

Bilanzierung ausgewählter raumphysiologischer Auswirkungen von Gebäuden auf den Nutzer

Carole Binsfeld

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer
2. Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner

Die Dissertation wurde am 21.09.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 16.01.2023 angenommen.

*Um das Ganze verstehen zu können, muss man die Teile verstehen,
aber man kann die Teile nur verstehen, wenn man einen gewissen Begriff vom Ganzen hat.*

David Couzens Hoy

Danksagung

Diese Dissertation wurde im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen sowie am Lehrstuhl für Bauphysik an der Technischen Universität in München angefertigt.

Für die vielfach erfahrene Hilfe möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken. Diese Arbeit hätte ohne die Unterstützung der im Folgenden genannten Personen nicht realisiert werden können.

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer, ohne dessen Zutun meine Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin und somit diese Dissertation nicht zustande gekommen wäre. Zudem bedanke ich mich für die methodische und wissenschaftliche Unterstützung und ein stets offenes Ohr seinerseits.

Ebenso möchte ich mich, für die Bereitschaft als Gutachter zu fungieren, bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner vom Institut für Akustik und Bauphysik an der Universität Stuttgart bedanken.

Ein weiterer Dank gilt dem gesamten Team vom Lehrstuhl für Bauphysik, insbesondere Dr.-Ing. Roland Göttig für den fachlichen Austausch, Dr.-Ing. Alexander Peikos für die Motivation das Projekt der Dissertation anzugehen, Mai-Khanh Talke für die nicht nur fachbezogenen Gespräche sowie Sylvia Goletz und Silvia Nowak für unzählige Kaffeepausen und die Unterstützung in allen administrativen Punkten. Zudem möchte ich mich bei Veronika Heinloth bedanken, die mir durch ihre helfende Hand meine Arbeit am Lehrstuhl sehr erleichtert hat.

Besonderer Dank gebührt Benjamin, der diese Dissertation seit dem ersten Tag miterlebt hat und ohne dessen unermüdliche Unterstützung ich mehr als einmal mit dem Gedanken gespielt hätte, das Projekt der Dissertation abubrechen.

Vu ganzem Häerze soen ech mengen Elteren, menger Schwëster a menge Frënn Merci. Si all stounge mir déi lescht Jore mat Rot an Dot zur Säit a jidderee vun hinnen huet säin Deel zu dëser Dissertatioun bäigedroen.

Zusammenfassung

Es ist allgemein bekannt, dass Menschen zum Schutz vor äußeren Umwelteinflüssen Unterschlupf in Gebäuden suchen. So befinden sie sich den größten Teil ihres alltäglichen Lebens in geschlossenen Innenräumen. Die durch die Gebäudeelemente entstehende Trennung zwischen der natürlichen Außenwelt und der von Menschenhand erschaffenen Innenwelt führt jedoch zur Entstehung von Innenraumumgebungen, die sich ebenfalls auf den Menschen auswirken können. Diese Auswirkungen sind im Gegensatz zu den Auswirkungen, die den Menschen evolutionär bedingt dazu getrieben haben, sich Unterschlupf zu suchen, nicht lebensbedrohlich, können ihn aber dennoch in seinem Wohlbefinden und seiner Gesundheit beeinflussen. Im Kontext der Bauphysik lassen sich diese Auswirkungen insbesondere durch die physikalischen Vorgänge im Innenraum beschreiben und beziehen sich somit auf die thermische, die visuelle, die lufthygienische und die akustische Umgebung, die den Menschen umgibt. Die Gesamtheit dieser Einflüsse wird in der vorliegenden Arbeit als das erweiterte Raumklima beschrieben. Es gibt zahlreiche Studien, die die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflüssen des erweiterten Raumklimas und der menschlichen Wahrnehmung sowie dem daraus resultierenden Komfortempfinden untersucht haben. Basierend auf diesen Studien wurden mehrere Normen verfasst, welche die für den Menschen akzeptablen Wertebereiche einzelner Einflüsse definieren.

Da es das Ziel der meisten Normen ist, für den Durchschnittsmenschen neutrale Innenraumbedingungen unter Einhaltung von Mittelwerten zu schaffen, erscheint es nicht verwunderlich, dass trotz der Erfüllung sämtlicher normativen Vorgaben nicht alle Gebäudenutzer das erweiterte Raumklima als komfortabel empfinden. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Normen keine intraindividuellen Eigenschaften der Gebäudenutzer berücksichtigen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Auswirkungen, die die Einflüsse des erweiterten Raumklimas auf individuelle Menschen haben können, zu bewerten. Hierfür wurde die Hypothese formuliert, dass sich die raumphysiologischen Auswirkungen von bestehenden Gebäuden, welche aus der bauphysikalischen Umgebung resultieren und zu einer Abweichung vom neutralen Zustand des Körpers führen können, anhand einer Bilanzierungsmethode erfassen lassen, die entsprechend den Grundsätzen der Methode der Ökobilanzierung aufgebaut ist.

Dabei wird die Raumphysiologie definiert als der Versuch, die funktionellen Vorgänge im menschlichen Organismus, die für die Entstehung, die Entwicklung sowie für die Aufrechterhaltung des menschlichen Lebens verantwortlich sind und aus dem Aufenthalt in einem Raum resultieren, zu beschreiben.

Die Wahl der Nutzung der Grundsätze der Ökobilanzierung lässt sich anhand von drei Argumenten begründen:

1. ähnliche Komplexität,
2. Bewertung von Auswirkungen,
3. nicht als Summe formulierbare Auswirkungen.

Die Ähnlichkeit in der Komplexität ergibt sich daraus, dass in der Ökobilanzierung die Auswirkungen eines Produktes auf die Umwelt bewertet werden. Hierbei werden sämtliche Input- und Output-Ströme über den

Lebensweg des Produktes erfasst und zu einzelnen Umweltauswirkungen zusammengefasst. Die raumphysiologische Bilanzierung bewertet die Auswirkungen von Gebäuden auf den Menschen. Hierfür werden sämtliche Komponenten (Umgebung, Gebäude, Raum), die den Menschen umgeben, berücksichtigt und zu einzelnen raumphysiologischen Auswirkungen zusammengefasst. Hieraus ergibt sich ebenfalls das zweite Argument, dass das Ziel beider Bilanzierungsmethoden die Bewertung von Auswirkungen ist. Entsprechend dem dritten Argument werden diese Auswirkungen nicht als Summe formuliert, sondern jede Auswirkung wird hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Umwelt / auf den Menschen einzeln quantifiziert.

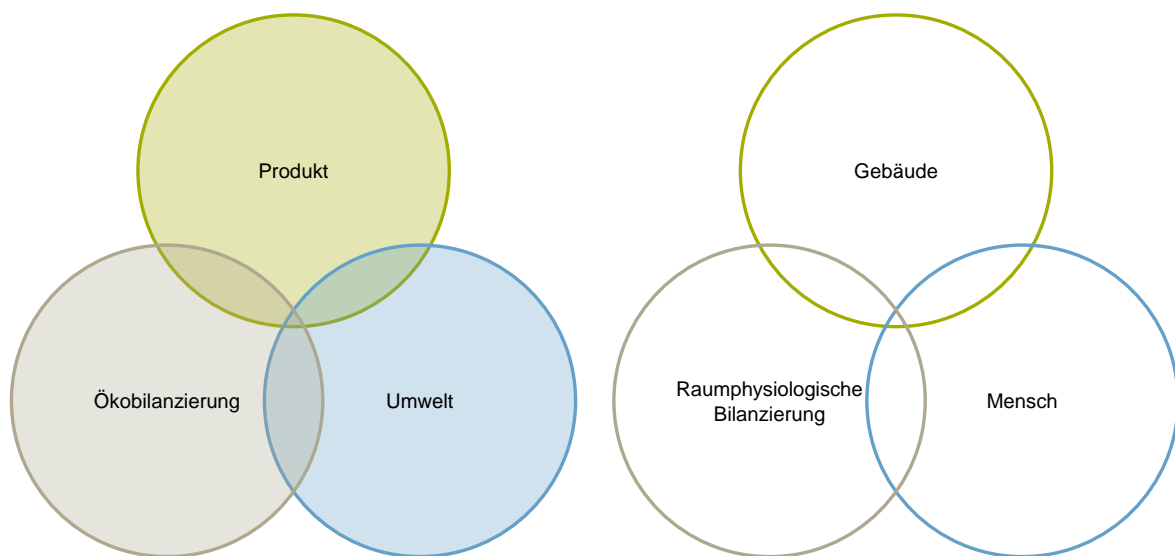


Abbildung Z1: Analogiebetrachtung zwischen der Ökobilanzierung und der raumphysiologischen Bilanzierung

Aus der Beschreibung der Bilanzierungsmethoden lässt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Bilanzierungsansätzen feststellen. Die Ökobilanzierung bezieht sich auf den gesamten oder einen definierten Bestandteil des Lebensweges des zu bilanzierenden Produktes. Die raumphysiologische Bilanzierung beschreibt dagegen eine Momentaufnahme. Diese kann beliebig oft wiederholt werden, verfolgt jedoch keinen Lebenszyklusansatz, sondern beschränkt sich auf konkrete Nutzungssituationen. Die Methode der Ökobilanzierung gliedert sich in vier Phasen. Die Definition des Ziels, die Definition des Untersuchungsrahmens, wobei diese Phasen häufig zu einer Phase zusammengefasst werden, die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung. Zudem findet am Ende jeder Phase eine Auswertung statt, die möglicherweise aufzeigt, dass Annahmen einer früheren Phase nachträglich angepasst werden müssen. Aus diesem Grund laufen die Phasen der Ökobilanzierung in einem iterativen Prozess ab. Diese Grundstruktur wird für die raumphysiologische Bilanzierung ohne zusätzliche Anpassungen übernommen. Jedoch werden die Bestandteile der einzelnen Phasen auf den Sachverhalt der raumphysiologischen Bilanz adaptiert. So definiert sich die raumphysiologische Bilanz als die Zusammenstellung und Beurteilung der Gestaltungs- und Umgebungsparameter, den daraus resultierenden raumphysiologisch relevanten Größen eines Gebäudesystems und der potentiellen Auswirkungen dieser auf den Menschen während der Gebäudenutzung. Die erste Phase, die Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens,

Zusammenfassung

wird weder in der Ökobilanzierung entsprechend den normativen Vorgaben noch in der raumphysiologischen Bilanz anhand einer konkreten Definition beschrieben, wohingegen die Phasen der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung wie folgt definiert werden.

Sachbilanz: Bestandteil der raumphysiologischen Bilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung der Gestaltungs- und Umgebungsparameter und den daraus resultierenden raumphysiologisch relevanten Einflüssen eines gegebenen Gebäudes während der Nutzung umfasst.

Wirkungsabschätzung: Bestandteil der raumphysiologischen Bilanz, der dem Erkennen und Beurteilen der Größe und Bedeutung von potentiellen Auswirkungen eines Gebäudes auf den Menschen während der Nutzung dient.

Die Herleitung der einzelnen Phasen erfolgt in der vorliegenden Dissertation in umgekehrter Reihenfolge, sodass mit der Wirkungsabschätzung begonnen wird, um anschließend die Sachbilanz und darauffolgend das Ziel und den Untersuchungsrahmen zu definieren, da vorerst die zu bilanzierenden Auswirkungen bekannt sein müssen. Ohne dieses Wissen kann nicht nachvollzogen werden, welche Bestandteile der Umgebung des Menschen in der Sachbilanz erfasst werden müssen oder welche Ausgangssituation im Ziel und im Untersuchungsrahmen beschrieben werden muss. Die vorliegende Zusammenfassung gliedert sich jedoch entsprechend dem Vorgehen der raumphysiologischen Bilanzierung, beginnend mit dem Ziel und Untersuchungsrahmen sowie der anschließenden Beschreibung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung.

Das Ziel einer raumphysiologischen Bilanz kann durch die Beantwortung der folgenden drei Fragen beschrieben werden:

- Warum wird diese Studie durchgeführt?
- Welche Frage(n) soll diese Studie beantworten?
- Für wen wird diese Studie durchgeführt?

Zur Beantwortung dieser Fragen muss zwischen zwei Anwendungsmöglichkeiten der raumphysiologischen Bilanzierung differenziert werden. So kann die raumphysiologische Bilanz entweder zu Vergleichs- oder zu Optimierungszwecken durchgeführt werden. Bei der Anwendung zum Vergleichszweck können die Auswirkungen von Räumen oder Gebäuden, die dem gleichen Nutzungszweck dienen, für eine einheitliche Person bewertet werden. Durch diese Anwendung kann eine Aussage darüber getroffen werden, welcher Raum zu weniger Abweichungen vom neutralen physiologischen Zustand der betrachteten Person führt. In diesem Anwendungsszenario wird die betrachtete Person als Standardperson definiert. Im Gegensatz zur Anwendung der normativen Vorgaben handelt es sich jedoch nicht um eine durchschnittliche Person, sondern es werden gezielt Standardpersonen für spezifische Raumnutzung anhand von Alter, Geschlecht und weiteren physiologischen Kenngrößen definiert.

Wird die raumphysiologische Bilanz zum Zweck der Optimierung durchgeführt, werden lediglich ein konkreter Raum und die sich darin befindlichen Personen betrachtet. Für jede dieser Personen können die individuellen raumphysiologischen Auswirkungen beurteilt und somit mögliche Optimierungspotentiale, die zur Vermeidung von negativen Auswirkungen führen, festgestellt werden. Welche Fragen die raumphysiologische Bilanzierung beantworten soll, muss der Studienersteller ebenfalls definieren. Die Beantwortung dieser Frage kann sich auf das Anwendungsszenario beziehen, kann aber beispielsweise auch festlegen, welche Wirkungskategorien erfasst werden müssen. Die Beantwortung der Frage, für wen die Studie durchgeführt wird, bezieht sich auf den Auftraggeber. Hier können potentiell wissenschaftliche oder politische Akteure, private Unternehmen oder einzelne Personen genannt werden. Für die Durchführung der raumphysiologischen Bilanzierung sind insbesondere die ersten zwei Fragen von Bedeutung. Die Dritte wird lediglich aus Gründen der Vollständigkeit mitaufgenommen, da diese ebenfalls bei der Zieldefinition der Ökobilanzierung beantwortet werden muss.

Die Definition des Untersuchungsrahmens erfolgt anhand der Festlegung von vierzehn Aspekten; elf hiervon sind der Ökobilanzierung entnommen:

- Anschrift des Gebäudes
- Nutzungszweck des Gebäudes
- Funktionelle Einheit
- Referenzraum
- Systemgrenzen
- Auswahl der Wirkungskategorien
- Anzuwendende Auswertung
- Anforderungen an die Daten
- Vereinfachende Annahmen
- Vorliegende Einschränkungen
- Aufbau des Berichts

Drei weitere Aspekte wurden hinzugefügt, da diese für die Durchführung der raumphysiologischen Bilanz von entscheidender Bedeutung sind. Diese beziehen sich auf den Referenzraum, die zu betrachtende Person sowie den Anwendungszeitraum.

Die Anschrift des Gebäudes wird lediglich aus Formalitätsgründen erfasst und kann einem späteren Bericht beigelegt werden. Der beschriebene Nutzungszweck des Gebäudes, wird einzeln hervorgehoben, ist jedoch ebenfalls Bestandteil der funktionellen Einheit. Die funktionelle Einheit beschreibt den quantifizierten Nutzen eines Gebäudes für die Verwendung als Vergleichseinheit. Dabei gilt es, die Gebäudenutzung, die Nutzungsfläche sowie die Anzahl der Nutzer, das Baujahr und die letzte Sanierung, den Standort sowie möglicherweise vorhandene Zertifizierungen oder Auszeichnungen zu beschreiben. Da die raumphysiologische Bilanz jedoch nicht für die funktionelle Einheit durchgeführt wird, sondern sich stets auf einen oder mehrere definierte Referenzräume in dieser funktionellen Einheit bezieht, muss als nächstes der Referenzraum beschrieben werden. Dieser wird definiert als das Maß von Outputs von Räumen eines vorhandenen Gebäudesystems, die zur Erfüllung der Funktion, ausgedrückt durch die

funktionelle Einheit, beitragen. Zur Beschreibung des Referenzraums müssen sowohl die Raumnutzung, die Nutzungsfläche und die Anzahl der Nutzer, die Nutzungsdauer und die Nutzungshäufigkeit sowie der Standort im Gebäude und die Orientierung beschrieben werden. An dieser Stelle werden die in der Ökobilanzierung definierten Aspekte um einen weiteren Aspekt ergänzt. So muss festgelegt werden, ob lediglich ein Referenzraum oder mehrere Referenzräume betrachtet werden. Werden mehrere Referenzräume in dem gleichen Gebäude betrachtet, muss jeder dieser Räume einzeln beschrieben und in einer einzelnen Sachbilanz und Wirkungsabschätzung erfasst werden. Für sämtliche Räume gilt jedoch das gleiche Ziel und der gleiche Untersuchungsrahmen. Ist dies nicht der Fall, muss für jeden Referenzraum eine eigene raumphysiologische Bilanz durchgeführt werden.

Bei den Systemgrenzen handelt es sich um einen Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Umgebungs- und Raumkomponenten Teil des Gebäude-/Raumsystems sind. Diese definieren, welche Komponenten in der Sachbilanz erfasst werden müssen und in welchem Umfang die Umgebung um das Gebäude und der konkrete Referenzraum erfasst werden muss. Dabei kann für die Systemgrenzen auf der horizontalen, der vertikalen und der zeitlichen Skala zwischen dem Mikro-, dem Meso- und dem Makroklima gewählt werden.

Es folgt die Auswahl der Wirkungskategorien. Hier kann zwischen den vier Wirkungskategorien thermische, lufthygienische, visuelle und akustische Umgebung differenziert werden. Die im Anschluss an die Wirkungsabschätzung anzuwendende Auswertung ergibt sich aus dem gewählten Ziel sowie dem Anwendungszeitraum.

Die Beschreibung der Anforderungen an die Daten bezieht sich auf die Datenqualität. So kann die Aussagekraft der Ergebnisse gesteigert werden, wenn hohe Anforderungen an die Datenqualität gestellt werden. Zusätzlich müssen vereinfachende Annahmen sowie möglicherweise bereits bekannte Einschränkungen erfasst werden. Diese drei Punkte, die sich sowohl auf die Datenerfassung in der Sachbilanz als auch auf die Durchführung der Wirkungsabschätzung beziehen, unterliegen im Besonderen dem iterativen Charakter der raumphysiologischen Bilanzierung, sodass beispielsweise die geforderte Datenqualität aufgrund der Einschränkung der Verfügbarkeit von einzelnen Daten nicht eingehalten werden kann und nachträglich angepasst werden muss.

Bei der Festlegung des Aufbaus des Berichts handelt es sich ebenfalls um eine Formalität, die lediglich festlegt, welche Phasen Bestandteil des Berichts sind und in welchem Detaillierungsgrad diese beschrieben werden müssen.

Neben der bereits genannten Ergänzung in Bezug auf die Beschreibung weiterer Referenzräume, müssen im Untersuchungsrahmen zusätzlich die zu berücksichtigende Person und der Anwendungszeitraum beschrieben werden. Bei der Festlegung der Person geht es nicht darum, diese anhand ihrer physiologischen Kenngrößen zu beschreiben, sondern lediglich um die Auswahl, ob eine der Raumnutzung entsprechende Standardperson oder der tatsächliche Raumnutzer berücksichtigt wird. Der letzte Aspekt, der Anwendungszeitraum, muss ebenfalls vom Studienersteller in Abhängigkeit von der Definition des Ziels gewählt werden. So kann an dieser Stelle angegeben werden, über welche Zeitspanne und mit welcher Häufigkeit sowohl die Sachbilanz als auch die Wirkungsabschätzung durchgeführt werden muss. Anzumerken ist, dass dies lediglich die veränderbaren Aspekte der Sachbilanz betrifft und somit die

Wirkungsabschätzung lediglich erneut durchgeführt werden muss, wenn sich eine der Eingangsgrößen verändert hat.

Im Untersuchungsrahmen der Ökobilanzierung werden zusätzlich zu den beschriebenen Aspekten die Allokationsverfahren, die Methode der Wirkungsabschätzung und die Art der kritischen Prüfung definiert. Diese haben jedoch für die Anwendung der raumphysiologischen Bilanz keine Relevanz, da weder Allokationsverfahren angewandt werden noch eine kritische Prüfung durchgeführt wird. Eine Wahl der Methode der Wirkungsabschätzung steht ebenfalls nicht zur Verfügung, da zum jetzigen Stand lediglich die Methode, so wie sie in der vorliegenden Dissertation beschrieben wird, existiert.

Zum Verständnis der Sachbilanz muss der Begriff Elementarstrom/-fluss definiert werden. Nach der Definition dieses Begriffs in der Ökobilanzierung handelt es sich hierbei um einen materiellen oder nicht-materiellen Gegenstand, der quantifizierbar sein muss und die Grenze zwischen der Technosphäre und der Ökosphäre durchquert. Da die Schutzgüter in der raumphysiologischen Bilanz abweichend von der Ökobilanzierung nicht in der Ökosphäre liegen, sondern durch die Sphäre des Menschen beschrieben werden, wird eine dritte menschliche Sphäre eingeführt. Es werden jedoch nur die in die Sphäre des Menschen eintretenden Elementarströme und nicht die daraus austretenden berücksichtigt. Die daraus austretenden würden sich letztendlich auf menschliche Handlungen beziehen, die in der raumphysiologischen Bilanz keine Berücksichtigung finden.

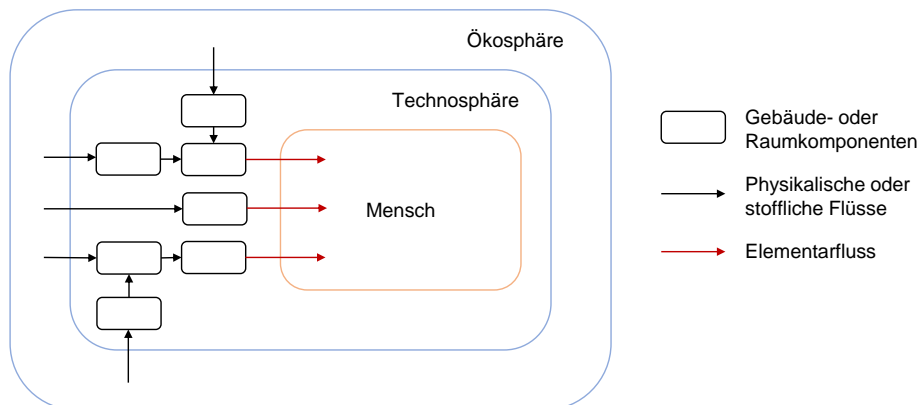


Abbildung Z2: Darstellung der Ökosphäre, der Technosphäre und des Menschen in der raumphysiologischen Bilanzierung

Entsprechend der obigen Darstellung werden in der raumphysiologischen Bilanz die Ökosphäre, die darin befindliche Technosphäre und der Mensch, der sich innerhalb der Technosphäre befindet, zur Erstellung der Sachbilanz berücksichtigt. Während die Ökosphäre die äußere Umgebung des Gebäudes beschreibt, bezieht sich die Technosphäre auf das Gebäude selber. Deswegen kann die Technosphäre durch einzelne Gebäude- und Raumkomponenten beschrieben werden. Durch das Einwirken der Ökosphäre sowie das Vorhandensein der Gebäude- und Raumkomponenten ergeben sich bestimmte Elementarflüsse. Diese können sowohl physikalischer als auch stofflicher Natur sein und sind als bauphysikalische Größen zu verstehen, welche die erweiterte raumklimatische Umgebung des Menschen gestalten und sich somit auf diesen auswirken können.

Das Ziel der Sachbilanz ist die Zusammenstellung der Einflüsse der Ökosphäre sowie aller Komponenten der Technosphäre und die Quantifizierung der daraus resultierenden Elementarströme. Somit setzt sich die Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz aus den folgenden vier Schritten zusammen:

1. Identifizierung von Parametern für das Sachbilanzmodell
2. Planung der Datenerhebung und Datenerfassung
3. Messung der Elementarströme und Konstruktion des Sachbilanzmodells
4. Berichterstattung

Aus der Herleitung der Wirkungsabschätzung werden neun Elementarströme identifiziert, die im Rahmen der Sachbilanz mit ihren jeweiligen Auslösern erfasst werden müssen. Hierbei handelt es sich um die Lufttemperatur, die Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit, die relative Luftfeuchte, den Luftdruck, die CO₂-Konzentration, das Emissionsspektrum der Lichtquelle, den Schalldruckpegel und die Frequenz des Schalls. Diese Elementarströme müssen im gegebenen Referenzraum gemessen werden. Der Sinn der Sachbilanz liegt darin, entsprechend einer Ursache-Wirkungs-Kette abzubilden, welche Komponenten des Referenzraums sowie der Umgebung einen Einfluss auf diese Elementarströme haben können. Zusätzlich zu diesem Teil der Sachbilanz, der die Abbildung der Ursache-Wirkungs-Kette und die gemessenen Elementarströme als Ergebnis hat, müssen weitere Parameter erfasst werden. Diese beschreiben insbesondere die Person, auf die sich die Elementarströme auswirken, sowie ergänzende Parameter, die sich nicht direkt zur Ursache-Wirkungs-Kette der Elementarströme zuordnen lassen und dennoch für das Ergebnis der Sachbilanz relevant sind.

Sämtliche Parameter, die in der Sachbilanz erfasst werden, lassen sich entweder dem sogenannten Hintergrund- oder Vordergrundsystem zuordnen. Diese Unterscheidung sowie die weitere Untergliederung des Vordergrundsystems dienen lediglich der strukturierten Identifizierung der relevanten Parameter. Somit wird zwischen den in der folgenden Grafik dargestellten Parametern differenziert.

Parameter der Umgebung	Beschreiben die äußere und innere Umgebung in einer übergeordneten Umgebung Hintergrundsystem
Gebäude Parameter	Beschreiben das Gebäude in einer Umgebung Vordergrundsystem – Level 0
Raum Parameter	Beschreiben den Raum in einem Gebäude Vordergrundsystem – Level 1
Individuelle Parameter	Beschreiben den Menschen in einem Raum Vordergrundsystem – Level 2
Ergänzende Parameter	Beschreiben Ergänzungen zu den übrigen Parametern Vordergrundsystem – Level 3

Abbildung Z3: Kategorisierung der relevanten Parameter für die Sachbilanz

Das Hintergrundsystem beinhaltet sämtliche Komponenten, die sich außerhalb des Referenzraums sowohl im Außenraum als auch im Innenraum (z. B. angrenzender Raum) erfassen lassen. Hierbei handelt es sich bei der Annahme von mikroklimatischen Systemgrenzen um die Luftbewegung, die CO₂-Konzentration, die relative Luftfeuchte, den Luftdruck, die Temperatur, die Sonnenstrahlung, den künstlichen Lichteinfall und den vorhandenen Schall. Diese Parameter können entweder messtechnisch oder im Falle des künstlichen und natürlichen Lichteinfalls sowie des vorhandenen Schalls beschreibend erfasst werden (bspw. mäßiger Verkehr auf zweispuriger Straße). In Abhängigkeit davon, ob die einzelnen Parameter vor Ort gemessen werden oder lediglich beschreibend erfasst werden, verändert sich jedoch die Datenqualität.

Anschließend werden die Level-0-Parameter des Vordergrundsystems erfasst; hierbei handelt es sich um die unveränderbaren Flächen des Referenzraums sowie die Materialeigenschaften der Ausstattungselemente, die in ihrem Zustand veränderbar sind, die jedoch innerhalb dieser Flächen verbaut sind und somit den Durchgang von Wärme, Licht, Luft und Schall durch diese Flächen beeinflussen können. So zählen beispielsweise die Materialeigenschaften eines Fensters zu den Level-0-Parametern, während die Zustandsänderung dieses Fensters erst bei den Level-1-Parametern, entsprechend den veränderlichen Raumkomponenten, erfasst wird. Bei den Level-0-Parametern müssen somit die vertikalen und horizontalen Abgrenzungen des Referenzraums mit ihren jeweiligen Eigenschaften sowie möglicherweise vorhandene Ausstattungen berücksichtigt werden. Im Wesentlichen wird hierbei zwischen den transparenten und den opaken Bauteilen unterschieden. Unabhängig von der Lichtdurchlässigkeit werden für sämtliche Flächen die Kubatur, der U-Wert, das Schalldämm-Maß und der Schallabsorptionsgrad erfasst. Für transparente Flächen wird zusätzlich der Gesamtenergiedurchlassgrad sowie der Lichttransmissionsgrad, für opake Flächen dagegen die Wärmespeicherfähigkeit, der Dampfdiffusionswiderstand sowie der Lichtreflexionsgrad der inneren Oberfläche erfasst. Zusätzlich wird in diesem Abschnitt der Sachbilanz der Referenzraum anhand seines Volumens, der Luftwechselzahl aufgrund von Undichtheit sowie die Nachhallzeit beschrieben.

Bei den Level-1-Parametern müssen sämtliche in ihrem Zustand veränderlichen Komponenten des Referenzraums erfasst werden. Diese werden definiert als Ausstattungselemente, die sich zusätzlich dahingehend unterscheiden, ob für ihre Zustandsveränderungen ein Energieumsatz benötigt wird oder nicht; dies im Hinblick auf mögliche Optimierungsmaßnahmen zur Energieeinsparung. Zudem werden zu den Ausstattungselementen lediglich die Elemente gezählt, deren Funktion es ist, die Elementarströme im Referenzraum zu regulieren. Somit werden beispielsweise ein Computer oder ein Schreibtisch bei der Erstellung der Sachbilanz nicht berücksichtigt. Zu den zu erfassenden Ausstattungselementen mit Energieumsatz zählen die Lüftung, die Heizung, die Kühlung, die Feuchteregulierung sowie Lampen und Leuchten. Zu denen ohne Energieumsatz zählen der Sonnen- und Blendschutz sowie Fenster und Türen. Anzumerken ist, dass die Veränderung der Position des Sonnen- oder Blendschutzes durchaus elektrisch betrieben werden kann; jedoch wird für die Erfüllung der Funktion dieser Systeme kein dauerhafter Energieumsatz benötigt. Zudem wird die natürliche Lüftung bei der Beschreibung des Fensters berücksichtigt, weswegen die Lüftung hier lediglich bei den Komponenten mit Energieumsatz aufgelistet ist da es sich um die mechanische Lüftung handelt. Alle diese Ausstattungselemente werden in der Sachbilanz mit der Art des Systems, der Position im Raum, der Dimension, ihrem aktuellen Zustand,

möglichen Schäden am System sowie der Zugänglichkeit der Regulierungseinheit beschrieben. Außerdem wird bei den Elementen mit Energieumsatz die Art und Anzahl der Leistungsstufen und bei den Elementen ohne Energieumsatz die Art und Anzahl der einstellbaren Zustände erfasst.

Basierend auf den gemessenen Elementarströmen sowie dem erfassten Hintergrundsystem, Level-0- und Level-1-Parametern kann der erste Teil des Sachbilanzergebnisses dargestellt werden, indem die Zusammenhänge zwischen diesen einzelnen Komponenten abgebildet werden. Hierbei handelt es sich um das Sachbilanzmodell. Dieses dient bei der Auswertung der Wirkungsabschätzung als Grundlage mögliche Optimierungspotentiale oder Unterschiede zwischen den Vergleichsräumen hervorzuheben.

Die Level-2-Parameter der Sachbilanz beziehen sich auf die zu betrachtende Person. In Abhängigkeit vom Anwendungsszenario sowie den Vorgaben des Untersuchungsrahmens kann hierfür entweder der tatsächliche Raumnutzer oder eine der Nutzung des Raums angepasste Standardperson ausgewählt werden. Unabhängig davon, für welche Person die Wirkungsabschätzung durchgeführt werden soll, muss für jede Person das Alter, das Geschlecht, das Gewicht, die Größe, der Hörzustand, die Aktivität, die Bekleidung und das visuelle Feld erfasst werden. Bei den letzten drei handelt es sich um die veränderbaren Größen, die bei mehrfacher Durchführung der Wirkungsabschätzung in der Sachbilanz erneut festgehalten werden müssen.

Die Level-3-Parameter beschreiben übergeordnete Einflüsse, die einen Einfluss auf die übrigen Parameter haben können. Dies kann beispielsweise in Bezug auf Level 2 eine Bekleidungsvorschrift sein, sodass die Personen im Referenzraum ihre Bekleidung nicht frei wählen und den thermischen Bedingungen anpassen können. In Bezug auf die Level-1-Parameter kann bei den Level-3-Parametern eine zentrale Heizungs- und Lüftungsregelung beschrieben werden.

Sämtliche Parameter, welche entsprechend dem Untersuchungsrahmen in der raumphysiologischen Bilanz aufgenommen werden, müssen abschließend im Bericht festgehalten werden. Hier muss neben dem Sachbilanzmodell ebenfalls die Datenqualität sämtlicher Daten berücksichtigt werden.

Im Anschluss folgt die Wirkungsabschätzung, die zur Quantifizierung der raumphysiologischen Auswirkungen dient. Hierfür wird die Wirkung der Elementarströme auf die Sinnesrezeptoren des Menschen betrachtet. Daraus ergeben sich die vier Wirkungskategorien der thermischen Umgebung, der lufthygienischen Umgebung, der visuellen Umgebung sowie der akustischen Umgebung entsprechend den Thermorezeptoren, den Chemorezeptoren, den Photorezeptoren und den Mechanorezeptoren. Für jede dieser Wirkungskategorien gibt es vier Wirkungszonen, die die Schwere der möglichen raumphysiologischen Auswirkungen entsprechend der folgenden Abbildung beschreiben.

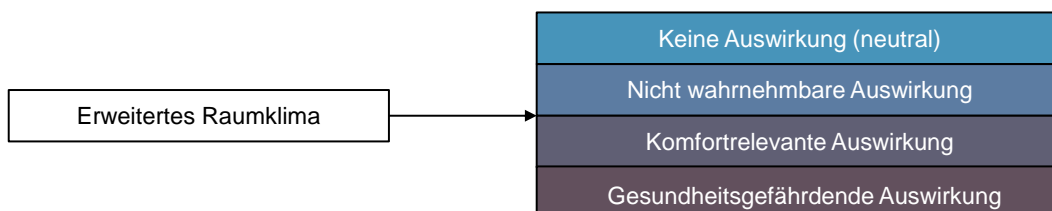


Abbildung Z4: Definition der Wirkungszonen der raumphysiologischen Bilanz

In der Wirkungsabschätzung wird für jede Wirkungskategorie ein quantitativer Indikator bestimmt, der die Zuordnung zu einer der vier Wirkungszonen ermöglicht. Um diesen Wirkungsindikator zu bestimmen wird jede Wirkungskategorie mit einem Wirkungsmechanismus beschrieben. Dabei handelt es sich um ein System physikalischer und physiologischer Prozesse für die vorgegebene Wirkungskategorie, welches die Sachbilanzergebnisse mit den Wirkungsindikatoren und den Wirkungszonen verbindet. Dieser Wirkungsmechanismus bezieht sich ausschließlich auf die physiologischen Reaktionen des Körpers auf seine Umgebung. Weitere Anpassungen durch bewusste Veränderungen (z. B. Bekleidungsstück ablegen) oder durch technische Anpassungen (z. B. Heizung aufdrehen) werden im Wirkungsmechanismus nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund handelt es sich bei den Wirkungsmechanismen um stationäre Berechnungen. Diese können jedoch entsprechend den Vorgaben des Untersuchungsrahmens, in Abhängigkeit der Anforderungen an die Häufigkeit der Durchführung der Wirkungsabschätzung, als quasi-stationär interpretiert werden.

Als Wirkungsindikator für die Wirkungskategorie der thermischen Umgebung wurde die mittlere Körpertemperatur ausgewählt. Diese setzt sich aus dem gewichteten Mittelwert der Körperkern- und der Hauttemperatur zusammen und repräsentiert somit den Einfluss der zentralen und der peripheren Temperatursensoren. Die lufthygienische Wirkungskategorie bezieht sich ausschließlich auf die Bewertung der Auswirkung der CO₂-Konzentration im Innenraum. Der Wirkungsindikator hierfür ist der arterielle CO₂-Partialdruck. Die visuelle Wirkungskategorie muss aufgrund der im menschlichen Auge vorhandenen Photorezeptoren weiter aufgegliedert werden in die visuelle und die biologische Wirkung. Die visuelle Wirkung wird anhand des Wirkungsindikators der retinalen Beleuchtungsstärke bewertet, während die biologische Wirkung durch den Circadianen Stimulus beschrieben wird. Und letztlich wird die akustische Umgebung anhand des Wirkungsindikators der Lautheit, ausgedrückt durch die kategoriale Einheit, beschrieben. Bei allen Wirkungsindikatoren, bis auf den zur Beschreibung der Auswirkung der akustischen Umgebung, handelt es sich um physiologische Größen, anhand derer sich der Zustand des menschlichen Körpers und mögliche Abweichungen vom neutralen Zustand beschreiben lassen. Aufgrund der hohen Dynamik der akustischen Wahrnehmung wird die Wirkung durch die Lautheit, welche die Bewegungen der Basilarmembranen beider Ohren repräsentiert, abgebildet. Die Wirkungsmechanismen der einzelnen Wirkungsindikatoren ermöglichen die Bestimmung dieser Wirkungsindikatoren in einer gegebenen Situation unter Berücksichtigung der vorliegenden Elementarströme sowie der individuellen Personendaten.

Die Auswertung der raumphysiologischen Bilanz ist wiederum abhängig vom Anwendungsszenario. Wird die Bilanzierung zum Zweck der Optimierung eines Referenzraums durchgeführt, muss die Wirkungsabschätzung gemeinsam mit dem Bericht der Sachbilanz sowie dem Sachbilanzmodell betrachtet werden. Wurden raumphysiologische Auswirkungen, die zu einer Abweichung vom neutralen Zustand des Menschen führen, identifiziert, können anhand der Sachbilanzergebnisse die Auslöser hierfür identifiziert werden. Durch die Anpassung dieser Elemente können insbesondere komfortrelevante oder gesundheitsgefährdende Auswirkungen vermieden werden. Dient die raumphysiologische Bilanz dem Vergleich von mehreren Referenzräumen, können die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung miteinander abgeglichen werden, um somit den Raum mit den geringsten Auswirkungen zu identifizieren. Durch die Gegenüberstellung der Sachbilanzen der einzelnen Räume können ebenfalls die Gründe für die

geringeren Auswirkungen eines Raums gegenüber einem anderen festgestellt werden. Somit wurden sämtliche Phasen der raumphysiologischen Bilanz definiert und hergeleitet.

Die hergeleitete Methode erweitert den Stand des Wissens bezüglich der drei Aspekte: der berücksichtigten Auswirkungen, der in den Ursache-Wirkungs-Ketten beschriebenen Eingangsparameter und der individuellen Personenparameter. Während die, im Stand des Wissens beschriebenen, Auswirkungen sich stets auf schwer quantifizierbare und subjektive Begriffe (z. B. Komfort, Zufriedenheit, Akzeptanz, Produktivität) beziehen, beschreibt die raumphysiologische Bilanz den zu erwartenden Zustand des Körpers, welcher quantifizierbaren Auswirkungen zugeordnet werden kann. Als Eingangsparameter werden im Stand des Wissens entweder physikalische Größen oder bauliche Eigenschaften berücksichtigt. Die raumphysiologische Bilanz integriert dagegen beide Arten an Eingangsgrößen. Zudem werden im Stand des Wissens, Personen lediglich anhand von genormten Standardwerten, welche für durchschnittliche Personen anzusetzen sind, beschrieben. Die raumphysiologische Bilanz geht insbesondere bei der Beschreibung der physiologischen Parameter über den Stand des Wissens hinaus und verfolgt den Ansatz, jede Person entsprechend ihrer individuellen Parameter zu berücksichtigen.

Trotz dieser Erweiterung des Stands des Wissens kann die raumphysiologische Bilanz derzeit nicht ohne Einschränkungen genutzt werden. Die Einschränkungen resultieren insbesondere aus der geringen Datengrundlage, die für die Herleitung der Wirkungsmechanismen zur Verfügung steht. Zudem werden psychologische Einflüsse nur über eine Gewichtung der Wirkungskategorien, jedoch nicht darüber hinaus, berücksichtigt.

Dennoch wurde in dieser Dissertation eine praktisch anwendbare Methode hergeleitet, die den Grundsätzen der Ökobilanzierung entspricht und die es erlaubt, die wesentlichen Einflüsse des erweiterten Raumklimas anhand von physiologischen Indikatoren für individuelle Personen zu bewerten. Außerdem werden sämtliche Einflüsse, die möglicherweise eine Auswirkung auf den Menschen im Innenraum haben können, erfasst und über umfassende Ursache-Wirkungs-Ketten im Sachbilanzmodell abgebildet. Die jetzige raumphysiologische Bilanzierung bezieht sich ausschließlich auf die vier beschriebenen Wirkungskategorien sowie die fünf Wirkungsindikatoren. Die Methode kann jedoch nach dem gleichen Vorgehen beliebig um zusätzliche Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren erweitert werden.

Zu den praktischen Anwendungen können beispielsweise die Bilanzierung von Büro- und Verwaltungsräumen, Klassenzimmern oder auch Wohnbereiche in Alten- und Pflegeheimen zählen. Insbesondere in solchen Räumen haben die Nutzer häufig selber keinen Einfluss auf das erweiterte Raumklima, weswegen die raumphysiologische Bilanzierung zur Identifizierung und Vermeidung von möglichen negativen Auswirkungen angewandt werden kann.

Abstract

People seek shelter in buildings for protection from external environmental influences. Thus, they spend most of their daily lives in enclosed indoor spaces. However, the separation created by building elements between the natural outside world and the man-made inside world leads to the creation of indoor environments that can also impact people. These effects, unlike the effects that evolutionarily drove humans to seek shelter, are not life-threatening, but can still affect their well-being and health. In the context of building physics, these effects can be described in particular in terms of the physical processes that take place indoors and thus relate to the thermal, visual, air-hygienic and acoustic environments that surround people. The totality of these influences is described in this dissertation as the indoor environment. There are numerous studies that have investigated the relationships between the individual influences of the indoor environment and human perception as well as the resulting sense of comfort. Based on these studies, a number of standards have been written that define the ranges of values of particular influences that are acceptable to humans.

Since the goal of most standards is to create indoor conditions that are neutral for the average person while maintaining mean values, it does not seem surprising that, despite meeting all normative requirements, not all building occupants find the indoor environment to be comfortable. This is mainly due to the fact that the standards do not take into account the interindividual characteristics of building users. The aim of the present work is to evaluate the effects that the influences of the indoor environment can have on individual people. For this purpose, the hypothesis was formulated that the indoor-physiological effects of existing buildings, which result from the building physical environment and can lead to a deviation from the neutral state of the body, can be recorded using a methodology of balancing, which is structured according to the principles of the method of life cycle assessment.

In this context, indoor-physiology is defined as the attempt to describe the functional processes in the human organism responsible for the formation, development, as well as for the maintenance of human life, resulting from the occupancy of a room.

The choice of using the principles of LCA can be justified on the basis of three arguments:

1. Similar complexity,
2. evaluation of impacts,
3. impacts that cannot be formulated as a sum.

The similarity in complexity results from the fact that in life cycle assessment, the effects of a product on the environment are to be evaluated. All input and output flows over the life cycle of the product are recorded and summarized into individual environmental impacts. Indoor-physiological balancing evaluates the effects of buildings on people. For this purpose, all components (environment, building, room) surrounding the human being are taken into account and summarized into individual indoor-physiological effects. This also results in the second argument that the aim of both balancing methods is the evaluation of impacts. According to the third argument, these impacts are not formulated as a sum, but each impact is quantified individually regarding its effect on the environment / on humans.

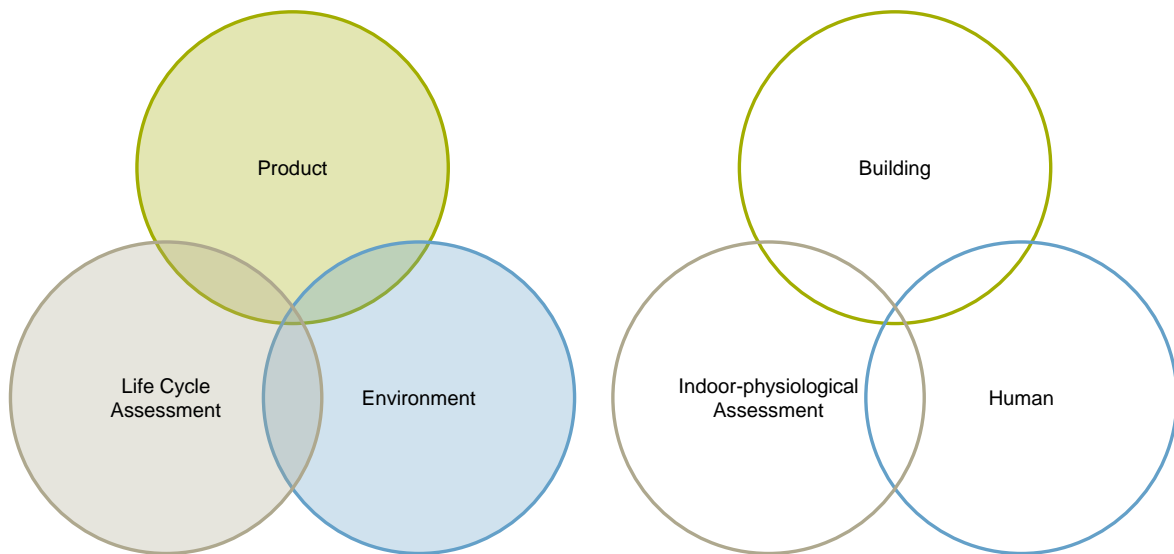


Figure A1: Analogy between life cycle assessment and indoor-physiological assessment

From the description of the methods of balancing, a significant difference between the two balancing approaches can be identified. Life cycle assessment refers to the entire or a defined part of the life cycle of the product to be balanced. Indoor-physiological assessment, on the other hand, describes a snapshot. This can be repeated as often as desired, but does not follow a life cycle approach, instead being limited to specific usage situations.

The life cycle assessment method is divided into four phases. The definition of the goal, the definition of the scope of the study (whereby these phases are often combined into one phase) the life cycle inventory and the impact assessment. In addition, an evaluation takes place at the end of each phase, which may reveal that assumptions made in an earlier phase need to be subsequently adjusted. For this reason, the phases of LCA proceed in an iterative process. This basic structure is adopted for the indoor-physiological assessment without additional adjustments. However, the components of the individual phases are adapted to the context of the indoor-physiological assessment. Thus, the indoor-physiological assessment is defined as the compilation and evaluation of the design and environmental parameters and the resulting indoor-physiologically relevant variables of a building system and the potential effects of these on people during building use. The first phase, the definition of the goal and scope, is neither described in the LCA according to the normative requirements nor in the indoor-physiological assessment on the basis of a concrete definition, whereas the phases of the inventory and the impact assessment are described as follows.

Inventory:

Component of the indoor-physiological assessment that includes the compilation and quantification of the design and environmental parameters and the resulting indoor-physiologically relevant influences of a given building during its use.

Impact Assessment: Component of the indoor-physiological assessment that is used to identify and assess the magnitude and significance of potential impacts of a building on people during its use.

The derivation of the different phases is done in reverse order in this dissertation, so that the impact assessment is the first step, followed by the definition of the inventory and the goal and scope definition since the to be assessed impacts have to be determined first. Without this knowledge, it is not possible to understand which components of the human environment must be included in the inventory or which initial situation must be described in the goal and investigation framework. However, this summary is structured according to the procedure of indoor-physiological assessment, starting with the goal and scope definition and the subsequent description of the inventory and the impact assessment.

The objective of an indoor-physiological assessment can be described by answering the following three questions:

- Why is this study being conducted?
- What question(s) is this study designed to answer?
- For whom is this study being conducted?

To answer these questions, it is necessary to differentiate between the two possible applications of the indoor-physiological assessment. Thus, the indoor-physiological assessment can be carried out either for comparison purposes or for optimization purposes. In the application for comparison purposes, the effects of rooms or buildings that serve the same purpose of use on a uniform person can be evaluated. Through this application, a conclusion can be made as to which indoor space results in less deviation from the neutral physiological state of the person under consideration. In this application scenario, the person under consideration is defined as a standard person. However, in contrast to the application of the normative specifications, this is not an average person, but rather targeted standard persons are defined for specific room use based on age, gender and other physiological parameters.

If the indoor-physiological assessment is carried out for the purpose of optimization, only a specific room and the persons located in it are considered. For each of these persons, the individual indoor-physiological effects can be assessed and thus possible optimization potentials that lead to the avoidance of negative effects can be determined. The study designer must also define which questions the indoor-physiological assessment should answer. The answer to this question may relate to the application scenario, but may also specify, for example, which impact categories need to be covered. The answer to the question for whom the study is being conducted refers to the client. Here, potentially scientific or political actors, private companies or different individuals can be named. The first two questions are of particular importance for the implementation of the indoor-physiological assessment. The third question is only included for completeness, since this question must also be answered when defining the objectives of the LCA.

The definition of the scope of the study is based on the definition of fourteen aspects; eleven of them are taken from the LCA:

- Address of the building
- The building's purpose of use
- Functional unit
- Reference room
- System boundaries
- Selection of impact categories
- Evaluation to be applied
- Data requirements
- Simplifying assumptions
- Existing constraints
- Structure of the report

Three additional aspects have been added as they are critical for conducting the indoor-physiological assessment. These relate to the reference room, the person under consideration and the time frame of the assessment.

The address of the building is only recorded for formality reasons and can be attached to a later report. The described use of the building, is highlighted separately, but is also a component of the functional unit. The functional unit describes the quantified benefit of a building to be used as a comparator unit. It is important to describe the building use, usable floor area, as well as the number of occupants, year of construction and most recent renovation, location and any certifications or awards that may exist. However, since the indoor-physiological assessment is not carried out for the functional unit, but always refers to one or multiple defined reference rooms in this functional unit, the next step is to describe the reference room. This is defined as the measure of outputs from rooms in an existing building system that contribute to the performance of the function expressed by the functional unit. To describe the reference room, it is necessary to describe the use of the room, the usable surface area and number of users, the duration of use and frequency of use, as well as the location in the building and the orientation. At this point, another aspect is added to the aspects defined in the LCA. It must be determined whether only one reference room or several reference rooms are to be considered. If several reference rooms are considered in the same building, each of these rooms must be described separately and captured in an individual inventory and impact assessment. However, the same objective and the same scope of investigation apply to all rooms. If this is not the case, a separate indoor-physiological assessment must be carried out for each reference room.

The system boundaries are a set of criteria for defining which environmental and spatial components are part of the building system. These define which components must be included in the inventory and to what extent the environment around the building and the concrete reference room must be included. For the system boundaries on the horizontal, vertical and temporal scales, a choice can be made between the microclimate, the mesoclimate and the macroclimate.

This is followed by the selection of the impact categories. It is possible to differentiate between the four impact categories thermal, air-hygienic, visual and acoustic environment. The evaluation to be applied following the impact assessment results from the selected target as well as the application period.

The description of the requirements for the data refers to the data quality. Thus, the informative value of the results can be increased if high requirements are placed on the data quality. In addition, simplifying assumptions as well as possibly already known limitations must be covered. These three points, which relate to data collection in the inventory as well as to the performance of the impact assessment, are subject in particular to the iterative character of indoor-physiological assessment, so that, for example, the required data quality cannot be met due to limitations in the availability of different data and must be adjusted subsequently.

The definition of the structure of the report is also a formality, which merely specifies which phases are part of the report and to what level of detail they must be described.

In addition to the already described extension with regard to the description of further reference rooms, the person to be taken into account and the period of application must also be mentioned in the scope of the investigation. When specifying the person, it is not a matter of describing the person on the basis of his physiological parameters, but merely of selecting whether a standard person corresponding to the room use or the actual room user is to be taken into account. The last aspect, the application period, must also be chosen by the study designer depending on the definition of the objective. Thus, at this point it can be specified over which time period and with which frequency both the inventory and the impact assessment have to be carried out. It should be noted that this only applies to the variable aspects of the inventory, so that the impact assessment only has to be carried out again if one of the input variables has changed.

In addition to the described aspects, the scope definition of the LCA defines the allocation procedures, the method of impact assessment and the type of critical review. However, these have no relevance for the application of the indoor-physiological assessment, since neither allocation procedures are applied nor a critical review is performed. A choice of the method of impact assessment is also not possible, since at this stage there is only the method as described in this dissertation.

To understand the inventory, the term elementary flow/stream must be defined. According to the definition of this term in LCA, this is a material or non-material object that must be quantifiable and crosses the boundary between the technosphere and the ecosphere. Since the protected goods in the indoor-physiological assessment are not located in the ecosphere, in contrast to the LCA, but are described by the human sphere, a third sphere is introduced. However, only the elementary flows entering the human sphere and not those exiting it are considered. Those exiting it would ultimately relate to human actions, which are not considered in the indoor-physiological assessment.

In accordance with the illustration A2, the ecosphere, the technosphere located within it, and the human being located within the technosphere are taken into account in the indoor-physiological assessment to create the inventory. While the ecosphere describes the external environment of the building, the technosphere refers to the building itself. Therefore, the technosphere can be described by different building and room components. The influence of the ecosphere as well as the presence of the building and room components result in certain elementary flows. These can be of physical as well as material nature and are to be understood as building physical quantities, which can form the indoor environment of the human being and thus have an effect on him.

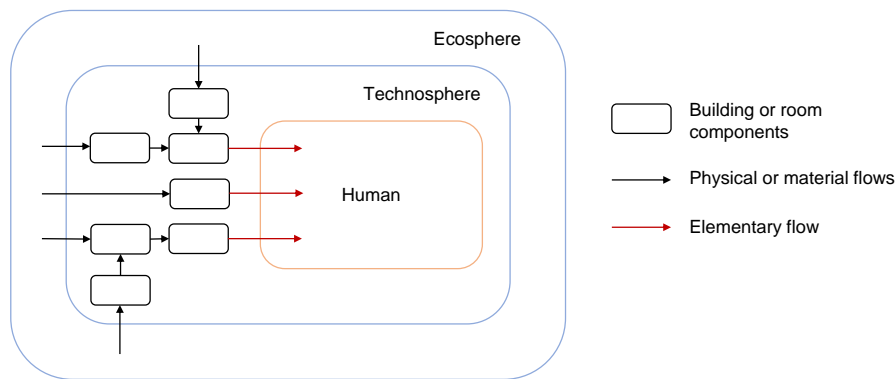


Figure A2: Representation of the ecosphere, the technosphere and the human being in the indoor-physiological assessment

The objective of the inventory is to compile the influences of the ecosphere as well as all components of the technosphere and to quantify the resulting elementary flows. Thus, the inventory in the indoor-physiological assessment is composed of the following four steps:

1. Identification of parameters for the inventory model.
2. Planning of data collection and data acquisition
3. Measurement of elementary flows and construction of the inventory model
4. Reporting

From the derivation of the impact assessment, nine elementary flows are identified that must be collected with their respective triggers as part of the inventory. These are the air temperature, the radiation temperature, the air velocity, the relative humidity, the air pressure, the CO₂-concentration, the emission spectrum of the light source, the sound pressure level and the frequency of the sound. These elementary flows must be measured in the given reference room. The purpose of the inventory is to show, according to a cause-effect chain, which components of the reference room as well as of the environment can have an influence on these elementary flows. In addition to this part of the inventory, which has the presentation of the cause-effect chain and the measured elementary flows as a result, further parameters must be collected. These describe in particular the person on whom the elementary flows have an impact, as well as supplementary parameters that cannot be directly assigned to the cause-effect chain of the elementary flows but are nevertheless relevant for the result of the inventory.

All parameters covered in the inventory can be assigned to either the so-called background or foreground system. This distinction, as well as the further subdivision of the foreground system, only serves to identify the relevant parameters in a structured way. Thus, a differentiation is made between the parameters shown in the following graphic.

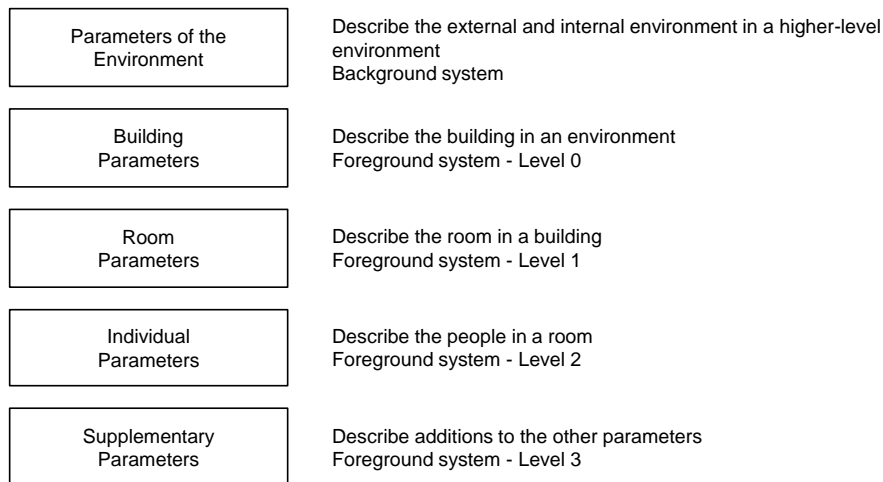


Figure A3: Categorization of the relevant parameters for the inventory

The background system includes all components that can be captured outside the reference room, both in the outdoor space and in the indoor space (e.g. adjacent room). Assuming microclimatic system boundaries, these are air movement, CO₂-concentration, relative humidity, air pressure, temperature, solar radiation, artificial light incidence and existing sound. These parameters can either be measured or, in the case of artificial and natural light incidence and existing sound, recorded descriptively (e.g. moderate traffic on a two-lane road). However, depending on whether the different parameters are measured on site or only described, the data quality changes.

Next, the Level-0-parameters of the foreground system are captured; these refer to the unchangeable surfaces of the reference room as well as the material properties of the equipment elements that are changeable in their condition but are installed within these surfaces and can thus influence the passage of heat, light, air and sound through these surfaces. For example, the material properties of a window are among the Level-0-parameters, while the change in state of this window is only recorded in the Level-1-parameters, corresponding to the variable room components. For the Level-0-parameters, the vertical and horizontal boundaries of the reference room with their respective properties, as well as possibly existing equipment must be captured. Essentially, a distinction is made between transparent and opaque components. Independent of the light transmission, the cubature, the U-value, the sound reduction index and the sound absorption coefficient are determined for all surfaces. For transparent surfaces, the total energy transmittance and the light transmittance are also reported, while for opaque surfaces, the heat storage capacity, the vapor diffusion resistance and the light reflectance of the inner surface are documented. In addition, the reference room is described in this section of the Inventory on the basis of its volume, the air exchange rate due to leakage, and the reverberation time.

For the Level-1-parameters, all components of the reference room that can be changed in their state must be recorded. These are defined as equipment elements that additionally differ in terms of whether or not energy conversion is required for their state changes; this with regard to possible optimization measures for additional energy savings. In addition, only those elements whose function is to regulate the elementary flows in the reference room are counted among the equipment elements. Thus, for example, a computer or a desk are not taken into account in the preparation of the inventory. The equipment elements with

energy turnover to be recorded include ventilation, heating, cooling, humidity control, lamps and luminaires. Those without energy consumption include sun and glare protection, as well as windows and doors. In this regard, it should be noted that changing the position of the sunshade or glare shield may well be electrically driven; however, no permanent energy turnover is required for these systems to perform their function. In addition, natural ventilation is taken into account in the description of the window, which is why ventilation is listed here only among the components with energy turnover, and therefore mechanical ventilation is involved. All these equipment elements are described in the Inventory Analysis with the type of system, position in the room, dimension, their current condition, possible damage to the system and accessibility of the regulation unit. In addition, the type and number of power levels is recorded for the elements with energy consumption, and the type and number of adjustable states for the elements without energy consumption.

Based on the measured elementary flows as well as the captured background system, Level-0- and Level-1-parameters, the first part of the inventory result can be presented by mapping the relationships between these different components. This is the inventory model and serves as a basis for the evaluation of the impact assessment to highlight possible optimization potentials or differences between the compared reference rooms.

The Level-2-parameters of the inventory refer to the person under consideration. Depending on the application scenario as well as the specifications of the assessment framework, either the actual room user or a standard person adapted to the use of the room can be selected for this purpose. Regardless of the person for whom the impact assessment is to be performed, the age, gender, weight, height, hearing status, activity, clothing and visual field must be surveyed for each person. The last three are the changeable variables that must be recorded again in the inventory if the impact assessment is performed more than once.

The Level-3-parameters describe superordinate influences that can have an impact on the other parameters. In relation to Level 2, for example, this can be a clothing regulation, so that the person in the reference room cannot freely select and adapt it to the thermal conditions. With respect to the Level-1-parameters, a central heating and ventilation control can be described for the Level-3-parameters. All described parameters, which are recorded according to the investigation framework of the indoor-physiological assessment, must be finally collected in the report. In addition to the inventory model, the data quality of all data must also be taken into account.

This is followed by the impact assessment, which serves to quantify the indoor-physiological effects. For this purpose, the effect of the elementary flows on the sensory receptors of humans is considered. Based on this derivation, the four impact categories of the thermal environment, the air-hygienic environment, the visual environment as well as the acoustic environment corresponding to the thermoreceptors, the chemoreceptors, the photoreceptors and the mechanoreceptors. For each of these impact categories, there are four impact zones that describe the severity of the possible indoor-physiological impacts, according to the following figure.

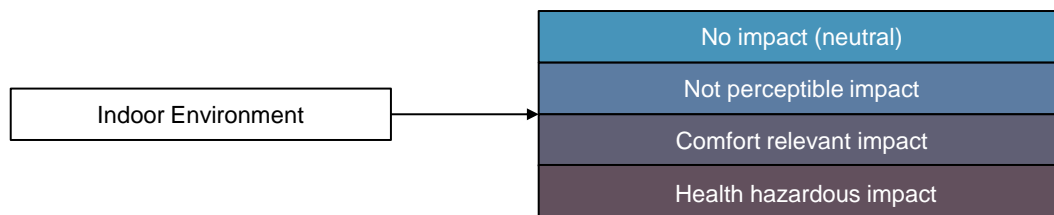


Figure A4: Definition of the impact zones of the indoor-physiological assessment

In the impact assessment, a quantitative indicator is thus determined for each impact category, which enables the assignment to one of the four impact zones. To determine this impact indicator, each impact category is described with an impact mechanism. This is a system of physical and physiological processes for the given impact category that links the inventory results to the impact indicators and the impact zones. This impact mechanism refers exclusively to the physiological responses of the body to its environment. Further adaptations through conscious changes (e.g. taking off a piece of clothing) or through technical adaptations (e.g. turning up the heating) are not considered in the impact mechanism. For this reason, the impact mechanisms are stationary calculations. However, these can be interpreted as quasi-stationary in accordance with the specifications of the study framework, depending on the requirements for the frequency with which the impact assessment is carried out.

The mean body temperature was selected as the impact indicator for the thermal environment impact category. This is composed of the weighted mean value of the body core temperature and the skin temperature, and thus represents the influence of the central and peripheral temperature sensors. The air-hygienic impact category refers exclusively to the evaluation of the impact of indoor CO₂-concentration. The impact indicator for this is arterial CO₂-partial pressure. The visual impact category must be further broken down into the visual impact and the biological impact due to the photoreceptors present in the human eye. The visual effect is evaluated by the retinal illuminance, while the biological effect is described by the circadian stimulus. And finally, the acoustic environment is described using the impact indicator of loudness, expressed by the categorical unit. All impact indicators, except the one describing the impact of the acoustic environment, are physiological quantities that can be used to describe the state of the human body and possible deviations from the neutral state. Due to the high dynamics of acoustic perception, the impact is represented by loudness, which represents the movements of the basilar membranes of both ears. The mechanisms of impact of the different impact indicators make it possible to determine these impact indicators in a given situation, taking into account the elementary flows present as well as the data of the individual person.

The evaluation of the indoor-physiological assessment is again dependent on the application scenario. If the assessment is carried out for the purpose of optimizing a reference room, the impact assessment must be considered together with the inventory report and the inventory model. If indoor-physiological impacts that lead to a deviation from the neutral human condition have been identified, the inventory results can be used to identify the triggers for this. Adjustments to these elements can be made to avoid impacts that are particularly relevant to comfort or hazardous to health. If the indoor-physiological assessment serves to compare several reference rooms, the results of the impact assessment can be compared with each

other in order to thus identify the room with the lowest impact. By comparing the inventories of the different rooms, the reasons for the lower impact of one room compared to another can also be determined. Thus, all phases of the indoor-physiological assessment were derived.

The derived method extends the state of the art regarding the three aspects: the considered impacts, the input parameters described in the cause-effect chains and the individual personal parameters. While the effects described in the state of the art always refer to terms that are difficult to quantify and subjective (e.g. comfort, satisfaction, acceptance, productivity), the indoor-physiological assessment describes the expected state of the body, which can be assigned to quantifiable impacts. In the current state of knowledge, either physical quantities or structural properties are considered as input parameters. The indoor-physiological assessment, on the other hand, integrates both types of input parameters. In addition, in the current state of knowledge, persons are only described on the basis of standardized default values, which are to be applied to average persons. The indoor-physiological assessment goes beyond the current state of knowledge, especially in the description of physiological parameters, and takes the approach of considering each person according to their individual parameters.

Despite this expansion of the state of knowledge, the indoor-physiological assessment can currently not be used without limitations. The limitations result in particular from the small data basis available for the derivation of the impact mechanisms. In addition, psychological influences are only taken into account via a weighting of the impact categories, but not beyond that.

Nevertheless, a practically applicable method was derived in this dissertation, which complies with the principles of LCA and which allows evaluating the main influences of the indoor environment on the basis of physiological indicators for individual persons. In addition, all influences that can potentially have an impact on humans in the indoor environment are collected and mapped in the inventory model via comprehensive cause-effect chains. The present indoor-physiological assessment relates exclusively to the four impact categories described, as well as the five impact indicators. However, the method can be extended by additional impact categories and impact indicators following the same procedure.

Practical applications can include, for example, the assessment of office and administrative spaces, classrooms, or living areas in retirement and nursing homes. Especially in such rooms, the users themselves often have no influence on the indoor environment, which is why the indoor-physiological assessment can be used to identify and avoid possible negative effects.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis		I
Tabellenverzeichnis		IX
Abkürzungsverzeichnis		X
Symbolverzeichnis		XI
Glossar		XV
1	Einleitung und Motivation	1
2	Zielstellung und methodisches Vorgehen	3
3	Stand des Wissens	8
3.1	Thermische Umgebung	11
3.1.1	Bewertung der thermischen Umgebung: Stand der Normen	12
3.1.2	Bewertung der thermischen Umgebung: Stand der Forschung	14
3.2	Lufthygienische Umgebung	16
3.2.1	Bewertung der lufthygienischen Umgebung: Stand der Technik	19
3.2.2	Bewertung der lufthygienischen Umgebung: Stand der Forschung	21
3.3	Visuelle Umgebung	22
3.3.1	Bewertung der visuellen Umgebung: Stand der Technik	24
3.3.2	Bewertung der visuellen Umgebung: Stand der Forschung	26
3.4	Akustische Umgebung	28
3.4.1	Bewertung der akustischen Umgebung: Stand der Technik	30
3.4.2	Bewertung der akustischen Umgebung: Stand der Forschung	32
3.5	Bewertung des erweiterten Raumklimas	33
3.5.1	Subjektive Bewertungsmethoden des erweiterten Raumklimas	33
3.5.2	Objektive Bewertungsmethoden des erweiterten Raumklimas	36
3.5.3	Subjektive-objektive Bewertungsmethoden des erweiterten Raumklimas	37
3.6	Wechselwirkung zwischen den Einflüssen des erweiterten Raumklimas	39
3.7	Personenbezogene Differenzen bei der Wahrnehmung und Bewertung des erweiterten Raumklimas	42
3.8	Auswertung des Stands des Wissens	48
4	Grundlagen der Bilanzierungsmethode	51

5	Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz	61
5.1	Bestandteile der Wirkungsabschätzung	64
5.2	Wirkungskategorie: Thermische Umgebung	75
5.2.1	Stand des Wissens: Thermorezeption	75
5.2.2	Definition des thermischen Wirkungsindikators und der Wirkungszonen	96
5.2.3	Herleitung des thermischen Wirkungsmechanismus	100
5.2.4	Anwendung des thermischen Wirkungsmechanismus	105
5.3	Wirkungskategorie: Lufthygienische Umgebung	113
5.3.1	Stand des Wissens: Chemorezeption	114
5.3.2	Definition des lufthygienischen Wirkungsindikators und der Wirkungszonen	123
5.3.3	Herleitung des lufthygienischen Wirkungsmechanismus	125
5.3.4	Anwendung des lufthygienischen Wirkungsmechanismus	132
5.4	Wirkungskategorie: Visuelle Umgebung	139
5.4.1	Visuelle Wirkung der visuellen Umgebung	139
5.4.2	Biologische Wirkung der visuellen Umgebung	164
5.5	Wirkungskategorie: Akustische Umgebung	177
5.5.1	Stand des Wissens: Mechanorezeption	177
5.5.2	Definition des akustischen Wirkungsindikators und der Wirkungszonen	187
5.5.3	Herleitung des akustischen Wirkungsmechanismus	198
5.5.4	Anwendung des akustischen Wirkungsmechanismus	201
5.6	Auswertung der Wirkungsabschätzung	204
5.7	Überprüfung der methodischen Validität der Wirkungsabschätzung	206
6	Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz	211
6.1	Bestandteile der Sachbilanz	211
6.2	Stand des Wissens zur Erstellung der Sachbilanz	218
6.2.1	Vorgehen zur Erstellung der Sachbilanz in der Ökobilanzierung	218
6.2.2	Gebäudemodelle zur Gliederung der Sachbilanzparameter in der raumphysiologischen Bilanz	220
6.3	Herleitung der Anwendung der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz	231
6.3.1	Sachbilanz zur Bestimmung der Elementarströme	237
6.3.2	Sachbilanz der individuellen Parameter	265
6.3.3	Sachbilanz der übergeordneten Parameter	274
6.4	Auswertung der Sachbilanz	275
6.5	Methodische Validität der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz	276

Inhaltsverzeichnis

7	Ziel und Untersuchungsrahmen der raumphysiologischen Bilanz	278
7.1	Ziel der raumphysiologischen Bilanz	278
7.2	Untersuchungsrahmen der raumphysiologischen Bilanz	278
8	Anwendung der raumphysiologischen Bilanz	281
8.1	Anwendungsszenario: Optimierung eines Referenzraums	281
8.1.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	281
8.1.2	Sachbilanz	282
8.1.3	Wirkungsabschätzung	285
8.1.4	Auswertung	289
8.2	Anwendungsszenario: Vergleich von Referenzräumen	291
8.2.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	291
8.2.2	Sachbilanz	293
8.2.3	Wirkungsabschätzung	295
8.2.4	Auswertung	299
9	Kritische Bewertung der Methodik	300
9.1	Aufbau der raumphysiologischen Bilanz	300
9.2	Limitation der raumphysiologischen Bilanz	302
9.3	Einordnung in den Stand des Wissens	303
10	Fazit und Ausblick	305
	Literaturverzeichnis	308
	Anhangsverzeichnis	342

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Analogiebetrachtung zwischen der Ökobilanzierung und der raumphysiologischen Bilanzierung	4
Abbildung 2: Aufbau der vorliegenden Dissertation	5
Abbildung 3: Thermische Umgebung des Menschen (in Anlehnung an Hausladen, Liedl & Saldanha, 2012)	11
Abbildung 4: Lufthygienische Umgebung des Menschen (in Anlehnung an Hausladen, Liedl & Saldanha, 2012)	18
Abbildung 5: Auswirkungen der akustischen Umgebung auf den Menschen (nach Kurra, 2020)	29
Abbildung 6: Verhältnis der Gewichtungsfaktoren bei der Bewertung des erweiterten Raumklimas mit einem einzelnen Indikator	38
Abbildung 7: Häufigkeit der Berücksichtigung der objektiven Messgrößen zur Bewertung des erweiterten Raumklimas	39
Abbildung 8: Zusammenfassung physiologischer, physischer und psychologischer Eigenschaften, welche die Wahrnehmung und Bewertung der akustischen, visuellen, lufthygienischen und thermischen Umgebung beeinflussen (in Anlehnung an Schneider, 2022)	47
Abbildung 9: Phasen der Ökobilanzierung (DIN EN ISO 14040, 2021)	51
Abbildung 10: Darstellung des Zusammenhangs zwischen einer Benennung und einem Gegenstand (DIN 2330, 2013)	52
Abbildung 11: Darstellung der Ökosphäre und der Technosphäre in der Ökobilanzierung (Bjorn et al., 2018a)	58
Abbildung 12: Darstellung der Ökosphäre, der Technosphäre und des Menschen in der raumphysiologischen Bilanzierung	60
Abbildung 13: Definition der Auswirkung / Wirkung	62
Abbildung 14: Zusammenhang zwischen der Sachbilanz und dem menschlichen Körper in Anlehnung an das Menschenmodell von Bluysen (2014a)	63
Abbildung 15: Sensorische Wahrnehmung – Zusammenhang zwischen Energie und Aktionspotential (Kapit, Macey & Meisami, 2007)	65
Abbildung 16: Definition der Wirkungskategorien	66
Abbildung 17: Prinzip eines Regelkreises zur Anwendung in der Physiologie (Silbernagl & Despopoulos, 2012)	68
Abbildung 18: Definition der Wirkungszonen der raumphysiologischen Bilanz	71
Abbildung 19: Schematische Darstellung der unbewussten, bewussten und technischen Regulierung der raumklimatischen Umgebung des Menschen (Generisch dargestellt nach Hensel, 1982)	73
Abbildung 20: Schematische Darstellung des negativen Rückkopplungsmechanismus zur Temperaturregulierung (Feigenspan, 2017)	76

Abbildung 21: Zusammenhang zwischen der Aktivierung der TRP-Kanäle, der Hauttemperatur und der entsprechenden Empfindung (Belmonte & Viana, 2008 adaptiert nach Patapoutian et al., 2003)	78
Abbildung 22: Darstellung der Effektorbahnen und der Reaktionen zur Aufrechterhaltung des Wärmehaushalts (Feigenspan, 2017)	79
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Thermoektoren, der mittleren Körpertemperatur und der Umgebungstemperatur (Taylor & Gordon, 2019 adaptiert nach Werner, Mekjavic & Taylor, 2008)	82
Abbildung 24: Vergleich der thermisch neutralen Hauttemperaturbereiche	84
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Widerstände zwischen dem Körperkern und der Oberfläche der Haut (Davoodi et al., 2018; Havenith, 2001)	85
Abbildung 26: Thermische Wechselwirkungen zwischen dem Körper und der Umgebung (ASHRAE, 2017)	88
Abbildung 27: Wirkungszonen der thermischen Umgebung	97
Abbildung 28: Numerische Abgrenzung der Wirkungszonen der thermischen Umgebung	100
Abbildung 29: Vereinfachte Darstellung des thermischen Wirkungsmechanismus	102
Abbildung 30: Individuelle Personendaten im Wirkungsmechanismus der thermischen Umgebung	106
Abbildung 31: Umgebungsdaten im Wirkungsmechanismus der thermischen Umgebung	106
Abbildung 32: Algorithmus des thermischen Wirkungsmechanismus	108
Abbildung 33: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 1 (Szenario 1)	109
Abbildung 34: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 2 (Szenario 1)	110
Abbildung 35: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 1 (Szenario 2)	111
Abbildung 36: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 2 (Szenario 2)	111
Abbildung 37: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 1 (Szenario 3)	112
Abbildung 38: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 2 (Szenario 3)	112
Abbildung 39: Zeitliche Adaptation der Empfindungsstärke von Geruch (nach Silbernagl & Despopoulos, 2012)	113
Abbildung 40: Regelkreis der Atmung unter der Kontrolle der Chemosensoren (Katschinski, 2019)	115
Abbildung 41: Berechnung des Grundumsatzes in Abhängigkeit vom Alter nach Schofield (1895), nach Kleiber (1967) und nach Harris-Benedict (nach Höpfe, 1984)	118
Abbildung 42: Verhältnis zwischen der Atemfrequenz und der körperlichen Anstrengung (Stielow, 2015)	120
Abbildung 43: Verhältnis zwischen dem Peak-Atemzugvolumen und dem Alter von Frauen (Godehardt, 2017)	121
Abbildung 44: Verhältnis zwischen dem Peak-Atemzugvolumen und dem Alter von Männern (Godehardt, 2017)	121
Abbildung 45: Verhältnis zwischen der Peak-Anstrengung und dem Alter von Frauen (Dubowy et al., 2008)	122
Abbildung 46: Verhältnis zwischen der Peak-Anstrengung und dem Alter von Männern (Dubowy et al., 2008)	122

Abbildung 47: Verhältnis zwischen dem Atemzugvolumen und dem Totraumvolumen in Ruhe und unter Anstrengung (Asmussen & Nielsen, 1957; Stegemann & Heinrich, 1967)	123
Abbildung 48: Wirkungszonen der lufthygienischen Umgebung	124
Abbildung 49: Verhältnis des Grundumsatzes zur CO ₂ -Produktion im menschlichen Körper in Abhängigkeit von der metabolischen Rate	125
Abbildung 50: Verhältnis des respiratorischen Quotienten zur CO ₂ -Produktion im menschlichen Körper in Abhängigkeit von der metabolischen Rate	126
Abbildung 51: Verhältnis zwischen der Atemfrequenz und der Anstrengung (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Stielow, 2018)	127
Abbildung 52: Verhältnis zwischen dem Peak-Atemzugvolumen und dem Alter von Frauen (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Godehardt, 2017)	128
Abbildung 53: Verhältnis zwischen dem Peak-Atemzugvolumen und dem Alter von Männern (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Godehardt, 2017)	129
Abbildung 54: Verhältnis zwischen der Peak-Anstrengung und dem Alter von Frauen (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Dubowy et al., 2018)	129
Abbildung 55: Verhältnis zwischen der Peak-Anstrengung und dem Alter von Männern (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Dubowy et al., 2018)	130
Abbildung 56: Atemzugvolumen in Ruhe (1 met) in Abhängigkeit vom Alter und vom Geschlecht	131
Abbildung 57: Atemzugvolumen unter Anstrengung (4 met) in Abhängigkeit vom Alter und vom Geschlecht	131
Abbildung 58: Verhältnis zwischen dem Atemzugvolumen und dem Totraumvolumen in Ruhe und unter Anstrengung (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Asmussen & Nielsen (1957) und Stegemann & Heinrich (1967))	132
Abbildung 59: Zusammenhang zwischen der CO ₂ -Konzentration im Innenraum, der Aktivität und dem alveolären CO ₂ -Partialdruck bei einer Lufttemperatur von 20 °C für einen jungen Mann (28 Jahre)	134
Abbildung 60: Zusammenhang zwischen der CO ₂ -Konzentration im Innenraum, der Aktivität und dem alveolären CO ₂ -Partialdruck bei einer Lufttemperatur von 25 °C für einen jungen Mann (28 Jahre)	135
Abbildung 61: Zusammenhang zwischen der CO ₂ -Konzentration im Innenraum, der Aktivität und dem alveolären CO ₂ -Partialdruck bei einer Lufttemperatur von 30 °C für einen jungen Mann (28 Jahre)	135
Abbildung 62: Wirkungsindikator und Wirkungszonen zur Bewertung der lufthygienischen Umgebung	136
Abbildung 63: Algorithmus des lufthygienischen Wirkungsmechanismus	137
Abbildung 64: Vom Licht zur Farbwahrnehmung (Asano, 2015)	145
Abbildung 65: Zusammenhang zwischen den Umgebungslichtstärken und der visuellen Funktion des Auges (Barbur & Stockman, 2010; Stockman & Sharpe, 2006 nach Hood & Finkelstein, 1986)	152
Abbildung 66: Wirkungszonen der visuellen Umgebung (visuelle Wirkung)	153

Abbildung 67: Darstellung der LMS-Funktionen für zwei unterschiedliche Alter	155
Abbildung 68: Photopische spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen für zwei Personen unterschiedlichen Alters	156
Abbildung 69: Algorithmus des visuellen Wirkungsmechanismus (visuelle Wirkung)	158
Abbildung 70: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen Person 1 bis 15000 Lumen (Szenario 1)	159
Abbildung 71: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 2 bis 15000 Lumen (Szenario 1)	159
Abbildung 72: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 1 bis 1500 Lumen (Szenario 1)	160
Abbildung 73: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 2 bis 1500 Lumen (Szenario 1)	160
Abbildung 74: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 1 bis 15000 Lumen (Szenario 2)	161
Abbildung 75: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 2 bis 15000 Lumen (Szenario 2)	162
Abbildung 76: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 1 bis 1500 Lumen (Szenario 2)	162
Abbildung 77: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 2 bis 1500 Lumen (Szenario 2)	163
Abbildung 78: Normalisierte spektrale Empfindlichkeit des Makulapigments nach Snodderly et al. (1984)	169
Abbildung 79: Wirkungszonen der visuellen Umgebung tagsüber bis 18 Uhr (biologische Wirkung)	170
Abbildung 80: Wirkungszonen der visuellen Umgebung nachts ab 18 Uhr (biologische Wirkung)	170
Abbildung 81: Skotopische spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion für jede Altersklasse	172
Abbildung 82: Algorithmus des visuellen Wirkungsmechanismus (biologische Wirkung)	173
Abbildung 83: Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus ohne Feldgröße und Expositionsdauer	174
Abbildung 84: Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus: volles visuelles Feld in Abhängigkeit von der Expositionsdauer	175
Abbildung 85: Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus: zentrales visuelles Feld in Abhängigkeit von der Expositionsdauer	176
Abbildung 86: Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus: übergeordnetes visuelles Feld in Abhängigkeit von der Expositionsdauer	176
Abbildung 87: Vereinfachte Darstellung des menschlichen Gehörs (Chittka & Brockmann, 2005)	177
Abbildung 88: Schematischer Schnitt durch das Mittelohr und die entrollte Cochlea (Baumgarte, 2000)	179
Abbildung 89: Querschnitt A – A der Cochlea aus Abbildung 88 (Baumgarte, 2000)	179
Abbildung 90: Blockdiagramm der binauralen zeitvariierenden Lautheit (nach Moore et al., 2016)	182
Abbildung 91: Verhältnis zwischen der Lautheit in Sone und der Lautheit in <i>Categorical Units</i>	183

Abbildung 92: Anzahl der inneren und äußeren Haarzellen mit zunehmendem Alter (Keithley, 2020 nach Bredberg, 1968)	184
Abbildung 93: Korrelation zwischen dem audiometrisch gemessenen Hörverlust und den Ergebnissen des HHIA (nach Newman et al., 1990)	186
Abbildung 94: Korrelation zwischen dem audiometrisch gemessenen Hörverlust und den Ergebnissen des HHIE (nach Weinstein & Ventry, 1983)	186
Abbildung 95: Wirkungskette zur Identifizierung eines Wirkungsindikators zur Bewertung der Auswirkung der akustischen Umgebung auf einen Menschen	187
Abbildung 96: Veränderung des Drucks am Trommelfell bei steigendem Schalldruck	188
Abbildung 97: Veränderung des Drucks am Trommelfell bei steigendem Schalldruck (vergrößerte Darstellung)	189
Abbildung 98: Links: Basilarmembran-Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel (Ruggero & Rich, 1991; nach Lentz 2020) Rechts: Lautheitsfunktion für Normalhörende und Hörgeschädigte (Lentz 2020)	190
Abbildung 99: Schall als Stressor für den Menschen (Park, 2018 eigene Ergänzungen)	192
Abbildung 100: Wirkungszonen der akustischen Umgebung tagsüber	194
Abbildung 101: Wirkungszonen der akustischen Umgebung nachts	195
Abbildung 102: Lautheit [CU] tagsüber in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel [dB] und der Frequenz [kHz] (Weiterverarbeitete Rohdaten nach Rasetshwane et al., 2015)	196
Abbildung 103: Lautheit [CU] tagsüber in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel [dB] und der Frequenz [kHz] für Personen mit einem Hörverlust von 20 dB (Weiterverarbeitete Rohdaten nach Rasetshwane et al., 2015)	196
Abbildung 104: Lautheit [CU] tagsüber in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel [dB] und der Frequenz [kHz] für Personen mit einem Hörverlust von 40 dB (Weiterverarbeitete Rohdaten nach Rasetshwane et al., 2015)	197
Abbildung 105: Lautheit [CU] tagsüber in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel [dB] und der Frequenz [kHz] für Personen mit einem Hörverlust von 60 dB (Weiterverarbeitete Rohdaten nach Rasetshwane et al., 2015)	197
Abbildung 106: Regressionsfunktion zur Darstellung der Korrelation zwischen dem audiometrisch gemessenen Hörverlust und den Ergebnissen des HHIA (nach Newman et al., 1990)	198
Abbildung 107: Regressionsfunktion zur Darstellung Korrelation zwischen dem audiometrisch gemessenen Hörverlust und den Ergebnissen des HHIE (nach Weinstein & Ventry, 1983)	199
Abbildung 108: Zusammenhang zwischen der Lautheit [CU] für Normalhörende und der Lautheit [CU] der Hörverlustkategorien 20 dB, 40 dB und 60 dB	201
Abbildung 109: Algorithmus des akustischen Wirkungsmechanismus	202
Abbildung 110: Anwendung des akustischen Wirkungsindikators für den Wachzustand	203
Abbildung 111: Anwendung des akustischen Wirkungsindikators für den schlafenden Zustand	203

Abbildung 112: Beispielhafte Auswertung der Wirkungsabschätzung für einen einzelnen Bilanzierungszeitpunkt	205
Abbildung 113: Beispielhafte Auswertung der Wirkungsabschätzung für mehrere Bilanzierungszeitpunkte innerhalb eines Tages	206
Abbildung 114: <i>Importance-Performance</i> -Matrix nach Martilla & James (1977)	209
Abbildung 115: Verbindliche und optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz	210
Abbildung 116: Definition der Systemgrenzen für die Sachbilanz (nach Weischert & Endlicher, 2018)	216
Abbildung 117: Berücksichtigte Parameter in den Gebäudemodellen nach Grabe (2012) und Heichele (2021)	220
Abbildung 118: Eigenschaften der Gebäudehülle (Hegger et al., 2007)	222
Abbildung 119: Schutzfunktionen der Gebäudehülle (Hegger et al., 2007)	225
Abbildung 120: Kategorisierung der relevanten Parameter für die Sachbilanz	233
Abbildung 121: Ausgangs- und Anpassungssituation für die Anwendung der Optimierung von Referenzräumen	235
Abbildung 122: Ausgangs- und Anpassungssituation für die Anwendung des Vergleichs von Referenzräumen	235
Abbildung 123: Zuordnung der materiellen und energetischen äußeren Umgebungsbedingungen nach Grabe (2012) und Heichele (2021) zu den vier Wirkungskategorien	238
Abbildung 124: Relevante Größen der Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems innerhalb der Systemgrenzen des Mikroklimas mit der Zuordnung zu den Wirkungskategorien	240
Abbildung 125: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems	242
Abbildung 126: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanz des inneren Hintergrundsystems	244
Abbildung 127: Zuordnung der Level-0-Sachbilanz-Parameter zu den vier Wirkungskategorien	247
Abbildung 128: Sachbilanz der äußeren vertikalen Gebäudehülle	248
Abbildung 129: Sachbilanz der inneren vertikalen Raumabgrenzung	249
Abbildung 130: Sachbilanz der inneren horizontalen oberen und unteren Raumabgrenzung	250
Abbildung 131: Sachbilanz der äußeren horizontalen Gebäudehülle	251
Abbildung 132: Sachbilanz der unterirdischen horizontalen und vertikalen Gebäudehülle	251
Abbildung 133: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanz des Level-0-Vordergrundsystems	253
Abbildung 134: Lüftungssysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme	255
Abbildung 135: Heizsysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme	256
Abbildung 136: Kühlsysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme	257
Abbildung 137: Feuchteregulierungssysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme	257
Abbildung 138: Blendschutz- und Sonnenschutzsysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme	258
Abbildung 139: Fenster und Türen im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme	259

Abbildung 140: Leuchten und Lampen im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme	260
Abbildung 141: Grundstruktur zur Erstellung der Sachbilanz der Level-1-Parameter	261
Abbildung 142: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanz des Level-1-Vordergrundsystems	262
Abbildung 143: Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den Elementarströmen (Sachbilanzmodell)	265
Abbildung 144: Personenbezogene (Level 2) Parameter in der Sachbilanz	266
Abbildung 145: Übersicht der Standardpersonen zur Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz	270
Abbildung 146: Sachbilanz Level 2: Standardperson (30-jährige und 60-jährige Bürobeschäftigte)	271
Abbildung 147: Sachbilanz Level 2: Standardperson (30-jähriger und 60-jähriger Bürobeschäftigter)	271
Abbildung 148: Sachbilanz Level 2: Standardperson (Grundschulkind)	272
Abbildung 149: Sachbilanz Level 2: Standardperson (Altenheimbewohner)	273
Abbildung 150: Auswertung des Sachbilanzmodells	275
Abbildung 151: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanzergebnisse	276
Abbildung 152: Sachbilanz Level 1 – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums	283
Abbildung 153: Sachbilanz Level 2 – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums	283
Abbildung 154: Sachbilanzmodell – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums	285
Abbildung 155: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der thermischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 9 Uhr	286
Abbildung 156: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der lufthygienischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 9 Uhr	286
Abbildung 157: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der thermischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 13 Uhr	287
Abbildung 158: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der lufthygienischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 13 Uhr	287
Abbildung 159: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der thermischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 17 Uhr	288
Abbildung 160: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der lufthygienischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 17 Uhr	288
Abbildung 161: Auswertung der Wirkungsabschätzung – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums	289
Abbildung 162: Ergänzung des Sachbilanzmodells – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums	289
Abbildung 163: Analyse der Neutralität – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums	290
Abbildung 164: Sachbilanz Level 1 – Anwendungsbeispiel: Vergleich von Referenzräumen	293
Abbildung 165: Sachbilanzmodell – Anwendungsbeispiel: Vergleich von Referenzräumen	295

Abbildung 166: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 22 Uhr und 6 Uhr in den Referenzräumen 1 und 3 (18 sone)	296
Abbildung 167: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 23 Uhr, 24 Uhr und 5 Uhr in den Referenzräumen 1 und 3 (12 sone)	296
Abbildung 168: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 1 Uhr, 2 Uhr, 3 Uhr und 4 Uhr in den Referenzräumen 1 und 3 (6 sone)	297
Abbildung 169: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 22 Uhr und 6 Uhr in den Referenzräumen 2 und 4 (2 sone)	297
Abbildung 170: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 23 Uhr, 24 Uhr und 5 Uhr in den Referenzräumen 2 und 4 (1 sone)	298
Abbildung 171: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 1 Uhr, 2 Uhr, 3 Uhr und 4 Uhr in den Referenzräumen 2 und 4 (0.5 sone)	298
Abbildung 172: Auswertung der Wirkungsabschätzung – Anwendungsbeispiel: Vergleich von Referenzräumen	299
Abbildung 173: Emissionsspektren von verschiedenen Lichtquellen: (A) Glühbirne; (B) weiße Leuchtstofflampe; (C) Energiesparlampe; (D) weiße LED-Glühbirne; (E) blaue LED-Glühbirne; (F) schwarze LED-Glühbirne; (G) Sonnenlicht am Morgen; (H) Sonnenlicht am Mittag; (I) Sonnenlicht bei Sonnenuntergang; und (J) Vergleich von Sonnenlicht am Mittag (rot), am Morgen (gelb) und bei Sonnenuntergang (grün). (Abdel-Rahman et al., 2017)	345
Abbildung 174: Bewegung einer Schallwelle durch das Außenohr (Gambin, 2019)	346

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassender Überblick über die Einflüsse und Auswirkungen des erweiterten Raumklimas	9
Tabelle 2: Chemische Luftverunreinigungen in Innenräumen mit ihrem Ursprung und den möglichen Auswirkungen (nach Tran, Park & Lee, 2020 und Zhang & Srinivasan, 2020)	17
Tabelle 3: Charakterisierung der sensorischen Rezeptoren nach Kapit, Macey & Meisami (2007)	65
Tabelle 4: Klinisch relevante Körperkern- und Hauttemperaturen (Taylor, Kondo & Kenney, 2008; Taylor, Mekjavic & Tipton, 2008)	83
Tabelle 5: Mittlere Abweichungen nach Altersgruppen untergliedert nach Asano (2015)	154
Tabelle 6: Kategoriale Lautheitsskalierung nach der DIN ISO 16832 (2007) und nach Hawkins et al. (1987)	193
Tabelle 7: Zuordnung des berechneten Hörverlustes zur Hörverlustkategorie	200
Tabelle 8: Klassifikation der Datenspezifität in der Ökobilanzierung (Bjorn et al., 2018b; Wenzel, Hauschild & Alting, 1997)	219
Tabelle 9: Materielle und energetische Umgebungsbedingungen nach Grabe (2012) und Heichele (2021)	221
Tabelle 10: Beleuchtungsmethoden von Lampen und beispielhafte Montagearten (Krimmling et al., 2014)	231
Tabelle 11: Datenspezifität der Sachbilanzdaten des äußeren Hintergrundsystems	242
Tabelle 12: Datenspezifität der Sachbilanzdaten des Level-0-Vordergrundsystems	253
Tabelle 13: Datenspezifität der Sachbilanzdaten des Level-1-Vordergrundsystems	262
Tabelle 14: Energieumsatz für bestimmte Tätigkeiten (DIN EN ISO 8996, 2005)	267
Tabelle 15: Beispielhafte Darstellung von Level-3-Parametern	274
Tabelle 16: Bestandteile des Untersuchungsrahmens in der Ökobilanz und der raumphysiologischen Bilanz	279
Tabelle 17: Untersuchungsrahmen – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums	282
Tabelle 18: Sachbilanz der veränderlichen Parameter zum Betrachtungszeitpunkt 9 Uhr	284
Tabelle 19: Sachbilanz der veränderlichen Parameter zum Betrachtungszeitpunkt 13 Uhr	284
Tabelle 20: Sachbilanz der veränderlichen Parameter zum Betrachtungszeitpunkt 17 Uhr	284
Tabelle 21: Untersuchungsrahmen – Anwendungsbeispiel: Vergleich von Referenzräumen	292
Tabelle 22: Sachbilanz der veränderlichen Parameter in den Referenzräumen 1 und 3	294
Tabelle 23: Sachbilanz der veränderlichen Parameter in den Referenzräumen 2 und 4	294
Tabelle 24: Berechnung der Durchblutungsrate für unterschiedliche <i>Set-Points</i>	343

Abkürzungsverzeichnis

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AUL	Außenluft
BREEAM	<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology</i>
BUS	<i>Building Use Studies</i>
CBE	<i>Center for the built environment</i>
CCPR	<i>Comité Consultatif de Photometrie et Radiometrie</i>
CIPM	<i>Comité International des Poids et Mesures</i>
CMF	<i>Color Matching Functions</i>
COPD	Chronisch obstruktive Lungenerkrankung
CPMV	<i>Corrected Predicted Mean Vote</i>
CU	<i>Categorical Units</i>
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
ELCs	<i>Equal-Loudness-Level Contours</i>
EU	Europäische Union
FRC	Funktionale Residualkapazität
HHIA	<i>Hearing Handicap Inventory for Adults</i>
HHIE	<i>Hearing Handicap Inventory for the Elderly</i>
HI	Hörgeschädigte Personen (engl. <i>Hearing Impaired</i>)
HQE	<i>Haute Qualité Environnementale</i>
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>
ipRGC	<i>intrinsic photosensitive Retinal Ganglion Cells</i>
ITACA	Gebäudezertifizierungslabel
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
NABERS	<i>National Australian Built Environment Rating System</i>
NH	Normalhörende Personen
ODA	<i>OutDoor Air</i>
OsmoZ	Gebäudezertifizierungslabel
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
RGB	Rot-Grün-Blau
TNZ	Thermisch neutrale Zone
TRPV / TRPA / TRPM	<i>Transient Receptor Potential</i> Ionenkanal
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i>
WELL	Gebäudezertifizierungslabel
WHO	Weltgesundheitsorganisation

Symbolverzeichnis

a	Adaptationswinkel [°]
A_D	DuBois Körperoberfläche [m ²]
A_f	Atemfrequenz [Atemzüge/min]
AI	Alter [Jahre]
A_r	Effektive Strahlungsfläche des Körpers [m ²]
$A_{\text{shift},j}$	Verschobene niedrigste optische Dichte des Zapfentyps j [-]
AZU	Atemzugvolumen [L/min]
AZU_p	Peak Atemzugvolumen [L/min]
BMI	Body Mass Index [-]
C	Rate des konvektiven Wärmeverlustes über die Haut [W/m ²]
c_0	Lichtgeschwindigkeit [m/s]
CL_A	Circadianes Licht [W/m ²]
$C_{p,bl}$	Spezifische Wärmekapazität von Blut [J/kgK]
C_{res}	Rate des konvektiven Wärmeverlustes über die Atmung [W/m ²]
CS	Circadianer Stimulus [-]
c_s	Schallgeschwindigkeit [mm/s]
$C_{SIG,sk}$	Effektor-Kontrollsignal der Vasokonstriktion [-]
CU	Lautheit [CU]
d_L	Abweichung von der maximalen optischen Dichte der L-Zapfen [%]
d_{lens}	Abweichung von der durchschnittlichen optische Dichte der Linse [%]
d_M	Abweichung von der maximalen optischen Dichte der M-Zapfen [%]
d_{makula}	Abweichung von der maximalen optischen Dichte des Makulapigments [%]
D_{makula}	Optische Dichte des Makulapigments [-]
D_{ocul}	Optische Dichte der Linse [-]
d_s	Abweichung von der maximalen optischen Dichte der S-Zapfen [%]
D_U	Pupillendurchmesser [mm]
E_{max}	Maximaler Verdunstungswärmeverlust [W/m ²]
E_{res}	Rate des evaporativen Wärmeverlustes über die Atmung [W/m ²]
E_{rsw}	Benötigter Verdunstungswärmeverlust [W/m ²]
E_{sk}	Gesamtrate des evaporativen Wärmeverlustes über die Haut [W/m ²]
F	Effektive Hornhautflussdichte [-]
f	Visuelles Feld [-]
F_0	Querschnittfläche am Eingang des Gehörgangs [mm ²]
f_{cl}	Bekleidungsflächenfaktor [-]
FRC	Funktionale Residualkapazität [L]
fs	Blickwinkel [°]
F_{TM}	Querschnittfläche am Trommelfell [mm ²]

Symbolverzeichnis

GE	Gewicht [kg]
GR	Größe [m]
GRU	Grundumsatz [MJ/Tag]
h	Summe der Wärmeübergangswiderstände der Konvektion und Strahlung [W/m ² K]
h _c	Konvektiver Wärmeübergangswiderstand [W/m ² K]
h _e	Verdunstungswärmeübergangswiderstand [W/m ² kPa]
h _{fg}	Verdampfungswärme von Wasser [kJ/kg]
h _r	Strahlungs-Wärmeübergangswiderstand [W/m ² K]
I	Lichtstärke [lm/sr]
I*	Referenzschalldruck [N/mm s]
I ₀	Intensität des Schalls [N/mm s]
I _{cl}	Bekleidungsisolierung [clo]
I _{clu}	Bekleidungsisolierung einzelnes Kleidungsstück [clo]
I _i	Körpereigene Isolierung bei Körperkerntemperatur i [m ² K/W]
i _{m,cl}	Permeabilitätsindex [-]
I _{max}	Maximale körpereigene Isolierung [m ² K/W]
I _{min}	Minimale körpereigene Isolierung [m ² K/W]
I _{TM-}	Intensität des Schall am Trommelfell [N/mm s]
K _m	Strahlungsäquivalent [lm/W]
L	Leuchtdichte [cd/m ²]
I _q	Spektrale Hellempfindlichkeit der L-Zapfen [-]
LR	Lewis Zahl [-]
m	Metabolische Rate [met]
M	Metabolische Rate [W/m ²]
m _{cl}	Durchlässigkeit des Makulapigments [-]
M _{cl}	Spektrale Sensitivität des Proteins Melanopsin [-]
MET _p	Peak metabolische rate [met]
m _q	Spektrale Hellempfindlichkeit der M-Zapfen [-]
n	Index der Brechkraft der Luft [-]
N _{TM-}	Kraft am Trommelfell [N]
P	Luftdruck [kPa]
p	Pupillenfläche [mm ²]
p ₀	Amplitude des Schalldrucks [N/mm ²]
P _a	Wasserdampfdruck der Umgebungsluft [kPa]
P _{a,s}	Sättigungswasserdampfdruck bei der Lufttemperatur [kPa]
PA _{CO2}	Alveolärer CO ₂ -Partialdruck [mmHg]
P _{CO2,Luft}	Kohlenstoffdioxid Partialdruck der Luft [mmHg]
P _{mmHg}	Luftdruck [mmHg]
P _{sk,s}	Sättigungswasserdampfdruck bei der Hauttemperatur [kPa]
p _{TM}	Amplitude des Schalldrucks am Trommelfell [N/mm ²]

Symbolverzeichnis

Q_{res}	Gesamtrate des Wärmeverlustes über die Atmung [W/m ²]
Q_{sk}	Gesamtrate des Wärmeverlustes über die Haut [W/m ²]
r	Radius der Pupille [mm]
R	Rate des Strahlungswärmeverlustes über die Haut [W/m ²]
$R_{Blutfluss}$	Thermischer Widerstand der Durchblutungsrate [m ² K/W]
R_{cl}	Wärmewiderstand der Bekleidungsisolierung [m ² K/W]
$R_{e,cl}$	Verdunstungswärmedurchgangswiderstand der Bekleidungsschicht [m ² kPa/W]
$R_{Fett+Haut}$	Thermischer Widerstand der subkutanen Fettschicht und der Haut [m ² K/W]
RH	Relative Luftfeuchte [%]
R_{Muskel}	Thermischer Widerstand der Muskeln [m ² K/W]
RQ	Respiratorische Quotient [-]
S	Gesamtrate der Wärmespeicherung [W/m ²]
SFT	Subkutane Fettschichtdicke [mm]
$SkBF$	Durchblutungsrate der Haut [L/min]
s_L	Abweichung vom durchschnittlichen Wellenlängen-Maximum der L-Zapfen [nm]
s_M	Abweichung vom durchschnittlichen Wellenlängen-Maximum der M-Zapfen [nm]
s_q	Spektrale Hellempfindlichkeit der S-Zapfen [-]
SR	Schweißrate [kg/sm ²]
s_S	Abweichung vom durchschnittlichen Wellenlängen-Maximum der S-Zapfen [nm]
S_λ	Spektrale Sensitivität der S-Zapfen [-]
T	Retinale Beleuchtungsstärke [Td]
t	Zeit [Stunden]
T_a	Lufttemperatur [°C]
T_b	Mittlere Körpertemperatur [°C]
T_c	Körperkerntemperatur [°C]
T_{cl}	Temperatur der Oberfläche der Bekleidung [°C]
T_o	Operative Temperatur [°C]
T_r	Strahlungstemperatur [°C]
T_{sk}	Hauttemperatur [°C]
$T_{skmax,1}$	Hauttemperatur an der oberen Grenze der neutralen Zone [°C]
$T_{skmax,2}$	Hauttemperatur an der oberen Grenze der vasomotorischen Zone [°C]
$T_{skmin,1}$	Hauttemperatur an der unteren Grenze der neutralen Zone [°C]
$T_{skmin,2}$	Hauttemperatur an der unteren Grenze der vasomotorischen Zone [°C]
$V(\lambda)$	Photopische spektrale Hellempfindlichkeitskurve [-]
$V'(\lambda)$	Skotopische spektrale Hellempfindlichkeit [-]
ν_0	Frequenz von monochromatischer Strahlung [THz]
V_A	Alveoläre Ventilation [L/min]
V_{CO_2}	CO ₂ -Produktion [L/s]
V_T	Totraumvolumen [ml]
w	Anteil der feuchten Haut [-]

Symbolverzeichnis

W	Rate der externen mechanischen Arbeit [W/m ²]
$W_{\text{SIG,er}}$	Effektor-Kontrollsignal der Vasodilatation [-]
α	Massenverschiebung im Körper [-]
α_j	Absorptionsspektrum [-]
β	Schalldruckpegel [dB]
γ	Anteil der Wärmeverluste über die Atmung [-]
ε	Mittlere Emissivität der Bekleidungs- und der Körperoberfläche [-]
η	Effizienz des Gegenstrom-Wärmeaustauschs [-]
λ	Wellenlänge [nm]
ρ_0	Dichte der Luft [g/mm ³]
σ	Stefan-Boltzmann Konstante $5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m ² K ⁴]
Φ	Lichtstrom [lm]
$\Phi_{e,\lambda}$	Spektraler Strahlungsfluss [-]
Ω	Raumwinkel [sr]

Glossar

Transduktion	Prozess der Umsetzung eines Sinnesreizes in ein Rezeptorpotential (Meßlinger, 2019)
Transformation	Prozess der Umsetzung eines Sinnesreizes in ein Aktionspotential (Meßlinger, 2019)
Aktionspotential	Aktivierter Zustand von erregbaren Nerven-, Sinnes- oder Muskelzellen, welche eine Signalfunktion für andere Zellen haben (Meßlinger, 2019)
Schwellenpotential	Kritischer Wert des Rezeptorpotentials, bei dessen Überschreiten ein Aktionspotential ausgelöst wird (Silbernagl & Despopoulos, 2012)
Adäquater Reiz	Reiz, der die minimale Energie benötigt, um das betreffende Sinnesorgan zu erregen (Handwerker & Schmelz, 2019)
Aberrationen	Physiologische Abbildungsfehler des Auges (Eysel, 2019)
Impedanz	Übertragung des Schalls von einem Medium mit niedrigem zu einem Medium mit hohem Wellenwiderstand (Silbernagl & Despopoulos, 2012)
Exergie	Quantifizierung des Energieverbrauchs aller energiebetriebenen Systeme (z. B. Gebäude, Heizungen, menschlicher Körper) (Shukuya, 2009)

1 Einleitung und Motivation

Zum Schutz vor äußeren Umwelteinflüssen suchen Menschen Unterschlupf in Gebäuden. Durch Gebäudeelemente wurde eine Trennung zwischen der natürlichen Außenwelt und der von Menschenhand geschaffenen Innenwelt gebildet, die zur Entstehung der Innenraumumgebung geführt hat. (Nimlyat, 2018) Die physikalischen Vorgänge in dieser Innenraumumgebung lassen sich mithilfe der Bauphysik quantifizieren. Mitte der 80er-Jahre galt diese Wissenschaftsdisziplin als neu und wenig erforscht. Das Wissen über die physikalischen Zusammenhänge der Wärme- und Wasserdampfübertragung in Gebäuden, der natürlichen und künstlichen Beleuchtung von Innenräumen, der Schallübertragung in Gebäudestrukturen und des Lärmschutzes sowie der Entstehung und Ausbreitung von Bränden in Gebäuden war zu diesem Zeitpunkt begrenzt. Aufgrund der Relevanz dieser Themen für die Qualität des Wohn- und Arbeitskomforts gehören angemessene bauphysikalische Kenntnisse heute zu den grundlegenden Fähigkeiten von Bauplanern und -ingenieuren. (Willems, 2017; Medved, 2022)

Bereits 1943 sagte Winston Churchill „Wir formen unsere Gebäude und danach formen unsere Gebäude uns“ (Churchill, 1943, übersetzt aus dem Englischen). Diese Aussage behält bis heute ihre Richtigkeit. Lag in den Anfängen der Bauphysik der Fokus beispielsweise auf der Beschreibung des Wärmeschutzes aus energetischen Gründen, so liegt heute der Fokus nicht alleine auf diesem Themengebiet, sondern wird ergänzt um die Komponente des menschlichen Wohlbefindens. Trotzdem wird bei der Planung von Gebäuden der letztendliche Nutzer vernachlässigt. (Altomonte et al., 2020)

Zahlreiche Studien haben die Zusammenhänge zwischen der menschlichen Wahrnehmung des Raumklimas und den Bedingungen, die als komfortabel empfunden werden, untersucht. Es konnten eine ganze Reihe von physikalischen und chemischen Parametern gefunden werden, die nachweislich den subjektiven Komfort der Gebäudenutzer verändern. Um die für den Menschen akzeptablen Bereiche dieser Parameter zu definieren, wurden zahlreiche Normen verfasst. Allerdings hat sich herausgestellt, dass selbst bei Erfüllung aller normativen Vorgaben nicht alle Gebäudenutzer mit den raumklimatischen Bedingungen zufrieden sind. Zusätzlich können die gleichen Bedingungen in Innenräumen zu unterschiedlichen subjektiven Reaktionen führen. Der offensichtlichste Grund hierfür ist, dass jeder Mensch einzigartig ist und somit nicht jeder mit den gleichen Bedingungen zufrieden sein kann. Daraus kann geschlossen werden, dass es noch weitere Faktoren gibt, die unabhängig von den Umgebungsbedingungen sind und trotzdem mitbestimmen, ob diese als komfortabel empfunden werden oder nicht. Üblicherweise werden solche Faktoren nicht in den Normen berücksichtigt. (Frontczak & Wargocki, 2011)

Die Planung und der Betrieb von Gebäuden, die sowohl die komplexen Anforderungen der Nutzer an den Komfort als auch die geltenden Bauvorschriften und normativen Vorgaben berücksichtigen, bringen erhebliche Herausforderungen mit sich. (Altomonte et al., 2020; Donn, Selkowitz & Bordass, 2012)

Da jedoch insbesondere in entwickelten Ländern die Menschen einen Großteil ihrer Zeit in Innenräumen verbringen (Frontczak & Wargocki, 2011) sollte das bisherige bauphysikalische Wissen dazu verwendet werden, die Lücke zwischen den normativen Anforderungen und den tatsächlichen Auswirkungen, die Innenräume auf den Menschen in einer gegebenen Situation haben können, zu schließen. Hierfür können

aufgrund der individuellen Wahrnehmung und Bewertung der Innenraumumgebung künftig keine Standardwerte, die für sämtliche Personen anzusetzen sind, verwendet werden.

2 Zielstellung und methodisches Vorgehen

Das Ziel der meisten Normen ist es, neutrale Innenraumbedingungen für den Menschen unter Einhaltung von Mittelwerten zu schaffen, die für alle Gebäudenutzungen gleichermaßen gelten. Dabei wird sich sowohl auf das Gebäude an sich als auch auf die jeweilige Aktivität bezogen. (Bluyssen, 2010) Zusätzlich berücksichtigen diese Durchschnittswerte eine Standardperson und vernachlässigen vollständig die inter- und intraindividuellen Eigenschaften der Gebäudenutzer. (Altomonte et al., 2020) Nach Shafavi et al. (2020) sollen beispielsweise die Auswirkungen der visuellen Innenraumumgebung nicht mehr nur im Hinblick auf die Einhaltung von normativen Vorgaben bewertet werden; vielmehr sollen die individuellen physiologischen Reaktionen des menschlichen Körpers, die in einer entsprechenden Umgebung auftreten, bei der Bewertung berücksichtigt werden. Ähnliche Anforderungen an die zukünftige Forschung werden von Zhao, Lian und Lai (2021) für das thermische Wohlbefinden beschrieben. Bluyssen (2020) geht einen Schritt darüber hinaus und beschreibt das Bedürfnis zur Erfassung der physiologischen, psychologischen, persönlichen und sozialen Aspekte, die einen Einfluss auf das Wohlbefinden des Menschen in Innenräumen haben können. Somit wird das Ziel der vorliegenden Arbeit durch die folgende Hypothese formuliert:

Die raumphysiologischen Auswirkungen von bestehenden Gebäuden, welche aus der bauphysikalischen Umgebung resultieren und zu einer Abweichung vom neutralen Zustand des menschlichen Körpers führen können, lassen sich anhand einer Bilanzierungsmethode erfassen, die entsprechend den Grundsätzen der Methode der Ökobilanzierung aufgebaut ist.

Der Begriff der Raumphysiologie ergibt sich dabei aus der Definition der Physiologie, welche die Wissenschaft beschreibt, die sich mit den funktionellen Vorgängen im Organismus befasst. (Deutsches Universalwörterbuch, 2011) Silbernagl (2019) definiert die Physiologie zudem als den Versuch, die physikalischen und chemischen Faktoren, die für die Entstehung, die Weiterentwicklung sowie die Aufrechterhaltung des menschlichen, aber auch des pflanzlichen und des tierischen Lebens notwendig sind, zu erklären. Das Adjektiv physiologisch wird im deutschen Universalwörterbuch (2011) weiterhin definiert als die Physiologie betreffend. Der Begriff Raum wird im deutschen Universalwörterbuch (2011) beschrieben als eine Funktion (z. B. Nutzfunktion) erfüllender, von Wänden, Boden und Decke umschlossener Teil eines Gebäudes.

Aus der Zusammenführung dieser beiden Begriffe entsteht der Begriff der Raumphysiologie. Im Unterschied beispielsweise zur Tierphysiologie, die sich auf ein Tier bezieht, stellt die Raumphysiologie nicht den Bezug zum gebauten Raum, sondern zum Lebewesen, in diesem Fall den Menschen in diesem Raum dar. Somit wird die Raumphysiologie definiert als der Versuch, die funktionellen Vorgänge im menschlichen Organismus, die für die Entstehung, die Entwicklung sowie die Aufrechterhaltung des menschlichen Lebens verantwortlich sind und aus dem Aufenthalt in einem Raum resultieren, zu beschreiben. Die Aspekte der Entstehung sowie der Entwicklung des Organismus sind nicht Bestandteil

der vorliegenden Arbeit, gehören jedoch entsprechend der Definition nach Silbernagl (2019) zu den Aspekten der Physiologie und werden zur Vollständigkeit ebenfalls in der Definition der Raumphysiologie genannt.

Die raumphysiologischen Auswirkungen von Räumen lassen sich demnach als Auswirkungen beschreiben, die der Aufrechterhaltung des menschlichen Lebens in Innenräumen möglicherweise entgegenstehen. Dies bezieht sich jedoch nicht ausschließlich auf Auswirkungen, die das menschliche Leben dauerhaft beenden würden, sondern ebenfalls auf Auswirkungen, die den Menschen in seinem neutralen Zustand, wenn der Körper nicht auf seine Umgebung mittels physiologischer Prozesse reagieren muss, beeinflussen würden. Es soll nicht das Ziel sein, sämtliche raumphysiologischen Auswirkungen, die in Gebäuden auftreten können, zu bilanzieren. Es werden lediglich einzelne Auswirkungen der thermischen, lufthygienischen, visuellen und akustischen Umgebung berücksichtigt.

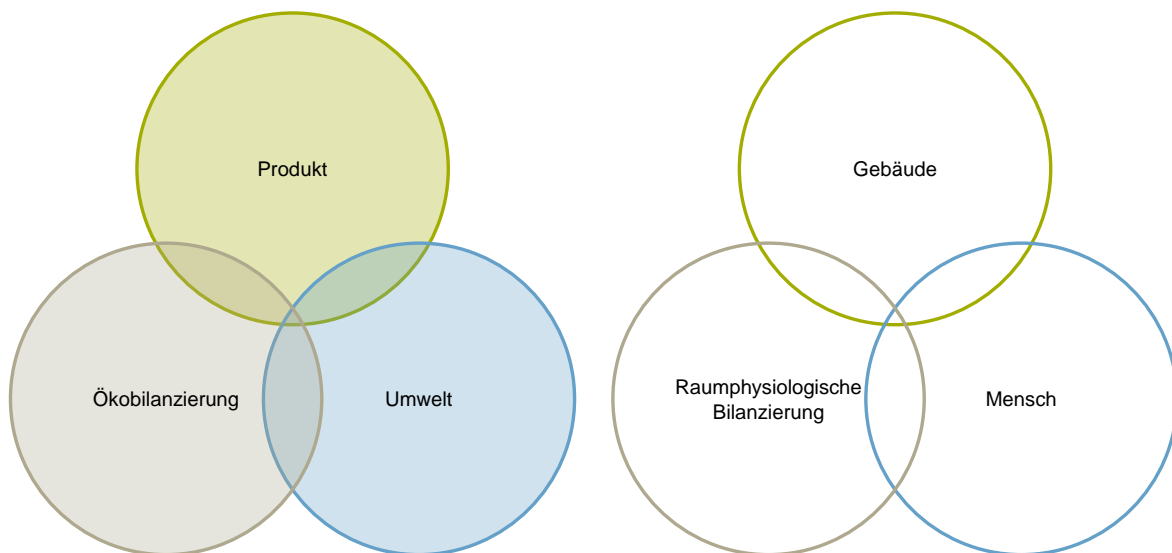


Abbildung 1: Analogiebetrachtung zwischen der Ökobilanzierung und der raumphysiologischen Bilanzierung

Die Wahl zur Nutzung der Grundsätze der Ökobilanzierung lässt sich anhand von drei Argumenten begründen.

1. Ähnliche Komplexität

Die Ökobilanzierung bewertet die Auswirkungen eines Produktes auf die Umwelt. Dabei werden sämtliche Input- und Output-Ströme dieses Produktes (im Verlauf seines Lebensweges) berücksichtigt und zu einzelnen Umweltauswirkungen zusammengefasst.

Die raumphysiologische Bilanzierung bewertet die Auswirkungen von bestehenden Gebäuden auf den Menschen. Dabei werden sämtliche Komponenten, die den Menschen umgeben, berücksichtigt und zu raumphysiologischen Auswirkungen zusammengefasst.

2. Bewertung von Auswirkungen

Die Ökobilanzierung bewertet die Auswirkungen von Produkten auf die Umwelt; die raumphysiologische Bilanzierung bewertet die Auswirkungen von Gebäuden auf den Menschen.

3. Auswirkungen werden nicht als Summe formuliert

Die Auswirkungen eines Produktes auf die Umwelt werden in der Ökobilanzierung nicht anhand eines einzelnen Werts, sondern für jede Auswirkung (definiert als Wirkungskategorie) einzeln beschrieben. Ebenso sollen die Auswirkungen in der raumphysiologischen Bilanz nicht mit einem einzelnen Wert beschrieben werden, sondern jede Auswirkung einzeln quantifiziert werden.

Das Ziel ist es, ein solches Bilanzierungsverfahren anzudenken und einen ersten Schritt in die Richtung einer einheitlichen Methode zur Bewertung der Auswirkungen von Innenräumen auf den Menschen zu gehen. Hier sollen bewusst vorerst nur die physiologischen Auswirkungen, die Gebäude oder Räume auf einen Menschen haben können, berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich um die Auswirkungen, die zu einer Abweichung des neutralen körperlichen Zustandes führen können und damit möglicherweise den Komfort sowie die Gesundheit beeinflussen. Mögliche daraus resultierende Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit oder das emotionale Befinden werden nicht berücksichtigt.

Zur Verifizierung der formulierten Hypothese gliedert sich die vorliegende Arbeit in zehn Kapitel. Die ersten zwei, die Einleitung sowie die Zielstellung und das methodische Vorgehen, beschreiben sowohl den Kontext als auch die Forschungshypothese und das in Abbildung 2 dargestellte methodische Vorgehen.

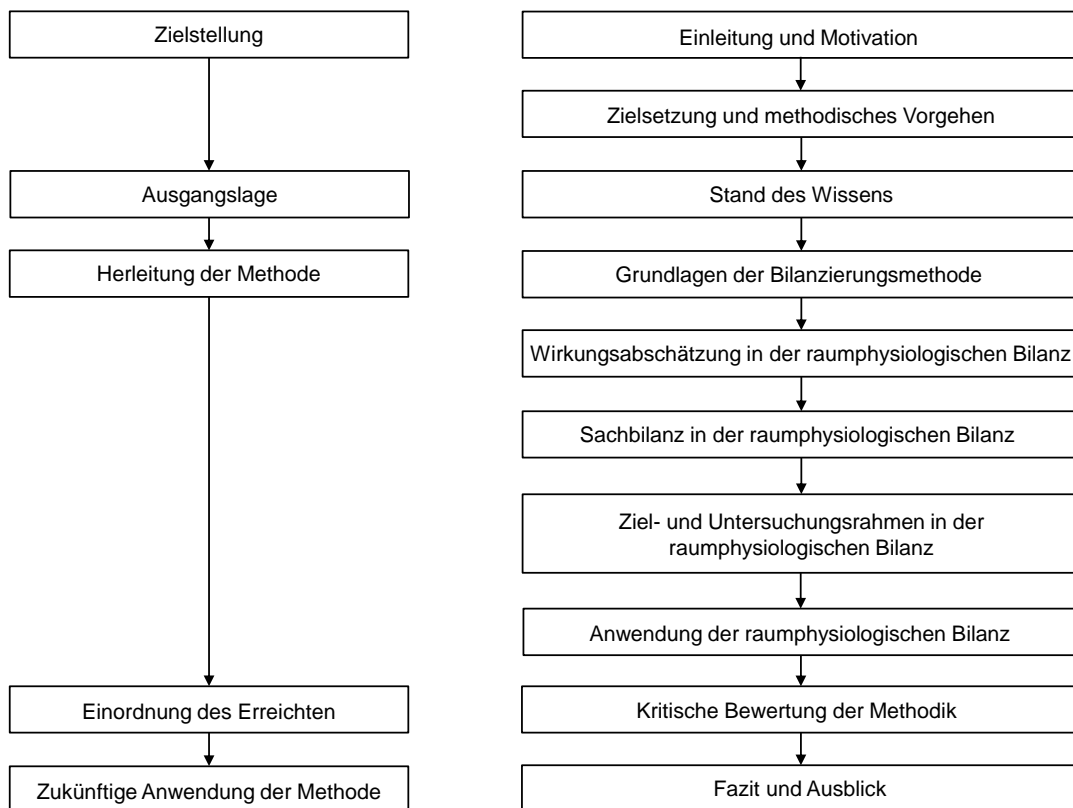


Abbildung 2: Aufbau der vorliegenden Dissertation

Der Stand des Wissens folgt im dritten Kapitel. Hierfür wird zunächst der Begriff des erweiterten Raumklimas mit den jeweiligen Einflüssen der thermischen (3.1), der lufthygienischen (3.2), der visuellen (3.3) und der akustischen (3.4) Umgebung beschrieben. Zudem wird für jeden der Einflussbereiche der Stand der Technik sowie der Stand der Forschung zur Bewertung der jeweiligen Auswirkungen abgebildet. Anschließend wird der Stand des Wissens zur Beurteilung des erweiterten Raumklimas untergliedert, nach subjektiven (3.5.1), objektiven (3.5.2) sowie subjektiv-objektiven (3.5.3) Verfahren, beschrieben. Zusätzlich werden mögliche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen bauphysikalischen Einflüssen (3.6) sowie die individuellen personenbezogenen Differenzen (3.7) bei der Wahrnehmung und der Bewertung der einzelnen Einflüsse des erweiterten Raumklimas dargestellt. Zum Abschluss erfolgt eine Bewertung des Stands des Wissens (3.8).

Ausgehend vom Stand des Wissens folgt die Herleitung der Methode. Hierfür werden in Kapitel vier die grundlegenden Definitionen der Ökobilanzierung unter Aufrechterhaltung der Struktur der Methode für die Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz angepasst. Dabei handelt es sich vorerst um die Definitionen, die für das allgemeine Verständnis der Methode zwingend notwendig sind. Alle weiteren Definitionen werden erst zu einem späteren Zeitpunkt bei der Herleitung der einzelnen Phasen der raumphysiologischen Bilanz beschrieben. Für die weitere Entwicklung der raumphysiologischen Bilanz wird die Methode von hinten nach vorne hergeleitet. Somit wird mit der Herleitung der letzten Phase, welche der Wirkungsabschätzung entspricht, in Kapitel fünf begonnen, um anschließend in Kapitel sechs die zweite Phase, die Sachbilanz und abschließend die erste Phase, die Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens herzuleiten. Diese Vorgehensweise begründet sich dadurch, dass im Gegensatz zur Ökobilanzierung die zu bilanzierenden Wirkungen und die dazugehörigen Einflüsse nicht bekannt sind. So kann weder ein Ziel noch ein Untersuchungsrahmen beschrieben werden, solange die zu bilanzierenden Wirkungen nicht definiert wurden. Gleiches gilt für die Erstellung einer Sachbilanz.

Das fünfte Kapitel definiert die einzelnen Bestandteile der Wirkungsabschätzung (5.1), um anschließend die einzelnen Wirkungskategorien zu beschreiben. Dabei wird zwischen der Wirkungskategorie der thermischen Umgebung (5.2), der lufthygienischen Umgebung (5.3), der visuellen Umgebung (5.4) und der akustischen Umgebung (5.5) differenziert. Jede der Wirkungskategorien wird weiter untergliedert in den Stand des Wissens der sensorischen Wahrnehmung der Einflüsse sowie deren numerische Darstellung, die Definition eines Wirkungsindikators und der Wirkungszonen sowie die Herleitung und die Anwendung des Wirkungsmechanismus. Anschließend wird die Auswertung der Wirkungsabschätzung (5.6) beschrieben sowie die methodische Validität der hergeleiteten Wirkungsabschätzung (5.7) überprüft. In Kapitel sechs wird ausgehend vom Wissen der für die Wirkungsabschätzung benötigten Parameter das Vorgehen der Sachbilanz hergeleitet. Dabei werden zuerst wiederum die Bestandteile der Sachbilanz (6.1) für die Anwendung der raumphysiologischen Bilanz definiert sowie der Stand des Wissens zur Erstellung einer Sachbilanz (6.2) dargestellt. Im Anschluss werden die Herleitung der Anwendung (6.3) und die Auswertung der Sachbilanz (6.4) beschrieben. Es folgt wiederum die Überprüfung der methodischen Validität der hergeleiteten Sachbilanz (6.5).

Im darauffolgenden siebten Kapitel wird die Definition des Ziels (7.1) sowie die Definition des Untersuchungsrahmens (7.2) in der raumphysiologischen Bilanz erläutert. Da die meisten Begriffe, die in dieser Phase definiert werden, bereits in der Herleitung der vorherigen Phasen definiert werden mussten,

handelt es sich, insbesondere bei der Definition des Untersuchungsrahmens, teilweise um eine Zusammenfassung der vorherigen Definitionen.

Anschließend werden im achten Kapitel zwei praktische Anwendungsbeispiele der raumphysiologischen Bilanz präsentiert. Im neunten Kapitel wird durch eine kritische Hinterfragung der Methodik das Erreichte eingeordnet. Dabei wird auf den Aufbau (9.1) sowie die Limitationen (9.2) der raumphysiologischen Bilanz eingegangen und die neue Methode zusätzlich in den Stand des Wissens eingeordnet (9.3).

Daraufhin folgt im letzten Kapitel ein Fazit sowie ein Ausblick zum Aufzeigen weiterer Anwendungsmöglichkeiten sowie des weiteren Forschungsbedarfs.

3 Stand des Wissens

Eine der zentralen Aufgaben der Gebäude- und der Raumplanung besteht darin, die Räume so zu gestalten, dass der Nutzer eine möglichst hohe Aufenthaltsqualität hat. Ein Nutzer soll sich nicht nur wohlfühlen in den Räumen, sondern seine Gesundheit soll langfristig nicht gefährdet werden. Die Umsetzung dieser Anforderung ist in der Realität mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden, die sowohl die räumlich-gestalterischen Komponenten als auch die materialbezogenen Eigenschaften, aber auch die aus der Bauphysik resultierenden raumklimatischen Bedingungen im weitesten Sinn berücksichtigen müssen. Die letztendliche Aufenthaltsqualität wird somit von einer Reihe von Einflussfaktoren, welche sich aus der Umgebung des Menschen ergeben, definiert. (Wagner & Lützkendorf, 2015a) Nach Sedlbauer et al. (2006) zählen zu diesen äußeren Einflüssen, welche im weitesten Sinn zum Raumklima gezählt werden, Licht, Schall, Gerüche, stoffliche Emissionen, Wärme und Feuchte. Diese Faktoren können den Menschen beeinflussen, werden jedoch im Gegenzug vom Verhalten des Menschen in einem Gebäude selbst beeinflusst. Der Begriff des Raumklimas ist zurückzuführen auf die Analogie zum Außenklima, welches das Zusammenwirken von meteorologischen Parametern darstellt. Sowohl die Lufttemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit, Strahlungseinflüsse und Luftbewegungen treten nicht nur außerhalb des Gebäudes, sondern auch innerhalb des Gebäudes auf und definieren damit im Wesentlichen das thermische Raumklima. Weitere Faktoren wie der Schall oder Emissionen in der Luft sind jedoch nach der Definition keine Klimaparameter, weswegen ihre Zuordnung zum Raumklima als kritisch zu betrachten ist. (Sedlbauer et al., 2006) In der englischen Sprache gibt es daher die Unterscheidung zwischen dem Begriff „*indoor climate*“, welcher das Raumklima repräsentiert und dem Begriff „*indoor environment*“, welcher wörtlich übersetzt die Raum-Umwelt bedeutet. Dem Begriff der Raum-Umwelt ist der Begriff des erweiterten Raumklimas vorzuziehen. (Sedlbauer et al., 2006) Nach Bluysen (2009) lässt sich dieses erweiterte Raumklima in vier Kategorien aufteilen, welche einen direkten Einfluss auf die sensorische Wahrnehmung haben und auf diesem Weg sowohl den Komfort als auch die Gesundheit beeinflussen können. Bei diesen vier handelt es sich um die thermische Umgebung, die visuelle Umgebung, die akustische Umgebung und die lufthygienische Umgebung. Die folgende Tabelle 1 zeigt zusammenfassend nach Sedlbauer et al. (2006), Bluysen (2009), Wagner und Lützkendorf (2015b) und Hohenegger (2020) die physikalischen Parameter, die für die Entstehung der jeweiligen Umgebung sorgen, beispielhafte Entwurfsentscheidungen sowie Standortbedingungen, die diese physikalischen Parameter beeinflussen können, beispielhafte Auswirkungen auf die menschliche Sinneswahrnehmung und die daraus resultierenden Auswirkungen des erweiterten Raumklimas auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Menschen in Innenräumen. Somit wird zwischen der menschlichen Wahrnehmung, die auf physiologischer Ebene stattfindet, und dem menschlichen Wohlbefinden, das aus der bewussten oder unbewussten Verarbeitung und Bewertung dieser Wahrnehmungen resultiert, unterschieden.

Tabelle 1: Zusammenfassender Überblick über die Einflüsse und Auswirkungen des erweiterten Raumklimas

Einteilung	Thermische Umgebung	Visuelle Umgebung	Akustische Umgebung	Lufthygienische Umgebung
Physikalische Parameter	Lufttemperatur Strahlungstemperatur Relative Luftfeuchte Luftgeschwindigkeit	Beleuchtungsstärke Leuchtdichte Farbtemperatur Tageslichtversorgung	Schalldruckpegel Frequenzen	Luftqualität CO ₂ -Konzentration Luftwechsel
Entwurfsentscheidungen	Art der Wärmedämmung Bauweise Art der Fenster Heizflächen/-körper	Reflexionsgrade Größe/Lage der Fenster Art der Verschattung Beleuchtungsanlage	Absorptionsgrade Schalldämmung Nachhallzeit Raumgeometrie	Wahl von Bauprodukten Art der Lüftung Position der Luftauslässe
Standortbedingungen	Außenklima	Lokale Besonnung/ Verschattung	Außenlärmpegel	Qualität der Außenluft
Auswirkungen: menschliche Wahrnehmung	Schwitzen / Kältezittern Erweitern / Verengen der Blutgefäße Erschöpfung Schlaganfälle	Störung des Sehvermögens Verringerung des Sichtfeldes wegen blendendem Licht Trübung der Linse	Störung des Hörvermögens Dauerhafter Hörverlust Hormonelle Reaktionen	Allergische Reaktionen Husten Kurzatmigkeit
Auswirkungen: menschliches Wohlbefinden	Thermische Zufriedenheit Veränderte Aufmerksamkeit	Visuelle Zufriedenheit Konzentrationschwäche Einfluss zirkadianer Rhythmus Überanstrengung der Augen und Kopfschmerzen	Akustische Zufriedenheit Ablenkung/Ermüdung Nervosität	Lufthygienische Zufriedenheit Geruchsbelästigung Kopfschmerzen Reizungen

Neben diesen Parametern, die sich ausschließlich auf das Gebäude in einer bestimmten Umgebung beziehen, werden die Auswirkungen, die beim Menschen entstehen, zusätzlich durch diesen selber beeinflusst. (Schneider, 2022) Die Hintergründe dieser individuellen Wahrnehmung und Bewertung werden in Kapitel 3.7 näher betrachtet.

Zur Planung eines angenehmen erweiterten Raumklimas können eine Reihe von Normen und Richtlinien genutzt werden. Allerdings bedeutet ein normgerechtes erweitertes Raumklima nicht zwangsläufig, dass jeder Nutzer dieses erweiterte Raumklima als angenehm empfindet. Die Wechselwirkungen zwischen dem Menschen und dem erweiterten Raumklima sowie zwischen den einzelnen Raumklimaparametern und den Außenbedingungen sind zu vielfältig, als dass durch die Einhaltung beispielsweise eines Grenzwerts für die Raumlufttemperatur zwangsläufig angenommen werden kann, dass diese Temperatur von jedem Nutzer als angenehm empfunden wird. Somit kann auch ein normgerecht geplantes erweitertes Raumklima negative Auswirkungen auf den Raumnutzer haben. Hinzu kommt, dass die beteiligten Planer oftmals nicht über einen ausreichenden Kenntnisstand zu den Komfortaspekten verfügen. Auf der anderen Seite sind die Anforderungen der Bauherren häufig unpräzise und werden pauschal für das gesamte Gebäude formuliert, ohne dabei einzelne Räume zu differenzieren. Nicht selten wird heutzutage das geforderte Komfortniveau implizit über ein gewünschtes Nachhaltigkeitszertifikat festgelegt. Anhand der Normen müssen Komfortnachweise erbracht werden, um zu belegen, dass die vorgesehenen Werte eingehalten werden. Allerdings gibt es dafür meist nur stark vereinfachte Berechnungsverfahren, mit denen das erweiterte Raumklima nicht in entsprechend hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung betrachtet werden kann. Viele dynamische Aspekte des erweiterten Raumklimas können mit solchen pauschalen Verfahren gar nicht erfasst werden. Zusätzlich wird bei derartigen Nachweisen der Nutzer mit einem standardisierten Verhaltensprofil berücksichtigt; auch das spiegelt die Realität nicht ausreichend wider. (Wagner, 2015)

Aufgrund dieser Unwissenheit und der pauschalen Vorgaben bezüglich der Erwartungen an das erweiterte Raumklima wird es ersichtlich, dass das erweiterte Raumklima nicht ausreichend auf den späteren individuellen Nutzer abgestimmt wird.

Im Folgenden werden die vier Aspekte des erweiterten Raumklimas sowohl einzeln als auch im Zusammenspiel betrachtet. Dafür werden nicht nur die von den Normen geforderten Werte abgebildet, sondern es werden zusätzlich die entsprechend dem Stand der Forschung vorgeschlagenen Bewertungsansätze dargestellt.

3.1 Thermische Umgebung

Die Auswirkungen der thermischen Umgebung und damit verbunden der thermische Komfort ist im Vergleich zum visuellen, akustischen und lufthygienischen Komfort der am weitesten erforschte und dementsprechend auch am meisten reglementierte Komfortaspekt. Für die Bewertung einer thermischen Umgebung muss zwischen dem thermischen Empfinden und der thermischen Behaglichkeit unterschieden werden. Die thermische Behaglichkeit beschreibt die Zufriedenheit mit einer thermischen Umgebung, während das thermische Empfinden die vom Körper wahrgenommene Temperatur beschreibt. Somit bildet das thermische Empfinden (bspw. warm oder kalt) die Grundlage für die thermische Behaglichkeit (bspw. zu warm oder zu kalt, unbehaglich oder behaglich). Das thermische Empfinden umfasst lediglich die physiologische Wahrnehmung, während die thermische Behaglichkeit diese Wahrnehmung um eine psychologische Komponente in einem bestimmten Kontext ergänzt.

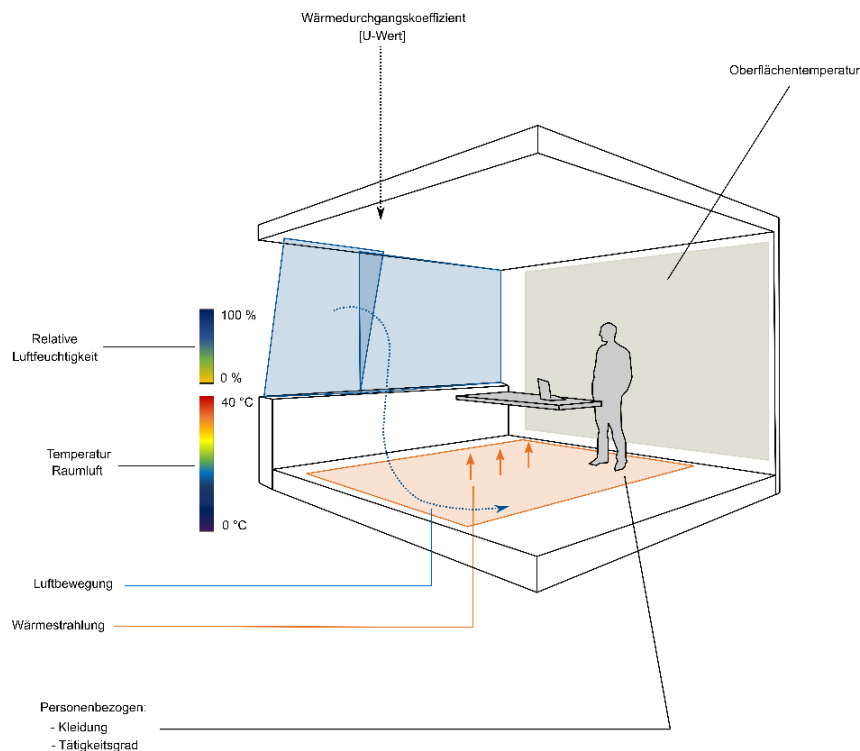


Abbildung 3: Thermische Umgebung des Menschen (in Anlehnung an Hausladen, Liedl & Saldanha, 2012)

Die Grundvoraussetzung für ein neutrales thermisches Empfinden ist eine ausgeglichene Wärmebilanz des menschlichen Körpers. Dabei befindet sich der Körper in einem thermischen Gleichgewicht, ohne dass er dafür einen erhöhten thermoregulatorischen Aufwand wie Schwitzen oder Kältezittern aufbringen muss. Die Wärmebilanz eines jeden Menschen wird maßgeblich durch sechs Faktoren beeinflusst. Dabei kann zwischen den in Tabelle 1 genannten physikalischen Umgebungsparametern und den individuellen Parametern unterschieden werden. Die physikalischen Umgebungsparameter beeinflussen den Wärmeaustausch des Körpers mit dem umgebenden Raum, welcher über drei Übertragungswege stattfinden kann. Der konvektive Wärmeaustausch wird durch die Lufttemperatur und die mittlere

Luftgeschwindigkeit bestimmt, während der Strahlungswärmeaustausch über die Temperatur der umgebenden Oberflächen bestimmt wird. Letztlich wird der Wärmeaustausch über Verdunstung maßgeblich durch die relative Luftfeuchte im Raum beeinflusst. (Schweiker et al., 2015)

Zu den individuellen Faktoren zählen die jeweilige Aktivität der Person, da diese für die interne Wärmeproduktion verantwortlich ist. Je anstrengender eine Aktivität, umso mehr Wärme wird der Körper produzieren. Da in einem gesunden Körper keine Wärme gespeichert wird, wird diese zusätzliche Wärme an die Umgebung abgegeben. Ein weiterer individueller Einfluss ist die Bekleidung, welche wie eine Wärmedämmung an einem Gebäude wirkt. Umso mehr der Körper gedämmt ist, desto weniger Wärme geht an die Umgebung verloren.

Es gibt eine Reihe an Modellansätzen zur Bewertung des thermischen Empfindens sowie der thermischen Behaglichkeit. Diese unterscheiden sich grundsätzlich darin, ob sie sich lediglich auf das Empfinden oder die daraus resultierende Behaglichkeit beziehen und variieren dementsprechend in ihrer Komplexität. Die Ansätze reichen von der Angabe von Temperaturbereichen über Klimasummenmaße, für die experimentell geeignete Werte bestimmt wurden, stationäre Wärmebilanzmodelle, thermophysiologische Modelle bis hin zu statistischen Ansätzen, die auf den Ergebnissen großer Befragungen basieren. (Schweiker et al., 2015)

3.1.1 Bewertung der thermischen Umgebung: Stand der Normen

Entsprechend der Vielzahl an Modellen zur Bewertung der thermischen Umgebung gibt es eine Reihe von Ansätzen, die für ihre Anwendung normiert wurden. Im Folgenden werden ausschließlich Ansätze berücksichtigt, die sich auf das globale thermische Empfinden/Behaglichkeit jedoch nicht auf lokale Temperatureinwirkungen beziehen. Die operative Temperatur (DIN EN ISO 7730, 2006), welche ein Klimasummenmaß darstellt und sowohl den Einfluss der Luft- und Strahlungstemperatur als auch der Luftgeschwindigkeit abbildet, wird vor allem in kalten und gemäßigten Klimazonen als Bewertungsmaßstab herangezogen. In anderen Klimazonen oder zu Jahreszeiten, in denen der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die thermische Behaglichkeit deutlich mehr ins Gewicht fällt, empfiehlt es sich dagegen, die in der DIN 33403-3 (2011) beschriebenen Klimasummenmaße zu verwenden. Diese gelten jedoch ausschließlich zur Beschreibung der thermischen Empfindung oberhalb des Temperaturbereichs, in dem der Mensch thermisches Behagen empfinden kann. Dabei handelt es sich um die Basis- und Normaleffektivtemperatur nach Yaglou (1927) und Yaglou (1947), den *Wet Bulb Globe Temperature Index* nach Yaglou & Minaed (1957) sowie die vorhergesagte Wärmebeanspruchung nach Malchaire et al. (2001).

Deutlich komplexer und umfassender in ihrer Berechnung sind dagegen Wärmebilanzmodelle sowie thermophysiologische Modelle. Dabei wird das thermische Empfinden durch die Bestimmung der Wärmegewinne und Wärmeverluste an einem standardisierten menschlichen Körper abgeleitet. Das bekannteste Wärmebilanzmodell wurde von Fanger (1970) entwickelt und ist genau wie die operative Temperatur in der DIN EN ISO 7730 (2006) festgehalten. Das Modell dient zur Berechnung eines vorhergesagten mittleren thermischen Empfindens einer Gruppe von Menschen in mechanisch belüfteten Gebäuden (Rupp, Vásquez & Lamberts, 2015). Der *Predicted Mean Vote* (PMV) wird auf einer sieben-stufigen Skala von heiß über warm, etwas warm, neutral, etwas kühl, kühl und kalt abgebildet. Für ein neutrales thermisches Empfinden muss ein PMV von 0 erreicht werden (+3 entspricht heiß, -3

entspricht kalt). Ergänzend zum PMV kann der vorhergesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (*Predicted Percentage of Dissatisfied*, PPD) ermittelt werden. Dieser gibt an, wie viel Prozent der Personen in der betrachteten Gruppe mit der thermischen Umgebung unzufrieden sind. Dabei ist anzumerken, dass selbst ein PMV von 0 einem PPD von 5 % entspricht. (Schweiker et al., 2015) Trotz der weiten Verwendung des PMV/PPD-Verfahrens gibt es Kritik an dieser Methode, unter anderem deswegen, da in Feldstudien belegt werden konnte, dass selbst in Gebäuden, die rechnerisch eine sehr hohe Zufriedenheitsrate erreichen, lediglich 80 % bis 85 % der Personen mit ihrer thermischen Umgebung zufrieden sind. (Hellwig, 2005; Gossauer, 2008) Humphreys und Nicol (2002) kamen sogar zum Schluss, dass die Nutzung des PMV, so wie er auch heute noch in der DIN EN ISO 7730 (2006) festgehalten ist, irreführend bei der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit sein kann.

Adaptive Behaglichkeitsmodelle schließen im Gegensatz zu den Wärmebilanzmodellen den Kontext der Bewertungssituation mit ein. Diese Ansätze beruhen auf der Auswertung von Feldstudien und gelten für definierte Aktivitäten in bestimmten Umgebungen. Adaptive Modelle sind *Black-Box* Modelle, die nicht jeden einzelnen Einfluss durch einen Berechnungsansatz berücksichtigen, sondern sie geben einen Bereich behaglicher Operativtemperaturen in Abhängigkeit von der Außentemperatur sowie der Aktivität an; dies jedoch unter der Voraussetzung, dass der Mensch eine der Situation angepasste Bekleidung trägt und die Möglichkeit hat, das thermische Raumklima zu verändern. Somit kann das adaptive Modell nicht genutzt werden, wenn der betrachtete Raum über eine maschinelle Lüftung verfügt. (Schweiker et al., 2015) Das adaptive Modell nach McCartney und Nicol (2002), basierend auf Dear, Brager und Cooper (1997) ist in der DIN EN 16798-1 (2022) (ehemals DIN EN 15251) festgehalten. Dieses Modell beruht auf der Prämisse, dass der Mensch, wenn er sich thermisch unbehaglich fühlt, die Möglichkeit hat sich an seine Umgebung anzupassen. Nach Dear, Brager und Cooper (1997) können diese Adaptationsprozesse in drei Kategorien untergliedert werden. Es ist zu unterscheiden zwischen den Verhaltensanpassungen, die alle bewussten und unbewussten Anpassungen des Menschen wie beispielsweise das Ablegen eines Kleidungsstückes oder das Öffnen eines Fensters berücksichtigen. Des Weiteren kann unterschieden werden zwischen den physiologischen Anpassungen, z. B. Veränderung der Schweißrate und den psychologischen Anpassungen, z. B. Erwartungen und Erfahrungen das thermische Raumklima betreffend. Nach Nicol und Wilson (2011) und Humphreys, Rijal und Nicol (2010) ist die Nutzung des adaptiven Modells, so wie es in der deutschen Normung festgehalten ist, aufgrund des vereinfachten Verhältnisses zwischen der Außen- und der Innentemperatur als kritisch zu betrachten. Für jede Außentemperatur wird ein Wertebereich für die komfortable Innentemperatur gegeben. Bei diesem handelt es sich um den realen Komfortbereich und nicht um eine Fehlerverteilung um einen Mittelwert. So kann der Temperaturbereich, der von den Gebäudenutzern als behaglich empfunden wird, vorausgesagt werden. Die tatsächlich bevorzugte Temperatur kann jedoch davon abweichen. Nicol und Cunill (2010) konnten nachweisen, dass die nach der EN 15251 als zu kalt eingestuften Büroräume, als komfortabel empfunden wurden und Büroräume, die nach der EN 15251 als komfortabel eingestuft wurden, tatsächlich als zu warm empfunden wurden.

Neben diesen drei Ansätzen zur Bewertung des thermischen Raumklimas in Bezug auf die Empfindung und die Behaglichkeit gibt es weitere Anforderungen, die an Innenräume in Bezug auf ein angenehmes Raumklima gestellt werden, so beispielsweise die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz

entsprechend der DIN 4108-2 (2013). Diese sind für die Darstellung der Bewertung der thermischen Umgebung jedoch nur von untergeordneter Bedeutung und werden nicht weiter im Detail erläutert. Dagegen ist die Bewertung der Auswirkung von Sonnenschutzvorrichtungen auf den thermischen Komfort von größerer Bedeutung. Diese lassen sich nach der DIN EN 14501 (2021) anhand des Gesamtenergiedurchlassgrads, dem sekundären Wärmeabgabegrad in den Raum sowie dem senkrechten Strahlungstransmissionsgrad beschreiben.

Trotz der Nutzung der verschiedenen Bewertungsmodelle werden die Temperaturen in Innenräumen häufig als unangenehm empfunden. Dieses Problem ist darauf zurückzuführen, dass die Normen objektive Kriterien zur Bewertung des Raumklimas vorgeben, während das tatsächliche thermische Empfinden der Nutzer und damit verbunden die thermische Behaglichkeit durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Die Komfortbereiche, die in den Normen vorgegeben werden, sollen von einem großen Prozentsatz der Nutzer als angenehm empfunden werden; jedoch ist dies nicht gleichzusetzen mit optimalen Randbedingungen für jedes Individuum. (Schweiker et al., 2015)

3.1.2 Bewertung der thermischen Umgebung: Stand der Forschung

Trotz des Vorhandenseins von bereits normierten Modellen zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit gibt es weitere Forschung in diesem Bereich, die zur Weiterentwicklung der Bewertung der thermischen Behaglichkeit geführt hat.

Durch die Kritik am *Predicted Mean Vote*, dass dieser in Gebäuden ohne Klimaanlage insbesondere in warmen Regionen ein höheres thermisches Empfinden vorhersagt, als dies tatsächlich der Fall ist, wurde der *Extended Predicted Mean Vote* abgeleitet. Dieser berücksichtigt, dass Menschen, die ihr Leben lang in einem warmen Gebiet wohnen und dies sowohl innerhalb als auch außerhalb des Gebäudes gewohnt sind, ein warmes Umgebungsklima als akzeptabler empfinden als Menschen, die es gewohnt sind, sich in wohltemperierten Gebäuden aufzuhalten. Um diese Adaptation zu berücksichtigen, wurde der Erwartungsfaktor eingeführt. Dabei handelt es sich um einen dimensionslosen Multiplikator des errechneten PMV. Dieser ergibt sich in Abhängigkeit vom Klima sowie der Klimatisierung des jeweiligen Gebäudes. (Fanger & Toftum, 2002) Zhang et al. (2018) beschreiben zudem, dass der PMV bei Gebäuden mit einem hohen Fensterflächenanteil aufgrund der direkten solaren Einstrahlung zu falschen Ergebnissen führt. Für entsprechende Innenräume wurde der *Corrected Predicted Mean Vote* CPMV eingeführt. Dieser berücksichtigt sowohl einen solaren Strahlungsterm als auch den langwelligen Strahlungsaustausch zwischen dem Menschen und seiner Umgebung.

Eine weitere Entwicklung des PMV ist der *Adaptive Predicted Mean Vote*, abgeleitet nach Yao, Li und Lui (2009) sowie Kim et al. (2015). Bei diesem Ansatz wird der berechnete PMV mit einem dimensionslosen Adaptationskoeffizienten multipliziert. Dieser ist in warmen Umgebungen positiv, während er in kälteren Umgebungen einen negativen Wert annimmt. Je höher der absolute Wert dieses Koeffizienten, desto größer ist der Einfluss der psychologischen und Verhaltens-Anpassung auf den PMV. (Dear et al., 2020) Diese Weiterentwicklungen des *Predicted Mean Vote* sollen dabei helfen, die *Black-Box* der adaptiven Modelle, die sich aus den Feldversuchen ergeben, in ein transparentes Modell zu wandeln. Nach Dear et al. (2020) ist dies jedoch keinem der Ansätze ausreichend gelungen. Lediglich das Modell nach Schweiker und Wagner (2015) bietet einen zufriedenstellenden Ansatz, in dem die Verhaltensanpassungen über eine

Veränderung der Bekleidung und die psychologischen sowie die physiologischen Anpassungen über die metabolische Rate quantifiziert werden. Dennoch werden in diesem Modell die Erwartungen an das thermische Raumklima nicht berücksichtigt.

Die adaptiven Modelle wurden ebenfalls weiterentwickelt, dies insbesondere unter dem Aspekt, dass Menschen, die in unterschiedlichen klimatischen Regionen leben, aufgrund der Adaptation diese anders wahrnehmen. Somit ist das adaptive Modell, das für den europäischen Standard gilt, beispielsweise nicht für die Anwendung in einer heißen Klimazone geeignet. So wurden für unterschiedliche Klimata, ausgehend von dem ursprünglichen, adaptiven Komfortmodell weitere Modelle abgeleitet. Trotz dieser klimatischen Anpassung fehlt bislang eine Anpassung an unterschiedliche Personengruppen (z. B. ältere Menschen oder Kinder). (Zhao, Lian & Lai, 2021)

Neben der Weiterentwicklung der gruppenbezogenen Modelle wurde ebenfalls das individuelle thermische Empfinden erforscht, insbesondere durch thermophysiologische Modelle wie das Zwei-Knoten oder Mehrfach-Knoten Modell. Beim Zwei-Knoten Modell wird der Körper vereinfacht als eine Zwei-Schichten Struktur, bestehend aus Haut und Körperkern, betrachtet. Diese werden als konzentrische Kreise dargestellt. (Gagge, Stolwijk & Nishi, 1971). Während in dem ursprünglichen Modell der Körper als ein einziges Segment betrachtet wurde, wurde das Modell dahingehend weiterentwickelt, dass der Körper in mehrere einzelne Zwei-Knoten Segmente untergliedert wird. (Kaynakli, Unver & Kilic, 2003; Kaynakli & Kilic, 2005; Foda & Sirén, 2011)

Das Mehrfach-Knoten-Modell ist ähnlich dem Zwei-Knoten-Modell aufgebaut, mit dem Unterschied, dass der Körper bereits im ursprünglichen Modell in mehrere Segmente unterteilt wurde und jedes dieser Segmente nicht nur aus Haut und Körperkern besteht, sondern unterteilt wird in Haut, Fett, Muskeln und Knochen. Jede Schicht in jedem Segment wird als eigener Wärmeübertragungsknoten mit seinen physiologischen Eigenschaften unter Berücksichtigung des Energie- und Masseerhaltungsgesetzes betrachtet. (Zhao, Lian & Lai, 2020) Ausgehend von dem ursprünglichen Modell nach Stolwijk (1971), hat jedes der daraus entstandenen Modelle seinen eigenen Eigenschaften. So umfasst das Modell nach Fiala, Lomas und Stohrer (1999) 15 Segmente mit insgesamt 187 Knoten und sieben verschiedene Schichten, während das Modell nach Huizenga, Hui und Arens (2001) sowie Zhang et al. (2001) lediglich fünf Schichten abbildet, eine davon die Bekleidung darstellend. Tanabe et al. (2002) haben als zusätzlichen Knoten das zentrale Durchblutungssystem berücksichtigt und das Modell nach Kingma (2012) sowie Kingma et al. (2012) wurde um die Komponente der Neurophysiologie der Thermorezeption ergänzt. (Katić, Li & Zeiler, 2016)

Neuere Studien nutzen im Gegensatz zu all den vorherigen Ansätzen nicht den Energieumsatz des Menschen als Grundlage, sondern die Exergie. (Rupp, Vásques & Lamberts, 2015) Nach Shukuya (2009) kann der Stoffwechsel des Menschen als Exergie-Entropie-Prozess angesehen werden und die thermische Behaglichkeit ist abhängig von einer ausgeglichenen Körper-Exergie Bilanz. Dieser Ansatz wird unter anderem unterstützt nach Mady et al. (2014), Ala-Juusela und Shukuya (2014), Caliskan (2013), Schweiker und Shukuya (2012), Matjaž, Prek und Butala (2012), Prek und Butala (2010), Molliet und Mady (2021) sowie Garcia et al. (2018).

Seit 2016 werden zudem vermehrt *Machine Learning* und *Big Data* Ansätze zur Bewertung des thermischen Empfindens und der Behaglichkeit eingesetzt. Die Genauigkeit der Vorhersage kann durch

die Nutzung von rein mathematisch statistischen Ansätzen deutlich erhöht werden. (Zhao, Lian & Lai, 2021) Fard, Zomorodian und Korsavi (2022) belegen, dass die Nutzung von *Machine Learning* in Studien zum thermischen Komfort von Personengruppen, die klassischen *Predicted Mean Vote* und adaptiven Modelle in der Genauigkeit um knapp ein Drittel übersteigen, während die Genauigkeit bei der personenbezogenen Verwendung sogar um 74 % höher lag. Zudem konnten sie nachweisen, dass die Nutzung von physiologischen Parametern (z. B. Hauttemperatur, Sauerstoffsättigung des Blutes) die Vorhersagegenauigkeit für die personenbezogene Anwendung um 97 % erhöht. Trotz dieser sehr positiven Aspekte stehen die *Machine Learning* Ansätze in der Kritik, da es sich ebenfalls um *Black-Box* Modelle handelt und sie somit nicht dazu beitragen, die Zusammenhänge zwischen den Inputs und den Outputs aufzuklären. (Dear et al., 2020)

Nach Zhao, Lian und Lai (2021) sollte die zukünftige Forschung dafür genutzt werden, um Komfortmodelle zu entwickeln, welche die physiologischen Mechanismen im menschlichen Körper berücksichtigen und auch in einer nicht stationären Umgebung angewandt werden können. Zum jetzigen Zeitpunkt werden die Klimakammer oder Feldstudien als Grundlage zur Recherche genutzt. Während die Klimakammer eine kontrollierte Steuerung insbesondere eines ungleichmäßigen Raumklimas ermöglicht, haben die Feldstudien den Vorteil, dass die psychologischen Erfahrungen in einer realen Situation erfasst werden können. Das Ziel sollte es sein, diese zwei Ansätze sowie die jeweiligen Vorteile der dargestellten Ansätze zu einem einheitlichen Modell zusammenzuführen.

3.2 Lufthygienische Umgebung

In entlegenen Kontinentalgebieten enthält frische Luft circa 78 % Stickstoff, 20 % Sauerstoff, 0.9 % Argon, 0.034 % Kohlenstoffdioxid und geringste Anteile weiterer Spurengase wie Neon, Helium, Methan, Ozon. (Keune, 2020) Insbesondere in besiedelten Gebieten können eine Reihe von weiteren Stoffen in der Umgebungsluft festgestellt werden, deren anthropogener Ursprung auf menschliche Handlungen zurückzuführen ist. (Wagner, Hellwig & Scherer, 2015) Neben diesen anthropogenen chemischen, sowohl organischen als auch anorganischen Verunreinigungen lassen sich in Innenräumen zusätzlich biologische Verunreinigungen auffinden. Zu den chemischen Verbindungen zählen Gase, Dämpfe und Feinstaub. Biologische Verunreinigungen bestehen aus mikrobiologischen Partikeln von Schimmelpilzen, Viren, Bakterien oder Pollen, die sich gegebenenfalls an Oberflächen festsetzen. (Bluyssen, 2009) Die wichtigsten Luftverunreinigungen in Innenräumen sind in der folgenden Tabelle 2 sowohl mit ihrem Ursprung als auch mit ihren möglichen Auswirkungen dargestellt.

Die dabei entstehenden Auswirkungen gefährden jedoch nicht jede Person gleichermaßen. So zählen insbesondere ältere Personen, Kinder oder vorerkrankte Personen (bspw. Asthma oder COPD) zu den Risikogruppen, die besonders gefährdet sind, unter den in Tabelle 2 genannten Auswirkungen zu leiden. (Scientific Committee on Health and Environmental Risks, 2007)

Für den lufthygienischen Komfort ist die Konzentration der Schadstoffe, denen die einzelne Person ausgesetzt ist, entscheidend. Diese Konzentration wird durch drei Faktoren beeinflusst: zum einen durch die Emissionsrate der Schadstoffe in dem betrachteten Raum, durch die Lüftungsrate dieses Raums und durch die Konzentration an Schadstoffen in dem Lüftungsstrom. Die Belastung der Luftschadstoffe wird

zusätzlich durch die Luftgeschwindigkeit, die Temperatur, die relative Luftfeuchte sowie die im Raum stattfindenden Aktivitäten beeinflusst. (Bluyssen, 2009) Sowohl Fang, Clausen und Fanger (1998) als auch Berglund und Cain (1989) konnten nachweisen, dass die empfundene Luftqualität sich bei ansteigender Lufttemperatur und ansteigender Luftfeuchte verschlechtert, während die olfaktorische Wahrnehmung unverändert blieb. Schmidt und Lang (2007) beschreiben dagegen einen Einfluss der Luftfeuchte und der Temperatur auf das Riechvermögen. Zusätzlich zu den bereits genannten Einflüssen spielt die Zeitkomponente eine Rolle, dies zum einen bezogen auf das Alter von beispielsweise Gebrauchsgegenständen und zum andern auf die Dauer der Exposition des Menschen. (Bluyssen, 2009)

Tabelle 2: Chemische Luftverunreinigungen in Innenräumen mit ihrem Ursprung und den möglichen Auswirkungen (nach Tran, Park & Lee, 2020 und Zhang & Srinivasan, 2020)

Verunreinigung	Ursprung	Auswirkung
Feinstaub PM	Kochen Verbrennungsprozesse Zigarettenrauch Kerzen	Veränderung der Herzfrequenz Verschlechterte Lungenfunktion Atemwegsbeschwerden
Flüchtige organische Stoffe VOC	Farben Lösungsmittel Holzschutzmittel Putzmittel Drucker und Kopiergeräte Baumaterialien Einrichtungsgegenstände	Reizungen der Augen, Nase und des Rachens Kopfschmerzen Schäden der Leber, Nieren und des zentralen Nervensystems Krebs
Stickstoffdioxid NO ₂	Gasbetriebene Geräte	Atemwegsbeschwerden
Ozon O ₃	Kopiergeräte Luftreiniger Äußere Quellen	Schädigung der Lunge Reduzierte Atemfunktion
Schwefeldioxid SO ₂	Kochherd Kamin	Asthma COPD Herz-Kreislauf-Erkrankungen
Kohlenstoffmonoxid CO	Zigarettenrauch Gasbetriebene Geräte	Müdigkeit Brustschmerzen Reduzierte Gehirnfunktion
Kohlenstoffdioxid CO ₂	Menschliche Atmung	<i>Sick-Building-Syndrome</i> Symptome wie Kopfschmerzen, Reizungen von Augen, Nase oder Rachen, juckende Haut und Müdigkeit, die durch den Aufenthalt in einem Gebäude auftreten (Wong et al., 2009)
Radon	Baumaterialien Äußere Quelle	Lungenkrebs
Mikroorganismen	Bakterien	Infektionskrankheiten
Biologische Stoffe	Hausstaub Haustiere Schimmelpilze Pollen	Asthma Allergien Atemwegserkrankungen

Sämtliche in Tabelle 2 beschriebenen Auswirkungen lassen sich nicht spezifisch einem einzigen Luftschadstoff zuordnen. Ebenso enthält die Luft in Innenräumen nicht nur einen einzelnen Schadstoff, sondern besteht aus einem Gemisch an Stoffen, die nicht zwangsläufig analytisch-chemisch charakterisierbar sind, weswegen die einzelnen Bestandteile keinen spezifischen Symptomen zugeordnet werden können. Neben der gesundheitlichen Bewertung ist die sensorische Wahrnehmung für den lufthygienischen Komfort von Bedeutung. Es gibt eine Reihe von Stoffen, die gesundheitlich unbedenklich sind, die jedoch von Gebäudenutzern olfaktorisch wahrgenommen werden können und aufgrund ihres Geruchs zu Unbehaglichkeit führen. (Wagner, Hellwig & Scherer, 2015) Zusätzlich zu den gesundheitlichen und sensorischen Aspekten beeinflusst die Luftqualität nachweislich die Arbeitsleistung und die Produktivität (Seppänen & Fisk, 2014).

Um die lufthygienische Behaglichkeit zu gewährleisten, muss demnach ein ausreichender Luftwechsel mit möglichst unbelasteter Luft sichergestellt werden (Knaack et al., 2014).

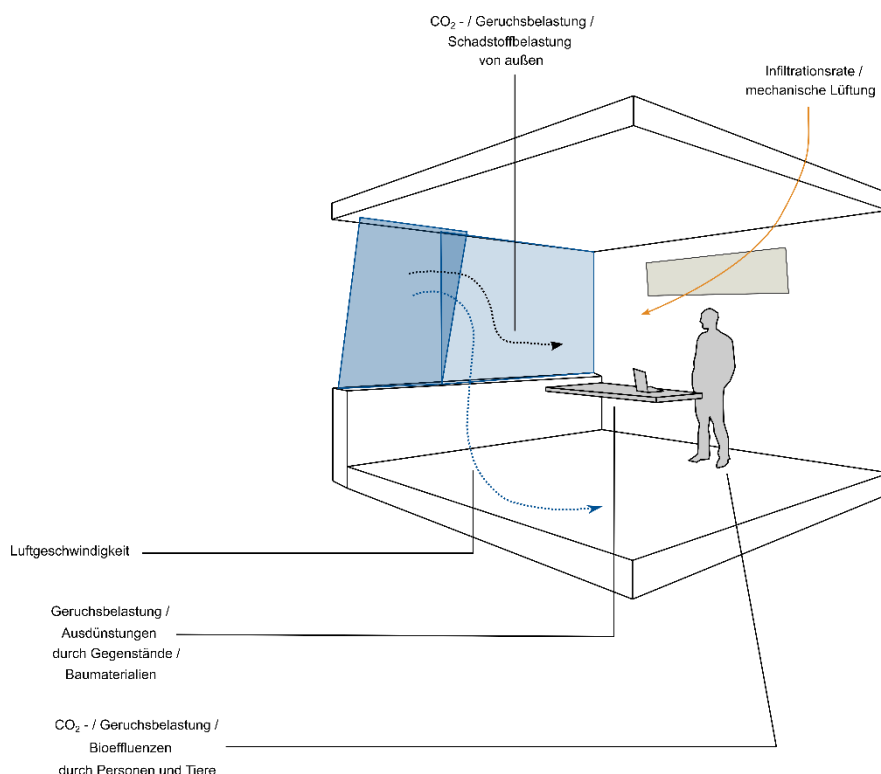


Abbildung 4: Lufthygienische Umgebung des Menschen (in Anlehnung an Hausladen, Liedl & Saldanha, 2012)

Für die Belüftung von Innenräumen sind zwei Eigenschaften von besonderer Bedeutung. Zum einen sollte die Effizienz des Luftwechsels so hoch wie möglich sein und zum anderen muss die saubere Luft an die richtigen Stellen gebracht werden. Somit sollte die Luftströmung in einem Innenraum so gesteuert werden, dass die frische Luft schnellstmöglich dahin gelangt, wo sie gebraucht wird, jedoch, ohne dass sich dabei die frische Luft und die bereits kontaminierte Luft vermischen. Somit ist nicht nur eine angepasste Luftwechselrate für den lufthygienischen Komfort entscheidend, sondern zusätzlich die Luftführung. Diese Lüftung kann sowohl natürlich als auch mechanisch betrieben werden. Die natürliche Lüftung entsteht

durch die Druckunterschiede, die zwischen dem Innenraum und dem Außenraum herrschen; somit muss keine Energie hierfür aufgewendet werden. Dies bedeutet jedoch auch, dass die Lüftungsanforderungen je nach Wetterlage nicht alleine anhand der natürlichen Lüftung eingehalten werden können. Trotz weiterer Vorteile wie der Einflussnahme des Nutzers und den vergleichsweise geringen Kosten wird in bestimmten Gebäuden eine mechanische Lüftungsanlage benötigt, beispielsweise in Gebieten mit einer stark verschmutzten Außenluft, mit zu viel Außenlärm oder in Gebäuden, die sich aufgrund ihrer geometrischen Abmessungen nicht für eine natürliche Lüftung eignen. Der Einsatz einer mechanischen Lüftung bringt ebenfalls eine Reihe von Vor- und Nachteilen mit sich, was dazu führt, dass es Gebäude gibt, die auf hybride Systeme setzen und somit sowohl die natürliche als auch die mechanische Lüftung nutzen, um eine angenehme Luftqualität zu gewährleisten. (Bluyssen, 2009)

Zur lufthygienischen Behaglichkeit in Innenräumen tragen somit eine Reihe von Faktoren bei, die eine genaue Bewertung zu einem komplexen Vorgang machen. Nicht nur gibt es in unterschiedlichen Räumen aufgrund ihrer Ausstattung, Nutzung und Lage ein Gemisch an verschiedenen Schadstoffen, die in Abhängigkeit von der Lüftungseffizienz unterschiedlich gut aus dem Raum abgetragen werden. Zusätzlich reagieren die Personen, die sich in dem Raum befinden, aufgrund von ihren individuellen physiologischen Eigenschaften unterschiedlich auf diese Schadstoffe, sowohl in ihrer Wahrnehmung als auch in den möglicherweise auftretenden gesundheitlichen Auswirkungen.

3.2.1 Bewertung der lufthygienischen Umgebung: Stand der Technik

Im Vergleich zur Bewertung des thermischen Empfindens und der thermischen Behaglichkeit gibt es keine normierten Ansätze zur Bewertung der lufthygienischen Umgebung, die sich direkt auf den Menschen beziehen. Dennoch gibt es eine Reihe von Vorschriften, die sich sowohl auf die Auslegung der Lüftung als auch auf die Messung und die Grenzwerte für die einzelnen Luftverunreinigungen beziehen.

Grundlegend gibt es für alle der in Tabelle 2 genannten chemischen Luftverunreinigungen Leit-, Richt- und/oder Grenzwerte, die für eine bestimmte Innenraumluftqualität eingehalten werden sollten. Bei Leitwerten handelt es sich um gesundheitlich-hygienisch begründete Beurteilungswerte. Diese werden für Stoffe definiert, bei denen der aktuelle Kenntnisstand nicht ausreicht, um einen Richtwert zu definieren. Richtwerte sind dagegen toxikologisch begründete Werte, die für die Stoffe definiert werden, bei denen ausreichende Erkenntnisse zu den Ursache-Wirkungs-Beziehungen vorliegen. (Sagunski, Heinzow & Müller, 2013) Dabei wird zusätzlich zwischen dem Richtwert I und dem Richtwert II unterschieden. Der Richtwert I ist definiert als die Konzentration eines Stoffes, bei dem nach heutigem Erkenntnisstand selbst bei lebenslanger Exposition keine gesundheitliche Auswirkung zu erwarten ist. Dennoch sollte bei Überschreitung dieses Werts aus Gründen der Vorsorge durch eine technische oder bauliche Maßnahme am Gebäude gehandelt werden. Bei der Überschreitung des Richtwerts II kann eine gesundheitliche Gefährdung, insbesondere von empfindlichen Personen nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund muss beim Erreichen oder Überschreiten des Richtwerts II unverzüglich gehandelt werden. (Lüdecke & Moriske, 2013) Neben den Leit- und den Richtwerten gibt es gesetzlich festgelegte Grenzwerte, die eingehalten werden müssen. (Sagunski, Heinzow & Müller, 2013) Die entsprechenden Werte werden von der Weltgesundheitsorganisation festgelegt und gegebenenfalls mit leichten Modifikationen von der Europäischen Union in Richtlinien festgehalten (übernommen in der DIN EN 16987-1:2022). Zusätzlich

dazu wurde in Deutschland ein Richtwertkonzept für den Innenraum von einer Arbeitsgruppe, bestehend aus der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes sowie den obersten Gesundheitsbehörden der Länder, erstellt. (Lüdecke & Moriske, 2013) Daneben definiert die Verordnung zum Schutz vor Gefahrenstoffen GefStoffV (2010) Arbeitsplatzgrenzwerte, die für bestimmte Stoffe einzuhalten sind. Dabei handelt es sich um Grenzwerte, die bei einer Exposition von 40 Stunden pro Woche über die Lebensarbeitszeit weder zu akuten noch zu chronischen Auswirkungen auf die Gesundheit führen. (BfGA, 2022)

Für die Belüftung der Innenräume gelten die drei bereits genannten Punkte: die Sauberkeit der Außenluft, die Luftwechselzahl und die Kontamination der Innenluft. Die Außenluft lässt sich anhand der beschriebenen Leit-, Richt- und Grenzwerte mithilfe der DIN EN 16798 – 3 (2017) oder VDI 6022 Blatt 3 (2011) klassifizieren. Dabei wird zwischen drei Kategorien für die Außenluft unterschieden. ODA1/AUL1 entspricht einer sauberen Außenluftqualität, was bedeutet, dass alle Grenz-, Richt- und Leitwerte der WHO oder der EU eingehalten werden. Lediglich eine zeitlich begrenzte Staubbelastung bspw. durch Pollen kann vorliegen. ODA2/AUL2 bedeutet eine große Verunreinigung der Luft, wofür das Kriterium erfüllt werden muss, dass mindestens ein Grenz-, Richt- oder Leitwert um maximal den Faktor 1.5 überschritten wird. Und eine sehr große Verunreinigungslast ODA3/AUL3 liegt vor, wenn einer der Werte um mehr als den Faktor 1.5 überschritten wird. Ausgehend von dieser Einordnung sowie der erforderlichen Raumlufthausqualität werden bestimmte Anforderungen an die Qualität der Zuluft und somit an die benötigten Luftfilter für die mechanische Lüftung gestellt. Im Hinblick auf die freie Lüftung kann, ausgehend von der Klassifizierung der Außenluftqualität, lediglich die erreichbare Raumlufthausqualität beschrieben werden.

Nach der VDI 6022 Blatt 3 (2011) können für die Raumlufthausqualität vier Kategorien definiert werden. Diese orientieren sich an den späteren Nutzungen der Räume. Werden die Räume von Personen mit einem erhöhten Gesundheitsrisiko genutzt, dann wird eine hohe Raumlufthausqualität RAL1 empfohlen. Sind Räume dagegen nur für einen zeitlich begrenzten Aufenthalt bestimmt (bspw. Flure oder Treppenhäume), dann wird eine niedrige Raumlufthausqualität RAL4 empfohlen.

Der nationale Anhang der DIN EN 16798-1 (2022) definiert ebenfalls Kategorien für die Qualität der Innenraumlufthaus. Dabei erfolgt die Einteilung in vier Kategorien von I – IV ohne eine namentliche Zuordnung, wobei die Kategorie I für eine hohe Qualität steht, während IV eine begrenzt annehmbare Qualität repräsentiert. Somit wird Kategorie I empfohlen für Räume, in denen sich empfindliche Personen aufhalten, Kategorie II für neue und renovierte Gebäude, Kategorien III für bestehende Gebäude und Kategorie IV für Räume mit begrenzter Aufenthaltsdauer. Anhand dieser Kategorien werden die erforderlichen Volumenströme definiert, die für die Aufrechterhaltung der geforderten Luftqualität benötigt werden.

Für die Bestimmung des Außenluftvolumenstroms von Nichtwohngebäuden können zwei unterschiedliche Verfahren angewandt werden, zum einen auf der Grundlage der wahrgenommenen Luftqualität und zum anderen durch die Einhaltung von Grenzwerten der Stoffkonzentration.

Bei dem ersten Verfahren ergibt sich der Außenluftvolumenstrom aus zwei unterschiedlichen Komponenten, der Verunreinigung durch die biologischen Ausdünstungen des Nutzers und durch die Verunreinigung durch das Gebäude sowie dessen Anlagen. Der geforderte Außenluftvolumenstrom ergibt

sich aus der Summe dieser beiden Komponenten. Somit erhöht sich der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Anzahl an Personen im Raum und in Abhängigkeit der Schadstoffbelastung der Gebäude.

Das zweite Verfahren beruht auf dem Grenzwert der CO₂-Belastung der Innenraumlufte. Entsprechend der vier Kategorien werden Grenzwerte festgelegt, die definieren, um wie viel ppm die CO₂-Konzentration im Innenraum, die der Außenumgebung übersteigen darf.

Für die Definition des Außenluftvolumenstroms für Wohngebäude werden für Nutzungseinheiten über 250 m² die Vorgaben der DIN EN 16798-1 (2022) für Nichtwohngebäude angewandt; ansonsten gilt die DIN 1946-6 (2019) als Berechnungsgrundlage. Hier wird nicht zwischen Kategorien für die Raumluftequalität unterschieden; vielmehr soll die Lüftung dem geforderten Feuchteschutz angepasst werden.

Neben der Planung der Raumluftequalität muss die tatsächlich vorhandene Raumluftequalität zusätzlich beurteilt werden. Hierfür unterscheidet die VDI 6022 Blatt 3 (2011) drei verschiedene Beurteilungsstufen. Von Beurteilungsstufe 1 zu Stufe 3 steigt der Umfang der Messungen. Für Stufe 1 müssen lediglich die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die CO₂-Konzentration erfasst werden, welche wiederum den vier Kategorien der Innenraumluftequalität zugeordnet werden. Bei Stufe 2 müssen zusätzlich Feinstaub, Kohlenmonoxid, Radon und flüchtige organische Verbindungen gemessen werden. Und letztlich bei Stufe 3 müssen eine ganze Reihe an chemischen Verbindungen und zusätzlich Schimmelpilzsporen sowie negativ geladene Ionen gemessen werden.

3.2.2 Bewertung der lufthygienischen Umgebung: Stand der Forschung

Zur Bewertung der lufthygienischen Behaglichkeit wird zum einen weiter an der Verschärfung von Richtwerten und der Herleitung von Leitwerten gearbeitet. Zum anderen gibt es Forschungsansätze, denen die Vorgaben der Normen nicht spezifisch genug sind und deswegen an der Herleitung eines oder mehrerer Indizes zur Bewertung der Luftqualität arbeiten. Auf der Grundlage des *Air Quality Index*, der grundsätzlich für die Außenumgebung angewandt werden kann, haben Saad et al. (2017) einen Index zur Bewertung der Luftqualität in Innenräumen abgeleitet. Dabei werden die Konzentrationen unterschiedlicher Schadstoffe wie CO₂, CO, VOC und PM₁₀ den vier Kategorien gut, moderat, ungesund und gefährlich zugeteilt und anhand einer Gewichtung zu einem Index zur Bewertung der Luftqualität zusammengefasst. Zhu und Li (2017) haben ebenfalls einen Index zur Bewertung der Luftqualität hergeleitet, verfolgen dabei jedoch einen anderen Ansatz als Saad et al. (2017). Zhu und Li (2017) bestimmen jeweils für die Konzentration an Kohlenstoffdioxid, Feinstaub und Formaldehyd einen Wert, der analog zum *Predicted Mean Vote* des thermischen Komforts zu interpretieren ist. Ausgehend von diesen Ergebnissen wird der Bewertungsindex, der *Predicted Mean Vote*, für die Qualität der Innenraumlufte bestimmt. Weitere Ansätze zur Herleitung eines einzelnen Indikators zur Bewertung der Raumluftequalität stammen von Castanet (1998) und Moschandreas sowie Sofuoglu (2004).

Andere Ansätze zur Bewertung der Innenraumluftequalität nutzen den Zusammenhang zwischen der Konzentration an Schadstoffen im Raum und der Lüftungsleistung. Zwar gibt es zur Bewertung der Lüftungsleistung ebenfalls einen normativen Ansatz (DIN EN 15665:2009); allerdings ist dieser aufgrund der langen Liste an Kriterien sowie der fehlenden Auswahlmöglichkeit der Parameter nicht nutzbar. (Laverge, Pattyn & Janssens, 2013; Guyot, 2019) Poirier et al. (2021) unterstützen die Nutzung von

leistungsbasierten Ansätzen zur Bewertung und Verbesserung der Innenraumlufthqualität. Jedoch sollen hierfür lediglich fünf Indikatoren genutzt werden, welche sich auf die Konzentration an Kohlenstoffdioxid, Formaldehyd, Feinstaub sowie die relative Luftfeuchte beziehen.

Weitere Forschungsansätze haben sich auf die Bestimmung der Lüftungsrate fokussiert. So kamen Ye et al. (2017) zu dem Schluss, dass für die Bestimmung des Außenluftvolumenstroms die Nutzung der Personenbelegung und der Fläche des Gebäudes grundsätzlich sinnvoll ist. Jedoch sollten diese zwei Komponenten um die Höhe des Gebäudes ergänzt werden, da die Raumhöhe einen entscheidenden Einfluss hat.

Die Nutzung von künstlichen neuronalen Netzwerken wurde ebenfalls zum Zweck der Bewertung der Raumlufthqualität erforscht. Dabei wurden verschiedenste Netzwerke definiert, die die Vorhersage von Innenraumschadstoffen ermöglichen: so beispielsweise Dai et al. (2019), die die CO₂-Konzentration mittels natürlicher Lüftung vorhersagen können; Lui, Li und Cao (2017), die einen Ansatz zur Bestimmung der Bakterienkonzentration in der Innenraumlufth anhand der Messung von Feinstaub, Kohlenstoffdioxid, der Lufttemperatur und der Luftfeuchte präsentieren; Elbayoumi, Ramil und Yusof (2015) bestimmen anhand einer Reihe von meteorologischen Daten sowohl die Konzentration an PM_{2.5} als auch an PM₁₀.

Die überwiegende Mehrheit der veröffentlichten Forschungsarbeiten zur Bewertung der Luftqualität in Innenräumen bezieht sich auf die Messung, Bewertung und Optimierung der Luftqualität in spezifischen Gebäuden, ohne jedoch die Herleitung neuer allgemeingültiger Bewertungsansätze anzustreben.

3.3 Visuelle Umgebung

Der Mensch nimmt die Mehrheit der Informationen über seine Umwelt durch das Auge wahr. Licht ist jedoch nicht nur eine Voraussetzung und Medium des Sehens, sondern beeinflusst die menschliche Wahrnehmung durch die Intensität, die Verteilung und weitere spezifische Eigenschaften. Eine visuelle Umgebung soll Wahrnehmungsbedingungen schaffen, die das konzentrierte Arbeiten, eine sichere Orientierung und das Wohlbefinden ermöglichen. Ähnlich der thermischen Umgebung kann für die visuelle Umgebung zwischen der Wahrnehmung und dem letztendlichen Komfort, welcher aus der subjektiven Bewertung resultiert, unterschieden werden. Somit muss eine behagliche Lichtplanung neben der technischen Konzeption die subjektive Bewertung des Menschen miteinbeziehen. (Ganslandt & Hofmann, 2012) Zusätzlich tragen die physikalischen Rahmenbedingungen des menschlichen Sehens zur visuellen Wahrnehmung bei. Die Empfindung von Licht und Farbe entsteht im visuellen Cortex des Gehirns. Dieses verarbeitet die Erregungsmuster, die das Auge im Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm wahrnimmt. (Hegger et al., 2007) Folglich kann der visuelle Komfort aufgrund der Vielzahl an teils messbaren und teils individuellen Einflüssen nicht über eine einzelne Kennziffer bewertet werden. (Moosmann et al., 2015)

Der Mensch selber ist jedoch in der Lage, sich durch sein Adaptationsvermögen an sehr unterschiedliche Lichtsituationen anzupassen. So kann der Mensch bei strahlendem Sonnenschein mit 100000 Lux sehen, sich jedoch auch bei Mondschein mit 1 Lux Beleuchtungsstärke ausreichend orientieren. Das menschliche Auge besitzt damit die Fähigkeit, sich auch an ungünstige visuelle Bedingungen anzupassen. Diese ungünstigen Bedingungen führen jedoch immer zu einer Störung der Sehaufgabe, wodurch wiederum

Unbehaglichkeit auftreten kann. (Moosmann et al., 2015) Optimaler Sehkomfort entsteht, wenn die Leuchtdichteverhältnisse der Umgebung und des Blickfeldes, welches auf die Sehaufgabe fokussiert ist, aufeinander abgestimmt sind. Diese Beleuchtungssituation lässt sich grundsätzlich durch Tageslicht, künstliches Licht oder eine Mischung aus beiden Lichtquellen erreichen. (Hegger et al., 2007) Für die unterschiedlichen Lichtquellen sind unterschiedliche Aspekte von Relevanz. Während für die künstliche Beleuchtung die Bauform der Leuchten, die Lichtverteilung, die Größe der Lichtaustrittsfläche und die Anordnung der Leuchten relevant sind, sind die entscheidenden Elemente der natürlichen Beleuchtung die Anordnung der Fenster oder Dachoberlichter, die Verglasung und der mögliche Einsatz von lichtlenkenden Elementen. Unabhängig davon, welche Lichtquelle genutzt wird, gibt es eine Reihe von Kriterien, die für eine komfortable Lichtplanung beachtet werden müssen. Die primäre Aufgabe des Lichts ist damit das störungsfreie Sehen und das Erkennen der Sehaufgabe. Die hierfür benötigte Beleuchtung ergibt sich aus der Sehaufgabe, den Umgebungsbedingungen sowie den persönlichen Präferenzen. Daneben schafft das Licht eine Atmosphäre und versorgt den Menschen mit Informationen über sein Umfeld (bspw. Ort, Zeit, Wetter, Geschehen). Und letztlich hat Licht eine nicht-visuelle, sondern biologische Wirkung, die den circadianen Rhythmus des Menschen steuert.

Eins der wichtigsten Gestaltungsmittel einer Lichtplanung ist die Beleuchtungsstärke, die auf eine definierte Fläche trifft. In Abhängigkeit von den Sehbedingungen sowie dem Detaillierungsgrad der Sehaufgabe kann das Beleuchtungsniveau bestimmt werden. Es gilt, je schwieriger die Sehaufgabe, desto höher wird die Beleuchtungsstärke. Für den visuellen Komfort reicht jedoch nicht ausschließlich die Anpassung der Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe. Darüber hinaus gilt die Gleichmäßigkeit, das Verhältnis zwischen minimaler und mittlerer Beleuchtungsstärke, als Qualitätskriterium. Im Allgemeinen erzeugt Tageslicht im Vergleich zu Kunstlicht eine deutlich ungleichmäßigere Lichtverteilung, da das Licht meistens seitlich in den Raum einfällt. Diese Ungleichmäßigkeit wird jedoch häufig toleriert, da der Mensch im Allgemeinen das Tageslicht dem Kunstlicht vorzieht.

Neben einer angepassten Beleuchtungsstärke gilt es, die Blendung sowohl durch Tages- als auch durch Kunstlicht zu vermeiden. Dabei kann zwischen der psychologischen und der physiologischen Blendung unterschieden werden. Die psychologische Blendung, welche häufig als unangenehm, jedoch nicht als Blendung wahrgenommen wird, entsteht durch zu große Helligkeitsunterschiede im Gesichtsfeld. Auf Dauer kann sie zu Ermüdung, Kopfschmerzen und körperlicher Fehlhaltung führen. Bei der physiologischen Blendung wird dagegen die Sehleistung messbar reduziert. Streulicht, welches im Auge durch zu hohe Leuchtdichten erzeugt wird, reduziert die vom Menschen wahrgenommenen Kontraste, was zum Empfinden von Blendung führt.

Ein weiteres Merkmal einer behaglichen Lichtplanung ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen diffusem und gerichtetem Licht. Sowohl das diffuse als auch das gerichtete Licht können positiv als auch negativ bewertet werden. Gerichtetes Licht entsteht durch punktförmige Lichtquellen mit einer kleinen Lichtaustrittsfläche oder durch direktes Sonnenlicht. Bei der Beleuchtung mit gerichtetem Licht entstehen Schlagschatten. Diese können zum einen den Eindruck eines natürlichen Raums vermitteln, zum anderen kann durch starken Schattenwurf die Sehaufgabe behindert werden. Diffuses Licht, das von großflächigen Leuchten oder dem bewölkten Himmel stammt, erzeugt eine schattenarme Beleuchtung, die ermüdend wirken kann, jedoch gleichzeitig auch für eine sehr gleichmäßige Beleuchtung sorgt.

Ein letztes wesentliches Kriterium, das sowohl für die künstliche als auch für die natürliche Beleuchtung gilt, ist die Lichtfarbe, welche sich aus dem Wellenlängenspektrum ergibt und die damit entstehende Atmosphäre. Die Lichtfarbe von Kunstlicht wird in drei Kategorien unterteilt. Es wird unterschieden zwischen warmweiß (< 3300 K), neutralweiß (3300 K – 5000 K) und tageslichtweiß (> 5000 K). Die Lichtfarbe des Sonnenlichts unterliegt einem ständigen Wechsel im Laufe des Tages, ist aber zumeist kalt, mit der Ausnahme zum Sonnenaufgang und -untergang. Die Wahl der Lichtfarbe in einer Lichtplanung ist abhängig von der beabsichtigten Nutzung des Raums; hierbei ist unter anderem auch der Einfluss der Lichtfarbe auf den circadianen Rhythmus zu beachten. Das Emissionsspektrum beeinflusst neben der Lichtfarbe auch die Farbwiedergabe einer Lichtquelle. Diese ist ein Ausdruck dafür, wie natürlich die Farben erscheinen. Aus diesem Grund weist Tageslicht in Abhängigkeit von der Uhrzeit den maximal erreichbaren Farbwiedergabeindex auf.

Für die künstliche Beleuchtung gibt es ein weiteres Kriterium, das von Bedeutung ist. Für den visuellen Komfort ist es entscheidend, dass die künstliche Beleuchtung weder flackert noch flimmert. (Moosmann et al., 2015)

3.3.1 Bewertung der visuellen Umgebung: Stand der Technik

Ähnlich zur Beurteilung der lufthygienischen Behaglichkeit gibt es für die Bewertung der visuellen Behaglichkeit keine normativen Vorschriften, die sich direkt auf den Menschen beziehen. Dafür gibt es jedoch eine Reihe von Vorschriften, die für eine behagliche Lichtplanung einzuhalten sind. Historisch gesehen dient die Lichtplanung dazu, ausreichend Tageslicht zu einem bestimmten Zeitpunkt an einen definierten Standpunkt zu bringen. Durch die immer größer werdende Auswahl an technischen Hilfsmitteln hat sich das menschliche Empfinden an die ständige Verfügbarkeit sowohl von Tages- als auch von Kunstlicht angepasst. Zeitgleich, mit der Erweiterung der Möglichkeiten der Lichtplanung, sind ebenfalls die Anforderungen gestiegen. Es gibt eine Reihe an Richtlinien für die natürliche und die künstliche Beleuchtung, die nicht nur Mindest- und Maximalwerte vorschreiben. (Showranek, 2017)

Zur Darstellung der Tageslichtqualität in Innenräumen werden in der DIN EN 17037 (2019) vier übergeordnete Dimensionen betrachtet: die Tageslichtzufuhr, die Besonnung, die Aussicht und die Blendung. Die Tageslichtzufuhr im Innenraum ergibt sich stets in Abhängigkeit vom Tageslichtangebot der Umgebung, welches im Verlauf des Tages und des Jahres stark variieren kann. Zur Bewertung der natürlichen Beleuchtungsstärke im Innenraum muss diese in einen nachvollziehbaren Bezug zur Tageslichtsituation der Außenumgebung gebracht werden. Zur Darstellung dieses Bezugs wird der Tageslichtquotient genutzt. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen der Beleuchtungsstärke auf einem definierten Punkt einer horizontalen Ebene im Innenraum zu der Beleuchtungsstärke auf einer unverschatteten horizontalen Ebene im Außenraum unter definierten Außenbedingungen. Für diese außerräumlichen Tagesbedingungen gilt in der DIN EN 17037 (2019) das indirekte Licht, jedoch darf das direkt von der Sonne abgestrahlte Licht für die Bestimmung des Tageslichtquotienten nicht miteinbezogen werden. Ergänzend hierzu wird über den Tageslichtquotienten ein Bezug zwischen den solaren Klimadaten eines Standorts und der Zielbeleuchtungsstärke im Innenraum gemacht. (Hammer & Wambsganß, 2020)

Die DIN EN 17037 (2019) definiert drei Kategorien für die Beschreibung der visuellen Umgebung. Dabei wird zwischen der Empfehlungsstufe gering, mittel und hoch unterschieden. Für jede Kategorie wird eine Zielbeleuchtungsstärke sowohl für horizontale als auch für vertikale Tageslichtöffnungen genannt. Diese muss für vertikale Öffnungen in mindestens 50 % der zu bewerteten Bezugsfläche vorliegen, bei horizontalen Öffnungen dagegen sogar in 95 % der Bezugsfläche. Für vertikale Öffnungen wird zusätzlich für jede Kategorie eine Mindestziel-Beleuchtungsstärke, die an 95 % der Bezugsfläche eingehalten werden soll, gefordert. Ebenfalls wird für beide Öffnungsarten definiert, dass diese Bedingungen an mindestens 50 % der Tageslichtstunden eingehalten werden müssen.

Die Beurteilung der Aussicht bezieht sich auf die drei Ebenen des Himmels, der Landschaft und des Bodens. Nach der DIN EN 17037 (2019) ist die Qualität abhängig von der Größe der Tageslichtöffnungen, der Breite, der Aussicht, der Sichtweite, der Anzahl an Ebenen und der Qualität der Umgebungsinformationen. Die Bewertung der Aussicht erfolgt wiederum anhand der drei Empfehlungsstufen und orientiert sich an dem horizontalen Sichtwinkel, der Außensichtweite und der Anzahl der sichtbaren Ebenen. In Bezug auf die Besonnungsdauer gibt die DIN EN 17037 (2019) die genaue Anzahl an Stunden vor, die ein Raum in einem ausgewählten Zeitraum besonnt werden soll. Auch diese Vorgabe orientiert sich an den drei Empfehlungsstufen.

Als letztes Beurteilungskriterium wird die Tageslichtblendungswahrscheinlichkeit DGP verwendet. Diese kann jedoch ausschließlich für Räume mit vertikalen oder geneigten Tageslichtöffnungen genutzt werden. Die vorgegebenen DGP-Werte, für die jeweiligen Empfehlungsstufen, sollen an weniger als 5 % der Nutzungsdauer des Raums überschritten werden. Die Blendungswahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Beleuchtungsstärke auf Augenhöhe, der Leuchtdichte der Blendungsquelle, einem Positionsindex, dem Raumwinkel der Blendquelle und der Anzahl der Blendquellen. Zusätzlich ist der Einfluss von Blendschutz-Vorrichtungen zu beachten.

Weitere allgemeine Anforderungen an die Beleuchtung von Innenräumen mit Tageslicht sind in der DIN 5034-1 (2021) festgehalten, jedoch ohne Darstellung von weiteren Bewertungsansätzen.

Ebenfalls von Relevanz für den visuellen Komfort bei Tageslicht ist der Einfluss der Sonnen- und Blendschutz-Vorrichtungen. Deswegen werden diese Vorrichtungen nach der DIN EN 14501 (2021) nach ihrer Verdunklungsleistung, dem Blendschutz, dem Sichtschutz bei Nacht, dem Sichtkontakt nach außen, der Tageslichtnutzung und dem Farbwiedergabeindex klassifiziert. Jeder der genannten Aspekte wird anhand seiner Eigenschaften (zu bestimmen, nach der DIN EN 14500:2021), mit Ausnahme des Farbwiedergabeindex zu bestimmen nach der DIN EN 410 (2011), nach ihrem Einfluss auf den visuellen Komfort klassifiziert. Es werden fünf Klassen von Klasse 0 (sehr geringe Auswirkung) bis Klasse 4 (sehr hohe Auswirkung) unterschieden.

Der Planung der Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen, sowohl mit künstlichem als auch mit natürlichem Licht, wird die DIN EN 12464-1 (2021) zugrunde gelegt. Entsprechend dieser Norm werden die grundsätzlichen Bedürfnisse der Menschen durch die Bereitstellung von Sehkomfort, Sehleistung und Sicherheit zufriedengestellt. Die DIN EN 12665 (2018) definiert den Sehkomfort als subjektives Wohlbefinden, welches durch die Lichtumgebung bestimmt wird und die Sehleistung als die Leistung des visuellen Systems, die beispielsweise durch die Geschwindigkeit und die Genauigkeit, mit der eine Sehaufgabe erfüllt wird, gemessen wird. Um die drei Bedürfnisse zu erfüllen, sind die wichtigsten Kriterien

die Leuchtdichtevertelung, die Beleuchtungsstärke, die Blendung, die Lichtrichtung, die Farbwiedergabe und die Lichtfarbe des Lichts, das Flimmern und die Variabilität des Lichts. Zur Erfüllung dieser Kriterien werden jeweils eine Reihe von Anforderungen gestellt. Die DIN EN 16798-1 (2022) bezieht sich für die Bewertung der visuellen Behaglichkeit lediglich auf die Anforderungen der DIN EN 12464-1 (2021). Für die Lichtplanungen von anderen Gebäudenutzungen, bspw. die Beleuchtung von Sportstätten gilt die DIN EN 12193 (2018) und die Beleuchtung von Gesundheitseinrichtungen, die DIN 5035-3 (2006).

Sämtliche beschriebenen Anforderungen werden mit einzelnen Ergänzungen zusätzlich in der VDI 6011 (2016) für die Optimierung der Nutzung von Tageslicht und künstlicher Beleuchtung beschrieben.

Neben dem visuellen Einfluss des Lichts hat dieses auch einen biologischen Einfluss. In Bezug auf die circadiane Wirkung von natürlichem Licht wurde die DIN/TS 5031-100 (2021) veröffentlicht. Da jedoch nicht alle Inhalte dieser Norm vorbehaltlos akzeptiert sind, handelt es sich dabei lediglich um eine Technische Spezifikation (TS). Die DIN/TS 5031-100 (2021) dient zur Bewertung der melanopischen Lichtwirkungen von Lichtquellen und Beleuchtungssituationen. Dabei handelt es sich um physiologische und psychologische Wirkungen, die durch die Stimulation der intrinsischen lichtempfindlichen Ganglienzellen ausgelöst werden. Zu den zu bewertenden Wirkungen gehören die Suppression von Melatonin in der Nacht, die Verschiebung der circadianen Phase und die Änderung der circadianen Amplitude, die Aktivierung mit Licht, die Steuerung des Pupillenreflexes sowie die Behandlung saisonal abhängiger Depressionen. Im Vergleich zu den übrigen vorgestellten Normen unterscheidet sich diese wesentlich, da diese Auswirkungen nicht nur für eine Standardperson bestimmt werden können, sondern die Berechnungen teilweise für unterschiedliche Altersgruppen erfolgen können.

3.3.2 Bewertung der visuellen Umgebung: Stand der Forschung

Nach Carlucci et al. (2015) ist die visuelle Behaglichkeit abhängig von der Physiologie des menschlichen Auges, den physikalischen Größen, die die Quantität sowie die Verteilung des Lichts beschreiben und der spektralen Emission der Lichtquelle. In den letzten Jahrzehnten wurde eine Reihe von Studien mit dem Ziel der Charakterisierung des Verhältnisses zwischen den visuellen menschlichen Bedürfnissen und der visuellen Umgebung durchgeführt. Dabei wurden vor allem vier Bewertungsgrößen berücksichtigt. Dazu zählen die Lichtquantität, die Gleichmäßigkeit des Lichts, die Farbwiedergabe und der Vorhersage des Blendungsrisikos.

Die Lichtquantität wird definiert als das Vorhandensein einer angemessenen Menge an Licht. Sowohl zu viel als auch zu wenig Licht können zu Unbehaglichkeit führen. Um die Lichtquantität an einem bestimmten Punkt beschreiben zu können, wird für gewöhnlich die Beleuchtungsstärke genutzt. Zur Bewertung des visuellen Komforts kann die Beleuchtungsstärke entweder direkt als Zahlenwert oder als Bestandteil eines Indizes genutzt werden. (Carlucci et al., 2015) Neben der Beleuchtungsstärke, wie sie in der DIN EN 12464-1 (2021) mit Anforderungswerten beschrieben wird, gibt es die Möglichkeit, diese über die Tageslicht-Autonomie zu bewerten. Dieser Index wurde erstmals von der *Association Suisse des Electriciens ASE* (1989) vorgeschlagen und nach Reinhart und Walkenhorst (2001) sowie Rogers und Goldman (2006) weiterentwickelt.

Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung beschreibt nach Carlucci et al. (2015), wie gleichmäßig sich die Beleuchtung über den Bereich der Sehaufgabe verteilt. Eine gute Gleichmäßigkeit verhindert die ständige Adaptation des Auges zwischen über- und unterbeleuchteten Bereichen und reduziert damit das Risiko der visuellen Unbehaglichkeit. Die Gleichmäßigkeit ergibt sich aus den Beleuchtungsstärken im Bereich der Sehaufgabe. Jedoch geben Carlucci et al. (2015) an, dass die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung keine große Aufmerksamkeit in der Forschung gefunden hat und sich dieser Verhältnisfaktor lediglich entsprechend den Vorgaben der DIN EN 12464-1 (2021) berechnen lässt. Für das Verhältnis wird die minimale und die durchschnittliche Beleuchtungsstärke genutzt, welche einen vorgegebenen Wert nicht überschreiten dürfen. An dieser Stelle gibt es jedoch Unterschiede für diesen Wert in den Normen einzelner Länder. (Dubois, 2001)

Die Bewertung des Blendungsrisikos ist der Komfortaspekt, für den die meisten Indikatoren existieren. Auch hier wird zwischen der bereits beschriebenen physiologischen und psychologischen Blendung unterschieden. (Carlucci et al., 2015) Die physiologische Blendung ist nach Reinhart und Wienold (2011) vergleichsweise einfach zu identifizieren, während die psychologische Blendung neben den messbaren Einflüssen auch eine subjektive Komponente hat, die schwieriger zu erfassen ist. Die meisten Indikatoren zur Bewertung der Blendung beziehen sich auf die psychologische Blendung. Dafür werden in den meisten Fällen Gleichungen hergeleitet, die eine Relation zwischen der menschlichen Blendungswahrnehmung und der Leuchtdichtenverteilung im Sehfeld aufstellen. (Wienold & Christoffersen, 2006) Mögliche Indizes zur Bewertung und Vorhersage von Blendungen sind die *Visual Comfort Probability* nach Guth (1963) und *Illuminating Engineering Society IES* (1972), der *Discomfort Glare Index* nach Hopkinson (1972), Chauvel et al. (1982) und Nazzal (2005), die *Discomfort Glare Probability* nach Wienold & Christofferson (2005), Wienold (2007) und Wienold (2009) sowie der *Predicted Glare Sensation Vote* nach Tokura, Iwata & Shukuya (1996) und Iwata & Tokura (1998).

Die Nutzung von Bewertungsindikatoren, um eine mögliche Blendung vorherzusagen, ist weiterhin ein Forschungsthema, da es mehrere Punkte gibt, die eine besondere Herausforderung darstellen. Zum einen ist die Blendung direkt anhängig von der Position der Person im Innenraum und von deren individuellen Blendungs-Toleranzen sowie deren Erfahrungen und Adaptationseigenschaften und zum anderen ist das Spektrum an zu untersuchenden Leuchtdichten sehr groß. (Andersen et al., 2008)

Die letzte übliche Bewertungsgröße, die Farbwiedergabe, bezieht sich hauptsächlich auf die Unterscheidung der spektralen Emission von Tageslicht und von künstlichem Licht. Daraus resultiert, dass das Tageslicht die Objekte in ihren natürlichen Farben erscheinen lässt. Auch hierfür gibt es eine Reihe von Indizes, bspw. die *Color Quality Scale* nach Davis und Ohno (2010), den *Flattery Index* nach Judd (1967) oder die *Color Rendering Capacity* nach Xu (1983, 1984).

Fakhari, Vahabi und Fayaz (2021) haben anhand von Messungen und Nutzerbefragungen ein Strukturgleichungsmodell für den visuellen Komfort abgeleitet. Hierfür werden die folgenden zwölf Einflüsse berücksichtigt: die Beleuchtungsstärke, die wahrgenommene Beleuchtungsstärke, die Zufriedenheit mit dem Ausblick, der Abstand zum Fenster, die Verteilung der Beleuchtung im Raum sowie die Zufriedenheit mit der Verteilung der Beleuchtung, die Helligkeit des Fensters, die Position im Raum, die Blendungswahrnehmung sowie die Zufriedenheit mit den Fenstern. Neben diesen Größen, die einen direkten Zusammenhang zum visuellen Komfort haben, werden jedoch zusätzlich die wahrgenommene

Temperatur und die thermische Zufriedenheit erfasst, die sich nach diesem Ansatz ebenfalls auf den visuellen Komfort auswirken.

Somit gibt es eine Reihe von Indizes, die zur Beschreibung und Bewertung der visuellen Behaglichkeit herangezogen werden können. Diese variieren jedoch in Bezug auf den Untersuchungsrahmen, die berücksichtigten physikalischen Größen, den Berechnungszeitraum, die Lichtquelle sowie die letztendliche Bewertungsgröße und deren Grenzwerte. (Carlucci et al., 2015) Unter anderem aus diesem Grund ist die Robustheit der Bewertungsindikatoren fragwürdig. Nach Shafavi et al. (2020) lassen sich die relevanten Parameter für den visuellen Komfort in drei Kategorien unterteilen. Dabei handelt es sich um die lichtbezogenen Parameter, die architekturbezogenen Parameter und die personenbezogenen Parameter. Zudem ist der jeweilige Grenzwert, um den visuellen Komfort zu definieren, abhängig vom Kontext. Zukünftiges Forschungspotential wird deswegen vor allem in der Bestimmung der Verhaltensanpassung und den physiologischen Reaktionen des Menschen, der Nutzung von Blendungsmustern, die beispielsweise anhand bestimmter meteorologischer Bedingungen eine mögliche Blendungsgefahr vorhersagen sowie in der Nutzung der virtuellen Realität zur Darstellung von visuellen Umgebungen gesehen.

3.4 Akustische Umgebung

Die auditive Wahrnehmung des Menschen resultiert aus Schwingungsübertragungen sowohl der Umgebungsluft (Luftschall) als auch in Festkörpern (Körperschall). Ob der dadurch entstehende Schall als Lärm oder Geräusch bezeichnet wird, ist davon abhängig, wie störend der Mensch den Schall empfindet. Während Lärm immer als störend bezeichnet wird, können Geräusche beispielsweise durch Erinnerungen, die der Mensch damit verbindet, positiv zum akustischen Komfort beitragen. Der akustische Komfort in Innenräumen wird jedoch von einer Vielzahl an Einflüssen bestimmt. Dazu zählen der Schallpegel der Außenumgebung, das Schalldämm-Maß der Gebäudehülle, der Schallpegel, der im Innenraum selber entsteht, sowie die Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit der Umschließungsflächen des Raums. (Hegger et al., 2007) Jedes Geräusch, unabhängig davon, ob es als störend bewertet wird oder nicht, lässt sich anhand des Schalldruckpegels, der Variation des Schalldruckpegels und der dazugehörigen Frequenzen quantifizieren. Weitere Größen zur Beschreibung des Schalls lassen sich aus diesen Größen herleiten. Diese Größen können zur Quantifizierung der Schallereignisse jeglicher Schallquellen genutzt werden, sei dies Industriegeräusche, Transportgeräusche (Straßen-, Schienen-, Flugverkehr), Baugeräusche, Sprachgeräusche oder natürliche Geräusche in Parkanlagen. Die Wahrnehmung von Geräuschen ist ein essentieller Bestandteil des täglichen Lebens, das für das allgemeine Wohlbefinden des Menschen benötigt wird. Während von natürlichen Geräuschen in Parkanlagen keine Gefahr ausgeht, kann dies in Bezug auf Industrie-, Verkehr- oder Baugeräusche anders sein. Negative Auswirkungen von Lärm werden nach der WHO definiert als die Veränderung der Morphologie und der Physiologie eines Organismus, die dazu führt, dass der Mensch in seiner Fähigkeit, zusätzlichen Stress zu kompensieren, eingeschränkt wird. Zu diesen negativen Auswirkungen können sowohl vorübergehende als auch langfristige Beeinträchtigung der physischen, psychischen und sozialen Funktionsfähigkeit des Menschen

oder seiner Organe zählen. Und letztlich wird die Anfälligkeit des Menschen gegenüber schädlichen Auswirkungen anderer Umwelteinflüsse erhöht. (Berglund, Lindvall & Schwela, 1999)

Negative Auswirkungen von Lärm können entweder konstant, dynamisch, spontan oder fluktuierend auftreten. Die heutigen Untersuchungen konzentrieren sich auf vier mögliche Auswirkungen. Dazu zählen die physischen Auswirkungen (z. B. Hörverlust), die physiologischen Auswirkungen (z. B. Veränderung des Blutdrucks und der Herzrate, Schlafstörungen), die psychologischen Auswirkungen (z. B. Verhaltensänderungen, Kopfschmerzen, Müdigkeit, Depression) und die Auswirkungen auf die Leistung (z. B. Reduzierung der Konversationsfähigkeit, Konzentrationsschwierigkeiten). Es ist wissenschaftlich belegt, dass diese vier verschiedenen Auswirkungen auf unterschiedliche Reaktionen des Körpers und die Mentalität des Menschen zurückzuführen sind. Bei der physischen Einwirkung von Lärm reagiert der Körper lediglich als passives System, wohingegen eine physiologische Auswirkung auf eine Veränderung, der mit dem zentralen Nervensystem verbundenen körperlichen Reaktionen zurückzuführen ist. Die psychologischen Reaktionen resultieren aus der Akzeptanz oder der Ablehnung jedes Einzelnen gegenüber einem bestimmten Geräusch und die Auswirkungen auf die Leistung sind auf die Interferenz zwischen dem Schall und der Aktivität zurückzuführen. (Kurra, 2020)

Gehirnschäden	140 dB
Schmerzgrenze	130 dB
	120 dB
Hörschäden	110 dB
	100 dB
	90 dB
Physiologische Reaktionen Psychologische Reaktionen	80 dB
	70 dB
Sprachstörung Verärgerung Schlafstörung	60 dB
	50 dB
	40 dB
Motivationseffekt	30 dB
	20 dB
Hörschwelle	10 dB
	0 dB

Abbildung 5: Auswirkungen der akustischen Umgebung auf den Menschen (nach Kurra, 2020)

Zur Beschreibung der subjektiven Einflüsse auf den akustischen Komfort wird für die Bewertung von Schall zwischen der Lautheit, dem Lärm an sich und einer möglicherweise daraus resultierenden Lärmbelästigung unterschieden. Diese drei Parameter, die alle zur Beschreibung eines Schallereignisses genutzt werden können, beschreiben letztlich unterschiedliche Einflüsse. Die Lautheit bezieht sich rein auf die physiologische Wahrnehmung und errechnet sich anhand des Schalldruckpegels und der Frequenz. Lärm beschreibt dagegen das Vorhandensein eines Schalldruckpegels über einen bestimmten Zeitraum sowie die zeitliche Variation des Schalldruckpegels. Zudem wird, für die Beschreibung von Lärm, die physiologische Wahrnehmung vernachlässigt und lediglich die Möglichkeit der Anpassungsfähigkeit des Menschen sowie die Bedeutung des Gehörten berücksichtigt. Eine Lärmbelästigung repräsentiert

dagegen deutlich mehr Einflüsse, wozu nicht nur die akustischen Faktoren, sondern auch die physiologischen und psychologischen Faktoren des Menschen und weitere Umgebungs- und Zeitfaktoren gehören. Diese drei Größen, mit denen sich der akustische Komfort beschreiben lässt, werden zudem mit unterschiedlichen Skalen bewertet. Für jede beliebige akustische Umgebung lassen sich somit diese drei Größen beschreiben; zudem besteht eine Korrelation zwischen den Größen. Jedoch haben diese unterschiedliche Bedeutungen. (Kurra, 2020; Hiramatsu, Takagi & Yamamoto, 1988) Neben dieser Subjektivität der Bewertung der akustischen Umgebung hat die Lärm-Sensitivität von individuellen Personen ebenfalls einen entscheidenden Einfluss. (Kurra, 2020; Miedema & Vos, 2003)

Für den akustischen Komfort in Innenräumen muss zudem zwischen den Teildisziplinen der Bau- und der Raumakustik unterschieden werden. Die Bauakustik umfasst sämtliche Komponenten, die das Eindringen von Schall in den Raum von äußeren Schallquellen oder angrenzenden geschlossenen Räumen verhindern oder minimieren sollen. Die Grundsätze der Bauakustik sind für alle Gebäude, in denen sich Menschen aufhalten, gleichermaßen einzuhalten. Dagegen befasst sich die Raumakustik mit der Schallausbreitung im Innenraum. Während im Wohnumfeld vor allem niedrige Nachhallzeiten von Relevanz sind, sollte für die Beurteilung von einem Büroarbeitsumfeld die Sprachverständlichkeit als wesentliche Beurteilungsgröße herangezogen werden. So ist im Nahbereich eine hohe Sprachverständlichkeit anzustreben, während bei größeren Distanzen zur Reduzierung der Störwirkung eine geringe Sprachverständlichkeit erzielt werden sollte. (Höfker, Meis & Schröder, 2015)

3.4.1 Bewertung der akustischen Umgebung: Stand der Technik

Ähnlich der Bewertung der visuellen und der lufthygienischen Umgebung gibt es, für die Beschreibung der akustischen Umgebung keine normativen Vorschriften, die sich direkt auf die menschliche Wahrnehmung und den daraus resultierenden Komfort beziehen. Es gibt jedoch eine Reihe von Normen, sowohl für die Bauakustik als auch für die Raumakustik, in denen gewisse Vorgaben zu finden sind, die für eine angenehme akustische Umgebung einzuhalten sind.

Die DIN 4109-1 (2018) beschreibt Anforderungen an den baulichen Schallschutz gegen Geräusche aus Nachbarräumen, die bei ordnungsgemäßer Nutzung entstehen, gegen Geräusche haustechnischer Anlagen und gegen Außenlärm. Dabei werden Anforderungen an das Schalldämm-Maß sowohl für die Übertragung des Luftschalls als auch für die Übertragung des Körperschalls gestellt. Die geforderten Schalldämmwerte orientieren sich an der Geräuschbelastung tagsüber von 6 Uhr bis 22 Uhr. (Vogelsang & Kunzmann, 2015).

Die DIN EN 16798-1 (2022) enthält zusätzlich Anforderungen an den äquivalenten Dauerschallpegel. Jedoch beziehen sich diese Anforderungen lediglich auf die Geräusche, die von technischen Gebäudeausrüstungen in dem betrachteten Raum verursacht werden. Die Anforderungen unterscheiden sich für Kategorie I, II und III entsprechend der bereits beschriebenen Einteilung. Zusätzlich wird zwischen Gebäudenutzungen und der Art des jeweiligen Raums (Wohnzimmer, Schlafzimmer, Operationsaal, Klassenzimmer etc.) unterschieden.

In Bezug auf die Raumakustik sind einzelne Anforderungen, insbesondere zur Sicherung der Hörsamkeit, in der DIN 18041 (2016) festgehalten. Es wird zwischen Räumen mit mittleren und größeren Entfernungen der Personen zueinander wie beispielsweise Klassenzimmer, Konferenzräume oder Gerichtssäle (Räume

Gruppe A) und Räumen mit geringen Entfernungen wie Schalterhallen, Büros oder Kantinen (Räume Gruppe B) unterschieden. Durch die Unterschiede in der Entfernung ergeben sich unterschiedliche Anforderungen für die Sicherstellung der Hörsamkeit. Bei Räumen der Gruppe A kann diese durch eine angepasste Nachhallzeit und Schalllenkung erreicht werden und bei Räumen der Gruppe B durch Schallabsorption und Störgeräuschminderung. Diese Anforderungen werden für unterschiedliche Räume beider Gruppen anhand der Anforderungen an die subjektive Wahrnehmung weiter aufgegliedert. So werden beispielsweise für Räume, in denen die gute Hörsamkeit von unverstärkter Musik im Vordergrund steht und für Räume, die der sprachlichen Kommunikation von mehreren Sprechern dienen, unterschiedliche Nachhallzeiten gefordert. Neben den allgemeinen Anforderungen an die Bau- und Raumakustik gibt es weitere Möglichkeiten, den akustischen Komfort zu unterstützen. Die DIN 18005 (2022) enthält Anforderungen an den Schallschutz im Städtebau; diese beziehen sich konkret auf die Planung von Gebäuden. Dafür gibt es beispielsweise Anforderungen an ausreichende Abstände zu Verkehrswegen oder zu Gewerbe- und Industriegebieten.

Weitere Anforderungen an Arbeitsplätze sind in der VDI 2058 Blatt 3 (2014) und spezifisch für Büroarbeitsplätze in der VDI 2569 (2019) zu finden. In letzterer werden die Schallschutzklassen A, B und C für Einzel-, Mehrpersonen- und vertrauliche Büros definiert. Diese werden beispielhaft für ein Einzelbüro wie folgt beschrieben: die Klasse A beschreibt ein hohes Erwartungsniveau, das gleichzusetzen ist mit einer hohen akustischen Behaglichkeit. Diese Klasse wird von Nutzern als angenehm empfunden und verursacht keine Störung der Sprachverständlichkeit. Klasse B, die sich an einem mittleren Erwartungsniveau orientiert, führt nur unter ungünstigen Zuständen zu einer reduzierten Sprachverständlichkeit, sodass in der Regel Beschwerden über die raumakustischen Bedingungen nur selten vorkommen. Klasse C entspricht dagegen einem niedrigen Erwartungsniveau, was dazu führt, dass Beschwerden der Nutzer über die raumakustischen Bedingungen nicht auszuschließen sind.

Die ISO/TS 19488 (2021) bezieht sich ausschließlich auf Wohngebäude und kann für die Klassifizierung der akustischen Qualität der Gebäude genutzt werden. Es werden sechs Klassen von A bis F unterschieden. Klasse A beschreibt Gebäude mit einer ruhigen Atmosphäre und einem hohen Maß an Schallschutz. Klasse F beschreibt dagegen Gebäude mit einem sehr geringen Schallschutz. Die Klassifizierung erfolgt anhand von fünf Kriterien.

- Luftschalldämmung
- Trittschalldämmung
- Luftschalldämmung der Gebäudehülle gegen Außenlärm
- Schalldruckpegel aus gebäudetechnischen Anlagen in den Wohnräumen
- Nachhallzeit oder Verhältnis der äquivalenten Schallabsorptionsfläche zur begehbaren Fläche

Ein letzter Aspekt, das Soundscape, das in der DIN 12913-1 (2018) beschrieben wird, dient der Verknüpfung der menschlichen Wahrnehmung mit dem Kontext eines Schallereignisses. Ein Soundscape wird definiert als eine akustische Umgebung, die von einer einzelnen Person oder einer Gruppe von Personen im Kontext wahrgenommen wird. Das Wahrnehmungskonstrukt des Soundscapes setzt sich zusammen aus den Schallquellen, der akustischen Umgebung, der Hörempfindung, der Interpretation der

Hörempfindung, den Reaktionen und den Folgen daraus. Jede dieser Komponenten wird im Kontext erfasst. Damit ist insbesondere die wechselseitige Beziehung zwischen Person, Aktivität und dem Ort in Raum und Zeit gemeint. Für die Beschreibung des Soundscape werden akustische, psychoakustische und durch Interviews erfasste qualitative Größen benötigt.

Es gibt somit keine Norm, die einen direkten numerischen Zusammenhang zu der akustischen Behaglichkeit herstellt. Ebenso bezieht sich keine der Normen auf den Menschen, sondern lediglich auf die baulichen Anforderungen an die Gebäude.

3.4.2 Bewertung der akustischen Umgebung: Stand der Forschung

In der Forschung zur Bewertung der akustischen Behaglichkeit lassen sich kaum relevante Studien finden, die sich auf neue Ansätze zur Bewertung der Behaglichkeit beziehen. Vielmehr geht es um die Untersuchung bestimmter Gebäude unter der Anwendung normativer Vorschriften. Vardaxis und Bard (2018) sowie Vardaxis, Bard und Waye (2018) erklären diese Tatsache dadurch, dass das Konzept des akustischen Komforts nicht vollständig und mit all seinen Einflüssen definiert ist und dieser somit häufig, anhand von standardisierten Deskriptoren wie einem niedrigen Lärmpegel oder einer geringen Belästigung beschrieben wird. Sie geben an, dass der Begriff akustischer Komfort oder akustische Qualität in einer Reihe von Veröffentlichungen zwar verwendet wird, dieser jedoch nicht definiert wird und somit auch keine Anforderungen an das akustische Wohlbefinden gestellt werden können. Häufig werden, zur Darstellung des Komforts, lediglich die Luft- und Trittschalldämmung als Bewertungsgrundlage herangezogen, ohne dass diese die menschliche Wahrnehmung von Schall berücksichtigen würden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, diese standardisierten Parameter mit Fragebögen zu verknüpfen. Die Kombination der objektiven und subjektiven Einflüsse könnte es ermöglichen, dass diese Methode als ausreichend robust für die Bewertung des akustischen Komforts gewertet wird. Beispielhafte Studien lassen sich unter anderem in Bodlund (1985), Bradley (1986), Bradley (2001) und Hagberg (2010) finden. Diese Studien haben alle gemeinsam, dass sie sich ausschließlich auf Wohngebäude konzentrieren und einen statistischen Zusammenhang zwischen den objektiven und den subjektiven Daten herleiten. Die objektiven Daten, die Luftschall- und die Trittschalldämmung, werden in jeder Studie anhand der normativen Vorgaben und die subjektiven, mittels unterschiedlicher Fragebögen, bestimmt. Weitere Studien, die ebenfalls die Kombination von objektiven Messgrößen und subjektiven Befragungen nutzen, sich jedoch auf andere Gebäudenutzungen konzentrieren, lassen sich beispielhaft in Wu et al. (2020b) für Bahnhöfe, Mu, Kang & Wu (2021) für Pflegeheime, Della Crociata, Simone und Martellotta (2013) für Warenhäuser und John, Thampuran und Premlet (2016) für Klassenzimmer finden.

Neben diesen Studien gibt es eine Reihe von Ansätzen, die versuchen, die objektiven und subjektiven Einflussgrößen in einem einzelnen Bewertungsindex zu kombinieren. Dazu zählen beispielsweise der *Noise Pollution Level* (Robinson, 1971), der *Office Noise Index* (Hay & Kemp, 1972), der *Noise Criterion* (Beranek, 1956), der *Room Criterion* (Warren & Blazier, 1981), der *Balanced Noise Criterion* (Beranek, 1989) oder der *Quality Assessment Index* (Warren & Blazier, 1995). Weitere Beschreibungen hierzu lassen sich in Ayr, Cirillo und Martellotta (2002) finden.

Die meisten Studien, in Bezug auf den akustischen Komfort, beziehen sich jedoch alleine auf die Überprüfung der vorhandenen normativen Vorgaben; beispielsweise Gramez und Boubenider (2017)

sowie Passero und Zannin (2012). Claudi et al. (2019) erarbeiten anhand der normativen Vorgaben ein Klassifizierungssystem für die Bewertung der akustischen Umgebung, ohne hierfür den akustischen Komfort zu definieren und ohne die physiologischen Wirkungen oder die subjektive Bewertung der Gebäudenutzer zu berücksichtigen.

3.5 Bewertung des erweiterten Raumklimas

Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bestandteilen des erweiterten Raumklimas und den Auswirkungen dieser auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Menschen sind komplex und bis heute nicht vollständig erforscht. (Bluyssen, 2020) Dennoch hat die bisherige Forschung gezeigt, dass die viele Zeit, die der Mensch in Innenräumen verbringt, unserer Gesundheit schadet, auch wenn das erweiterte Raumklima, den in den vorherigen Kapiteln dargestellten normativen Vorgaben entspricht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Vorgaben auf Einzeldosis-Reaktionen basieren und damit nicht die Realität abbilden können. (Bluyssen, 2014b) Auch die bereits vorgestellten Forschungsansätze zur Bewertung der einzelnen Aspekte des erweiterten Raumklimas, konnten zur Abbildung der Realität und zur Anwendung für individuelle Nutzer keine zufriedenstellenden Ansätze liefern. Im Gegensatz zu den einzelnen Aspekten Temperatur, Licht, Luft und Akustik gibt es für die Gesamtbewertung des erweiterten Raumklimas keine normativen Vorgaben. Die vier Aspekte werden lediglich in der DIN EN ISO 16798-1 (2022) mit den entsprechenden Anforderungen im Hinblick auf die Energieeinsparung aufgeführt; jedoch wird hier kein Zusammenhang zwischen den einzelnen Teilbereichen angestrebt. Es gibt allerdings eine Reihe von Forschungsansätzen, die sich mit der Bewertung des erweiterten Raumklimas beschäftigen.

Heinzerling et al. (2013) beschreiben das erweiterte Raumklima als die wahrgenommene Innenraumerfahrung, die sowohl Aspekte des Designs, der Analyse und des Betriebs von energieeffizienten, aber auch komfortablen und gesunden Gebäuden umfasst. Modelle zur Bewertung des erweiterten Raumklimas basieren auf der Aggregation von Daten zur umfassenden Darstellung der Leistung des Raums oder Gebäudes, in dem sich die Menschen befinden. Diese Darstellung kann entweder anhand von objektiven Messdaten, subjektiven Nutzerbefragungen oder einer Mischung aus beiden Datenquellen erfolgen. Der Sinn eines solchen Modells liegt darin, diese Daten in ein Bewertungsschema zu integrieren. In Abhängigkeit von der Qualität der gesammelten Daten ergibt sich die Genauigkeit, die Relevanz und die Anwendbarkeit solcher Bewertungssysteme.

Im Folgenden werden Bewertungssysteme des erweiterten Raumklimas dargestellt. Dabei wird zwischen Modellen unterschieden, die ausschließlich auf subjektiven, auf objektiven oder auf einer Mischung aus beiden Datentypen basieren.

3.5.1 Subjektive Bewertungsmethoden des erweiterten Raumklimas

Die meisten subjektiven Bewertungsmethoden nutzen die Nutzerzufriedenheit als Indikator für die Beurteilung des erweiterten Raumklimas. Unabhängig von den tatsächlich vorliegenden physikalischen Bedingungen in einem Gebäude ist die Nutzerzufriedenheit die oberste Priorität eines Gebäudebesitzers oder -betreibers. (Heinzerling et al., 2013)

Die zwei bekanntesten und am häufigsten genutzten Fragebögen sind die *Building Use Studies Ltd.* (BUS) (Cohen et al., 2001) und der Fragebogen des *Center for the Built Environment* (CBE) (beispielhaft dargestellt in Graham, Parkinson & Schiavon, 2021). Ersterer besteht aus rund 50 Fragen, die sich auf die individuelle Person (z.B. Alter, Geschlecht), das Gebäudedesign, die individuelle Kontrolle über Heizung, Kühlung, Licht usw., die Schnelligkeit und Effektivität des Gebäudemanagements bei Beschwerden, die Temperatur, die Luftbewegung, die Luftqualität, die Beleuchtung, Geräusche, den Gesamtkomfort, die Gesundheit und die Produktivität bei der Arbeit beziehen. Der Fragebogen wird auch in größeren Gebäuden lediglich an 100 Personen ausgeteilt, um die auszuwertende Datenmenge einzugrenzen. Für die Auswertung der Fragebögen werden zwei Indikatoren genutzt, wobei sich einer auf den Komfort bezieht und somit die Bewertung der physikalischen Umgebungsbedingungen sowie den Gesamtkomfort miteinbezieht. Der zweite Indikator bezieht sich auf die Zufriedenheit und nutzt dabei Punktzahlen für das Design, die Produktivität und die Gesundheit. Diese Indikatoren, die auf dem statistischen Durchschnitt der befragten Nutzer basieren, dienen letztlich zur Gebäudebewertung. Daneben können für die Ergebnisdarstellung, zusätzlich die Konfidenzintervalle abgebildet werden, womit festgestellt werden kann, ob die durchschnittliche Wahrnehmung des Gebäudes vom Benchmark oder von der Bewertung eines anderen Gebäudes abweicht. (Cohen et al., 2001)

Der CBE Fragebogen besteht aus rund 60 Fragen, die in 10 Kategorien aufgegliedert sind und nach Bedarf angepasst werden können. In diesem werden nicht nur Fragen zur Demografie (z. B. Alter, Geschlecht, Art der Arbeit) und zur Erfahrung der Menschen mit ihrer Umgebung (z. B. wie viele Stunden pro Woche sie sich an ihrem Arbeitsplatz befinden), sondern auch die Position der Personen im Gebäude sowie die Art ihrer Arbeitsumgebung abgefragt. Daneben werden die Wahrnehmung des erweiterten Raumklimas und die Zufriedenheit, untergliedert in die einzelnen Bestandteile, sowie der Aufbau der Arbeitsumgebung, die Möblierung, die Sauberkeit und die Instandhaltung erfasst. Bei dem CBE Fragebogen handelt es sich um einen digitalen Fragebogen. Wird bei der Beantwortung einer der Fragen eine leichte Unzufriedenheit festgestellt, werden zu diesem Aspekt weitere vertiefende Fragen gestellt, um die Ursache der Unzufriedenheit ausfindig zu machen. In einem vorletzten Punkt werden individualisierte Fragen zum jeweiligen Gebäude gestellt, bspw. in Bezug zur IT-Infrastruktur, Wegführung oder Aufzüge. Anschließend müssen drei abschließende Fragen zur Zufriedenheit mit dem Gebäude insgesamt, zur Zufriedenheit mit dem jeweiligen Arbeitsplatz und zum Glauben, dass die Innenraum-Umgebung die individuelle Produktivität steigert oder reduziert, beantwortet werden. Anhand der gegebenen Antworten werden eine Reihe statistischer Auswertungen und Korrelationsanalysen durchgeführt. Diese erlauben es, jedes Gebäude mit der Datenbank des CBE abzugleichen und auf diese Weise das Gebäude zu bewerten. Die Bewertung erfolgt seit 2020 anhand von neun Richtwerten. Dazu zählen die Temperatur, die Luftqualität, der visuelle Komfort, der Schalldruckpegel, aber auch die Sauberkeit, die Platzverfügbarkeit, die visuelle Privatheit, die Ergonomie der Möblierung und der Arbeitsplatz. Diese werden auf einer Sieben-Punkte-Skala von sehr unzufrieden (1) über neutral zu sehr zufrieden (7) ausgewertet. (Graham, Parkinson & Schiavon, 2021)

Neben diesen zwei bekannten, subjektiven Bewertungsansätzen finden sich noch eine Reihe weiterer subjektiver Bewertungsansätze in der Zusammenstellung von Peretti und Schiavon (2011).

El Asmar, Chokor und Srour (2014) nutzen, für die Bewertung von Hochschulgebäuden beispielsweise, die Grundlage des CBE Fragebogens, ergänzen diesen jedoch nach ihren eigenen Bedürfnissen um weitere Kategorien. Cheung et al. (2021) nutzen ebenfalls die gleiche Grundlage, ergänzen den CBE Fragebogen jedoch mit den Fragen zur Zufriedenheit mit der Luftfeuchtigkeit sowie der Luftbewegung, da diese für die Bewertung des warmen und feuchten Klimas in Singapur benötigt werden. Gleichzeitig wurden in dieser Studie Fragen zum Gebäude aus dem Fragebogen gestrichen. Nimlyat (2018) nutzt dagegen, für die Bewertung des erweiterten Raumklimas, die Grundlage des BUS Fragebogens und macht auch hier Anpassungen. Zudem wird der BUS Fragebogen, zur Bewertung von Büroräumen lediglich an Mitarbeiter verteilt, die sich dauerhaft in diesem Gebäude befinden. In dieser Anwendung wird der Fragebogen jedoch an die drei typischen Personenkategorien (Medizinisches Personal, Patienten und Besucher) verteilt.

Andere Studien hingegen nutzen ihre eigens erstellten Fragebögen (Sant'Anna et al., 2018; Kang, Ou & Mak, 2017; Wong et al., 2009) oder weniger verbreitete Fragebögen (Kamaruzzaman et al., 2011), die dem Aufbau der beiden beschriebenen ähneln, sich aber dennoch, zum Beispiel in den Auswahlmöglichkeiten der Antworten, stark unterscheiden. Andere subjektive Ansätze zur Bewertung des erweiterten Raumklimas verzichten gänzlich auf den Fragebogen und nutzen, beispielsweise für die Befragung von Kindern in Bezug zu ihrem Klassenzimmer einen Workshop, indem die Kinder die für sie relevanten Probleme ihrer Umgebung sowohl beschreiben als auch malen können. Auf diese Weise konnten hilfreiche Erkenntnisse zur Auslegung neuer Klassenzimmer erarbeitet werden. (Bluyssen et al., 2020)

Neben diesen Ansätzen aus der Forschung beschreibt die DIN EN ISO 10551 (2020) subjektive Bewertungsskalen für die Beurteilung der physikalischen Umgebung. Hierfür werden fünf mögliche Ansätze zur Beurteilung vorgegeben. Diese unterscheiden sich in dem zu bewerteten Subjekt, der Art der Bewertung sowie der Formulierung. Für das zu bewertende Subjekt kann zwischen dem persönlichen Befinden und dem physikalischen Ambiente unterschieden werden. Hieraus ergibt sich die Art der Bewertung, die sich für das persönliche Befinden, entweder auf die Wahrnehmung, die Bewertung oder die Präferenz bezieht. Ist das Bewertungssubjekt das physikalische Ambiente, bezieht sich die Bewertung auf die persönliche Annehmbarkeit oder die persönliche Toleranz. Aus diesen fünf Arten der Bewertung ergibt sich wiederum die Formulierung der Fragen. Eine beispielhafte Frage für die Wahrnehmungsbewertung würde lauten „Wie fühlen Sie sich genau in diesem Moment“ und die Beantwortung kann auf einer symmetrischen Sieben- oder Neun-stufigen zweipoligen Skala mit einem zentralen Neutralitätspunkt erfolgen.

Die ausschließliche Bewertung des erweiterten Raumklimas anhand von subjektiven Befragungen stellt sich jedoch als wenig aussagekräftig heraus. Durch die subjektiven Meinungen der Gebäudenutzer ergeben sich vielfältige Antworten der gleichen physikalischen Bedingungen (Heinzerling et al., 2013). Weitere Schwierigkeiten ergeben sich laut Nicol und Wilson (2011) durch die Identifizierung einer repräsentativen Zeitperiode für die Durchführung einer Befragung, die Auswertung und Interpretation der Daten sowie der Festlegung, welche Fragen Bestandteil einer Nutzerbefragung sein sollten. Für die Zeitperiode kann zwischen einer Momentaufnahme, welche an ausgewählten Zeitpunkten innerhalb eines Tages, einer Woche oder eines Monats durchgeführt wird und einer Langzeitbewertung, die beispielsweise

die Nutzerzufriedenheit der letzten Woche zusammenfassend abbilden soll, unterschieden werden. Der zweite Kritikpunkt bezieht sich auf das Fehlen klarer Vorschriften, wie die Ergebnisse von Befragungen, beispielsweise in Grenzwerten, für die Parameter des erweiterten Raumklimas übertragen werden sollen. Der letzte Kritikpunkt bezieht sich auf die Schwierigkeit des Erstellens eines Fragebogens, da die gewählte Phrasierung einen entscheidenden Einfluss auf die Antworten haben kann. Hierdurch können verfälschte Ergebnisse entstehen. Dazu kommt, dass sich die gestellten Fragen häufig ausschließlich auf das erweiterte Raumklima, nicht jedoch auf den psychologischen und physiologischen Status, sowie ökonomische und kulturelle Unterschiede beziehen. (Heinzerling et al., 2013)

3.5.2 Objektive Bewertungsmethoden des erweiterten Raumklimas

Die Grundlage objektiver Bewertungsmethoden ist die Verfügbarkeit von kalibrierten und akkuraten Messgeräten. Die Auswahl der jeweiligen Geräte ist jedoch häufig abhängig vom Ziel der Bewertung. Dazu kommt, dass hierfür eine Reihe von Messungen in dem jeweiligen Gebäude gemacht werden müssen, was sowohl kosten- als auch zeitintensiv ist. Ähnlich wie bei den subjektiven Bewertungsmethoden muss der passende Messzeitpunkt und Messzeitraum definiert werden und zusätzlich der passende Standort für die Sensoren gefunden werden. Werden diese ungünstig platziert (z. B. direktes Sonnenlicht, CO₂-Blase, neben der Heizung) können sie verfälschte Messergebnisse liefern, die nicht repräsentativ für das betrachtete Gebäude sind.

Welche Daten zu welchem Zeitpunkt und über welchen Zeitraum gewonnen werden müssen, um robuste Bewertungen zu ermöglichen, ist in keiner Vorschrift definiert. Zusätzlich dazu ist die Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten nicht standardisiert und kann somit zu Schwierigkeiten führen. (Roumi et al., 2022; Heinzerling et al., 2013) Trotz dieser Herausforderungen gibt es eine Reihe von Studien, die das erweiterte Raumklima ausschließlich anhand von objektiven Messdaten bewerten. Hierfür werden bestimmte Messgrößen bestimmt und mit den Vorgaben der lokalen Vorschriften abgeglichen, um auf diese Weise eine Bewertung zu erhalten. Im Vergleich zu subjektiven oder subjektiv-objektiven Bewertungen des erweiterten Raumklimas findet die rein objektive Bewertung deutlich weniger Anwendung. Auffällig ist jedoch, dass die einzelnen Studien keine einheitlichen Messstrategien haben und teilweise unterschiedliche Messdaten erfasst werden. Während beispielsweise Bejan, Catalina & Munteanu (2017) und Serrano-Jiménez et al. (2020) lediglich die Temperatur, die relative Luftfeuchte und die CO₂-Konzentration messen, vernachlässigen Akanmu, Nunayon und Eboson (2021), Marchetti et al. (2017) sowie Marino, Nucara und Pietrafesa (2012) die relative Luftfeuchte, erweitern die Messungen dafür um den Schalldruckpegel und eine lichttechnische Bewertungsgröße. Dabei handelt es sich entweder um die Beleuchtungsstärke oder um das visuelle und infrarote Strahlungsangebot. Fadeyi et al. (2014) gehen noch einen Schritt weiter und messen neben den genannten Parametern zusätzlich die Konzentration an TVOC, O₃ und CO. Es wird offensichtlich, dass die Definition des erweiterten Raumklimas (engl. *Indoor Environment*) nicht einheitlich interpretiert wird und aus diesem Grund unterschiedliche Messgrößen für die Bewertung erfasst werden. Zudem unterscheiden sich alle Studien in der zeitlichen und räumlichen Auflösung der Messungen.

Neben diesen Forschungsansätzen wird das erweiterte Raumklima im Rahmen der Gebäudezertifizierung (bspw.: LEED, BREEAM, HQE) bewertet. Diese Bewertungen basieren ausschließlich auf objektiven

Messungen. Lediglich drei britische Zertifizierungssysteme (OsmoZ, WELL, NABERS) empfehlen die Nutzung von subjektiven Bewertungen, geben jedoch kein Bewertungsschema vor. Aus diesem Grund können sämtliche Zertifizierungssysteme zu den objektiven Bewertungsmethoden gezählt werden. Diese unterscheiden sich jedoch stark in den Messgrößen, die sie berücksichtigen sowie in der Gewichtung der einzelnen Einflüsse des erweiterten Raumklimas. Während das deutsche Zertifizierungssystem DGNB und das italienische Zertifizierungssystem ITACA die vier Aspekte des erweiterten Raumklimas gleichwertig gewichten, wird im amerikanischen LEED die lufthygienische Umgebung deutlich stärker gewichtet als alle anderen Aspekte. Das englische System BREEAM gewichtet dagegen die visuelle Umgebung gefolgt von der lufthygienischen Umgebung stärker als die akustische und die thermische Umgebung. (Wei et al., 2020)

3.5.3 Subjektive-objektive Bewertungsmethoden des erweiterten Raumklimas

Subjektive-objektive Bewertungsmethoden kombinieren die Messungen der physikalischen Parameter mit den Auswertungen von Nutzerbefragungen mit dem Ziel, Korrelationen zwischen diesen beiden Aspekten zu identifizieren die es ermöglichen, eine Gleichung zur Vorhersage der Zufriedenheit der Gebäudenutzer mit dem erweiterten Raumklima zu definieren. (Roumi et al., 2022)

Es existiert eine ganze Fülle an Forschungsansätzen, die es sich zum Ziel gemacht haben, das erweiterte Raumklima bewerten zu können. Der Bezug, der hierfür gemacht wird, ist jedoch nicht immer der gleiche. Chiang und Lai (2002) sowie Chiang et al. (2001) verfolgen das Ziel einer Risikobewertung für die Gesundheit. Dagegen wollen Wong, Mui & Hui (2008), Lai et al. (2009) sowie Lee et al. (2012) einen Indikator für die Akzeptanz des erweiterten Raumklimas schaffen. Letztere bewerten zusätzlich, die Lernperformanz von Studenten, die sich in Abhängigkeit von der Qualität des erweiterten Raumklimas ergibt. Ncube und Riffat (2012) sowie Mihai und Lordache (2016) beziehen sich dagegen lediglich auf die Qualität der Umgebung. Tang, Ding und Singer (2020a; 2020b), Wang und Zheng (2020), Miao und Ding (2020), Danza et al. (2020), Zuhair et al. (2018), Cao et al. (2012), Fassio, Fanchiotti und de Lieto Vollaro (2014) sowie Andargie und Azar (2019) beziehen sich für ihre Bewertung auf die Zufriedenheit der Nutzer. Letztere beurteilen zusätzlich die Arbeitsleistung und den Komfort der Gebäudenutzer. Mujan et al. (2021) berücksichtigen, neben der Zufriedenheit mit der Gesamtumgebung, auch die Wahrnehmung der einzelnen Einflüsse. Mui und Chan (2005) beziehen ihre Bewertung auf die Akzeptanz und die Wahrnehmung der einzelnen Einflüsse.

Diese Ansätze unterscheiden sich nicht nur durch den Bewertungsbezug, sondern grundsätzlich in ihrer Herangehensweise. Während die einen das erweiterte Raumklima anhand eines einzelnen Indikators bewerten (z. B. Chiang & Lai, 2002; Ncube & Riffat, 2012; Cao et al, 2012; Mujan et al., 2021) bewerten die anderen jeden Aspekt des erweiterten Raumklimas für sich alleine (z. B. Zuhair et al., 2018; Tang, Ding & Singer, 2020a; Miao & Ding, 2020). Dies führt zu dem wesentlichen Unterscheidungsmerkmal, dass bei der Bewertung des erweiterten Raumklimas anhand einer einzelnen Größe ein Gewichtungsschema für die einzelnen Einflüsse benötigt wird. Die Gewichtungen unterscheiden sich jedoch ebenfalls in jedem der betrachteten Ansätze. Sowohl Danza et al. (2020) als auch Miao und Ding

(2020) beschreiben zudem unterschiedliche Gewichtungen für unterschiedliche Räume. Sämtliche Gewichtungen sind in der folgenden Abbildung 6 dargestellt. Je weiter außen sich der jeweilige Einfluss (Thermisch, Akustisch, Visuell und Lufthygienisch) befindet, desto höher ist dieser gewichtet. Dementsprechend wird der Einfluss der lufthygienischen und der thermischen Umgebungen in den meisten Ansätzen am höchsten gewichtet, während der Einfluss der Beleuchtung meistens am niedrigsten gewichtet wird. Zu dem gleichen Ergebnis kamen Leccese et al. (2021), die die Gewichtung für unterschiedliche Gebäudetypen aufgliedert haben. Lolli, Coruzzolo und Balugani (2022) konnten mit ihrem Ansatz zusätzlich nachweisen, dass sich die Gewichtung der vier Einflüsse des erweiterten Raumklimas für jede individuelle Person unterscheidet, auch wenn diese Personen den gleichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Jedoch wertete auch hier die Mehrzahl der Personen den Einfluss der thermischen Umgebung am stärksten.

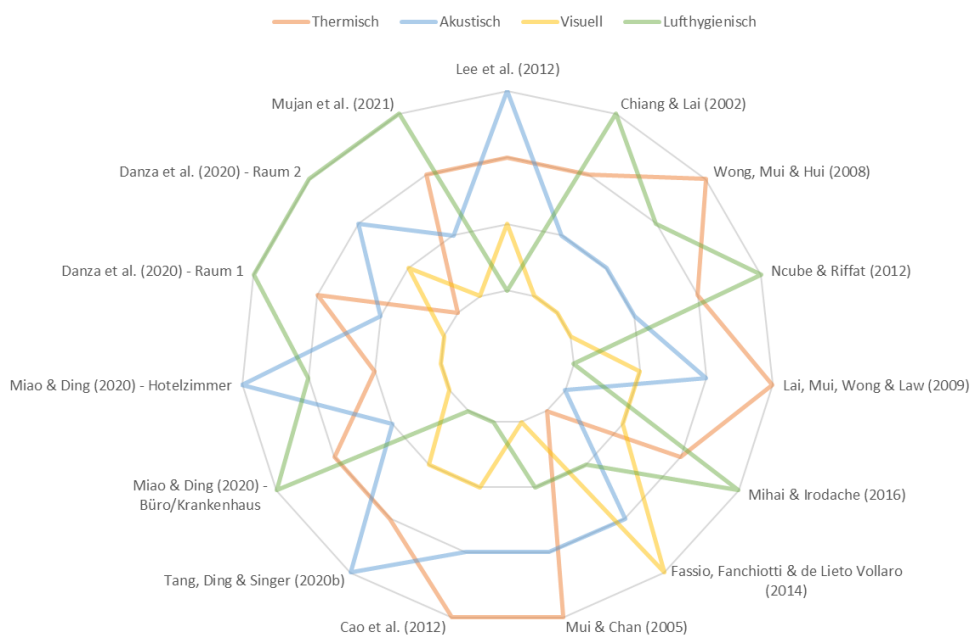


Abbildung 6: Verhältnis der Gewichtungsfaktoren bei der Bewertung des erweiterten Raumklimas mit einem einzelnen Indikator

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal sind die berücksichtigten Größen zur Beschreibung des erweiterten Raumklimas sowie die benutzten Fragebögen, deren Fragen sich aus dem Bezug des jeweiligen Ansatzes ergeben. Von den 18 genannten Studien berücksichtigen alle die Lufttemperatur und die Beleuchtungsstärke. Dagegen werden Größen wie der Luftdruck oder die Luftwechselrate nur von einer einzigen Studie berücksichtigt. Neben den physikalischen Messgrößen berücksichtigen lediglich zwei Ansätze (Lee et al., 2012; Tang, Ding & Singer, 2020b) die Bekleidung und die Aktivität der betrachteten Personen. Die Häufigkeit der Berücksichtigung ist für sämtliche in den Studien genannten Einflussgrößen in der folgenden Abbildung 7 dargestellt. Die Größe der einzelnen Blasen repräsentiert die Häufigkeit der Berücksichtigung. Somit werden die Lufttemperatur und die Beleuchtungsstärke am häufigsten berücksichtigt, während andere Aspekte wie die Luftwechselrate lediglich in einer einzigen Studie erfasst werden.

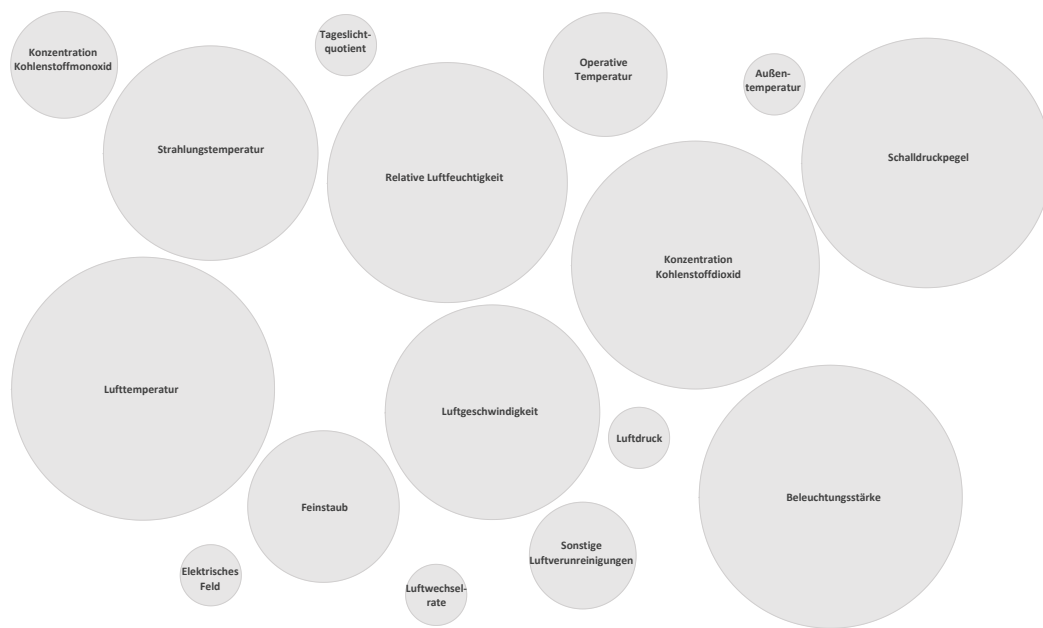


Abbildung 7: Häufigkeit der Berücksichtigung der objektiven Messgrößen zur Bewertung des erweiterten Raumklimas

Neben den objektiven Messgrößen unterscheiden sich die Bewertungsansätze wie bereits beschrieben in dem Bezug, den die Bewertungsmethode zum erweiterten Raumklima herleiten soll. Dabei kann zwischen der Wahrnehmung, der Zufriedenheit, der Akzeptanz sowie der Produktivität unterschieden werden. Dieser Bezug lässt sich ebenfalls in den verwendeten Fragebögen erkennen, wodurch sich für jeden der Ansätze unterschiedliche Formulierungen und Antwortmöglichkeiten für die Fragebögen ergeben. Zudem wurden weitere persönliche Faktoren wie das Alter, das Geschlecht oder das Gewicht lediglich von Andargie und Azar (2019), Wang und Zheng (2020), Miao und Ding (2020) sowie Danza et al. (2020) abgefragt. Zusätzlich kann unterschieden werden zwischen Langzeitbewertungen (bspw. Chiang & Lai, 2002; Tang, Ding & Singer, 2020a) und direkten Momentaufnahmen (bspw. Mui & Chan, 2005; Wong, Mui & Hui, 2008; Lai et al., 2009).

Auch an dieser Stelle wird die Problematik der Definition des erweiterten Raumklimas ersichtlich. Eine Reihe von Autoren postulieren, dass sie die *Indoor Environment Quality* bewerten, berücksichtigen jedoch lediglich einen (Turunen et al., 2014), zwei (Xu, Huang & Zhang, 2018; Vakalis et al., 2019; Huang & Liao, 2022) oder drei (Geng, Lin & Zhu, 2020; Guo, Hu & Liu, 2017) der vier beschriebenen Einflüsse.

3.6 Wechselwirkung zwischen den Einflüssen des erweiterten Raumklimas

Die bisher beschriebenen Bewertungsansätze berücksichtigen die Einflüsse des erweiterten Raumklimas jeweils einzeln und verfolgen den Ansatz, diese mithilfe eines Gewichtungsschemas in einem Indikator zusammenzuführen. Lediglich Fakhari, Vahabi und Fayaz (2021) beschreiben den Einfluss der thermischen Wahrnehmung sowie der thermischen Zufriedenheit auf die visuelle Zufriedenheit in einem Innenraum. Tatsächlich sind die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflüssen des erweiterten

Raumklimas nicht vollständig erforscht. Es gibt jedoch eine Reihe von Studien, die die Wechselwirkungen zwischen zwei oder drei der vier verschiedenen Einflüsse untersucht haben (unter anderem dargestellt in Wu et al., 2020a; Bluysen, 2014b). Pellerin und Candas (2003) kamen zu dem Schluss, dass sich der kombinierte Effekt der thermischen und der akustischen Umgebung nicht in physiologischen Daten nachweisen lässt und dennoch der Lärmpegel insbesondere in warmen Umgebungen einen Einfluss auf die thermische Zufriedenheit hat. Zudem konnte ein Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden. Frauen akzeptieren demnach eher lautere Umgebungen als Männer. Dies lässt darauf schließen, dass für die Gesamtzufriedenheit mit dem erweiterten Raumklima der thermische Komfort der dominierende Einfluss ist. Nagano und Horikoshi (2005) belegen ebenfalls, dass die Geräuschkulisse einen Einfluss auf die Wahrnehmung von warmen thermischen Umgebungen hat; zudem beschreiben sie, dass die thermische Umgebung ebenso die Wahrnehmung der akustischen Umgebung beeinflusst. Yang und Moon (2018a) sowie Pellerin und Candas (2004) liefern ähnliche Ergebnisse, die eine gegenseitige Beeinflussung der thermischen und der akustischen Wahrnehmung beschreiben. Yang, Moon und Kim (2018) kamen zu dem Schluss, dass psychoakustische Größen durch die thermische Umgebung beeinflusst werden, jedoch die thermische Wahrnehmung nicht durch kurzzeitige moderate Geräusche beeinflusst wird. Trotz dieser Ergebnisse geben sie an, dass die Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Geräuschen und der Temperatur sowie der Einfluss auf die Wahrnehmung und Zufriedenheit nach wie vor unklar ist. Tiller et al. (2010) beschreiben in Bezug auf unterschiedliche Arten von Geräuschen, dass der thermische Komfort durch den *Room Criteria* jedoch nicht durch Gebäude- oder Bürogeräusche beeinflusst wird. Beim *Room Criteria* handelt es sich um einen Bewertungsindex der akustischen Umgebung. Nitidara et al. (2022) stellten bei steigendem Geräuschpegel und steigender Temperatur einen Einfluss auf die akustische Wahrnehmung fest. Ein Einfluss der akustischen Umgebung auf die thermische Umgebung wurde jedoch nicht festgestellt. Geng et al. (2022) belegen zum einen, dass das Hören von Musik die thermische Komfortbewertung verbessert. Umgekehrt verringert sich die akustische Komfortbewertung, wenn der *Universal Thermal Climate Index* steigt. Je höher dieser Index, desto größer wird der Hitzestress. Fanger, Breum und Jerking (1977) sind die Einzigen, die keinen Zusammenhang zwischen der akustischen Umgebung und dem thermischen Komfort belegen.

Nicht nur der Zusammenhang zwischen der akustischen und der thermischen Umgebung ist Bestandteil der Forschung; ebenso werden die Zusammenhänge zwischen der thermischen und visuellen sowie der akustischen und visuellen Umgebung untersucht.

Haldi und Robinson (2010) beschreiben, dass die Wahrscheinlichkeit, dass der Mensch sich bei niedrigen Temperaturen thermisch komfortabel fühlt, in einer Umgebung mit geringem visuellem Komfort, sinkt. Ebenso empfindet der Mensch in dunkler Umgebung bei höheren Temperaturen einen höheren thermischen Komfort. Umgekehrt erhöht sich in thermisch komfortablen Umgebungen ebenfalls der visuelle Komfort. Yang und Moon (2018b) belegen, dass die visuelle Umgebung keinen Einfluss auf die Wahrnehmung der thermischen Umgebung hat. Jedoch hat die thermische Umgebung einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Helligkeit und der Entspanntheit der visuellen Umgebung. Du, Zhang und Zao (2022) beschreiben, dass sich im Winter die Wahrnehmung des thermischen Komforts in Innenräumen mit zunehmender Beleuchtungsstärke verbessert. Kim und Jeong (2002) konnten keine Auswirkung der visuellen Umgebung auf die Durchblutung des Unterarms, als physiologische Messgröße für die

Thermoregulation des Körpers, feststellen. Dennoch bevorzugten die Testpersonen bei einer geringeren Beleuchtungsstärke wärmere Kleidung für ihren thermisch komfortablen Zustand. Chinazzo et al. (2018) belegen einen signifikanten Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die thermische Bewertung der Umgebung, jedoch nicht auf die thermische Wahrnehmung. Dieser Zusammenhang wird durch die thermischen Erwartungen, die durch die Beleuchtungsintensität entstehen, erklärt. Moosmann (2014) beschreibt ebenfalls den Einfluss der thermischen Zufriedenheit auf den visuellen Komfort. Dieser Zusammenhang wird insbesondere in Gebäuden mit einem hohen Fensterflächenanteil durch die Nutzung des Sonnenschutzes erklärt. Nach Geng et al. (2022) wird, in einem thermisch neutralen Zustand, die vorhandene Beleuchtung als dunkler bewertet. Bellia et al. (2021) kommen zu dem Schluss, dass ein wärmeres Licht zu einer wärmeren thermischen Wahrnehmung führt. Fanger, Breum und Jerking (1977) belegen zudem, dass die Farbtemperatur einen Einfluss auf die bevorzugte Temperatur im Innenraum hat. Lediglich Laurentin, Berrutto und Fontoyont (2000) konnten keinen Zusammenhang zwischen dem thermischen und dem visuellen Komfort feststellen.

In Bezug auf die Wechselwirkung zwischen der akustischen und der visuellen Umgebung beschreiben Yang und Moon (2018c), dass die Beleuchtungsstärke keinen Einfluss auf die akustische Wahrnehmung hat. Ebenso wurde die Empfindung der Helligkeit nicht durch die Geräuschkulisse beeinflusst. Die akustische Umgebung hat jedoch einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Entspannung der visuellen Umgebung. Liebl et al. (2012) beziehen sich nicht auf den Komfort, sondern auf die daraus resultierende Produktivität. So kamen sie zu dem Schluss, dass durch die Interaktion der visuellen und der akustischen Umgebung die wahrgenommene kognitive Performanz beeinflusst wird, jedoch die tatsächlich objektiv messbare kognitive Performanz hiervon nicht betroffen ist. Fastl (2004) beschreibt den Einfluss von visuellen Reizen auf die psychoakustische Größe der Lautheit. Dabei wird jedoch nicht die Beleuchtung an sich beschrieben, sondern die Farbe und die Bewegung von gesehenen Objekten. Das Ergebnis zeigt, dass ein zusätzlicher visueller Input zu einem vorhandenen akustischen Input die wahrgenommene Lautheit reduziert. Menzel, Haufe und Fastl (2010) belegen ebenfalls, dass durch die gesehene Farbe von Objekten die wahrgenommene Lautheit reduziert, jedoch auch verstärkt werden kann. Zudem konnte eine große intraindividuelle Variabilität festgestellt werden.

Die Wechselwirkung zwischen der lufthygienischen Wahrnehmung und den anderen drei Einflüssen des erweiterten Raumklimas wird deutlich seltener in der Forschung abgebildet. Haldi und Robinson (2010) konnten keinen Zusammenhang zwischen der olfaktorischen und der thermischen Wahrnehmung sowie der olfaktorischen und der visuellen Wahrnehmung feststellen. Fang, Clausen und Fanger (1998) konnten ebenfalls keinen Einfluss der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit auf die olfaktorische Wahrnehmung feststellen. Jedoch verschlechtert sich die wahrgenommene Luftqualität bei steigender Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Des Weiteren wurden die Wechselwirkungen zwischen der Luftqualität, der thermischen und der akustischen Umgebung untersucht. Die Akzeptanz des erweiterten Raumklimas reduziert sich insbesondere bei warmen und lauten, warmen und luftverschmutzten sowie warmen, lauten und luftverschmutzten Umgebungen. Ebenso verschlechtert sich die subjektive Motivation und Performanz. (Balazova, Clausen & Wyon, 2007) Clausen et al. (1993) beschreiben zusätzlich, wie sich der Gesamtkomfort bei einer Änderung der drei Einflüsse verändert.

Huang et al. (2012) erläutern dagegen den Einfluss der thermischen Zufriedenheit auf die Wahrnehmung des Schalldruckpegels und der Beleuchtungsstärke. Ist der Mensch in einem thermisch unkomfortablen Zustand, dann wird der Mensch höchstwahrscheinlich ebenfalls mit der visuellen und der akustischen Umgebung unzufrieden sein, auch wenn diese beiden den normativen Vorgaben entsprechen. Nach Yang und Moon (2019) erhöht sich der akustische Komfort im Zustand der Thermoneutralität; zudem erhöht sich der thermische Komfort bei einer konstanten Beleuchtungsstärke, wenn sich der Schallpegel reduziert. Der visuelle Komfort erhöht sich dagegen im Zustand der Thermoneutralität, wenn der Schalldruckpegel reduziert wird. Und letztlich erhöht sich der Gesamtkomfort im thermisch neutralen Zustand in hellerer Umgebung bei einem reduzierten Schalldruckpegel. Nach Du, Zhang und Zhao (2022) wird der visuelle Komfort durch die Interaktion der Lufttemperatur und des Schalldruckpegels beeinflusst.

3.7 Personenbezogene Differenzen bei der Wahrnehmung und Bewertung des erweiterten Raumklimas

Aus den zahlreichen Ansätzen, die zur Bewertung der Wahrnehmung und der Auswirkungen der thermischen, lufthygienischen, visuellen und akustischen Umgebung sowie des erweiterten Raumklimas als Ganzes abgeleitet wurden, wird ersichtlich, dass die individuelle Person eine zentrale Rolle spielt. Diese wird jedoch in den meisten Ansätzen vollständig vernachlässigt oder nur unzureichend berücksichtigt.

Dies führt dazu, dass Innenraumumgebungen, die bei einer Person zur Zufriedenheit führen, nicht zwangsläufig von anderen Personen als zufriedenstellend bewertet werden. Gebäudenutzer reagieren teilweise merkbar anders, obwohl sie den gleichen Bedingungen ausgesetzt sind. Dies führt zu der Annahme, dass es eine Reihe von persönlichen und psychosozialen Faktoren gibt, die die Wahrnehmung und Bewertung des erweiterten Raumklimas beeinflussen. (Kim et al., 2013) Aus dieser Wahrnehmung und der anschließenden Bewertung resultiert letztendlich der Komfort und die Zufriedenheit des Menschen (Grün, 2009).

Der menschliche Komfort wird definiert als „[...] ein angenehmer Zustand der physiologischen, psychologischen und physischen Harmonie zwischen dem Menschen und seiner Umgebung“ (Slater, 1985; S. 4). Das bedeutet im Umkehrschluss, dass dieser Zustand des Komforts für jeden Menschen anhand unterschiedlicher Einflüsse definiert werden kann. Der physiologische Zustand bezieht sich auf die Fähigkeit des Körpers, trotz unterschiedlichster Umgebungsbedingungen, weiter zu funktionieren. Hierfür gibt es eine Reihe von Mechanismen im menschlichen Körper, die ohne das Bewusstsein ablaufen und das Wohlbefinden des Menschen stetig aufrechterhalten, dies zumindest bis gewisse Grenzen überschritten werden und diese Mechanismen nicht mehr ausreichen. Die psychologische Komponente bezieht sich auf die bewusste Bewertung der Wahrnehmung. Der Mensch nimmt für gewöhnlich die Umgebung nur bewusst wahr, wenn diese zu einer negativen Bewertung und zu einer körperlichen Stressreaktion führt. Die bewusste Wahrnehmung einer als zufriedenstellend bewerteten Umgebung erfolgt lediglich, wenn der Mensch beispielsweise beim Ausfüllen eines Fragebogens darauf hingewiesen wird. Der physische Komfort bezieht sich ebenfalls auf die bewusste Wahrnehmung, dies jedoch durch Aktionen, die der Mensch durch sein Verhalten beeinflussen kann oder

zu verantworten hat. Beispielsweise führt das Tragen von unangenehmer Kleidung oder das Anstoßen des kleinen Zehs zum physischen Unwohlsein. (Slater, 1985)

Es gibt eine Reihe von Studien, die sich insbesondere mit den ersten beiden Aspekten, dem physiologischen und dem psychologischen Einfluss, auf die menschliche Wahrnehmung befassen haben. Am häufigsten wurde der Einfluss des Geschlechts auf die Wahrnehmung der thermischen Umgebung untersucht. (Kim et al., 2013) Hierbei kamen die Studien jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen. Becker und Paciuk (2009), Indraganti und Rao (2010) kamen zu dem Schluss, dass es keinen Unterschied in der Wahrnehmung der thermischen Umgebung zwischen beiden Geschlechtern gibt. Beshir und Ramsey (1981), Parsons (2002), Schellen et al. (2013) und Pigliautile et al. (2020) kamen zu dem umgekehrten Ergebnis und belegen, dass es einen Unterschied in der Wahrnehmung der thermischen Umgebung zwischen beiden Geschlechtern gibt. Neben der Wahrnehmung wurde ebenfalls der Einfluss des Geschlechts auf die Akzeptanz und die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung untersucht. Cena und Dear (1999), Choi, Aziz und Loftness (2010), Dear und Fountain (1994), Karjalainen (2007), Schellen et al. (2013), Zalejska-Jonsson und Wilhelmsson (2013), Donnini et al. (1997), Zhang und Zhu (2022), Bae, Asojo und Martin (2020) sowie Hu et al. (2022) belegen, dass das Geschlecht einen Einfluss auf die Akzeptanz und die Zufriedenheit mit der Umgebung hat. Indraganti und Humphreys (2021), Nakano, Tanabe und Kimura (2002), Maykot, Rupp und Ghisi (2018) sowie Thapa (2019) belegen zudem einen Unterschied in der als thermisch neutral bewerteten Temperatur zwischen den beiden Geschlechtern. Dieser Unterschied kann jedoch nach Dear und Fountain (1994), Donnini et al. (1997) sowie Rohles (1979) nicht belegt werden. Aus der Zusammenfassung einer Reihe von Studien schlussfolgert Haselsteiner (2021), dass Frauen im Gegensatz zu Männern leicht wärmere Umgebungen bevorzugen. Die Unterschiede in der thermisch neutralen Temperatur beider Geschlechter sind jedoch so gering, dass angenommen werden kann, dass Frauen empfindlicher gegenüber zu hohen und zu niedrigen Temperaturen sind, während die neutralen Temperaturen nur leicht voneinander abweichen. Diese höhere Sensitivität konnte ebenfalls von Rupp et al. (2019) sowie Lui et al. (2018) nachgewiesen werden.

Der Einfluss des Geschlechts auf die Wahrnehmung und Bewertung der restlichen Aspekte des erweiterten Raumklimas ist im Vergleich dazu deutlich weniger erforscht. In Bezug auf die Sensitivität gegenüber dem Licht zeigen einige Studien einen deutlichen Unterschied zwischen den Geschlechtern. Diese beziehen sich sowohl auf die Wahrnehmung und Präferenz der Lichtfarbe und der Helligkeit von künstlichem Licht (Chellappa et al., 2017; Cirrincione et al., 2018; Gennusa et al., 2017; Knez und Kers, 2000; Knez, 2001) die Bewertung der Qualität von Tageslicht und künstlichem Licht (Aries, Veitch & Newsham, 2010), den empfundenen Komfort mit künstlichem Licht und Tageslicht (Pigliautile et al., 2020; Lee, Park und Jeong, 2018) sowie die Zufriedenheit mit der künstlichen Beleuchtung (Collins et al., 1990; Bae, Asojo & Martin, 2020; Kraus & Novakova, 2019) Lediglich Choi, Aziz und Loftness (2009) konnten keinen Einfluss des Geschlechts auf die Zufriedenheit mit der Beleuchtungsumgebung feststellen.

Nach Pigliautile et al. (2020) hat das Geschlecht ebenfalls einen Einfluss auf den akustischen Komfort. Yang et al. (2012) konnten ebenfalls einen Unterschied zwischen den Geschlechtern bei der Ablenkung durch Hintergrundgeräusche feststellen. Bae, Asojo und Martin (2020) sowie Lee, Park und Jeong (2018) belegen zudem einen geschlechterspezifischen Unterschied in der Zufriedenheit mit der akustischen

Umgebung, wohingegen Ellermeier und Zimmer (1997), Choi, Aziz und Loftness (2009) sowie Kraus und Novakova (2019) keinen Unterschied in der Sensitivität gegenüber Geräuschen feststellen konnten.

Bei der Zufriedenheit und Akzeptanz mit der Qualität der Luft gibt es nach Kraus und Novakova (2019) sowie Bae, Asojo und Martin (2020) keinen Unterschied zwischen den Geschlechtern. Demgegenüber stehen die Ergebnisse von Andargie und Azar (2019), Bakke et al. (2007) und Pigliautile et al. (2020), die einen Einfluss des Geschlechts auf die Zufriedenheit mit der Luftqualität nachweisen. Cheng et al. (2022) beschreiben den Unterschied für ein gesundheitliches Risiko, welches zum Unwohlsein beiträgt, zusätzlich aus physiologischer Sicht. Dazu vergleichen sie die Inhalationsrate von Männern und Frauen in Abhängigkeit von den jeweiligen Schadstoffen, die teilweise zu einem höheren Gesundheitsrisiko für Männer oder Frauen führen.

In Bezug auf die Bewertung der Zufriedenheit mit dem erweiterten Raumklima kann kein Unterschied zwischen den Geschlechtern festgestellt werden. (Zalejska-Jonsson & Wilhelmsson, 2013) Keine der übrigen Studien stellt einen Bezug zwischen dem Geschlecht und der Wahrnehmung oder Bewertung des erweiterten Raumklimas her.

Obwohl eine Reihe von Studien keinen Zusammenhang zwischen dem Geschlecht und dem Wohlbefinden der Gebäudenutzer feststellen konnten, widerspricht die überwiegende Mehrheit der Studien diesem Ergebnis und kann einen Zusammenhang nachweisen. Unklar ist hierbei jedoch, ob dieser Unterschied lediglich aus den physiologischen Unterschieden zwischen Mann und Frau resultiert oder ob dieser auf psychologische Aspekte zurückzuführen ist (Ausnahme: Cheng et al., 2022). Der Einfluss der psychologischen Komponente der Wahrnehmung kann bei den subjektiven Bewertungen zu starken individuellen Differenzen führen, die nicht zwangsläufig mit dem Geschlecht einer Person zusammenhängen. Dies könnte eine Erklärung für die sich widersprechenden Ergebnisse sein.

Neben dem Geschlecht wird in einer Vielzahl der Studien zusätzlich der Einfluss des Alters betrachtet. Becker und Paciuik (2009) sowie Erlandson et al. (2003) konnten keinen Zusammenhang zwischen der thermischen Wahrnehmung und dem Alter feststellen. Ebenso gibt es nach Melikov et al. (2005) keinen Einfluss des Alters auf die Akzeptanz der thermischen Umgebung. Entgegen diesen Ergebnissen belegen Choi, Aziz und Loftness (2010) und Indraganti und Rao (2010), dass jüngere Personen unzufriedener bei niedrigerer Temperatur sind und eine geringere Toleranz für ihre thermische Umgebung haben. Thapa (2019) konnte für die drei Alterskategorien 12 bis 30 Jahre, 30 bis 50 Jahre sowie über 50-jährige Personen unterschiedliche Komforttemperaturen bestimmen. Ebenso belegen Dosumu und Aigbavboa (2019), Indraganti und Humphreys (2021) sowie Pigliautile et al. (2020) den Einfluss des Alters auf die Wahrnehmung und den Komfort der thermischen Umgebung.

Ein Unterschied der Zufriedenheit mit der visuellen Umgebung in Abhängigkeit vom Alter konnte nach Collins et al. (1990), Dosumu und Aigbavbova (2019), Shafavi et al. (2020) und Pigliautile et al. (2019) belegt werden. Knez und Kers (2000) beweisen zudem, dass jüngere und ältere Personengruppen unterschiedliche Lichtfarben bevorzugen.

Zur Bewertung der akustischen Umgebung im Zusammenhang mit dem Alter der Gebäudenutzer bezieht sich die Mehrheit der Studien auf den aufgrund von Geräuschen empfundenen Ärger. Jedoch lassen sich hier wiederum unterschiedliche Ergebnisse feststellen. Ni und Huang (2022) beschreiben, dass die entstehende Verärgerung aufgrund von Geräuschen vom Kindesalter bis zum Alter von 18 Jahren steigt

und anschließend bis zum Alter von 30 Jahren wieder sinkt. Ab 30 Jahren verändert sich die Wahrnehmung deutlich weniger als in den Jahren davor. Dennoch werden die Menschen mit zunehmendem Alter toleranter gegenüber Geräuschen, was nach Ni und Huang (2022) möglicherweise auf einen beginnenden Hörverlust zurückzuführen ist. Daneben beschreiben Pigliautile et al. (2020) ebenfalls einen Einfluss des Alters auf den akustischen Komfort; hierzu werden jedoch keine Altersgruppen genannt.

Bei der Bewertung der Luftqualität konnten Smedje, Norbäck und Edling (1997) sowie Dosumu und Aigbavboa (2019) ebenfalls einen Unterschied zwischen jüngeren und älteren Studienteilnehmern feststellen. Pigliautile et al. (2020) konnten diesen Unterschied zwischen den Alterskategorien lediglich im Sommer, jedoch nicht im Winter feststellen. Zusätzlich zu diesen Komfortbewertungen beschreiben Branco et al. (2014) und Faustman et al. (2000), dass Kinder anfälliger für negative Auswirkungen von Schadstoffen sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Kinder im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht eine höhere Inhalationsrate haben als ausgewachsene Personen und zudem ihre Lungen und ihr Immunsystem nicht vollständig entwickelt sind. Bae, Asojo und Martin (2020) konnten für die in ihrer Studie definierten Alterskategorien jedoch keinen Unterschied bezüglich der Zufriedenheit mit der Luftqualität feststellen.

Bae, Asojo und Martin (2020) kamen abschließend dazu, dass in Bezug auf die Bewertung der Zufriedenheit mit dem erweiterten Raumklima die mittlere Alterskategorie (35 – 54 Jahre) im Vergleich zu der jüngeren Alterskategorie (18 – 34 Jahre) und der älteren Alterskategorie (> 55 Jahre) unzufriedener ist.

Neben dem Geschlecht und dem Alter gibt es eine Reihe weiterer physiologischer Faktoren, die sich auf die Wahrnehmung und die Bewertung der einzelnen Einflüsse des erweiterten Raumklimas auswirken können. Für die thermische Umgebung sind dies unter anderem der *Body Mass Index* (Pigliautile et al., 2020; Thapa, 2019; Rewitz & Müller, 2022) der Körperfettanteil (Anderson, 1999) und mögliche Krankheiten wie Parkinson (Maruo et al., 2011). Daneben spielt der Energieumsatz der jeweiligen Person eine entscheidende Rolle. Dieser ergibt sich zum einen aus dem physiologischen Körperbau und zum anderen aus der Tätigkeit, die ausgeübt wird. Dieser Energieumsatz, ausgedrückt in der Einheit met (Gagge, Burton & Bazett, 1941), wird bereits in der DIN EN ISO 8996 (2005) berücksichtigt. Dabei handelt es sich jedoch um den Energieumsatz einer Standardperson; eine individuellere Bestimmung kann nach Binsfeld (2018) ebenfalls erfolgen. Der Energieverbrauch eines durchschnittlichen Menschen, der unter thermisch komfortablen Bedingungen auf einem Stuhl ruhend sitzt, entspricht 1 met. Parsons (2002) beschreibt die Akklimatisierung ebenfalls als physiologische Anpassung an die thermische Umgebung. Unter der Akklimatisierung wird die Veränderung der physiologischen Reaktionen von Personen, die längerfristig warmen Umgebungen ausgesetzt sind, verstanden. (Parsons, 2014)

Die visuelle Wahrnehmung kann insbesondere durch Erkrankungen des Auges (z. B. grauer/grüner Star, Makuladegeneration), verändert werden (Grehn, 2019). Ebenso verändert sich die akustische Wahrnehmung bei einer möglichen Hörschwäche oder Erkrankungen des Außen-, Mittel- oder Innenohrs (Lenarz & Boenninghaus, 2012). Die Wahrnehmung und bewusste Bewertung der Luftqualität kann insbesondere durch eine Veränderung des Riechvermögens, ebenfalls aufgrund von Erkrankungen, zwischen unterschiedlichen Personen variieren. Beispiele hierfür sind eine COVID-19 Erkrankung (Luers

et al., 2020), Patienten die sich in der Chemotherapie befinden (Steinbach et al., 2009) sowie eine Diabetes-Erkrankung (Le Floch et al., 1993; Gouveri et al., 2014).

Neben dem Einfluss individueller physiologischer Unterschiede beschreibt Slater (1985) den Einfluss physischer Komponenten auf das Wohlbefinden. Beispielhafte physische Einflüsse sind die Bekleidung für das thermische Wohlbefinden (Fabbri, 2015), das Tragen einer Brille beim visuellen Wohlbefinden (Grehn, 2019) und das Tragen eines Hörapparates für das akustische Wohlbefinden (Lenarz & Boenninghaus, 2012). Lediglich für das lufthygienische Wohlbefinden lässt sich in der Literatur kein physischer Einfluss finden. Aufgrund der Erfahrungen des Tragens von Schutzmasken im Laufe der COVID-19-Pandemie kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um einen physischen Einfluss für die Bewertung der Luftqualität handelt. Der physische Komfort bezieht sich jedoch weniger auf die Beispiele, die Slater (1985) genannt hat, sondern auf die Einflüsse dieser physischen Komponenten auf die Wahrnehmung und Bewertung des erweiterten Raumklimas.

Die Bekleidungsisolierung, ausgedrückt in der Einheit clo (Kurzform für *clothing*), kann durch die Eigenschaften des jeweiligen Kleidungsstücks beschrieben werden und stellt den thermischen Widerstand zwischen der Haut und der äußeren Bekleidungsschicht dar. Somit ist die funktionelle Rolle der Kleidung die Aufrechterhaltung eines thermisch akzeptablen Zustands des Körpers unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. (Parsons, 2014) Das Tragen einer Brille kann sich auf mehrere Aspekte der visuellen Wahrnehmung auswirken. So kann unter anderem das Gesichtsfeld verkleinert und die Farbwahrnehmung verändert werden; es können vermehrt störende Reflexionen auftreten. (Grehn, 2019) Beim Tragen eines Hörgeräts kann es wiederum zu Rückkopplungsschleifen, dem Abschirmen von tiefen Frequenzen (Okklusionseffekt) oder einer verminderten Klangqualität kommen (Lenarz & Boenninghaus, 2012).

Neben den physiologischen und physischen Unterschieden individueller Personen bezieht Slater (1985) sich ebenfalls auf eine psychologische Komponente des Komforts. Ein möglicher Ansatz, die psychologischen Unterschiede zwischen den Personen zu berücksichtigen, ist die Kategorisierung der Persönlichkeit nach den *Big-Five* Faktoren. Die Persönlichkeit kann als Verhaltens- und Gefühlsbeschreibung betrachtet werden und gibt Aufschluss darüber, wie eine durchschnittliche Person mit bestimmten Persönlichkeitszügen sich in einer Umgebung verhält und wie sie diese bewertet. (Kallio et al., 2020) Das *Big-Five* Modell ordnet Personen den fünf Persönlichkeitsdimensionen Neurotizismus, Extrovertiertheit, Offenheit für neue Erfahrungen, Gewissenhaftigkeit und Verträglichkeit zu (Goldberg, 1990). Kallio et al. (2020) konnten nachweisen, dass extrovertierte Personen sich bei einer unzureichenden Qualität des erweiterten Raumklimas schneller gestresst fühlen. Schweiker, Hawighorst und Wagner (2016) belegen zudem, dass sich der Neurotizismus wesentlich auf die Präferenz der thermischen Umgebung und Extrovertiertheit auf die thermische Wahrnehmung auswirken. Cheung, Graham und Schiavon (2022) belegen ebenfalls Zusammenhänge zwischen der Verträglichkeit und der Zufriedenheit bei Tageslichtbeleuchtung sowie zwischen der Gewissenhaftigkeit und der Zufriedenheit bei elektrischer Beleuchtung.

Neben der Persönlichkeit hat auch die allgemeine Lebenszufriedenheit sowie die Zufriedenheit mit dem Beruf einen Einfluss auf die Zufriedenheit mit den einzelnen Aspekten des erweiterten Raumklimas. (Cheung, Graham & Schiavon, 2022) Weitere psychologische Einflüsse können die Erfahrung und die

Erwartung an das erweiterte Raumklima sein. Ein solcher Einfluss der Erfahrung und Erwartung wird nach Yamtraipat, Khedari und Hirunlabh (2005) beschrieben. Dabei wird belegt, dass die Komforttemperatur von Personen in warmen und feuchten Regionen, die sowohl zuhause als auch bei der Arbeit eine Klimaanlage nutzen, fast ein Grad niedriger ist als die Komforttemperatur von Personen, die keine Klimaanlage nutzen. Dieser Einfluss kann ebenfalls auf die nach Parsons (2002, 2014) beschriebene Akklimatisierung zurückzuführen sein. Ein weiteres Beispiel wird nach Smedje, Norbäck und Edling (1997) beschrieben. So wird die Luftqualität am Arbeitsplatz schlechter empfunden von den Personen, die zuhause keinem Zigarettenrauch ausgesetzt sind.

Darüber hinaus wird sowohl der thermische, der akustische als auch der visuelle Komfort durch die Tätigkeit zum Zeitpunkt der Wahrnehmung beeinflusst. Während beispielsweise das Hören von Musik bei einer mit Konzentration durchgeführten Aufgabe als störend empfunden wird, kann es in anderen Situationen als komfortabel bewertet werden. Eine visuelle Umgebung, die für eine anspruchsvolle Sehaufgabe gut ausgeleuchtet ist, wird als angenehm empfunden, während die gleiche Beleuchtung in einem Restaurant als unangenehm bewertet wird.

Neben den physiologischen, physischen und psychologischen Einflüssen werden in der Literatur im Allgemeinen drei weitere Einflüsse, insbesondere für das thermische Wohlbefinden, beschrieben, die sich keiner der drei Kategorien zuordnen lassen. Dazu zählen: der soziale Status (Indraganti & Rao, 2010; Hondula et al., 2021), das Bildungslevel (Yamtraipat, Khedari & Hirunlabh, 2005) und die Herkunft (Nakano, Tanabe & Kimura, 2002; He et al., 2020) Die folgende Abbildung 8 zeigt zusammenfassend die wichtigsten individuellen Einflüsse für die Wahrnehmung des erweiterten Raumklimas.

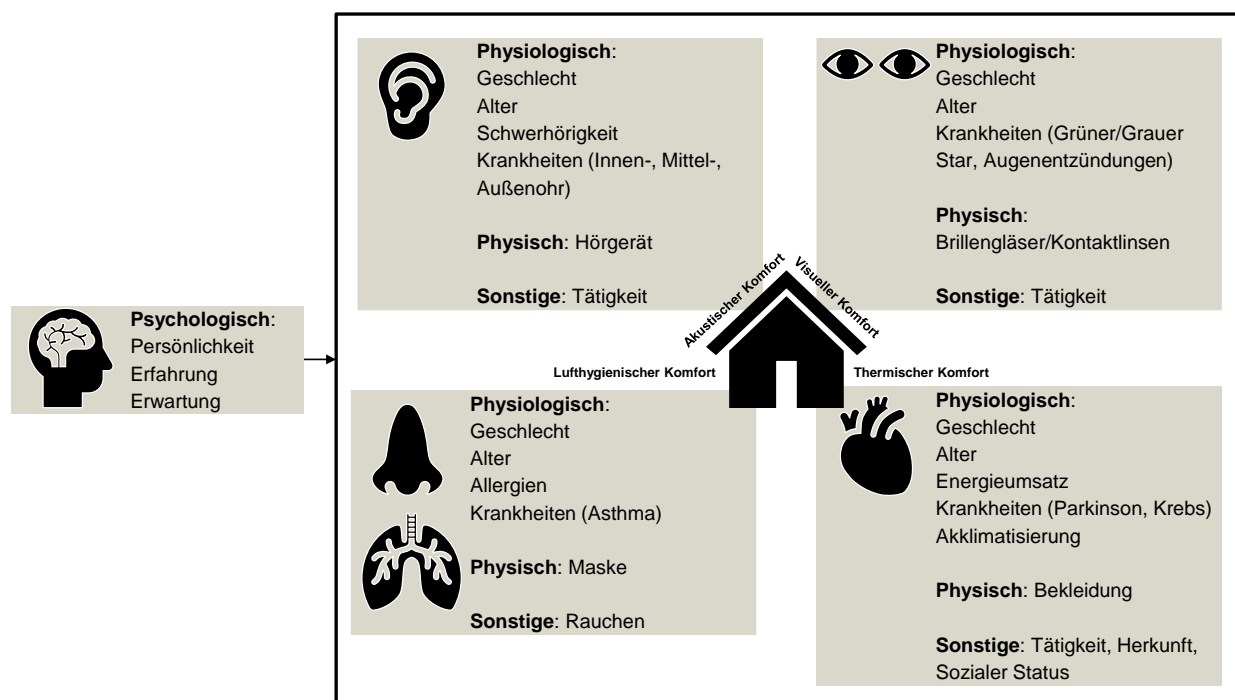


Abbildung 8: Zusammenfassung physiologischer, physischer und psychologischer Eigenschaften, welche die Wahrnehmung und Bewertung der akustischen, visuellen, lufthygienischen und thermischen Umgebung beeinflussen (in Anlehnung an Schneider, 2022)

3.8 Auswertung des Stands des Wissens

Der Stand des Wissens lässt etliche bestehende Lücken erkennen, angefangen mit der Definition des erweiterten Raumklimas oder *Indoor Environment*. Dieses bezieht sich meistens auf die genannten vier Einflüsse, jedoch teilweise auch nur auf zwei oder drei dieser Einflüsse. Ebenso verhält es sich mit der Definition des akustischen und des lufthygienischen Komforts. Während die Begriffe des thermischen und des visuellen Komforts weitestgehend einheitlich definiert werden, existiert für die andern zwei Komfortarten eine derartige einheitliche Definition bislang nicht. Aus diesem Grund erscheint es wenig überraschend, dass sich das erweiterte Raumklima oder gar der Komfort des erweiterten Raumklimas mit dem heutigen Wissensstand nicht definieren lässt.

Diese Uneinheitlichkeit der Definitionen resultiert möglicherweise aus der Vielzahl an unterschiedlichen Aspekten, die für jeden der vier Einflüsse des erweiterten Raumklimas berücksichtigt werden müssen. Auf der einen Seite stehen die physikalischen Bedingungen in einem Innenraum, die Entwurfsentscheidungen dieses Raums sowie einflussnehmende Außenbedingungen. Auf der anderen Seite stehen die sensorische menschliche Wahrnehmung sowie weitere individuelle Einflüsse und die daraus resultierende Bewertung. Somit ergibt sich eine Vielzahl an Parametern, die für die Bewertung der Auswirkungen von Innenräumen auf den Menschen berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise wird das thermische Raumklima mit dem normierten *Predicted Mean Vote*, einem Klimasummenmaß oder einem adaptiven Modell, von der Gebäudeseite aus betrachtet, ausschließlich auf der Grundlage von physikalischen Parametern, bewertet. Dahingegen wird die akustische Umgebung ausschließlich über das Einhalten von vorgegebenen Schallintensitäten oder den Entwurfparametern der Luft- oder Trittschalldämmung bewertet. Somit würde sich eine für den Menschen positive akustische Umgebung ergeben, wenn die nach Norm geforderten Werte eingehalten werden, während sich eine positive thermische Umgebung durch das Nachweisen eines *Predicted Mean Vote*, der möglichst nahe an dem Wert Null liegt, ergibt. Ähnlich der Bewertung der akustischen Umgebung verhält es sich bei der Bewertung der visuellen Umgebung, die sich hauptsächlich an fixierten Werten für die Beleuchtungsstärke oder den Tageslichtquotienten ergibt und der lufthygienischen Umgebung, bei der sich die Bewertung oder Klassifizierung ebenfalls anhand stofflicher Grenzwerte ergibt.

Dazu kommt, dass keine der genannten Normen individuelle personenbezogene Daten berücksichtigt. Die Ausnahmen bilden hier die DIN EN ISO 7730 (2006) sowie die DIN/TS 5031-100 (2021). Erstere berücksichtigt jedoch lediglich den Aktivitätsumsatz sowie die Bekleidungsisolierung von einer Personengruppe und bezieht sich somit ebenfalls nicht auf eine individuelle Person. Letztere bestimmt die biologische Wirkung von Licht anhand des Alters des Beobachters, wobei dieses bestimmten Alterskategorien zugeordnet wird. Da es sich hierbei jedoch um eine technische Spezifikation handelt, gibt es bezüglich der Vorgaben in dieser Norm Vorbehalte.

Die Richtigkeit und die Anwendbarkeit einer Reihe der vorgestellten Normen wurde bereits öffentlich kritisiert. Aus diesem Grund gibt es eine Reihe von Forschungsansätzen, die Bewertungsmethoden für die einzelnen Einflüsse des erweiterten Raumklimas beschreiben. Dabei handelt es sich jedoch in den meisten Fällen um Verbesserungen und Weiterentwicklungen von bereits existierenden und teilweise normierten Ansätzen. So werden für die Bewertung des thermischen Komforts mehrere Verbesserungsvorschläge für

den *Predicted Mean Vote* vorgestellt, für die Bewertung des lufthygienischen Komforts aus einzelnen stofflichen Grenzwerten zusammengefasste Bewertungsindikatoren hergeleitet oder die Bewertung der Lüftungsleistung bewertet. Für die Bewertung der visuellen Umgebung liegt der Fokus auf der Lichtquantität, der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung sowie dem Ableiten eines Indikators zur Bewertung des Blendungsrisikos. Für die Bewertung des akustischen Komforts fokussieren sich eine Reihe von Ansätzen auf die Erarbeitung des Zusammenhangs zwischen den subjektiven Bewertungen und den objektiv gemessenen Schalldruckpegeln; ansonsten wird hier zumeist lediglich die Einhaltung der vorhandenen normativen Vorgaben überprüft.

Der Stand der Forschung bezüglich der Bewertung der Wirkungen der Einflüsse des erweiterten Raumklimas unterscheidet sich beim Einbeziehen von individuellen Personendaten nicht wesentlich vom Stand der Normen. Am häufigsten werden Parameter wie der Aktivitätsumsatz oder die Bekleidung zur Bewertung des thermischen Komforts genutzt. Für die Bewertung der drei weiteren Einflüsse des erweiterten Raumklimas werden auch in der Forschung keine individuellen Personenparameter berücksichtigt.

Neben den Ansätzen, sowohl aus den Normen als auch aus der Forschung, die sich auf die Bewertung der einzelnen Einflüsse des erweiterten Raumklimas beziehen, gibt es eine Reihe von Ansätzen, die das erweiterte Raumklima als Ganzes bewerten wollen. Hierbei kann zwischen den subjektiven, den objektiven und den subjektiv-objektiven Ansätzen unterschieden werden. Während bei den subjektiven Ansätzen keine Einigkeit darüber herrscht, welche Fragen in den Fragebögen gestellt werden müssen, sind die objektiven Ansätze sich uneinig in Bezug auf die zu messenden Daten sowie die Messstrategie und die Gewichtung (bspw. bei den Gebäudezertifizierungen). Der Großteil der Forschung zur Bewertung des erweiterten Raumklimas bezieht sich daher auf die Entwicklung einer subjektiv-objektiven Methode. Die Mehrheit dieser Ansätze entwickelt einen einzelnen Indikator zur Bewertung der Wirkung des erweiterten Raumklimas. Diese Ansätze bewerten letztendlich jeden der vier Einflüsse für sich alleine und kombinieren diese Ergebnisse anhand entsprechend subjektiv ermittelter Gewichtungen zu einem Indikator. Dabei herrscht jedoch große Uneinigkeit über die Gewichtung der vier Einflüsse. Diese unterscheiden sich teilweise sogar innerhalb einzelner Studien, wenn diese Studie mehr als einen Raum untersucht hat. Dazu kommt, dass die objektiv gemessenen Daten, die für diese Ansätze miteinbezogen wurden, sich ebenfalls stark unterscheiden. Lediglich die Lufttemperatur und die Beleuchtungsstärke wurden in jedem der betrachteten subjektiv-objektiven Ansätze berücksichtigt.

Ein weiterer Faktor, der bei der Bewertung sowohl der einzelnen Einflüsse als auch des gesamten erweiterten Raumklimas bislang keine Berücksichtigung findet, ist die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Einflüssen. Diese stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar, da diese Zusammenspiele nicht ansatzweise vollständig erforscht sind. Hauptsächlich werden die Wechselwirkungen zwischen jeweils zwei Einflüssen (z. B. thermische und akustische Umgebung) und teilweise zwischen drei Einflüssen (z. B. thermische, akustische und visuelle Umgebung) betrachtet. Eine Studie, die die Wechselwirkung zwischen allen vier Einflüssen abbildet, wurde nicht gefunden. Auffällig ist zudem, dass die Wechselwirkung zwischen der lufthygienischen Umgebung mit den anderen Umgebungen vergleichsweise am wenigsten thematisiert wird.

Neben der Einheitlichkeit des Bewertungsansatzes fehlt es ebenfalls an der Einheitlichkeit des Bewertungsziels. So kann das Ziel die Zufriedenheit, die Wahrnehmung, die Akzeptanz oder der Komfort und teilweise die Performanz sein und dennoch geben alle Studien an, dass die Auswirkung des erweiterten Raumklimas bewertet wird. Grundsätzlich kann zwischen der sensorischen Empfindung oder Wahrnehmung und dem daraus resultierenden Wohlbefinden unterschieden werden. Während es sich bei ersterem um die rein physiologischen Veränderungen im menschlichen Körper handelt, beschreiben letztere die Bewertung dieser Wahrnehmung. Aus diesem Grund haben die individuellen Personenparameter ebenfalls einen Einfluss darauf, wie sich das erweiterte Raumklima auf eine Person auswirken kann. Bei diesen Parametern kann im Wesentlichen zwischen den physiologischen, den physischen sowie den psychologischen Einflüssen unterschieden werden. Die physiologischen Parameter beeinflussen die sensorische Wahrnehmung sowie die körperliche Reaktion auf mögliche Einflüsse, die psychologischen Parameter, die individuelle Bewertung dieser Wahrnehmung. Die physischen Parameter können als zusätzliche Einflüsse betrachtet werden, die sowohl einen Einfluss auf die physiologischen Reaktionen als auch die psychologischen Bewertungen haben können. Die Vollständigkeit dieser Zusammenhänge wird jedoch in keinem der vorgestellten Ansätze zur Bewertung der Auswirkungen des erweiterten Raumklimas auf den Menschen berücksichtigt.

Schlussfolgernd ist festzustellen, dass es kein einheitliches methodisches Vorgehen bei der Bewertung der Auswirkungen des erweiterten Raumklimas auf den Menschen gibt und bei den bereits vorhandenen Ansätzen die individuellen Personen mit ihren physiologischen, physischen und psychologischen Eigenschaften nicht ausreichend berücksichtigt werden.

4 Grundlagen der Bilanzierungsmethode

Die Methode der Ökobilanzierung setzt sich aus vier Phasen zusammen: die Definition des Ziels, die Definition des Untersuchungsrahmens, wobei diese Phasen häufig zu einer Phase zusammengefasst werden, die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung. Der Prozess der Erstellung einer Ökobilanz erfolgt dabei iterativ, sodass bereits getroffene Annahmen einer früheren Phase bei Bedarf im Kontext der Auswertung zu einem späteren Zeitpunkt angepasst werden können. (Hauschild, 2018; DIN EN ISO 14040, 2021)

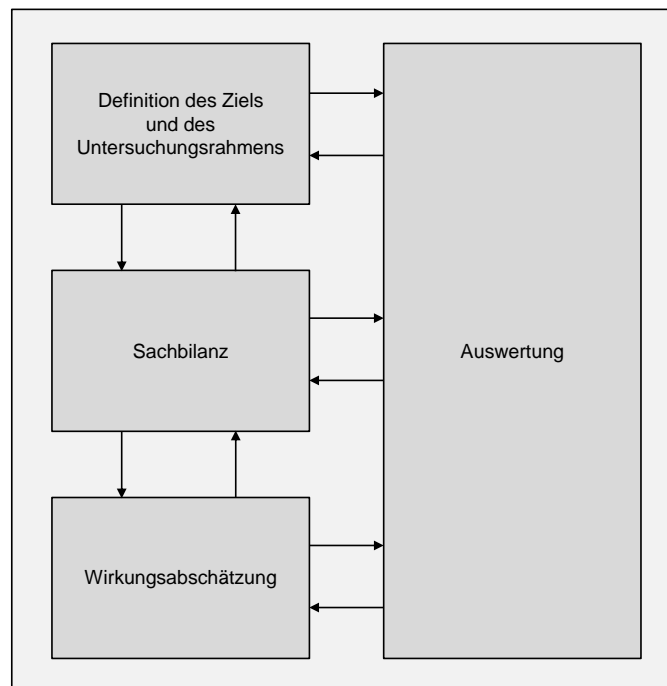


Abbildung 9: Phasen der Ökobilanzierung (DIN EN ISO 14040, 2021)

Die erste Phase dient nicht nur der Definition des Ziels, sondern formuliert weitere wichtige Aspekte, die für die konkrete Anwendung der Ökobilanzierung benötigt werden. Dazu zählen beispielsweise die Systemgrenzen, innerhalb derer sämtliche Input- und Output-Ströme des zu bilanzierenden Produktes mit in die Bilanz einfließen und die funktionelle Einheit, die als quantitativer Maßstab zur Beschreibung eines Produktes insbesondere im Hinblick auf den Vergleich von Produkten dient. Die zweite Phase umfasst die Erstellung der Sachbilanz. In dieser Phase werden sämtliche relevanten Prozesse, die am Lebenszyklus eines Produktes beteiligt sind, mit ihren jeweiligen Input- und Output-Strömen erfasst. Das Ergebnis dieser Phase ist eine umfassende Sachbilanz, die aus einer Liste von quantifizierbaren physikalischen Elementarflüssen besteht. Ausgehend von dem Ergebnis der Sachbilanz werden diese physikalischen Größen in der Wirkungsabschätzung in spezifische Auswirkungen für die Umwelt umgewandelt. Die hierfür zu berücksichtigenden Wirkungskategorien werden bereits in der Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens festgelegt. Die Grundlage der Wirkungsabschätzung bilden die

Umweltmechanismen, anhand derer ein Wirkungsindikator definiert wird, der die letztendliche Auswirkung auf die Umwelt repräsentiert.

Die Auswertung der Ökobilanzierung erfolgt nach Abschluss der Wirkungsabschätzung zur Beantwortung der Fragen, die in der ersten Phase als Ziel der Ökobilanzierung definiert wurden. Dabei werden sowohl die Ergebnisse der Sachbilanz als auch die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung und die Anforderungen des Untersuchungsrahmens berücksichtigt. (Hauschild, 2018)

Die grundlegende Struktur der Ökobilanzierung wird für die Erstellung der raumphysiologischen Bilanz aufrechterhalten. Ebenso erfüllen die Phasen weiterhin eine analoge Funktion. In einem ersten Schritt zur Erstellung der neuen Methode müssen die wesentlichen Begriffe dieser Methode definiert werden. Deswegen werden im Folgenden die grundlegenden Definitionen der raumphysiologischen Bilanz beschrieben. Sämtliche Definitionen wurden in ihrer ursprünglichen Formulierung, bezogen auf die Anwendung in der Ökobilanzierung, der DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 (2021) entnommen.

Um aus den vorhandenen Definitionen neue Definitionen ableiten zu können, wurden die Grundsätze, die in der DIN 2330 (2013) bezüglich Begriffsdefinitionen festgeschrieben sind, herangezogen. Um diese zu verstehen, sollte sich bewusst gemacht werden, dass sowohl den materiellen wie auch den nicht-materiellen Gegenständen Benennungen zugeordnet werden, die keinen direkten Bezug zu dem betrachteten Gegenstand haben. Dieser Bezug wird erst durch die erklärenden Begriffe geliefert, also durch die Definition an sich. Dieser Zusammenhang wird im sogenannten semiotischen Dreieck dargestellt.

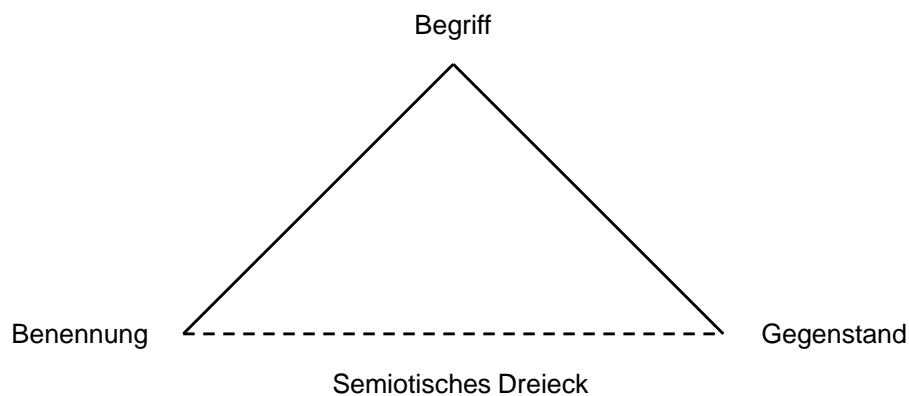


Abbildung 10: Darstellung des Zusammenhangs zwischen einer Benennung und einem Gegenstand (DIN 2330, 2013)

In der DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 (2021) sind eine Reihe von Begriffen definiert, die für das allgemeine Verständnis und die Anwendung der Ökobilanzierung relevant sind. Diese wurden jeweils einzeln betrachtet und mit einem einheitlichen Schema aufgegliedert, um basierend auf diesem Ergebnis, eine neutrale Definition zu erstellen. Diese beschreibt den zentralen Inhalt, den dieser Gegenstand nach der vorhandenen Ausgangsdefinition aufweisen muss. Die neutrale Definition bezieht sich dabei jedoch weder auf die Ökobilanzierung noch auf die raumphysiologische Bilanzierung. Ausgehend von der neutralen Definition wird die für die raumphysiologische Bilanzierung benötigte Definition dieses Gegenstands abgeleitet.

Um aus denen in der Norm gegebenen Definitionen eine neutrale Begriffsdefinition zu erstellen, müssen für jede der benötigten Definitionen die Gegenstandsart (materiell oder nicht materiell) sowie die Beschaffenheits- und Relationsmerkmale (Aktivität, Beschreibung, quantifizierbare Größe oder Phase der Ökobilanzierung) entsprechend der DIN 2330 (2013) aufgegliedert werden.

Zusätzlich gibt es einzelne Definitionen, die für die Entwicklung der raumphysiologischen Bilanzierungsmethode nicht relevant sind und bereits an dieser Stelle vernachlässigt werden können (z. B. der Lebensweg eines Produktes). Der vorerst wichtigste Begriff, den es zu definieren gilt, ist die Ökobilanz an sich.

Ökobilanz: Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Output-Flüsse und der potentiellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges.

Art des Gegenstands	Nicht-materieller Gegenstand	
Merkmale	Bezug	Produktsystem
	Form	Handlung Zusammenstellen und Beurteilen der Input- und Output-Flüsse und der potentiellen Umweltauswirkungen
	Zeit	Lebensweg

Um von dieser spezifischen Definition zu einer neutralen Definition ohne Bezug zu der Ökobilanzierung zu gelangen, müssen demnach die Begriffe Produkt, Umwelt und Lebensweg aus der Definition entfernt werden. Und trotzdem müssen die zentralen Inhalte, die zur Klärung der folgenden Fragen benötigt werden, erhalten bleiben:

- Welche Ein- und Ausgänge werden zusammengestellt und beurteilt?
- Welches System wird betrachtet?
- Welche potentiellen Auswirkungen sind zu berücksichtigen?
- Auf welchen Zeitraum bezieht sich die Bilanz?

Neutrale Definition: Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und der Output-Flüsse und der potentiellen Auswirkungen eines Systems über einen gewissen Betrachtungszeitraum.

Im Hinblick auf die raumphysiologische Bilanz ergibt sich ein wesentlicher Unterschied zur Ökobilanzierung in Bezug auf den Betrachtungszeitraum. Eine Ökobilanz bezieht sich immer auf den Lebenszyklus des betrachteten Produktsystems; dabei müssen nicht alle Phasen berücksichtigt werden, aber dennoch ist der Lebenszyklusgedanke entscheidend für die Bestimmung der Umweltauswirkungen. Eine Lebenszyklusbetrachtung erscheint bei der Bestimmung möglicher Auswirkungen von Gebäuden auf ihre Nutzer wenig sinnvoll, da die Nutzer sich lediglich zu einem bestimmten Zeitpunkt in dem Gebäude

aufhalten und es sich dabei vielmehr um eine zeitlich begrenzte Momentaufnahme handelt als um einen Lebenszyklus. Somit wird der Betrachtungszeitraum vorerst auf den Zeitraum der Gebäudenutzung festgelegt. Wie diese Zeitangabe im Detail auf Stunden, Tage oder Monate zu interpretieren ist, wird vorerst offengelassen.

Raumphysiologische Bilanz: Zusammenstellung und Beurteilung der Gestaltungs- und Umgebungsparameter und den daraus resultierenden raumphysiologisch relevanten Einflüssen eines Gebäudesystems und der potentiellen Auswirkungen auf den Menschen während der Gebäudenutzung.

Der Begriff der Bilanz wird unter Berücksichtigung der Definition, die in einschlägigen deutschen Wörterbüchern niedergeschrieben ist, im Regelfall in der Wirtschaft verwendet und ist ein Bestandteil der Kaufmannssprache. Dabei wird die Bilanz als „abschließende Gegenüberstellung von Aktiva und Passiva, Einnahmen und Ausgaben, Vermögen und Schulden, besonders für das abgelaufene Geschäftsjahr; Kontenabschluss“ (Deutsches Universalwörterbuch, 2011) bezeichnet. Daraus lässt sich ebenfalls erkennen, dass für eine Bilanz sowohl die in das System eingehenden und die daraus ausgehenden Größen berücksichtigt werden müssen. Ebenfalls ist erkennbar, dass sich die Bilanz auf einen konkreten Zeitraum bezieht. Lediglich die daraus folgenden Auswirkungen werden bei der Bilanzierung in der Finanzwirtschaft nicht berücksichtigt. Dazu kann jedoch ergänzt werden, dass es sich bei der Ökobilanz um ein zusammengesetztes Wort aus Ökologie (=Umwelt) und Bilanz handelt. Und daher geschlossen werden kann, dass diese Bilanz in Bezug auf die Umwelt durchgeführt werden soll. Diese Komponente ist ein entscheidender Bestandteil der Ökobilanzierung und somit auch für die raumphysiologische Bilanz relevant. Das Beispiel aus der Finanzwirtschaft soll hier lediglich aufzeigen, dass die Vorgehensweise für die Ableitung von neuen Definitionen aus bereits gegebenen Definitionen angewandt werden kann, da die Sinnmäßigkeit der Begriffe erhalten bleibt und lediglich der Kontext angepasst wird.

An dieser Stelle ist ebenfalls anzumerken, dass bei der Definition einer Bilanz, sei es nun in der Finanzwirtschaft oder bei der Ökobilanz, die Möglichkeit besteht, lediglich die neutralen Begriffe „Input- und Output-Flüsse“ zu verwenden, ohne dass diese näher definiert sind. Für die Definition der raumphysiologischen Bilanz wurden diese Input- und Output-Flüsse bereits konkreter beschrieben. Die Eingänge in das System werden als „Gestaltungs- und Umgebungsparameter“ und die Ausgänge als „daraus resultierende raumphysiologisch relevante Einflüsse“ definiert. Dies soll lediglich dem allgemeinen Verständnis dienen. Die Verwendung der Begriffe Input und Output in Bezug auf die Wirkungen von Gebäuden könnte ansonsten missverstanden werden.

An nächster Stelle müssen die entscheidenden Phasen der Ökobilanz neu definiert werden. Dabei handelt es sich um die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung. Die erste Phase der Ökobilanzierung, die Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens, wird weder in der DIN EN ISO 14044 (2021) noch in der DIN EN ISO 14040 (2021) explizit definiert, weswegen für die raumphysiologische Bilanz ebenfalls auf eine Definition verzichtet wird.

Sachbilanz: Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst.

Art des Gegenstands	Nicht-materieller Gegenstand	
Merkmale	Bezug	Produkt
	Form	Handlung Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs
	Zeit	Lebensweg
	Relation	Bestandteil der Ökobilanz

Bei der Betrachtung der Definition der Sachbilanz fällt auf, dass hier im Gegensatz zur Definition der Ökobilanz nicht vom Produktsystem, sondern lediglich vom Produkt die Rede ist. Zusätzlich werden die Inputs und Outputs als einzelne Komponenten und nicht als zusammenhängende Input- und Output-Flüsse berücksichtigt. Für die Anpassung der Definition der Sachbilanz wird jedoch keine Rücksicht auf diese Terminologie genommen und es werden nach wie vor die Inputs und die Outputs, angepasst an den hier vorliegenden Sachverhalt, als Grundlage verwendet.

Neutrale Definition: Bestandteil der Bilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Gegenstands / einer gegebenen Aktivität über einen bestimmten Betrachtungszeitraum umfasst.

Sachbilanz: Bestandteil der raumphysiologischen Bilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung der Gestaltungs- und Umgebungsparameter und den daraus resultierenden raumphysiologisch relevanten Einflüssen eines gegebenen Gebäudes während dessen Nutzung umfasst.

Die Benennung „Sachbilanz“ kann hier erhalten bleiben, da es sich dabei um einen neutralen Begriff handelt, der keinen konkreten Bezug zur Umwelt hat. Um so nah wie möglich an der Terminologie der Ökobilanz zu bleiben, wird dem Begriff somit auch kein konkreter Bezug zu Gebäuden oder dem Menschen gegeben.

Es ist ersichtlich, dass es sich hier ebenfalls um eine Bilanz handelt. Diese soll auf sachlicher Ebene für jedes Produkt innerhalb eines Produktsystems die einzelnen Inputs und Outputs zusammenstellen und quantifizieren. Auch hier werden die vorher in Bezug zu einer Bilanz gestellten Fragen beantwortet. Es lässt sich aus dieser Definition klar ableiten, welche Ein- und Ausgänge berücksichtigt werden und welches System über welchen Zeitraum bilanziert wird.

Wirkungsabschätzung: Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und Beurteilen der Größe und Bedeutung von potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient.

Art des Gegenstands	Nicht-materieller Gegenstand	
Merkmale	Bezug	Produktsystem
	Form	Handlung Erkennen und Beurteilen der Größe und Bedeutung von potentiellen Umweltauswirkungen
	Zeit	Lebensweg
	Relation	Bestandteil der Ökobilanz

Im Gegensatz zur Sachbilanz bezieht sich die Wirkungsabschätzung wieder auf das gesamte Produktsystem und dient der Abschätzung der durch den gesamten Lebensweg des Produktes hervorgerufenen Umweltauswirkungen.

Neutrale Definition: Bestandteil der Bilanz, der dem Erkennen und Beurteilen der Größe und Bedeutung von potentiellen Auswirkungen eines Systems über einen bestimmten Betrachtungszeitraum dient.

Wirkungsabschätzung: Bestandteil der raumphysiologischen Bilanz, der dem Erkennen und Beurteilen der Größe und Bedeutung von potentiellen Auswirkungen eines Gebäudes auf den Menschen während dessen Nutzung dient.

Ähnlich wie bei der Sachbilanz kann der Begriff der Wirkungsabschätzung erhalten bleiben, da dieser keinen direkten Bezug zur Umwelt herstellt und letztendlich ein neutraler Begriff ist, der ebenfalls für die raumphysiologische Bilanz genutzt werden kann.

Der letzte entscheidende Verfahrensschritt, der im Rahmen der Ökobilanz durchgeführt werden muss, ist die Auswertung. Diese wird in der DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 (2021) folgendermaßen definiert.

Auswertung: Bestandteil der Ökobilanz, bei dem die Ergebnisse der Sachbilanz oder der Wirkungsabschätzung oder beide bezüglich des festgelegten Ziels und Untersuchungsrahmens beurteilt werden, um Schlussfolgerungen abzuleiten und Empfehlungen zu geben.

Die Definition bezieht sich auf die Auswertung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung und dient zur Ableitung von sinnvollen Schlussfolgerungen und Empfehlungen. Dementsprechend kann die Definition vollständig erhalten bleiben. Lediglich ist die Auswertung nicht mehr Teil der Ökobilanz, sondern Teil der raumphysiologischen Bilanz. Der Zwischenschritt über die neutrale Definition entfällt hier.

Auswertung: Bestandteil der raumphysiologischen Bilanz, bei dem die Ergebnisse der Sachbilanz oder der Wirkungsabschätzung oder beide bezüglich des festgelegten Ziels und Untersuchungsrahmens beurteilt werden, um Schlussfolgerungen abzuleiten und Empfehlungen zu geben.

Im Folgenden werden weitere Begriffe definiert, die für das Verständnis und die Durchführung einer Ökobilanz und dementsprechend einer raumphysiologischen Bilanz relevant sind. Für die Aufstellung dieser Definitionen kann nicht die gleiche Vorgehensweise wie für die vorherigen Definitionen genutzt werden. Da es sich bei diesen Begriffen oftmals um Begriffe handelt, die explizit für die Ökobilanzierung formuliert wurden und sich daher in keiner aussagekräftigen neutralen Definition darstellen lassen. Jedoch werden die für die raumphysiologische Bilanz benötigten Definitionen in Analogie zu den vorhandenen Definitionen erstellt. Zu diesem Zweck werden die wesentlichen Kernelemente jeder Definition herausgearbeitet und es wird überprüft, ob diese in der neuen Definition ebenfalls vorhanden sind. Auf die in der DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 (2021) definierten Begriffe die sich auf die Produkte sowie deren Herstellung und Verwertung beziehen wird, sofern diese für das allgemeine Verständnis nicht benötigt werden, hier nicht weiter eingegangen.

Für das weitere Verständnis wird der Begriff des Elementarstroms mit den dazugehörigen Komponenten definiert. Diese Komponenten sind Bestandteil der Sachbilanz, müssen jedoch bereits an dieser Stelle beschrieben werden, damit der Begriff des Elementarstroms für die Herleitung der Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz genutzt werden kann.

Elementarfluss: Stoff oder Energie, der bzw. die dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde, oder Stoff oder Energie, der bzw. die das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird.

Der Elementarfluss kann sowohl ein materieller als auch nicht-materieller Gegenstand sein, der quantifizierbar ist. Entscheidend für einen Elementarfluss ist, dass dieser eine Systemgrenze überquert. Diese Grenze befindet sich bei der Ökobilanzierung zwischen dem Produktsystem und der Umwelt. Der Fluss kann dabei von der Umwelt in das System (Input) oder von dem System in die Umwelt (Output) fließen. (Bjorn et al., 2018a)

Entscheidend für die Ökobilanzierung ist die Existenz der Ökosphäre und der Technosphäre. Dieser Zusammenhang ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

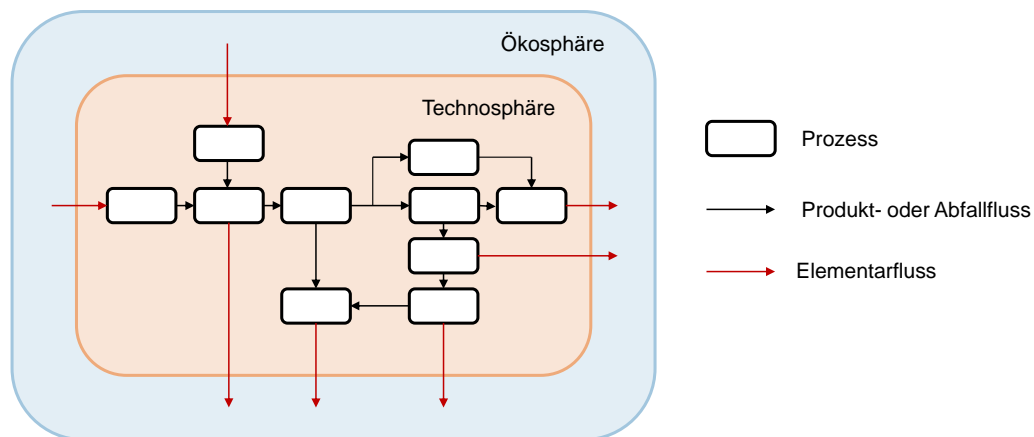


Abbildung 11: Darstellung der Ökosphäre und der Technosphäre in der Ökobilanzierung (Bjorn et al., 2018a)

Zum verbesserten Verständnis werden die Begriffe Prozess, Produkt, Produktfluss und Abfall ebenfalls in der DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 (2021) definiert. Der Begriff Abfallfluss wird nicht explizit erläutert. Die Bedeutung lässt sich jedoch aufgrund der restlichen Definitionen logisch erschließen.

Prozess	Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten der Eingaben (Inputs) in Ergebnisse (Outputs) verwandelt.
Prozessmodul	Kleinster in der Sachbilanz berücksichtigter Bestandteil, für den Input- und Output-Daten quantifiziert werden.
Produkt	Jede Ware oder Dienstleistung.
Produktfluss	Produkte, die von einem anderen Produktsystem zugeführt oder an ein anderes Produktsystem abgegeben werden.
Abfall	Substanzen oder Gegenstände, die der Eigentümer für die Beseitigung vorgesehen hat oder die er beseitigen muss.

Der Bereich der Technosphäre entspricht im Wesentlichen dem Produktsystem, das wie folgt definiert wird.

Produktsystem	Zusammenstellung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modelliert und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt.
---------------	---

Auf die in dieser Definition erwähnte „festgelegte Funktion“ wird zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen. An dieser Stelle soll der Fokus auf der Definition des Elementarflusses liegen. Dazu ist es notwendig, die Unterteilung in Ökosphäre und Technosphäre nachvollziehen zu können.

Zur Technosphäre gehört alles, was von Menschenhand erschaffen wird. Dazu zählen auch sämtliche Prozesse, die für den Lebensweg eines Produktes relevant sind. (Bjorn et al., 2018a) Die zuvor definierte Sachbilanz bezieht sich auf die Zusammenstellung und Quantifizierung dessen, was in der Technosphäre passiert. Dagegen beschreibt die Ökosphäre alles, das nicht absichtlich von Menschenhand erschaffen

wurde. Im Bereich der Ökosphäre liegen die Aspekte, die im Rahmen der Ökobilanz als Schutzgüter definiert werden, z. B. die Ökosysteme, die menschliche Gesundheit oder die Verfügbarkeit von Ressourcen. Dementsprechend bezieht sich die zuvor beschriebene Wirkungsabschätzung auf die Abschätzung der Auswirkungen der Technosphäre auf die Ökosphäre.

Definitionsgemäß sind die Elementarflüsse die einzigen Flüsse die die Grenze zwischen Ökosphäre und Technosphäre überqueren. Aufgrund der durch ein Produktsystem entstehenden Elementarflüsse werden die Schutzgüter, für welche die Auswirkungen in der Ökobilanz bewertet werden sollen, festgelegt. Dabei ist anzumerken, dass keine klare räumliche Trennung zwischen den Sphären existiert. Die beiden Sphären sind abstrakter Natur, da sie sich teilweise vermischen. Beispielsweise zählt unbebautes Land zur Ökosphäre, eventuell dadurch verlaufende Transportinfrastruktur (z. B. Straßen) gehören wiederum zur Technosphäre. (Bjorn et al., 2018a)

Für die raumphysiologische Bilanzierung werden ebenfalls Elementarflüsse benötigt, die sich aus der bauphysikalischen Umgebung des Menschen ergeben und zu gewissen Auswirkungen führen können. Hier ist die Analogie der beiden Bilanzierungsmethoden erneut erkennbar. Während sich bei der Ökobilanzierung die Elementarflüsse aus dem Lebensweg eines Produktes ergeben und sich auf die Umwelt auswirken, ergeben sich die Elementarflüsse bei der raumphysiologischen Bilanzierung aus einem Gebäude und dessen Umgebung und wirken sich auf die darin befindlichen Menschen aus. Trotz der vorhandenen Analogie ist aus dem beschriebenen Zusammenhang erkennbar, dass die vorliegende Problemstellung mit zwei Sphären nicht ausreichend beschrieben werden kann. Es wird eine dritte Sphäre benötigt, nämlich der Mensch, der sich innerhalb der Technosphäre, dem Gebäude, befindet. Zusätzlich müssen die Prozesse sowie die Produkt- und Abfallflüsse, die innerhalb der Technosphäre stattfinden, neu definiert werden.

Der Elementarfluss kann nach wie vor ein materieller oder ein nicht-materieller Gegenstand sein, der quantifizierbar sein muss. Zusätzlich muss ein Elementarfluss eine Systemgrenze durchqueren; bei der raumphysiologischen Bilanz ist dies die Grenze zwischen der Technosphäre und dem darin befindlichen Menschen. Wie zuvor definiert, bestimmen die in die Technosphäre eintretenden sowie die daraus austretenden Elementarflüsse, welche Schutzgüter in der Ökobilanz zu berücksichtigen sind. Bei der raumphysiologischen Bilanz liegen die Schutzgüter nicht in der Ökosphäre, sondern gehören zu der Sphäre des Menschen. Aus diesem Grund werden auch nur die in diese Sphäre eintretenden Elementarflüsse berücksichtigt, nicht jedoch die daraus austretenden. Bei den daraus austretenden Elementarflüssen würden letztendlich menschliche Handlungen beschrieben werden, die im Rahmen der Bilanzierung keine weitere Berücksichtigung finden. Aus dieser Entscheidung ergibt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen der Ökobilanzierung und der raumphysiologischen Bilanzierung. Die Elementarflüsse existieren nur zwischen der Technosphäre und dem Menschen, und sie können diese Grenze lediglich in eine Richtung durchqueren. Zur Verdeutlichung ist dieser Zusammenhang in der folgenden Grafik dargestellt.

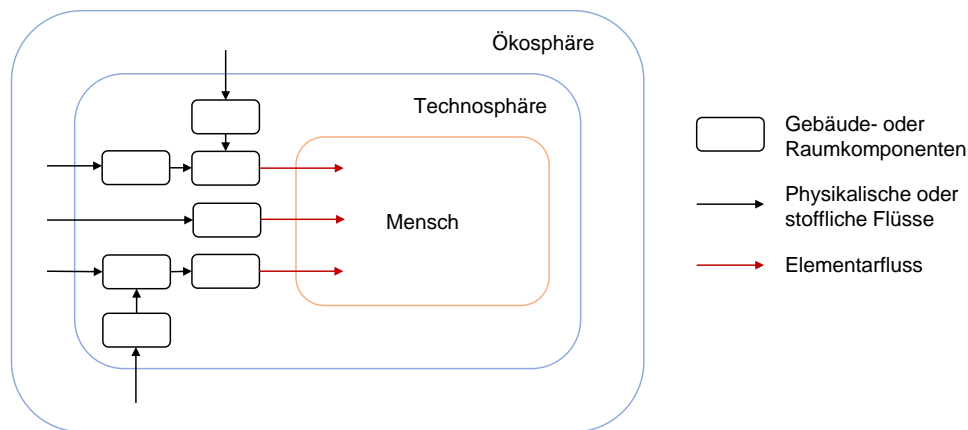


Abbildung 12: Darstellung der Ökosphäre, der Technosphäre und des Menschen in der raumphysiologischen Bilanzierung

Bei der Ökobilanzierung setzt sich die Technosphäre aus dem Produktsystem mit einzelnen Prozessen und den zwischen diesen Prozessen stattfindenden Flüssen zusammen. In der raumphysiologischen Bilanzierung beschreibt die Technosphäre das Gebäude, welches sich aus den einzelnen Gebäude- und Raumkomponenten zusammensetzt. Aus diesen Komponenten ergeben sich bestimmte Elementarflüsse, die sowohl physikalischer als auch stofflicher Natur sein können. Diese sind als bauphysikalische Größen zu verstehen, welche die erweiterte raumklimatische Umgebung des Menschen gestalten und sich somit auf diesen auswirken können.

In der Ökobilanzierung beschreiben Prozesse in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehende Tätigkeiten, die Inputs in Outputs verwandeln. Diese Analogie kann hier durch die Definition der Prozesse als Gebäude- und Raumkomponenten aufrechterhalten werden. Vereinfachend und beispielhaft gesprochen ist eine Raumkomponente die in einem Raum befindliche Heizung. Dieser Heizung wird Energie zugeführt, die in Wärme umgewandelt wird. Ohne vorerst weiter auf die physikalischen Prozesse einzugehen, ist das Ergebnis dieser Wärme eine bestimmte operative Raumtemperatur. Diese operative Temperatur wird vom Menschen wahrgenommen und kann zu einer raumphysiologischen Auswirkung führen. Der Grund, warum die Technosphäre nicht ohne die Ökosphäre betrachtet werden kann, lässt sich ebenfalls an diesem Beispiel erklären. Die sich einstellende Raumtemperatur kann nur in Zusammenhang mit dem Außenklima betrachtet werden. In Räumen mit einer erhöhten solaren Einstrahlung in denen die Heizung nicht genutzt wird, ergibt sich ebenfalls eine operative Raumtemperatur, die eine Auswirkung auf den Nutzer hat.

Letztendlich sind die Elementarflüsse quantifizierbare Flüsse stofflicher oder physikalischer Natur, die sich aus dem Zusammenspiel der Ökosphäre und der Technosphäre ergeben und die Grenze zur menschlichen Sphäre durchqueren. Damit werden sämtliche Kernaussagen berücksichtigt, die in der Originaldefinition des Elementarflusses ebenfalls zu finden sind. Dies ist die Definition, die im Folgenden Verwendung findet. Alle weiteren Definitionen werden in den folgenden Kapiteln jeweils an der Stelle, an der die Begriffe verwendet werden, erläutert. Somit wurden die grundlegenden Begriffe der raumphysiologischen Bilanzierung definiert. Ausgehend von diesem Wissensstand kann im folgenden Kapitel das Vorgehen zu Erstellung der Wirkungsabschätzung hergeleitet werden.

5 Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz

Um eine Wirkungsabschätzung zur Bilanzierung von Auswirkungen durchführen zu können, wird vorerst der Begriff der Auswirkung und der Wirkung für die Anwendung in der vorliegenden Arbeit genauer definiert. Beide Begriffe werden im Allgemeinen als Synonyme betrachtet. Da die alleinige Definition beider Begriffe nicht ausreicht, um eine einheitliche Definition für die Verwendung in der vorliegenden Arbeit herzuleiten, werden zusätzlich beide Begriffe ins Englische übersetzt. Somit werden ebenfalls die Beschreibungen der Begriffe *impact* und *effect* berücksichtigt.

Durch die Betrachtung der vier Definitionen (Deutsches Universalwörterbuch, 2011; Cambridge Academic Content Dictionary, 2009) lässt sich eine einheitliche Definition für den Begriff der Auswirkung herleiten.

Auswirkung	1. Das Sichauswirken 2. Wirkung, sich auswirkenden Folge
Wirkung	Durch eine verursachende Kraft bewirkte Veränderung , Beeinflussung, bewirktes Ergebnis
<i>Effect</i>	<i>The result of a particular influence, something that happens because of something else.</i> Das Ergebnis eines bestimmten Einflusses; etwas das aufgrund von etwas anderem geschieht.
<i>Impact</i>	1. <i>The force with which one thing hits another or with which two things hit each other.</i> Die Kraft , mit der eine Sache auf eine andere trifft oder mit der zwei Dinge aufeinandertreffen. 2. <i>The strong effect or influence that something has on a situation or person.</i> Die starke Wirkung oder der Einfluss, auf eine Situation oder Person .

Aus diesen vier Definitionen kann vorerst abgeleitet werden, dass eine Auswirkung durch ein bestimmtes Ereignis hervorgerufen wird. Trifft diese Kraft oder starke Wirkung, die aus dem Ereignis resultiert, auf eine andere Person oder ein Objekt, kann sie eine Veränderung des Empfängers verursachen.

Damit lässt sich zusammenfassen, dass zu einer Auswirkung vier wesentliche Komponenten gehören. Ausgehend vom Auslöser wird eine Kraft hervorgerufen, die von einem Empfänger aufgenommen wird und dort zu einer Veränderung führt. Der Auslöser und der Empfänger sind in der Regel Objekte oder Personen, während die entstehende Wirkung und die dazugehörige ausgelöste Veränderung variable Größen darstellen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 13 mit einem vereinfachten Beispiel dargestellt. Das Objekt Glühbirne löst eine bestimmte Leuchtdichte aus. Das ist die Kraft, die auf den Empfänger, das

menschliche Auge wirkt und dazu beiträgt, dass der Mensch sehen kann. Die tatsächliche Wirkung und die physiologischen Zusammenhänge zwischen der Leuchtdichte und dem Prozess des Sehens sind offensichtlich deutlich komplexer. Dieses Beispiel dient lediglich zur Veranschaulichung der vier relevanten Komponenten für die Definition des Begriffs der Auswirkung. Für das weitere Vorgehen werden die Begriffe Auswirkung und Wirkung weiterhin als Synonyme verwendet. Beide Begriffe beziehen sich jeweils auf die Definition der vier beschriebenen Komponenten.

Es ist anzumerken, dass die dargestellte Ursache-Wirkungs-Kette in der Realität nicht so simplistisch auftreten wird. Vielmehr wird jede der vier Komponenten in einer Vielzahl auftreten und ausgehend von einem oder mehreren Auslösern werden die übrigen Komponenten in vielfachen Wechselwirkungen zueinanderstehen.

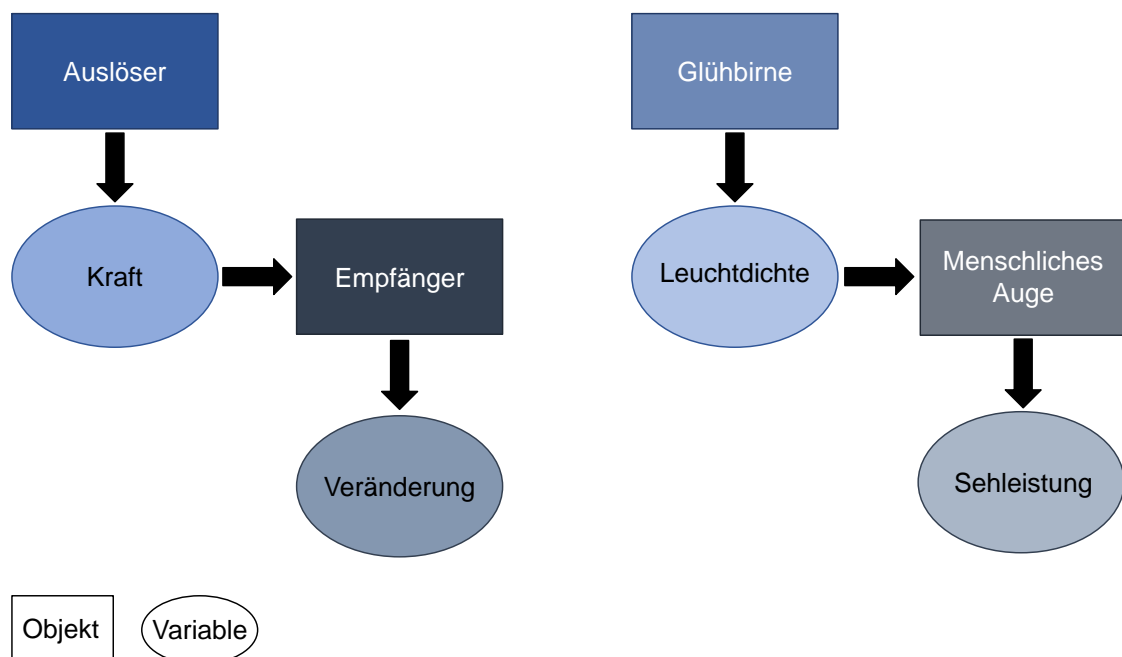


Abbildung 13: Definition der Auswirkung / Wirkung

In keiner der vier genannten Definitionen wird eine Aussage darüber gemacht, in welcher Schwere die durch den Auslöser verursachte Kraft den Empfänger verändert. Somit können potentiell ausgelöste Veränderungen sowohl positiver, negativer oder neutraler Natur sein. Ebenfalls wird in den dargestellten Definitionen keine Angabe bezüglich des Zeitrahmes gemacht, in welchem eine mögliche Auswirkung entsteht. Möglicherweise gibt es Auslöser die zu einer direkten Veränderung führen, während wieder andere erst nach einem bestimmten Wirkzeitraum eine Veränderung beim Empfänger hervorrufen. Somit wird kein Zeitrahmen für die raumphysiologische Bilanz definiert und diese bezieht sich vorerst weiterhin auf den Zeitraum der Gebäudenutzung.

Der Mensch wird in seinem Wohlbefinden durch das Zusammenspiel aller zum erweiterten Raumklima beitragenden Aspekte beeinflusst. Um die Auswirkungen der im Raum vorherrschenden Bedingungen in ihrer Gesamtheit bilanzieren zu können, ist ein Verständnis des menschlichen Körpers, seiner Systeme und den darin ablaufenden Prozessen eine Grundbedingung. (Bluyssen, 2009) In der einschlägigen

Literatur werden die Umgebungsbedingungen, die auf den menschlichen Körper wirken, oftmals als externe Stressfaktoren bezeichnet (Bluyssen, 2009; Vischer, 2005). Im Sinne der hier präsentierten Methode werden diese Stressfaktoren, die eine Veränderung im menschlichen Körper verursachen, als Elementarströme des erweiterten Raumklimas bezeichnet. Im Folgenden werden dementsprechend die Wahrnehmung dieser und die daraus resultierenden Reaktionen im menschlichen Körper beschrieben. Bei diesen Reaktionen handelt es sich um raumphysiologische Auswirkungen, die anhand der Wirkungsabschätzung quantifizierbar werden.

Neben den physikalischen Stressfaktoren, also den Elementarströmen, die innerhalb eines Raums auf einen Menschen wirken, gibt es zusätzlich psychologische Stressfaktoren. Diese werden in diesem Modell nicht berücksichtigt, da vorerst alleine die Wirkung der physischen Umgebung auf den Körper bewertet werden soll. Hierbei handelt es sich um eine wichtige Limitation für die Anwendung des Verfahrens. Das Modell, das in Abbildung 14 dargestellt ist, ist eine vereinfachte Darstellung vom Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Sachbilanz und dem menschlichen Körper. Hier werden die psychologischen Komponenten, die bei der Reaktion auf die Elementarströme ebenfalls einen Einfluss auf die Auswirkungen haben können, vernachlässigt. Aus dem Modell in Abbildung 14 wird ersichtlich, dass diese externen Stressfaktoren, die zu einer Veränderung im menschlichen Körper führen können, letztlich einen Einfluss auf den Komfort und auf die Gesundheit des Menschen haben können.

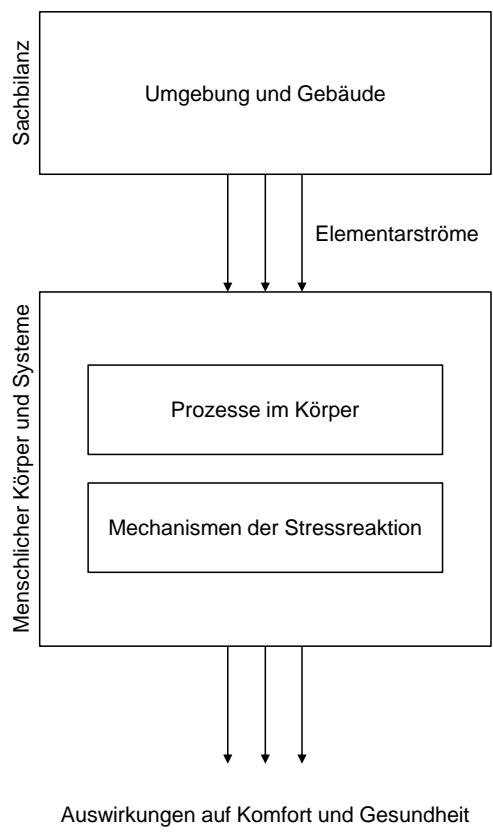


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen der Sachbilanz und dem menschlichen Körper in Anlehnung an das Menschenmodell von Bluyssen (2014a)

5.1 Bestandteile der Wirkungsabschätzung

Die zur Phase der Wirkungsabschätzung zugehörigen Definitionen lassen sich nur mit deutlichen Modifikationen für die Nutzung in der raumphysiologischen Bilanz anpassen. Vorerst gilt es zu definieren, in welchem Sinne sich die Umgebung des Menschen auf diesen auswirken kann, um auf diesem Weg insbesondere die zu berücksichtigenden Wirkungskategorien sowie die weiteren dazugehörigen Bestandteile der Wirkungsabschätzung zu definieren.

Der menschliche Körper ist ein offenes System, das einerseits versucht, sich vor den Einflüssen (Stressfaktoren) der Umwelt zu schützen und andererseits sich dennoch öffnet und mit dieser Umwelt z. B. Hitze oder Sauerstoff austauscht (Silbernagl & Despopoulos, 2012). Die Wechselwirkungen zwischen der Umwelt und dem Körper werden durch die ständig im Körper ablaufenden Prozesse und durch die entsprechenden Stressreaktionen charakterisiert.

Die Wahrnehmung der Umwelt ist der erste Schritt, damit der Körper auf die möglicherweise vorliegenden Stressfaktoren reagieren kann (Bluyssen, 2009). Diese Wahrnehmung wird durch das Extrahieren von Informationen ermöglicht, die in einem Stimulus enthalten sind (O'Callaghan, 2019). Die Sinne sind die wesentliche Informationsquelle, um die Umgebung wahrzunehmen. Diese können dem Menschen dabei helfen festzustellen ob er sich wohl und gesund fühlt oder nicht. Das kann sowohl bewusst als auch unbewusst erfolgen. Über Sinnesrezeptoren und über die Nerven können die Sinne Informationen an das Gehirn weiterleiten, die dort verarbeitet werden, um anschließend eine Nachricht mit einer vorgeschriebenen Reaktion an den entsprechenden Körperteil zu senden. (Bluyssen, 2009) Dabei handelt es sich um einen Reglungsprozess, der ununterbrochen Ist-Werte mit Soll-Werten abgleicht (Silbernagl & Despopoulos, 2012). Anhand dieser Informationen lassen sich die grundlegenden Definitionen für die Wirkungsabschätzung in Analogie zu der Herleitung der Definitionen in Kapitel vier beschreiben.

Zur sensorischen Wahrnehmung der Elementarströme im Raum spielt das Nervensystem eine entscheidende Rolle, da hiervon ausgehend sämtliche Reaktionen im Körper gesteuert werden. Die Funktionen des Nervensystems können in drei Gruppen untergliedert werden. Dabei wird zwischen den sensorischen, den motorischen und den integrativen Funktionen unterschieden. Für die sensorischen Mechanismen des Nervensystems sind insbesondere die sensorischen Rezeptoren von Bedeutung. Dabei lassen sich eine Reihe unterschiedlicher Rezeptoren, die der Vermittlung von äußeren und inneren Reizen dienen, unterscheiden. (Kapit, Macey & Meisami, 2007) Besonders relevant für die Bilanzierung der Auswirkungen von Gebäuden sind die Rezeptoren, die der Vermittlung von äußeren Reizen, also Elementarströmen, dienen.

Die sensorischen Rezeptoren des Nervensystems dienen somit der Wahrnehmung von Veränderungen des Energiegehalts oder der Energieform sowohl im inneren als auch im äußeren Milieu. Diese verschiedenen Energieformen werden von den Rezeptoren in Nervenimpulse übertragen und an das zentrale Nervensystem übermittelt. Jeder einzelne Rezeptor besitzt die Fähigkeit, die wahrgenommenen Stimuli und deren physikalische Energie in Nervenimpulse zu transformieren. Die von den sensorischen Rezeptoren wahrnehmbaren Stimuli lassen sich in vier Energieformen unterteilen. Dabei wird zwischen mechanischer, chemischer, thermischer und Lichtenergie unterschieden. Zur Wahrnehmung jeder dieser Reize hat der Körper entweder einen einzigen oder mehrere Arten sensorischer Rezeptoren. In

Abhängigkeit von der Energieform, auf die sie reagieren, können die Rezeptoren entweder als Mechanorezeptoren, Chemorezeptoren, Thermorezeptoren, Nozizeptoren oder Photorezeptoren klassifiziert werden. (Kapit, Macey & Meisami, 2007)

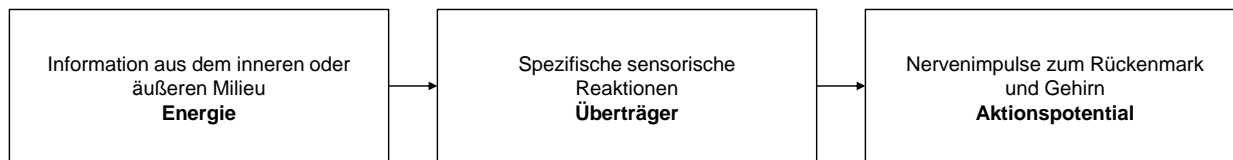


Abbildung 15: Sensorische Wahrnehmung – Zusammenhang zwischen Energie und Aktionspotential (Kapit, Macey & Meisami, 2007)

Die Energie, also die Information aus dem inneren oder dem äußeren Milieu, bezieht sich auf die Ergebnisse der Sachbilanz und dementsprechend auf die im Raum entstehenden Elementarströme. Somit erscheinen an dieser Stelle nur die Informationen aus dem äußeren Milieu relevant. Da jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, dass eine Information aus dem äußeren Milieu zu einer Veränderung der Information im inneren Milieu führt, werden vorerst sämtliche Rezeptoren weiter betrachtet, um letztendlich jene zu identifizieren, die für die Bilanzierung der Auswirkungen von Gebäuden zurückbehalten werden. (Handwerker & Schmelz, 2019)

In der Wirkungsabschätzung gilt es das Aktionspotential zu bewerten, das durch eine bestimmte Energie ausgelöst wird. Dieses Aktionspotential führt zu einer Reaktion im Körper, die sich gegebenenfalls negativ auf den Komfort und die Gesundheit auswirken kann. In Tabelle 3 sind die fünf verschiedenen Rezeptortypen mit ihren jeweiligen Charakteristika aufgeführt.

Tabelle 3: Charakterisierung der sensorischen Rezeptoren nach Kapit, Macey & Meisami (2007)

Mechanorezeptoren	<ul style="list-style-type: none"> • Messen Verschiebung, Streckung und Schall • In der Haut, den Muskeln, den Gelenken und den viszerale Organen • Reaktion auf mechanische Deformierung des Gewebes und der Zellmembran
Chemorezeptoren	<ul style="list-style-type: none"> • Reagieren auf spezifische chemische Verbindungen • In der hinteren Nasenhöhle, den Geschmacksknospen der Zunge, in der Medulla, in den Aorten- und Karotiskörperchen und im Hypothalamus • Empfindung von Gerüchen, Detektion bestimmter Substanzen in der Nahrung und Detektion der Veränderung physiologisch wichtiger Substanzen im Blut
Thermorezeptoren Nozizeptoren	<ul style="list-style-type: none"> • Empfindung von Hitze, Kälte oder Schmerz • In der Haut und im Hypothalamus
Photorezeptoren	<ul style="list-style-type: none"> • Wahrnehmung von Lichtenergie • In der Retina, Unterscheidung zwischen Stäbchen und Zapfen

Aus der obigen Tabelle kann bereits geschlossen werden, dass der Mensch mehr als die nach der allgemeinen Annahme definierten fünf Sinne (Sehen, Hören, Riechen, Fühlen und Schmecken) besitzt. Die tatsächliche Anzahl an menschlichen Sinnen lässt Spielraum zur Interpretation offen. (Handwerker & Schmelz, 2019, O’Callaghan, 2019) Für das weitere Vorgehen wird sich jedoch auf die hier angegebenen Rezeptoren mit den zugehörigen Sinnen beschränkt.

Für jedes Sinnesorgan gibt es evolutionär bedingt einen Reiz, auf den der betreffende Rezeptor optimal reagiert. Dabei handelt es sich um den Reiz mit dem minimalen Energiegehalt, der bei diesem Sinnesorgan eine Reaktion auslöst. In der Fachliteratur werden diese Reize als adäquate Reize bezeichnet. Bezogen auf die Photorezeptoren sind adäquate Reize beispielweise elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von 400 bis 750 nm. (Eysel, 2010)

Aufgrund der Tatsache, dass die Wirkung der Elementarströme auf die Sinnesrezeptoren betrachtet werden soll, können an dieser Stelle die Nozizeptoren vom weiteren Vorgehen ausgeschlossen werden. Diese beziehen sich auf das Schmerzempfinden der Haut. Unter üblichen Nutzungsgegebenheiten in einem Gebäude kann davon ausgegangen werden, dass kein Schmerz auf der Haut verursacht wird. Von den übrigen vier Arten an Rezeptoren müssen ebenfalls nicht alle Typen berücksichtigt werden, lediglich solche, die auf relevante Sinnesreize reagieren. Diese vier Arten an Rezeptoren beziehen sich auf die vier Energieformen, die der menschliche Körper über die Rezeptoren wahrnehmen kann.

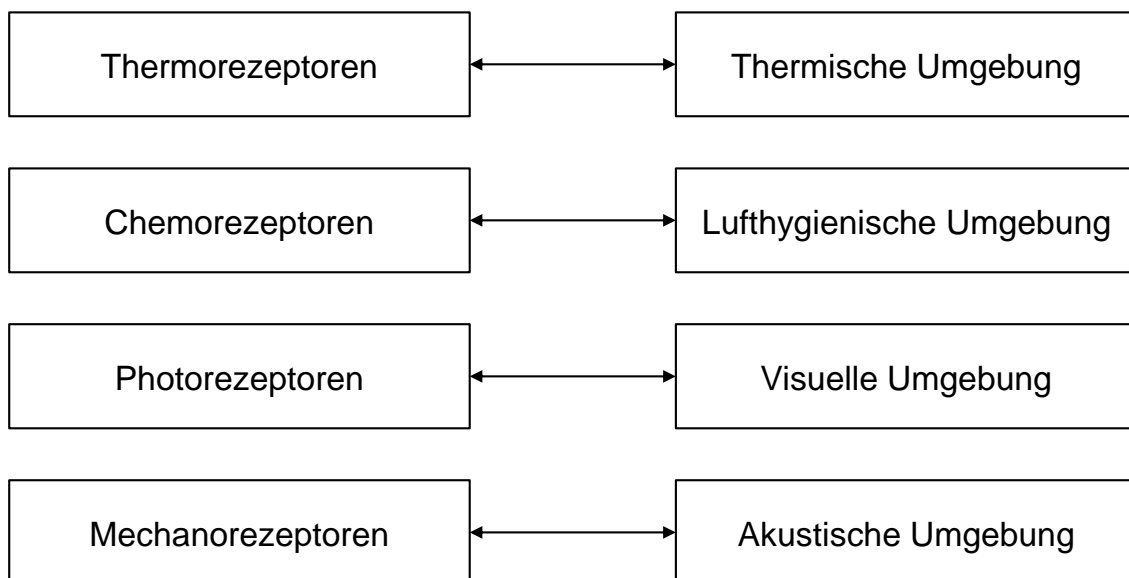


Abbildung 16: Definition der Wirkungskategorien

Um die Analogie zur Methode der Ökobilanzierung aufrechtzuerhalten, werden diese vier Arten von Rezeptoren genutzt um die Wirkungskategorien, ausgehend von der Definition in der Ökobilanz, in der raumphysiologischen Bilanz zu definieren. Die im Folgenden genannten Definitionen der Ökobilanzierung sind der DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 (2021) entnommen.

Wirkungskategorie Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können.

Dieser Definition ist zu entnehmen, dass die Wirkungskategorien (im Normalfall gibt es mehrere) den Bezug zu den Ergebnissen der Sachbilanz herstellen. Bei der Wirkungskategorie handelt es sich um einzelne Themen, die für den Umweltschutz relevant sind und einem oder mehreren Wirkungsendpunkten zugeordnet werden können. Der Klimawandel repräsentiert beispielsweise eine Wirkungskategorie, die sich sowohl auf die menschliche Gesundheit als auch auf die natürliche Umwelt auswirken kann. Die Ergebnisse aus der Sachbilanz bestimmen, wie stark sich ein bestimmtes Produktsystem auf den Klimawandel auswirkt. Nach den europäischen Richtlinien gibt es für die Ökobilanzierung 15 Wirkungskategorien, welche unterschiedliche Wirkungsendpunkte haben und insgesamt den drei großen Schutzgütern (natürliche Umwelt, menschliche Gesundheit und Ressourcen) zugeordnet werden können. (Rosenbaum et al., 2018; ILCD Handbook, 2010) Zur Definition der Wirkungskategorie wird somit zusätzlich die Definition der Wirkungsendpunkte benötigt.

Wirkungsendpunkt Eigenschaft oder Aspekt der natürlichen Umwelt, der menschlichen Gesundheit oder der Ressourcen, die oder der ein Umweltthema identifiziert, das Grund zur Besorgnis darstellt.

Sowohl die Wirkungskategorie als auch die Wirkungsendpunkte werden in der raumphysiologischen Bilanz auf eine dem Sachverhalt angepasste Weise interpretiert. Da der Mensch seine Umgebung über die Sinnesrezeptoren wahrnehmen kann, welche sich den vier unterschiedlichen Energieformen zuordnen lassen, werden genau diese vier als Wirkungskategorien definiert.

Wirkungskategorie Klasse, die wichtige raumphysiologische Themen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können.

Somit handelt es sich bei den Wirkungskategorien in der raumphysiologischen Bilanz um die thermische, die lufthygienische, die visuelle und die akustische Umgebung. Bevor sich jedoch die Wirkungsendpunkte definieren lassen, wird ein Verständnis dafür benötigt, wie der Körper auf die wahrgenommenen Reize reagieren kann.

Physiologisch betrachtet sind die bereits dargestellten Rezeptoren Membranbereiche in einer Zelle, die darauf spezialisiert sind den Reiz, den sie wahrnehmen, in neuronale Informationen zu übersetzen. Somit können die sinnesphysiologischen Rezeptoren auch als Sensoren bezeichnet werden. Werden diese Sensoren gereizt, führt dies zu einer lokalen Änderung des Potentials ihrer Membran. (Handwerker & Schmelz, 2019) Ein Aktionspotential wird erregt, wenn sich das Ruhepotential einer Nervenzelle, durch einen externen (oder internen) Reiz immer weiter von seinem Ruhebereich entfernt. (Silbernagl & Despopoulos, 2012)

Die aus den Reizen über die Sensorrezeptoren erfassten Informationen müssen anschließend verarbeitet werden. Die Informationsverarbeitung erfolgt in einem neuronalen Netzwerk. Die Bezeichnung als Netzwerk deutet darauf hin, dass das zentrale Nervensystem nicht nur aus Sinnesbahnen besteht, die die Information linear zu zentralen Neuronen leiten. Vielmehr sind die Projektionsneurone der einzelnen Bahnen untereinander synaptisch verkettet. Um die Struktur der sensorischen Bahnen zu verstehen, muss

zwischen primären afferenten Nervenfasern und sekundären sensorischen Neuronen unterschieden werden. (Anmerkung: afferent bezeichnet Neurone, die Informationen von einem Sinnesorgan in das zentrale Nervensystem übertragen). Die primären Nervenfasern enden mit Eintritt ins Rückenmark in den Hirnstamm und genau dort befinden sich die sekundären Neuronen. Ein einzelnes Sinnessystem besteht demnach aus allen neuronalen Verschaltungen, die innerhalb einer Kette von zentralen Neuronen durch Synapsen miteinander verbunden sind. (Handwerker & Schmelzer, 2019)

Hinter diesen Vorgängen steht jeweils ein Regelkreis, der auf die entsprechenden Reize reagiert.

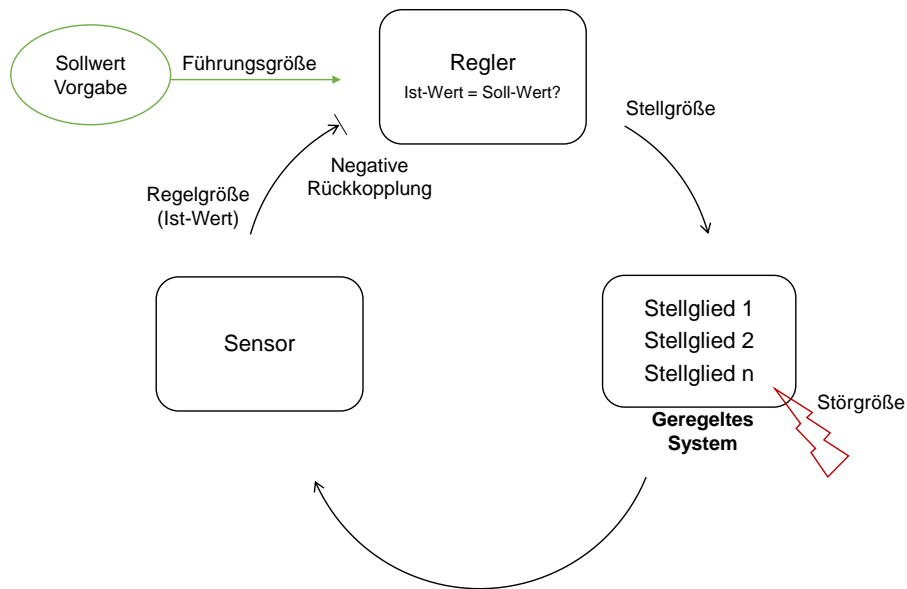


Abbildung 17: Prinzip eines Regelkreises zur Anwendung in der Physiologie (Silbernagl & Despopoulos, 2012)

Der Regelkreis setzt sich zusammen aus dem Regler, den Stellgliedern und dem Sensor. Dem Regler wird eine Führungsgröße anhand eines bestimmten Soll-Werts vorgegeben. Von hier aus werden einzelne Stellglieder, die zur Erreichung dieses Soll-Werts erforderlich sind, angesteuert. Die dritte Komponente des Kreises, die Sensoren, messen fortlaufend den Ist-Wert der zu regelnden Größe und melden diesen an den Regler, welcher einen Abgleich von Ist-Wert und Soll-Wert macht. Falls Störgrößen den Ist-Wert verändert haben, dann wird an dieser Stelle mit einer neuen Stellgröße entsprechend nachgeregelt. Dieser Regelkreis kann im menschlichen Körper entweder in den Organen selber ablaufen oder wird über ein übergeordnetes Organ wie bspw. das zentrale Nervensystem reguliert. Zusätzlich muss zwischen verschiedenen Regler-Arten unterschieden werden. Es gibt Haltere regler, deren Aufgabe es ist, eine bestimmte Größe konstant zu halten. Dementsprechend sind es in einem solchen Fall die Störgrößen, die dafür sorgen, dass der Ist-Wert vom Soll-Wert abweicht. Neben diesen gibt es sogenannte Folge- oder Servoregler. In diesem Fall gibt es keine Störgröße, die eine Anpassung erforderlich macht, sondern übergeordnete Bedürfnisse haben den Soll-Wert verstellt. Diese Soll-Wert-Verstellung führt zu einer Abweichung von Ist-Wert und Soll-Wert. Ein Beispiel für eine solche Soll-Wert-Verstellung ist eine Fiebererscheinung. Die Verarbeitung von Sinnesreizen erfolgt in derartigen Regelkreisen. Die Dauer des Regelprozesses kann dabei sehr unterschiedlich sein. (Silbernagl & Despopoulos, 2012)

Sämtliche Reaktionen des menschlichen Körpers auf die im Raum vorhandenen Elementarströme, werden von drei Systemen im Körper entsprechend dem in Abbildung 17 dargestellten Regelkreis gesteuert. Dazu zählen das Nervensystem, das Immunsystem und das Hormonsystem (Endokrines System). Aufgrund der unterschiedlichen Einflüsse der Umgebung des Menschen und dem Zusammenspiel dieser drei Systeme können eine Reihe von unterschiedlichen Reaktionen ausgelöst werden, die sich wie folgt (Bluyssen, 2009) untergliedern lassen. (Bluyssen, 2010)

- Reaktionen, die durch Elementarströme ausgelöst werden und welche durch ein Zusammenspiel des Nerven- und des Hormonsystems verarbeitet werden und zusätzlich durch den Status des Immunsystems verändert werden können.
 - Durch die Sinne direkt wahrnehmbare komfortrelevante Veränderungen (z. B. Geruch, Wärme, Hitze, Lärm)
 - Systemische Effekte (z. B. Müdigkeit, Konzentrationsschwäche)
 - Psychologische Effekte (z. B. Depression, Angst)

- Reaktionen, die durch Elementarströme ausgelöst werden und welche durch ein Zusammenspiel des Immun- und des Hormonsystems gegebenenfalls unter Einwirkung des Nervensystems verarbeitet werden.
 - Irritationen, allergische oder hyperreaktive Reaktionen (z. B. Asthma, Hautirritationen, Hörverlust)
 - Infektionskrankheiten (z. B. Legionärskrankheit)
 - Toxische chronische Reaktionen (z. B. Krebs)

Sämtliche Reaktionen, die hier dargestellt sind, können durch Elementarströme im Raum ausgelöst werden. Die Reaktionen, die durch ein Zusammenspiel des Nerven- und Hormonsystems verarbeitet werden, beziehen sich vorrangig auf den Komfort, weniger auf die Gesundheit und dies unter der Bedingung, dass lediglich die physiologischen Veränderungen, nicht jedoch die psychologischen Veränderungen berücksichtigt werden. Zu den Limitationen dieser Methode zählt, dass die psychologischen Veränderungen nicht berücksichtigt werden, somit können diese hier vernachlässigt werden. Die systemischen Effekte, die in Bezug auf den Komfort auftreten können, wie Müdigkeit oder eine Reduktion der Konzentrationsfähigkeit, können als sekundäre Auswirkungen betrachtet werden, da vorerst eine komfortrelevante Veränderung von den Sinnen wahrgenommen wird und es sich dabei um die primäre Auswirkung auf den Körper handelt; somit können diese Effekte ebenfalls für das weitere Vorgehen vernachlässigt werden. Folglich werden an dieser Stelle komfortrelevante Veränderungen als mögliche raumphysiologische Auswirkungen identifiziert.

Die Reaktionen, die durch ein Zusammenspiel des Immun- und des Hormonsystems verarbeitet werden, werden dagegen den gesundheitsgefährdenden Veränderungen zugeordnet. Für das weitere Vorgehen werden die drei oben aufgezählten Krankheitsbilder zurückbehalten. Sowohl Irritationen, allergische

Reaktionen, Infektionen und chronische Krankheiten können direkt auf im Gebäude entstehende Elementarströme zurückgeführt werden, ohne dass hier ein Einfluss von psychologischen Faktoren berücksichtigt werden muss. Es ist davon auszugehen, dass es auch bei diesen Krankheiten möglicherweise psychologische Faktoren gibt, die einen Einfluss haben, jedoch werden diese hier nicht berücksichtigt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den einzelnen Krankheitsbildern besteht in der Dauer, die es braucht, bis diese in Erscheinung treten und in der Schwere des Krankheitsbildes. Das Ziel soll es jedoch nicht sein spezifische Krankheitsbilder zu betrachten; diese Darstellung dient lediglich der Feststellung, dass in ungünstigen Fällen die Elementarströme des Innenraums zu gesundheitsgefährdenden Auswirkungen beitragen können.

Im Sinne der Aufrechterhaltung der Analogie zur Methode der Ökobilanzierung sollen in der raumphysiologischen Bilanz sämtliche möglichen Auswirkungen, die beispielhaft aufgezeigt wurden, mithilfe von Ursache-Wirkungs-Ketten dargestellt und im Verlauf dieser Kette für jede Auswirkung ein passender Wirkungsindikator gefunden werden. Um die passenden Indikatoren zu identifizieren, erscheint es sinnvoll, an erster Stelle die Rezeptoren des menschlichen Körpers zu betrachten, welche die Elementarströme erfassen können. Diese reagieren auf unterschiedliche Reize und Reizstärken, die es letztendlich zu bewerten gilt. Ausgehend von den Wahrnehmungsorganen können die Ursache-Wirkungs-Ketten, die den Zusammenhang zwischen den Elementarströmen und der Wirkung im Körper bilden, beschrieben werden. Somit kann für jede Rezeptorart der passende Indikator für die Quantifizierung der Auswirkung der Elementarströme einer Wirkungskategorie hergeleitet werden. Diese Quantifizierung muss zusätzlich bewertbar gemacht werden, so dass eine Aussage ermöglicht wird, ob der Mensch in einem bestimmten Raum in seinem Komfort oder gar seiner Gesundheit beeinträchtigt wird. Wie in der Definition der Auswirkung bereits beschrieben, muss eine Auswirkung nicht immer nur negativ sein, diese kann ebenfalls als positiv oder neutral gewertet werden.

Da es sich ausschließlich um die Betrachtung der Veränderung der physiologischen Parameter beim Menschen handelt, wird es keine positive Auswirkung geben; diese kann lediglich neutral sein. In dem Fall wirkt die Umgebung auf den Menschen, jedoch entspricht der im Regelkreis erfasste Soll-Wert dem Ist-Wert. Somit gibt es vorerst drei mögliche Auswirkungen, die eine Umgebung auf den Menschen haben kann; neutral (keine Auswirkung), komfortrelevante oder gesundheitsgefährdende Auswirkung. Zwischen dem physiologischen Bereich, in dem keine Auswirkung stattfindet und dem Bereich, in dem der Mensch bewusst eine komfortrelevante Veränderung bemerkt, muss es jedoch noch einen Bereich geben, in dem der Körper bereits eine Abweichung vom Soll-Wert feststellen kann und auf diese reagieren wird, ohne dass der Mensch diese Anpassung jedoch wahrnehmen kann (bspw. Vasomotorik in der Thermoregulation). Somit ergeben sich insgesamt vier mögliche Auswirkungen, welche sich durch Wirkungszonen beschreiben lassen. Für jede der Wirkungskategorien, die im Folgenden beschrieben werden, muss dementsprechend ein Wirkungsindikator gefunden werden, der eine Zuordnung zu einer der vier Wirkungszonen ermöglicht. Hierfür wird bewusst die Beschreibung als „Zone“ gewählt, da es sich hierbei nicht um einen einzelnen konkreten Zahlenwert handelt, sondern um Wertebereiche, die eine Aussage darüber ermöglichen, in welchem Zustand sich der Körper befindet.

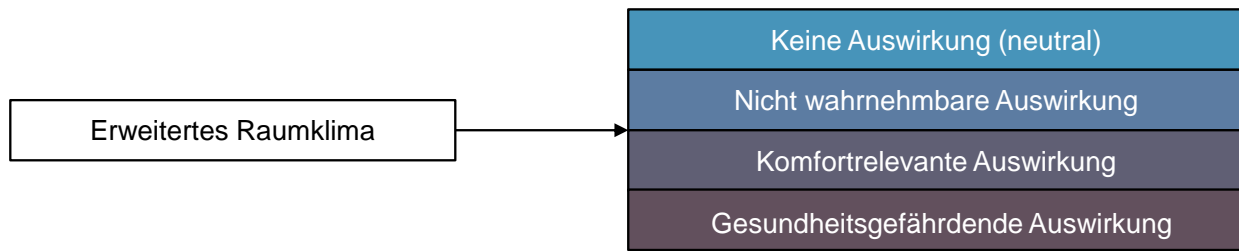


Abbildung 18: Definition der Wirkungszonen der raumphysiologischen Bilanz

Die Farben zur grafischen Darstellung der einzelnen Zonen wurden bewusst gewählt. Die Farbe Blau wird als beruhigende, entspannte Farbe wahrgenommen (Welsch & Liebmann, 2012). Je geringer der Anteil an Blau und je höher der Anteil an Rot im RGB-Farbraum wird, desto dunkler wird der Farbton. Diese Abstufung verbildlicht, wie negativ die Auswirkung der Umgebung für den Menschen ist, denn Rot hat psychologisch betrachtet die entgegengesetzte Wirkung von Blau. (Welsch & Liebmann, 2012)

Anstelle der Definition von Wirkungsendpunkten, welche sich in der Ökobilanzierung auf unterschiedliche Schutzgüter und die möglichen Auswirkungen auf diese in Abhängigkeit von den betrachteten Elementarströmen ergeben, wird für die raumphysiologische Bilanz der Begriff der Wirkungszonen eingeführt. Die Nutzung des Begriffs Wirkungszone im Kontext der raumphysiologischen Bilanz erscheint sinnvoller, da jede der vier Wirkungskategorien zu diesen vier möglichen Auswirkungen führen kann. Die Wirkungszonen beschreiben lediglich die Schwere der Auswirkung, welche gleichzustellen ist mit dem sich einstellenden Zustand des menschlichen Körpers. Ein Wirkungsendpunkt steht nicht stellvertretend für die Schwere der Auswirkung, sondern definiert den Punkt der Ursache-Wirkungs-Kette, der als Ende der Auswirkung zu betrachten ist. Da bei den Auswirkungen auf den Menschen ausschließlich die primären, also physiologischen Auswirkungen berücksichtigt werden, ist der Wirkungsendpunkt für jede Wirkungskategorie identisch zu interpretieren.

Der nächste zu definierende Begriff ist der Wirkungsindikator. Dieser wird in der DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 (2021) als die „quantifizierte Darstellung einer Wirkungskategorie“ beschrieben. Diese Definition kann für die Anwendung der Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz beibehalten werden. Für jede Wirkungskategorie gilt es demnach einen numerischen Indikator zu finden, der es ermöglicht zu bestimmen, in welcher Wirkungszone sich die betrachtete Person befindet. Um diesen Wirkungsindikator zu bestimmen, werden in der Ökobilanzierung sowohl der Umweltmechanismus als auch der Charakterisierungsfaktor benötigt.

Umweltmechanismus	System physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse für die vorgegebene Wirkungskategorie, das die Sachbilanzergebnisse mit den Wirkungsindikatoren und den Wirkungsendpunkten verbindet.
-------------------	---

Der Umweltmechanismus ist ein System aus unterschiedlichen Prozessen, das den Zusammenhang zwischen den Elementarflüssen (Sachbilanzergebnis) und den Wirkungsendpunkten herstellt. Damit wird die Ursache-Wirkungs-Kette repräsentiert, die zwischen dem Verlassen der Elementarflüsse des Systems und der Auswirkung auf die Schutzgüter abläuft. Auf dieser Ursache-Wirkungs-Kette gibt es mehrere

Ereignisse, die einzeln als Wirkungsindikatoren bezeichnet werden können und von denen einer für die Repräsentation dieser Wirkungskategorie ausgewählt werden muss. Um einen entsprechenden Indikator auszuwählen, sollte nicht nur auf die Möglichkeit der Modellierung dieses Indikators geachtet werden, sondern zusätzlich auf die Umweltrelevanz. Im Allgemeinen gilt, je weiter unten in der Ursache-Wirkungs-Kette sich ein Indikator befindet (näher an der tatsächlichen Auswirkung, die repräsentiert werden soll), desto mehr Umweltrelevanz hat dieser. Jedoch sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass die Unsicherheit weiter unten in der Ursache-Wirkungs-Kette ansteigt, da die Messbarkeit im direkten Zusammenhang zu dem auslösenden Elementarfluss sich verringert. (Rosenbaum et al., 2018) Der Umweltmechanismus wird mathematisch als Charakterisierungsmodell beschrieben. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Modells ist der Charakterisierungsfaktor.

Charakterisierungsfaktor Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewandt wird.

Die Charakterisierung an sich ist ein nach der DIN EN ISO 14040 / 14044 (2021) vorgeschriebener Bestandteil der Phase der Wirkungsabschätzung. In diesem Schritt werden alle Elementarflüsse der Sachbilanz bezüglich des Grades ihres Beitrags zu einer Wirkung bewertet. Zu diesem Zweck werden alle Elementarflüsse, die einer bestimmten Wirkungskategorie zugeordnet sind, mit ihrem jeweiligen Charakterisierungsfaktor multipliziert. Aus diesen Ergebnissen kann am Ende eine Wirkungsbewertung für die jeweilige Wirkungskategorie erfolgen.

Der Charakterisierungsfaktor stellt den Beitrag jedes Elementarflusses zu einer bestimmten Wirkungskategorie dar. Die Berechnung dieser Faktoren erfolgt mithilfe von wissenschaftlich validen und quantitativen Modellen des Umweltmechanismus. Beispielsweise gibt es eine Reihe von Elementarflüssen eines Produktsystems, die alle zur Versauerung beitragen. Wie viel die jeweiligen Elementarflüsse dazu beitragen, wird durch den Charakterisierungsfaktor beschrieben. (Rosenbaum et al., 2018)

Der Umweltmechanismus und der Charakterisierungsfaktor stehen in direktem Zusammenhang zueinander. Zudem müssen beide für die Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz in ihrer Definition entsprechend angepasst werden, angefangen mit dem Umweltmechanismus, welcher die Ursache-Wirkungs-Kette zwischen den Elementarströmen (Auslöser) und den möglichen Wirkungsendpunkten (Veränderung) abbildet. Da es in der raumphysiologischen Bilanz keine unterschiedlichen Wirkungsendpunkte gibt, sondern für jede Wirkungskategorie die physiologischen Auswirkungen quantifiziert und den Wirkungszonen zugeordnet werden sollen, muss der zu betrachtende Mechanismus entsprechend modifiziert werden.

Für die Anpassung des Menschen an die erweiterte raumklimatische Umgebung stehen neben dem bereits beschriebenen Regelkreis, der sich rein auf die physiologischen Reaktionen bezieht, noch zwei weitere Regelkreise zur Verfügung. Der erste beschreibt die technische Regulation der Umgebung (z. B. Temperatursensoren regulieren die Heizung) und der zweite die bewusste Anpassung des Menschen an seine Umgebung (z. B. Kleidungsstück an- oder ablegen). Ein solcher dreifacher Regelkreis wurde bislang ausschließlich für die Thermoregulation beschrieben. (Hensel, 1982) Hier heißt es, dass

aufgrund des hierarchisch aufgebauten Systems der Thermoregulation, der Mensch, soweit dies möglich ist, zuerst sein Verhalten anpassen wird, bevor sich der Körper mit unbeeinflussbaren Reaktionen der Umgebung anpasst. Zu diesen Verhaltensanpassungen gehören insbesondere eine Veränderung der Körperhaltung, die Willkürmotorik, die Anpassung der Umgebung und die Auswahl der als passend erachteten Bekleidung. (Gekle & Singer, 2019)

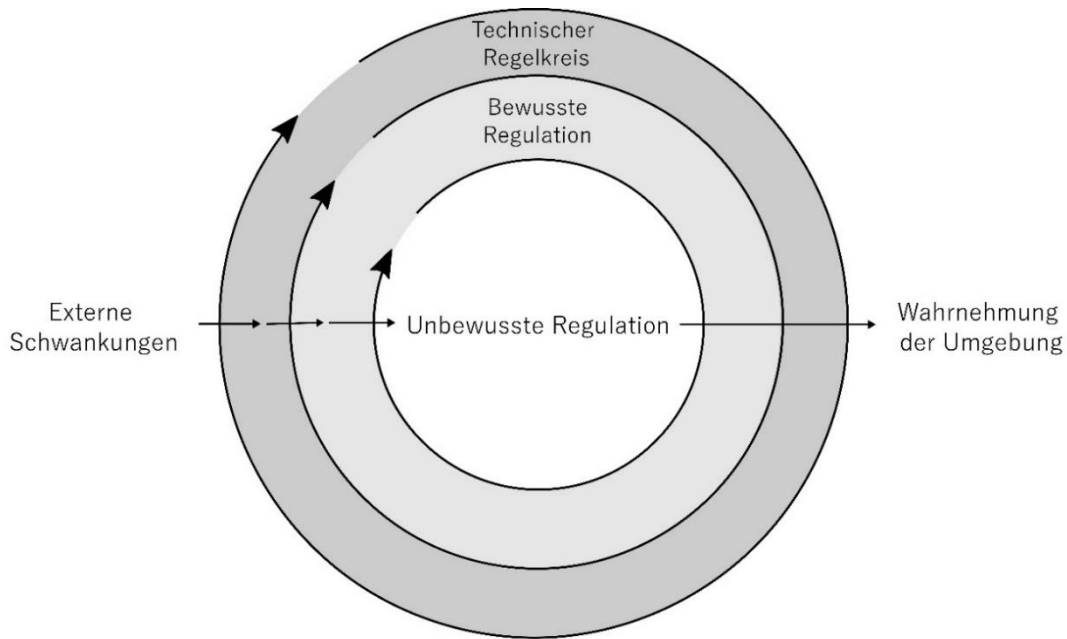


Abbildung 19: Schematische Darstellung der unbewussten, bewussten und technischen Regulierung der raumklimatischen Umgebung des Menschen (Generisch dargestellt nach Hensel, 1982)

Es ist davon auszugehen, dass dieser Regelkreis gleichermaßen für die übrigen Wirkungskategorien gilt. In der vorliegenden Methode soll ausschließlich die unbewusste Regulation bewertet werden, welche innerhalb der bewussten sowie der technischen Regulation stattfindet. Die beiden äußeren Regelkreise sind somit Bestandteil der Sachbilanz und bilden den stationären Rahmen der Wirkungsabschätzung. Lediglich der innere Regelkreis wird in der Wirkungsabschätzung berücksichtigt; somit wäre es sinnvoll, den Begriff Umweltmechanismus durch den Begriff Wahrnehmungsmechanismus zu ersetzen. Diese Wahrnehmung lässt sich, unabhängig, ob sie bewusst oder unbewusst stattfindet, letztendlich durch den Wirkungsindikator quantifizieren. Jedoch kann der Begriff Wahrnehmung verwirrend sein, denn durch die Sinnesreize werden Empfindungen induziert, welche wiederum durch die menschliche Erfahrung zu einer Wahrnehmung modifiziert werden. (Handwerker & Schmelzer, 2019) Somit muss die Wahrnehmung des Menschen nicht zwangsläufig übereinstimmen mit der Einteilung der potentiellen Wahrnehmung über die Wirkungszonen. Deswegen wird dieser Begriff in der Anwendung der Methode nicht verwendet. Besser geeignet scheint der Begriff Wirkungsmechanismus, da dieser eher darauf hindeutet zu beschreiben, welche Prozesse im menschlichen Körper ablaufen, um ausgehend von den Elementarströmen der einzelnen Wirkungskategorien, den letztendlichen Wirkungsindikator für die Zuordnung zu einer Wirkungszone zu bestimmen. Somit lässt sich der Wirkungsmechanismus wie folgt definieren.

Wirkungsmechanismus System physikalischer und physiologischer Prozesse für die vorgegebene Wirkungskategorie, welches die Sachbilanzergebnisse mit den Wirkungsindikatoren und den Wirkungszonen verbindet.

Bei der Definition wird auf biologische und chemische Prozesse verzichtet; lediglich der Begriff physikalische Prozesse wird beibehalten und durch physiologische Prozesse ergänzt. Die physikalischen Prozesse beziehen sich auf das Zusammenspiel der einzelnen Elementarströme, während sich die physiologischen Prozesse auf die Prozesse innerhalb des menschlichen Körpers beziehen. Die Beschreibung als biologische und chemische Prozesse wäre durchaus ebenfalls valide, jedoch wird durch die Beschreibung von physiologischen Prozessen der Bezug zum menschlichen Körper hervorgehoben. Das Charakterisierungsmodell bildet den entsprechenden Umweltmechanismus quantitativ ab, woraus der Charakterisierungsfaktor für jeden Elementarstrom, der zu einer bestimmten Wirkungskategorie beiträgt, abgeleitet werden kann. Ein solcher Faktor ist in der raumphysiologischen Bilanz nicht zielführend, da die einzelnen Elementarströme in Wechselwirkung zu einer Wirkungskategorie beitragen und nicht jeder Elementarstrom für sich alleine betrachtet wird. Somit wird lediglich eine Quantifizierung des Wirkungsmechanismus zur Bestimmung des Wirkungsindikators für jede Wirkungskategorie benötigt, nicht jedoch ein gesondertes Charakterisierungsmodell mit einem bestimmten Charakterisierungsfaktor. Eine entscheidende Komponente für die Wirkungsabschätzung ist der betrachtete Zeitraum. Bislang wurde dieser auf die Gebäudenutzung festgelegt. Da sämtliche physiologischen und physikalischen Prozesse einer gewissen Dynamik unterliegen, würden sich für die Bestimmung der Wirkungsmechanismen und somit der Wirkungsindikatoren dynamische Verfahren ergeben. Jedoch sind nach Rosenbaum et al. (2018) Wirkungsindikatoren in der Ökobilanzierung stationär. Um diesen Grundsatz aufrecht zu halten, wird die Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz als quasi-stationäre Wirkungsabschätzung durchgeführt. Somit werden bei der Berechnung der Wirkungsindikatoren stationäre Zustände einer Momentaufnahme betrachtet. Diese Momentaufnahme kann jedoch in beliebig kleinen oder großen Zeitintervallen wiederholt werden, sodass beispielsweise trotz des stationären Verfahrens die Veränderung der Wirkungsindikatoren im Verlauf eines Tages abgebildet werden kann. Für welchen konkreten Zeitrahmen diese Momentaufnahmen getätigt werden, muss bei der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens definiert werden. Vorerst ist es entscheidend, dass sämtliche Wirkungsmechanismen, die im Anschluss hergeleitet werden, keine zeitliche Komponente aufweisen. Im Folgenden wird für jede der identifizierten Wirkungskategorien der Stand des Wissens bezüglich der physiologischen Wahrnehmung sowie die Herleitung des Wirkungsindikators und der Wirkungszonen beschreiben. Anschließend werden die jeweiligen Wirkungsmechanismen quantitativ angewandt und die Ergebnisse dargestellt.

5.2 Wirkungskategorie: Thermische Umgebung

Der erste Rezeptortyp, der näher betrachtet wird, sind die Thermorezeptoren, welche zur Bewertung der Auswirkung der thermischen Umgebung und sämtlichen zugehörigen Elementarströmen genutzt werden sollen. Hierfür wird vorerst der Stand des Wissens zur Thermorezeption und -regulation sowie zur numerischen Darstellung der Wärmebilanz des Körpers abgebildet. Ausgehend von diesen Grundlagen werden ein Wirkungsindikator sowie die dazugehörigen Wirkungszonen für die Bewertung der thermischen Umgebung definiert. Im Anschluss kann auf der Grundlage der Wärmebilanz des menschlichen Körpers ein Wirkungsmechanismus hergeleitet werden, der es ermöglicht, für jede beliebige Bewertungssituation den Wirkungsindikator quantitativ zu bestimmen und den definierten Wirkungszonen zuzuordnen.

5.2.1 Stand des Wissens: Thermorezeption

Das folgende Unterkapitel stellt die physiologischen Grundlagen zur Wahrnehmung der thermischen Umgebung dar. Hierbei wird der Stand des Wissens dieser Prozesse abgebildet. Es sollen jedoch nicht sämtliche Prozesse, die im Körper stattfinden, berücksichtigt werden, sondern lediglich solche, die für die Herleitung der raumphysiologischen Bilanz relevant sind. Somit wird der Stand des Wissens an gegebenen Stellen durch einen methodenrelevanten Einschub eingegrenzt.

Der Mensch gehört zu den endothermen Organismen. Das bedeutet, dass der Körper in der Lage ist, die Körpertemperatur unabhängig von der Umgebungstemperatur mithilfe der vom Stoffwechsel erzeugten Wärme auf einem konstanten Niveau zu halten. Beim Menschen liegt die Körperkerntemperatur bei 37 °C. Jedoch sind im Verlauf eines Tages leichte Schwankungen zu beobachten, wodurch die Körperkerntemperatur am Abend um 0.5 °C bis 0.7 °C höher sein kann als am Morgen. Zudem schwankt die Körperkerntemperatur im Zyklus der Frau, wodurch ebenfalls eine Erhöhung um ein halbes Grad eintreten kann. Trotz dieser leichten Schwankungen gibt es Toleranzgrenzen für die Körperkerntemperatur im Bereich von 36 °C bis 38 °C, deren Überschreiten zu pathophysiologischen Veränderungen führt. Um die Körperkerntemperatur konstant zu halten, wird eine aktive Thermoregulation mit negativen Rückkopplungsmechanismen benötigt. (Feigenspan, 2017) Analog zu dem in Abbildung 17 dargestellten Regelkreis wird in der folgenden Abbildung 20 der Regelkreis für die Temperaturregulierung dargestellt. Der Regler wird durch den Hypothalamus repräsentiert, der Sensor über die peripheren und zentralen Thermosensoren und die Stellglieder setzen sich zusammen aus dem autonomen Nervensystem, den Reaktionen auf die Effektoren sowie der Wärmeproduktion und -abgabe.

Der Hypothalamus meldet ein Fehlersignal bei einer Abweichung der Körpertemperatur vom Soll-Wert. Dieses Signal führt zu einer kompensatorischen Reaktion der Effektoren. Die durch die Veränderung von Wärmeabgabe oder Wärmeproduktion veränderte Körpertemperatur wird von den Sensoren gemessen und als Feedback-Signal wieder an den Hypothalamus geleitet. Falls der Soll-Wert mit dem Feedback-Signal übereinstimmen, wird kein Fehlersignal mehr erzeugt. Ist dies nicht der Fall, wird der Mechanismus wiederholt. (Feigenspan, 2017)

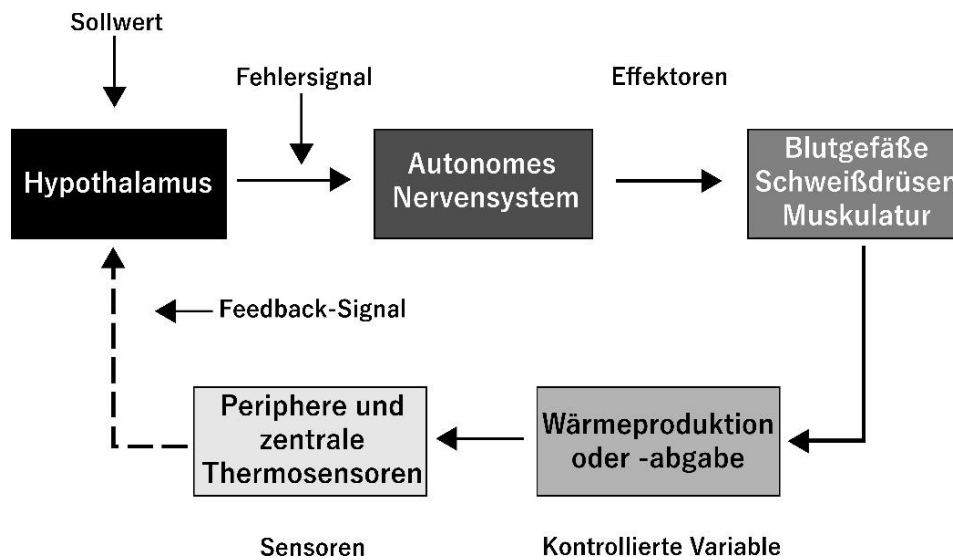


Abbildung 20: Schematische Darstellung des negativen Rückkopplungsmechanismus zur Temperaturregulierung (Feigenspan, 2017)

Entscheidend für die Wahrnehmung der Temperatur sind somit die Thermosensoren, welche umgangssprachlich als Temperatursinn bezeichnet werden und ein Teil des übergeordneten somatosensorischen Systems sind. Die Rezeptoren, die zu diesem System gehören, reagieren auf eine Vielzahl an unterschiedlichen Reizen, beispielsweise einen leichten Druck auf der Haut, die Dehnung der Harnblase oder eben auch die Temperaturwahrnehmung, sowohl an den Gliedmaßen als auch im Gehirn. Als Teil des somatosensorischen Systems dienen die Thermorezeptoren zur Wahrnehmung und Weiterverarbeitung (Transduktion und Transformation) von thermischer Energie. Das somatosensorische System unterscheidet sich wesentlich von den anderen Sinnen wie Hören oder Sehen dadurch, dass die Rezeptoren über den ganzen Körper verteilt sind und sich nicht nur in kleinen spezialisierten Bereichen befinden. (Bear, Connors & Paradiso, 2018) Da die anderen Bestandteile des somatosensorischen Systems für die Wahrnehmung der thermischen Energie nicht relevant sind, werden diese hier nicht weiter berücksichtigt und lediglich die Funktionsweise der Thermorezeptoren und die damit einhergehende Regulation der Temperatur werden im Detail dargestellt.

Neben der Zugehörigkeit zur Oberflächensensibilität zeichnet sich der Temperatursinn noch durch weitere Besonderheiten aus. Beim Temperatursinn handelt es sich um einen homöostatisch ausgerichteten Sinn. Das bedeutet erst, wenn der Körper thermoregulatorisch gegensteuern muss, weil er sich beispielsweise in einer Umgebung befindet, die eine solche Gegensteuerung verlangt, dann wird der Temperatursinn bewusst wahrgenommen. Die Temperaturempfindung, die dabei entsteht, wird unbewusst affektiv beantwortet und zusätzlich hedonisch, also als angenehm oder unangenehm bewertet. (Meßlinger, 2019) Die Thermorezeptoren sind jedoch aufgrund bestimmter Membranmechanismen besonders temperaturempfindlich. Diese Rezeptoren können Änderungen der durchschnittlichen Hauttemperatur von 0.01 °C wahrnehmen. Somit sind es die Neuronen in der Haut, die zur Temperaturwahrnehmung beitragen, während die temperaturempfindlichen Neuronen im Rückenmark und im Hypothalamus zu den physiologischen Reaktionen beitragen. Es kann dementsprechend zwischen den peripheren Thermorezeptoren und den zentralen Neuronen der Thermorezeption unterschieden werden. (Bear,

Connors & Paradiso, 2018) Diese beiden Rezeptorarten werden benötigt, da physiologisch relevante Temperaturänderungen sowohl durch Schwankungen in der Umgebungstemperatur als auch durch eine veränderte Stoffwechselrate innerhalb des Organismus ausgelöst werden können. Die Sensoren, die kontinuierlich die Temperatur der Außenwelt wahrnehmen, werden als periphere Thermosensoren bezeichnet. Dabei handelt es sich um freie Nervenendigungen in der Haut die Temperaturreize der Umgebung wahrnehmen. Wird hier das Schwellenpotential erreicht, werden Aktionspotentiale an den Hypothalamus weitergeleitet. Die zentralen Thermosensoren sind dagegen für die Erfassung von Temperaturänderungen im Körperkern verantwortlich. (Feigenspan, 2017)

Bei der Temperaturempfindung kann zusätzlich zwischen den lokalen und den globalen Empfindungen unterschieden werden. Bei lokalen Empfindungen handelt es sich um Temperaturwahrnehmungen an einer bestimmten Stelle des Körpers. Diese werden in der Herleitung der raumphysiologischen Bilanz nicht weiter betrachtet, könnten jedoch durch die Anwendung eines gesonderten Wirkungsmechanismus bilanziert werden. Es gilt alleine anhand des Wirkungsindikators die Allgemeinempfindung, also die globale Wahrnehmung der thermischen Umgebung zu bewerten. Diese nicht lokalisierten Empfindungen hängen nicht nur von der Hauttemperatur, sondern zusätzlich von der Körperkerntemperatur ab und dienen zur Homöostase der Körperkerntemperatur, indem sie das thermoregulatorische Verhalten steuern. (Treede & Baumgärtner, 2019)

5.2.1.1 Thermische Regulierung des Körpers

Zwischen der Wahrnehmung der Temperatur sowohl im Inneren des Körpers als auch die der Außenwelt und der letztendlichen Reaktion des Körpers auf diese Temperaturen findet eine Verarbeitung der Information auf neuronaler Ebene statt (Feigenspan, 2017). Diese beginnt in den Thermorezeptoren; hier gibt es mehrere unterschiedliche temperaturempfindliche Moleküle, die als Thermorezeptoren identifiziert werden. Bei diesen Molekülen handelt es sich in den meisten Fällen um Ionenproteinkanäle, die bei der Wahrnehmung einer Temperaturveränderung eine Reihe von Reaktionen auslösen, die letztendlich zur thermoregulatorischen Anpassung des Körpers führen. (Martinez & Pena Garcia, 2013) Nimmt der Sensor eine Veränderung der Temperatur wahr, dann verändert sich die Konfiguration und die Leitfähigkeit der Kanalkomplexe. Aus dieser Veränderung resultiert das Sensorpotential. Die Rezeptormoleküle in den Thermosensoren gehören überwiegend der Familie der *Transient-Receptor-Potential* (TRP) an. Es gibt sechs verschiedene TRP Kanäle, die sensorisch den physiologisch relevanten Temperaturbereich zwischen 10 °C und 55 °C abdecken (Dhaka, Viswanath & Patapoutian, 2006). TRPV3 und TRPV4 werden bei einer leichten Erwärmung der Haut aktiviert, während bei einer schmerzhaften Erwärmung TRPV1 und bei einer leichten Abkühlung der Haut TRPM8 erregt wird. Die unterschiedlichen TRP Kanäle befinden sich in den freien Nervenendigungen, die in der Haut integriert sind und zur Detektion von Abkühlung, Erwärmung, aber auch noxischer Kälte und Wärme dienen (schmerzhafte Reize). Die letztendliche Wahrnehmung wird immer durch ein Zusammenspiel der unterschiedlichen Rezeptormoleküle generiert. (Handwerker & Schmelz, 2019)

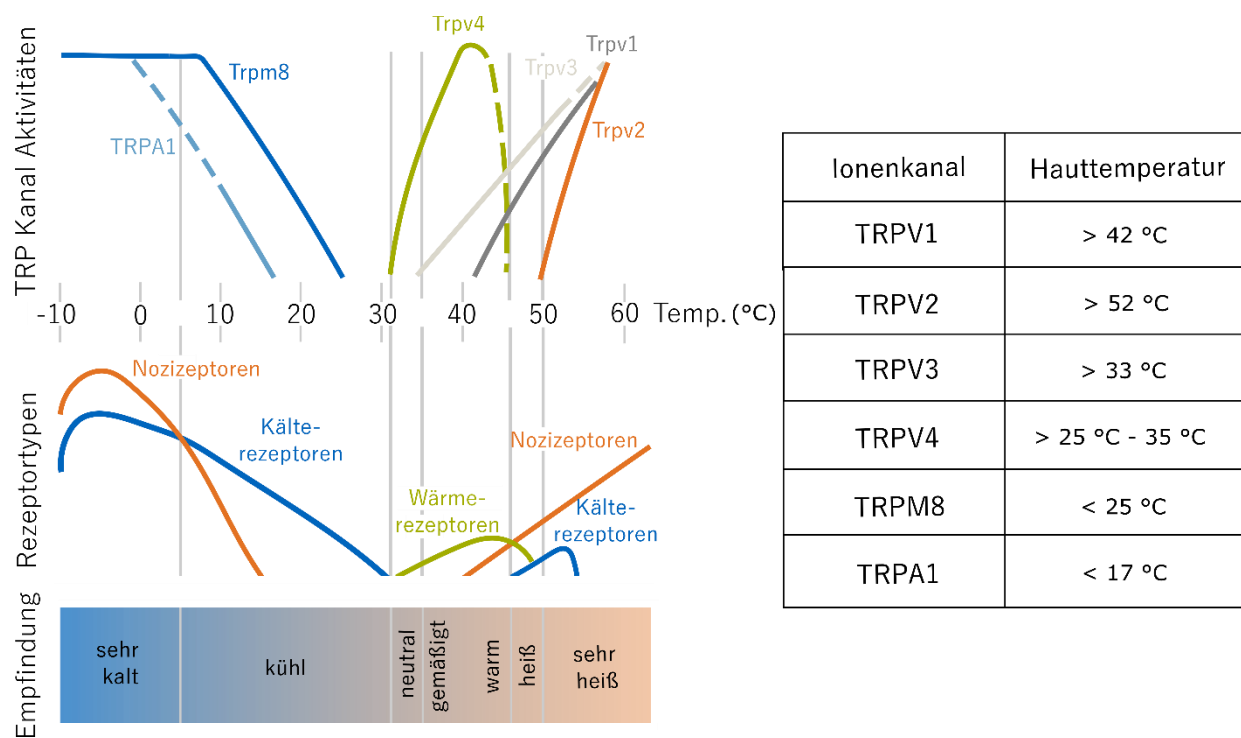


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen der Aktivierung der TRP-Kanäle, der Hauttemperatur und der entsprechenden Empfindung (Belmonte & Viana, 2008 adaptiert nach Patapoutian et al., 2003)

Jeder TRP-Kanal reagiert auf unterschiedliche Temperaturbereiche. Damit wird der thermische Schwankungsbereich abgedeckt, welchem lebende Organismen üblicherweise ausgesetzt sind. (Martinez & Pena Garcia, 2013)

Zur Verarbeitung der Aktionspotentiale, die in den unterschiedlichen Ionenkanälen entstehen, lassen sich drei Signalbahnen unterscheiden, die für die physiologischen Reaktionen relevant sind. Zur Vermeidung von Gewebeschädigungen durch schmerzhafte Kälte- oder Wärmereize wird der Rückziehreflex im Rückenmark eingeleitet. Dabei handelt es sich um eine motorische Reaktion, die eine Muskelkontraktion zum Wegziehen des betroffenen Körperteils hervorruft. Die zweite Signalbahn sorgt für die bewusste Wahrnehmung der Temperatur im somatosensorischen Cortex und leitet willkürliche Verhaltensänderungen ein. Die dritte Signalbahn verläuft bis in den Hypothalamus, der wiederum über temperaturempfindliche Neuronen verfügt. Hier werden die Signale der peripheren und der zentralen Neuronen verarbeitet und entsprechende unbewusste thermoregulatorische Prozesse zur Konstanzhaltung der Körperkerntemperatur ausgelöst. (Feigenspan, 2017) Diese drei sensorischen Bahnen werden funktionell als Afferenzen beschrieben. Diese führen das durch den Reiz entstehende Potential einem Verarbeitungszentrum zu. (Clauss & Clauss, 2018) Jedoch wird lediglich die dritte Bahn für die Darstellung des Stands des Wissens weiter berücksichtigt. Eine motorische Reaktion als Wirkung der Innenraumumgebung kann ausgeschlossen werden, da unter gewöhnlichen Nutzungsbedingungen die Elementarströme in einem Innenraum nicht dazu führen, dass der Mensch eine schmerzhaft warme oder kalte Fläche berührt. Die zweite sensorische Bahn widerspricht den Grundsätzen der Methode, da diese zu einer bewussten Verhaltensänderung führt. Somit wird lediglich die dritte sensorische Bahn für die Wirkungsabschätzung der thermischen Umgebung zurückbehalten.

Die Verarbeitungszentren der dritten sensorischen Bahn liegen, wie eben beschrieben, an unterschiedlichen Stellen im Körper und gehören zu dem zentralen Nervensystem. Ausgehend vom Hypothalamus können fünf unterschiedliche Effektoren der Temperaturregulierung identifiziert werden, die für die unbewusste Aufrechterhaltung der Körperkerntemperatur zuständig sind. Die fünf unterschiedlichen Effektoren führen jeweils zu unterschiedlichen Reaktionen des Körpers und werden somit bei unterschiedlichen Reizen (warm/kalt) und Reizstärken ausgelöst. (Feigenspan, 2017; Persson, 2019) Je nach Literaturquelle werden statt fünf Effektoren die Anzahl von sechs Effektoren genannt. Bei dem zusätzlichen Effektor handelt es sich ebenfalls um die Einleitung einer erhöhten Wärmeproduktion durch verbesserte Vasodilatation und verbesserte Fettsäurenverwertung (Edholm & Weiner, 1981; Parsons, 2014). Somit werden diese Reaktionen bei der Betrachtung von lediglich fünf Effektoren bereits berücksichtigt.

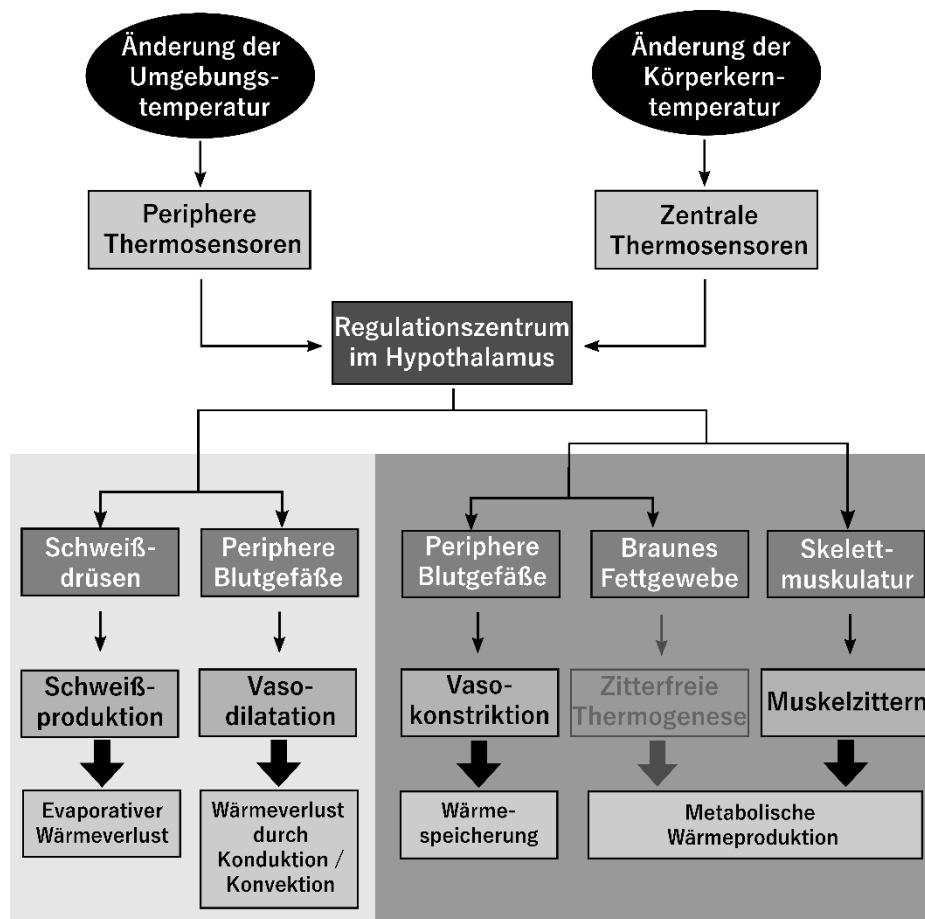


Abbildung 22: Darstellung der Effektorbahnen und der Reaktionen zur Aufrechterhaltung des Wärmehaushalts (Feigenspan, 2017)

Auf der linken Seite der Abbildung 22 sind die Reaktionen des Körpers auf eine Erhöhung der Temperatur dargestellt. Durch die Aktivierung dieser Regelkreise wird eine vermehrte Wärmeabgabe aus dem Körper generiert, um vor einer möglichen Überhitzung zu schützen. An erster Stelle tritt eine Weitstellung der peripheren Blutgefäße ein, die für eine erhöhte Durchblutung der Haut sorgt (vgl. thermoneutraler Zustand 0.2 L/min bis 0.5 L/min, extreme Wärmebelastung im Ruhezustand 4 L/min). Durch die stärkere

Durchblutung kann mehr Wärme durch Konvektion und Konduktion an die Umgebung abgegeben werden. Die maximale Vasodilatation tritt bei beginnender Schweißsekretion auf. Für die zusätzliche Abführung von Wärme an die Umgebung werden die Schweißdrüsen aktiviert. Durch die evaporative Wärmeabgabe kann zusätzlich eine große Menge an Wärmeenergie an die Umgebung abgegeben werden. (Feigenspan, 2017; Persson, 2019) Im Gegensatz zur trockenen Wärmeabgabe wird für die evaporative Wärmegabe kein Temperaturgefälle zwischen der Haut und der Umgebung vorausgesetzt. Deswegen ist diese Art der Wärmeabgabe, insbesondere bei hohen Umgebungstemperaturen von großer Bedeutung. Diese Art der Wärmeabgabe ist jedoch nur solange möglich, wie der Wasserdampfdruck an der Haut über dem der Umgebung liegt. Zusätzlich zu dem thermoregulatorischen Schwitzen tritt bei starker psychischer Anspannung das emotionale Schwitzen ein. Da dies in Verbindung mit einer Vasokonstriktion stattfindet, führt dieser Vorgang zu kaltem Schweiß. (Persson, 2019) Da auf den psychischen Zustand der Personen im Raum bei der Erstellung dieser Methode nicht eingegangen wird, kann das Auftreten von dieser Reaktion vernachlässigt werden.

Auf der rechten Seite stehen dagegen die Reaktionen des Körpers, die bei der Wahrnehmung von Kältereizen einsetzen. In diesem Fall werden Mechanismen eingeleitet, welche die Wärme im Körper zurückhalten, um einer möglichen Unterkühlung entgegenzuwirken. An erster Stelle wird eine Vasokonstriktion, also eine Engstellung der peripheren Gefäße hervorgerufen, wodurch der Blutfluss und damit ebenfalls die Wärmeabgabe der Körperoberfläche an die Umgebung reduziert wird. (Feigenspan, 2017) Zur Unterstützung der Wärmespeicherung im Körper wird oftmals im Zusammenhang mit der Vasokonstriktion eine pilomotorische Reaktion ausgelöst. Die Aufstellung der Haare ist eine Reaktion auf eine Kältebelastung des Körpers. Dadurch wird eine Schicht ruhender Luft zwischen dem Körper und der kälteren Umgebung aufrechterhalten, um die Wärmeverluste zu reduzieren. Allerdings leistet diese Reaktion beim Menschen nur einen unbedeutenden Beitrag zur Thermoregulation, da der Mensch relativ wenig Haare am Körper hat und die meiste Zeit bekleidet ist. (Parsons, 2014) Deswegen kann diese Reaktion für das weitere Vorgehen vernachlässigt werden. Zusätzlich hierzu kann die Muskelaktivität unwillkürlich gesteigert werden. Dadurch entsteht das rhythmische Muskelzittern, wodurch die Wärmeproduktion im Vergleich zum Grundumsatz um das Drei- bis Fünffache gesteigert werden kann. Die zitterfreie Wärmethermogenese tritt lediglich bei Neugeborenen auf, da bei diesen die autonomen thermoregulatorischen Mechanismen nicht ausreichend wirksam sind. (Persson, 2019) Da es sich hierbei um einen Sonderfall handelt, wird die zitterfreie Thermogenese nicht weiter berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob es einen konkreten Schwellenwert für jeden der beschriebenen Effektoren gibt und wie sich Veränderungen sowohl an der Oberfläche als auch im Körperkern auf diese Effektoren auswirken. (Taylor & Gordon, 2019)

Romanovsky (2014) belegt, dass es sich bei der Hauttemperatur nicht um eine Repräsentation der Umgebungstemperatur handelt, sondern dass es eine Körpertemperatur ist und als solche wird sie für Rückkopplungssignale verwendet, die die autonomen Effektoren antreibt und somit das thermoregulatorische Verhalten steuert und der thermischen Empfindung dient. Damit kann ebenfalls belegt werden, dass die Hauttemperatur nicht als *Feedforward*-Signal für die Thermoregulation dient. Das bedeutet, dass die Hauttemperatur nicht als alleiniger Aktivator der Temperaturregulierung betrachtet werden kann. Das erscheint sinnvoll, da die Haut des Menschen die meiste Zeit von Kleidung bedeckt ist

und nicht direkt der Umgebungstemperatur ausgesetzt ist. Der Unterschied zwischen *Feedforward* und *Feedback*-Signal kann vereinfacht an dem Beispiel einer Gebäudeheizung erklärt werden. Angenommen, in einer kalten Nacht fällt die Außentemperatur; das führt dazu, dass sich die Innentemperatur unterhalb des Schwellenwerts des Thermostats absenkt, was schließlich dazu führt, dass geheizt wird. Dabei handelt es sich um ein *Feedback*-Signal. Beim *Feedforward*-Signal wird die Außentemperatur gemessen; fällt diese, wird die Heizung im Inneren angeschaltet, bevor die Temperatur im Innenraum sich verändert. Für die Temperaturregulierung im Körper bedeutet das, dass die Hauttemperatur als *Feedback*-Signal ein wichtiger Indikator ist; jedoch muss sie erst im Zusammenhang mit anderen Größen im Hypothalamus bewertet werden, bevor der Körper reagiert.

Es herrscht weitgehend Einigkeit, dass die Körperkerntemperatur die primäre Kontrollvariable der Thermoregulation ist. Als solche handelt es sich dabei genau wie bei der Hauttemperatur um ein *Feedback*-Signal. Die Körperkerntemperatur ist vergleichsweise höher als die Hauttemperatur und daneben auch deutlich konstanter. Die Hauttemperatur variiert im Verlauf eines Tages stärker. Da es sich sowohl bei der Körperkerntemperatur als auch bei der Hauttemperatur um *Feedback*-Signale handelt, kann angenommen werden, dass die Regelgröße in der menschlichen Temperaturregulierung nicht eine einzelne Größe ist, sondern es sich dabei um ein integratives räumliches Temperatursignal handelt, das sowohl die Körperkerntemperatur, als auch die Schalentemperatur umfasst. Die unterschiedlichen Effektoren werden dementsprechend stets aus einer Kombination der Haut- und Körperkerntemperatur ausgelöst. Auch wenn die Hauttemperatur nicht als alleiniger Repräsentant der Umgebungstemperatur angesehen werden darf, so reagiert diese trotzdem schneller auf Veränderungen in der thermischen Umgebung als die Körperkerntemperatur. (Romanovsky, 2014) Basierend auf ähnlichen Überlegungen hat Werner (2010) den aus der Regelungstechnik bekannten Begriff der Hilfsrückkopplungsregelung eingeführt. Das bedeutet, dass der Regelkreis samt Rückkopplung durch eine zweite Rückkopplung unter Verwendung einer Hilfsgröße erweitert wird. Bestenfalls reagiert die Hilfsgröße schneller auf Veränderungen als die Hauptgröße. Wird dieses Konzept auf die Thermoregulation des Menschen angewandt, dann setzt sich das Rückkopplungssignal zusammen aus der stark gewichteten Körperkerntemperatur und der weniger stark gewichteten Hauttemperatur. Damit ist die Körperkerntemperatur die Hauptregelgröße und die Hauttemperatur die Hilfsgröße.

Aufgrund der Neurologie des Menschen ist gewusst, dass jedes Effektor-Signal auf unterschiedlichen neuronalen Bahnen verläuft, wodurch erklärt werden kann, warum jeder Effektor von einer unterschiedlichen Kombination aus Haut- und Körperkerntemperatur ausgelöst wird (Romanovsky, 2018). Wird die Stabilität des internen Milieus gestört, dann werden die Effektoren aktiviert, um den Normalzustand wiederherzustellen. Dabei versucht die Thermoregulation die Körpertemperaturen zwischen bestimmten oberen und unteren Grenzwerten zu halten, welche die physiologische Funktion optimieren. Beim Über- oder Unterschreiten dieser kritischen Schwellenwerttemperaturen werden die Effektoren zur entsprechenden Gegenwirkung aktiv. (Stolwijk & Hardy, 2011 aus Taylor et al., 2019) Es gibt mittlerweile überzeugende Forschungsbelege dafür, dass die Effektoren nicht bei konkreten Grenzwerten (*Set-Points*) ausgelöst werden (Werner, 1984; Romanovsky, 2007), sondern dass die menschliche Thermoregulation sich am besten mit einer Serie an thermoregulatorischen Zonen beschreiben lässt (Mekjavic & Eiken, 2006). Die Grenzen dieser Zonen werden jeweils von den unteren

und oberen kritischen Temperaturen der Effektor-Aktivierung gesetzt. Taylor et al. (2019) haben experimentell untersucht, ob es sich bei den Grenzen der Zonen um feste Temperaturwerte handelt oder ob diese voneinander abhängig sind. Sie kamen zu dem Schluss, dass es sich bei den kritischen mittleren Körpertemperaturen nicht um fixierte oder einheitliche Werte handelt, sondern dass diese individuelle und unabhängige Schwellenwerte darstellen.

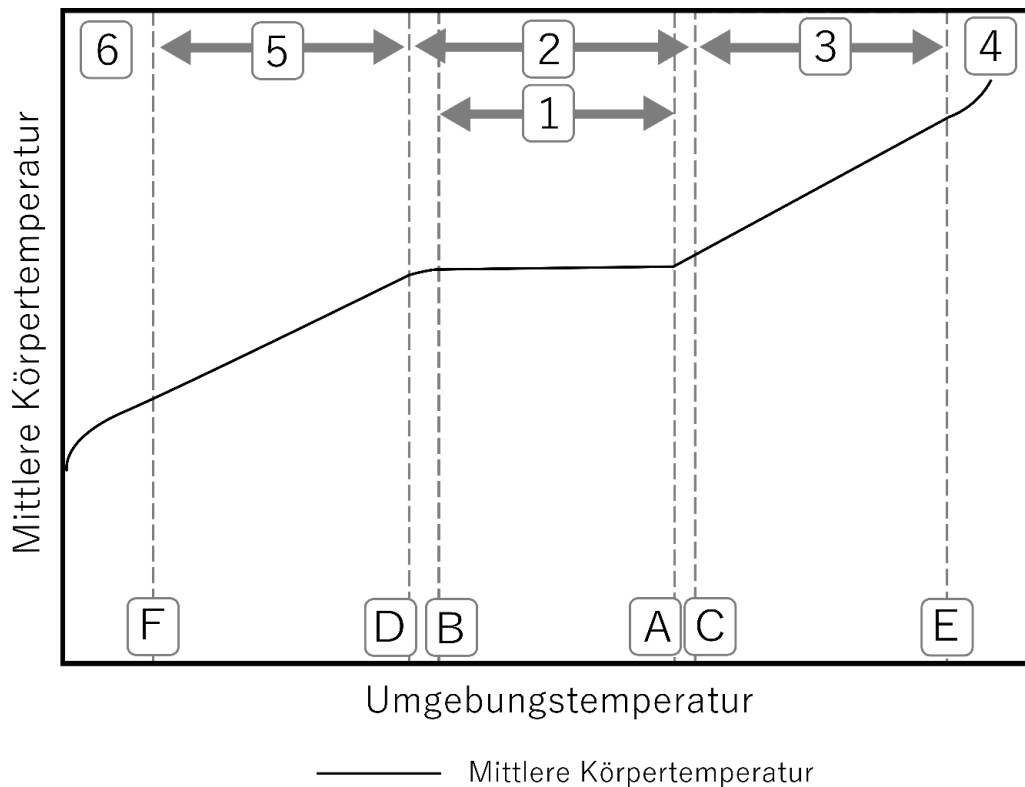


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen der Aktivität der Thermoeffektoren, der mittleren Körpertemperatur und der Umgebungstemperatur (Taylor & Gordon, 2019 adaptiert nach Werner, Mekjavic & Taylor, 2008)

Die thermoneutrale vasomotorische Zone liegt innerhalb der (1) und wird noch oben sowie nach unten hin durch die Grenzen für die Aktivierung der Vasodilatation (A) und der Vasokonstriktion (B) begrenzt. Entscheidend für die obere kritische und die untere kritische Grenze der Vasomotorik ist die mittlere Körpertemperatur. Die Zone (2) liegt innerhalb der Schwellenwerte für die Aktivierung des Schwitzens (C) und der Aktivierung des Zitterns (D). Wird die obere oder die untere kritische Temperatur überschritten oder unterschritten, bedeutet dies den Eintritt in die Bereiche der sudomotorischen (3) und der thermogenesen (5) Temperaturregulation. Schlussendlich beschreiben die Grenzen (E) und (F) die Schwellenwerte der maximalen Wärmeabführung durch Schwitzen und der maximalen Wärmeproduktion durch Zittern. Jenseits dieser Schwellenwerte liegen die Zonen (4) und (6) in denen die Thermoregulation des Menschen versagt. (Taylor & Gordon, 2019) Somit lassen sich vier thermoregulatorische Zonen unterscheiden: die Zone der Vasomotorik, innerhalb derer die thermoneutrale vasomotorische Zone liegt, die sudomotorische und die thermogenese Zone (Werner, Mekjavic & Taylor, 2008).

Anzustreben ist demnach ein Zustand der Umgebungsbedingungen, bei denen sich der Mensch innerhalb der thermisch neutralen Zone (TNZ) befindet. Je weiter er sich von diesem Bereich entfernt, desto größer

werden die Auswirkungen, die die thermischen Elementarströme auf den Menschen haben. Die thermisch neutrale Zone wird definiert als ein Bereich der Umgebungstemperatur, in dem die Temperaturregulierung ausschließlich über die sensiblen Wärmeverluste (Wärmeleitung bis zur Körperschale, Konvektion und Strahlung) stattfindet. In diesem Zustand gibt es keine regulatorischen Änderungen der Wärmeproduktion oder Verdunstungswärmeverluste. Weiter heißt es in der Definition, dass diese Zone ganz klar von der Thermoeffektorschwellenzone unterschieden werden muss. Letztere wird definiert als der Temperaturbereich, der zwischen zwei Schwellen-Körpertemperaturen liegt und für die Aktivierung beliebiger Effektor-Reaktionen verantwortlich ist (Zone 2). (IUPS, 2001) Kingma et al. (2014) kritisieren, dass die traditionelle Definition der thermoneutralen Zone in Abhängigkeit von einer sich veränderten Hauttemperatur zu Zuständen führen kann, die nicht als thermisch neutral bewertet werden können. Somit soll die thermisch neutrale Zone nicht nur in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur definiert werden, sondern es muss die Kombination aus Umgebungs-, Haut- und Körpertemperatur, die lediglich zu sensiblen Wärmeverlusten führt, betrachtet werden.

Tabelle 4: Klinisch relevante Körperkern- und Hauttemperaturen (Taylor, Kondo & Kenney, 2008; Taylor, Mekjavic & Tipton, 2008)

Körperkerntemperatur [°C]		Hauttemperatur [°C]	
> 45.0	Möglicher Tod (ohne Behandlung)	> 50.0	Verbrennung zweiten Grades
> 40.5	Klinische Hyperthermie (Hitzeschlag)	> 45.0	Gewebeschädigung
> 39.5	Schwere Hyperthermie	41.0 – 43.0	Brennender Schmerz
38.5 – 39.5	Moderate Hyperthermie (Hitzeerschöpfung)	39.0 – 41.0	Schmerz
37.2 – 38.5	Milde Hyperthermie	33.0 – 39.0	Hauterwärmung bis zum Dis-Komfort
36.5 – 37.0	Normothermie	28.0 – 33.0	Thermischer Komfort
36.0 – 33.0	Milde Hypothermie	25.0 – 28.0	Kälte bis zum Dis-Komfort
33.0 – 25.0	Moderate Hypothermie	20.0	Eingeschränkte Beweglichkeit
< 25.0	Schwere Hypothermie	15.0	Schmerz
< 24.0	Schwere klinische Hypothermie	10.0	Verlust der Hautwahrnehmung
< 22.0	Möglicher Tod	5.0	Kälteschäden
		< 0.55	Frostbeulen /Erfrierung

Die Angaben in der obenstehenden Tabelle überschneiden sich mit Campbell (2008). Hier wird ebenfalls eine Körperkerntemperatur (bezogen auf die Hypothalamus-Temperatur) von 36.5 °C bis 37.0 °C als die thermisch neutrale Zone bezeichnet. Der Schwellenwert für die Aktivierung der Vasokonstriktion liegt demnach bei 36.5 °C; eine weitere Abkühlung auf 36.0 °C löst das Muskelzittern aus. Der Schwellenwert für die Vasodilatation liegt bei 37.0 °C, mit einem anschließenden Einsetzen von Schwitzen. Nach Taylor, Kondo und Kenney (2008) setzt eine milde Hyperthermie bei 37.2 °C ein; somit kann dieser Wert als der Schwellenwert für das Schwitzen angesehen werden. Aus diesen Angaben können die Schwellenwerte für die thermisch neutrale Zone und die Schwellenwert-Zone für die Effektorreaktionen in Bezug auf die Körperkerntemperatur gezogen werden.

Für eine thermisch neutrale Hauttemperatur werden in der Literatur jedoch stark unterschiedliche Angaben gemacht. Der Bereich aus Tabelle 4 von 28.0 °C bis 33.0 °C ist vergleichsweise sehr weit gefasst. Hardy (1970) gibt für die Körperkerntemperatur einen Bereich von 36.6 °C bis 37.1 °C an, während er für die mittlere Hauttemperatur einen Bereich von 33.0 °C bis 34.5 °C für Männer und 32.5 °C bis 35.0 °C für Frauen als komfortabel erklärt. Weiwei, Lian und Deng (2015) kamen zu dem Schluss, dass für den thermischen Komfort eine mittlere Hauttemperatur in einem Bereich zwischen 32.6 °C bis 33.7 °C benötigt wird, während Gagge, Stolwijk und Hardy (1967) einen deutlich weiteren Bereich für die mittlere Hauttemperatur von 31.5 °C bis 35.5 °C als thermisch komfortabel definieren. Fanger (1970) hat sich darauf festgelegt, dass es einen Zusammenhang zwischen der metabolischen Rate (M) und der thermisch komfortablen Hauttemperatur geben muss. Je größer die Anstrengung, desto niedriger kann die Hauttemperatur sein, um dennoch als thermisch neutral bewertet zu werden.

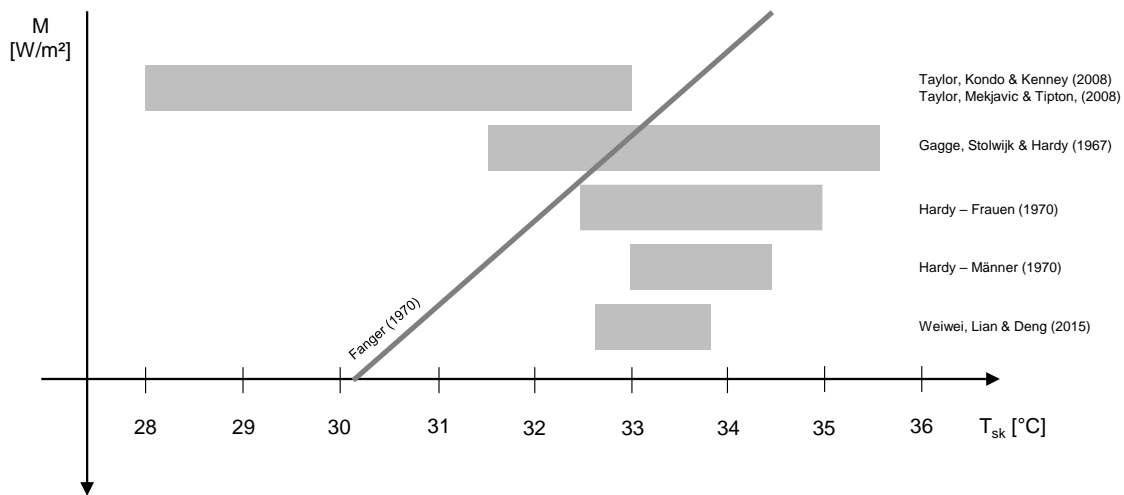


Abbildung 24: Vergleich der thermisch neutralen Hauttemperaturbereiche

Aus Abbildung 24 wird ersichtlich, dass sehr unterschiedliche Temperaturbereiche in der Literatur als thermisch komfortabel beschrieben werden. Der Zusammenhang mit der metabolischen Rate gilt lediglich für die nach Fanger (1970) beschriebene komfortable Hauttemperatur. Die anderen Hauttemperaturbereiche in Abbildung 24 stehen in keinem Zusammenhang mit der y-Achse. Es gibt keine Schnittmenge zwischen den abgebildeten Temperaturbereichen. Jedoch ist erkennbar, dass der Bereich um die 33.0 °C von den meisten Autoren als thermisch neutrale Hauttemperatur beschrieben wurde. Dagegen wird der Bereich unterhalb von 30.0 °C nur von einem Autor als thermisch behaglich definiert, wobei Fanger (1970) diesen unteren Bereich nur bei sehr hohen metabolischen Raten ($> 150 \text{ W/m}^2$) als thermisch neutral definiert. Es ist anzumerken, dass die gegebenen Studien die Begriffe thermisch neutral und thermisch komfortabel als Synonyme verwenden. Aus diesen Angaben kann somit keine allgemeingültige thermisch neutrale Hauttemperatur definiert werden.

Da die Körperkerntemperatur weniger Schwankungen unterliegt, in einem kleineren Bereich als thermisch neutral beschrieben wird und in der vorhandenen Literatur weitestgehend Einigung herrscht, wird eine thermisch neutrale Körperkerntemperatur als Ausgangspunkt zur Bewertung der thermischen

Auswirkungen von Gebäuden verwendet. Um die Hauttemperatur dennoch ebenfalls bestimmen zu können, wird hierzu ermittelt, in welchem Bereich die Hauttemperatur liegen muss, damit die thermisch neutrale Körperkerntemperatur aufrechterhalten werden kann. Hierfür muss der thermische Widerstand zwischen dem Körperkern und der Hautoberfläche bekannt sein. Dieser ändert sich in Abhängigkeit von der subkutanen Fettschicht, der metabolischen Rate und dem Durchblutungsfluss. Je größer der Durchblutungsfluss, desto kleiner wird der thermische Widerstand und umgekehrt. Somit verkleinert sich der thermische Widerstand (I_{min}) des Körpers, je näher die Körperkerntemperatur an der Schwelle zum Schwitzen liegt, während er an der Schwelle zum Zittern (I_{max}) am größten ist. Die Gesamtisolierung des Körpers setzt sich zusammen aus einem aktiven und einem passiven Part. Der aktive Part wird durch die sich verändernde Durchblutungsrate bestimmt, der passive Part bezieht sich dagegen auf die Gewebeisolierung, die sich aus der Isolierung der Muskeln sowie der subkutanen Fett- und darüberliegenden Hautschicht zusammensetzt. (Kingma et al., 2014)

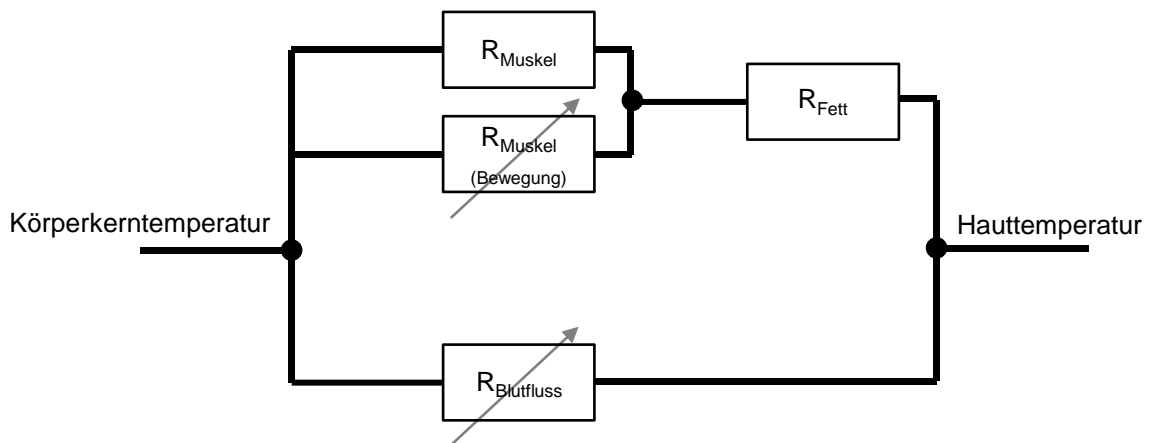


Abbildung 25: Schematische Darstellung der Widerstände zwischen dem Körperkern und der Oberfläche der Haut (Davoodi et al., 2018; Havenith, 2001)

Im Zustand der maximalen Vasokonstriktion wird die Isolierung durch den passiven Part erbracht. Im Zustand der maximalen Vasodilatation wird die Gewebeisolierung dagegen umgangen, wodurch sich die Isolierung deutlich reduziert. In dem Bereich zwischen der maximalen und der minimalen Körperisolierung kann die Isolierung als lineare Funktion der Hauttemperatur berechnet werden. Für eine Person mit einer subkutanen Fettschichtdicke von 4 mm soll sich nach Kingma et al. (2014), mit Bezug auf Veicsteinas, Ferretti und Rennie (1982) ein Wert für I_{max} von $0.124 \text{ m}^2\text{K/W}$ und für I_{min} $0.031 \text{ m}^2\text{K/W}$ (Burton & Edholm, 1950) ergeben. Da hierbei entscheidende Informationen für die Berücksichtigung der individuellen Person fehlen, wird empfohlen, für die Anwendung der raumphysiologischen Bilanz auf die detaillierte Berechnung nach Havenith (2001) und Davoodi et al. (2018) zurückzugreifen.

$$R_{Muskel} = \frac{0.05}{1 + \left(\frac{M - 65}{130}\right)} \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (1)$$

$$R_{Fett+Haut} = 0.0048 * (SFT - 2) + 0.0044 \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (2)$$

$$R_{Blutfluss} = \frac{1}{\eta C_{p,bl} SkBF} \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (3)$$

In der Berechnung beschreibt R den thermischen Widerstand [m^2K/W], M die metabolische Rate [W/m^2] und SFT die subkutane Fettschichtdicke [mm]. Die Bestimmung der Dicke der subkutanen Fettschicht kann entweder messtechnisch mit einer Reihe von Messungen der Hautfaltendicke bestimmt werden (Wölki, 2017) oder rechnerisch aus einem linearen Zusammenhang mit dem *Body Mass Index* (BMI) der betrachteten Person berechnet werden. Nadeem, Bacha und Gilani (2018) konnten anhand ihrer Studie einen linearen Zusammenhang zwischen dem BMI und der Dicke der subkutanen Fettschicht nachweisen. So kann die Dicke der subkutanen Fettschicht bestimmt werden, wenn der BMI der betrachteten Person bekannt ist. Dieser lässt sich aus dem Gewicht [kg] und der Größe [m] berechnen.

$$BMI = \frac{GE}{GR^2} [-] \quad (4)$$

$$SFT = \frac{BMI - 16.99}{0.39} [mm] \quad (5)$$

Zur Berechnung des thermischen Widerstands des Blutflusses wird die Durchblutungsrate nach Gagge, Stolwijk und Nishi (1971) bestimmt. Daneben wird die spezifische Wärmekapazität von Blut $C_{p,bl}$ [J/kgK] und die Effizienz des Gegenstrom-Wärmeaustauschs η [-] benötigt. (Havenith, 2001) Bei der spezifischen Wärmekapazität des Blutes handelt es sich um einen konstanten Wert. Dieser wird in der Literatur mit unterschiedlichen Werten zwischen 3617 J/kgK und 4180 J/kgK angegeben. Somit wird die Annahme sämtlicher in der Literatur beschriebener Werte, als richtig erachtet und es wird dem Ersteller der raumphysiologischen Bilanz überlassen, für welchen Wert er sich schlussendlich entscheidet. Die Effizienz des Gegenstrom-Wärmeaustauschs wurde in früheren Berechnungen des Zwei-Knoten-Modells nicht berücksichtigt und erst später von Lotens (1993) eingeführt (Havenith, 2001). Der Gegenstrom-Wärmeaustausch bezieht sich auf den Wärmeaustausch zwischen Arterien und Venen. Dieser führt dazu, dass der arterielle Blutfluss abkühlt, während der venöse Blutfluss zeitgleich aufgewärmt wird. Dieser Wärmeaustausch kann sich auf die Isolierung der Extremitäten des Menschen auswirken. (Aschoff, 1957) Die Effizienz ist allerdings sehr gering und ergibt sich aufgrund der Durchblutungsrate und somit ebenfalls

aus der Hauttemperatur. Die Effizienz des Gegenstrom-Wärmeaustauschs liegt bei maximal 15 % bei einer Hauttemperatur von etwas unter 18 °C. Im Bereich von 25 °C bis 40 °C Hauttemperatur nimmt die Effizienz stetig ab und liegt zwischen etwa 8 % bis 2 %. (Raman, 1992) Damit sind die Grundlagen bekannt, um ausgehend von den gegebenen Grenzen der Körperkerntemperatur die dazugehörige Hauttemperatur zu bestimmen.

5.2.1.2 Numerische Wärmebilanz des Körpers

Die Wärmeproduktion im Körper wird durch die metabolische Rate bestimmt. Diese setzt sich zusammen aus dem Ruheumsatz und dem Aktivitätsumsatz und ist ein Indikator dafür, wie anstrengend eine bestimmte Aktivität ist (vgl. 58 W/m² im Sitzen ruhen, 400 W/m² Leistungssport). Je höher der Energieumsatz, beschrieben durch die metabolische Rate ist, desto mehr Wärme wird im Körper produziert. Diese gebildete Wärme muss im Körper verteilt und anschließend an die Umgebung abgegeben werden. Die Wärmeabgabe an die Umgebung erfolgt durch Konvektion, Strahlung und die Verdunstung von evaporativen Wärmeverlusten. Bei üblichen Raumtemperaturen erfolgt die Wärmeabgabe hauptsächlich über Strahlung. Ab circa 30 °C Raumtemperatur beginnt der Mensch zu schwitzen und die Verdunstung von Schweiß stellt die größte Wärmeabgabe dar. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sowohl Konvektion als auch Strahlung ein Temperaturgefälle zwischen der Hautoberfläche und der Umgebung voraussetzen. Liegt die Umgebungstemperatur oberhalb der Hauttemperatur, muss die produzierte Wärme mithilfe von evaporativen Wärmeverlusten abgegeben werden. (Persson, 2019)

Die *American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* ASHRAE (2017) beschreibt die Wärmebilanz des menschlichen Körpers mit der folgenden Gleichung. Dabei wird die interne Wärmeproduktion abzüglich externer Arbeit gleichgesetzt mit den Wärmeverlusten über die Haut und den Wärmeverlusten über die Atmung zuzüglich oder abzüglich der Wärme-Differenz, die für einen Anstieg oder Abfall der Temperatur im Körper sorgt.

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + S \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (6)$$

Der Körper steht mit seiner Umgebung in einem ständigen Wärmeaustausch. Dieser Wärmeaustausch setzt sich zusammen aus dem trockenen Wärmestrom der Haut (C + R), dem latenten Wärmestrom E_{sk}, der sich zusammensetzt aus der Schweißverdunstung E_{rsw} und der Verdunstung der Feuchtigkeit, die durch die Haut diffundiert E_{diff}. Zu diesen Wärmeströmen addieren sich die Wärmeströme, die über die Atmung abgegeben werden. Hierbei wird ebenfalls zwischen dem sensiblen Wärmestrom C_{res} und dem latenten Wärmestrom bei der Verdunstung der ausgeatmeten feuchten Luft E_{res} unterschieden. Sämtliche Wärmeströme, die von der Haut ausgehen, werden von der Bekleidung maßgeblich beeinflusst. Die sensiblen Wärmeströme, die sich aus einer komplexen Mischung aus Konduktion, Konvektion und Strahlung zusammensetzen, sind gleichzusetzen mit der Summe der Wärmeübertragung, die an der Außenfläche des bekleideten Körpers durch Strahlung und durch Konvektion stattfindet. In Abbildung 26 ist der Wärmeaustausch des bekleideten Körpers mit der Umgebung dargestellt. Die relevanten

Elementarströme, die diesen Austausch beeinflussen, sind die Lufttemperatur T_a , die mittlere Strahlungstemperatur T_r , die mittlere Luftgeschwindigkeit v_a und der partielle Wasserdampfdruck P_a ; dieser ergibt sich aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte. Des Weiteren wird die Barriere zwischen dem Menschen und der Umgebung berücksichtigt; dabei handelt es sich um die Bekleidung, die sowohl einen Einfluss auf die sensiblen (R_{cl}) als auch auf die latenten ($R_{e,cl}$) Wärmeverluste hat. Als letzter Parameter wird die Wärmeproduktion im menschlichen Körper berücksichtigt. Diese wird durch die Anstrengung, die durch die jeweilige Aktivität hervorgerufen wird, bestimmt. (ASHRAE, 2017)

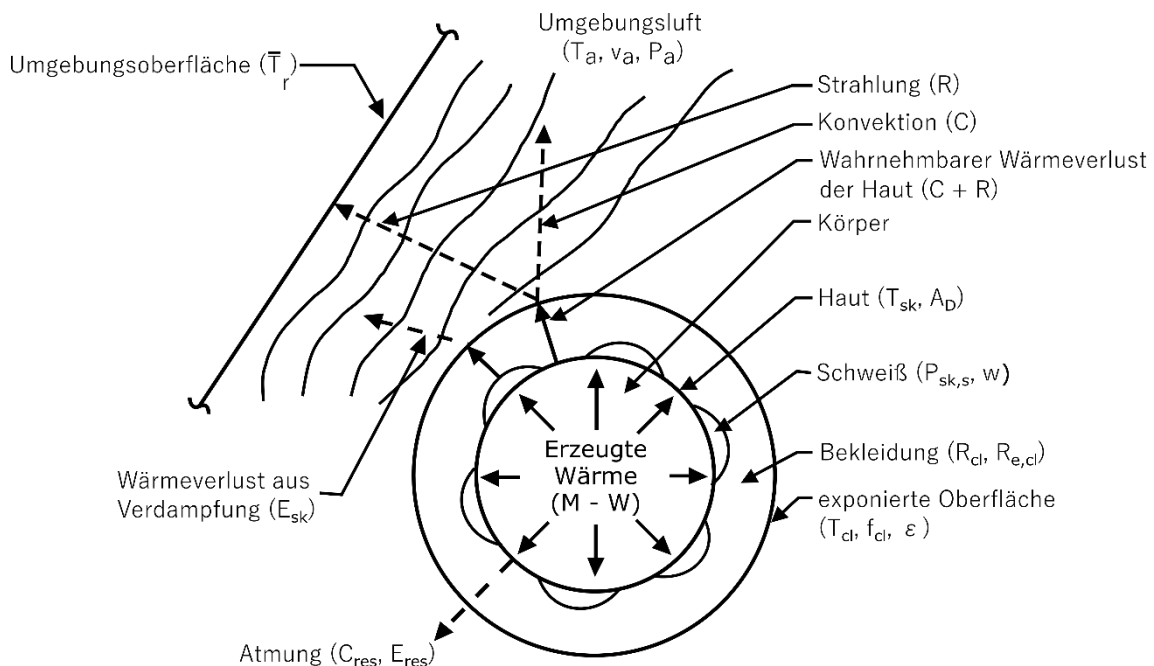


Abbildung 26: Thermische Wechselwirkungen zwischen dem Körper und der Umgebung (ASHRAE, 2017)

Sämtliche Wärmeströme beziehen sich auf die Oberfläche A_D . Die Berechnung erfolgt nach DuBois und DuBois (1915) und berücksichtigt sowohl die Körpergröße GR [m] und das Körpergewicht GE [kg].

$$A_D = 0.202 * GE^{0.425} * GR^{0.725} [m^2] \quad (7)$$

Als Standardgröße für die Körperoberfläche wird ein Wert von 1.8 m^2 angesetzt. Die Spanne, innerhalb der die Dubois-Oberfläche variieren kann, liegt zwischen 0.8 m^2 bei Kindern und 2.4 m^2 bei sehr kräftigen Erwachsenen. (Arens & Zhang, 2006)

5.2.1.2.1 Wärmeproduktion im Körper

Die Wärmeproduktion im Körper steht in direktem Zusammenhang mit der Aktivität der Person. Je anstrengender eine Aktivität ist, desto mehr Sauerstoff wird eingeatmet und über das Blut bis in die Zellen verteilt. Hier wird dieser Sauerstoff dazu genutzt, die aufgenommene Nahrung zu verbrennen. Dabei wird der Großteil der Energie als Wärme (M) freigesetzt. Für die meisten Aktivitäten, insbesondere in Innenräumen, ist die externe mechanische Leistung (W) ungefähr null und kann dementsprechend bei der

Berechnung vernachlässigt werden. (Parsons, 2014) Die DIN EN ISO 8996 (2005) gibt für eine Reihe von Standardaktivitäten die Werte, die für den Energieverbrauch anzusetzen sind, vor. Hierbei handelt es sich jedoch lediglich um Durchschnittswerte. Damit die Bilanzierung auf den individuellen Menschen abgestimmt wird und nicht nur auf Standardwerten basiert, empfiehlt es sich, die metabolische Rate und damit der genaue Energieverbrauch anhand der Herzfrequenz, beispielsweise durch die Nutzung einer Smart-Watch, zu bestimmen (Binsfeld, 2018).

5.2.1.2.2 Sensibler Wärmeverlust über die Haut

Die sensiblen Wärmeverluste über die Haut werden durch die Bekleidungsschicht geleitet und von der Oberfläche der Bekleidung durch Strahlung und Konvektion mit der Umgebung ausgetauscht. Entsprechend dieser Reihenfolge werden diese Wärmeübergänge in Reihe geschaltet. Der Wärmefluss verläuft von der Hautoberfläche durch die Bekleidung an die Oberfläche dieser. Dazu kommt der abschließend stattfindende Wärmetransport von der Oberfläche der Bekleidung in die Umgebung. Sowohl der konvektive Wärmeaustausch als auch der Strahlungswärmeaustausch mit der Umgebung kann durch den entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten und die Temperaturdifferenz zwischen der Oberflächentemperatur des bekleideten Körpers und der Umgebungstemperatur bestimmt werden. (ASHRAE, 2017)

$$C = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (8)$$

$$R = f_{cl} h_r (T_{cl} - \bar{T}_r) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (9)$$

$$C + R = f_{cl} h (T_{cl} - T_o) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (10)$$

Zur Berechnung der Summe der sensiblen Wärmeverluste wird somit der Bekleidungsflächenfaktor f_{cl} , der konvektive- h_c und Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient h_r , die Temperatur der Oberfläche der Bekleidung T_{cl} und die operative Temperatur T_o benötigt. Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten werden in Innenräumen hauptsächlich durch die Luftbewegung bestimmt. Bei einer Aktivität, die sehr viel Bewegung erfordert, kann zusätzlich diese Körperbewegung den konvektiven Wärmeübergang beeinflussen. In Bezug auf die Wärmeübergangskoeffizienten gibt es unterschiedliche Berechnungsformeln, die in der Literatur verwendet werden (Fanger, 1970; Winslow, Gagge & Herrington, 1939, Oguro et al., 2002, Dear et al., 1997). Sämtliche Formeln, die präsentiert werden, beziehen sich auf den nackten Körper (Wissler, 2018); lediglich Oguro et al. (2002) bestimmen den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ebenfalls für einen bekleideten beheizten Manekin. Für die konkrete Anwendung in Innenräumen sind die wichtigsten Unterscheidungsfaktoren, die einen Einfluss auf den konvektiven Wärmeübergang haben, die Luftgeschwindigkeit und die Position (sitzen oder stehen). In den

meisten Innenräumen liegt eine vergleichsweise geringe Luftgeschwindigkeit vor, so dass es sich hier um eine freie Konvektion handelt. Bei einer höheren Luftgeschwindigkeit ist dagegen die Rede von der erzwungenen Konvektion.

Oliveira, Gaspar und Quintela (2006) kamen zu dem Schluss, dass die Bekleidung den konvektiven Wärmeübergang nicht wesentlich beeinflusst. Dementsprechend reicht für die Anwendung der entsprechenden Berechnungsformeln die Berücksichtigung der größeren Oberfläche des bekleideten Körpers. Dabei bestimmt die Dicke der Bekleidungsschicht, um wie viel die Oberfläche des Körpers vergrößert wird. Um das Größenverhältnis zwischen unbekleidetem und bekleidetem Körper abschätzen zu können, wurde der Bekleidungsflächenfaktor f_{cl} eingeführt. (Parsons, 2014) Dabei handelt es sich um eine Vereinfachung, die das Größenverhältnis anhand der Bekleidungsisolierung I_{cl} [clo] abschätzt; damit kann auf die Durchführung von Ganzkörperscans oder photographischen Verfahren verzichtet werden. (DIN EN ISO 9920, 2009)

$$f_{cl} = 1.00 + 0.28 I_{cl} [-] \quad (11)$$

Neben dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wird der Wärmeübergangskoeffizient für den Strahlungsaustausch zwischen dem Körper und der Umgebung benötigt. Dieser kann wie folgt berechnet werden. (Parsons, 2014)

$$h_r = 4\varepsilon\sigma \frac{A_r}{A_D} \left[273.2 + \frac{T_{cl} + \bar{T}_r}{2} \right]^3 \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (12)$$

In Abhängigkeit von der Position des menschlichen Körpers verändert sich die effektive Strahlungsfläche, die mit der Umgebung im Wärmeaustausch steht. Zusätzlich wird die Größe der effektiven Strahlungsfläche dadurch verändert, dass der menschliche Körper nicht an jeder Stelle konvex ist und dadurch eine Strahlungswechselwirkung zwischen den einzelnen Körperteilen entstehen kann. (Fanger, 1970) Dieser Anteil kann vereinfacht angenommen werden mit 0.67 bei einer hockenden, 0.70 bei einer sitzenden und 0.77 bei einer stehenden Person. (DIN EN ISO 7933, 2018; Fanger, 1967) Die mittlere Emissivität der Bekleidungs- und Körperoberfläche ergibt sich aus der Emissivität der nackten Haut, die bei 1.0 liegt und der Emissivität der Bekleidung, die für die meisten Bekleidungskombinationen bei 0.95 liegt. Daraus ergibt sich ein mittlerer Wert von 0.97. (Fanger, 1970) Somit kann der Wärmeübergangskoeffizient bei üblichen Innenraumbedingungen mit einem Wert von 4.7 W/m²K angesetzt werden. (ASHRAE, 2017)

Der gesamte Wärmeübergangskoeffizient, der in der Berechnung der sensiblen Wärmeverluste über die Haut benötigt wird, ergibt sich aus der Summe der beiden erläuterten Wärmeübergangskoeffizienten. Anschließend wird für die Berechnung die operative Temperatur T_o benötigt. Diese errechnet sich aus der Lufttemperatur, der Strahlungstemperatur und den beiden Wärmeübergangskoeffizienten. (Parsons, 2014)

$$T_o = \frac{T_a * h_c + \bar{T}_r * h_r}{h_c + h_r} [^{\circ}C] \quad (13)$$

Als letzte Komponente bleibt die Bekleidungsoberflächentemperatur. Diese kann, wie bereits beschrieben, nicht ohne erheblichen Aufwand experimentell ermittelt werden. Der Wärmeverlust von der Oberfläche der Bekleidung ist gleichzusetzen mit dem Wärmefluss, der von der Hautoberfläche bis zur Oberfläche der Bekleidung stattfindet. Dieser Wärmestrom kann aus der Temperaturdifferenz der beiden Oberflächentemperaturen und dem Wärmewiderstand I_{cl} , der sich dazwischen befindet, berechnet werden. Dieser Wärmewiderstand ergibt sich aus der Dämmwirkung der Bekleidung. Dabei wird der sensible Wärmefluss durch einen einzelnen Wärmewiderstand beschrieben, der sowohl Leitung, Strahlung als auch Konvektion berücksichtigt. (Parsons, 2014)

$$f_{cl} h (T_{cl} - T_o) = \frac{(T_{sk} - T_{cl})}{I_{cl}} \quad (14)$$

Der Wärmewiderstand der Bekleidung wird in der Einheit m^2K/W ausgedrückt und kann vereinfachend mit einem Wert von 0.5 clo für eine Sommerbekleidung und 1.0 clo für eine Winterbekleidung angesetzt werden, entsprechend der nach Gagge, Burton und Bazett (1941) eingeführten clothing-Einheit (1 clo = 0.155 m^2K/W). Für eine detailliertere Bestimmung empfiehlt es sich, den Widerstandswert jedes einzelnen Kleidungsstückes zu ermitteln und anhand dessen für jede beliebige Bekleidungskombination den tatsächlichen clo-Wert zu bestimmen. Entsprechende Werte sind der DIN EN ISO 9920 (2009) zu entnehmen.

5.2.1.2.3 Verdunstungswärmeverlust über die Haut

Der Verdunstungswärmeverlust über die Haut ist abhängig von dem Feuchtigkeitsgehalt auf der Hautoberfläche und der Differenz zwischen dem Wasserdampfpartialdruck der Haut und dem der Umgebungsluft.

$$E_{sk} = \frac{w (P_{sk,s} - P_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl} h_e}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (15)$$

Der Bekleidungsflächenfaktor ist bereits aus der vorherigen Gleichung bekannt. Sämtliche weiteren Berechnungsgrößen gilt es für die jeweilige Innenraumbetrachtung zu bestimmen. Der evaporative Wärmeübergangswiderstand kann aus der Lewis Zahl und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt werden. Die Lewis Zahl wird definiert als das Verhältnis des Massenübergangskoeffizienten durch Verdunstung zum Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion. Die Lewis Zahl wird weder durch die Größe oder die Form des Körpers noch durch die Luftgeschwindigkeit oder Temperatur verändert. Somit kann der Verdunstungswiderstand wie folgt berechnet werden. (Parsons, 2014)

$$h_e = LR * h_c = 16.5 h_c \left[\frac{W}{m^2 kPa} \right] \quad (16)$$

Der Verdunstungswärme­widerstand der Bekleidung $R_{e,cl}$ kann analog zum Widerstand gegenüber sensibler Wärme anhand der DIN EN ISO 9920 (2009) bestimmt werden. Neben der tabellarischen Bestimmung dieses Widerstandes besteht die Möglichkeit, den Widerstandwert, basierend auf der Bekleidungs­isolierung für den trockenen Wärmedurchgang und dem Permeabilitätsindex $i_{m,cl}$ zu berechnen. Der Permeabilitätsindex kann ebenfalls der DIN EN ISO 9920 (2009) entnommen werden. Für die meisten ein- und zweischichtigen Bekleidungskombinationen kann dieser Index mit dem Wert 0.34 angenommen werden. In der folgenden Gleichung ist die Bekleidungs­isolierung in der Einheit m^2K/W einzusetzen.

$$R_{e,cl} = 0.06 \frac{R_{cl}}{i_{m,cl}} \left[\frac{m^2 kPa}{W} \right] \quad (17)$$

Für die Berechnung der Wasserdampfdrücke wird die Antoine-Gleichung benötigt, angefangen mit dem Wasserdampfdruck der Luft. Hierfür wird zuerst der Sättigungsdampfdruck berechnet, um anschließend unter Beachtung der relativen Luftfeuchte RH den partialen Wasserdampfdruck im Raum zu bestimmen. (Parsons, 2014)

$$P_{a,s;sk,s} = 0.1 \exp \left(18.956 - \frac{4030}{T_{a;sk} + 235} \right) [kPa] \quad (18)$$

$$P_a = P_{a,s} * RH [kPa] \quad (19)$$

Für die Berechnung des Sättigungsdampfdrucks des Wassers auf der Haut wird entsprechend der Antoine-Gleichung die Hauttemperatur benötigt. Zudem kam Fanger (1970) zu dem Schluss, dass der Sättigungsdampfdruck für Hauttemperaturen zwischen 27 °C und 37 °C vereinfacht mit folgender Formel bestimmt werden kann.

$$P_{sk,s} = \frac{1.92 T_{sk} - 25.3}{7.5} [kPa] \quad (20)$$

Der Anteil der feuchten Haut kann zwischen 0.06, wenn lediglich natürliche Diffusion durch die Haut stattfindet und 1.0, bei vollständiger Bedeckung der Haut durch einen Schweißfilm, variieren. Dieser Anteil der Haut errechnet sich aus dem benötigten Verdunstungswärme­verlust E_{rsW} und dem maximalen Verdunstungswärme­verlust E_{max} . (Parsons, 2014)

$$w = 0.06 + 0.94 \frac{E_{rsw}}{E_{max}} [-] \quad (21)$$

Der maximale Verdunstungswärmeverlust kann berechnet werden, indem in Gleichung 15 zur Berechnung des gesamten Verdunstungswärmeverlusts (E_{sk}) der Anteil der feuchten Haut mit 1.0 angenommen wird. Der benötigte Verdunstungswärmeverlust muss dagegen unter Berücksichtigung der Verdampfungswärme von Wasser und der Schweißrate SR berechnet werden. Die Verdampfungswärme von Wasser h_{fg} kann mit einem konstanten Wert von 2430 kJ/kg angenommen werden. (Parsons, 2014) Für die Ermittlung der Schweißrate müssen die unter den gegebenen Bedingungen entstehende Haut- und Körperkerntemperatur berücksichtigt werden. (Stolwijk & Hardy, 1966)

$$E_{rsw} = h_{fg} * SR \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (22)$$

$$SR = 1.67 * 10^{-4} * 1000 * (0.014 + 0.231 (T_c - 37.18) + 0.052 (T_{sk} - 33)) \left[\frac{kg}{sm^2} \right] \quad (23)$$

Die nach Stolwijk und Hardy (1966) berechnete und nach Wissler (2018) beschriebene Schweißrate wird in kg/sm² ausgedrückt. Aus der Berechnungsformel wird ersichtlich, dass der Mensch auch ohne eine Überschreitung einer Körperkerntemperatur, hier dargestellt, mit der Rektaltemperatur von 37.18 °C oder einer Hauttemperatur von 33 °C eine geringe Schweißproduktion hat. Für die Berechnung der Schweißrate wurde sich für die hier angeschriebene Formel entschieden, da es sich hierbei um eine Summenformel handelt. Dabei wird die Schweißproduktion, die durch einen Anstieg entweder der Körperkerntemperatur oder der Hauttemperatur entsteht, gesondert betrachtet. Im Vergleich dazu existieren auch multiplikative Berechnungsformeln, bei denen allerdings davon ausgegangen werden kann, dass die Schweißproduktion unterschätzt wird. (Wissler, 2018)

5.2.1.2.4 Wärmeverluste über die Atmung

Während der Atmung verliert der Körper sowohl sensible als auch latente Wärme durch Konvektion und Verdunstung von Wärme und Wasserdampf durch den Atmungstrakt an die eingeatmete Luft. Dieser Wärmeaustausch ergibt sich daraus, dass die eingeatmete Luft den Umgebungsbedingungen entspricht, während die ausgeatmete Luft nahezu wassergesättigt ist und eine Temperatur hat, die fast der Körperkerntemperatur entspricht. Für die Berechnung der Atmungswärmeverluste sind die Lufttemperatur und der Wasserdampfpartialdruck dementsprechend entscheidende Größen. (ASHRAE, 2017) Zusätzlich hat die Lungenventilation, die sich aus einem direkten Zusammenhang zu der Anstrengung der jeweiligen Aktivität ergibt, einen wesentlichen Einfluss (Fanger, 1970). Je anstrengender eine Aktivität, desto mehr Sauerstoff wird benötigt. Damit steigen gleichzeitig die Wärmeverluste über die Atmung. Somit lassen sich die konvektiven und die evaporativen Atmungsverluste als Funktion der physikalischen

Umgebungsbedingungen und der internen Energieproduktion des Menschen beschreiben. (Parsons, 2014)

$$C_{res} + E_{res} = [0.0014M(34 - T_a) + 0.0173M(5.87 - P_a)] \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (24)$$

5.2.1.2.5 Durchblutung des Körpers

Unter thermisch neutralen Bedingungen beträgt die Durchblutungsrate 6.3 L/m²h; ausgehend hiervon wird die Durchblutungsrate für andere Zustände berechnet (Parsons, 2014). Die minimale und die maximale Durchblutungsrate liegen bei 0.5 L/m²h und bei 90 L/m²h (Foda & Sirén, 2010).

Bei der Betrachtung des menschlichen Körpers als zwei konzentrische Zylinder, die den Körperkern und die Körperschale repräsentieren, kann ein Gewichtungsfaktor α bestimmt werden. Dieser repräsentiert die Veränderung der Durchblutungsrate der Haut, welche zwangsläufig zu einer Verlagerung der Körpermasse führt. Wird der Blutfluss erhöht (Vasodilatation), erhöht sich die Masse der Körperschale, umgekehrt wird der Blutfluss in den peripheren Gefäßen reduziert, dann verlagert sich die Masse wieder hin zur Körperschale. Diese Verlagerung der Körpermasse wird durch den Gewichtungsfaktor α berücksichtigt. Je mehr Blut durch die Hautschale fließt, desto mehr trägt diese zur mittleren Körpertemperatur bei und umgekehrt. (Wölki et al., 2014) Das Zwei-Knoten-Modell nach Gagge, Stolwijk und Nishi (1971) sowie Gagge (1973) bietet eine Möglichkeit zur Bestimmung der Durchblutungsrate der äußeren Körperschale. Allerdings werden hier sowohl die Hauttemperatur, also auch die Körperkerntemperatur als fixierte Schwellenwerte behandelt. Bei dem Zwei-Knoten-Modell wird davon ausgegangen, dass die Vasodilatation durch die Aktivität der Warmrezeptoren im Körperkern entsteht und dass die Vasokonstriktion durch die Aktivität der Kaltrezeptoren in der Haut entsteht. Das Zwei-Knoten-Modell bezieht sich auf die fixierten *Set-Points* von 33.7 °C für die Hauttemperatur und 36.8 °C für die Körperkerntemperatur. Eine dynamische Veränderung dieser Parameter wird nicht berücksichtigt, weswegen die Anwendung dieser Methode hinterfragt werden sollte. Um die Aktivität der Effektoren bewerten zu können, wird für die Vasodilatation die Abweichung der Körperkerntemperatur vom *Set-Point* 36.8 °C und für die Vasokonstriktion die Abweichung der Hauttemperatur vom *Set-Point* 33.7 °C bewertet. (Foda & Sirén, 2010) Nach Werner (1984) und Romanovsky (2007) ist dieser Ansatz zur Bewertung der Aktivität der Effektor-Mechanismen anhand von fixierten Werten nur bedingt geeignet. Vielmehr müssen die Hauttemperatur und die Körperkerntemperatur, die zueinander in Wechselwirkung stehen, berücksichtigt werden und daraus die Temperaturzonen, in denen die bestimmten Effektoren aktiv sind, identifiziert werden. Ein erster vereinfachter Ansatz zur Bestimmung der Durchblutungsrate der Haut, der keine fixierten Schwellenwerte berücksichtigt, sondern sich auf die Differenz zwischen der Haut- und der Körperkerntemperatur bezieht, wurde von Kenney und Havenith (1993) präsentiert. In diesem Ansatz kann die Durchblutungsrate der Haut $SkBF$ [L/min] ebenfalls aus der Wärmebilanz unter Berücksichtigung der internen Wärmeproduktion sowie der Haut- und Körperkerntemperatur bestimmt werden.

$$SkBF = \frac{M - W}{T_c - T_{sk}} - 5.3 A_D \left[\frac{L}{min} \right] \quad (25)$$

Bei der Anwendung dieser Berechnungsmethode wurden deutlich höhere Durchblutungsraten bestimmt, im Vergleich zu der Anwendung des Zwei-Knoten-Modells nach Gagge, Stolwijk und Nishi (1971), weswegen Letztere für die Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz bevorzugt wird. Um diese Anwendung zu rechtfertigen, wurden unterschiedliche Studien betrachtet, die sich mit der Bestimmung der *Set-Points* auseinandersetzen.

Die in den Studien identifizierten, teils dynamischen *Set-Points* (Li et al., 2017; Takada, Kobayashi & Matsushita, 2007; Fiala, Lomas & Stohrer, 1999; Wölki, 2017) wurden anhand der Gleichungen 26 – 29 hinsichtlich ihrer Ergebnisse überprüft. Die Tabelle mit den Ergebnissen dieses Vergleichs befindet sich in Anhang A. Dabei schwankte die letztendlich berechnete mittlere Körpertemperatur zwischen 36.5 °C und 36.9 °C, wobei das Modell nach Gagge, Stolwijk und Nishi (1971) eine mittlere Körpertemperatur von 36.8 °C hervorbrachte. Somit liegt diese innerhalb des Schwankungsbereichs der mittleren Körpertemperaturen, die mithilfe von dynamisch bestimmten *Set-Points* bestimmt wurden. Aus diesem Grund wird die Anwendung der fixierten *Set-Points* zur Bestimmung der Durchblutungsrate als valide erachtet.

$$SkBF = 6.3 + \frac{200 W_{SIG_{cr}}}{1 + 0.5 C_{SIG_{sk}}} \left[\frac{L}{min} \right] \quad (26)$$

$$W_{SIG_{er}} = \begin{cases} 0 & T_c \leq 36.8 \\ T_c - 36.8 & T_c > 36.8 \end{cases} [-] \quad (27)$$

$$C_{SIG_{sk}} = \begin{cases} 33.7 - T_{sk} & T_{sk} < 33.7 \\ 0 & T_{sk} \geq 33.7 \end{cases} [-] \quad (28)$$

$$\alpha = 0.0418 + \frac{0.745}{(SkBF - 0.585)} [-] \quad (29)$$

Ausgehend von dem beschriebenen Stand des Wissens lassen sich sowohl ein Wirkungsindikator sowie die dazugehörigen Wirkungszonen und ein Wirkungsmechanismus zur Beschreibung der Wirkungskategorie der thermischen Umgebung herleiten.

5.2.2 Definition des thermischen Wirkungsindikators und der Wirkungszonen

In Analogie zur Ökobilanzierung muss zur Bewertung dieser Wirkungskategorie ein geeigneter Indikator identifiziert werden, der es erlaubt, die Wirkung der relevanten Elementarströme auf den Menschen in ihrer Größenordnung zu bewerten. Demnach wird ein Indikator gesucht, der es ermöglicht zu definieren, bei welchen Umgebungsbedingungen, also externen Reizen, welche Reaktion im Körper auftritt und zu quantifizieren, wie sich dieser Zustand auf den Menschen auswirken kann.

Zur Bestimmung dieses Indikators wurden im Stand des Wissens sämtliche Afferenzen und Efferenzen der Thermorezeption und Thermoregulation dargestellt. Diese beschreiben einen Teil der Ursache-Wirkungs-Kette zwischen den Elementarströmen, die auf den Menschen wirken und seinem thermischen Zustand.

Ausgehend von der Wahrnehmung der Thermorezeptoren werden bestimmte Effektor-Maßnahmen im Körper ausgelöst. Hierbei handelt es sich um die Vasodilatation, die Vasokonstriktion, die Schweißproduktion sowie das Muskelzittern. Diese vier Reaktionen, die aufgrund von externen Reizen im menschlichen Körper ausgelöst werden, zählen zu den möglichen Auswirkungen, die ein Gebäude auf einen Menschen haben kann. Es lassen sich somit vier raumphysiologische Auswirkungen identifizieren, die es zu quantifizieren gilt.

Die Unterscheidung der TRP-Kanäle in Abhängigkeit von dem jeweiligen Temperaturbereich, auf den sie reagieren, wäre ein erster potentieller Wirkungsindikator. Jedoch gibt es in diesem Bereich keine ausreichende Datengrundlage, die eine Nutzung als Wirkungsindikator ermöglichen würde.

Die alleinige Nutzung der Hauttemperatur als potentieller Wirkungsindikator kann aufgrund der Tatsache, dass es sich hierbei um ein *Feedback*-Signal handelt, welches im Zusammenhang mit anderen Größen im Hypothalamus bewertet wird, bevor der Körper auf seine thermische Umgebung reagiert, ausgeschlossen werden. Da es sich bei der Körperkerntemperatur ebenfalls um ein *Feedback*-Signal handelt, kann die Nutzung dieses numerischen Werts als alleiniger Wirkungsindikator ebenfalls ausgeschlossen werden. Die Temperaturregulierung des Menschen erfolgt somit nicht auf der Grundlage einer einzelnen Größe, sondern es handelt sich um ein integratives, räumliches Temperatursignal (Romanovsky, 2014) Aufgrund der Annahme, dass die Thermoregulation des Menschen anhand einer solchen Hilfsrückkopplungsreglung erfolgt, welche sich aus der stark gewichteten Körperkerntemperatur und der weniger stark gewichteten Hauttemperatur zusammensetzt, kann davon ausgegangen werden, dass der thermische Wirkungsindikator diese beiden Größen berücksichtigen muss. Dementsprechend müssen diese beiden Größen bei der Bewertung eines konkreten Raums erfasst und in ihrem Verhältnis zueinander für jede individuelle Person bewertet werden. Bei diesem Wert handelt es sich um die sogenannte mittlere Körpertemperatur T_b , welche als Wirkungsindikator für die thermische Umgebung dient. Da dieser Indikator zum einen beide Körpertemperaturen berücksichtigt und zum anderen definierten Wirkungszonen zugeordnet werden kann.

Um den Wirkungsindikator numerisch zu bestimmen und definierten Wirkungszonen zuzuordnen, wird die Aktivität der Effektor-Mechanismen beurteilt, da diese erst aktiv werden, wenn eine Abweichung vom thermisch neutralen Zustand vorliegt. Nach Taylor und Gordon (2019) kann geschlussfolgert werden, dass

eine solche Bewertungsmethode als wissenschaftlich korrekt erachtet werden kann. Hier nach heißt es, dass die thermische Neutralität nicht von Umgebungsbedingungen oder vom passiven Wärmeaustausch bestimmt wird, sondern dass es sich hierbei um ein individuelles physiologisches Phänomen handelt, das auf der Basis der minimalen kutanen Vasomotorik bewertet werden sollte.

Aus dem beschriebenen Stand des Wissens kann geschlussfolgert werden, dass die thermisch neutrale Zone sich in Abhängigkeit von individuellen Parametern verändern kann, da die sensiblen Wärmeverluste maßgeblich durch die Wärmedämmung des Körpers, die Haltung (in Bezug auf den Strahlungsaustausch) und die interne Wärmeproduktion verändert werden. Für die Bewertung der Auswirkung der thermischen Umgebung auf den Menschen werden die in Abbildung 23 beschriebenen sechs Zonen genutzt. Die thermisch neutrale Zone sowie alle weiteren Zonen werden dabei auf die mittlere Körpertemperatur T_b , welche sowohl die Haut- als auch die Körperkerntemperatur repräsentiert und nicht auf die Umgebungstemperatur bezogen. Die beschriebenen sechs Zonen stimmen überein mit den definierten vier Wirkungszonen. Die numerischen Grenzwerte dieser Zonen sind jedoch noch nicht bekannt (Abbildung 27).

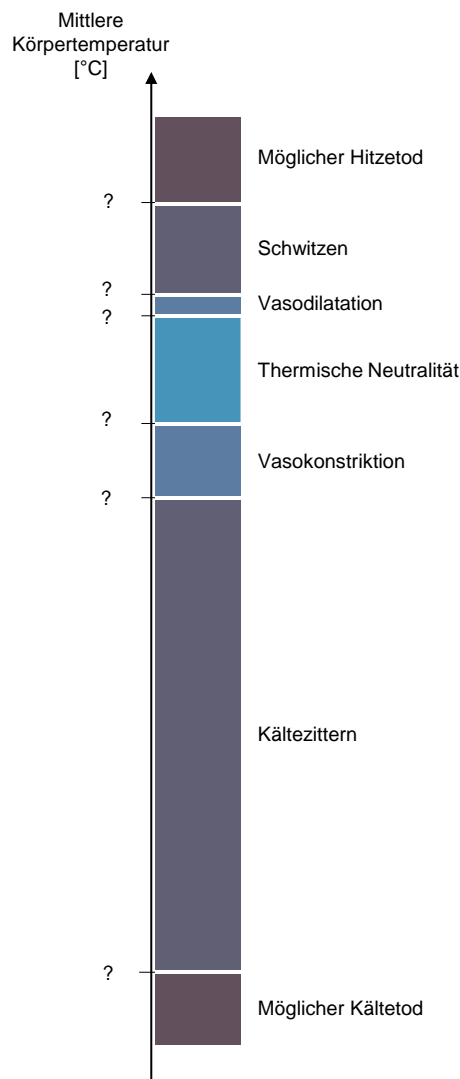


Abbildung 27: Wirkungszonen der thermischen Umgebung

Im Folgenden gilt es zu bestimmen, welche Grenzwerte für die jeweiligen Zonen gelten. Da der Wirkungsindikator durch die mittlere Körpertemperatur abgebildet wird, welche sich aus der Körperkern- und der Hauttemperatur zusammensetzt, müssen diesen beiden Temperaturwerte für die Berechnung des Wirkungsindikators bekannt sein.

Das Berechnungsvorgehen beruht auf den Grundlagen von Kingma et al. (2014) und wurde für die vorliegende Anwendung angepasst. Für die Zwischen-Schwellenwert-Zone werden die minimale und die maximale Wärmedämmung des Körpers angegeben. Es empfiehlt sich, die maximale Wärmedämmung des Körpers für jede Person individuell, basierend auf der Fettschicht und dem tatsächlichen Energieverbrauch, zu bestimmen. Da die minimale Wärmedämmung rein durch den maximalen Blutfluss bestimmt wird, kann diese vereinfacht für jede Person mit einem Wert von 0.031 m²K/W angenommen werden. Eine detaillierte Berechnung wäre auch hier empfehlenswert, steht jedoch zum derzeitigen Zeitpunkt mit einem unverhältnismäßigen Aufwand in Verbindung, da die entsprechenden Daten aus dem Fachgebiet der Physiologie, insbesondere in Bezug auf die Effizienz des Gegenstrom-Wärmeaustauschs, nicht vorliegen. Somit sind die Werte sowohl für die minimale als auch für die maximale körpereigene Wärmedämmung bekannt. Diese entsprechen jeweils dem Zustand der maximalen Vasokonstriktion bei 36.0 °C sowie der maximalen Vasodilatation bei 37.2 °C Körperkerntemperatur und repräsentieren somit die Grenzen der zweiten Wirkungszone. Nach Kingma et al. (2014) gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen der Hauttemperatur und der Wärmedämmung des Körpers; deswegen kann für sämtliche Werte, die im Bereich zwischen der minimalen und der maximalen Wärmedämmung liegen, linear interpoliert werden.

Der Zusammenhang zwischen den bereits genannten Körperkerntemperaturen, die die Grenzwerte der zweiten Zone darstellen und den Hauttemperaturen lässt sich durch den Wärmefluss vom Körperinneren zur Oberfläche des Körpers bestimmen. Dieser Wärmefluss verändert sich in Abhängigkeit von der körpereigenen Wärmedämmung (I_{min} und I_{max}), der internen Wärmeproduktion und dem Wärmeverlust, der über die Atmung abgegeben wird. Der Anteil des Wärmeverlustes über die Atmung (γ) wird bestimmt durch die Ventilationsrate der Lunge; diese steht in direktem Zusammenhang mit der metabolischen Rate. Umso anstrengender eine Aktivität ist, desto mehr Sauerstoff benötigt der Körper. Bei einer ruhigen Aktivität im Sitzen beträgt dieser Anteil für gewöhnlich 8 %. Der prozentuale Anteil der Atmungswärmeverluste kann für jede beliebige Aktivität aus dem Verhältnis der Wärmeverluste über die Atmung ($C_{res} + E_{res}$) zur internen metabolischen Wärmeproduktion bestimmt werden. Basierend auf diesen Zusammenhängen können die oberen und die unteren Grenzwerte für die Hauttemperaturen für die erste und die zweite Wirkungszone entsprechend der Grenzwerte der Körperkerntemperatur sowie der minimalen und der maximalen körpereigenen Wärmedämmung bestimmt werden. In einem ersten Berechnungsschritt werden die Grenzwerte der Hauttemperatur für die zweite Zone bestimmt.

$$T_{sk_{min,2}} = 36.0 - (1 - \gamma) M I_{max} [^{\circ}C] \quad (30)$$

$$T_{sk_{max,2}} = 37.2 - (1 - \gamma) M I_{min} [^{\circ}C] \quad (31)$$

Anschließend kann für die Bestimmung der Wärmedämmung des Körpers bei einer Körperkerntemperatur von 36.5 °C und bei 37.0 °C (Grenzen Zone 1) linear interpoliert werden. Da die lineare Interpolation jedoch auf einem Zusammenhang mit der Hauttemperatur basiert, muss diese substituiert und durch die Körperkerntemperatur repräsentiert werden (Gleichung 33).

$$I_i = I_{max} + \frac{I_{max} - I_{min}}{T_{sk_{min,2}} - T_{sk_{max,2}}} (T_{sk_i} - T_{sk_{min,2}}) \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (32)$$

$$T_{sk_i} = \frac{A_D * T_{c_i} - I_i * M * A_D (1 - \gamma)}{A_D} [^{\circ}C] \quad (33)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 33 in Gleichung 32 und anschließendes Auflösen kann die körpereigene Wärmedämmung für die Grenzwerte der Körperkerntemperatur der ersten Zone bestimmt werden. Anschließend lassen sich analog zur Berechnung der Grenzwerte der Hauttemperatur für die zweite Zone die Hauttemperaturen der Grenzen der ersten Zone berechnen.

$$T_{sk_{min,1}} = 36.5 - (1 - \gamma) M I_i [^{\circ}C] \quad (34)$$

$$T_{sk_{max,1}} = 37.0 - (1 - \gamma) M I_i [^{\circ}C] \quad (35)$$

Dieses Vorgehen wird ebenfalls für die Bestimmung der oberen und unteren Grenze der dritten Wirkungszone verwendet. Dabei handelt es sich entsprechend Abbildung 23 um die Grenzen E und F. Die Grenzwerte der Körperkerntemperaturen liegen hierbei jeweils bei 39.5 °C und bei 25.0 °C (Tabelle 4). Die Wärmedämmung des Körpers bleibt identisch bei I_{min} und I_{max} , da der Körper hier bereits seine Kapazität zur Wärmedämmung ausgeschöpft hat.

$$T_{sk_{min,3}} = 25.0 - (1 - \gamma) M I_{max} [^{\circ}C] \quad (36)$$

$$T_{sk_{max,3}} = 39.5 - (1 - \gamma) M I_{min} [^{\circ}C] \quad (37)$$

Durch die Kenntnis sämtlicher Haut- und Körperkerntemperaturen, die die Grenzwerte darstellen, kann für jede Zone die mittlere Körpertemperatur T_b bestimmt werden. Diese berechnet sich anteilig aus der Hauttemperatur und der Körperkerntemperatur. (Werner, 2010; Parsons, 2014)

$$T_b = \alpha T_{sk} + (1 - \alpha) T_c [^{\circ}C] \quad (38)$$

Hierzu wird wiederum die Massenverschiebung α im Körper berücksichtigt. Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass diese innerhalb der thermisch neutralen Zone einen Wert von 0.2 hat. Unterhalb dieser Zone liegt der Wert bei 0.33 und oberhalb dieser Zone bei 0.1. (Parsons, 2014) Es kann ebenfalls eine detaillierte Berechnung des Gewichtungsfaktors mit Gleichung 29, basierend auf dem Durchblutungsfluss, durchgeführt werden.

Der berechnete Wirkungsindikator für die Bewertung der Temperaturwirkung auf den Menschen in einer bestimmten räumlichen Umgebung kann letztendlich einer der vier beschriebenen Wirkungszonen zugeordnet werden. Innerhalb der ersten Zone ist mit keiner Auswirkung zu rechnen, während innerhalb der zweiten Zone die Vasomotorik aktiv ist. Dieser Vorgang wird für gewöhnlich nicht vom Menschen wahrgenommen und kann somit als nicht wahrnehmbare Auswirkung beschrieben werden. Innerhalb der dritten Zone beginnt der Körper zu schwitzen, während er innerhalb der fünften Zone zittert; diese beiden physiologischen Reaktionen auf die Umgebung stellen eine Auswirkung auf den thermischen Komfort des Menschen dar. Bei einer Überschreitung der Grenzen der dritten Wirkungszone sind gesundheitsgefährdende Auswirkungen die Folge.

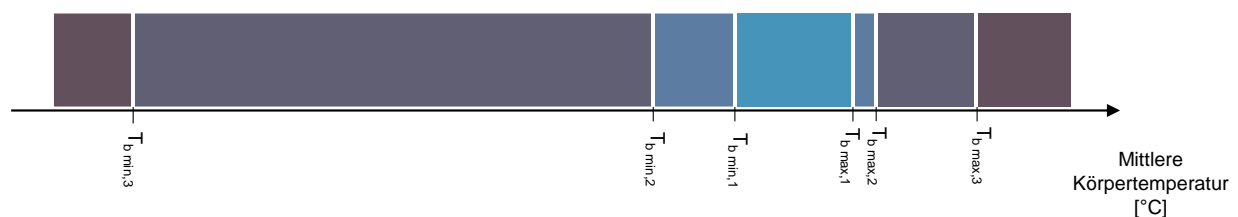


Abbildung 28: Numerische Abgrenzung der Wirkungszonen der thermischen Umgebung

5.2.3 Herleitung des thermischen Wirkungsmechanismus

Zur Herleitung eines möglichen Wirkungsmechanismus, welcher die Elementarströme der thermischen Umgebung mit dem Wirkungsindikator in Relation setzt, müssen erst die zu berücksichtigenden Elementarströme identifiziert werden. Hierbei handelt es sich entsprechend der Definition um physikalische Größen im Innenraum, welche die thermische Umgebung des Menschen gestalten. Nach Bluyssen (2009) zählen zu den Parametern, die den thermischen Komfort von Menschen in Innenräumen beeinflussen, die Luft- und Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit und die relative Luftfeuchte. Es ist anzumerken, dass der Bezug zum thermischen Komfort gemacht werden kann, da dieser direkt aus dem thermischen Zustand des menschlichen Körpers resultiert. Diese vier physikalischen Größen müssen demnach in der Sachbilanz bestimmt werden. Im Wirkungsmechanismus werden hingegen ihr physikalisches Zusammenspiel sowie die dadurch beeinflussten physiologischen Prozesse quantifizierbar gemacht.

Um den Einfluss sämtlicher Elementarflüsse, die für den thermischen Zustand relevant sind, mit ihrer jeweiligen Gewichtung zu erfassen, wird die Wärmebilanz des menschlichen Körpers betrachtet. Diese stellt einen direkten Bezug zwischen den einwirkenden Elementarströmen und dem definierten Wirkungsindikator dar.

Die Aufrechterhaltung einer konstanten Körperkerntemperatur setzt voraus, dass ein Wärmegleichgewicht zwischen dem Körper und seiner Umgebung besteht. Sämtliche Wärme, die im Körper produziert wird und die Wärme, die der Körper von seiner Umgebung erhält, muss durch die Wärmeabgabe des Körpers ausgeglichen werden. (Parsons, 2014) Ist die Wärmeerzeugung zusammen mit dem Wärmeeintrag größer als die Wärmeabgabe, dann steigt die Körpertemperatur zwangsläufig an. Ist die Wärmeabgabe größer als die Wärmegewinnung, dann sinkt die Körpertemperatur. (Parsons, 2014)

Unter thermisch neutralen Bedingungen findet keine Wärmespeicherung statt, weswegen die Gesamtrate der Wärmespeicherung in der Wärmebilanz (Gleichung 6) vernachlässigt werden kann. Für die Anwendung der Wärmebilanz in der raumphysiologischen Bilanz kann nicht zwangsläufig von neutralen Bedingungen ausgegangen werden. Dennoch wird die Rate der Wärmespeicherung vernachlässigt, da diese über einen Anstieg oder Abfall der Körpertemperatur berücksichtigt wird. Werden sämtliche Elementarflüsse, die zum thermischen Zustand beitragen, in die Wärmebilanz eingesetzt, unter Berücksichtigung der jeweiligen Aktivität des Menschen und der Bekleidungsbarriere zwischen der Haut und der Umgebung, dann ist die sich ergebende mittlere Körpertemperatur die Temperatur, die sich mit der Wärmespeicherung oder dem Wärmeverlust ergeben würde, da diese von der neutralen Temperatur abweicht. Bei einer hohen metabolischen Rate und Umgebungsbedingungen, die eine hohe Wärmeabgabe verhindern, muss die mittlere Körpertemperatur zwangsläufig ansteigen. Da alle diese Aspekte in der Wärmebilanzgleichung berücksichtigt werden, stellt dieser Anstieg die theoretische Wärmespeicherung im menschlichen Körper dar.

Zur Bestimmung des Wirkungsindikators werden sowohl die Haut- oder als auch die Körperkerntemperatur benötigt. Beide Größen sind Bestandteile der beschriebenen Wärmebilanz. Jedoch lässt sich die Körperkerntemperatur mit entsprechenden Anpassungen als Funktion der Hauttemperatur beschreiben, weswegen die Wärmebilanz so aufgestellt wird, dass die Hauttemperatur durch das Auflösen der Gleichung numerisch bestimmt werden kann. Im Anschluss kann die Körperkerntemperatur und somit ebenfalls die mittlere Körpertemperatur als Wirkungsindikator hergeleitet werden. Bei diesem Vorgehen handelt es sich letztendlich um den Wirkungsmechanismus, denn jeder einzelne Elementarstrom, der für die Wirkungskategorie der thermischen Umgebung relevant ist, wird in dieser Gleichung berücksichtigt und nach dem jeweiligen Beitrag zur Veränderung der Hauttemperatur gewichtet.

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile der Wärmebilanz für die konkrete Anwendung der raumphysiologischen Bilanz dargestellt. Hierbei werden die Wärmeproduktion im Körper, der sensible Wärmeverlust über die Haut, der Verdunstungswärmeverlust über die Haut, die Wärmeverluste über die Atmung sowie die Berechnung der Haut-, Körperkern- und mittleren Körpertemperatur beschrieben. Dabei handelt es sich um die einzelnen Bestandteile des thermischen Wirkungsmechanismus (Abbildung 29). Ausgehend von der Wärmebilanz kann die Hauttemperatur bestimmt werden. Basierend auf der Hauttemperatur und der körpereigenen Wärmedämmung lässt sich die dazugehörige Körperkerntemperatur und schließlich unter Berücksichtigung der Massenverschiebung im Körper die mittlere Körpertemperatur bestimmen.

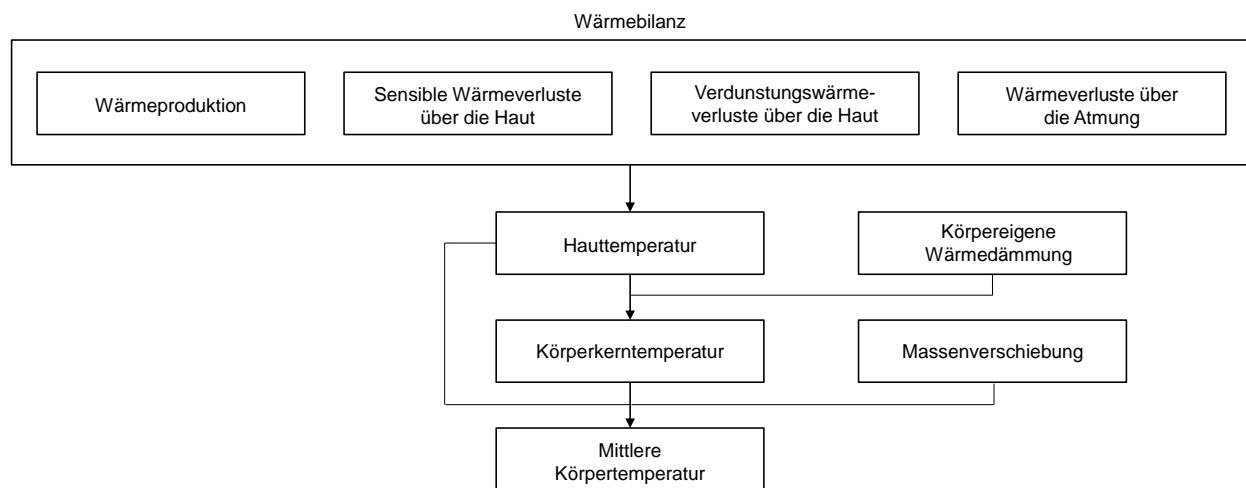


Abbildung 29: Vereinfachte Darstellung des thermischen Wirkungsmechanismus

Die Wärmeproduktion im Körper, welche durch die metabolische Rate abgebildet wird und sich auf die DuBois-Oberfläche bezieht, kann wie beschrieben entweder anhand von vorgegebenen Normwerten oder individuellen Bestimmungsmethoden, beispielsweise anhand der Herzfrequenz ermittelt werden. Die exakte Bestimmung unterliegt dem Studierersteller und erfolgt in der Sachbilanz.

Bei den sensiblen Wärmeverlusten über die Haut handelt sich um die Wärmeverluste, die über die Haut durch die Bekleidungsschicht und von der Oberfläche der Bekleidung durch Konvektion und Strahlung mit der Umgebung ausgetauscht werden. Als Eingangsgröße für die Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung werden der Bekleidungsflächenfaktor, der konvektive und der Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient sowie die Bekleidungsflächen- und die operative Temperatur (Gleichung 10) benötigt. Die Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs obliegt dem Studierersteller. Dieser muss der Bewertungssituation angepasst sein und somit sowohl die Aktivität, die Position der jeweiligen Person als auch die Luftgeschwindigkeit im Raum berücksichtigen. Der Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient kann dagegen nicht exakt bestimmt werden, da für die Berechnung des Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizienten nach Gleichung 12 die Temperatur der Bekleidungsoberfläche benötigt wird. Diese steht in direkter Wechselwirkung mit der Hauttemperatur und ist dementsprechend nicht bekannt. Die Größe experimentell zu ermitteln, wäre wiederum mit einem erheblichen Messaufwand verbunden. Aus diesen Gründen muss der Wärmeübergangskoeffizient vereinfacht angenommen werden. Dies steht in Einklang mit dem Vorgehen, wie es in der Literatur beschrieben wird. Somit kann ein Wärmeübergangskoeffizient mit einem Wert von $4.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ASHRAE, 2017) angesetzt werden.

Der Bekleidungsflächenfaktor kann anhand der Bekleidungsdämmung berechnet werden. Die Wärmedämmung der jeweils getragenen Bekleidung wird in der Sachbilanz bestimmt.

Als letzter Eingangsparameter bleibt die operative Temperatur, diese setzt sich zusammen aus den beiden Wärmeübergangskoeffizienten sowie der Luft- und Strahlungstemperatur. Die beiden Temperaturen werden ebenfalls in der Sachbilanz erfasst. Die Bekleidungsoberflächentemperatur lässt sich an dieser Stelle nicht bestimmen, da diese in direktem Zusammenhang mit der Hauttemperatur steht und es sich hierbei um die gesuchte Größe handelt, können durch die Vereinfachung von Gleichung 14 die sensiblen Wärmeverluste in Funktion der beschriebenen Parameter sowie der Hauttemperatur bestimmt werden.

$$C + R = \frac{(T_{sk} - T_o)}{\left(R_{cl} + \frac{1}{f_{cl}h}\right)} \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (39)$$

Der Verdunstungswärmeverlust über die Haut setzt sich aus dem Anteil der feuchten Haut, dem Wasserdampfdruck der Luft, dem Sättigungsdampfdruck der Haut, dem Verdunstungswiderstand der Bekleidung, dem Bekleidungsflächenfaktor sowie dem Verdunstungs-Wärmeübergangskoeffizienten zusammen. Letzterer kann anhand der Lewis Zahl und dem bereits bekannten konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt werden. Der Verdunstungswiderstand der Bekleidung setzt sich zusammen aus dem Wärmewiderstand der Bekleidung sowie dem Permeabilitätsindex. Der Wärmewiderstand kann ausgehend von der Bekleidungsämmung, welche in der Sachbilanz erfasst wird, bestimmt werden. Für den Permeabilitätsindex kann dagegen ein konstanter Wert von 0.34 angenommen werden, welcher für die meisten ein- und zweischichtigen Bekleidungskombinationen gilt. Der Wasserdampfdruck der Luft wird mithilfe der Antoine-Gleichung unter Berücksichtigung der Lufttemperatur berechnet. Für die Bestimmung des Sättigungsdampfdrucks des Wassers auf der Haut kann dagegen die vereinfachte Gleichung 20 genutzt werden. Bei gewöhnlichen Innenraumbedingungen ist davon auszugehen, dass die Hauttemperatur weder 27.0 °C unterschreitet noch 37.0 °C überschreitet; aus diesem Grund wird für das weitere Verfahren die vereinfachte Formel zur Bestimmung des Wasserdampfsättigungsdrucks genutzt. Durch die Verwendung dieser vereinfachten Berechnungsformel kann der Rechenaufwand deutlich reduziert werden. Bei Hauttemperaturen, die außerhalb dieses Bereichs liegen, kann es zu leichten Abweichungen vom tatsächlichen Sättigungsdampfdruck kommen. Diese Abweichungen haben jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsindikator, da dieser den Wirkungszonen zugeordnet wird und es sich hierbei nicht um konkrete Zahlenwerte, sondern Wertebereiche handelt.

Die letzte Eingangsgröße zur Bestimmung der Verdunstungswärmeverluste über die Haut ist der Anteil der feuchten Haut. Dieser Anteil errechnet sich nach Gleichung 21 aus dem benötigten und dem maximalen Verdunstungswärmeverlust. Der maximale Verdunstungswärmeverlust kann durch die Vereinfachung von Gleichung 15 bestimmt werden. Für die Bestimmung des Verdunstungswärmeverlusts wird die Verdampfungswärme von Wasser sowie die Schweißrate benötigt. Erstere kann mit einem konstanten Wert angenommen werden, während die Schweißrate mit Gleichung 23 errechnet werden kann.

Für die Bestimmung der Schweißrate in der raumphysiologischen Bilanz wurden lediglich die nach Wissler (2018) beschriebenen Modelle berücksichtigt. Diese fokussieren sich auf die Beschreibung von quantitativen Zusammenhängen zwischen der Schweißrate und den physiologischen Einflüssen. Basierend auf diesen Grundlagen wurde das Modell nach Stolwijk und Hardy (1966) zurückbehalten.

Für die Berechnung der Schweißrate wird demnach die Körperkerntemperatur und die Hauttemperatur benötigt. Bei der Hauttemperatur handelt es sich um die Größe, die durch das Auflösen der Wärmebilanzgleichung bestimmt werden soll. Damit ist die Körperkerntemperatur die letzte Unbekannte, die für die Berechnung der gesamten Verdunstungswärmeverluste benötigt wird. Die

Körperkerntemperatur kann rechnerisch, ausgehend von der Hauttemperatur, mithilfe der körpereigenen Wärmedämmung berechnet werden.

Somit muss zur Bestimmung der Hauttemperatur einer Person in einem Raum in einem ersten Schritt der Anteil des Wärmeverlustes über die Atmung sowie die minimale (Körperkerntemperatur = 36.0 °C) und die maximale (Körperkerntemperatur = 37.2 °C) körpereigene Wärmedämmung bestimmt werden. Zwischen diesen beiden Werten darf wiederum linear interpoliert werden (Kingma et al., 2014). Somit ergibt sich für die Berechnung der Körperkerntemperatur in Funktion der Hauttemperatur, welche in der Wärmebilanz des Menschen benötigt wird, das folgende Verhältnis.

$$T_c = T_{sk} + (1 - \gamma) M I_i \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (40)$$

Hierbei wird die körpereigene Wärmedämmung I_i aus der linearen Interpolation ebenfalls in Funktion der Hauttemperatur bestimmt. Dieser Zusammenhang stimmt jedoch nur, solange die ermittelte Hauttemperatur innerhalb der Grenzen $T_{sk \text{ min},2}$ und $T_{sk \text{ max}, 2}$ liegt. Liegt die berechnete Hauttemperatur nicht innerhalb dieses Temperaturintervalls, dann wird I_i nicht mehr in Funktion der Hauttemperatur angegeben, sondern nimmt den maximalen oder minimalen Wert der körpereigenen Wärmedämmung an, je nachdem, ob die Grenze nach oben oder nach unten überschritten wird.

Basierend auf diesen Grundlagen zur Berechnung der Wärmebilanz des menschlichen Körpers kann die mittlere Hauttemperatur eines Menschen für jegliche Kombinationen an Innenraumbedingungen sowie Bekleidung und Aktivität bestimmt werden. Entscheidend für diese Methode der Berechnung ist, dass es sich bei der Betrachtung um eine stationäre Berechnung handelt. Da Gebäude für einen längerfristigen Aufenthalt von Personen gedacht sind, wird diese Herangehensweise als passend erachtet, um die Auswirkungen auf die Thermoregulation und damit die Wirkungskategorie des globalen thermischen Zustands des Menschen beurteilen zu können. Bei kurzfristigen Änderungen der Temperatur wird der Mensch bewusst auf seine Umgebung reagieren, beispielsweise in dem er einen Orts- oder Bekleidungswechsel durchführt. Die dauerhaften und somit stationären Bedingungen sind dagegen besser geeignet, um die Auswirkungen der Temperatur zu beurteilen, da diese gegebenenfalls nicht bewusst vom Menschen wahrgenommen werden und dennoch eine gewisse Anstrengung des Körpers verlangen, um den thermisch neutralen Zustand des Körpers aufrechtzuerhalten.

$$M - W = \frac{(T_{sk} - T_o)}{\left(R_{cl} + \frac{1}{f_{cl}h}\right)} + \frac{\left(0.06 + 0.94 \left(\frac{\frac{h_{fg} * SR}{\left(\frac{1.92 T_{sk} - 25.3}{7.5}\right) - P_a}}{\left(R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl}h_e}\right)} \right)\right) \left(\frac{1.92 T_{sk} - 25.3}{7.5} - P_a\right)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl}h_e}} + [0.0014M(34 - T_a) + 0.0173M(5.87 - P_a)] \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (41)$$

Durch das numerische Auflösen der Gleichung 41 kann demnach die Hauttemperatur für die gegebene Situation bestimmt werden. Da die Schweißrate mit der Körperkern- und der Hauttemperatur zusammenhängt, muss anschließend überprüft werden, ob der Körper schwitzt oder lediglich eine Diffusion durch die Haut stattfindet. Falls die Schweißrate einen negativen Wert annimmt, kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil der feuchten Haut 0.06 beträgt und sich nicht durch die gegebenen Bedingungen verändert. In diesem Fall kann die Berechnung entsprechend Gleichung 42 vereinfacht werden.

$$M - W = \frac{(T_{sk} - T_o)}{\left(R_{cl} + \frac{1}{f_{cl}h}\right)} + \frac{0.06 \left(\frac{1.92 T_{sk} - 25.3}{7.5} - P_a\right)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl}h_e}} + [0.0014M(34 - T_a) + 0.0173M(5.87 - P_a)] \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (42)$$

Aus der ermittelten Hauttemperatur kann anschließend die Körperkerntemperatur unter Berücksichtigung der körpereigenen Wärmedämmung entsprechend Gleichung 40 berechnet werden. Diese beiden Größen sind der erste Anhaltspunkt dafür, in welchem Zustand sich der Körper befindet. Für die schlussendliche Bewertung wird die mittlere Körpertemperatur T_b benötigt, welche letztendlich den beschriebenen Wirkungsindikator darstellt. Diese berechnet sich anteilig aus der Hauttemperatur und der Körperkerntemperatur entsprechend Gleichung 38. Hierfür wird zusätzlich der Gewichtungsfaktor α benötigt, welcher mit Gleichung 26 – 29 bestimmt werden kann. Da an dieser Stelle die *Set-Points* lediglich genutzt werden, um die Durchblutungsrate zu bestimmen, damit die Massenverschiebung im Körper ohne die Verwendung der vorgegebenen Standard-Gewichtungsfaktoren bestimmt werden kann, kann davon ausgegangen werden, dass die Verschiebung von den personenabhängigen optimalen *Set-Points* so gering ist, dass diese nicht weiter berücksichtigt werden muss. Deswegen kann trotz der Umstrittenheit der Verwendung von *Set-Points* das Modell nach Gagge, Stolwijk und Nishi (1971), an dieser Stelle des Wirkungsmechanismus verwendet werden. Dies soll jedoch auf die Berechnung der Durchblutungsrate beschränkt werden.

Anhand des beschriebenen Wirkungsmechanismus kann für jede beliebige Innenraumumgebung und jede individuelle Person der thermische Zustand, dargestellt durch den Wirkungsindikator, bestimmt werden.

5.2.4 Anwendung des thermischen Wirkungsmechanismus

Der hergeleitete Wirkungsmechanismus für die thermische Umgebung setzt sich aus vier Bestandteilen zusammen. Es kann zudem zwischen den Input- und den Output-Parametern unterschieden werden. Auf der Input-Seite werden die personenbezogenen Parameter (1) und die umgebungsbezogenen Parameter (2) berücksichtigt. Auf der Output-Seite stehen dagegen die Bestimmung der Grenzen der Wirkungszone (3) und die Bestimmung des Wirkungsindikators in einer bestimmten Umgebung (4).

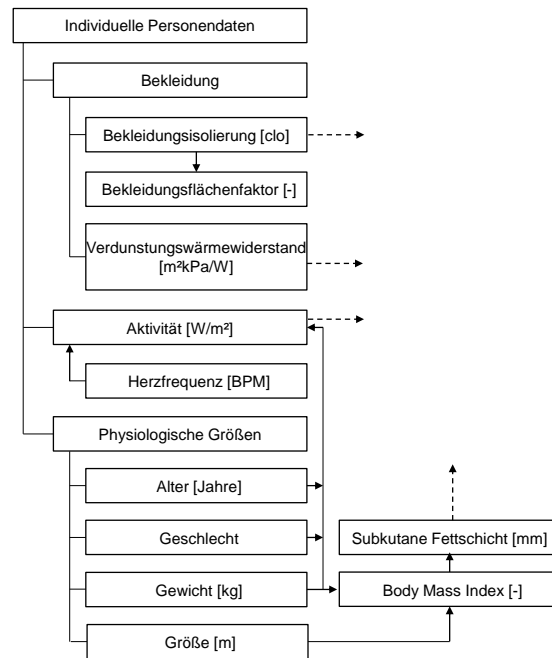


Abbildung 30: Individuelle Personendaten im Wirkungsmechanismus der thermischen Umgebung

Die personenbezogenen Input-Parameter gliedern sich, wie in Abbildung 30 dargestellt, in die Parameter, die situationsabhängig sind (Aktivität und Bekleidung) und die physiologischen Größen (Alter, Geschlecht, Gewicht etc.). Die relevanten Personendaten werden ebenfalls im Rahmen der Sachbilanz bestimmt. Die benötigten Umgebungsdaten (Abbildung 31) entsprechen den bauphysikalischen Parametern, die als Grundlage für die Wärmebilanz dienen. In beiden Abbildungen deuten die gestrichelten Pfeile darauf hin, dass diese quantitativen Größen als Eingangsgrößen für weitere Berechnungsschritte des Wirkungsmechanismus dienen.

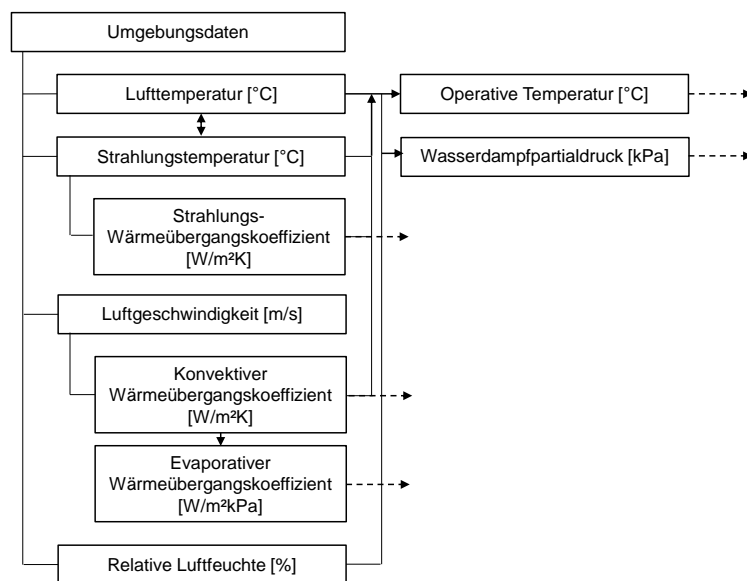


Abbildung 31: Umgebungsdaten im Wirkungsmechanismus der thermischen Umgebung

Ausgehend von diesen Input-Daten ergibt sich der gesamte Algorithmus (Abbildung 32) der sich in die vier genannten Bestandteile aufgliedern lässt. In Abbildung 32 ist neben den individuellen Personendaten aus Abbildung 30 und den Umgebungsdaten aus Abbildung 31 der Berechnungsalgorithmus sowohl zur individuellen Bestimmung der Grenzen der Wirkungszonen sowie des Wirkungsindikators in einer bestimmten Bewertungssituation dargestellt. Ausgehend von den Input-Daten lässt sich der Anteil der Wärmeverluste über die Atmung sowie die maximale körpereigene Wärmedämmung bestimmen. Die minimale körpereigene Wärmedämmung wird dagegen aufgrund der geringen Datengrundlage, insbesondere in Bezug auf den Gegenstrom-Wärmeaustausch, mit einem konstanten Wert angesetzt. Bei der maximalen sowie der minimalen körpereigenen Wärmedämmung handelt es sich um die Grenzen der zweiten Wirkungszone, weswegen ausgehend hiervon die Hauttemperatur sowie die Körperkerntemperatur an der unteren und oberen Grenze der zweiten Wirkungszone bestimmt werden kann. Durch die Bestimmung der sich bei diesen Temperaturen einstellenden Durchblutungsrate und der daraus entstehenden Massenverschiebung lässt sich die mittlere Körpertemperatur der zweiten Wirkungszone berechnen. Die Grenzwerte der Körperkerntemperaturen der weiteren Wirkungszonen sind aus dem Stand des Wissens bekannt, somit können die mittleren Körpertemperaturen als Grenzwerte der weiteren Wirkungszonen in einem analogen Vorgehen bestimmt werden. Der Bestimmung der individuellen Grenzen der Wirkungszonen werden die Gleichungen 30 bis 38 zugrunde gelegt.

Ausgehend von der Wärmebilanz kann ebenfalls die mittlere Körpertemperatur in der konkreten Bewertungssituation berechnet werden. Durch die Umformulierung der Wärmebilanz (Gleichung 41) kann die Hauttemperatur sowie durch das Bekanntsein der körpereigenen Wärmedämmung die Körperkerntemperatur bestimmt werden. Aus diesen beiden Größen kann unter Berücksichtigung der Durchblutungsrate eine mittlere Körpertemperatur berechnet werden, die anschließend auf ihrer Richtigkeit überprüft werden muss. Liegt diese mittlere Körpertemperatur über dem Grenzwert der zweiten Wirkungszone, dann handelt es sich hierbei bereits um die tatsächliche mittlere Körpertemperatur. Liegt diese mittlere Körpertemperatur innerhalb der zweiten Wirkungszone, dann kann für die tatsächliche Berechnung die vereinfachte Gleichung 42 genutzt werden. Zusätzlich muss für die körpereigene Wärmedämmung zwischen den Werten der minimalen und der maximalen körpereigenen Wärmedämmung interpoliert werden. Liegt die berechnete mittlere Körpertemperatur unterhalb der zweiten Wirkungszone, können die evaporativen Wärmeverluste ebenfalls vereinfacht werden und die körpereigene Wärmedämmung mit dem minimalen Wert angenommen werden. Nach dieser Überprüfung und den entsprechenden Anpassungen kann die tatsächliche mittlere Körpertemperatur bestimmt werden. Zur Anwendung des Wirkungsmechanismus wurde ein entsprechendes *Matlab*-Skript generiert, welches die Möglichkeit bietet, die Input-Daten personen- und umgebungsabhängig zu variieren. Dieses ermöglicht es, für jede Umgebungssituation und für jede individuelle Person, die sich unter bestimmten Bedingungen einstellende mittlere Körpertemperatur sowie die individuellen Grenzen der Wirkungszonen zu bestimmen. Somit lässt sich feststellen, welche Auswirkung die thermische Umgebung auf eine Person haben kann. Hierbei handelt es sich um ein stationäres Verfahren zur Bestimmung des Wirkungsindikators. Zur Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz wird jedoch empfohlen, das Verfahren mehrmals innerhalb einer definierten Zeitperiode durchzuführen, insbesondere dann, wenn sich eine der Eingangsgrößen verändert.

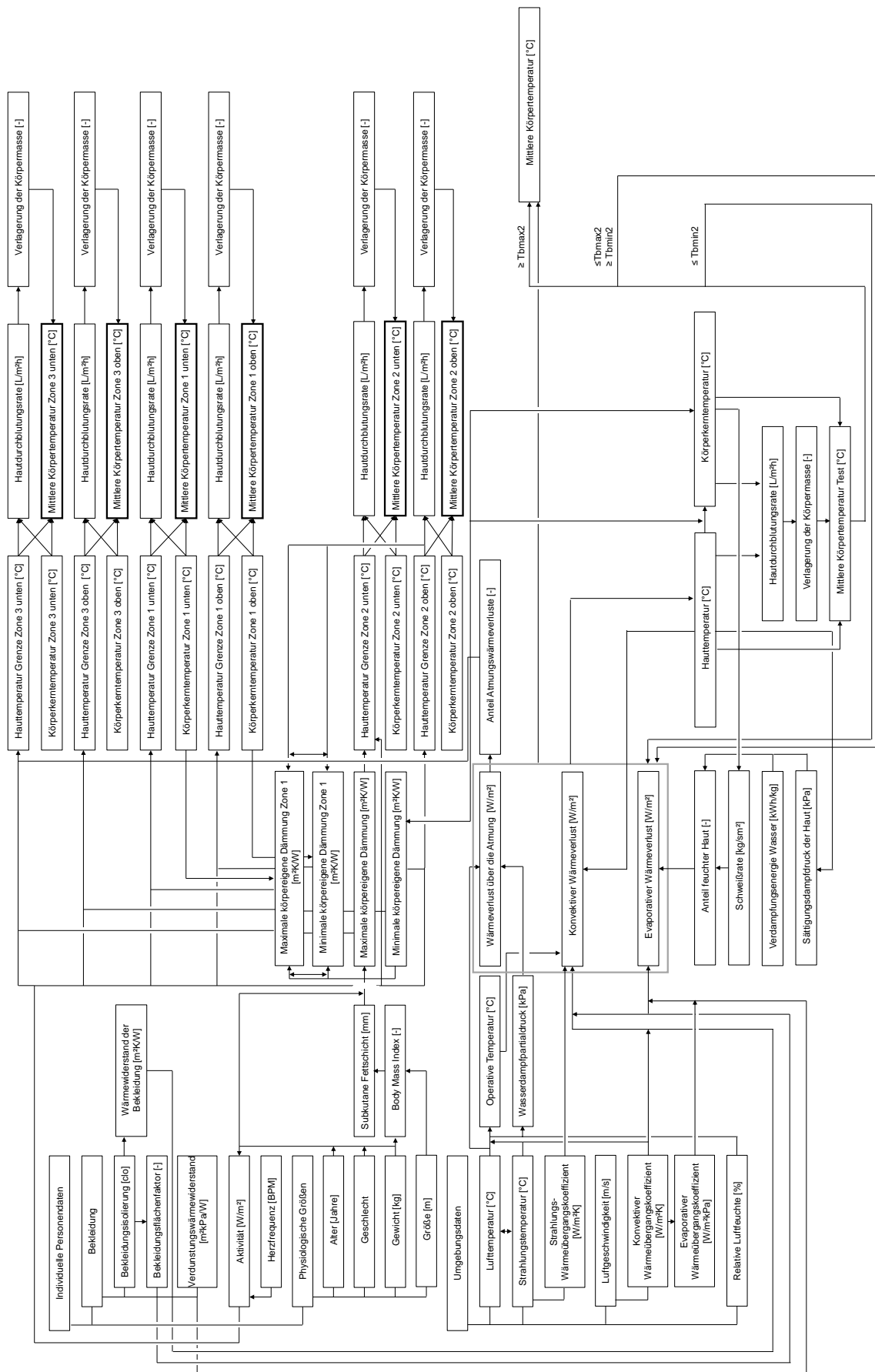


Abbildung 32: Algorithmus des thermischen Wirkungsmechanismus

Die grafische Darstellung der Wirkungszonen in Abhängigkeit von den Umgebungsparametern erfolgt in einem Drei-Achsen-System. Dabei wird die operative Temperatur auf der x-Achse abgebildet, die Luftgeschwindigkeit auf der y-Achse und die mittlere Körpertemperatur auf der z-Achse. Der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit wird ebenfalls berücksichtigt. Es wird lediglich davon ausgegangen, dass es sich hierbei um die am wenigsten variabelste Größe der gegebenen Umgebungs-Input-Größen handelt, weswegen diese für die grafische Abbildung, wie sie hier erfolgt, konstant mit 50 % angenommen wurde. Zudem wurden die Wirkungszonen für zwei unterschiedliche Personen jeweils unter den gleichen drei Beobachtungsszenarien durchgeführt. Bei Szenario 1 handelt es sich um eine Bürosituation mit einem Energieverbrauch der Personen von 60 W/m² und einem sommerlichen clo-Wert von 0.5. In Szenario 2 wird die gleiche Arbeitsumgebung betrachtet, lediglich der clo-Wert wird für den Winterfall auf 1.0 clo angepasst. In Szenario 3 werden beide Personen in einer aktiveren Umgebung betrachtet; somit erhöht sich der Energieverbrauch auf 120 W/m², der clo-Wert wird dagegen wieder stellvertretend für eine leichte Bekleidungskombination mit 0.5 clo angenommen. Die sich ergebende grafische Abbildung ist als beispielhafte Darstellung zu interpretieren, innerhalb derer eine Variation der Input-Parameter der x- und y-Achse und deren Auswirkung auf die mittlere Körpertemperatur ohne rechnerischen Aufwand abgelesen werden kann. Für die betrachteten Szenarien wurde eine operative Temperatur im Bereich von 15 °C bis 35 °C und eine Luftgeschwindigkeit im Bereich von 0.01 m/s bis 2 m/s berücksichtigt. Bei den betrachteten Personen handelt es sich beispielhaft um eine 30-jährige Frau mit einer Größe von 1.70 m und einem Gewicht von 65 kg (Person 1) sowie um einen 60-jährigen Mann mit einer Größe von 1.85 m und einem Gewicht von 85 kg (Person 2).

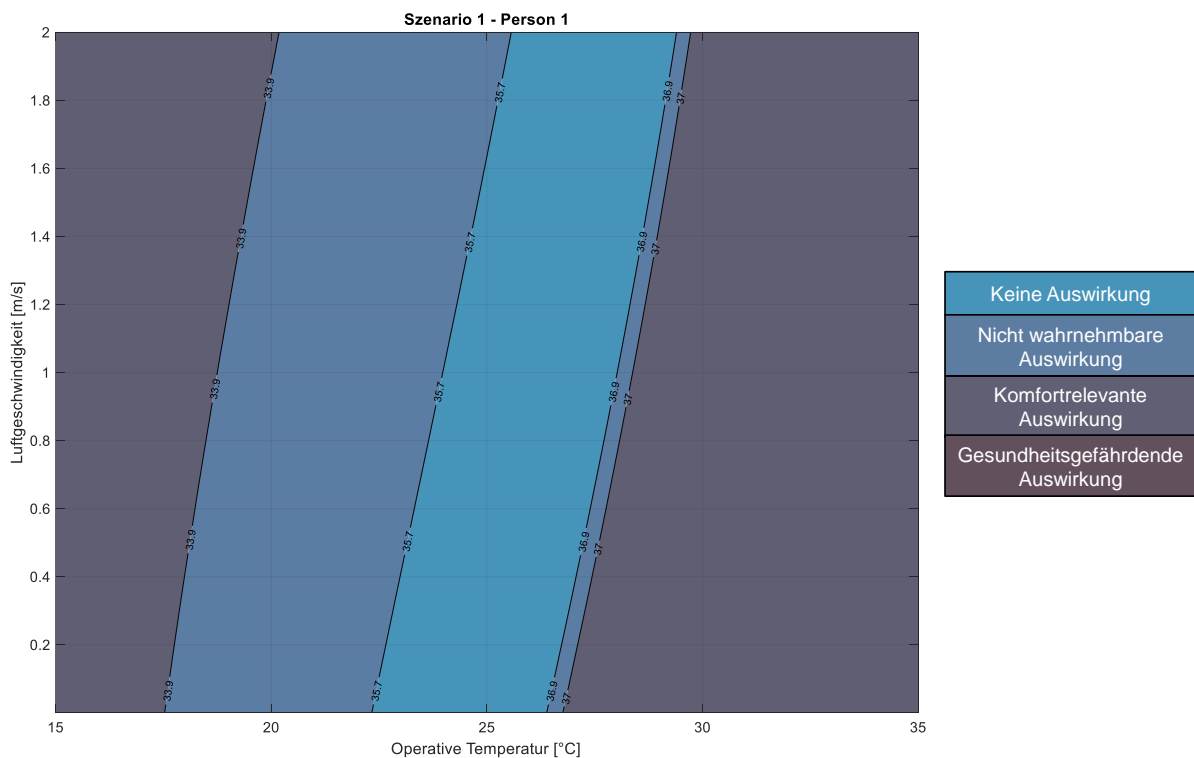


Abbildung 33: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 1 (Szenario 1)

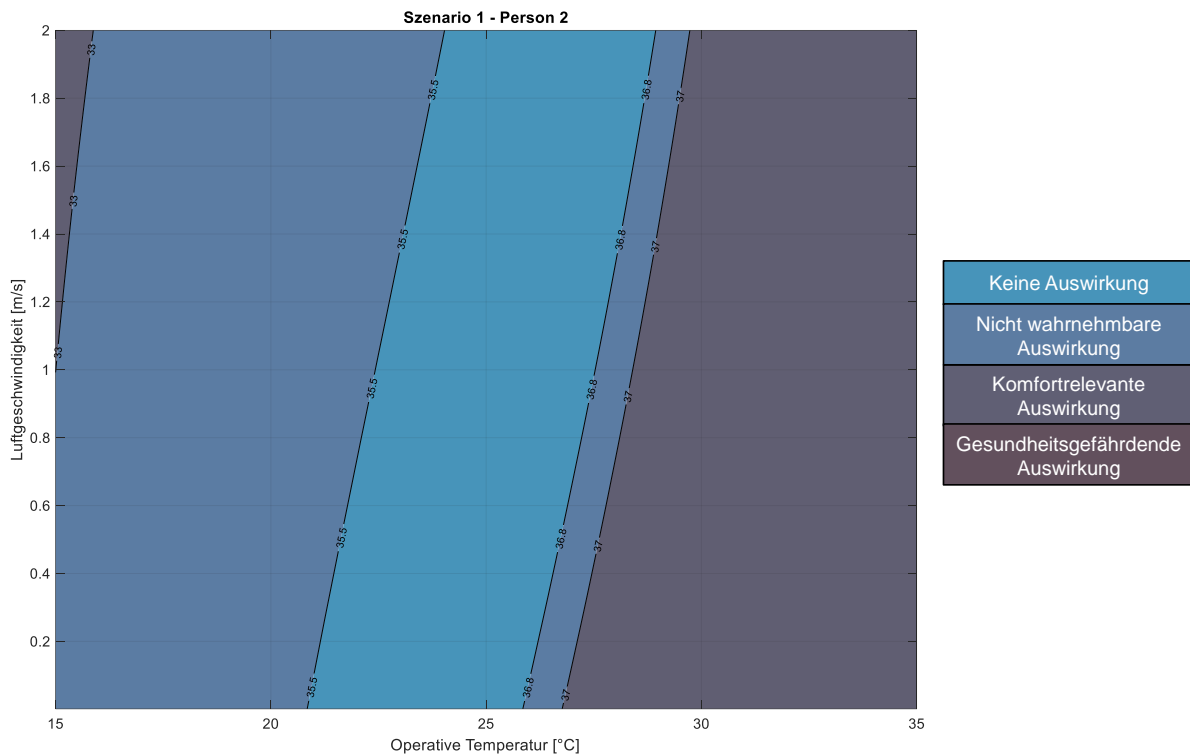


Abbildung 34: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 2 (Szenario 1)

Die Verteilung der Wirkungszonen in Szenario 1 lässt einen deutlichen Unterschied zwischen Person 1 und 2 erkennen. Während bei Person 1 die Zone der komfortrelevanten Auswirkungen hin zu niedrigeren operativen Temperaturen deutlich ausgedehnt ist, ist diese Zone bei Person 2 lediglich bei höheren Luftgeschwindigkeiten und ausschließlich in einem sehr kleinen Bereich vorhanden. Dies führt dazu, dass sowohl die neutrale Zone als auch die Zone der nicht wahrnehmbaren Auswirkungen (Richtung niedrigere und höhere Temperaturen) ausgedehnter sind als bei Person 1. Das bedeutet, dass der thermisch neutrale Zustand bei Person 2 mit einer größeren Auswahl an Kombinationen von Luftgeschwindigkeiten und operativen Temperaturen erreicht werden kann. Die obere Zone der komfortrelevanten Auswirkung in Richtung der höheren operativen Temperaturen ist dagegen nahezu identisch. Außerdem lässt sich erkennen, dass der Grenzwert für diese Zone für beide Personen bei 37 °C mittlerer Körpertemperatur liegt, während die Grenzwerte der anderen Zonen sich unterscheiden und Person 1 im Vergleich zu Person 2 für die Grenze jeder Zone einen höheren Temperaturwert aufweist.

In Szenario 2 wurde der clo-Wert von 0.5 clo auf 1.0 clo erhöht. Dies führt dazu, dass sich die Grenzen der Wirkungszonen weiter nach links verschieben. Ansonsten bleibt die Verteilung der einzelnen Wirkungszonen identisch. Somit hat Person 2 nach wie vor einen größeren Bereich, in welchem sich der Körper in der neutralen Wirkungszone oder in der Zone der nicht wahrnehmbaren Auswirkungen befindet. Die Grenzwerte der einzelnen Wirkungszonen haben sich dagegen nicht verändert.

In Szenario 3 bei einer erhöhten Energieproduktion von 120 W/m² ist im Vergleich zu den vorherigen Szenarien ein deutlicher Unterschied im Verlauf der Grenzen der Wirkungszonen zu erkennen. Bei einer geringen Luftgeschwindigkeit werden die betrachteten Personen bereits bei einer geringen operativen Temperatur von 15 °C schwitzen, um ihre hohe Wärmeproduktion auszugleichen.

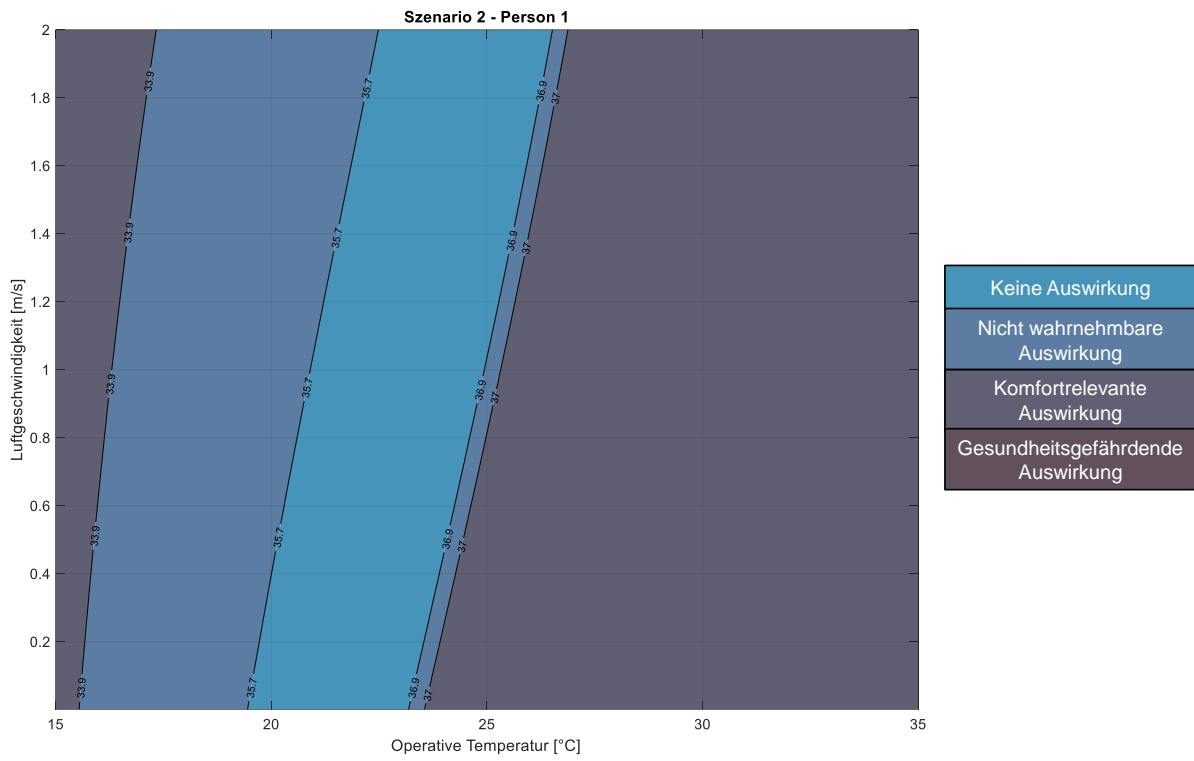


Abbildung 35: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 1 (Szenario 2)

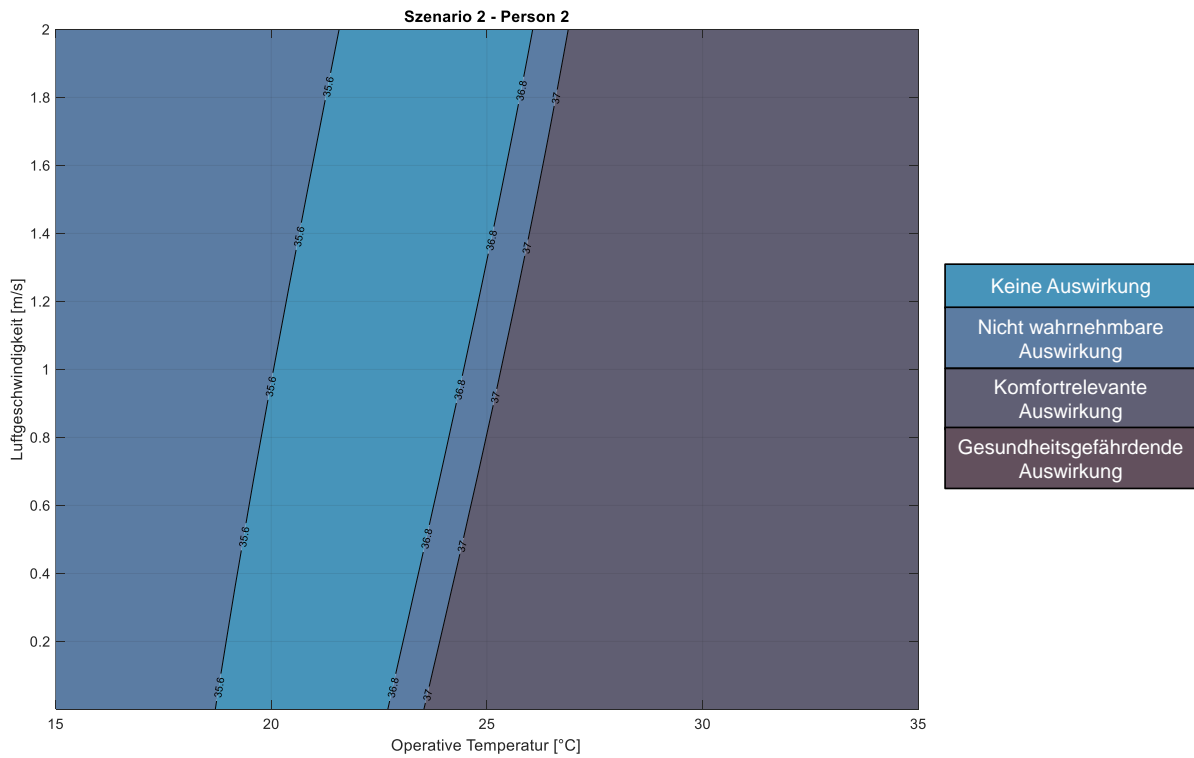


Abbildung 36: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 2 (Szenario 2)

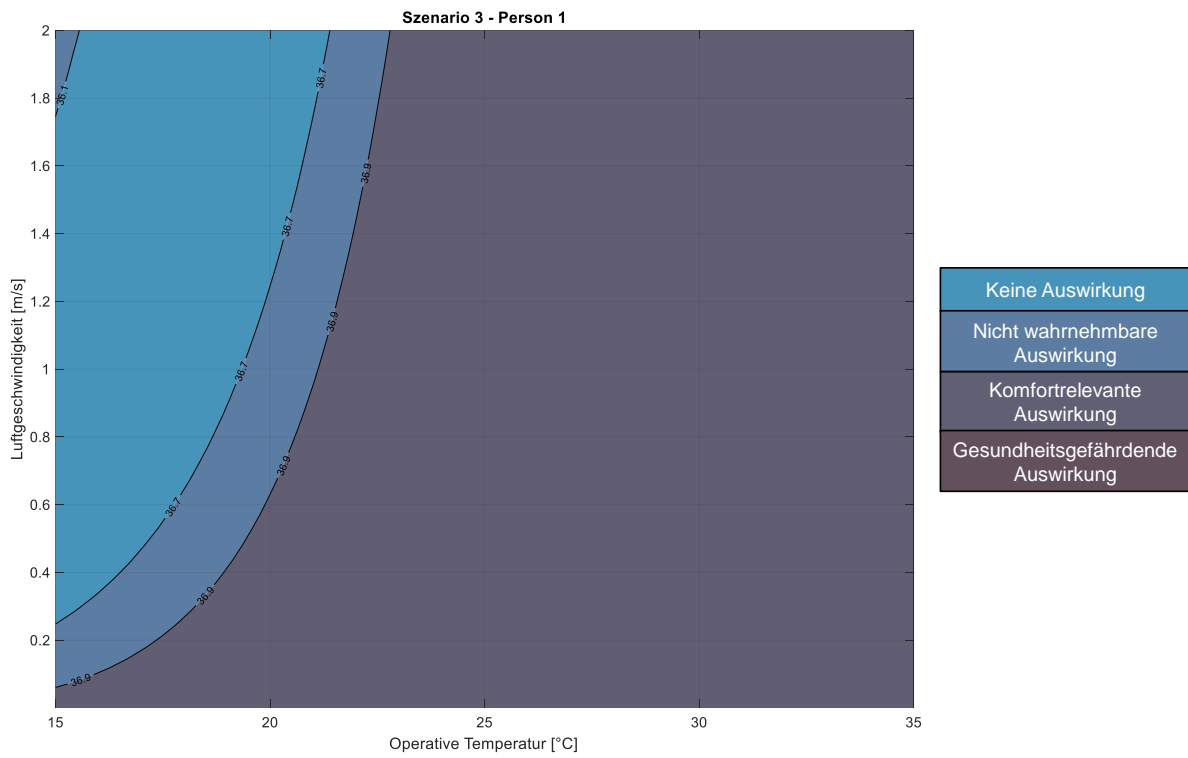


Abbildung 37: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 1 (Szenario 3)

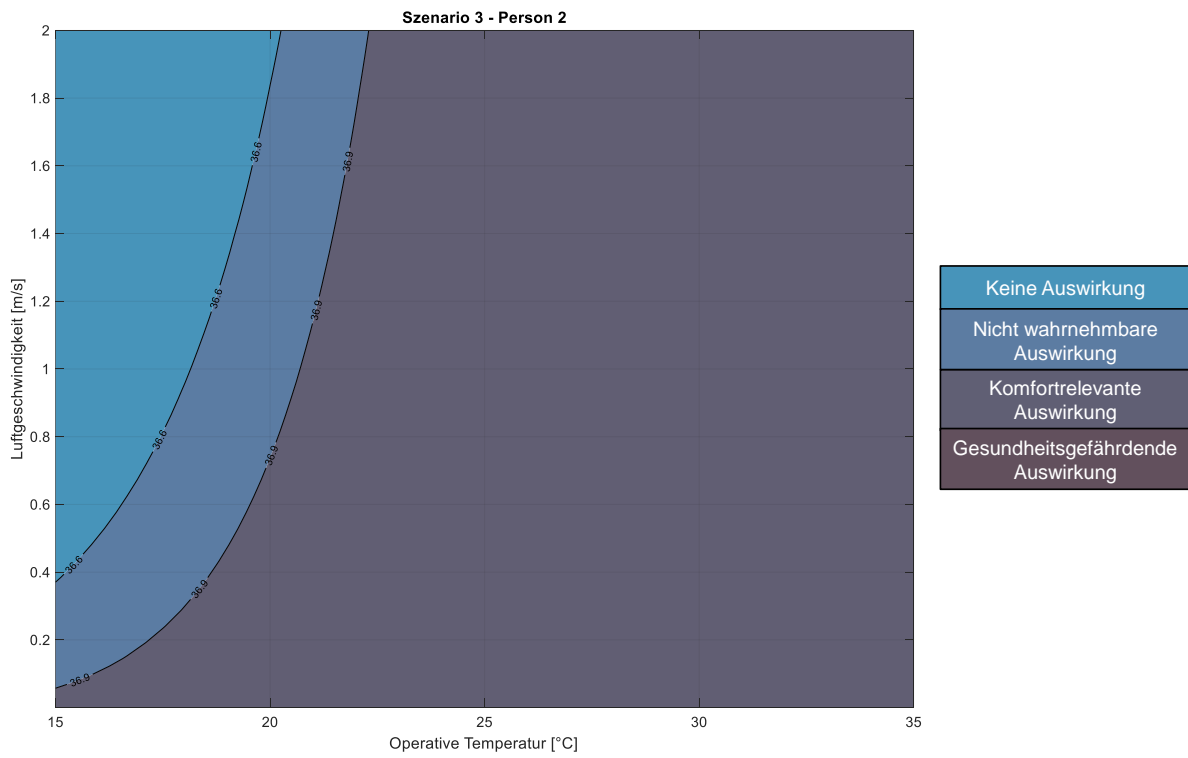


Abbildung 38: Grafische Darstellung der thermischen Wirkungszonen für Person 2 (Szenario 3)

5.3 Wirkungskategorie: Lufthygienische Umgebung

Die zweite betrachtete Wirkungskategorie ist die der lufthygienischen Umgebung. Diese Bezeichnung beschreibt vorerst einen sehr weitgefassten Begriff, da hierzu sowohl die im Stand des Wissens beschriebenen Schadstoffe als auch die Luftfeuchte und mögliche Schimmelpilzsporen zählen können. Wird jedoch der Bezug zu den Chemorezeptoren hergestellt, lässt sich eine klare Abgrenzung festlegen, welcher Bestandteil der Innenraumluft in dieser Wirkungskategorie im Detail beschrieben wird.

Chemorezeptoren lassen sich an unterschiedlichen Stellen im Körper finden. Sie sind unter anderem für die Regulierung der Atemreize verantwortlich und tragen sowohl zum Geruch- als auch zum Geschmackssinn bei. Bei der Beurteilung der Wirkung einer raumklimatischen Umgebung in Bezug auf die Chemorezeptoren, geht es insbesondere um die Beurteilung der Luftqualität. Somit kann an dieser Stelle der Beitrag der Chemorezeptoren am Geschmackssinn bereits vernachlässigt werden, da der Mensch in einer gewöhnlichen Gebäudeumgebung diese nicht schmeckt, sondern höchstens bewusst riecht oder unbewusst die Luftqualität wahrnimmt. Dabei spielt insbesondere die Unterscheidung in die bewusste und die unbewusste Wahrnehmung eine Rolle. Betritt der Mensch einen Raum, in dem er einen unangenehmen Geruch vorfindet, wird er diesen bewusst wahrnehmen und versuchen die Geruchssituation zu verbessern (z. B. Fenster öffnen, Raumspray benutzen, Nase zuhalten). Ist eine Änderung der Geruchssituation nicht möglich, wird er höchstwahrscheinlich versuchen, seinen Aufenthalt in dem entsprechenden Raum so kurz wie möglich zu gestalten. Nimmt der Mensch einen Geruch wahr, dann reagiert einer der ca. 200 bis 400 Sensoren, welche auf spezifische molekulare Strukturen der Partikel in der Luft reagieren. (Silbernagl & Despopoulos, 2012) Dazu kommt die Besonderheit der olfaktorischen Adaptation; diese geschieht innerhalb von Minuten und trägt dazu bei, dass die wahrgenommene Geruchsintensität abnimmt, während zeitgleich die Geruchsschwelle zunimmt (VDI 3882 Blatt 1 (1992) nach Bluysen, 2009).

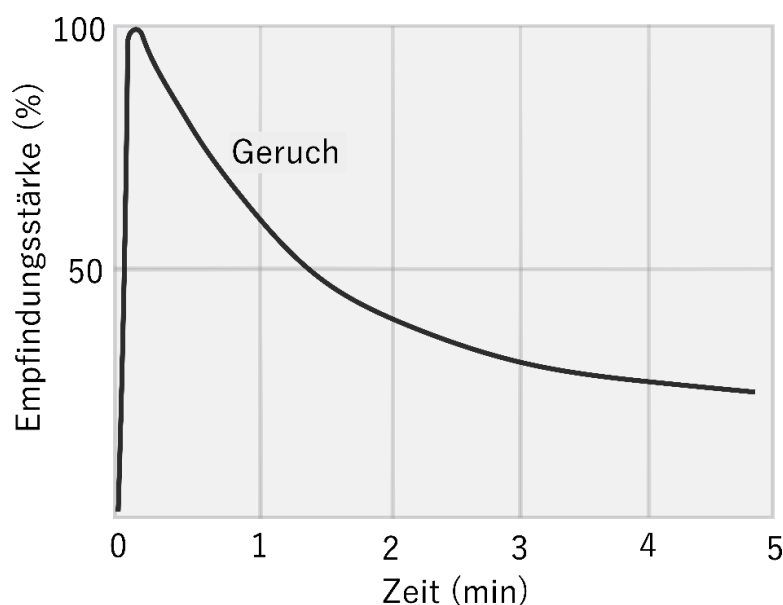


Abbildung 39: Zeitliche Adaptation der Empfindungsstärke von Geruch (nach Silbernagl & Despopoulos, 2012)

Eine einzelne Bewertung der Reaktion jedes duftstoff-spezifischen Sensors unter der zusätzlichen Besonderheit der olfaktorischen Adaptation ist mit dem heutigen Wissen nicht machbar. Aufgrund der bewussten Wahrnehmung der Gerüche und der menschlichen Reaktion (Regelkreis der bewussten Regulation) auf die Empfindung von störenden Gerüchen wird die Auswirkung der Geruchsumgebung auf den Menschen an dieser Stelle aus der Wirkungskategorie der lufthygienischen Umgebung ausgeschlossen. Somit wird für die Beurteilung der Chemorezeption in der raumphysiologischen Bilanz lediglich die Auswirkung einer Umgebung auf die Regulierung der Atemreize und die daraus entstehenden Folgen beschränkt. Beim CO₂ handelt es sich um den wichtigsten Atemreiz für den Menschen (Katschinski, 2019; Powell, 2006) und gleichzeitig um die nach wie vor wichtigste Luftverunreinigung im Innenraum. CO₂ ist die wichtigste Innenraumluftverunreinigung, da diese nicht nur von außen in den Raum gelangt, sondern ebenfalls durch den Menschen im Raum selber gebildet werden kann. Somit kann es insbesondere bei schlecht belüfteten Räumen zu sehr hohen CO₂-Konzentrationen kommen, obwohl es vom Ausschuss für Innenraumschadstoffe klare Richtlinien gibt, welche Konzentrationen in Innenräumen einzuhalten sind. Die Wirkung weiterer möglicher Innenraumschadstoffe wird hier nicht betrachtet; jedoch besteht jederzeit die Möglichkeit, die Methode um weitere Wirkungsindikatoren zu ergänzen und damit ebenfalls weitere Luftschadstoffe zu berücksichtigen.

Nach Bierwirth (2021) ist CO₂ ein toxisches Gas, das häufig übersehen wird; dies bezieht sich nicht ausschließlich auf den Innenraum, sondern zusätzlich auf die steigenden CO₂-Konzentrationen in der Umgebungsluft des Menschen. Im Laufe der Evolution lagen die CO₂-Konzentrationen, denen der Mensch (und seine Ursprungsformen) ausgesetzt waren, bei rund 280 ppm. Mittlerweile erreichen diese Werte über 400 ppm. (Knoll et al., 1996; Duarte, Jaremko & Jaremko, 2020) In diesem Kontext gilt es sich zukünftig mit der Frage zu befassen, bei welchem ppm-Wert das Sicherheitslevel liegt, welches über die Lebensdauer eines Menschen nicht überschritten werden darf, um negative gesundheitliche Auswirkungen vermeiden zu können. (Bierwirth, 2021; Karnauskas, Miller & Schapiro, 2020) Hierzu kann eine detaillierte Betrachtung der Wirkung von CO₂ auf den Menschen in Innenräumen einen entscheidenden Beitrag leisten. Im Folgenden wird der Stand des Wissens der Chemorezeption mit besonderem Fokus auf die CO₂-Produktion im Körper sowie die Ventilation der Lungen dargestellt. Hierbei soll jedoch nicht der vollständige Stand des Wissens dargestellt werden, sondern lediglich die für die Herleitung der raumphysiologischen Bilanz relevanten Aspekte. Demzufolge wird an entsprechenden Stellen ein methodischer Einschub ergänzt.

5.3.1 Stand des Wissens: Chemorezeption

Zu den chemischen Atemreizen, die unter anderem durch die Luftqualität in einer Umgebung bestimmt werden und das Ausmaß der unwillkürlichen Atmung kontrollieren, gehören der arterielle O₂-Druck, der arterielle CO₂-Druck und der pH-Wert des Blutes. (Silbernagl & Despopoulos, 2012; Katschinski, 2019) Eine Veränderung eines einzigen der drei genannten Atemreize kann zu einer Veränderung der Lungenventilation führen. Deswegen wird der Prozess des Atemantriebs als ein rückgekoppelter Atemantrieb der beiden Gase sowie des Blut-pH-Werts bezeichnet. Für einen solchen Prozess braucht es eine Verschaltung, welche in den Glomuszellen (Glomus lat. Knäuel) vorhanden ist. Diese befinden sich sowohl in der Aufgabelung der Halsschlagadern sowie der Wand des Aortenbogens (beides Orte mit einer

sehr hohen Durchblutungsrate). Bei den Glomuszellen handelt es sich im Wesentlichen um sekundäre Sinneszellen, welche eine Veränderung der Atemreize übermitteln. Als sekundäre Sinneszellen stehen die Glomuszellen in synaptischer Verbindung mit afferenten Nervenfasern, die für die Weiterleitung der Aktionspotentiale sorgen. (Katschinski, 2019)

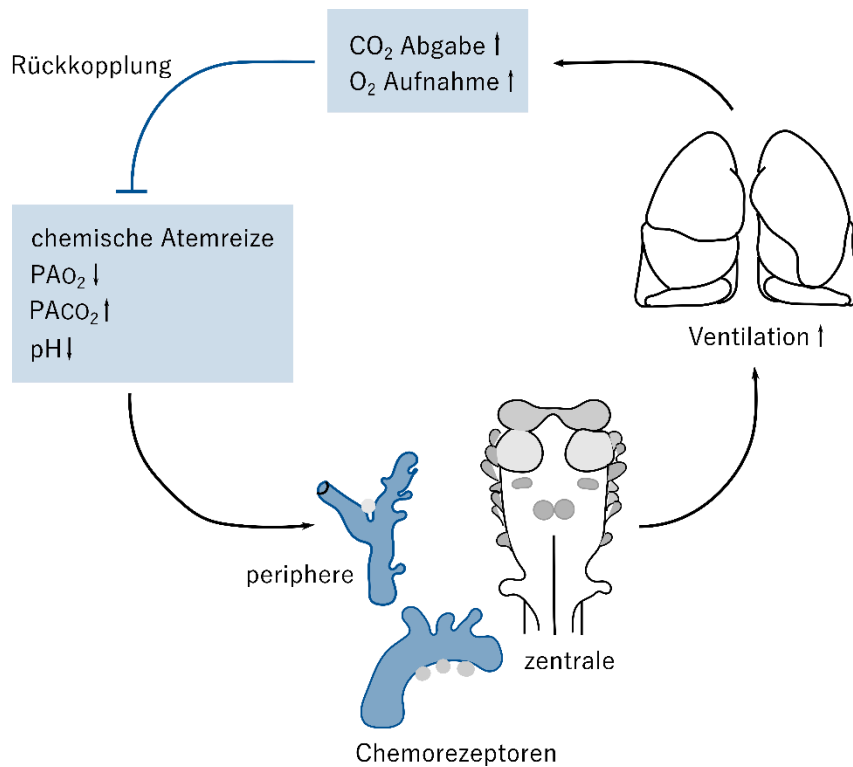
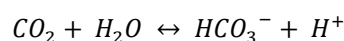


Abbildung 40: Regelkreis der Atmung unter der Kontrolle der Chemosensoren (Katschinski, 2019)

Bei normaler Atmung spielt eine Änderung des arteriellen O_2 -Partialdrucks nur eine untergeordnete Rolle. Trotz der überlebenswichtigen Funktion dieses Gases ist die Ventilation aufgrund der Hämoglobin-Bindung des Sauerstoffs weitestgehend unabhängig hiervon, außer im Falle eines außergewöhnlich hohen Abfalls des O_2 -Partialdrucks. (Lang & Lang, 2007) Der zweite Atemreiz, der Blut-pH-Wert, verändert sich in Abhängigkeit vom arteriellen CO_2 -Partialdruck. Dieser Prozess findet im menschlichen Körper dauerhaft statt, denn zur Erzeugung von Energie verbrauchen die Körperzellen Sauerstoff. Bei dieser chemischen Reaktion wird zeitgleich das Abfallprodukt Kohlenstoffdioxid freigesetzt, welches vom Körper nicht weiterverwendet werden kann. Somit muss jedes aerobe Lebewesen in einem ständigen Wechsel über die Atmung Sauerstoff aus der Umgebungsluft aufnehmen und zeitgleich Kohlenstoffdioxid wieder abgeben. (Kurtz, 2019; Bierwirth, 2020) Das bei der Zellatmung entstandene CO_2 wird auf unterschiedliche Weise im Blut transportiert. Ungefähr 5 % verbleiben in einem gasförmigen Zustand im Blut und können als CO_2 -Partialdruck des Blutes bestimmt werden. Der weitaus größte Teil des Kohlenstoffdioxids diffundiert in die roten Blutkörperchen und wird zu Bicarbonat hydriert. (Adeva-Andany, 2014)



Da der CO₂-Gehalt im Blut maßgeblich durch die Ventilation der Lungen bestimmt wird und das Plasma das hauptsächliche Transportmedium von CO₂ im Blut ist, erhöht sich die Konzentration an Bicarbonat, wenn sich der CO₂-Gehalt erhöht und umgekehrt. Aufgrund der negativen Ladung des Bicarbonats spielt es eine wesentliche Rolle für den Säuregehalt und somit den pH-Wert des Blutes. (Adeva-Andany, 2014) Atmet der Mensch vermehrt CO₂ ein, dann steigt der CO₂-Gehalt im Blut, wodurch sich zeitgleich der Blut-pH-Wert reduziert, umgekehrt sinkt der CO₂-Gehalt im Blut dann steigt der Blut-pH-Wert. (Katschinski, 2019) Ein erhöhter pH-Wert löst wiederum weitere kompensatorische Reaktionen im menschlichen Körper aus, dazu zählen unter anderem eine verstärkte Atmung, um das überschüssige CO₂ aus dem Körper abzuführen, eine erhöhte Säure-Ausscheidung der Nieren, um das Säure-Basen-Gleichgewicht wieder herzustellen und eine Stimulation des Nervensystems, um einer durch die erhöhten pH-Werte ausgelösten Herzkontraktilität und Vasodilatation entgegenzuwirken. (Bierwirth, 2021; Eckenhoff & Longnecker, 1995; Burton, 1978) Dennoch gilt, dass es sich bei dem Blut-pH-Wert zwar um einen wirkungsvolleren Atemreiz handelt als beim arteriellen O₂-Partialdruck, jedoch um einen weniger wirkungsvollen als beim CO₂-Partialdruck.

Somit ist der wichtigste Atemreiz bei gesunden Menschen der arterielle Partialdruck von Kohlenstoffdioxid. (Katschinski, 2019; Powell, 2006; Lang & Lang, 2007) Die ventilatorische Antwort auf eine Abweichung vom Soll-Wert wird durch die arteriellen (auch peripheren) und zentralen Chemorezeptoren kontrolliert. (Powell, 2006) Ähnlich wie bei den Thermorezeptoren lassen sich die Chemorezeptoren somit ebenfalls an unterschiedlichen Stellen im Körper finden und reagieren auf unterschiedliche Reize (analog Kälte-/Wärmerezeptoren). Die peripheren Rezeptoren reagieren auf eine Veränderung des arteriellen Partialdrucks von Kohlenstoffdioxid, während die zentralen Rezeptoren auf eine Veränderung des Partialdrucks von Kohlenstoffdioxid im Gehirn ansprechen, welcher abhängig ist vom Metabolismus und der Ventilation der Lunge. Die Reize auf beide Sensoren haben einen additiven Effekt, wobei ungefähr 70 % der Regulierung der Atmung in Folge von metabolisiertem CO₂ durch die zentralen Chemorezeptoren kontrolliert wird und nur die übrigen 30 % durch die peripheren Sensoren gesteuert werden. (Cherniack & Altose, 2006) Wichtig ist jedoch, dass exogen eingeatmetes CO₂ zu dem gleichen Anstieg des arteriellen Partialdrucks führt wie endogen durch den Metabolismus produziertes CO₂. (Marquaß, 2003)

Nach Ziegler (2020) liegt der normale Wert für PACO₂ bei 40 mmHg. Zusätzlich gibt Smith (2005) einen deutlich größeren normalen PACO₂-Bereich, unabhängig vom Alter zwischen 37 mmHg und 43 mmHg an. Werte unterhalb dieses Bereichs führen zu einer milden (30 mmHg – 37 mmHg), moderaten (26 mmHg – 29 mmHg) oder schweren (\leq 25 mmHg) Hypokapnie. Werte oberhalb des neutralen Bereichs führen somit zu einer milden (44 mmHg – 50 mmHg), moderaten (51 mmHg – 60 mmHg) oder schweren (> 60 mmHg) Hyperkapnie. Gleichzeitig führt eine Hypokapnie zu einem Anstieg des Blut-pH-Werts; umgekehrt reduziert eine Hyperkapnie den Blut-pH-Wert. Der neutrale Blut-pH-Wert liegt nach Smith (2005) bei 7.37 – 7.43 [-]. Liegt der pH-Wert oberhalb dieses Bereichs führt dies zu einer Alkalose, unterhalb dieses Bereichs kommt es zu einer Übersäuerung des Blutes.

Umso höher das Atemzugvolumen und die Atemfrequenz sind, desto mehr CO₂ wird aus den Lungen abgeatmet, wodurch die Hypokapnie entsteht. Jedoch gilt es hier zu unterscheiden zwischen der Hyperventilation und der Mehrventilation. Eine Hyperventilation wird durch die atemregulierenden Neuronen aktiviert, während es sich bei einer Mehrventilation um eine angepasste Steigerung bei

körperlicher Anstrengung handelt. Somit handelt es sich bei der Mehrventilation um eine kompensatorische Maßnahme des Körpers, die erwünscht ist, während die Hyperventilation eine über den Bedarf gesteigerte Ventilation ist. (Lang & Lang, 2007)

5.3.1.1 CO₂-Produktion im Körper

Entscheidend für die Regulierung der Atmung ist nicht nur der CO₂-Gehalt der Luft, sondern ebenfalls die CO₂-Produktion im menschlichen Körper. Diese wird bereits teilweise in Studien zur Innenraum-Luftqualität genutzt; allerdings wurden bislang keine individuellen Parameter zur Bestimmung der CO₂-Produktion berücksichtigt. Persily und Jonge (2016) liefern einen ersten Ansatz, welcher sowohl die Umgebungsbedingungen als auch individuelle Personendaten berücksichtigt, um die CO₂-Produktion von einzelnen Personen im Detail bestimmen zu können.

Nach Persily und Jonge (2016) kann die CO₂-Produktion [L/s] anhand von Gleichung 43 bestimmt werden. Dabei wird der Grundumsatz (GRU) [MJ/ Tag], die metabolische Rate m [met], die Lufttemperatur T_a [°C] und der Luftdruck P [kPa] berücksichtigt.

$$V_{CO_2} = RQ * GRU * m * \frac{273.15 + T_a}{P} * 0.000211 \left[\frac{L}{s} \right] \quad (43)$$

Der Grundumsatz beschreibt den Energieverbrauch des Körpers, welcher dieser zum Überleben benötigt (Zellfunktionen und Erneuerung, Aufrechterhaltung der Körperkerntemperatur, Gehirn, kardiale und respiratorische Funktion). Damit macht der Grundumsatz zwischen 45 % und 70 % des täglichen Energieverbrauchs aus. (Persily & Jonge, 2016) Der Grundumsatz repräsentiert somit das Geschlecht, das Alter, die Größe, den Körperbau und das Fitnesslevel (prozentualer Muskelanteil) der betrachteten Person. Persily und Jonge (2016) beziehen sich hierfür auf den Bericht der FAO *Food and Nutrition Technical Report Series* (2001), welche sich wiederum auf die Ergebnisse von Schofield (1985) berufen. Daneben existieren zahlreiche weitere Berechnungsformeln, wobei insbesondere auf Kleiber (1967) und die Harris-Benedict Formeln, beschrieben nach Höppe (1984), hinzuweisen ist, da diese zur Bestimmung des Grundumsatzes sowohl das Geschlecht, die Größe, das Gewicht und das Alter berücksichtigen.

Abbildung 41 zeigt den Grundumsatz in Abhängigkeit vom Alter; hierbei wurden jedoch ausschließlich eine Frau mit einer Größe von 1.70 m und 65 kg Körpergewicht sowie ein Mann mit einer Größe von 1.85 m und einem Gewicht von 85 kg berücksichtigt. Es lässt sich erkennen, dass die Ergebnisse sowohl für Frauen als auch für Männer jeweils in einem ähnlichen Wertebereich liegen.

Ein weiterer Einflussfaktor für die CO₂-Produktion im menschlichen Körper stellt die Zusammensetzung der Ernährung dar. Der Mensch verbraucht Sauerstoff, während er gleichzeitig Kohlenstoffdioxid produziert; dabei bestimmt der respiratorische Quotient, wie diese beiden Größen im Verhältnis zueinanderstehen. (Parsons, 2014) Bischoff und Voit (1860) haben sich bereits im 19. Jahrhundert damit befasst, wie sich unterschiedliche Nährstoffe auf den kalorischen und den respiratorischen Gasaustausch auswirken. Dabei kamen sie bereits damals zu dem Schluss, dass die Verbrennung jedes einzelnen Nährstoffs durch eine eigene chemische Reaktion beschrieben wird. Die entsprechenden Oxidierungsgleichungen sind nachzulesen in Persily und Jonge (2016).

Der respiratorische Quotient (RQ) ergibt sich aus dem Verhältnis des verbrauchten Sauerstoffs zu dem produzierten Kohlenstoffdioxid. Somit ergibt sich für die Verbrennung von einer Mol Kohlehydrat ein RQ von 1.0 [-] und einer Mol Fett ein RQ von 0.7 [-]. (Parsons, 2014; Persily & Jonge, 2016; Herman, 2016) Für eine gewöhnliche Mischkost aus Kohlenhydraten, Fett und Proteinen wird ein RQ von 0.85 angesetzt (Parsons, 2014).

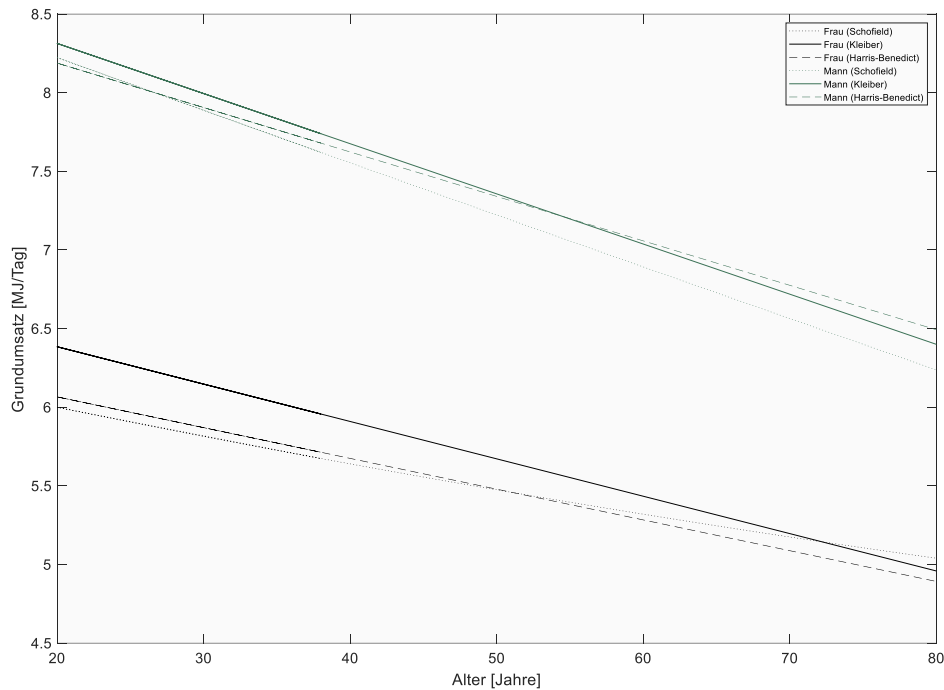


Abbildung 41: Berechnung des Grundumsatzes in Abhängigkeit vom Alter nach Schofield (1895), nach Kleiber (1967) und nach Harris-Benedict (nach Höppe, 1984)

Sämtliches CO₂, das im Körper produziert wird, muss der Mensch an seine Umgebung abgeben; daher gilt der Grundsatz:

$$CO_2 - \text{Produktion} = CO_2 - \text{Abgabe}$$

Dieser Austausch an CO₂ findet in den Lungenalveolen statt. Dabei wird insbesondere die alveoläre und somit auch die arterielle Gaskonzentration durch die alveoläre Ventilation bestimmt. (Kurtz, 2019)

Es gilt außerdem, dass die Differenz zwischen der CO₂-Menge, die von außen in die Alveolen eintritt und der von den Alveolen abgegebenen CO₂-Menge gleichzusetzen ist, mit der CO₂-Produktion im Körper und somit auch der CO₂-Abgabe des Körpers. (Kurtz, 2019) Somit hat die folgende Gleichung 44 ihre Gültigkeit.

$$CO_2 - \text{Produktion} = \dot{V}_A * \frac{PA_{CO_2} - P_{CO_2 \text{Luft}}}{P_{mmHg}} \left[\frac{L}{s} \right] \quad (44)$$

5.3.1.2 Alveoläre Ventilation

Der letzte fehlende Parameter in Gleichung 44 ist die alveoläre Ventilation, welche sich auf die Atmung und damit die Lungenfunktion von individuellen Personen bezieht. Diese berechnet sich aus dem Atemzugvolumen AZU [L/min], dem Totraumvolumen V_T [L/min] und der Atemfrequenz A_f [Atemzüge/min]. (Kurtz, 2019)

$$\dot{V}_A = (AZU - V_T) * A_f \left[\frac{L}{min} \right] \quad (45)$$

Das Atemzugvolumen [L/min] beschreibt die Volumenänderung zwischen Inspiration und Expiration. Dieses beträgt bei einem Erwachsenen mit ruhiger Atmung circa 0.5 L/min. Das Atemzugvolumen macht damit aber nur einen sehr geringen Teil der gesamten Lungenkapazität aus, welche bei einem jungen Mann circa 6 Liter beträgt. Die totale Lungenkapazität setzt sich wiederum aus der Vitalkapazität und der Residualkapazität zusammen. Die Vitalkapazität repräsentiert das maximale Volumen, das nach maximaler Einatmung ausgeatmet werden kann, und setzt sich zusammen aus dem Atemzugvolumen sowie dem inspiratorischen und expiratorischen Reservevolumen. Diese beschreiben die maximale Ein- und Ausatmung durch im Ruhezustand forciertes Ein- und Ausatmen. Nach maximaler Ausatmung ist die Lunge jedoch nicht luftleer, sondern es verbleibt das sogenannte Residualvolumen, welches verhindert, dass die Lunge kollabiert. Während die totale Lungenkapazität mit zunehmendem Alter geringfügig zunimmt, ändert sich das Verhältnis von Vitalkapazität zu Residualvolumen deutlich. So vergrößert sich insbesondere im Alter über 50 Jahre die Residualkapazität wesentlich, was dazu führt, dass die Vitalkapazität sich verringert. Neben der Veränderung mit dem Alter ist die Vitalkapazität abhängig von der Größe eines Menschen, vom Geschlecht und dem Trainingszustand. Zur Bestimmung des Atemzugvolumens wird die funktionale Residualkapazität (FRC) benötigt, welche sich aus dem expiratorischen Reservevolumen und dem Residualvolumen zusammensetzt. Mit einer Spirometrie lassen sich diese unterschiedlichen Volumina für jede Person bemessen. (Kurtz, 2019; Lang & Lang, 2007) Da eine solche Messung im Rahmen der raumphysiologischen Bilanz unrealistisch erscheint, ist es an dieser Stelle durchaus sinnvoll, auf Normwerte zurückzugreifen, die lediglich das Geschlecht, die Größe [m], das Alter [Jahre] und das Gewicht [kg] berücksichtigen (Warliah, Rohman & Rusmin, 2012).

$$\text{Männer } FRC = 7.502 * GR + 0.009 * Al - 0.033 * GE - 7.608 [L] \quad (46)$$

$$\text{Frauen } FRC = 5.867 * GR + 0.009 * Al - 0.022 * GE - 5.972 [L] \quad (47)$$

Das Atemzugvolumen kann wiederum als Prozentsatz der funktionalen Residualkapazität angegeben werden und beträgt nach Duhm (1984) 15 % – 20 %. Bei diesem Atemzugvolumen handelt es sich jedoch ausschließlich um das Atemzugvolumen bei ruhigen Aktivitäten. Bei Anstrengung wird sich das Atemzugvolumen erhöhen und kann nicht mehr anhand der funktionalen Residualkapazität bestimmt

werden. Zusätzlich zur funktionalen Residualkapazität werden für die Berechnung der alveolären Ventilation das Totraumvolumen und die Atemfrequenz benötigt.

Der Totraum setzt sich zusammen aus dem anatomischen und dem funktionellen Totraum. Ersterer bezeichnet den Teil der Lunge zwischen der Trachea und den Bronchien, in dem kein Gasaustausch stattfindet. Der funktionelle Totraum bezeichnet dagegen die Alveolen, die zwar belüftet werden, jedoch aufgrund von schlechter Durchblutung nicht am Austausch von Gas beteiligt sind. Bei einem Erwachsenen umfasst dieses Volumen circa 150 ml oder 30 % des Atemzugvolumens bei ruhiger Atmung. (Kurtz, 2019) Als letzter zu bestimmender Parameter wird die Atemfrequenz benötigt. Diese verändert sich in Abhängigkeit von der Anstrengung, da der Körper bei erhöhter Anstrengung mehr Energie verbraucht, für die er Sauerstoff verbrennen muss. (Richter, 2010) Ein möglicher Zusammenhang zwischen der Anstrengung und der sich ergebenden Atemfrequenz wurde nach Stielow (2015) abgebildet.

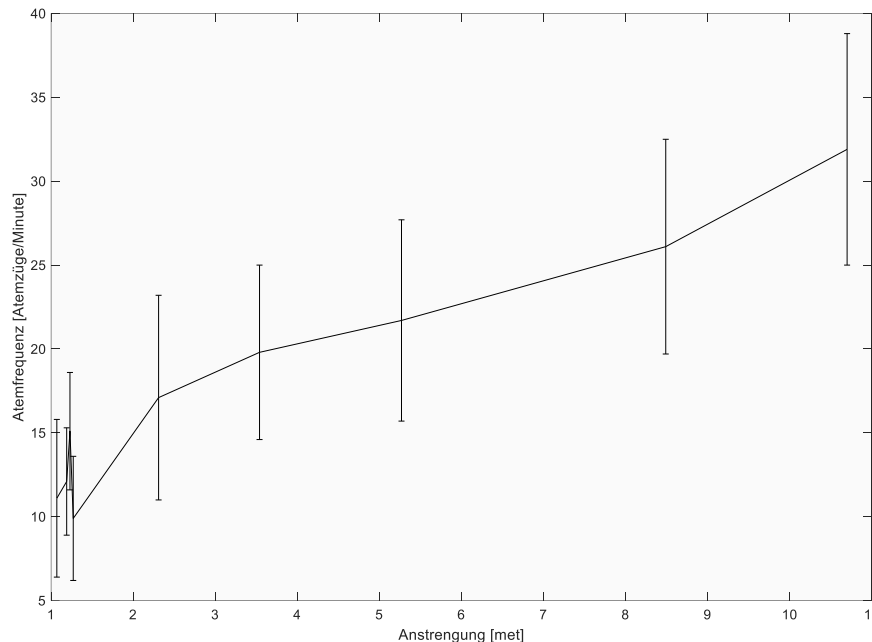


Abbildung 42: Verhältnis zwischen der Atemfrequenz und der körperlichen Anstrengung (Stielow, 2015)

Die bisher beschriebenen Berechnungsgrundlagen der alveolären Ventilation gelten nur, solange sich die betrachtete Person im Ruhezustand befindet. Für alle weiteren Situationen, in denen der met-Wert größer als 1 wird, müssen das Atemzugvolumen und das Totraumvolumen neu bestimmt werden. Auf diesem Gebiet gibt es jedoch nur sehr wenige zur Verfügung stehende Daten, da sich die meisten Studien mit der Beatmung von Patienten oder der Lungenfunktion von erkrankten Personen befassen, welche in Ruhe beatmet werden müssen. Lediglich Godehardt (2017) zusammen mit Dubowy et al. (2008) liefern einen validen Ansatz, mit dem die Bestimmung des Atemzugvolumens ebenfalls unter Belastung möglich ist. Godehardt (2017) beschreibt das Atemzugvolumen in drei verschiedenen Zuständen: dem basalen Atemzugvolumen, welches bereits aus der funktionalen Residualkapazität bestimmt werden konnte, dem Atemzugvolumen an der ventilatorischen Schwelle und dem Peak-Atemzugvolumen. Letzteres dient als Grundlage zur Bestimmung des Atemzugvolumens unter Belastung. Die genauen Daten lassen sich aus Tabelle A 11 (Godehardt, 2017, S. 130) auslesen.

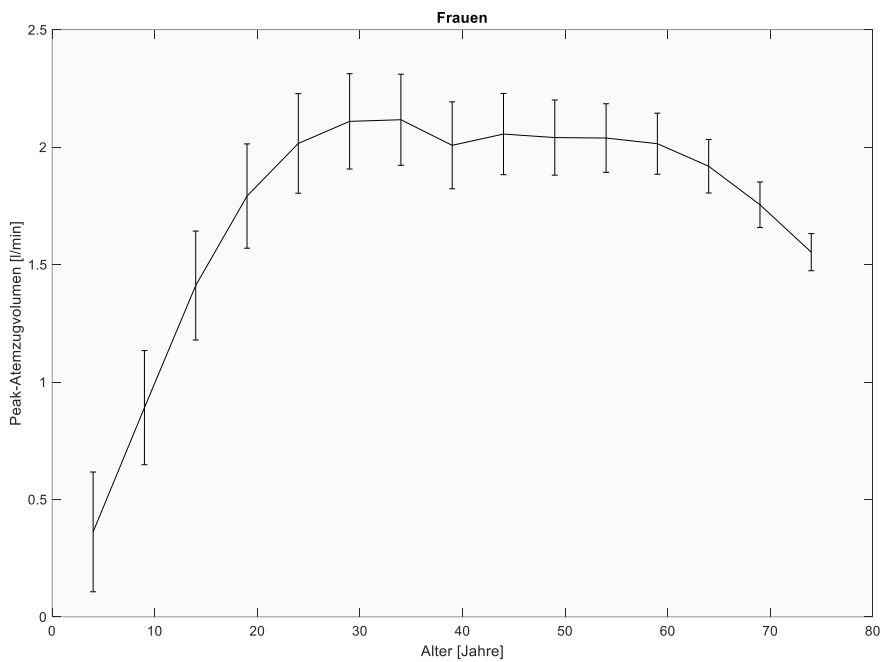


Abbildung 43: Verhältnis zwischen dem Peak-Atemzugvolumen und dem Alter von Frauen (Godehardt, 2017)

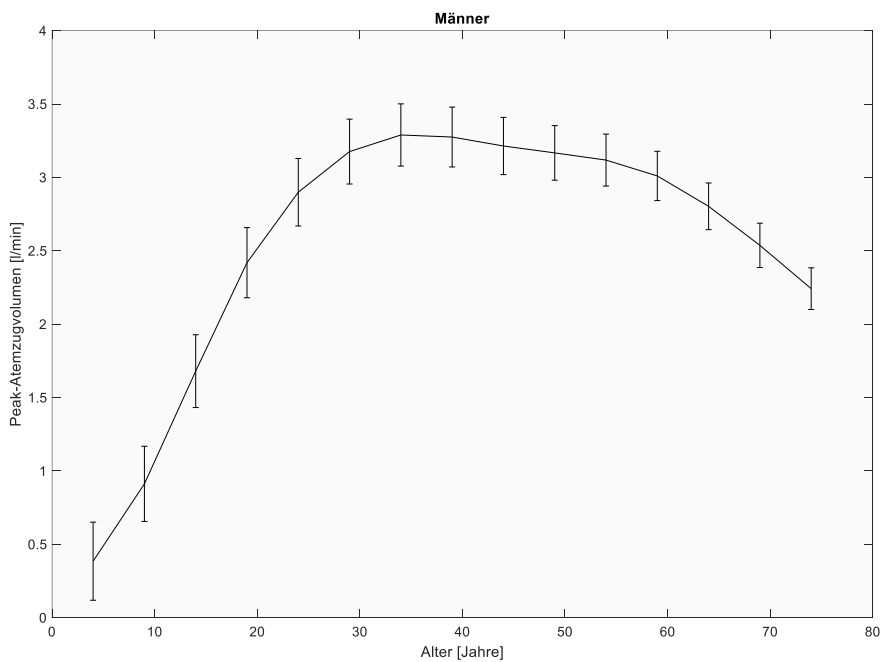


Abbildung 44: Verhältnis zwischen dem Peak-Atemzugvolumen und dem Alter von Männern (Godehardt, 2017)

Die alleinige Bestimmung des Peak-Atemzugvolumens ist für eine Anwendung dieser Daten in der raumphysiologischen Bilanz nicht ausreichend. Um die Daten von Godehardt (2017) verwenden zu können, muss dieses Peak-Atemzugvolumen einem bestimmten met-Wert zugeordnet werden. Dieser ergibt sich aus der maximalen Sauerstoffaufnahme [ml/(kg min)], welche sich in Abhängigkeit von der Lungenkapazität und somit dem Alter verändert. (Dubowy et al., 2008) Zusätzlich stellt die Sauerstoffaufnahme einen direkten Bezug zum met-Wert dar. (Gagge, Burton & Bazett, 1941)

$$1 \text{ met} = 58 \frac{W}{m^2} = 3.5 \frac{ml O_2}{kg \text{ min}}$$

Aus den Daten nach Dubowy et al. (2008) lassen sich die Peak-Sauerstoffaufnahme sowohl für Männer und Frauen auslesen und somit die met-Werte bestimmen, welche den Peak-Atemzugvolumina zuzuordnen sind.

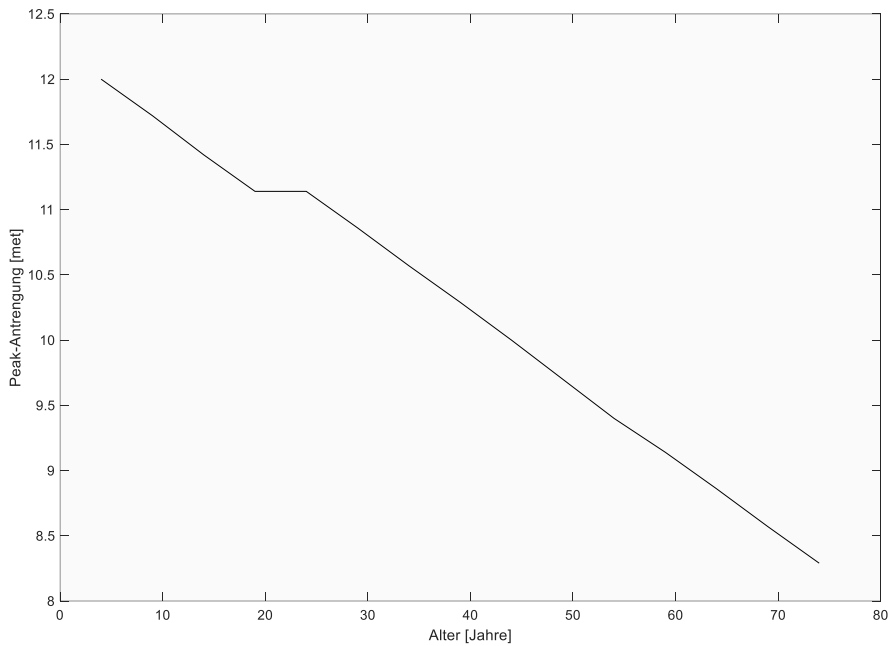


Abbildung 45: Verhältnis zwischen der Peak-Anstrengung und dem Alter von Frauen (Dubowy et al., 2008)

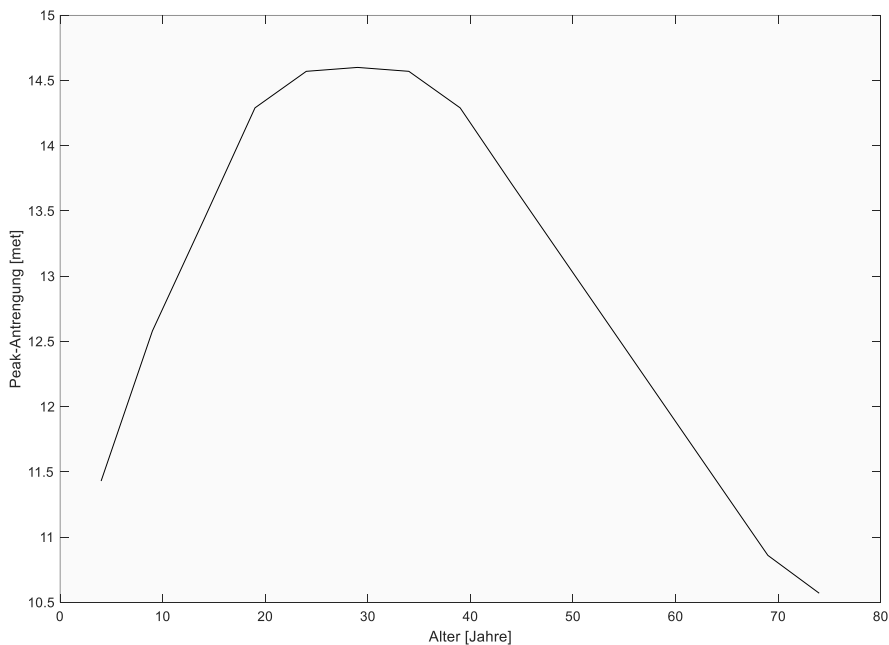


Abbildung 46: Verhältnis zwischen der Peak-Anstrengung und dem Alter von Männern (Dubowy et al., 2008)

Neben dem Atemzugvolumen verändert sich ebenfalls das Totraumvolumen in Abhängigkeit von der Anstrengung, da dieses direkt mit dem Atemzugvolumen zusammenhängt. Die entsprechenden Zusammenhänge werden in Asmussen und Nielsen (1957) sowie Stegemann und Heinrich (1967) erfasst und sind in Abbildung 47 grafisch dargestellt.

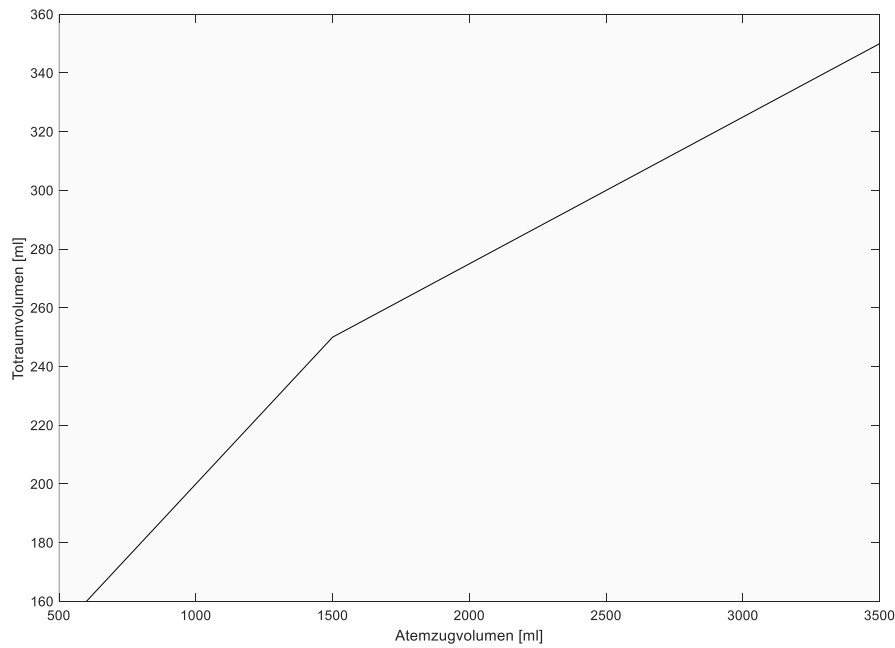


Abbildung 47: Verhältnis zwischen dem Atemzugvolumen und dem Totraumvolumen in Ruhe und unter Anstrengung (Asmussen & Nielsen, 1957; Stegemann & Heinrich, 1967)

5.3.2 Definition des lufthygienischen Wirkungsindikators und der Wirkungszonen

Die drei wichtigsten Atemreize des Menschen sind der arterielle O_2 -Partialdruck, der Blut-pH-Wert und der arterielle CO_2 -Partialdruck. Alle drei wurden im Stand des Wissens beschrieben. Da jedoch bei einer gesunden Atmung die Veränderung des arteriellen O_2 -Partialdrucks nur eine untergeordnete Rolle spielt und sich der Blut-pH-Wert direkt aus dem arteriellen CO_2 -Partialdruck ergibt, kann letzterer als der wichtigste Atemreiz des Menschen beschrieben werden. Als solcher wird dieser als Wirkungsindikator zur Bewertung der Auswirkungen der lufthygienischen Umgebung des Menschen herangezogen. Zur Veränderung des arteriellen CO_2 -Partialdrucks trägt neben der CO_2 -Produktion im menschlichen Körper auch der Anstieg oder der Abfall der CO_2 -Konzentration im Innenraum bei. Es handelt sich somit um eine Ursache-Wirkungs-Kette, die mithilfe eines Wirkungsindikators bewertbar ist. Der Elementarstrom, welcher sich aus der Sachbilanz ergibt, stellt in diesem Fall die CO_2 -Konzentration in der Innenraumluft dar.

Ausgehend von den im Stand des Wissens beschriebenen Grenzwerten der einzelnen Zonen kann angenommen werden, dass sich der Körper lediglich bei einem arteriellen CO_2 -Partialdruck von 40 mmHg in einem neutralen Zustand befindet. Der Bereich von 37 mmHg bis 43 mmHg ist deutlich weiter gefasst, so dass es in diesem Bereich bereits Veränderungen im Körper geben muss, die auf die erhöhte oder

geminderte CO₂-Konzentration zurückzuführen sind. Somit wird der Körper in diesem Bereich auf seine Umgebung reagieren jedoch, ohne dass der Mensch dies bewusst wahrnehmen kann. Eine schwere Hyperkapnie (> 60 mmHg) führt zu Bewusstseinstörungen und in Extremfällen zu einer CO₂-Narkose. Somit handelt es sich hierbei um gesundheitsgefährdende Auswirkungen. Jedoch sind Werte über 50 mmHg bereits als gesundheitsschädlich einzustufen. (Buscher, 2021) Eine milde Hyperkapnie zeichnet sich dagegen durch Kopfschmerzen, Müdigkeit, Trägheit und möglicherweise Kurzatmigkeit aus. (Brody, 2021) Somit bleiben zur Bewertung von erhöhten CO₂-Werten lediglich zwei Wirkungskategorien übrig, die komfortrelevanten Auswirkungen (44 mmHg – 50 mmHg) und die gesundheitsgefährdenden Auswirkungen (> 50 mmHg).

Bei der Anwendung der raumphysiologischen Bilanz ist eine Reduktion des PACO₂ grundsätzlich auf eine Mehrventilation infolge von Anstrengung und nicht eine Hyperventilation zurückzuführen. Ein deutlich reduzierter PACO₂-Wert führt zu einer Verringerung der Gehirndurchblutung und kann demzufolge zu Schwindel und zu einem Zusammenbruch führen. Eine solche Auswirkung ist jedoch erst unterhalb von 30 mmHg zu erwarten. Ab einem Wert von 35 mmHg kann eine leichte Hypokapnie eintreten. (Haber, 2013) Diese wird, sofern es sich um eine leichte Hypokapnie handelt, den komfortrelevanten Auswirkungen zugeordnet. Somit ergibt sich die gleiche Einteilung wie bei erhöhten PACO₂-Werten. Komfortrelevante Auswirkungen reichen bis zu einem PACO₂-Wert von 30 mmHg; verringert sich dieser Wert weiter ist mit gesundheitsgefährdenden Auswirkungen zu rechnen.

Anhand der beschriebenen Aufteilung lassen sich die in Abbildung 48 dargestellten Wirkungszonen ableiten. Die neutrale Zone wurde auf den Bereich von 39 mmHg bis 41 mmHg erweitert, da es im Körper immer zu Schwankungen kommen wird, womit eine Begrenzung dieser Zone ausschließlich auf den Wert 40 mmHg zu eng gefasst erscheint.

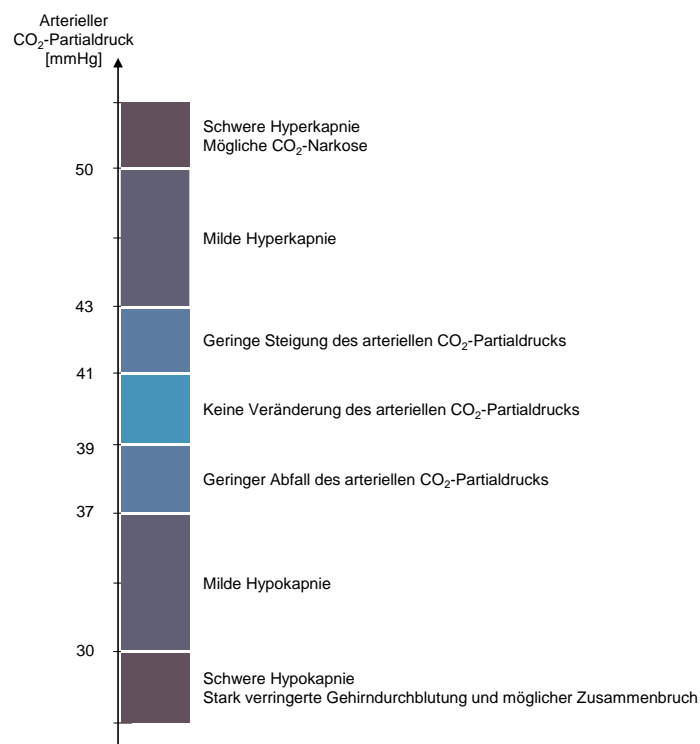


Abbildung 48: Wirkungszonen der luftthygienischen Umgebung

Eine Einteilung der Auswirkungen anhand des pH-Werts wäre ebenfalls denkbar, jedoch ist hier der direkte Ursache-Wirkungs-Zusammenhang, der eine Zuordnung zu den Wirkungszonen ermöglicht, nicht gegeben. Aus diesem Grund wurde sich für den arteriellen CO₂-Partialdruck entschieden, welcher sich entsprechend der für die vorliegende Methode definierten Wirkungszonen einteilen lässt.

5.3.3 Herleitung des lufthygienischen Wirkungsmechanismus

Zur Herleitung des Wirkungsmechanismus der lufthygienischen Umgebung müssen die Atemprozesse des Menschen betrachtet werden. Der Mensch atmet exogenes CO₂ ein und zeitgleich endogen durch den Energieverbrauch produziertes CO₂ wieder aus. Stimmt das Verhältnis von eingeatmetem zu ausgeatmetem CO₂ nicht mehr überein, dann wird sich der arterielle CO₂-Partialdruck verändern. Somit ist es für den Wirkungsmechanismus entscheidend, sowohl die CO₂-Produktion im menschlichen Körper als auch die Atemprozesse anhand der Funktion und der Kapazität der Lunge quantifizieren zu können. In einem ersten Schritt muss die menschliche CO₂-Produktion bestimmt werden. Diese ergibt sich entsprechend Gleichung 43 aus der Lufttemperatur und dem Luftdruck sowie den individuellen Einflüssen des Grundumsatzes und des respiratorischen Quotienten.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Berechnungsergebnisse der Veränderung des Grundumsatzes mit zunehmendem Alter, mit unterschiedlichen Berechnungsansätzen (Schofield, 1895; Kleiber, 1967; Harris-Benedict nach Höpfe, 1984) wird dem Ersteller der raumphysiologischen Bilanz die Entscheidung überlassen, welches der Modelle er in seiner Bilanz nutzen will.

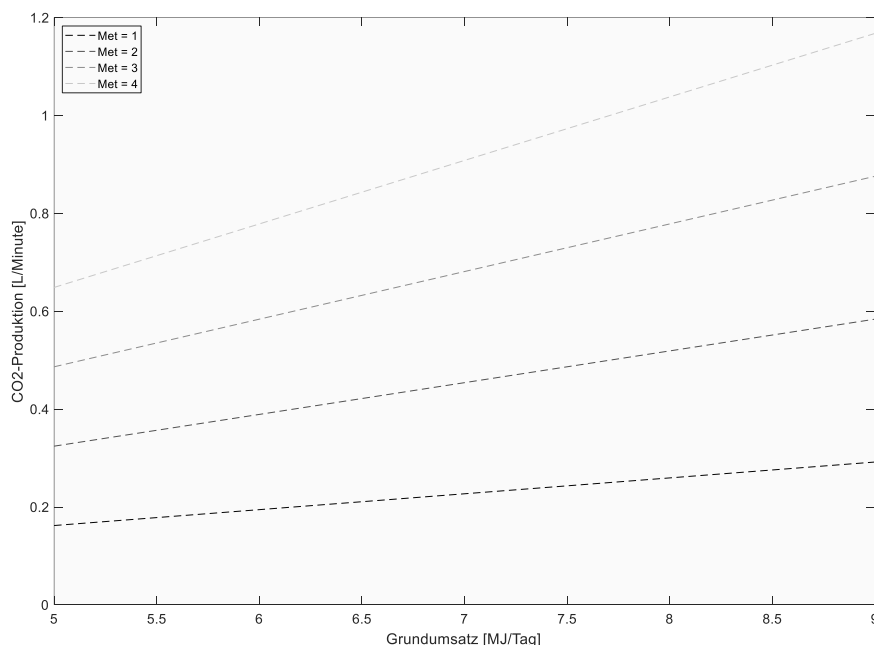


Abbildung 49: Verhältnis des Grundumsatzes zur CO₂-Produktion im menschlichen Körper in Abhängigkeit von der metabolischen Rate

Dies wird zusätzlich durch den vergleichsweise geringen Einfluss des Grundumsatzes auf die CO₂-Produktion begründet, welcher aus Abbildung 49 hervorgeht. Die metabolische Rate hat im Vergleich zum Grundumsatz einen deutlich größeren Einfluss auf die CO₂-Produktion. So verändert sich die

CO₂-Produktion bei einem konstanten met-Wert von 1.0 mit steigendem Grundumsatz nur von 0.16 L/s zu 0.29 L/s, während die CO₂-Produktion bei einem met-Wert von 4.0 bei einem Grundumsatz von 5 MJ/Tag bei 0.64 L/s liegt und bei einem Grundumsatz von 9 MJ/Tag bei 1.17 L/s liegt. Daraus kann geschlossen werden, je höher der met-Wert, desto größer wird der Einfluss des Grundumsatzes in der Berechnung der CO₂-Produktion.

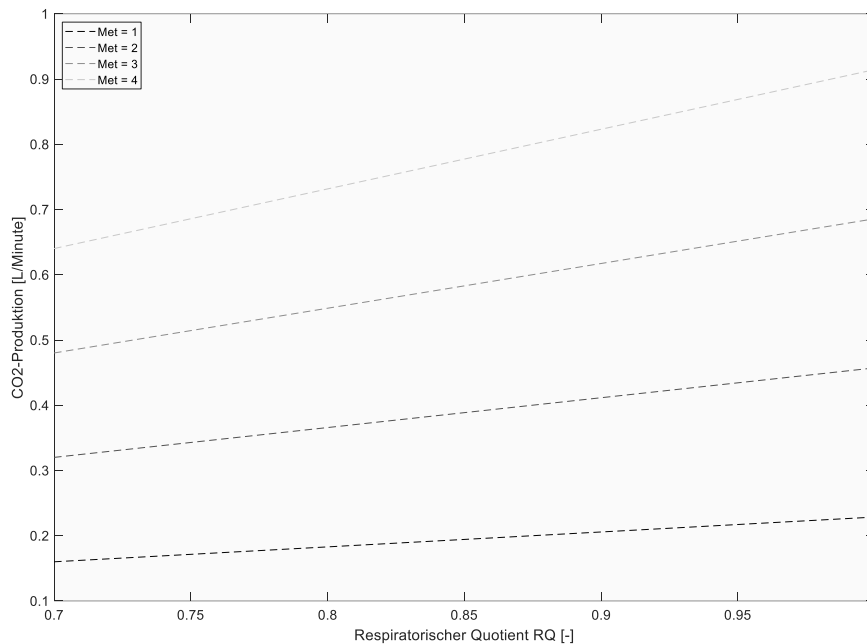


Abbildung 50: Verhältnis des respiratorischen Quotienten zur CO₂-Produktion im menschlichen Körper in Abhängigkeit von der metabolischen Rate

Ein ähnliches Verhältnis ergibt sich für den Einfluss des respiratorischen Quotienten auf die CO₂-Produktion des Menschen. Abbildung 50 stellt die CO₂-Produktion für eine Frau mit einem GRU von 5.85 MJ/Tag in Abhängigkeit vom respiratorischen Quotienten dar. Ähnlich wie in Abbildung 49 ist deutlich erkennbar, dass der RQ einen Einfluss auf die CO₂-Produktion hat, dass dieser im Vergleich zum Einfluss der metabolischen Rate jedoch geringer ist. Somit wird im Folgenden von einer gewöhnlichen Mischkost ausgegangen, die durch einen RQ von 0.85 [-] beschrieben wird. Auch hier gilt, je höher der met-Wert, desto mehr wirkt sich der respiratorische Quotient auf die CO₂-Produktion im Körper aus.

Um den arteriellen CO₂-Partialdruck bewerten zu können, muss das Verhältnis zwischen ausgeatmetem und eingeatmetem CO₂ betrachtet werden. Nach entsprechender Umformulierung von Gleichung 44 lässt sich der Wirkungsindikator wie folgt berechnen.

$$PA_{CO_2} = \frac{CO_2 - \text{Produktion}}{\dot{V}_A} * P_{mmHg} + P_{CO_2Luft} [mmHg] \quad (48)$$

Dabei beschreibt V_A [L/min] die alveoläre Ventilation, welche sich aus individuellen physiologischen Kenngrößen sowie der Aktivität des Menschen ergibt, P_{mmHg} den Luftdruck [mmHg], P_{CO_2Luft} den Kohlenstoffdioxid-Partialdruck [mmHg] der Umgebung, welcher sich somit aus der Sachbilanz ergibt und PA_{CO_2} den alveolären Partialdruck von CO₂ [mmHg], welcher letztendlich den Wirkungsindikator darstellt.

Es ist anzumerken, dass der alveoläre Partialdruck stellvertretend für den arteriellen Partialdruck steht. Je nach betrachteter Literatur werden diese Begriffe im Wechsel zur Beschreibung des gleichen Sachverhalts verwendet, da sowohl die alveoläre als auch die arterielle Gaskonzentration durch die Lungenventilation bestimmt werden.

Zur Bestimmung der alveolären Ventilation müssen entsprechend Gleichung 45 das Atemzugvolumen, das Totraumvolumen sowie die Atemfrequenz bekannt sein. Im Ruhezustand lässt sich das Atemzugvolumen aus einem festgelegten prozentualen Anteil der funktionalen Residualkapazität bestimmen, welche sich wiederum aus Gleichung 46 und 47 für Männer und Frauen ergibt. Gleiches gilt für das Totraumvolumen welches sich aus einem definierten prozentualen Anteil des Atemzugvolumens errechnet. Die Atemfrequenz kann dagegen basierend auf einem Zusammenhang mit der körperlichen Anstrengung bestimmt werden. In Abbildung 51 ist der Zusammenhang zwischen der Atemfrequenz und der Anstrengung für den Bereich von 1 met bis 11 met abgebildet. Es ist davon auszugehen, dass im Rahmen der raumphysiologischen Bilanz derart hohe met-Werte nicht auftreten werden. Dennoch lässt sich die Atemfrequenz auf der Grundlage der Aktivität der jeweiligen Person im Raum anhand der Regressionsgleichung 49 bestimmen (dargestellt in Abbildung 51).

$$A_f = 0.052 * m^3 - 0.96 * m^2 + 6.8 * m + 5.3 \left[\frac{\text{Atemzüge}}{\text{min}} \right] \quad (49)$$

Aufgrund der vorhandenen Standardabweichungen (Abbildung 42) können offensichtlich individuelle Abweichungen vorliegen, die im Rahmen der vorliegenden Methode nicht abgebildet werden können; hier können individuelle Belastungstests eine personenbezogene Bestimmung der Atemfrequenz ermöglichen.

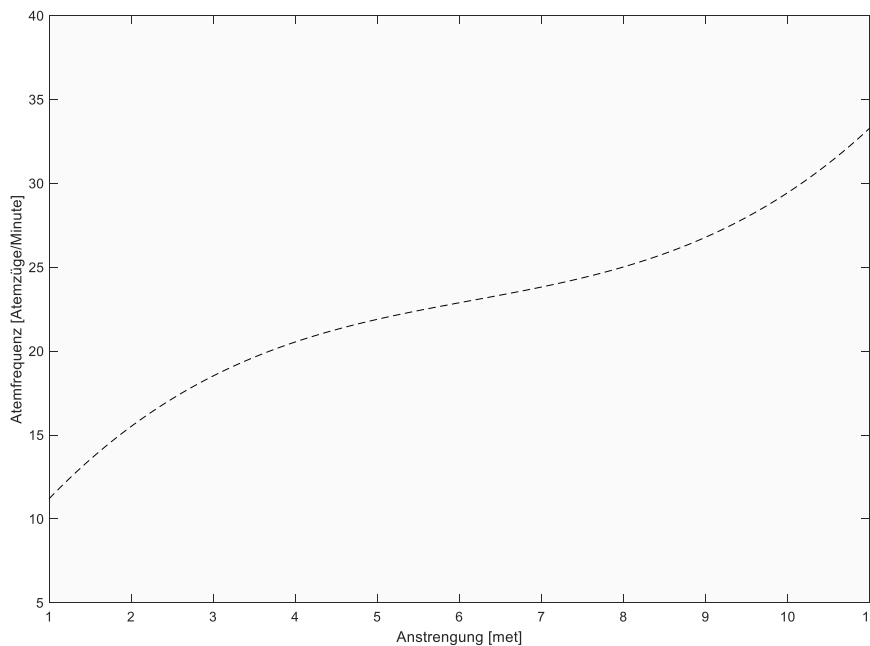


Abbildung 51: Verhältnis zwischen der Atemfrequenz und der Anstrengung (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Stielow, 2018)

Somit sind sämtliche Größen zur Bestimmung der alveolären Ventilation bekannt und der Wirkungsindikator kann für eine bestimmte Umgebung und eine individuelle Person ermittelt werden, jedoch nur so lange sich diese Person in einem Ruhezustand befindet. Für alle weiteren Bewertungssituationen müssen sowohl das Atemzugvolumen als auch das Totraumvolumen neu bestimmt werden. Hierfür können die Daten nach Godehardt (2017) zur Bestimmung des Peak-Atemzugvolumens sowie die Daten nach Dubowy et al. (2008) zur Bestimmung des jeweils zugehörigen met-Werts genutzt werden.

Aus den jeweiligen Regressionsgleichungen (Abbildung 52 und 53) lassen sich in Abhängigkeit vom Alter die Peak-Atemzugvolumina berechnen. Analog zur Bestimmung der Atemfrequenz wird hier ebenfalls das Peak-Atemzugvolumen mittels Regression in Abhängigkeit vom Alter bestimmbar gemacht. Da sich beide Regressionsgleichungen innerhalb der Standardabweichungen der durchgeführten Messungen befinden, kann wiederum davon ausgegangen werden, dass eine derartige Berechnung ihre Richtigkeit behält, auch wenn es zu individuellen Abweichungen kommen kann.

$$\text{Frauen } AZU_p = -4.7 * 10^{-7} * Al^4 + 8.9 * 10^{-5} * Al^3 - 0.0065 * Al^2 + 0.21 * Al - 0.45 \left[\frac{L}{min} \right] \quad (50)$$

$$\text{Männer } AZU_p = 2.9 * 10^{-8} * Al^4 + 1.3 * 10^{-5} * Al^3 - 0.0035 * Al^2 + 0.22 * Al - 0.56 \left[\frac{L}{min} \right] \quad (51)$$

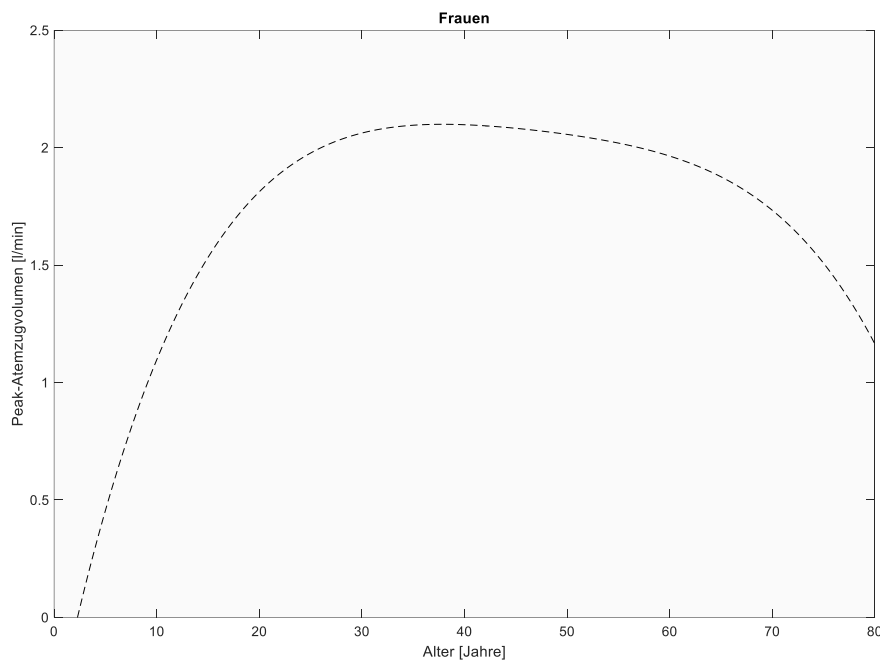


Abbildung 52: Verhältnis zwischen dem Peak-Atemzugvolumen und dem Alter von Frauen (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Godehardt, 2017)

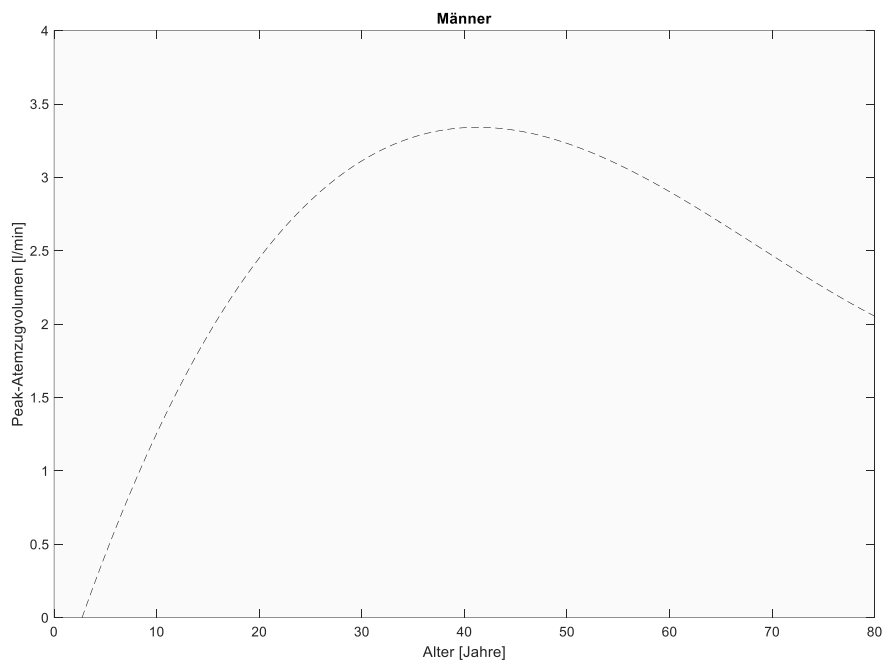


Abbildung 53: Verhältnis zwischen dem Peak-Atemzugvolumen und dem Alter von Männern (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Godehardt, 2017)

Aus den Daten nach Dubowy et al. (2008) lassen sich die Peak-Sauerstoffaufnahme sowohl für Männer und Frauen auslesen und somit die met-Werte bestimmen, welche den Peak-Atemzugvolumina zuzuordnen sind. Aufgrund der Rohdaten erscheint für Frauen eine lineare Regression am passendsten, während die Abhängigkeit bei den Männern mittels eines Polynoms des 4. Grades dargestellt werden kann. Dieser Zusammenhang gilt für Männer jedoch nur bis zum 78. Lebensjahr. Daten für eine Standardabweichung wurden nach Dubowy et al. (2008) nicht gegeben.

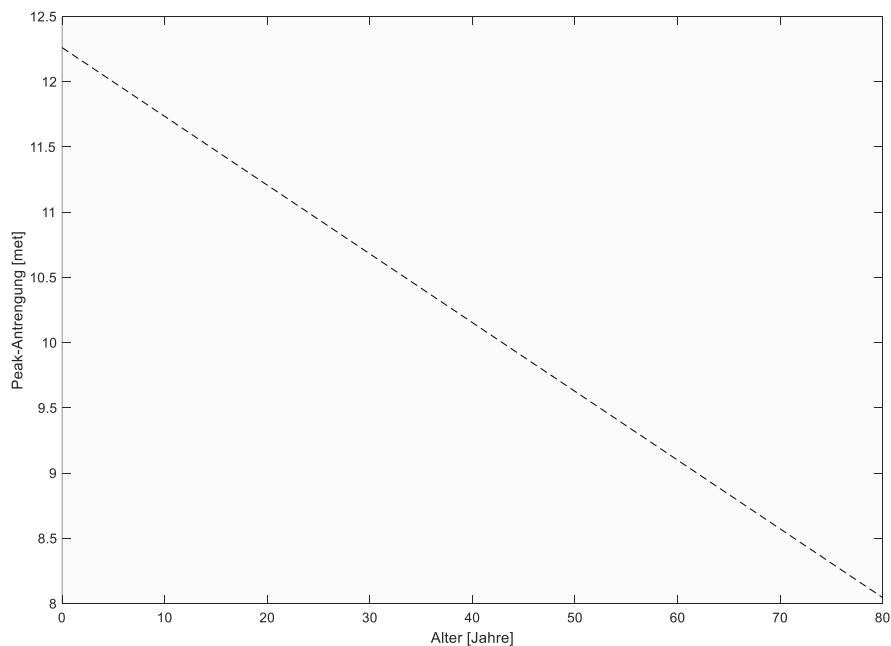


Abbildung 54: Verhältnis zwischen der Peak-Anstrengung und dem Alter von Frauen (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Dubowy et al., 2018)

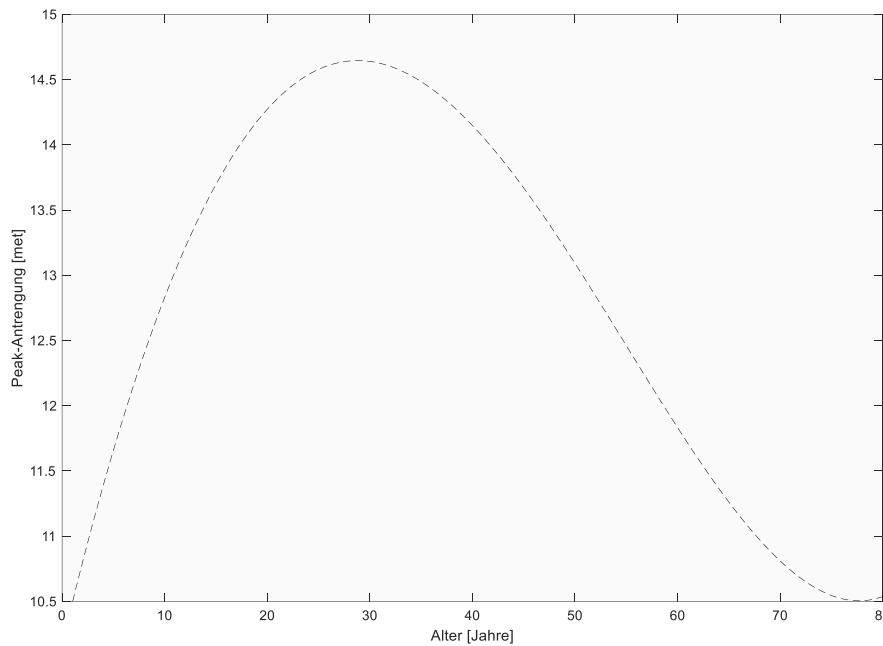


Abbildung 55: Verhältnis zwischen der Peak-Anstrengung und dem Alter von Männern (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Dubowy et al., 2018)

Aus Abbildung 54 und 55 geht hervor, dass der Peak met-Wert über dem in Innenräumen üblichen met-Wert liegt. Sogar bei großer Anstrengung ist nicht davon auszugehen, dass met-Werte von 4.0 überschritten werden, mit Ausnahme von sportlichen Tätigkeiten.

$$\text{Frauen } MET_p = -0.053 * Al + 12 \text{ [met]} \quad (52)$$

$$\text{Männer } MET_p = 3.1 * 10^{-7} * Al^4 + 5.6 * 10^{-6} * Al^3 - 0.0065 * Al^2 + 0.33 * Al + 10 \text{ [met]} \quad (53)$$

Somit muss in einem letzten Schritt das tatsächliche Atemzugvolumen bei Anstrengung bestimmt werden. Hierfür wird vereinfacht eine lineare Interpolation genutzt, die das Atemzugvolumen in dem Bereich zwischen der Atemruhelage und dem Atemzugvolumen bei Anstrengung bestimmen kann.

Die Abbildungen 56 und 57 zeigen die Entwicklung der Atemzugvolumina mit zunehmendem Alter sowohl für Frauen und für Männer. Es wird deutlich, dass Männer stets ein größeres Atemzugvolumen haben als Frauen. Während das Atemzugvolumen in der Ruhelage mit dem Alter zunimmt, verringert sich das Peak-Atemzugvolumen mit zunehmendem Alter, was darauf zurückzuführen ist, dass sich sowohl die Vital- als auch die Residualkapazität mit steigendem Alter verändern.

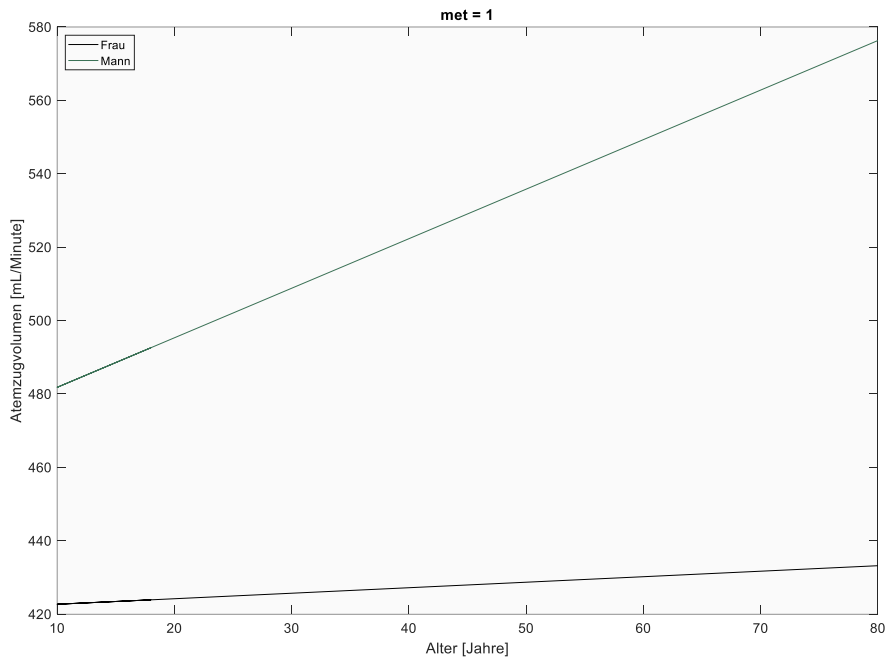


Abbildung 56: Atemzugvolumen in Ruhe (1 met) in Abhängigkeit vom Alter und vom Geschlecht

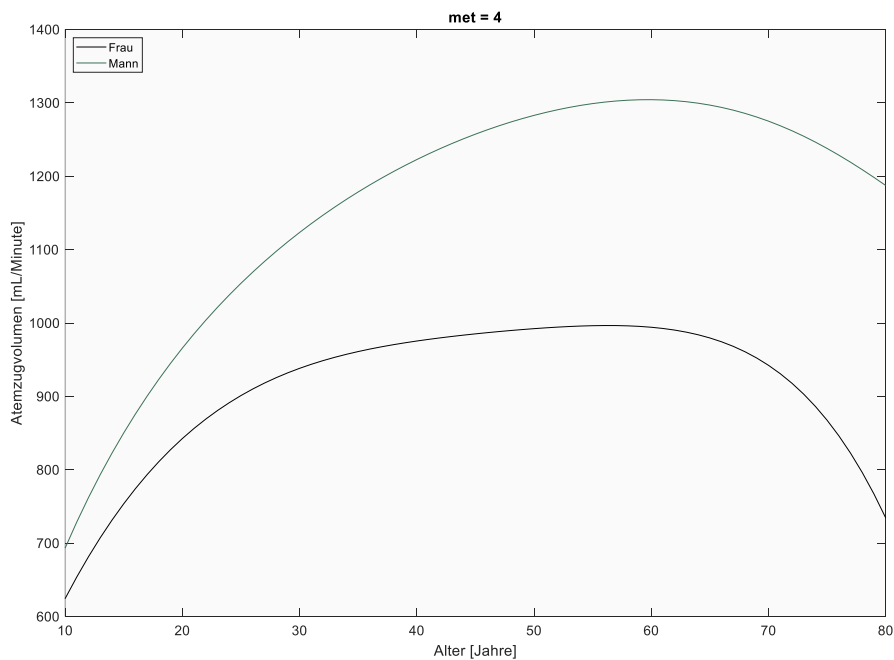


Abbildung 57: Atemzugvolumen unter Anstrengung (4 met) in Abhängigkeit vom Alter und vom Geschlecht

Der letzte fehlende Parameter zur Bestimmung der alveolären Ventilation unter Anstrengung ist das Totraumvolumen. Dieses lässt sich ebenfalls mithilfe einer Regressionsfunktion, basierend auf den in der Literatur vorhandenen Daten, bestimmen. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen dem Atemzugvolumen und dem Totraumvolumen abgebildet.

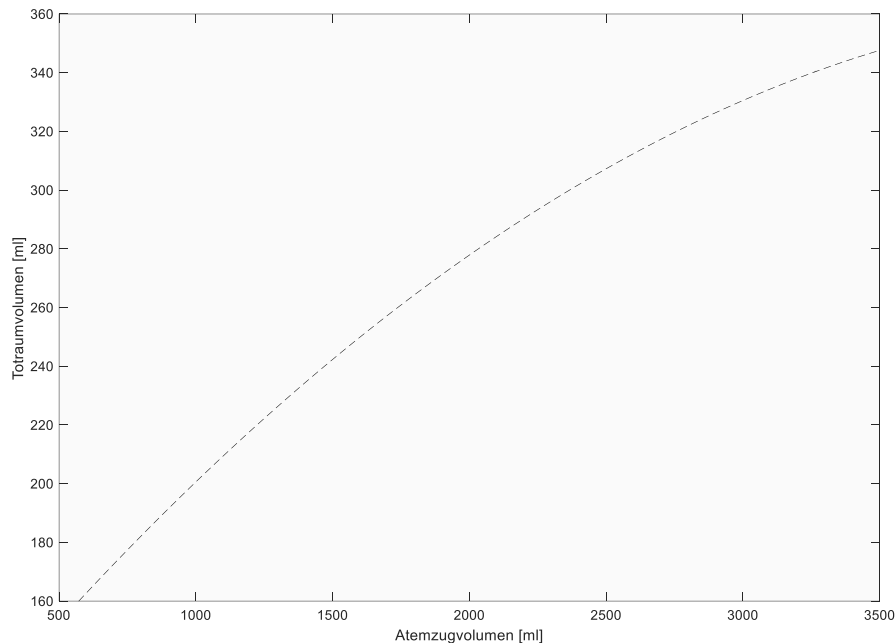


Abbildung 58: Verhältnis zwischen dem Atemzugvolumen und dem Totraumvolumen in Ruhe und unter Anstrengung (Regressionsfunktion basierend auf den Daten nach Asmussen & Nielsen (1957) und Stegemann & Heinrich (1967))

Folglich lässt sich das Totraumvolumen mittels der Regressionsgleichung 54 bestimmen.

$$V_T = -1.2 \cdot 10^{-5} \cdot AZU^2 + 0.11 \cdot AZU + 99 \text{ [ml]} \quad (54)$$

Sämtliche Parameter des lufthygienischen Wirkungsmechanismus sind bekannt. Somit kann der Wirkungsindikator für unterschiedliche Personen, insbesondere Personen verschiedenen Alters und Personen, die unterschiedlich anstrengenden Aktivitäten nachgehen, bestimmt werden. Im Gegensatz zur Wirkungskategorie der thermischen Umgebung müssen die Wirkungszonen der lufthygienischen Umgebung nicht für jede Person im einzelnen bestimmt werden, da es sich hierbei um festgelegte Grenzwerte handelt. Somit bleibt lediglich eine individuelle Bestimmung des Wirkungsindikators.

5.3.4 Anwendung des lufthygienischen Wirkungsmechanismus

Sämtliche Berechnungsgrößen sind bekannt und der sich beim Menschen im Innenraum einstellende alveoläre/arterielle Kohlenstoffdioxid-Partialdruck kann ermittelt werden. Dabei handelt es sich lediglich um die Bestimmung einer potentiellen Auswirkung, welche auftreten könnte, wenn ein Mensch sich in der beschriebenen Umgebung aufhält. Auf dieser Grundlage können die Auswirkungen der lufthygienischen Umgebung in Bezug auf die CO₂-Konzentration bewertet werden.

Jede der Einflussgrößen unterliegt dabei dynamischen Veränderungen; da jedoch die dynamische Bestimmung des Indikators nicht zielführend ist, sondern vielmehr der Zustand des menschlichen Körpers in einer konkreten Situation bewertet werden soll, wird wiederum eine statische Darstellung des Indikators gewählt.

Die Darstellung der Ergebnisse ist bei diesem Wirkungsindikator nicht ganz trivial, da die entscheidenden Einflussgrößen die CO₂-Konzentration der Umgebung und der Energieverbrauch des Menschen sind. Der Energieverbrauch beeinflusst zeitgleich sowohl die CO₂-Produktion im menschlichen Körper und die Ventilationsrate. Je mehr Energie der Mensch für eine Aktivität benötigt, umso mehr erhöht sich seine Atemfrequenz (Abbildung 42) und zusätzlich verändert sich sein Atemzugvolumen. Das bedeutet wiederum, dass der Mensch mehr Sauerstoff verbraucht und somit mehr CO₂ produziert, welches er wieder abgibt. Letztendlich bedeutet das jedoch, dass das Verhältnis zwischen CO₂-Produktion und der alveolären Ventilationsrate in etwa immer das gleiche bleibt, da sich diese beiden Parameter immer zeitgleich verändern. In Kurtz (2019) wird für junge gesunde Erwachsene für eine ruhige Aktivität eine CO₂-Produktion von 0.26 L/min und eine alveoläre Ventilation von 4.9 L/min bis 5.6 L/min angegeben. Demnach verändert sich das Verhältnis der CO₂-Produktion zur alveolären Ventilation zwischen 0.053 – 0.046 [-]. Unter Annahme von Standardbedingungen (Luftdruck 760 mmHg) und einer CO₂-Konzentration im Innenraum von 1000 ppm liegt der alveoläre CO₂-Partialdruck zwischen 41.4 mmHg und 36.0 mmHg und würde insbesondere am unteren und oberen Grenzwert der Ventilation bereits zu komfortrelevanten Auswirkungen führen.

Bei der Überprüfung der Ergebnisse mit der Nutzung der in Kapitel 5.3.3 gegebenen Werte ergaben sich, insbesondere für die weniger anstrengenden Aktivitäten, Verhältnisse zwischen der CO₂-Produktion und der alveolären Ventilation, die auch bei jungen gesunden Erwachsenen um 20 % von den Standardwerten nach Kurtz (2019) abweichen und dementsprechend zu Ergebnissen für den alveolären CO₂-Partialdruck führen, die nicht annähernd die Realität abbilden. In dem hier beschriebenen Algorithmus wird sowohl die CO₂-Produktion als auch die alveoläre Ventilation mit einem niedrigeren Wert ausgegeben als der von Kurtz (2019) angegebene. Die alveoläre Ventilation liegt bei einem jungen Erwachsenen bei einer ruhigen Aktivität im Sitzen bei 3.2 L/min. Dies scheint hauptsächlich darauf zurückzuführen zu sein, dass die Atemfrequenz nach dem Modell von Stielow (2015) ebenfalls deutlich unter dem Standardwert liegt. Nach Stielow (2015) liegt die Atemfrequenz in Ruhe bei 11 Atemzügen pro Minute, nach Kurtz (2019) allerdings bei 14 – 16 Atemzügen pro Minute und nach Warliah, Rohman und Rusmin (2012) ebenfalls bei 16 Atemzügen pro Minute. Zudem lässt sich eine hohe Sensitivität der Daten erkennen, sodass kleinste Veränderungen an diesen Eingangsgrößen bereits zu Veränderungen der Ergebnisse führen, welche die Realität nicht abbilden. Da sich dieses Modell jedoch darauf stützt, die Daten aus den vorhandenen Forschungsansätzen zu verwenden und diese, wie es scheint, nicht immer die Realität abbilden, ist eine individuelle Anpassung auf das Atemverhalten von einzelnen Personen nicht umzusetzen.

Unter den Bedingungen von einem Luftdruck von 760 mmHg und einer Lufttemperatur von 20 °C ergibt sich für die Normwerte für eine ruhige Aktivität (CO₂-Produktion 0.26 L/min und alveoläre Ventilation 5 L/min) sowie der Nutzung des hier vorgeschlagenen Algorithmus für Aktivitäten mit 1 met bis 4 met das folgende Ergebnis.

In Abbildung 59 ist auf der x-Achse die CO₂-Konzentration des Innenraums und auf der y-Achse die Anstrengung in met eingetragen. Die CO₂-Konzentration wurde für den Bereich zwischen 300 ppm, welche einem niedrigen CO₂-Gehalt der Außenluft entspricht (Knoll et al., 1996) und 6000 ppm, einer deutlich über dem Normalwert liegenden Konzentration berücksichtigt. Auf der z-Achse ist der alveolären CO₂-Partialdruck abgebildet. Der neutrale Bereich zwischen 39 mmHg und 41 mmHg zieht sich über alle

Anstrengungen und alle ppm-Bereiche. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Mensch, wie bereits beschrieben, bei großer Anstrengung sein Atemverhalten anpasst und durch die veränderte Atmung der hohe Innenraum CO₂-Gehalt weniger Einfluss auf den alveolären CO₂-Partialdruck hat. Deutlich zu erkennen ist, dass bei geringen met-Werten, die hauptsächlich in Innenräumen relevant sind, der neutrale Bereich bereits unter 1000 ppm verlassen wird. Ab diesem Punkt wird der Körper versuchen gegenzusteuern und beispielsweise durch eine Veränderung der Herzfrequenz oder des Blutdrucks reagieren, was unter anderem zu *Sick Building* Symptomen führen kann. (Azuma et al., 2018) Diese sekundären Auswirkungen werden an dieser Stelle jedoch nicht weiter berücksichtigt.

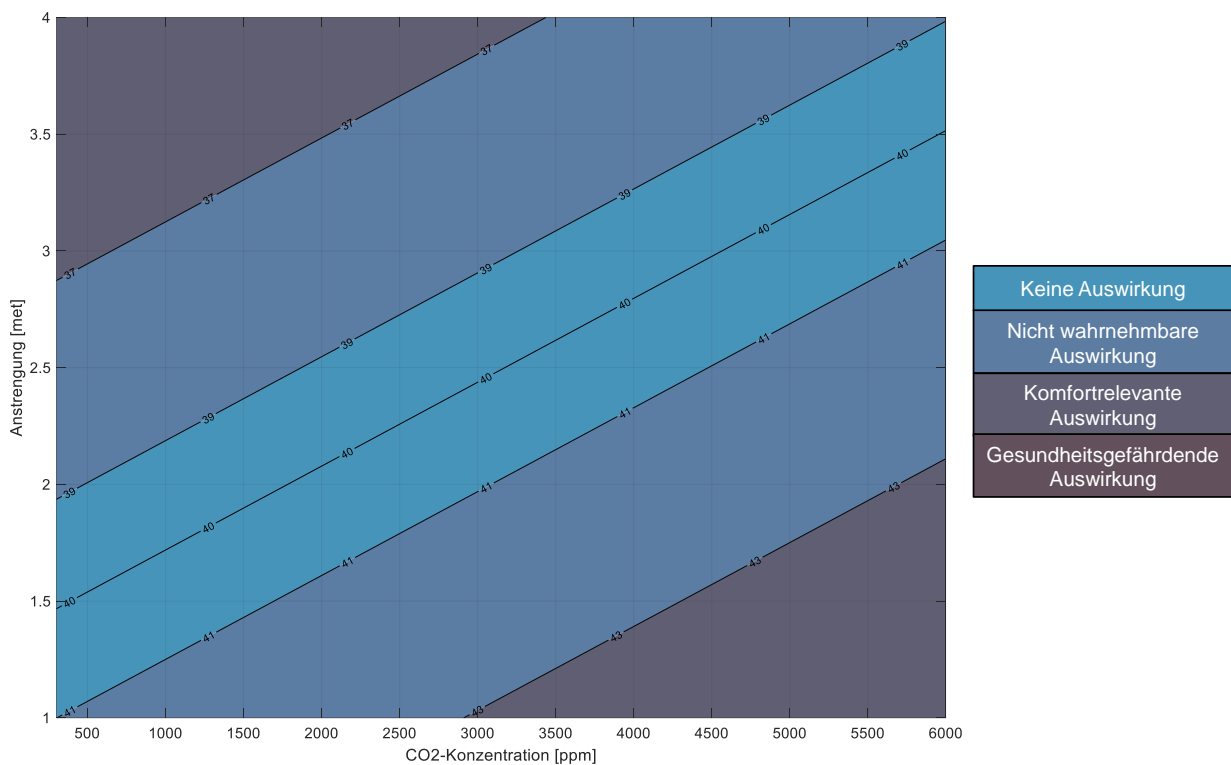


Abbildung 59: Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration im Innenraum, der Aktivität und dem alveolären CO₂-Partialdruck bei einer Lufttemperatur von 20 °C für einen jungen Mann (28 Jahre)

Bei steigender Lufttemperatur (Abbildung 60 und 61) ist zu erkennen, dass bei geringen Anstrengungen (met = 1) sich die Grenze der Zone der komfortrelevanten Veränderungen deutlich in Richtung geringerer CO₂-Konzentrationen verschiebt (2200 ppm bei 25 °C, 1500 ppm bei 30 °C). Entsprechend verschieben sich die anderen Zonen ebenfalls, sodass die neutrale Zone nur mit einer erhöhten Atmung (größere Anstrengung als 1 met) erreicht werden kann. Diese Tatsache lässt sich dadurch erklären, dass nach Persily und Jonge (2016) die CO₂-Produktion mit zunehmender Lufttemperatur ansteigt. Diesem Zusammenhang wurde ausgehend von dem Standardwert von 0.26 L/min bei 20 °C Lufttemperatur hier Rechnung getragen, sodass die CO₂-Produktion bei 30 °C Lufttemperatur bei 0.27 L/min liegt, während die alveoläre Ventilation konstant bei 5 L/min liegt.

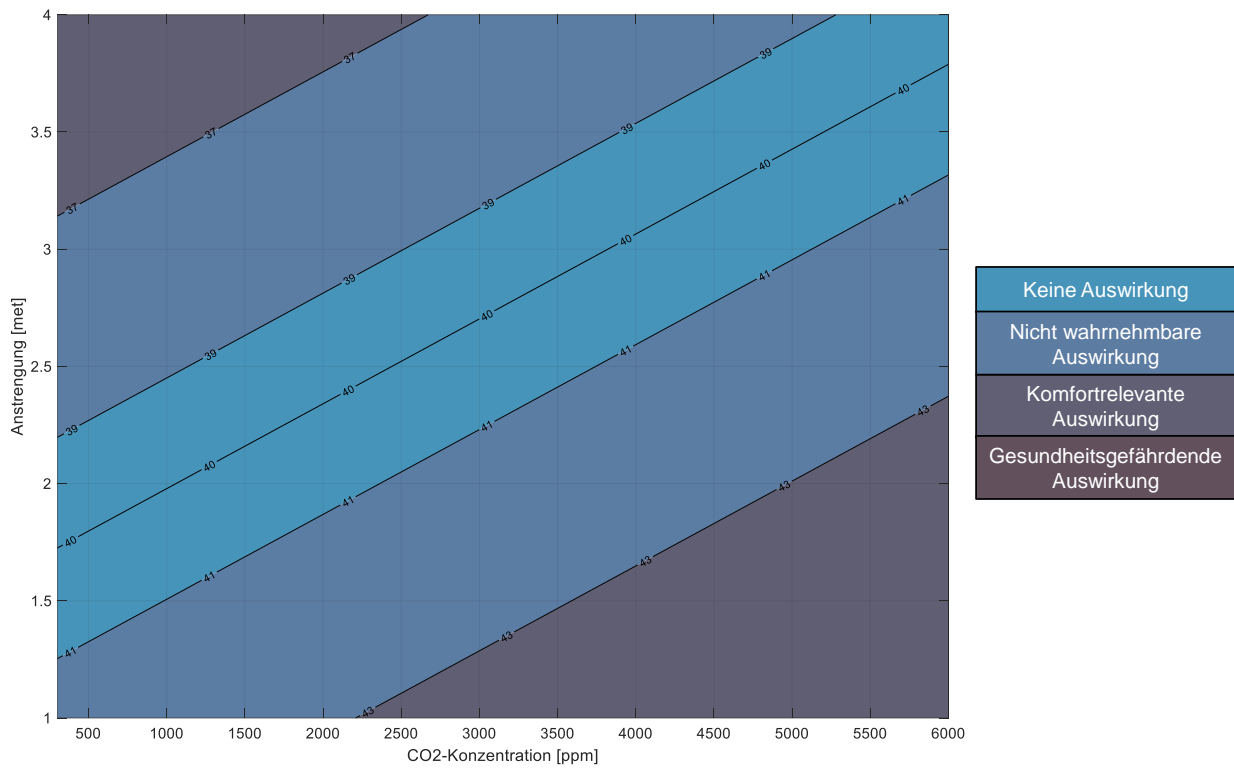


Abbildung 60: Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration im Innenraum, der Aktivität und dem alveolären CO₂-Partialdruck bei einer Lufttemperatur von 25 °C für einen jungen Mann (28 Jahre)

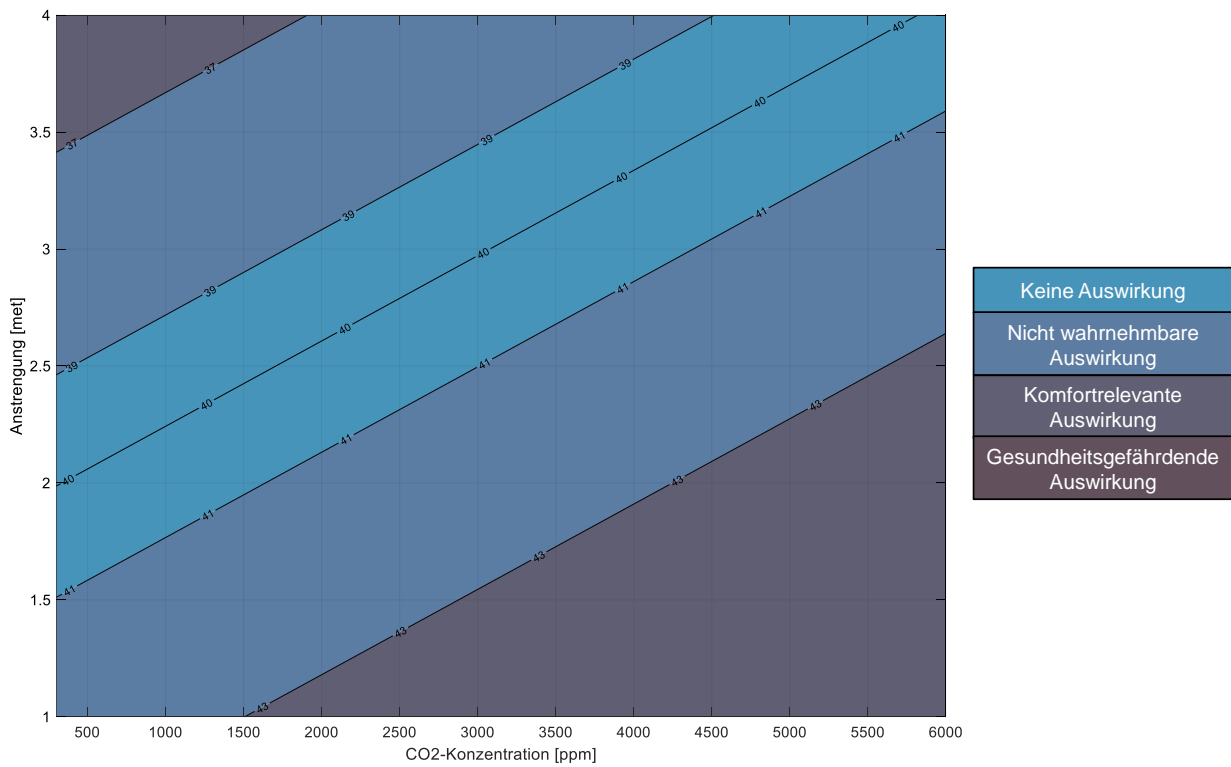


Abbildung 61: Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration im Innenraum, der Aktivität und dem alveolären CO₂-Partialdruck bei einer Lufttemperatur von 30 °C für einen jungen Mann (28 Jahre)

Mit dem vorliegenden Algorithmus wurden die Ergebnisse für den alveolären CO₂-Partialdruck rechnerisch sowohl für Person 1 (weiblich, 65 kg, 1.70 m) und Person 2 (männlich, 85 kg, 1.85 m) für die Altersklassen 30 Jahre, 40 Jahre, 50 Jahre, 60 Jahre und 70 Jahre überprüft unter der Annahme einer Lufttemperatur von 20 °C und einem Standardluftdruck. Dabei hat sich gezeigt, dass sich in Abhängigkeit vom Alter die Steigungen der Abgrenzungen der einzelnen Zonen ändern (Daten der z-Achse). Es konnte festgestellt werden, dass diese Steigung maßgeblich durch das Verhältnis der CO₂-Produktion zur alveolären Ventilation bestimmt wird. Damit ist dieser Faktor der entscheidende für die Bestimmung des Wirkungsindikators zur Beurteilung der Luftqualität in einem Innenraum. Dieses Verhältnis gibt sowohl Aufschluss über die Anstrengung der Aktivität als auch über die Kapazität der Lungen der jeweiligen Person. Bei den betrachteten Fällen bewegte sich dieser Faktor bei geringen Anstrengungen zwischen 0.053 – und 0.056 [-] und lag damit etwas höher als die nach Kurtz (2019) vorgegebenen Standardwerte. Bei hohen Anstrengungen (met = 4) lag der Wert dagegen bei 0.039 – 0.048 [-] und somit etwas niedriger als bei geringen Anstrengungen. In diesem Faktor sind zudem sämtliche weiteren Parameter, die bei der Berechnung der CO₂-Produktion berücksichtigt werden, integriert. Mit den vorliegenden Daten wird somit nicht, wie für die Standardperson, der alveoläre CO₂-Partialdruck für jede Person in Abhängigkeit von der Aktivität und der CO₂-Konzentration im Innenraum dargestellt. Für die Bewertung der Auswirkungen der lufthygienischen Umgebung gibt es folglich nur eine Bewertungsgrafik entsprechend Abbildung 62, die für sämtliche Personen verwendet werden kann. Auf der x-Achse wird weiterhin die CO₂-Konzentration im Innenraum angegeben, auf der y-Achse wird dagegen nicht mehr die Anstrengung, sondern der Verhältnisfaktor der CO₂-Produktion zur alveolären Ventilation abgebildet. Diese Grafik ermöglicht es für jede individuelle Person in jeder beliebigen Umgebung, den Zustand des Körpers, welcher durch die CO₂-Konzentration der Umgebung verändert wird, zu bestimmen.

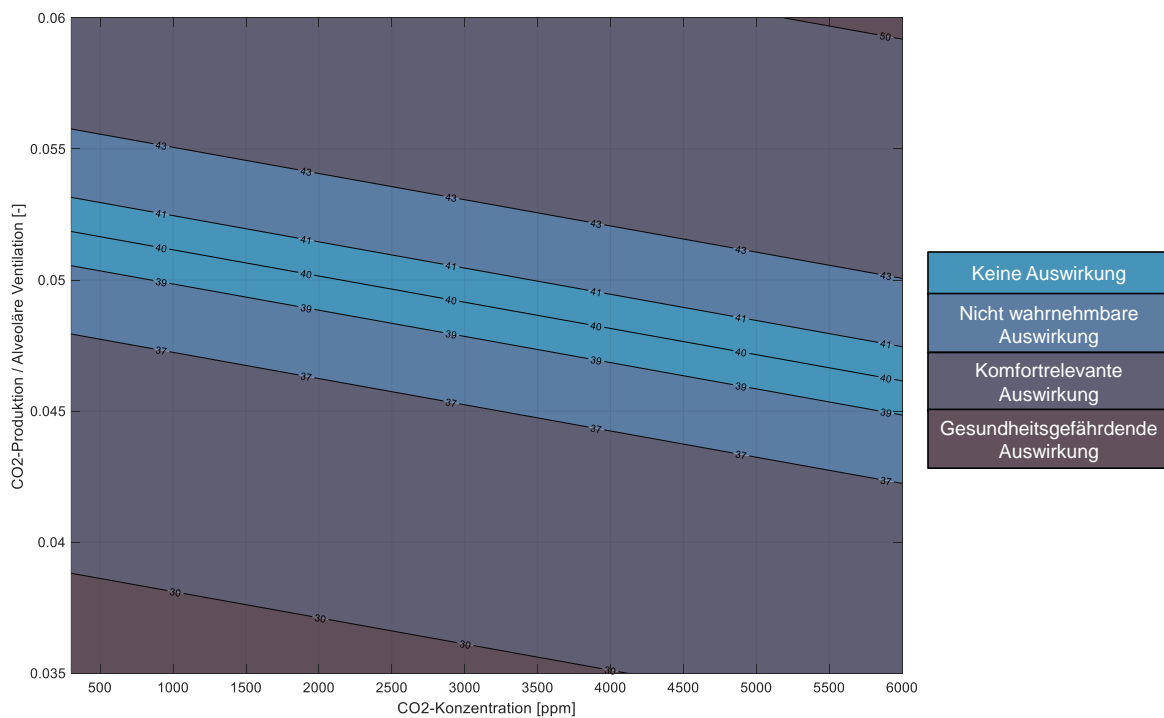


Abbildung 62: Wirkungsindikator und Wirkungszonen zur Bewertung der lufthygienischen Umgebung

Für die letztendliche Bewertung der Auswirkung der Luftqualität im Innenraum müssen eine Reihe von Parametern, sowohl individuelle (personenbezogene) als auch Umgebungs-Parameter aus der Sachbilanz bekannt sein. Sämtliche Eingangsparameter des Algorithmus sowie ihre Beziehungen zueinander sind in der folgenden Abbildung 63 dargestellt. Der Berechnungsalgorithmus wurde wiederum in einem *Matlab*-Skript erstellt und ermöglicht die Bestimmung des Wirkungsindikators der lufthygienischen Umgebung in Abhängigkeit der gegebenen Input-Parameter.

Die individuellen Personendaten bestimmen zum einen den Grundumsatz, welcher wiederum einen Einfluss auf die CO₂-Produktion des Menschen hat. Daneben beeinflusst die Aktivität, welche maßgeblich die CO₂-Produktion bestimmt, die Atemfrequenz und somit das Atemzugvolumen. Zur numerischen Bestimmung des Atemzugvolumens muss sowohl das Atemzugvolumen in Ruhelage und das Atemzugvolumen unter Peak-Anstrengung bekannt sein, damit zwischen diesen beiden Größen interpoliert werden kann. Das Atemzugvolumen in Ruhelage lässt sich wiederum aus den individuellen physiologischen Größen Geschlecht, Alter, Größe und Gewicht bestimmen. Wurden sowohl die CO₂-Produktion als auch die alveoläre Ventilation errechnet, kann nicht nur der alveoläre CO₂-Partialdruck bestimmt werden, sondern zusätzlich der Verhältnissfaktor zwischen diesen beiden Einflüssen, welcher zur Beurteilung der raumphysiologischen Wirkung der lufthygienischen Umgebung dient.

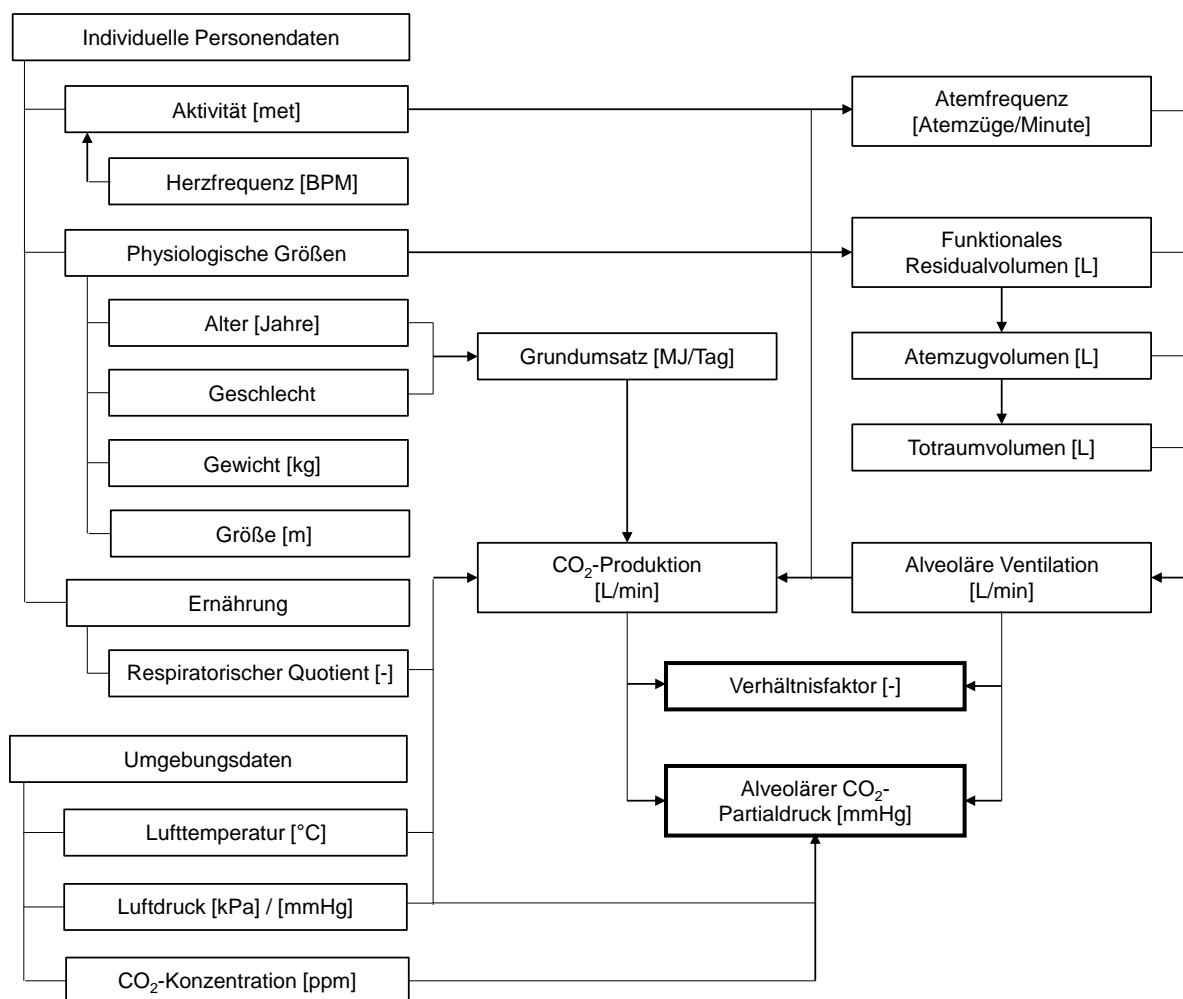


Abbildung 63: Algorithmus des lufthygienischen Wirkungsmechanismus

Es ist anzumerken, dass die grafischen Darstellungen dieses Kapitels auf den zur Verfügung stehenden Studien mit einer begrenzten Datengrundlage basieren. Die vorhandenen Daten sind ausreichend, um die Veränderung des arteriellen/alveolären CO₂-Partialdrucks anhand der Einflussparameter abzubilden und diese den definierten Wirkungskategorien zuzuordnen; jedoch sollten für eine weitere Anwendung gezielte Studien insbesondere zum Atemverhalten der Mensch durchgeführt werden, da sich dieses individuell sehr stark unterscheiden können.

Des Weiteren gilt es weiterhin herauszufinden, inwieweit die vom Menschen abgegebenen Bioeffluenzen einen Einfluss auf die beschriebenen Zusammenhänge und Auswirkungen haben. Hierzu gibt es eine Vielzahl an Studien, die zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen: während die einen den Standpunkt belegen, dass reines CO₂ ohne vom Menschen abgegebene Bioeffluenzen zwar den arteriellen CO₂-Partialdruck steigen lässt, dies jedoch keine Auswirkungen auf den Komfort hat (Zhang, Wargocki & Lian, 2016a; Zhang, Wargocki & Lian, 2016b; Vehviläinen et al., 2016) belegen wieder andere Studien, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen dem CO₂ im Innenraum, dem arteriellen CO₂-Partialdruck und dem Zustand des Menschen gibt, wobei sich in diesen Studien zum Teil auf das Wohlbefinden des Menschen bezogen wird, jedoch hauptsächlich die kognitive Leistungsfähigkeit im Fokus steht (Kajtár & Herczeg, 2012; Allen et al., 2016; Satish et al., 2012).

5.4 Wirkungskategorie: Visuelle Umgebung

Die Photorezeptoren, welche für die Wahrnehmung von Lichtenergie verantwortlich sind, haben zwei unterschiedliche Wirkungswege. Zum einen haben sie einen Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung des Menschen und zum anderen wirken sie sich auf den circadianen Rhythmus des Menschen aus. Diese zwei Wirkungswege müssen mit unterschiedlichen Wirkungsindikatoren berücksichtigt werden.

5.4.1 Visuelle Wirkung der visuellen Umgebung

Die visuelle Wahrnehmung der Umgebung resultiert aus dem Zusammenspiel der sensorischen und motorischen Leistungen des menschlichen Auges sowie des zentralen Nervensystems.

Der adäquate Reiz, der von den Photorezeptoren in der Netzhaut des visuellen Systems wahrgenommen wird, ist eine elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich von 400 nm bis 750 nm. Wellenlängen unterhalb 400 nm liegen im ultravioletten Bereich und werden von der Körperoberfläche absorbiert. In Bezug auf das Auge kann diese Strahlung zu Linsentrübungen oder vorübergehenden Hornhautschädigungen führen. Oberhalb von 750 nm, im infraroten Bereich, kann die Strahlung bei häufiger Exposition dauerhafte Trübungen der Linse verursachen.

Neben dem adäquaten Reiz der elektromagnetischen Strahlung, die auf die Photorezeptoren in der Netzhaut wirkt, gibt es zusätzlich weitere neuronale Anpassungsprozesse, wie die Nah- und die Fernakkommodation. (Eysel, 2010) Letztere sind jedoch für die Beurteilung der Wirkung der visuellen Umgebung nicht weiter relevant und werden aus diesem Grund nicht weiter beschrieben. Im Folgenden wird der Stand des Wissens der Photorezeption mit besonderem Fokus auf die numerische Darstellung der Pupillengröße und der retinalen Beleuchtungsstärke sowie die quantitative Herleitung der individuellen spektralen Hellempfindlichkeit dargestellt. Der Stand des Wissens soll dabei nicht sämtliches Wissen zur Photorezeption abbilden, sondern lediglich die Aspekte, die für die Herleitung des Wirkungsindikators, der Wirkungszonen sowie des Wirkungsmechanismus von Relevanz sind.

5.4.1.1 Stand des Wissens: Photorezeption

Die Photorezeptoren liegen in der Netzhaut, auf der dem Licht, das durch die Pupille einfällt, abgewandten Seite. Das Auge hat aufgrund von unterschiedlichen Rezeptortypen die Fähigkeit, sich an unterschiedliche Beleuchtungssituationen anzupassen. Ähnlich wie bei den Thermorezeptoren, bei denen zwischen Kalt- und Warmrezeptoren unterschieden werden muss, muss bei den Photorezeptoren zwischen Zapfen und Stäbchen differenziert werden. Die Stäbchen sind für das sogenannte Sternenlicht Sehen, das skotopische Sehen verantwortlich und ermöglichen das Erkennen von Helligkeitsunterschieden, nicht aber von Farben. Im Gegensatz dazu sind die Zapfen für das Sehen am Tag, das photopische Sehen, verantwortlich. Diese ermöglichen sowohl das Unterscheiden von Farben als auch von Hell-Dunkel-Unterschieden. Der Übergangsbereich zwischen dem skotopischen Sehen, in dem lediglich die Stäbchen aktiv sind, und dem photopischen Sehen, in dem lediglich die Zapfen aktiv sind, wird als Dämmerungssehen oder auch mesopisches Sehen bezeichnet. In diesem Übergangsbereich können Farben nur eingeschränkt erkannt werden. Der skotopische Zustand tritt ein, wenn die Adaptationsbeleuchtungsstärke unter 0.005 cd/m^2

liegt. Dieser geringe Lichtreiz liegt unterhalb des Schwellenwerts, der die Zapfen anspricht; somit sind ausschließlich die Stäbchen aktiv. Der Übergangsbereich liegt zwischen 0.005 cd/m^2 und 5 cd/m^2 . In diesem Bereich der Leuchtdichte sind beide Rezeptortypen aktiv. Oberhalb von 5 cd/m^2 sind lediglich die Zapfen aktiv; in diesem Zustand können sowohl Farben als auch Objektdetails erkannt werden. (Boyce, 2014)

Die unterschiedlichen Rezeptortypen unterscheiden sich nicht nur physiologisch in ihrer Form, sondern ebenfalls durch die Sehfärbstoffe. Die Sehfärbstoffe leiten durch die Absorption von Licht den Transduktionsprozess des Sehens ein. Rhodopsin ist der Sehfärbstoff der Stäbchen; dieser sieht rötlich aus, weil er besonders gut blaues und grünes Licht absorbiert. Das spektrale Absorptionsmaximum liegt für Rhodopsin bei etwa 500 nm . Bei den Zapfen muss weiter unterschieden werden: so lassen sich drei verschiedene Zapfenarten mit verschiedenen Sehfärbstoffen unterscheiden. Diese haben jeweils ihr spektrales Absorptionsmaxima bei 420 nm im kurzwelligen Bereich, bei 535 nm im mittelwelligen Bereich und bei 565 nm im langwelligen Bereich. Durch die Absorption von Licht zerfällt der Sehfärbstoff, wodurch die Signaltransduktion eingeleitet wird. (Eysel, 2010)

Das Ruhemembranpotential der Photorezeptormembran liegt bei etwa -30 mV . Wird diese Membran belichtet, kommt es zu einer Hyperpolarisation, wohingegen es bei einer Verdunklung zu einer Depolarisation kommt. Je größer die Intensität der Lichtreize, desto größer wird die Amplitude des Photorezeptorpotentials. (Eysel, 2010) Die Anpassung an diese Potentialänderungen stellt eine negative Rückkopplungsschleife dar, an deren Ende sich die Sensoren bei entsprechenden Bedingungen entweder hell- oder dunkeladaptiert haben. Die Zapfen haben im Vergleich zu den Stäbchen eine etwa 100-fach geringere Lichtempfindlichkeit. Es besteht die Annahme, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass die Reaktion in den Zapfen deutlich schneller inaktiviert wird. (Silbernagl & Despopoulos, 2012)

Durch die Reaktion der Rezeptoren in der Netzhaut ist das Auge in der Lage, sich an unterschiedliche Leuchtdichten anzupassen und kann sowohl sehr starke als auch sehr schwache Lichtreize wahrnehmen. Es können Reizstärken in einem Verhältnis von $1:10^{12}$ wahrgenommen werden. Für diese Wahrnehmung wird eine Anpassung, Adaptation des Auges, an die Leuchtdichte der jeweiligen Umgebung benötigt. Ein helladaptiertes Auge nimmt einen nicht beleuchteten Raum vorerst als schwarz wahr; nach einigen Minuten kann der Beobachter dennoch Gegenstände erkennen. Das bedeutet, dass sich die Reizschwelle gesenkt hat. Die Sensorempfindlichkeit wird letztendlich chemisch an die unterschiedlichen Lichtverhältnisse angepasst. (Silbernagl & Despopoulos, 2012)

Zur Adaptation an unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse stehen dem Auge neben der Retina-Adaptation noch drei weitere Mechanismen zur Verfügung. An erste Stelle kann die Pupille die Lichtmenge des ins Auge fallenden Lichts um den Faktor 16 verändern. Durch diese Anpassung einer weiten Pupille bei Dunkelheit und einer verengten Pupille bei Helligkeit reagiert das Auge auf eine plötzliche Helligkeitsveränderung. Diese Anpassung braucht nur wenige Sekunden; im Vergleich dazu benötigt die Adaptation des Auges an die vollkommene Dunkelheit durch die Retina-Anpassung etwa 30 Minuten. (Silbernagl & Despopoulos, 2012) Die Größe der Pupille ändert sich nicht nur durch einen veränderten Lichteinfall, sondern wird zusätzlich beeinflusst durch die Entfernung des Sehobjekts, das Alter des Betrachters und emotionale Faktoren wie Angst oder Wut. Insbesondere das Alter ist für die Ableitung der Wirkungsindikatoren von großer Bedeutung, da sich das Auge beispielsweise im Alter deutlich schlechter

an unterschiedliche Leuchtdichten anpassen kann und dadurch die visuelle Empfindung verschlechtert wird. Die gewöhnliche Pupillengröße variiert zwischen 1 mm und 8 mm. Sowohl für Neugeborene als auch für ältere Menschen ist dieses Anpassungsfeld jedoch kleiner. Bei gewöhnlichen Beleuchtungsverhältnissen in einem Innenraum hat die Pupille eines Erwachsenen einen Durchmesser von 4 mm. (Nema & Nema, 2008) Die zweite Anpassung erfolgt durch die sogenannte räumliche Summation. Hierbei wird die Größe der Retinafläche verändert, aus der eine Sehnervfaser ihre Erregung bekommt. Bei geringem Licht ist diese Fläche größer als bei Helligkeit. Neben der räumlichen Summation kann ebenfalls eine zeitliche Summation stattfinden. So kann das längere Anschauen von einem geringeren Reiz (schwaches Licht) ein Aktionspotential auslösen. Durch das längere Hinschauen findet im Wesentlichen eine Reizverlängerung statt. Ein größerer Lichtreiz würde hingegen nur eine kürzere Zeitspanne benötigen, um ein Aktionspotential auszulösen. (Silbernagl & Despopoulos, 2012)

Diese vier Adaptationsvorgänge lassen sich in drei Kategorien untergliedern: die Veränderung der Pupillengröße, die neuronale Adaptation und die photochemische Adaptation. Die Pupille hat vergleichsweise die geringste Anpassungsfähigkeit. Die neuronale Adaptation, wozu sowohl die räumliche als auch die zeitliche Summierung zählt, ist dafür verantwortlich, dass der Mensch in einem Raum mit sehr unterschiedlichen Leuchtdichten nicht bewusst merkt, dass das Auge nicht an die entsprechende Leuchtdichte adaptiert ist, da auf der neuronalen Ebene eine sehr schnelle Anpassung stattfindet. Die neuronale Anpassung reicht jedoch nur für Beleuchtungsunterschiede, die nicht größer als 2 – 3 Log-Einheiten sind. Muss das Auge sich an größere Beleuchtungsunterschiede anpassen, wird eine photochemische Adaptation durch die Photorezeptoren benötigt. (Boyce, 2014)

Zur Definition eines Wirkungsindikators sowie zum Herleiten eines Wirkungsmechanismus müssen somit die Adaptationsvorgänge quantifizierbar sein. Diese Quantifizierung bezieht sich jedoch ausschließlich auf die Anpassung der Pupille sowie die photochemische Adaptation, da sich die neuronale Anpassung aufgrund der sehr schnellen Anpassung und des geringen Anpassungsbereichs in einem stationären Modell nicht für die Nutzung in einem Wirkungsmechanismus quantifizieren lässt.

5.4.1.1 Numerische Bestimmung der Pupillengröße

Die Größe der Pupille beeinflusst nicht nur die Beleuchtungsstärke der Netzhaut, sondern zusätzlich die Schärfentiefe, die Beugung des Lichts, das Streulicht im Auge und die Aberrationen höherer Ordnung. Das wichtigste afferente Signal, das die Größe der Pupille steuert, ist die Veränderung der Umgebungsbeleuchtung. (Barbur & Stockman, 2010) Für die Bewertung der Auswirkungen der visuellen Umgebung auf einen individuellen Menschen ist es daher von entscheidender Bedeutung, die aktuelle Größe der Pupille zu kennen, da diese wiederum einen Einfluss auf die Performanz des visuellen Systems hat. Im Laufe des letzten Jahrhunderts wurden eine Reihe von Formeln zur mathematischen Bestimmung der Pupillengröße hergeleitet. Dabei wurde jedoch jeweils ein einzelner Einflussparameter berücksichtigt (Holladay, 1926; Crawford, 1936; Moon & Spencer, 1944; Groot & Gebhard, 1952; Stanley & Davis, 1995; Barten 1999; Blackie & Howland, 1999; Winn et al., 1994). Jede dieser Studien berücksichtigt entweder nur die Leuchtdichte oder die Leuchtdichte und zusätzlich das Adaptationsfeld, welches der Spannweite des Blickfeldes entspricht. Letztere bezieht sich lediglich auf den Bezug zwischen der Abnahme der Anpassungsfähigkeit der Pupille mit zunehmendem Alter. Des Weiteren werden gewöhnlicherweise in

solchen Studien lediglich die monokularen Auswirkungen der Beleuchtungsumgebung geprüft und nicht die binokularen. Watson und Yellott (2012) untersuchten in ihrer Studie jede, der oben genannten Formeln und leiteten daraus eine mathematische Formulierung für die einheitliche Bestimmung der Pupillengröße her. Diese berücksichtigt sowohl die Leuchtdichte als auch die Größe des Adaptationsfeldes, das Alter und die Differenzierung zwischen der monokularen und der binokularen Anpassung der Pupille. Diese Herleitung basiert auf vier Annahmen. Die erste Annahme beruht darauf, dass in einem gegebenen Alter sich die monokulare Pupillengröße alleine in Abhängigkeit von der Leuchtdichte und dem Winkel des Adaptationsfeldes errechnen lässt. Das Produkt aus Leuchtdichte und Adaptationswinkel wird im Folgenden als effektive Hornhautflussdichte F bezeichnet. Diese errechnet sich wie folgt.

$$F = L a M(e) [-] \quad (55)$$

Dabei ist L die Leuchtdichte [cd/m^2], a der Adaptationswinkel [$^\circ$] und $M(e)$ ein konstanter Faktor, der den Bezug für die monokulare oder binokulare Betrachtung herstellt. Dabei gilt:

$$M(1) = 0.1 \quad (56)$$

$$M(2) = 1 \quad (57)$$

Die zweite Annahme beruht darauf, dass in diesem gegebenen Alter, das als Referenzalter bezeichnet wird, die Gleichung von Stanley und Davis (1995) für die Bestimmung der monokularen Pupillengröße als gültig erachtet werden kann. Die dritte Annahme beruht auf den Studien von Winn et al. (1994), die zu dem Ergebnis kamen, dass die Pupillengröße mit zunehmendem Alter für alle Leuchtdichten linear abnimmt. Somit kann für jedes Alter, das vom Referenzalter abweicht, die Pupillengröße durch eine lineare Altersfunktion im Verhältnis zum Referenzalter angepasst werden. Die letzte Annahme, die getroffen wurde, bezieht sich auf das Verhältnis zwischen dem Referenzalter und der Veränderung der Pupillengröße in Abhängigkeit vom Alter. Es gilt, dass die Steigung der linearen Altersanpassung eine Funktion des Referenz-Pupillendurchmessers ist. Dies wird dadurch begründet, dass der verfügbare Variationsbereich des Pupillendurchmessers wiederum vom Referenz-Pupillendurchmesser abhängig ist. Unter Berücksichtigung dieser vier Annahmen kann die individuelle Pupillengröße entsprechend Gleichung 59 und 60 numerisch bestimmt werden. Dabei wird zusätzlich unterschieden, ob die betrachteten Personen älter / gleich alt oder jünger als 20 Jahre sind. Als Grundlage für die vereinfachte Berechnung wird wiederum die Hornhautflussdichte genutzt. (Watson & Yellott, 2012)

$$f = F^{0.41} = [LaM(e)]^{0.41} [-] \quad (58)$$

$$y \geq 20$$

$$D_U = \frac{18.5172 + 0.122165 f - 0.105569 y + 0.000138645 f A l}{2 + 0.0630635 f} [mm] \quad (59)$$

$$y < 20$$

$$D_U = \frac{16.4674 + e^{-0.208269 A l} (-3.96868 + 0.00521209 f) + 0.124857 f}{2 + 0.0630635 f} [mm] \quad (60)$$

Bei dieser Berechnung handelt es sich um eine stationäre Berechnung der Pupillengröße; die dynamischen und kurzfristigen Anpassungen werden nicht berücksichtigt. Daneben ist anzumerken, dass es weitere Faktoren gibt, die die Pupillengröße verändern können. Hierzu zählen beispielsweise die Akkommodation, mentale Aktivitäten, emotionaler Stress, die Wiedererkennung und die Aufmerksamkeit. Jedoch wird bisher davon ausgegangen, dass die kognitiven Effekte auf die Pupillengröße vergleichsweise klein sind. Zusätzlich haben diese Faktoren nur sehr kurzfristige Auswirkungen auf die Pupille, was bedeutet, dass die Pupille nach wenigen Sekunden in ihren ursprünglichen Adaptationszustand zurückkehrt. (Watson & Yellott, 2012) Andere Faktoren wie das Geschlecht, die Farbe der Iris und mögliche Sehstörungen (Kurzsichtigkeit, Weitsichtigkeit) haben dagegen keinen direkten Einfluss auf die Veränderungen der Pupillengröße. (Winn et al., 1994)

5.4.1.1.2 Numerische Bestimmung der retinalen Beleuchtungsstärke

Da die alleinige Betrachtung der Pupillengröße zur Anwendung im Wirkungsmechanismus nicht ausreichend erscheint, wird der Fokus auf den visuellen Reiz gelegt. Dabei handelt es sich um das Bild, das auf der Netzhaut entsteht und nicht wie vielfach vermutet um die Leuchtdichte einer externen Quelle. (Troland, 1917) Dennoch wird dieses Bild durch die externen visuellen Reize hervorgerufen, weswegen ein Zusammenhang zwischen dem äußeren Reiz und dem internen Bild gemacht werden muss. Dieses interne Bild entsteht durch die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut. Dabei handelt es sich um eine nicht messbare Größe. Jedoch kann diese quantitativ in Abhängigkeit von der Umgebungsleuchtdichte ermittelt werden, wenn der Pupillendurchmesser bekannt ist. (Groot & Gebhard, 1952) Troland (1917) hat die Einheit Troland eingeführt, die zur Beschreibung der retinalen Beleuchtungsstärke herangezogen werden kann. Somit wird das Produkt aus Leuchtdichte und Pupillenfläche als Troland bezeichnet. Definitionsgemäß handelt es sich hierbei um die retinale Beleuchtungsstärke, wenn eine externe Fläche mit einer Leuchtdichte von einer Candela pro Quadratmeter durch eine Pupillenöffnung von einem Quadratmillimeter gesehen wird. Somit berechnet sich die retinale Beleuchtungsstärke wie folgt. (Wyszecki & Stiles, 1982)

$$T = L * p [Td] \quad (61)$$

Dabei steht T für die retinale Beleuchtungsstärke [Td], L für die Leuchtdichte des Blickfeldes [cd/m²] und p für die Pupillenfläche [mm²]. Anzumerken ist, dass selbst in der Fachwelt Uneinigkeit bezüglich der Definition des Trolands herrscht. So heißt es von der *Optical Society of America*, dass die Troland Einheit

oftmals mit der retinalen Beleuchtungsstärke gleichgesetzt wird und diese Anwendung technisch inkorrekt ist. Dennoch schreibt die Society in einer anderen Veröffentlichung, dass der Troland eine Einheit für die Beleuchtungsstärke auf der Retina ist. Die internationale Beleuchtungskommission gibt wiederum an, dass der Troland eine Einheit ist, mit der eine Quantität, ausgelöst durch einen Lichtreiz und welche proportional zur retinalen Beleuchtungsstärke ist, ausgedrückt wird. (Thibos, Lopez-Gil & Bradley, 2018)

Um der physiologischen Zweifelhafte Rechnung zu tragen, wird nicht die vereinfachte Berechnung, welche sich lediglich aus der Leuchtdichte und der Pupillenfläche zusammensetzt, berücksichtigt, sondern es wird zusätzlich der Stiles-Crawford Effekt zur Kenntnis genommen. Es wird gewöhnlicherweise davon ausgegangen, dass die scheinbare Helligkeit eines Sehobjektes proportional zur Pupillenfläche ist. Das würde bedeuten, dass die Beleuchtungseffizienz eines Lichtstrahls, der durch die Pupille in das Auge tritt und auf die Retina trifft, unabhängig davon ist, an welcher Stelle der Lichtstrahl durch die Pupille durchgetreten ist. (Stiles & Crawford, 1933) Die entsprechenden Untersuchungen führten zu dem Schluss, dass je weiter der Eintrittspunkt des Lichtstrahls vom Mittelpunkt der Pupille abweicht, desto weniger effizient wird der Lichtstrahl. Deswegen sind kleine Pupillen effizienter als größere Pupillen. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, wird Gleichung 62 nach Groot und Gebhard (1952) für die Berechnung der retinalen Beleuchtungsstärke genutzt.

$$T = 10 r^2 * 3.18 * L (1 - 0.0425r^2 + 0.00067 r^4) [Td] \quad (62)$$

In der oben angeschriebenen Formel wird die retinale Beleuchtungsstärke in Funktion des Radius der Pupille [mm] und der Leuchtdichte [cd/m²] berechnet.

Die retinale Beleuchtungsstärke gibt im Anschluss Aufschluss darüber, in welchem Zustand, in Bezug auf die Aktivität der Photorezeptoren, sich das menschliche Auge befindet. Dabei kann, wie beschrieben zwischen dem skotopischen, mesophischen und photopischen Zustand unterschieden werden. Diese Zustände ergeben sich aus der Aktivität der jeweiligen Photorezeptoren. Die Bandbreite der Leuchtdichten, denen der Mensch ausgesetzt ist, lässt sich somit in die drei genannten Bereiche aufgliedern. Der skotopische Bereich erstreckt sich von der absoluten Schwelle des Sehens, dem Schwellenwert für das Stäbchensehen bis zum Schwellenwert für das Zapfensehen. Der Photopische Bereich beginnt bei der Sättigung der Stäbchen und endet bei dem obersten Schwellenwert der ohne gesundheitliche Auswirkungen sehbaren Leuchtdichte. Zwischen dem unteren Schwellenwert für das Zapfensehen und dem Sättigungswert für das Stäbchensehen liegt der mesophische Bereich, in dem sowohl Zapfen als auch Stäbchen aktiv sind. (Stockman & Sharpe, 2006) Zur Bestimmung der retinalen Beleuchtungsstärke wird neben der bereits beschriebenen Pupillengröße ebenfalls die Leuchtdichte benötigt. Diese kann ausgehend von der individuellen spektralen Hellempfindlichkeit bestimmt werden.

5.4.1.1.3 Individuelle spektrale Hellempfindlichkeit

Licht, das in das menschliche Auge fällt, wird von drei verschiedenen Zapfentypen empfangen. Aus dem Zusammenspiel der L-, M- und S-Zapfen resultiert die individuelle Farbwahrnehmung. Somit kann die Farbwahrnehmung durch drei Funktionen abgebildet werden. Dabei gibt es eine Reihe von individuellen Parametern, die die Farbwahrnehmung beeinflussen. (Asano, 2015)

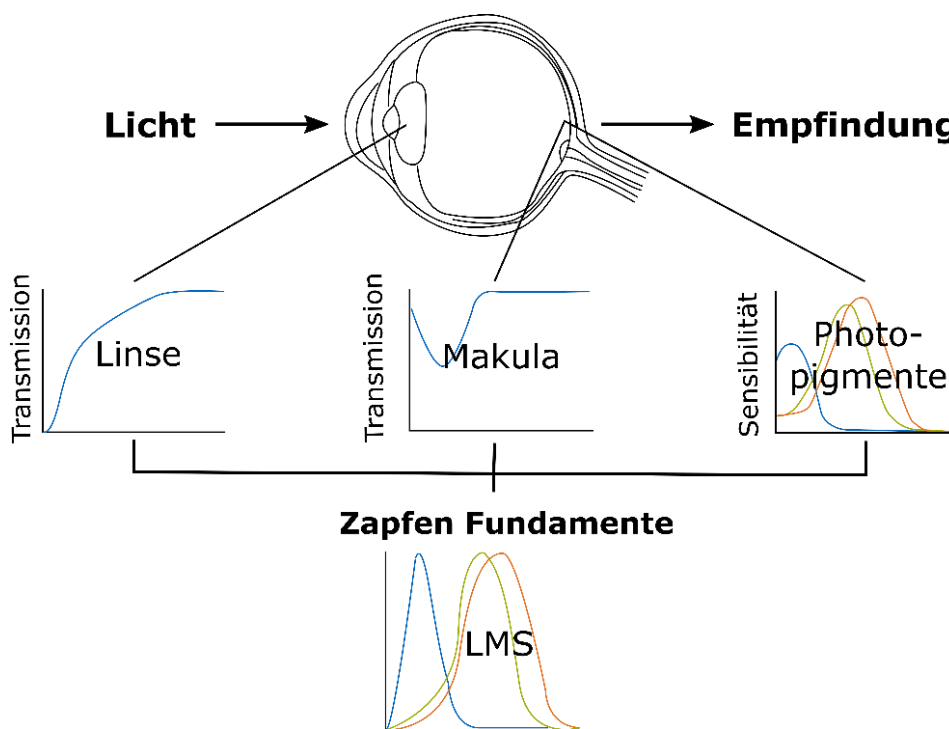


Abbildung 64: Vom Licht zur Farbwahrnehmung (Asano, 2015)

Die drei entscheidenden Komponenten der individuellen Farbwahrnehmung sind die Pigmentierung der Linse, die Makulapigmentierung und die Photopigmente. Die Linse und die Makula, der Bereich der Netzhaut in dem die Sehzellen am dichtesten angeordnet sind, filtern das Licht, das letztendlich auf die drei verschiedenen Sensoren trifft. Da diese spektral selektiv sind, ergeben sich daraus die drei Funktionen zur Beschreibung der Farbwahrnehmung.

Die Pigmentierung der Linse wird im vorliegenden Modell durch die optische Dichte der Linse beschrieben. Mit zunehmendem Alter nimmt die Dichte der Linse zu, was dazu führt, dass vermehrt Licht in der kurzwelligen Region absorbiert wird. (Asano, 2015) Dieser Zusammenhang wird in mehreren unterschiedlichen Modellen beschrieben (Pokorny, Smith & Lutze, 1987; Weale, 1988; Savage et al., 1993; Xu, Pokorny & Smith, 1997). Die einfachste Berechnung der optischen Dichte der Linse in Abhängigkeit des Alters ermöglicht das lineare Modell nach Savage et al. (1993); dabei muss die optische Dichte für jede Wellenlänge einzeln bestimmt werden.

$$D_{ocul}(\lambda) = [(Al - 25.4) * 0.013 + 1] * 10^{[5.543 - (0.013439 * \lambda)]} [-] \quad (63)$$

Im technischen Bericht der internationalen Beleuchtungskommission wird auf das Modell von Pokorny, Smith & Lutze (1987) verwiesen, womit für einen durchschnittlichen physiologischen Beobachter die optische Dichte der Linse bestimmt werden kann. Dabei wird unterschieden, ob die Person zwischen 20 Jahren und 60 Jahren oder älter als 60 Jahre ist.

Zwischen 20 und 60 Jahre:

$$D_{ocul,ave}(\lambda) = D_{ocul,1}[1 + 0.02(Al - 32)] + D_{ocul,2}[-] \quad (64)$$

Älter als 60 Jahre:

$$D_{ocul,ave}(\lambda) = D_{ocul,1}[1.56 + 0.06667(Al - 60)] + D_{ocul,2}[-] \quad (65)$$

$D_{ocul,1}$ repräsentiert den Anteil der optischen Dichte der Linse, der durch das Alter verändert wird und $D_{ocul,2}$ repräsentiert den Teil, der ab einem Alter von 20 Jahren stabil ist. Die Werte für $D_{ocul,1}$ und $D_{ocul,2}$ sind Tabelle 6.10 des technischen Berichts der internationalen Beleuchtungskommission zu entnehmen und beziehen sich auf einen 32-jährigen Standard-Beobachter. (CIE, 2005)

Auch wenn das Alter die entscheidende Größe für die optische Dichte der Linse ist (Artigas et al., 2012; Berendschot et al., 2002) ist es nicht der einzige Parameter, der einen Einfluss hat. Zwei weitere Parameter, die für eine starke Variabilität zwischen Personen gleichen Alters sorgen, sind das Raucherverhalten und Diabetes Typ 1 bei jungen Menschen. (Asano, 2015) Rauchen verändert die optische Dichte der Linse aufgrund des oxidierenden Effekts (Hammond et al., 1999), während Diabetes aufgrund des erhöhten Plasmaglukosespiegels zu einer schnelleren Vergilbung der Linse führt und somit dazu beiträgt, dass die optische Dichte der Linse bei jüngeren Menschen mit Diabetes denen von älteren gesunden Menschen entspricht (Lutze & Bresnick, 1991).

Anschließend hat die spektrale optische Dichte des Makulapigments einen entscheidenden Einfluss auf den Strahlungsanteil, der letztendlich die Zapfen erreicht. Das Makulapigment ist ungleichmäßig auf der Retina verteilt, befindet sich jedoch hauptsächlich in der Sehgrube. Deswegen ist die optische Dichte des Makulapigments abhängig von der Größe des Gesichtsfeldes, das entweder durch die Größe direkt oder durch den Blickwinkel beschrieben werden kann. (Asano, 2015) Das mathematische Modell von Moreland und Alexander (1997) zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Maximum der optischen Dichte des Makulapigments und dem Blickwinkel f_s wurde ebenfalls im Bericht der internationalen Beleuchtungskommission übernommen.

$$D_{max,makula}(\lambda) = 0.485 * e^{-\frac{f_s}{6.132}} [-] \quad (66)$$

Die Photopigmente sind die letzte Größe, die die individuelle Farbwahrnehmung beeinflussen. Ihre Sensitivität wird in Abhängigkeit von der optischen Dichte der Linse und der Makula in drei Funktionen

dargestellt. Um fundierte Aussagen über individuelle Varianzen zu treffen, werden in vivo oder in vitro Messverfahren benötigt. Allgemein gilt jedoch, je größer die optische Dichte oder je kleiner das Blickfeld, desto mehr vergrößert sich die spektrale Sensitivität der Photopigmente. Umgekehrt je geringer die optische Dichte und je größer das Blickfeld, desto mehr verringert sich die spektrale Sensitivität der Photopigmente. (Asano, 2015)

Asano (2015) präsentiert ein Modell zur Bestimmung der individuellen spektralen Sensitivität der L-, M- und S-Zapfen, basiert sich dabei jedoch auf die beschriebenen Grundlagen und auf das in dem Bericht der CIE (2005) enthaltene Modell. Die LMS-Spektralwertfunktionen (*color matching functions* – CMF) errechnen sich auf der Grundlage der folgenden Gleichung unter Berücksichtigung von zehn individuellen Parametern.

$$lms - CMF = f(Al, f_s, d_{lens}, d_{makula}, d_L, d_M, d_S, s_L, s_M, s_S) \quad (67)$$

Neben dem Alter in Jahren und dem Blickwinkel in Grad werden die prozentuale Abweichung von der durchschnittlichen optischen Dichte der Linse (d_{lens}) sowie von der maximalen optischen Dichte des Makulapigments (d_{makula}) berücksichtigt. Ebenso werden die prozentualen Abweichungen von den maximalen optischen Dichten der L-, M- und S-Zapfenpigmente mit d_L , d_M und d_S sowie die Abweichungen in Nanometer vom durchschnittlichen Wellenlängen-Maximum für die L-, M., und S-Zapfenpigmente berücksichtigt. (Asano, 2015)

Somit werden für die Berechnung der optischen Dichte der Linse die von Pokorny, Smith & Lutze (1987) gegebenen Formeln genutzt und um die von Asano (2015) beschriebene Standardabweichung erweitert.

$$D_{ocul}(\lambda) = D_{ocul,ave}(\lambda) \left(1 + \frac{d_{lens}}{100} \right) [-] \quad (68)$$

Die optische Dichte des Makulapigments wird in ähnlicher Weise um die Komponente der Standardabweichung ergänzt. Zusätzlich wird die relative spektrale optische Dichte des Makulapigments benötigt, welche Tabelle 6.4 (CIE, 2005) zu entnehmen ist.

$$D_{makula}(\lambda) = D_{max,makula}(\lambda) \left(1 + \frac{d_{makula}}{100} \right) D_{relativ,makula}(\lambda) [-] \quad (69)$$

Anschließend werden die Absorptions-Spektren $\alpha_j(\lambda)$ der L-, M- und S-Zapfen bestimmt. Die Absorption beschreibt das Verhältnis zwischen absorbiertem und einfallendem Lichtstrom. (Asano, 2015)

$$\alpha_j(\lambda) = 1 - 10^{-D_{max,photopic,j} * A_{shift,j}(\lambda)} [-] \quad (70)$$

$D_{max,photoic}$ beschreibt dabei die maximale optische Dichte eines bestimmten Zapfentyps.

$$D_{max,photopic,L} = \left(0.38 + 0.54 e^{-\frac{fs}{1.333}}\right) \left(1 + \frac{d_L}{100}\right) [-] \quad (71)$$

$$D_{max,photopic,M} = \left(0.38 + 0.54 e^{-\frac{fs}{1.333}}\right) \left(1 + \frac{d_M}{100}\right) [-] \quad (72)$$

$$D_{max,photopic,S} = \left(0.30 + 0.45 e^{-\frac{fs}{1.333}}\right) \left(1 + \frac{d_S}{100}\right) [-] \quad (73)$$

A_{shift} repräsentiert die verschobene niedrigste optische Dichte eines Zapfentyps und wird auf der Grundlage der in CIE (2005) definierten durchschnittlichen niedrigsten optischen Dichte eines Zapfentyps $A_j(\lambda)$ berechnet. Die Werte für $A_j(\lambda)$ sind Tabelle 6.6 CIE (2005) zu entnehmen. An dieser Stelle wird wiederum die Ergänzung nach Asano (2015) zur Berücksichtigung der Abweichungen von den maximalen Wellenlängen für einen bestimmten Zapfentyp eingefügt. Somit errechnet sich die tatsächliche durchschnittliche niedrigste optische Dichte aus einer linearen Interpolation. Hierbei wird zwischen den Werten, die in Tabelle 6.6 (CIE, 2005) in Fünferschritten gegeben sind, mit dem aus der Verschiebung berechneten Wellenlängen-Wert interpoliert.

$$A_{shift,j}(\lambda) = A_j(\lambda - s_j)[-] \quad (74)$$

Für jeden Zapfentyp kann anschließend die spektrale Hellempfindlichkeit in Bezug auf die Quanten bestimmt werden. Diese gilt es anschließend auf den Bereich zwischen 0 und 1 zu normalisieren. Da die Berechnung anhand der im CIE (2005) gegebenen Daten erfolgt, muss für die fehlenden Werte (zwischen den Fünferstufen) eine Spline-Interpolation durchgeführt werden. (Asano, 2015)

$$l_q(\lambda) = \alpha_l(\lambda) * 10^{-D_{makula}(\lambda) - D_{ocul}(\lambda)} [-] \quad (75)$$

$$m_q(\lambda) = \alpha_m(\lambda) * 10^{-D_{makula}(\lambda) - D_{ocul}(\lambda)} [-] \quad (76)$$

$$s_q(\lambda) = \alpha_s(\lambda) * 10^{-D_{makula}(\lambda) - D_{ocul}(\lambda)} [-] \quad (77)$$

Der im menschlichen Auge erzeugte Helligkeitseindruck wird durch den Strahlungsfluss bestimmt, der ausgehend von einer Lichtquelle in das Auge fällt. Dabei entspricht die Strahlung des Lichts der Energie von elektromagnetischen Wellen, welche hauptsächlich durch die Wellenlänge bestimmt wird. Der Helligkeitseindruck im Auge ergibt sich demnach aus der Wechselwirkung zwischen dem Strahlungsfluss,

bestimmt durch die Wellenlänge und den physiologischen Charakteristiken des Beobachters. Daraus ergibt sich, dass die spektrale Empfindlichkeit des Auges nicht für jede Lichtfarbe identisch ist. Vielmehr ergibt sie sich aus einer wellenlängenabhängigen Helligkeitsbewertung der ins Auge fallenden Strahlungsleistung. Zur Beschreibung der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges unter photopischen Bedingungen wurde bereits im Jahr 1924 von der internationalen Beleuchtungskommission die $V(\lambda)$ -Funktion eingeführt. (Witting, 2014) Die individuelle spektrale Sensitivität ist abhängig davon, welche Photorezeptoren tatsächlich stimuliert werden. Somit ergibt sich eine große individuelle Variabilität, die die Wahrscheinlichkeit, dass die individuelle spektrale Hellempfindlichkeit, von der die durch die standardisierte $V(\lambda)$ -Kurve beschrieben wird, abweicht, deutlich erhöht. (Boyce, 2014)

Sharpe et al. (2005) äußern deutliche Kritik an der normierten Hellempfindlichkeitskurve, wodurch deren Validität hinterfragt wird. Ausgehend hiervon haben sie mittels Probandenversuchen eine neue, verbesserte spektrale Hellempfindlichkeitskurve für das Tagessehen abgeleitet, welche die Nachteile aller bisher präsentierten Ansätze zur Bestimmung der spektralen Hellempfindlichkeit eliminieren soll. Ihre modifizierte Hellempfindlichkeitskurve gilt für einen 2° Beobachter und behält die grundlegenden Eigenschaften der ursprünglichen Hellempfindlichkeitskurve bei. Als weiterer Vorteil wird hervorgehoben, dass die gewählte Methode der Datenerhebung der Standardmethode zur Bestimmung von Helligkeit entspricht. Basierend auf den Studiendaten kann geschlussfolgert werden, dass die spektrale Hellempfindlichkeit primär durch die L- und M-Zapfen bestimmt wird, wohingegen der Beitrag der S-Zapfen vernachlässigbar ist. Somit ergibt sich die spektrale Hellempfindlichkeitskurve aus einer linearen Kombination der Signale der L- und M-Zapfen. Aus dem Fitting der vorhandenen Daten resultiert die folgende Gleichung zur Ableitung der spektralen Hellempfindlichkeitskurve. (Sharpe et al., 2005)

$$V(\lambda) = 1.55 l_q(\lambda) + m_q(\lambda)[-] \quad (78)$$

Die oben genannte Formel bezieht sich auf die normalisierten L- und M-Kurven. Die Renormalisierung der spektralen Hellempfindlichkeit kann durch die Division mit dem Faktor 2.476985 erreicht werden. (Sharpe et al., 2005) Wenngleich der oben beschriebene Zusammenhang für einen 2° Beobachter abgeleitet wurde, wird an dieser Stelle angenommen, dass er gleichermaßen für andere Beobachter gilt. Es wird hier zu Abweichungen von der tatsächlichen spektralen Hellempfindlichkeit kommen; diese können jedoch an dieser Stelle als vernachlässigbar betrachtet werden. Dies kann dadurch begründet werden, dass selbst für den CIE Standard-Beobachter die spektrale Hellempfindlichkeitskurve für das photopische Sehen für einen 2° Beobachter und für einen 10° Beobachter nur geringfügig voneinander abweichen und diese Abweichung sich ausschließlich auf den kurzwelligen Bereich bezieht. (CIE, 2005)

Ausgehend von den entsprechenden spektralen Hellempfindlichkeitskurven können die drei für das weitere Vorgehen benötigten photometrischen Größen, der Lichtstrom, die Lichtstärke und die Leuchtdichte bestimmt werden. (Boyce, 2014)

Bei diesen Größen handelt es sich um die grundlegenden photometrischen Größen, die zur quantitativen Bewertung von Strahlung im für den Menschen sichtbaren Spektralbereich dienen. Diese berücksichtigen sowohl die spektralen als auch die geometrischen Randbedingungen des menschlichen Auges. (Sperling, 2015) An erster Stelle steht die Bestimmung des Lichtstroms, da ausgehend hiervon alle weiteren

photometrischen Größen bis hin zur Leuchtdichte berechnet werden können. Die Einheit des Lichtstroms sind die Lumen, welche gleichzusetzen sind mit der Einheit Candela pro Steh radiant. Seit 1979 gilt nach dem *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM) die Definition, welche 1977 vom *Comité Consultatif de Photometrie et Radiometrie* (CCPR) festgelegt wurde. „Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt durch Steh radiant beträgt.“ (CGPM, 1979, S. 100) Diese Definition ist als die Anbindung der Hellempfindlichkeitsfunktion des menschlichen Auges an das radiometrische Watt zu verstehen, um letztendlich aus der Strahlung Licht zu machen. (Sperling, 2015) Die Wahl der Festlegung der Frequenz von 540 THz, statt einer monochromatischen Wellenlänge für einen Energiefluss, hat den Vorteil, dass es keinen Einfluss hat, durch welches optische Medium der Strahlungsfluss durchgeht. Das Verhältnis zwischen Frequenz und Wellenlänge kann insbesondere für das Medium Luft wie folgt mit Gleichung 79 beschrieben werden, woraus sich die zur Frequenz korrespondierende Wellenlänge ergibt. (Wyszecki & Stiles, 1982; Schäfer, 2012)

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{\nu_0 n} = \frac{2.99792458 * 10^8}{540 * 10^{12} * 1.00028} = 555.016 \text{ nm} \quad (79)$$

Dabei beschreibt c_0 die Lichtgeschwindigkeit [m/s] und n den Index der Brechkraft der Luft [-], wodurch sich eine Wellenlänge von 555.016 nm ergibt. Diese Wellenlänge bildet die Grundlage zur Bestimmung des Strahlungsäquivalents K_m , welches als Eingangsgröße für die Berechnung des Lichtstroms benötigt wird. Basierend auf der Definition der Candela Einheit wurde $K_0 = 683 \text{ cdsr/W}$ festgelegt. (Wyszecki & Stiles, 1982)

$$K_m = \frac{K_0}{V(\lambda_0)} \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right] \quad (80)$$

Ausgehend hiervon ergeben sich für die Berechnung des photopischen Lichtstroms, der Lichtstärke und der Leuchtdichte die folgenden Formeln. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls der Raumwinkel definiert. (Witting, 2014)

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d(\lambda) \quad [\text{lm}] \quad (81)$$

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \left[\frac{\text{lm}}{\text{sr}} \right] \quad (82)$$

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \text{ [sr]} \quad (83)$$

$$L = \frac{I}{A^*} \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (84)$$

Die Bestimmung des Lichtstroms Φ erfolgt als Integral über die Wellenlängen des sichtbaren Spektrums der elektromagnetischen Strahlung. Hierfür werden die bereits beschriebenen Größen des Strahlungsäquivalents und die individuelle spektrale Hellempfindlichkeitskurve benötigt. Zusätzlich wird der spektrale Strahlungsfluss $\Phi_{e,\lambda}$ [W/nm] berücksichtigt. Beispielhafte Emissionsspektren, welche als Grundlage für den spektralen Strahlungsfluss dienen, sind in Anhang B abgebildet.

Die Bestimmung der Lichtstärke erfolgt auf der Grundlage des Lichtstroms, jedoch wird nur ein Teillichtstrom betrachtet nämlich, der in einem bestimmten Raumwinkel Ω abgegeben wird. Der Raumwinkel ergibt sich aus der beleuchteten Fläche und dem Abstand zwischen dieser Fläche und der Lichtquelle (Positionsverhältnis). Ausgehend von der Lichtstärke lässt sich die individuell wahrgenommene Leuchtdichte, welche als Eingangsparameter für die retinale Beleuchtungsstärke dient, bestimmen.

5.4.1.2 Definition des visuellen Wirkungsindikators und der Wirkungszonen

Ein wesentlicher Unterschied in der Bewertung der Auswirkung von Licht auf den Menschen im Gegensatz zur Bewertung der Wirkung von der Temperatur auf den Menschen ist die fehlende Datengrundlage. Die Auswirkungen der Temperatur werden seit Jahrzehnten erforscht, wodurch eine breite Datenbasis geschaffen wurde, welche für die Bewertung der visuellen Umgebung kaum vorhanden ist. (Shafavi et al., 2020) Eine weitere wichtige Unterscheidung liegt in der Identifizierung der direkten Auswirkungen, die das Licht auf den Menschen haben kann und welche hiervon als neutral zu betrachten sind. Bei der Temperatur gibt es hierfür eine ganz klare Abgrenzung zwischen der neutralen und den nicht neutralen Zonen, in denen der Körper auf seine Umgebung reagiert. Diese Unterscheidung ist bei der Wirkung von Licht deutlich schwieriger. Das Auge kann sich durch die Anpassungsprozesse an sehr unterschiedliche Leuchtdichten anpassen. Somit kann eine weite Spannbreite an Leuchtdichten als neutral betrachtet werden. Diese wirken sich somit zwar auf den Menschen aus, da sie eine Reaktion der Pupille und der Photorezeptoren der Netzhaut auslösen; diese Anpassung stellt jedoch keine negative Auswirkung für den Menschen dar.

Es lässt sich für jede beliebige Beleuchtungssituation darstellen, in welchem Zustand sich das Auge befindet (photopisch, skoptopisch oder mesopisch). Jedoch sind diese Zustände in Bezug auf die physiologische Auswirkung alle als neutral zu bewerten. Muss das Auge sich an Leuchtdichten anpassen, die außerhalb des Anpassungsbereichs liegen, würde dies eine negative Auswirkung für das menschliche Sehen darstellen. Ein solcher Zustand ist jedoch innerhalb eines Gebäudes kaum zu erwarten. Der Vollständigkeit halber wird dieser Zusammenhang in der Wirkungsbewertung mitaufgenommen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dieser Zustand in der Realität nicht auftritt.

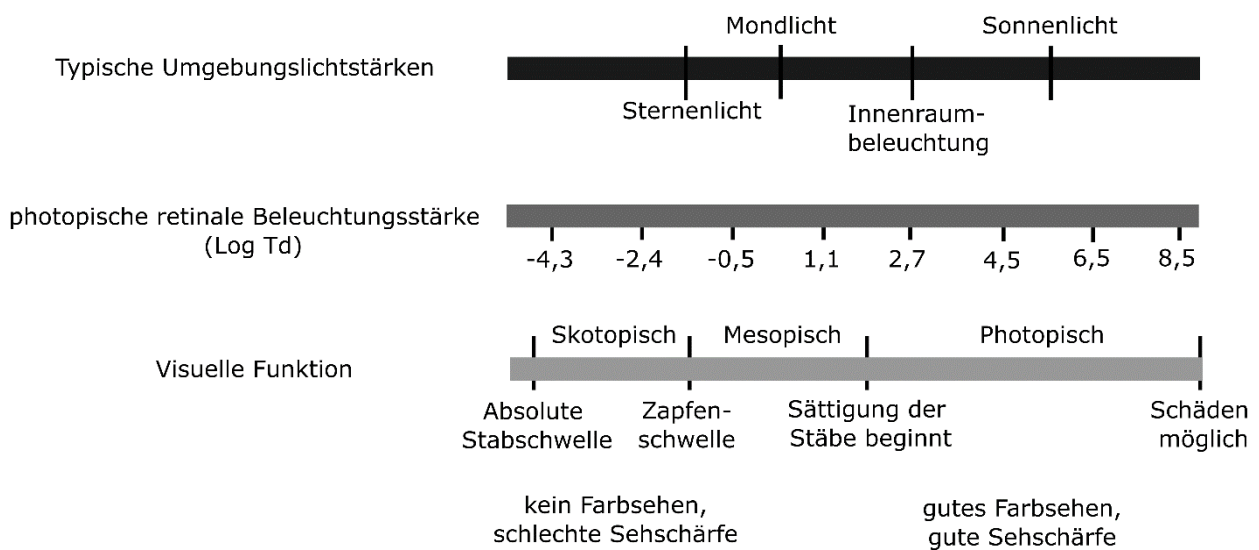


Abbildung 65: Zusammenhang zwischen den Umgebungslichtstärken und der visuellen Funktion des Auges (Barbur & Stockman, 2010; Stockman & Sharpe, 2006 nach Hood & Finkelstein, 1986)

Zur Ableitung des Wirkungsindikators, der es ermöglicht, die Auswirkungen der visuellen Lichtumgebung zu bewerten, wird der Weg des Lichts durch das Auge betrachtet, ausgehend von der Pupille bis hin zur Netzhaut.

Die Pupillengröße könnte theoretisch als Wirkungsindikator zur Bewertung der Auswirkung der visuellen Lichtumgebung genutzt werden. Wird jedoch die Wirkungskette weiter in ihrem Verlauf betrachtet, dann ist eine fundiertere Bewertung möglich. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Pupillengröße durch individuelle Personenfaktoren bestimmt wird und sich somit nicht einheitlich in Bezug auf die vom Menschen wahrnehmbare Leuchtdichte und die ausgelöste Wirkung bewerten lässt.

Die retinale Beleuchtungsstärke berücksichtigt sowohl die individuelle Pupillengröße als auch die Leuchtdichte, welche sich definierten visuellen Funktionen zuordnen lässt. Somit wird die retinale Beleuchtungsstärke als Wirkungsindikator zur Bewertung der visuellen Wirkung einer visuellen Umgebung herangezogen.

Im skotopischen Bereich ist sowohl das Farbsehen als auch die Sehschärfe eingeschränkt, während der photopische Bereich sich durch ein gutes Farbsehen auszeichnet. Zudem liegt die retinale Beleuchtungsstärke, die für die beste Sehschärfe sorgt, im photopischen Bereich. Exakt fixierte Werte gibt es hierfür keine; jedoch wird in der gängigen Literatur immer wieder auf die Veröffentlichung von Hood und Finkelstein (1986) verwiesen. Der Punkt der besten Sehschärfe befindet sich demnach circa bei 3.2 log Td. Als Wirkungsindikator für die Quantifizierung der Auswirkung der visuellen Umgebung auf den Menschen erscheint es nicht sinnvoll, sich auf diesen einzelnen Wert festzulegen. Aus diesem Grund wird hierfür der Bereich mit einer Spannweite von 2.7 log Td bis 3.7 log Td als der Bereich der optimalen Sehschärfe definiert. (Hood & Finkelstein, 1986; Kaiser, 2017) Liegt die retinale Beleuchtungsstärke der betrachteten Person in diesem Bereich, ist in Bezug auf die Sehschärfe und auf das Erkennen von Farben mit keiner negativen Auswirkung zu rechnen. Um diesen Bereich befindet sich die Zone, in der ebenfalls davon ausgegangen werden kann, dass der Mensch nur geringfügig in seiner Sehaufgabe gestört wird. Die

untere Grenze dieser zweiten Zone liegt bei dem oberen Grenzwert der mesophischen Zone bei $2 \log Td$, da unterhalb dieses Schwellenwerts vermehrt die Stäbchen aktiv werden. (Stockman & Sharpe, 2006) Der obere Schwellenwert dieser Zone liegt bei $7.5 \log Td$, da oberhalb dieses Schwellenwerts mit Schädigungen der Netzhaut zu rechnen ist. Die komfortrelevante Auswirkungszone bei geringen retinalen Beleuchtungsstärken beschreibt die mesophische Zone; in dieser Zone wird die Sehschärfe zunehmend schlechter. Die Zone erstreckt sich von der Schwelle des Sehens bei $-4.3 \log Td$ bis zur Grenze der Zone der nicht wahrnehmbaren Auswirkungen bei $2 \log Td$. (Stockman & Sharpe, 2006) Zusätzlich zu den Grenzwerten der Wirkungszonen, welche der Literatur entnommen wurden, wird ein weiterer Bereich für die Zone der komfortrelevanten Auswirkungen eingeführt. Dieser befindet sich am oberen Ende der bisherigen Zone der nicht wahrnehmbaren Auswirkungen ab $5.5 \log Td$ bis $7.5 \log Td$. Dieser Bereich entspricht umgerechnet der retinalen Beleuchtungsstärke bei wolkenfreiem Himmel und Sonnenschein. In diesem Bereich kann es erfahrungsgemäß bereits zu komfortrelevanten Auswirkungen beim Menschen kommen, da die Überbeleuchtung bewusst bemerkbar wird und die Adaptationsvorgänge des Auges diese nur noch teilweise ausgleichen können.

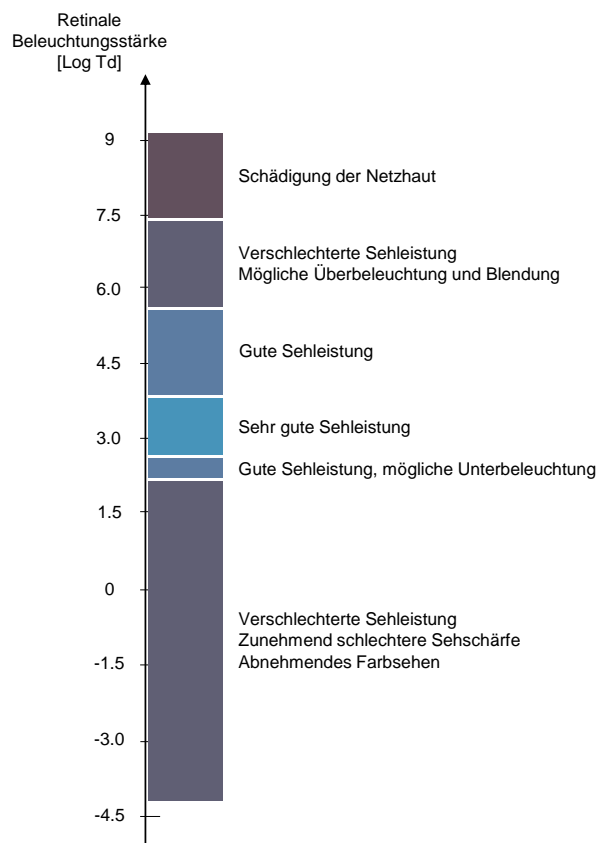


Abbildung 66: Wirkungszonen der visuellen Umgebung (visuelle Wirkung)

Der Wirkungsindikator für die visuelle Umgebung wird somit durch die photopische retinale Beleuchtungsstärke beschrieben. Hiermit können ebenfalls der mesophische und der skotopische Bereich des Sehens abgebildet werden. Diese Abbildung kann jedoch zu leichten Abweichungen führen, da sich sowohl im mesophischen als auch im skotopischen Bereich eine unterschiedliche spektrale Hellempfindlichkeit einstellt. Da jedoch eine visuelle Umgebung primär dazu dient, dass der Mensch in

einer gegebenen Beleuchtungssituation eine Sehaufgabe erfüllen kann, liegt der Fokus auf der photopischen retinalen Beleuchtungsstärke; sinkt diese in den Bereich des mesopischen Sehens, kann der Mensch seine Sehaufgabe nicht mehr erfüllen, weswegen es sich hierbei um eine komfortrelevante Auswirkung handelt. Eine exakte Bestimmung der mesopischen oder der skotopischen retinalen Beleuchtungsstärke wird für die Zuordnung zu den Wirkungszonen jedoch nicht benötigt. Die in Abbildung 66 dargestellten Wirkungszonen gelten somit lediglich für den Zeitraum des Tages, in denen der Mensch eine Sehaufgabe erfüllt. Zudem existiert die Zone der gesundheitsgefährdenden Auswirkungen lediglich bei hohen retinalen Beleuchtungsstärken, da ein Zustand der Dunkelheit, in dem der Mensch vermindert sehen kann, lediglich die Sehaufgabe erschwert und damit den Komfort beeinträchtigt, jedoch keine Gefährdung für die Gesundheit darstellt.

5.4.1.3 Herleitung des visuellen Wirkungsmechanismus

Der visuelle Wirkungsmechanismus dient der individuellen Bestimmung der retinalen Beleuchtungsstärke, welche sich nach Gleichung 62 berechnen lässt. Grundlage zur individuellen Bestimmung ist zum einen die Pupillengröße der betrachteten Person sowie die personenbezogene spektrale Hellempfindlichkeit. Beide Einflüsse lassen sich basierend auf dem beschriebenen Stand des Wissens herleiten.

Da sich die Pupillengröße ebenfalls auf die vorhandene Leuchtdichte bezieht, müssen vorerst die relevanten photometrischen Größen, basierend auf der individuellen spektralen Hellempfindlichkeit ermittelt werden.

Die individuelle spektrale Hellempfindlichkeit lässt sich nach dem von Asano (2015) beschriebenen Verfahren und den im Stand des Wissens dargestellten Anpassung für individuelle Personen bestimmen. Für die Anwendung von Gleichung 67 müssen neben dem Alter und dem Blickwinkel die Abweichungen der individuellen Person vom ursprünglichen Modell einzeln bestimmt werden. Da dies nur mit in vivo oder in vitro Messmethoden umsetzbar und mit entsprechendem Aufwand realisierbar ist, wird an dieser Stelle darauf verwiesen, dass für eine möglichst exakte Bewertung der Wirkung der Innenraumbeleuchtung diese Größen benötigt werden. Die weitere Herleitung der Bewertungsmethode basiert jedoch auf den mittleren Abweichungen nach Asano (2015), die mithilfe von umfangreichen Personenstudien abgeleitet wurden. Damit werden für die weiteren Berechnungen die Daten der folgenden Tabelle 5 übernommen. Lediglich die optische Dichte der Linse kann rechnerisch individuell bestimmt werden, woraus wiederum die Abweichung vom Standardwert bestimmbar ist.

Tabelle 5: Mittlere Abweichungen nach Altersgruppen untergliedert nach Asano (2015)

	21 – 30 Jahre	31 – 40 Jahre	41 – 50 Jahre	> 50 Jahre
d_{makula} [%]	2.79	3.43	1.20	9.43
d_L [%]	-8.44	-10.23	-4.00	-7.33
d_M [%]	0.46	-3.84	-3.25	-8.37
d_S [%]	0.02	-0.04	0.00	-0.75
s_L [mm]	1.39	2.16	1.36	0.73
s_M [mm]	-0.39	-0.91	-1.07	-1.71
s_S [mm]	-0.30	-0.80	-1.14	-0.52

Das Ergebnis der Anwendung der Gleichungen 63 sowie 66 bis 77 ist beispielhaft in Abbildung 67 dargestellt. Die gezeigten Funktionen dienen der Beschreibung der spektralen Hellempfindlichkeit jedes Zapfentyps für zwei individuelle Personen.

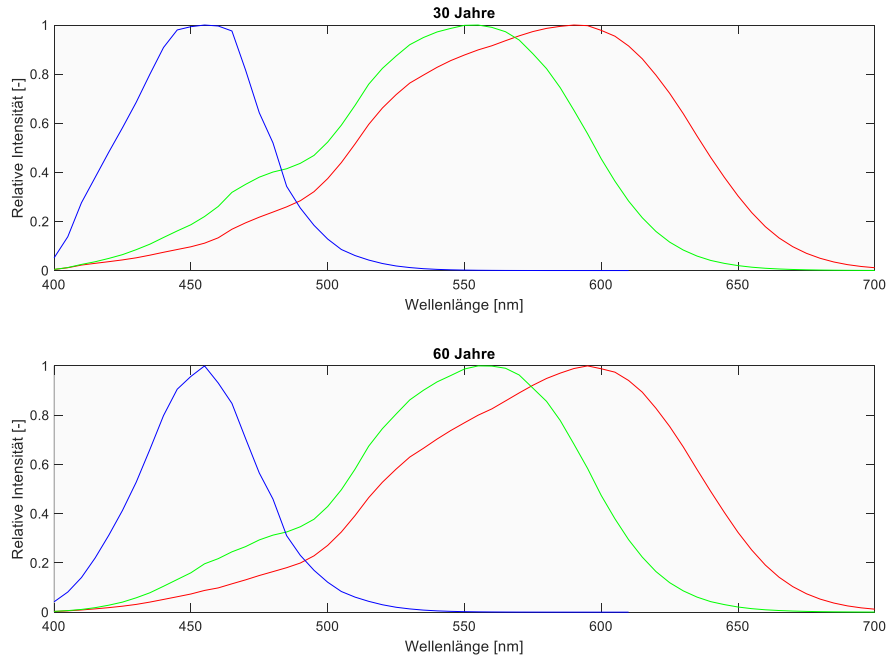


Abbildung 67: Darstellung der LMS-Funktionen für zwei unterschiedliche Alter

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die optische Dichte abweichend von Asano (2015) entsprechend Gleichung 63 nach Savage et al. (1993) in Abhängigkeit vom Alter bestimmt werden kann und somit die tatsächliche Abweichung vom Standardwert berücksichtigt werden kann. Weitere Einflüsse auf die optische Dichte wie beispielsweise Diabetes Typ 1 oder das Raucherverhalten können derzeit aufgrund der fehlenden Datengrundlage nicht in der raumphysiologischen Bilanz einbezogen werden. Lutze und Bresnick (1991) haben lediglich die Zusammenhänge zwischen der optischen Dichte von jüngeren Menschen mit Diabetes und denen von älteren gesunden Personen abgebildet, jedoch keine Möglichkeit dargestellt, die optische Dichte von betroffenen Personen rechnerisch zu bestimmen. Hammond et al. (1999) präsentieren dagegen eine Regressionsanalyse, mit welcher die optische Dichte in Abhängigkeit vom Alter für Raucher bestimmbar ist. Dabei wird zusätzlich unterschieden, ob die Person zum Zeitpunkt der Betrachtung Raucher ist oder ob sie lediglich in der Vergangenheit geraucht hat; jedoch wurde die Regression lediglich für eine Wellenlänge von 410 Nanometer aufgestellt. Trotz des nachgewiesenen Einflusses sowohl des aktuellen wie auch des vergangenen Raucherverhaltens und einer Diabetes Typ 1 Erkrankung bei jungen Personen können diese Einflüsse numerisch nicht erfasst werden. Sind die spektralen Empfindlichkeiten der L-, M- und S-Zapfen bekannt, kann ebenfalls mittels Gleichung 78 die spektrale Hellempfindlichkeit für das Tagessehen abgebildet werden, beispielhaft dargestellt in Abbildung 68.

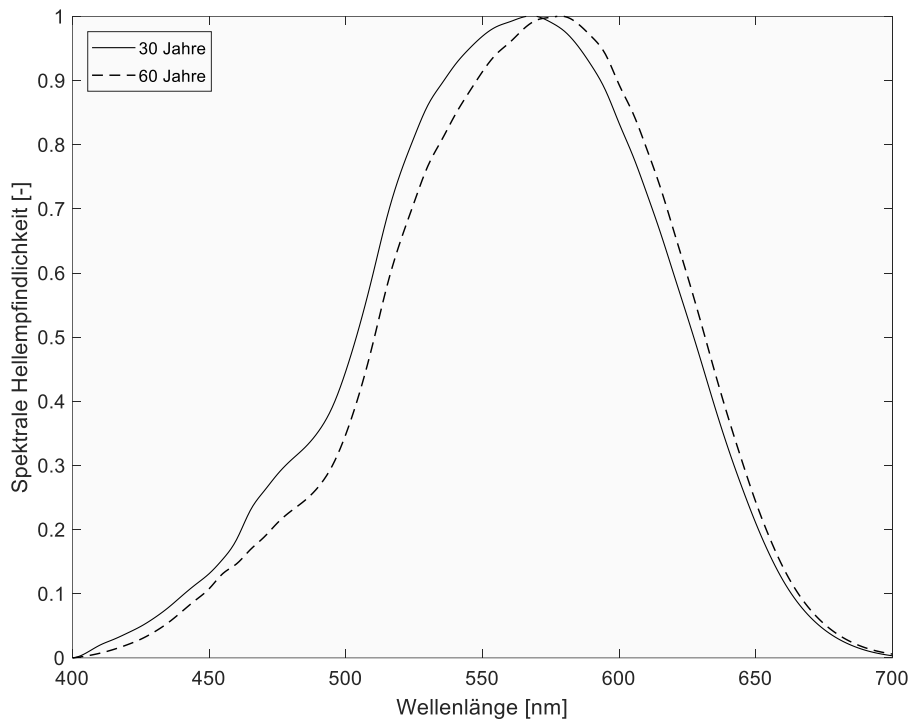


Abbildung 68: Photopische spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen für zwei Personen unterschiedlichen Alters

Aus der obigen Darstellung ergeben sich die Maxima für die spektrale Hellempfindlichkeit bei einer Wellenlänge von 568 Nanometer (30 Jahre) und 579 Nanometer (60 Jahre).

Zur Bestimmung der retinalen Beleuchtungsstärke werden eine Reihe von photometrischen Größen benötigt. So lässt sich der Lichtstrom in Abhängigkeit von der elektromagnetischen Strahlungsverteilung jeder Lichtquelle und der individuellen spektralen Hellempfindlichkeit berechnen (Gleichung 81). Der spektrale Strahlungsfluss ist abhängig von der jeweiligen Lichtquelle und ergibt sich somit aus der Sachbilanz des Raums. Zusätzlich wird das Strahlungsäquivalent benötigt. Dieses lässt sich für die individuelle Person durch die Bestimmung der spektralen Hellempfindlichkeit für den Wert λ_0 ermitteln.

Da zur Bestimmung der Pupillengröße und der retinalen Beleuchtungsstärke die Leuchtdichte als Eingangsgröße benötigt wird, muss zusätzlich ausgehend vom Lichtstrom die Lichtstärke berechnet werden. Diese ergibt sich wiederum aus dem bereits bekannten Lichtstrom und dem Raumwinkel. Letzterer muss in der Sachbilanz erfasst werden, da sich der Raumwinkel in Abhängigkeit von der Position der Person zur Lichtquelle und der jeweiligen Tätigkeit ergibt. Obwohl der Raumwinkel in der Sachbilanz erfasst wird, handelt es sich bei diesem nicht um einen Elementarstrom, sondern vielmehr um einen Unterstützungsparameter, der zur Bestimmung der Lichtstärke dient.

Die Leuchtdichte errechnet sich aus der Lichtstärke, welche nach Gleichung 82 ebenfalls bekannt ist, und der Größe der gesehenen Fläche. Auch dieser, von der Person und ihrer Tätigkeit, abhängige Parameter muss in der Sachbilanz bei den personenbezogenen Parametern erfasst werden. Im Anschluss lassen sich sowohl der Pupillendurchmesser als auch der Pupillradius in Abhängigkeit von der Leuchtdichte, dem Alter und dem Blickwinkel sowie die retinale Beleuchtungsstärke als Wirkungsindikator numerisch bestimmen.

5.4.1.4 Anwendung des visuellen Wirkungsmechanismus

Für die Berechnung des visuellen Wirkungsindikators werden zum einen individuelle Personendaten benötigt, welche sich in diesem Fall ausschließlich auf das Alter beschränken. Neben den Umgebungsdaten, welche lediglich das Emissionsspektrum der Lichtquelle und die beleuchtete Fläche umfassen, werden zum anderen Parameter benötigt, welche das visuelle Feld des Menschen in einer gegebenen Situation beschreiben.

Das visuelle Feld ist für die Bewertung der visuellen Umgebung ein entscheidender Faktor. Dieses berücksichtigt die Augenanzahl, die Feldgröße, das Blickfeld, die gesehene Fläche und den Abstand zur Lichtquelle. In einer gewöhnlichen Bewertungssituation wird der Mensch die Umgebung mit beiden Augen betrachten. Es werden sowohl die Feldgröße mit 2° oder 10° berücksichtigt. Die Feldgröße ist jedoch an dieser Stelle stellvertretend zu verstehen, da der Beobachter ein großes oder ein kleines Feld betrachten kann. Es wurde bereits beschrieben, dass der Unterschied in den Ergebnissen nahezu vernachlässigbar ist und es eine Reihe von Berechnungsformeln ausschließlich für den 2° Betrachter gibt; dennoch wird diese Größe hier der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Das Blickfeld dagegen ist entscheidend für die Pupillengröße. Somit handelt es sich bei dieser Größe um das tatsächliche Blickfeld des Menschen. Die gesehene Fläche beeinflusst zudem die Leuchtdichte und der Abstand zur Lichtquelle den Raumwinkel.

Für die Bestimmung des Wirkungsindikators gibt es somit mehrere entscheidende Faktoren. Zum einen das Alter, welches die Sehqualität bestimmt und somit ebenfalls die spektrale Hellempfindlichkeit verändert. Zum anderen der vom individuellen Menschen sehbare Lichtstrom. Dieser berücksichtigt sowohl den spektralen Strahlungsfluss der jeweiligen Lichtquelle und die individuellen physiologischen Gegebenheiten des menschlichen Auges. Zudem macht es Sinn zu unterscheiden, ob der Mensch eine große oder eine kleine Fläche sieht. Dies steht in direktem Zusammenhang mit dem Blickfeld des Menschen. Der letzte entscheidende Faktor ist der Raumwinkel, welcher den Abstand zur Lichtquelle sowie die beleuchtete Fläche repräsentiert.

Der visuelle Wirkungsmechanismus berücksichtigt als physiologische Größe lediglich das Alter, welches die optische Dichte der Linse sowie den Pupillendurchmesser beeinflusst. Die weiteren personenbezogenen Einflüsse beziehen sich auf das visuelle Feld der jeweiligen Person. Die Augenanzahl sowie das Blickfeld haben ebenfalls einen Einfluss auf den Pupillendurchmesser, während die Feldgröße die optische Dichte des Makulapigments bestimmt. Die Größe der gesehenen Fläche sowie der Abstand zur Lichtquelle werden zur Bestimmung der photometrischen Größen und des Raumwinkels benötigt. Als Umgebungsdaten sind lediglich das Emissionsspektrum der Lichtquelle sowie die Größe der beleuchteten Fläche relevant. Aus diesen unterschiedlichen Eingangsgrößen lässt sich die photopische spektrale Hellempfindlichkeit und somit der Lichtstrom als Übergang zu den photometrischen Größen bestimmen. Womit letztendlich sowohl die Leuchtdichte als auch der Pupillenradius als Eingangsgrößen für die retinale Beleuchtungsstärke bekannt sind. Diese Zusammenhänge sind in der folgenden Abbildung 69 dargestellt. Für die Anwendung des visuellen Wirkungsmechanismus wurde wiederum ein *Matlab*-Skript generiert, in welchem sämtliche Eingangsdaten in Abhängigkeit von der betrachteten Person und der jeweiligen Umgebung variiert werden können. Dabei gilt wiederum, dass es sich um einen stationären Ansatz handelt und der Berechnungsvorgang nach Möglichkeit bei der Veränderung einer der Eingangsparameter erneut durchgeführt werden soll.

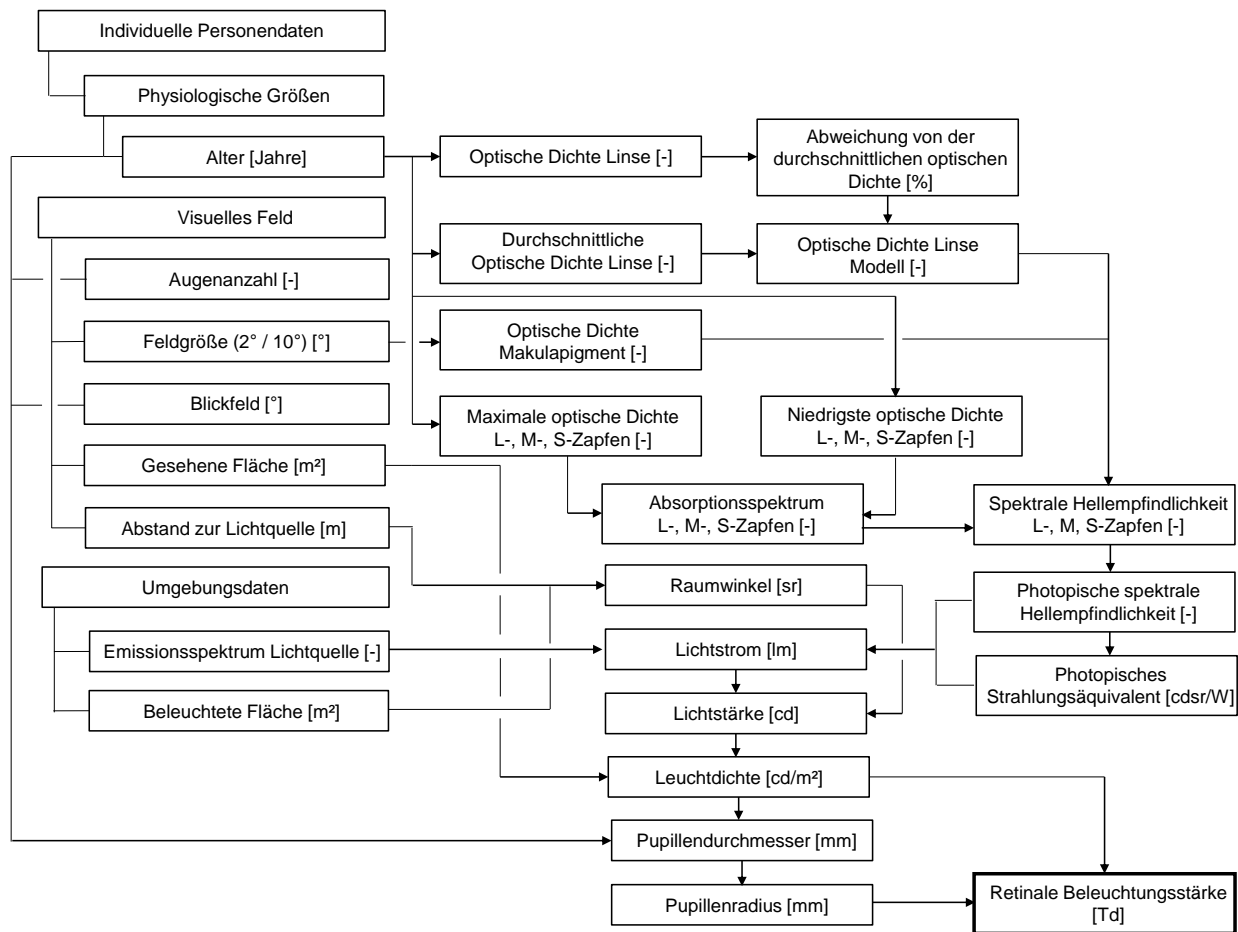


Abbildung 69: Algorithmus des visuellen Wirkungsmechanismus (visuelle Wirkung)

Für die Darstellung der Anwendung wird ebenfalls ein Drei-Achsen-System gewählt. Auf der x-Achse wird der Lichtstrom, auf der y-Achse der Raumwinkel und auf der z-Achse der sich ergebende Wirkungsindikator, die retinale Beleuchtungsstärke, eingetragen. Als weitere Einflussfaktoren bleiben somit das Alter und die Größe der gesehenen Fläche zusammen mit dem Blickfeld. Für die Darstellung der Ergebnisse wurden Person 1 im Alter von 30 Jahren und Person 2 im Alter von 60 Jahren betrachtet. Dabei werden zwei Szenarien unterschieden. Das erste Szenario beschreibt die Arbeit an einem Computerarbeitsplatz; somit beträgt die gesehene Fläche 0.2 m² und das Blickfeld 10°. Das zweite Szenario beschreibt die Situation beim Betrachten einer Präsentation an einer Leinwand; somit beträgt die gesehene Fläche 10 m² und das Blickfeld 60°. Für die Anwendung wurde ein Raumwinkel von 0.1 sr bis 6 sr und ein Lichtstrom von 1 lm bis 15000 lm angesetzt.

Abbildung 70 und Abbildung 71 stellen für beide Personen Szenario 1 dar. Zur verbesserten Lesbarkeit wurde in den Abbildungen 72 und 73 die x-Achse auf 1500 lm reduziert. Trotz der vergrößerten Darstellung lassen sich kaum Unterschiede zwischen beiden Personen erkennen.

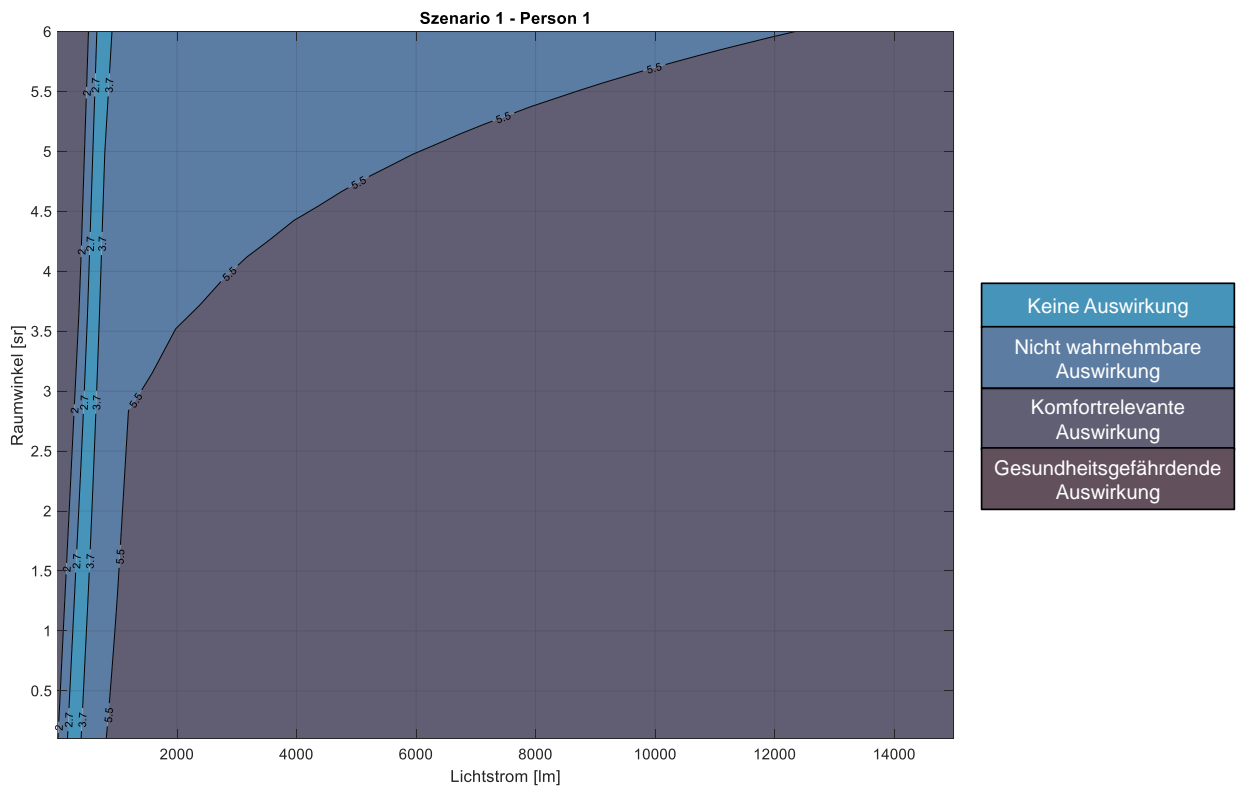


Abbildung 70: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen Person 1 bis 15000 Lumen (Szenario 1)

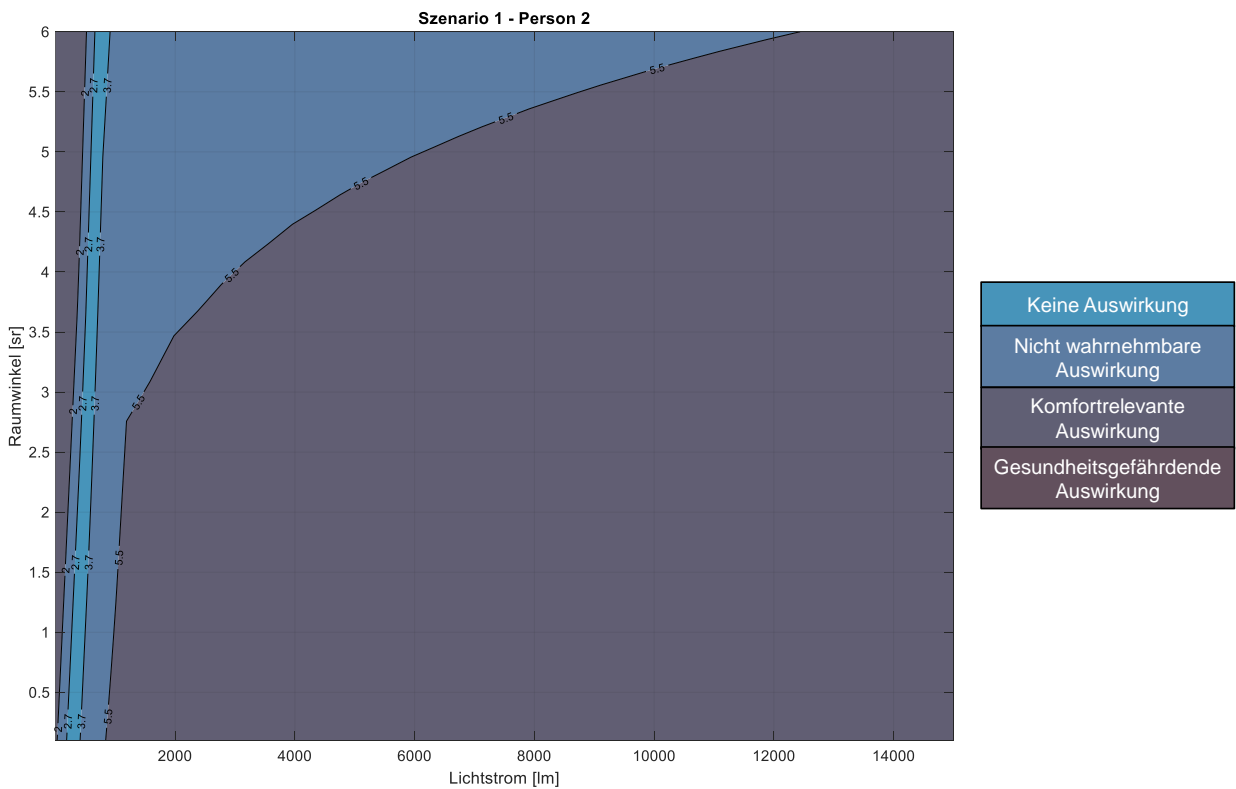


Abbildung 71: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 2 bis 15000 Lumen (Szenario 1)

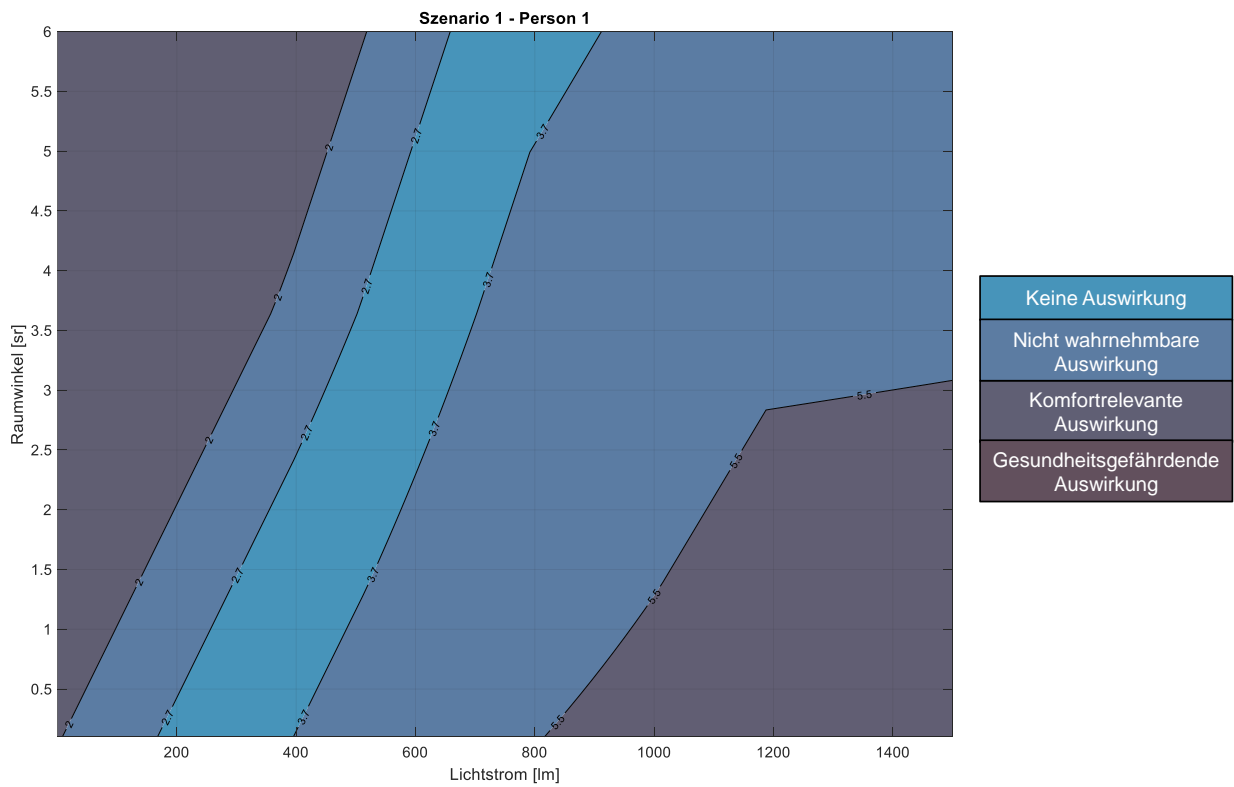


Abbildung 72: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 1 bis 1500 Lumen (Szenario 1)

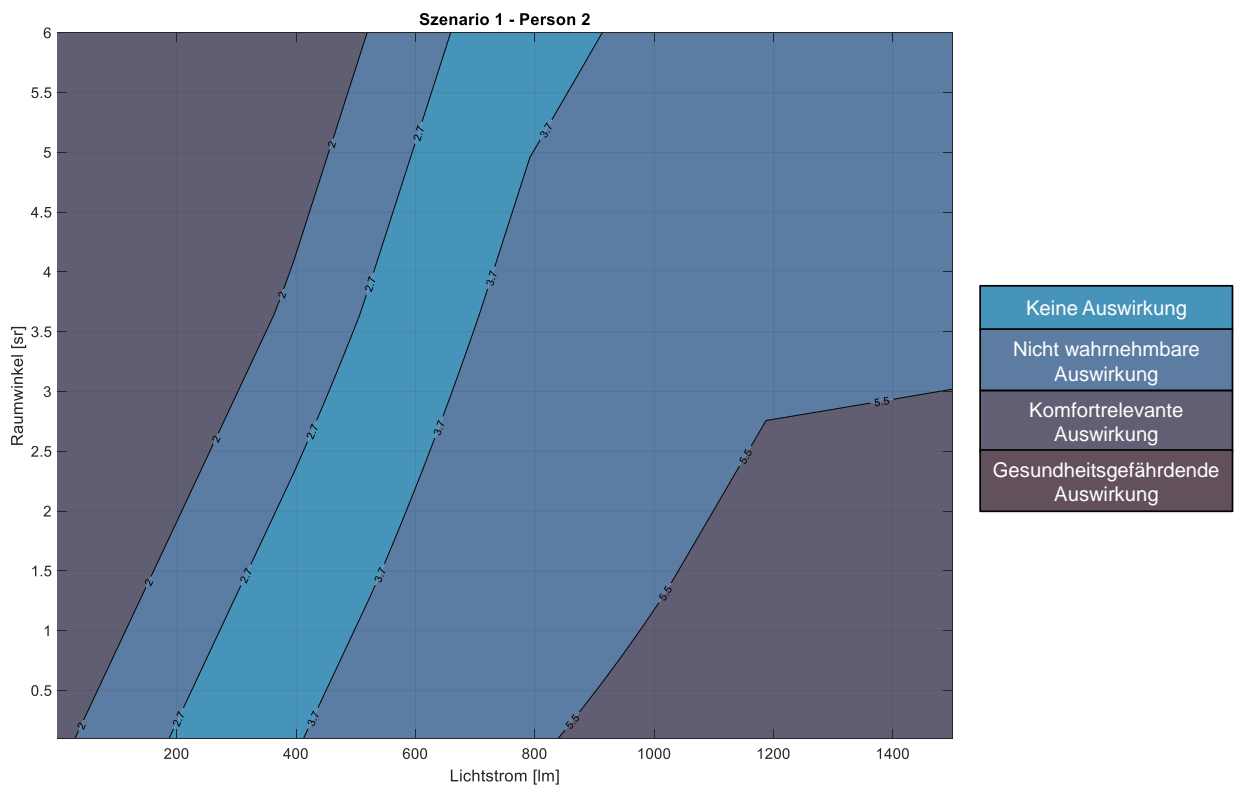


Abbildung 73: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 2 bis 1500 Lumen (Szenario 1)

Im Vergleich zu den Abbildungen 70 bis 73 verändert sich die Verteilung der Wirkungszonen bei der Betrachtung des zweiten Szenarios. In den Abbildungen 74 bis 77 haben sich die Grenzen der einzelnen Zonen weiter nach rechts verschoben. Somit wird der neutrale Bereich insgesamt erweitert. Im Vergleich zwischen den beiden Personen sind nur kleinste quantitative Unterschiede in den Ergebnissen erkennbar. Somit kann hieraus geschlussfolgert werden, dass das Alter zwar einen Einfluss auf den Wirkungsindikator hat, dieser jedoch im Vergleich zu den anderen Einflüssen gering ist. Dies kann jedoch auch darauf zurückzuführen sein, dass die Datengrundlage gering ist und eventuell nicht alle altersbezogenen Einflüsse ausreichend abgebildet werden können.

Für den Berechnungsalgorithmus wurde an dieser Stelle lediglich die photopische Hellempfindlichkeitskurve berücksichtigt. Jedoch wurde überprüft und nachgewiesen, dass bei der Nutzung der mesopischen spektralen Hellempfindlichkeit (Ansatz nach Shapk, Kärhä & Ikonen, 2017) der mesopische Bereich mit der Zone der komfortrelevanten Auswirkungen der photopischen retinalen Beleuchtungsstärke übereinstimmt. Es ist zudem anzumerken, dass der Knick in der Grenze der Wirkungszonen sich aus der Pupillengröße ergibt, die sich ab diesem Punkt nicht weiter verändert.

Es gilt wie bei den vorherigen Wirkungsindikatoren, dass es sich hierbei um eine stationäre Betrachtung handelt.

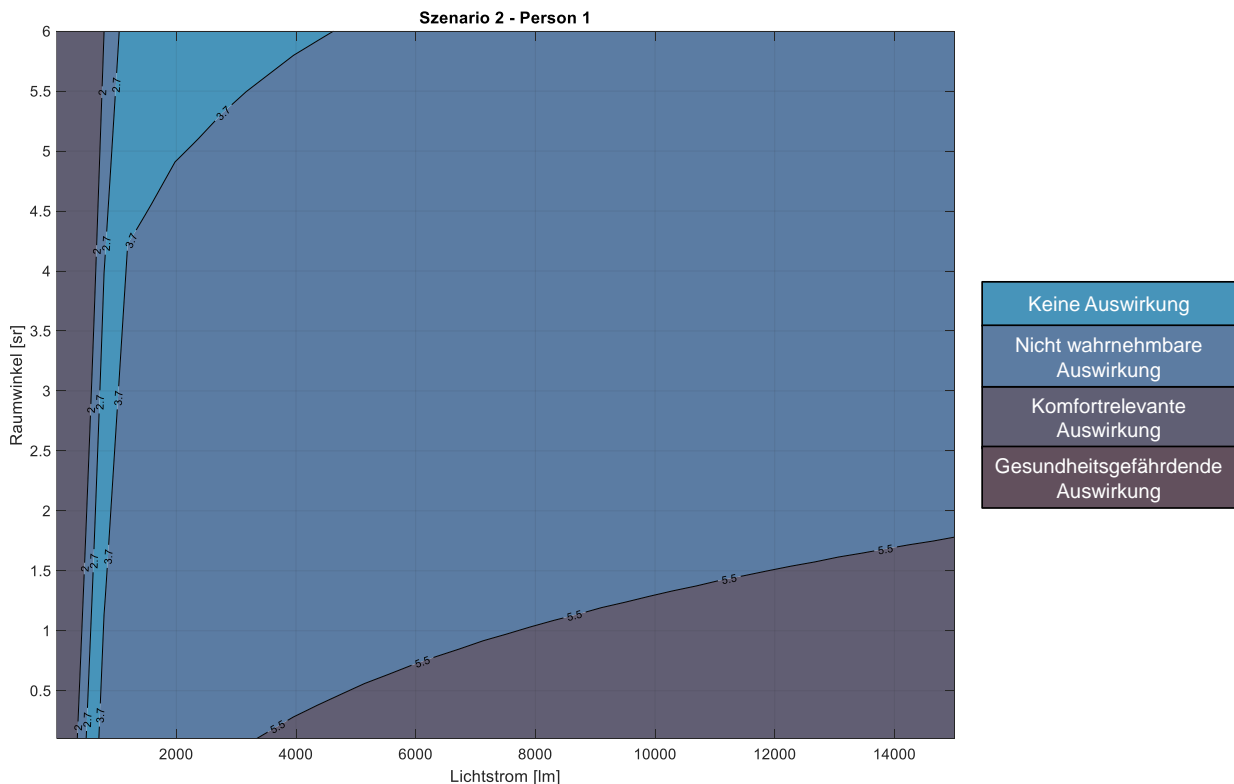


Abbildung 74: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 1 bis 15000 Lumen (Szenario 2)

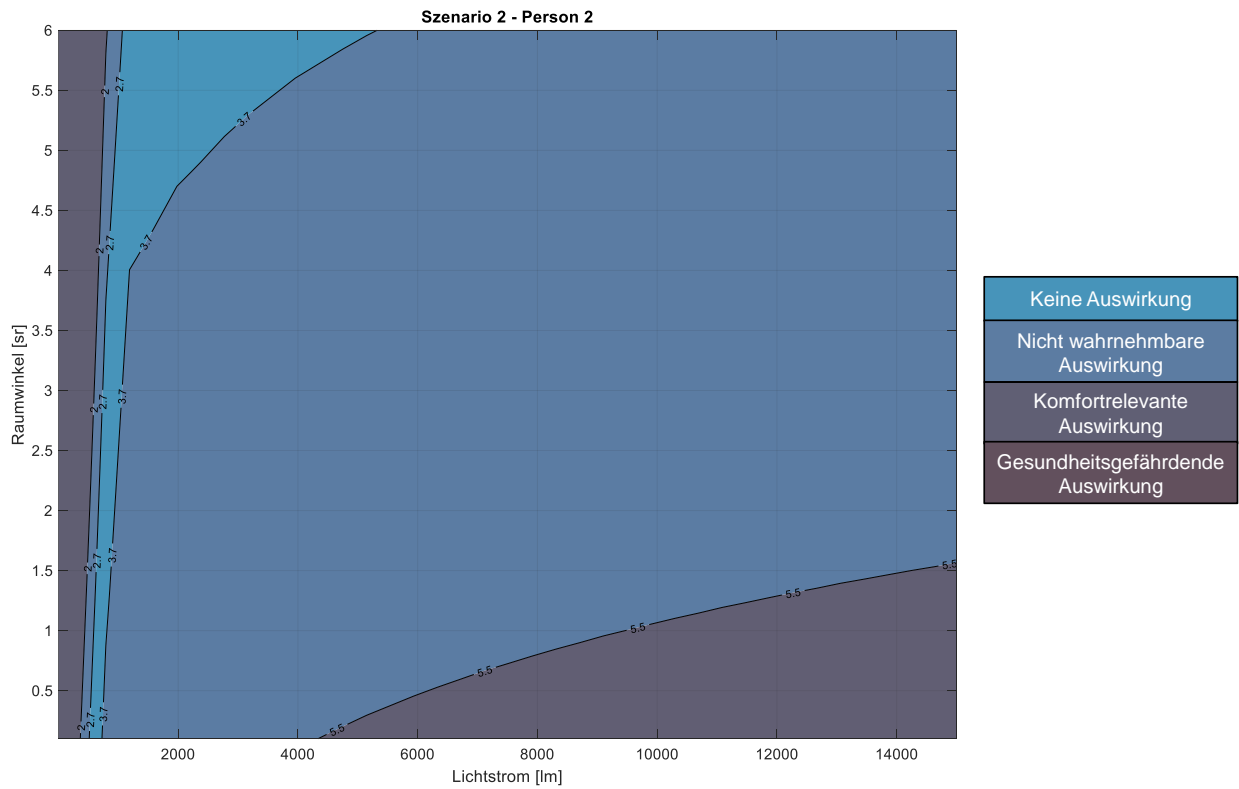


Abbildung 75: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 2 bis 15000 Lumen (Szenario 2)

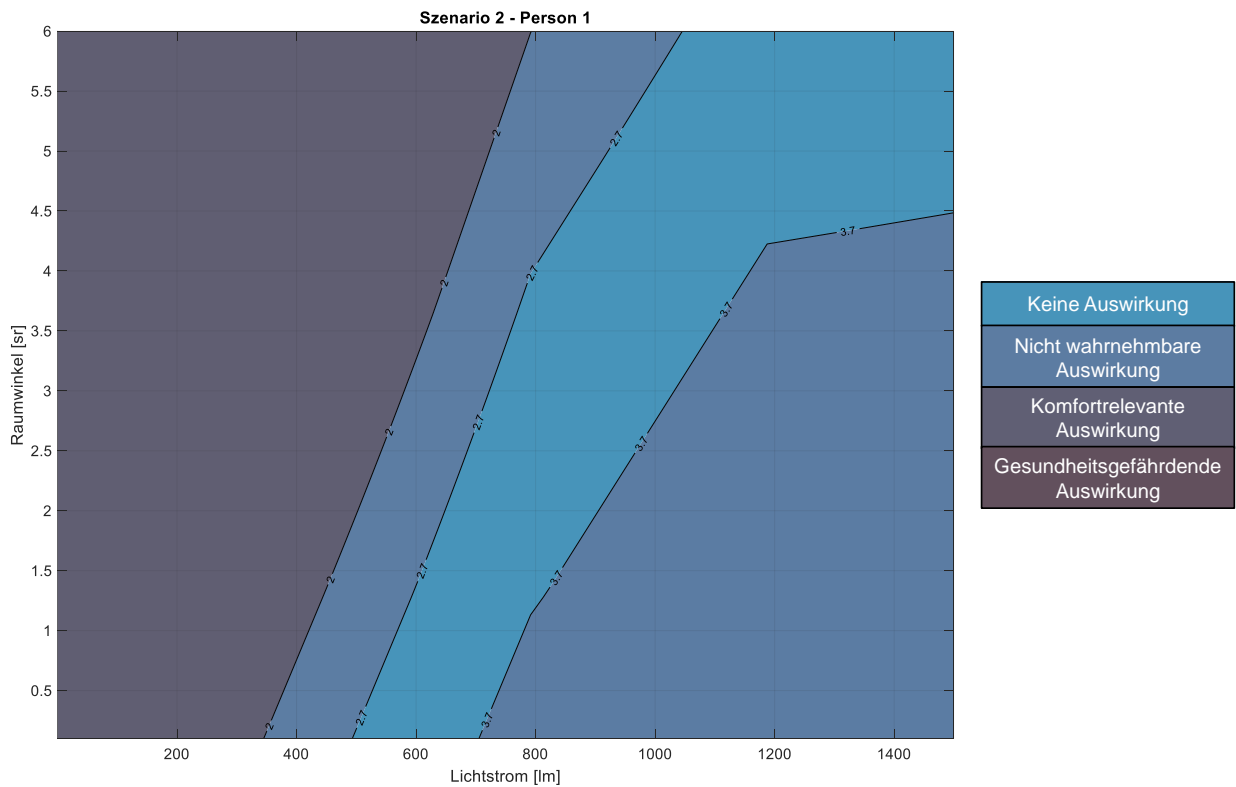


Abbildung 76: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 1 bis 1500 Lumen (Szenario 2)

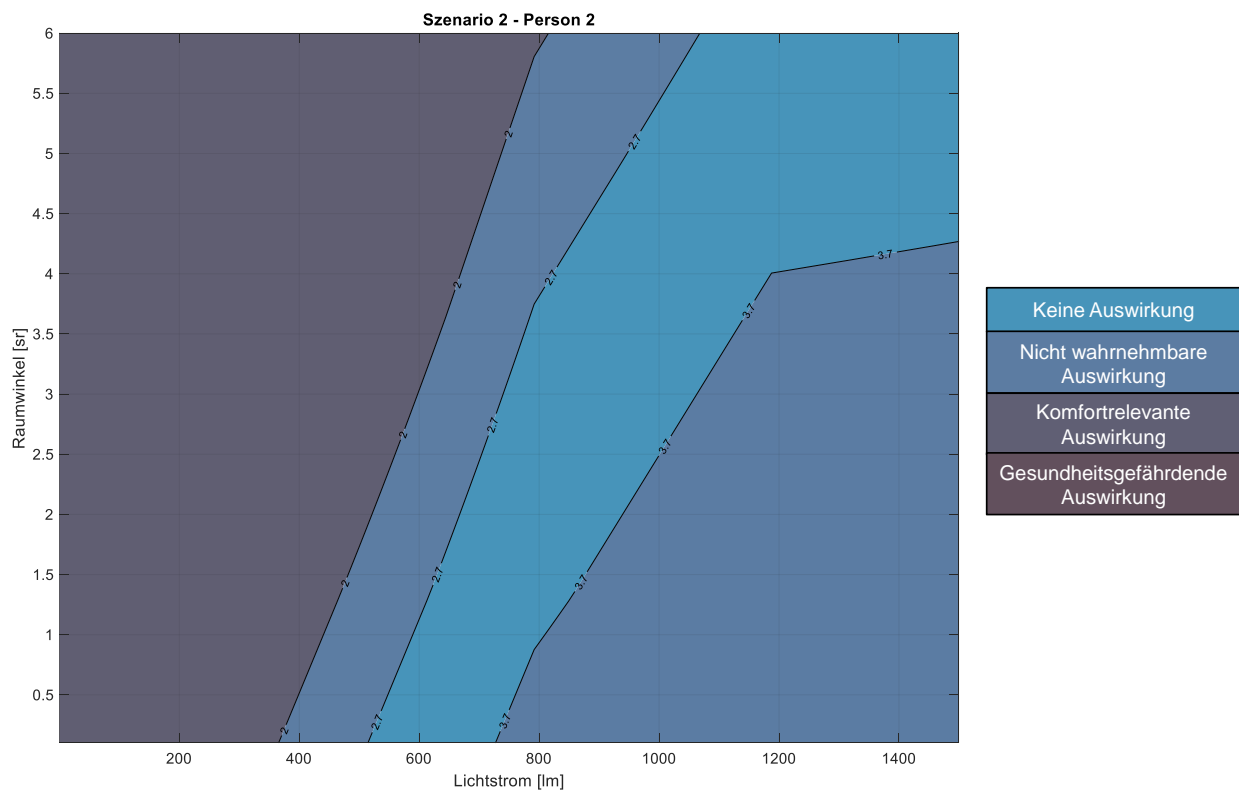


Abbildung 77: Grafische Darstellung der visuellen Wirkungszonen für Person 2 bis 1500 Lumen (Szenario 2)

5.4.2 Biologische Wirkung der visuellen Umgebung

Licht, welches ins Auge tritt, beeinflusst nicht ausschließlich das Funktionieren des visuellen Systems, sondern noch weitere physiologische Aspekte. Diese Wirkung der visuellen Umgebung wird durch das nicht-bildgebende System (*non-image forming system*) gesteuert. Nach Boyce (2014) ist der Name des Systems bewusst so gewählt, damit zwischen den visuellen und den nicht-visuellen Auswirkungen besser differenziert werden kann. Im Gegensatz zum bildgebenden System, für welches die Auswirkungen der visuellen Umgebung anhand der retinalen Beleuchtungsstärke bewertet werden, braucht es für die Bewertung des nicht-bildgebenden Systems einen anderen Wirkungsindikator. Um diesen Wirkungsindikator, die dazugehörigen Wirkungszonen und den Wirkungsmechanismus der biologischen Wirkung der visuellen Umgebung zu identifizieren, werden im Stand des Wissens die Grundlagen zur biologischen Photorezeption sowie die numerische Abbildung dieses Prozesses dargestellt.

5.4.2.1 Stand des Wissens: biologische Photorezeption

Die Tatsache, dass Licht neben der visuellen Wirkung weitere physiologische Wirkungen auf den Menschen hat, ist bereits lange bekannt. (Boyce, 2014) In den 1930er-Jahren wurde in diesem Zusammenhang das Konzept des circadianen Rhythmus eingeführt. Bünning (1936) hat dafür die Hypothese aufgestellt, dass der circadiane Rhythmus des Menschen (und anderer Lebewesen) durch eine interne Uhr, als endogener Stimulus bezeichnet, kontrolliert wird. Dieser endogene Stimulus wird jedoch durch einen exogenen Stimulus wie der Wechsel zwischen hell und dunkel aufrechterhalten. Heutzutage ist gewusst, dass diese Hypothese stimmt und dass der circadiane Rhythmus für mehrere physiologische Reaktionen des Körpers verantwortlich ist. Trotz dieses Wissens wurde die Wirkungskette des nicht-bildgebenden Systems erst in den letzten Jahrzehnten genauer erforscht. Ein entscheidender Fortschritt auf diesem Forschungsgebiet wurde von Freedman et al. (1999) geliefert. In deren Laborstudie wurde untersucht, ob die Zapfen oder die Stäbchen maßgeblich für die Kontrolle des nicht-bildgebenden Systems verantwortlich sind. Dafür wurde die Wirkung von Licht auf die Regulierung des circadianen Rhythmus bei Mäusen untersucht, die weder Zapfen noch Stäbchen hatten. Das Ergebnis zeigte eindeutig, dass die physiologischen Phasenverschiebungen, die durch das Licht hervorgerufen werden, ungehindert stattfanden. Erst als den Mäusen die Augen entfernt wurden, hat sich dieses Verhalten verändert. Damit konnte nachgewiesen werden, dass das Auge über einen weiteren Photorezeptor verfügen muss, der für die Regulierung der inneren Uhr verantwortlich ist. Ausgehend hiervon haben Berson, Dunn und Takao (2002), sowie Berson (2003) diesen Photorezeptor und dessen Funktionalität weiter untersucht. Dabei wurden photosensitive Ganglienzellen gefunden, die die Fähigkeit besitzen elektromagnetische Strahlung in ein Rezeptorpotential umzuwandeln. Diese werden als intrinsisch photosensitive retinale Ganglienzellen (ipRGC) bezeichnet. Im Vergleich zu den anderen Photorezeptoren sind die ipRGCs weniger sensitiv und haben eine geringere räumlich-zeitliche Auflösung; dafür sind sie deutlich sensibler gegenüber der Lichtintensität der Umgebung. (Berson, 2003) Ähnlich wie die Zapfen und die Stäbchen haben auch die ipRGCs ein spektrales Empfindlichkeitsspektrum, welches darauf schließen lässt, dass das Melanopsin (Kumbalasisri & Provencio, 2005) mit einer maximalen Empfindlichkeit im kurzwelligen Bereich um die 480 nm, das Photopigment der ipRGCs ist (Berson et al., 2002, Berson, 2007).

Während die Zapfen und Stäbchen des bild-gebenden Systems die visuellen Reize, die sie wahrnehmen, über die optische Bahn an den visuellen Kortex weiterleiten, leiten die ipRGCs ihr Signal über die Retino-Hypothalamus-Bahn an den suprachiasmatischen Kern weiter. (Boyce, 2014) Der suprachiasmatische Kern ist die innere Uhr des Menschen (Klein, Moore & Reppert, 1991) und ist damit verantwortlich für die zeitliche Synchronisierung von mehreren physiologischen Prozessen, die im Körper ablaufen. Somit trägt dieser wesentlich zum circadianen Timing im menschlichen Körper bei. (Boyce, 2014)

Der Schlaf-Wach-Rhythmus ist der circadiane Rhythmus, der am meisten erforscht ist und somit wird dieser für die Ableitung eines Wirkungsindikators zur Beurteilung der biologischen Wirkung von Licht herangezogen. Ausgehend von den ipRGCs, über den suprachiasmatischen Nucleus führt der Wirkungsweg weiter bis zur Epiphyse, die hauptsächlich für die Produktion des Hormons Melatonin verantwortlich ist. Senden die ipRGCs kein Lichtsignal an die Epiphyse, dann wird das Hormon Melatonin produziert. (Boyce, 2014)

Ausgehend von der Epiphyse wird das Melatonin über die Blutbahn im gesamten Körper verteilt. Im Körper gibt es wiederum mehrere Melatonin-Rezeptoren, die für eine Reihe von physiologischen Reaktionen verantwortlich sind und auf diese Weise auf den 24-Stunden-Rhythmus des Menschen synchronisiert werden. (Menaker, 1997; Cagnacci et al., 1997; Cagnacci, Soldani & Yen, 1997) Für gewöhnlich, unter natürlichen Hell-Dunkel-Bedingungen, werden große Mengen an Melatonin in der Nacht produziert, während tagsüber nur geringe Mengen produziert werden. Ist der Mensch jedoch in der Nacht in einer hell beleuchteten Umgebung, dann wird die Melatoninproduktion unterdrückt. Diese Störung der Melatoninproduktion hängt vom jeweiligen Lichtspektrum, der sich ergebenden retinalen Beleuchtungsstärke und der Dauer der Beleuchtung ab. (Wood et al., 2013)

Ein Ansatz, um die Melatoninproduktion bewerten zu können wird nach Rea et al. (2005), mit weiteren Anpassungen nach Rea et al. (2012) und nach Rea, Nagare & Figueiro (2021) geliefert. Die genannten Autoren definieren den circadianen Stimulus als ein Ausdruck der Melatonin-Unterdrückung, welcher in Funktion des circadianen Lichts berechnet werden kann.

$$CS = 0.7 * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{CLA}{355.7} \right)^{1.1026}} \right] [-] \quad (85)$$

Wood et al. (2013) kritisieren, dass beim ursprünglichen Modell (Rea et al., 2005) zur Bestimmung des circadianen Stimulus weder die räumliche Verteilung der Lichtquellen noch die Dauer der Beleuchtung berücksichtigt wird. Da es sich hierbei jedoch um zwei wesentliche Faktoren handelt, die den circadianen Stimulus verändern können, wurden diese im neueren Modell nach Rea, Nagare und Figueiro (2021) ergänzt. Wood et al. (2013) merken weiterhin an, dass die Unterdrückung der Melatoninproduktion durch den circadianen Stimulus in Abhängigkeit von der jeweiligen Tageszeit auch als positiv beurteilt werden kann. So ist eine Unterdrückung der Melatoninproduktion in den Morgenstunden wünschenswert, während sie abends oder in der Nacht eher zu negativen Auswirkungen durch die Störung des natürlichen circadianen Rhythmus führt.

Nach Rea, Nagare und Figueiro (2021) muss die Bestimmung des circadianen Stimulus somit um die Dauer der Exposition und die Beleuchtungsverteilung auf der Retina ergänzt werden. In Bezug auf die räumliche Verteilung muss unterschieden werden, ob es sich bei der Lichtquelle um eine lokale Punktquelle oder um ein ausgedehntes Lichtfeld handelt. (Novotny et al., 2013) Zusätzlich gilt, dass die gleiche Lichtmenge, die nur in ein Auge eintritt, im Vergleich zum Eintritt in beide Augen nicht die gleiche Melatonin-Unterdrückung hervorruft. (Spitschan & Cajochen, 2019) Das überarbeitete Modell berücksichtigt sämtliche zeitlichen (erstmal berücksichtigt nach Rea, Nagare & Figueiro, 2020) als auch räumlichen Komponenten und nimmt dabei an, dass diese beiden sowohl die spektrale Sensitivität als auch die physiologische Stimulus-Reaktion charakterisieren. (Rea, Nagare & Figueiro, 2021)

In Bezug auf die zeitlichen Komponenten gilt es ebenfalls zu berücksichtigen, dass ein flackerndes Licht mit dem gleichen Energiespektrum wie ein beständiges Licht dennoch nicht die gleiche Unterdrückung an Melatonin hervorruft. (Figueiro, Bierman & Rea, 2013) Der Einfachheit halber wird sowohl der zeitliche als auch der räumliche Einfluss jeweils nur mit einem einzigen Wert in der Berechnung berücksichtigt. Die Auswirkung der kontinuierlichen Beleuchtung kann für jeden Zeitraum zwischen einer halben Stunde ($t = 0.5$) und drei Stunden ($t = 3.0$) eingesetzt werden. Für die räumliche Verteilung können drei Situationen berücksichtigt werden:

1. Volles visuelles Feld $f = 2.0$
2. Zentrales visuelles Feld (z. B. ein diskretes Lichtfeld auf einem Schreibtisch) $f = 1.0$
3. Übergeordnetes visuelles Feld (z. B. an der Decke befestigte *Downlight*-Leuchten) $f = 0.5$

Damit lässt sich der circadiane Stimulus zur Unterdrückung der Melatoninproduktion in der sogenannten frühen biologischen Nacht wie folgt berechnen. (Rea, Nagare & Figueiro, 2021) Bei diesem Wert handelt es sich um einen quantitativen Ausdruck der Effektivität des retinalen Lichtstimulus für den menschlichen circadianen Rhythmus. (Figueiro et al., 2019)

$$CS_{t,f} = 0.7 * \left[1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t * f * CL_A}{355.7} \right)^{1.1026}} \right] [-] \quad (86)$$

Nach Rea und Figueiro (2018) ist die Berechnung und Bewertung des circadianen Stimulus die akkurateste Methode zur Bestimmung der Melatonin-Unterdrückung in einer Lichtumgebung. Daraus können wiederum die möglichen Reaktionen des circadianen Systems des Menschen abgeleitet werden. Sie stützen Ihre Aussagen auf die vielfältigen Studien, die eine mögliche Quantifizierung des Lichtreizes anhand der Metrik des circadianen Stimulus belegen. Die Studien mit unterschiedlichsten thematischen Schwerpunkten reichen von der Bewertung des circadianen Stimulus von LED-Displays (Wood et al., 2013) bis hin zur Bewertung der Lichtumgebung in einem U-Boot (Young et al., 2015) oder in einer Pflegeeinheit für Alzheimer-Patienten (Figueiro et al., 2014, Figueiro et al., 2015., Figueiro, Plitnick & Rea, 2016). Ein circadianer Stimulus von 0.3 [-] oder höher, vom Zeitpunkt des Aufwachens bis 18 Uhr verbessert sowohl die Schlafqualität und die Schlafdauer und reduziert zusätzlich Symptome von

Depression. (Figueiro et al., 2014, Figueiro et al., 2015, Figueiro, Plitnick & Rea, 2016) Figueiro et al. (2019) konnten zudem mit Feldstudien belegen, dass Angestellte, die zwischen 8 Uhr und 12 Uhr einem circadianen Stimulus größer als 0.3 [-] ausgesetzt waren im Vergleich zu denjenigen, die einem circadianen Stimulus von 0.15 [-] ausgesetzt waren, einen verbesserten Schlaf mit weniger Schlafstörungen hatten und sich weniger bedrückt fühlten.

Zur Bestimmung des circadianen Stimulus wird das circadiane Licht CL_A benötigt. Das Modell nach Rea et al. (2005) präsentiert den Zusammenhang zwischen dem exogenen Input, der für den circadianen Rhythmus des Menschen benötigt wird und den entsprechenden Reaktionen, die im Körper entstehen. Genau wie die Stäbchen und die drei verschiedenen Zapfentypen haben die ipRGCs eine spektrale Sensitivität, die quantifiziert werden muss. Dabei wird angenommen, dass sich die spektrale Sensitivität nicht in Abhängigkeit von der circadianen Zeit verändert. Aufbauend auf weiteren Arbeiten auf diesem Forschungsgebiet (Brainard, 2001; Thapan, Arendt & Skene, 2001), kann ein Modell für die circadiane Phototransduktion des Menschen abgeleitet werden, mit welchem sich jeder Lichtreiz in Bezug auf seine Fähigkeit, die Melatoninproduktion zu unterdrücken, quantifizieren lässt. Nach entsprechenden Anpassungen durch Rea et al. (2012) und Rea, Nagare & Figueiro (2021) sieht das Modell zur Berechnung des circadianen Lichts CL_A [W/m²] wie folgt aus.

Für $b - y > 0$

$$CL_A = 1548 \left\{ \left(\int Mc_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda - a_{rod1} \left(\frac{\int V'_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int V_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda + g_1 \int S_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda} \right) \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right. \\ \left. + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} \phi_{e,\lambda} d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} \phi_{e,\lambda} d\lambda \right) - a_{rod2} \left(\frac{\int V'_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int V_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda + g_2 \int S_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda} \right) \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right\} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (87)$$

Für $b - y \leq 0$

$$CL_A = 1548 \left(\int Mc_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda - a_{rod1} \left(\frac{\int V'_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int V_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda + g_1 \int S_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda} \right) \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (88)$$

$$b - y = \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} \phi_{e,\lambda} d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} \phi_{e,\lambda} d\lambda \quad (89)$$

Mit

k	= 0.2616	a_{rod2}	= 1.60	RodSat	= 6.5 [W/m ²]
a_{b-y}	= 0.21	g_1	= 1.00		
a_{rod1}	= 2.30	g_2	= 0.16		

Neben der spektralen Hellempfindlichkeit für das photopische $V(\lambda)$ und das skotopische Sehen $V'(\lambda)$ wird der spektrale Strahlungsfluss $\Phi_{e,\lambda}$ der jeweiligen Lichtquelle berücksichtigt. Zusätzlich werden drei weitere Größen für die Berechnung benötigt: die spektrale Sensitivität des Proteins Melanopsin $M_{c\lambda}$, die fundamentale S-Kurve S_λ und die Durchlässigkeit des Makulapigments $m_{c\lambda}$. (Rea, Nagare & Figueiro, 2021)

Die spektrale Hellempfindlichkeitskurve für das Tagessehen wurde bereits im Zusammenhang mit der visuellen Wirkung von Licht beschrieben. Im Allgemeinen gibt es deutlich mehr Daten, die das Tagessehen als das Nachtsehen beschreiben, da eine Lichtplanung implementiert, dass das menschliche Auge sich in einem photopischen Zustand befindet. (Boyce, 2014) Ähnlich dem photopischen Standardbeobachter, der von der internationalen Beleuchtungskommission eingeführt wurde, gibt es ebenfalls einen skotopischen Standardbeobachter (CIE, 1951). Dieses Modell wurde ebenfalls in der DIN 5031-3 (1982) übernommen. Das Modell basiert auf früheren Arbeiten von Wald (1945) und Crawford (1949). Um die Anwendung dieses standardisierten Modells in der vorliegenden Arbeit zu umgehen, muss auf Daten von Crawford (1949) zurückgegriffen werden. Dieser konnte nachweisen, dass mit zunehmendem Alter insbesondere die Sensitivität am violetten Ende des Spektrums abnimmt. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, wird für die skotopische spektrale Hellempfindlichkeit zwischen verschiedenen Alterskategorien unterschieden. Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass weder das Geschlecht noch Farbenblindheit einen Einfluss auf die skotopische spektrale Hellempfindlichkeit haben. Somit kann begründet werden, warum lediglich das Alter als Einflussgröße berücksichtigt wird.

Als nächster Eingangsparameter wird die fundamentale S-Kurve benötigt, diese wird im vorliegenden Modell nach Smith und Pokorny (1975) abgeleitet. Da es sich hierbei jedoch um einen Bestandteil der spektralen Hellempfindlichkeitskurve für das Tagessehen handelt, kann diese Kurve ebenfalls individuell hergeleitet werden. Die spektrale Sensitivität des Proteins Melanopsin wird nach Wyszecki und Stiles (1982) abgeleitet.

Die letzte zu berücksichtigende Größe ist die Durchlässigkeit des Makulapigments, welche ebenfalls bereits für die Bestimmung der individuellen Hellempfindlichkeit beschrieben wurde. Da es sich hier jedoch konkret um die Durchlässigkeit und nicht um die optische Dichte des Makulapigments handelt, wird auf die von Rea, Nagare und Figueiro (2021) vorgeschlagene Originalquelle nach Snodderly et al. (1984) zurückgegriffen. Die optische Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge ist in der folgenden Abbildung 78 beispielhaft dargestellt. Wohlgermerkt wäre hier ebenfalls die individuelle Bestimmung der spektralen Durchlässigkeit des Makulapigments empfehlenswert.

Basierend auf den beschriebenen Einflüssen lässt sich sowohl das circadiane Licht als auch der circadiane Stimulus bestimmen. Beide Größen werden im Folgenden, im Kontext der Wirkungsabschätzung, weiter erläutert.

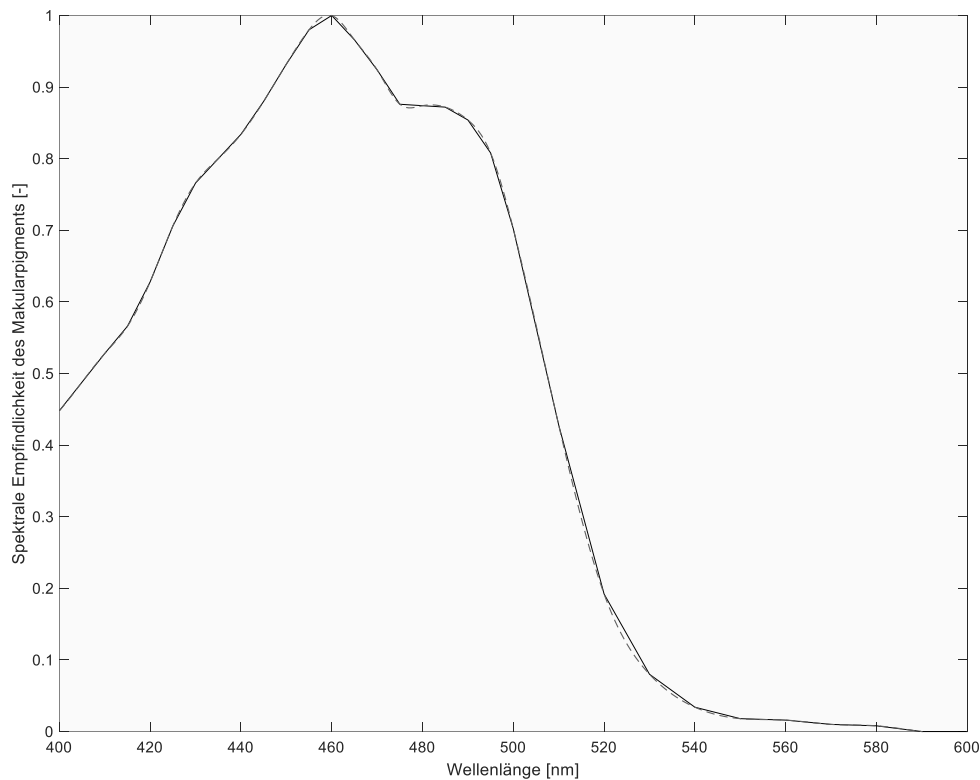


Abbildung 78: Normalisierte spektrale Empfindlichkeit des Makulapigments nach Snodderly et al. (1984)

5.4.2.2 Definition des biologischen Wirkungsindikators und der Wirkungszonen

Zur Ableitung eines Wirkungsindikators gilt es zu bestimmen, unter welchen Beleuchtungsbedingungen das Hormon Melatonin produziert wird. Somit wird als Wirkungsindikator der circadiane Stimulus definiert. Hierbei spielt nicht nur die Hormonproduktion an sich eine Rolle, denn diese lässt sich alleine weder als positiv noch als negativ bewerten. Jedoch spielt die Uhrzeit eine entscheidende Rolle, denn der Mensch benötigt Schlaf. Wird demnach sein Schlaf-Wach-Rhythmus dadurch gestört, dass zu einem ungünstigen Zeitpunkt kein Melatonin produziert wird, dann kann dies als eine negative Auswirkung der Umgebung auf den Menschen gesehen werden.

Aus dem beschriebenen Stand des Wissens geht hervor, dass vor allem in den Morgenstunden bis um die Mittagszeit ein circadianer Stimulus von größer 0.3 [-] den natürlich circadianen Rhythmus des Menschen unterstützt und somit als eine positive Auswirkung der Umgebung gewertet werden kann. Da es in der raumphysiologischen Bilanz keine positiven, sondern lediglich neutrale Auswirkungen gibt, werden diese der neutralen Wirkungszone zugeteilt. Dahingegen unterstützt ein circadianer Stimulus, der unterhalb von 0.15 [-] liegt, den natürlichen circadianen Rhythmus nicht und führt eher zu einer Deregulierung des natürlichen Rhythmus. Somit kann ein circadianer Stimulus, mit einem Wert von kleiner oder gleich 0.15 [-], tagsüber als negative Auswirkung gewertet werden, welche aufgrund der entstehenden Deregulierung des natürlichen Rhythmus einer gesundheitsgefährdenden Auswirkung entspricht. Im Bereich zwischen 0.15 [-] und 0.30 [-] werden weder positive noch negative Auswirkungen festgestellt. Dennoch wird der natürliche circadiane Rhythmus bei diesen Werten des circadianen Stimulus nicht unterstützt, weswegen

der Körper auf diese Veränderung reagieren wird. Dabei handelt es sich somit um eine nicht wahrnehmbare Auswirkung. Während ein circadianer Stimulus von 0.15 [-] in den Morgenstunden den circadianen Rhythmus negativ beeinflusst, ist dieser in den Abendstunden wünschenswert, da ein hoher circadianer Stimulus die Melatoninproduktion unterdrückt und somit dem natürlichen Schlaf-Wach-Rhythmus entgegenwirkt.

Nach Figueiro et al. (2019) kann als untere Grenze des circadianen Stimulus ein Wert von 0.1 [-] angesehen werden. Dabei handelt es sich um den Schwellenwert, unterhalb welchem keine Unterdrückung der Melatoninproduktion mehr stattfindet. Ein Wert von 0.7 [-] wird dagegen als oberer Schwellenwert betrachtet, bei diesem Wert ist die Unterdrückung der Melatoninproduktion vollständig gesättigt.

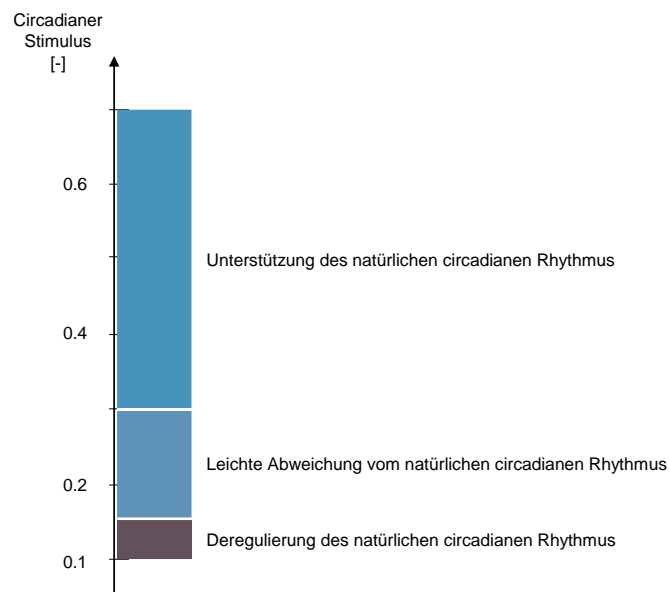


Abbildung 79: Wirkungszonen der visuellen Umgebung tagsüber bis 18 Uhr (biologische Wirkung)

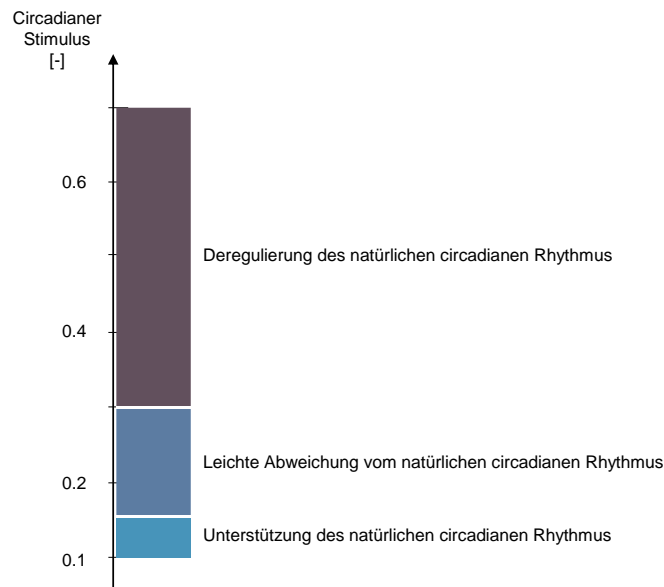


Abbildung 80: Wirkungszonen der visuellen Umgebung nachts ab 18 Uhr (biologische Wirkung)

Aus den beschriebenen Grundlagen lassen sich entsprechend Abbildung 79 und Abbildung 80 die Wirkungszonen sowohl für den Tag bis 18 Uhr und für die Nacht ab 18 Uhr bis zum Zeitpunkt des Aufwachens definieren. Hierbei wurde bewusst auf eine Definition der komfortrelevanten Auswirkungen verzichtet. Findet eine Deregulierung des circadianen Rhythmus statt, wird dies sich sicherlich auf das Wohlbefinden des Menschen auswirken. Jedoch handelt es sich hierbei bereits um eine gesundheitsgefährdende Wirkung, da der Mensch für das Funktionieren seines Körpers einen gesunden Schlaf benötigt.

Diese Schwellenwerte gelten für beide Berechnungsformeln. Für die Nutzung in der raumphysiologischen Bilanz wird zwischen der Tages- und der Nachtzeit differenziert und demnach werden die zwei Berechnungsformeln für unterschiedliche Tageszeiten herangezogen. Da sich die ursprüngliche Formel (Gleichung 85) nach Rea et al. (2005) in mehreren Studien, die sich auf den Zeitraum vom Aufstehen des Menschen bis 18 Uhr beziehen, bewährt hat, wird dieser Zeitraum hier ebenfalls angesetzt. Dabei wird der Zeitpunkt des Aufstehens des Menschen flexibel gewählt, beispielsweise je nachdem wann der Arbeitstag des Menschen beginnt. Die überarbeitete Berechnungsformel (Gleichung 86) nach Rea, Nagere und Figueiro (2021) wird für den Zeitraum ab 18 Uhr wiederum bis zum Zeitpunkt des Aufstehens des Menschen gewählt.

5.4.2.3 Herleitung des biologischen Wirkungsmechanismus

Der biologische Wirkungsmechanismus der visuellen Wirkungskategorie dient zur Feststellung des circadianen Lichts und der anschließenden Bestimmung des circadianen Stimulus, welcher als Wirkungsindikator genutzt wird. Hierfür gilt es, die genannten Einflussgrößen zu bestimmen. Hierzu zählen der spektrale Strahlungsfluss der Lichtquelle, die spektrale Hellempfindlichkeit für das photopische und das skotopische Sehen, die spektrale Sensitivität des Proteins Melanopsin, die fundamentale S-Kurve und die Durchlässigkeit des Makulapigments. Die individuelle spektrale Hellempfindlichkeit lässt sich durch Anwendung der Gleichungen 63 und 67 bis 77 entsprechend dem Wirkungsmechanismus der visuellen Wirkung bestimmen. Da die spektrale Empfindlichkeit der S-Zapfen ebenfalls in diesem Wirkungsmechanismus ermittelt wird, ist diese bereits bekannt. Die skotopische spektrale Hellempfindlichkeit muss dagegen basierend auf den Daten von Crawford (1949) für unterschiedliche Alterskategorien, denen die individuelle Person zugeordnet werden kann, definiert werden. Die skotopische spektrale Hellempfindlichkeit für die definierten Alterskategorien ist in Abbildung 81 abgebildet. Mit diesem Ansatz lässt sich die Realität nicht vollständig abbilden, da die genannten Werte unter bestimmten experimentellen Bedingungen ermittelt wurden. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass auf diese Weise dem wichtigsten individuellen Aspekt, der die skotopische spektrale Hellempfindlichkeit beeinflusst, dem Alter, Rechnung getragen wird. Somit wird dieser Ansatz dem standardisierten Beobachter vorgezogen. Eine Anwendung des standardisierten Modells wäre ebenfalls möglich, mit dem Wissen, dass dieses ebenfalls nicht die vollständige Realität abbildet.

Aus Abbildung 81 geht hervor, dass in Bezug auf unterschiedliche Altersklassen die skotopische spektrale Hellempfindlichkeit sich vorwiegend im kurzwelligen Bereich unterscheidet. Die jeweils maximale spektrale Hellempfindlichkeit liegt bei 514 Nanometer (≤ 20 Jahre), 509 Nanometer (21 – 30 Jahre), 508 Nanometer (31 – 40 Jahre) und 510 Nanometer (41 – 50 Jahre & > 50 Jahre). Dementsprechend variiert die

Wellenlänge der maximalen spektralen Hellempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Altersklasse zwischen 508 und 514 Nanometer. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass mit dieser Darstellung lediglich bewiesen werden kann, dass es Unterschiede zwischen den Altersklassen gibt; jedoch ist die Datengrundlage mehr als dürftig, um gesicherte Zusammenhänge hieraus zu ziehen. Des Weiteren hat Crawford (1949) Wellenlängenbereiche, die außerhalb der skotopischen spektralen Empfindlichkeit liegen, mitberücksichtigt. Dies lässt sich aus den Rohdaten erkennen, so ist beispielsweise bei Altersklasse ≤ 20 Jahre die Empfindlichkeit bei 410 nm größer als die Empfindlichkeit bei 420 nm; damit kann angenommen werden, dass hier S-Zapfen angesprochen werden und keine Stäbchen. Es muss davon ausgegangen werden, dass aufgrund dieser Tatsache eine leichte Verfälschung der Daten nicht auszuschließen ist.

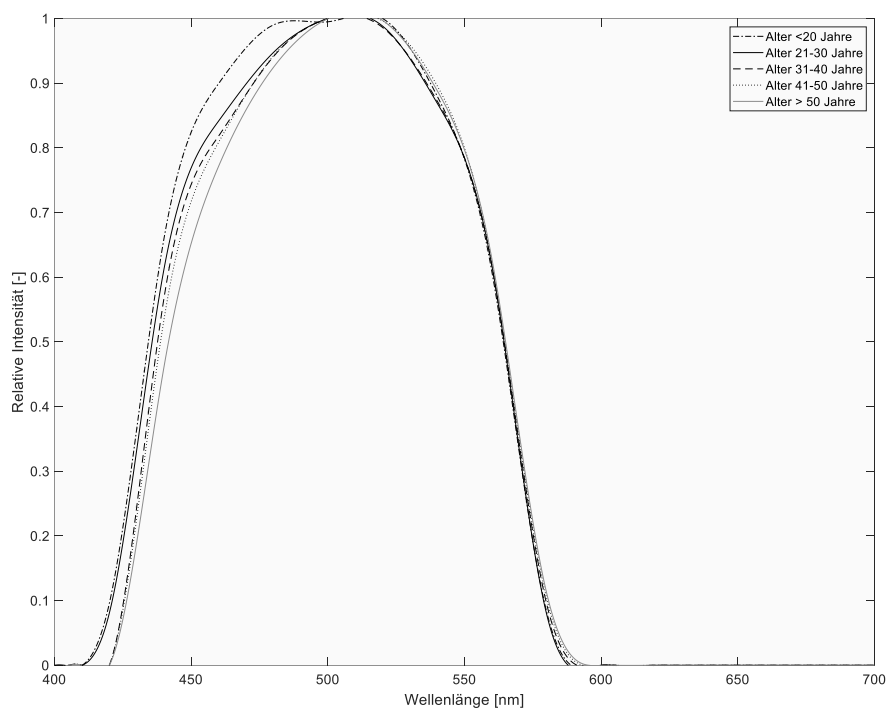


Abbildung 81: Skotopische spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion für jede Altersklasse

Die Durchlässigkeit des Makulapigments sowie die spektrale Sensitivität des Proteins Melanopsin lassen sich aufgrund der fehlenden Datengrundlage nicht individuell bestimmen. Diese beiden wellenlängenabhängigen Einflüsse müssen dementsprechend nach Snodderly et al. (1984) sowie nach Wyszecki und Stiles (1982) basierend auf Standardwerten berücksichtigt werden.

Neben diesen physiologischen Größen, die sich auf das menschliche Auge beziehen, muss für die Bestimmung des circadianen Lichts der spektrale Strahlungsfluss der jeweiligen Lichtquelle berücksichtigt werden. Dieser muss in der Sachbilanz erfasst werden und wird ebenfalls im visuellen Wirkungsmechanismus als Eingangsgröße berücksichtigt.

Die alleinige Bestimmung des circadianen Lichts reicht jedoch nicht aus, um eine Bewertung des externen Stimulus zu ermöglichen. Deswegen muss auf der Grundlage dieser Größe der ausgelöste circadiane Stimulus für die letztendliche Bewertung der biologischen Wirkung einer Beleuchtungsumgebung ermittelt

werden. Hierbei ist der Betrachtungszeitpunkt entscheidend, da sich in Abhängigkeit von diesem zwei Möglichkeiten zur Berechnung entsprechend Gleichung 85 und 86 festlegen lassen. Für den Zeitraum vom Aufstehen bis 18 Uhr gilt die Gleichung 85 zur Berechnung des circadianen Stimulus. Für diese Berechnung muss keine weitere Einflussgröße berücksichtigt werden. Ab 18 Uhr gilt dagegen die Gleichung 86 zur Berechnung des circadianen Stimulus. Dieser Ansatz hat dagegen eine räumliche und eine zeitliche Komponente. Diese beiden Einflüsse müssen ebenfalls in der Sachbilanz erfasst werden, da sie sich konkret auf die betrachtete Person in einem Raum beziehen.

5.4.2.4 Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus

Für die Anwendung des visuellen biologischen Wirkungsmechanismus werden die bereits für die visuelle Wirkung der visuellen Umgebung beschriebenen Grundlagen benötigt. Dementsprechend sind diese in der schematischen Darstellung des Berechnungsalgorithmus nicht abgebildet, sondern werden als gegebene betrachtet. Zusätzlich wird das visuelle Feld nicht für jede Berechnungssituation berücksichtigt, sondern lediglich in Abhängigkeit von der Tageszeit bei der Anwendung der modifizierten Gleichung 86 betrachtet. Deswegen wird der Zusammenhang zwischen den Bestimmungsgrößen des visuellen Feldes und dem circadianen Stimulus in gestrichelter Form abgebildet. Neben den individuellen Personendaten, den Daten des visuellen Feldes und den Umgebungsdaten werden zusätzlich die spektrale Sensitivität des Makulapigments sowie die spektrale Sensitivität des Melanopsins benötigt. Hierbei handelt es sich in der Theorie um individuelle, durch die Physiologie des Menschen bestimmbare Größen. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage zur individuellen Bestimmung dieser beiden Parameter werden diese als konstante Größen mit in den Berechnungsalgorithmus aufgenommen und sind aus diesem Grund in der grafischen Darstellung als alleinstehende Input-Parameter abgebildet.

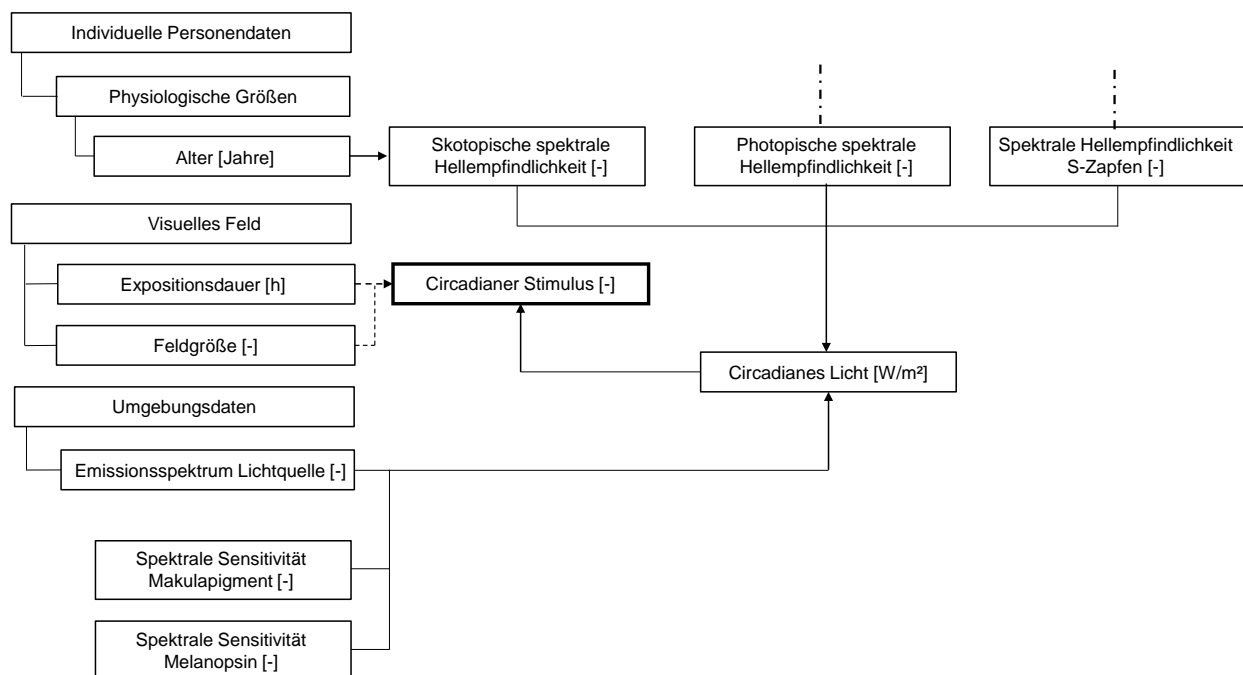


Abbildung 82: Algorithmus des visuellen Wirkungsmechanismus (biologische Wirkung)

Die Unterscheidung zur Verwendung der Gleichung 85 und 86 erfolgt in Abhängigkeit von der Tageszeit. Nach Rea, Nagare und Figueiro (2021) lässt sich der circadiane Stimulus lediglich in der frühen biologischen Nacht in Abhängigkeit von der Expositionsdauer und der Expositionssituation bestimmen. Aufgrund der fehlenden Definition dieses Begriffes wird im Folgenden die Gleichung 86 für die Berechnung des circadianen Stimulus für den Zeitraum ab 18 Uhr bis zum Aufstehen des Menschen verwendet. Somit wird der Bezug nicht mehr ausschließlich zur frühen biologischen Nacht hergestellt, sondern zur Nacht. Ab dem Zeitpunkt des Aufstehens bis 18 Uhr wird dagegen die Berechnungsformel 85 nach Rea et al. (2005) verwendet.

Die Anwendung von Gleichung 85 wird in einem Zwei-Achsen-System dargestellt, mit dem circadianen Licht auf der x-Achse und dem circadianen Stimulus auf der y-Achse. Die Anwendung von Gleichung 86 wird dagegen in einem Drei-Achsen-System abgebildet, mit dem circadianen Licht auf der x-Achse, der Expositionsdauer auf der y-Achse und dem circadianen Stimulus auf der z-Achse. Zudem muss diese Anwendung für die drei unterschiedlichen Situationen volles visuelles Feld, zentrales visuelles Feld und übergeordnetes visuelles Feld betrachtet werden. Die folgenden Abbildungen 83 bis 86 gelten für sämtliche Personen und können für eine grafische Bestimmung des Wirkungsindikators genutzt werden. Der individuelle Einfluss des Alters wird implizit in der Berechnung des circadianen Lichts berücksichtigt.

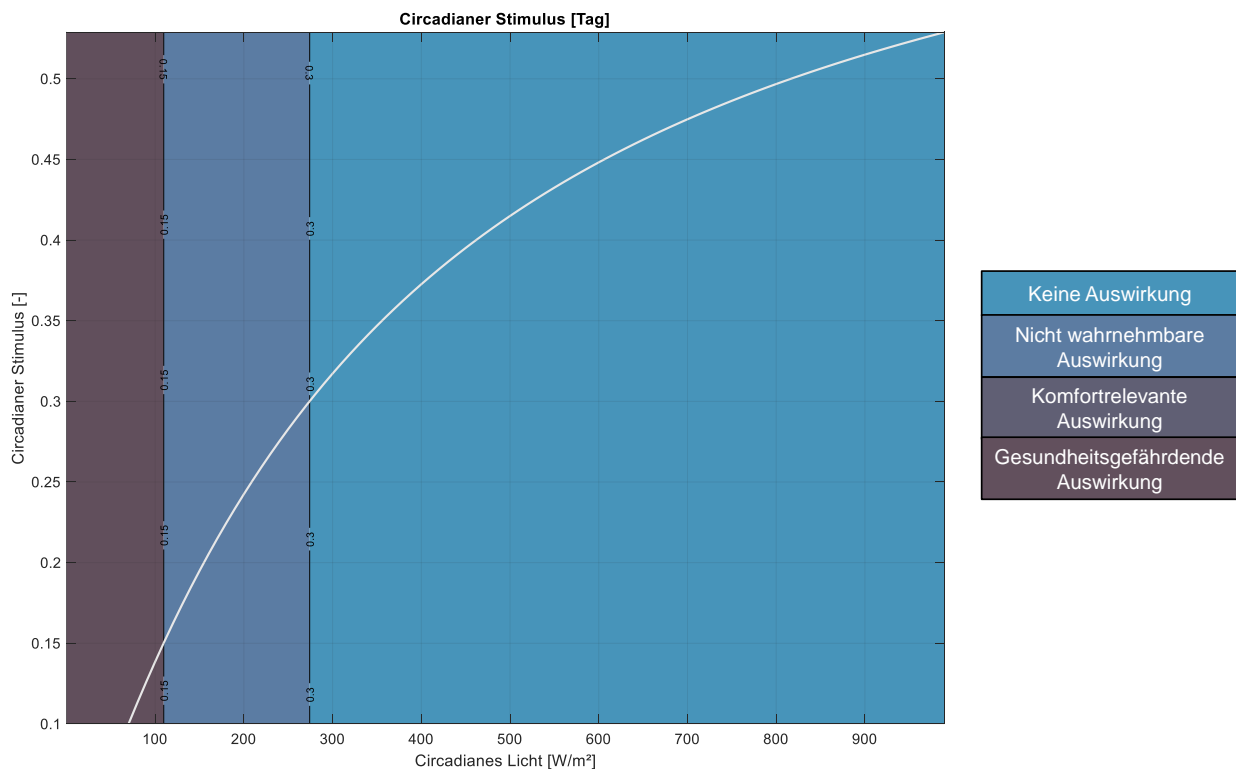


Abbildung 83: Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus ohne Feldgröße und Expositionsdauer

Abbildung 83 zeigt die Abhängigkeit zwischen dem circadianen Stimulus und dem circadianen Licht für die Betrachtung tagsüber. Dabei wurden zusätzlich die drei Wirkungszonen eingetragen. Somit ist ein circadianes Licht über 280 W/m² für einen neutralen Zustand erforderlich. Ein circadianes Licht, kleiner als

110 W/m², führt dagegen zu einer Deregulierung des circadianen Rhythmus und sorgt somit für gesundheitsgefährdende Auswirkungen. Abbildung 84 zeigt den circadianen Stimulus in der Nacht für das volle visuelle Feld, Abbildung 85 für das zentrale visuelle Feld und Abbildung 86 für das übergeordnete visuelle Feld. Je kleiner das visuelle Feld wird, desto mehr circadianes Licht kann der Mensch für einen neutralen Zustand vertragen. Im Vergleich für das volle visuelle Feld liegt die Grenze bei circa 110 W/m², beim zentralen visuellen Feld bei circa 220 W/m² und beim übergeordneten visuellen Feld bei circa 440 W/m². Im gleichen Verhältnis verändert sich die Grenze zwischen den Wirkungszonen der nicht wahrnehmbaren Auswirkungen und den gesundheitsgefährdenden Auswirkungen.

Im Gegensatz zu den vorherigen Wirkungsindikatoren gibt es bei der Anwendung des biologischen Wirkungsindikators eine Zeitkomponente. Diese bestimmt jedoch ausschließlich, welche der beiden Berechnungsformeln anzuwenden ist. Genau wie bei den vorherigen Indikatoren handelt es sich jedoch um eine stationäre Betrachtung, welche wiederum in einem *Matlab*-Skript implementiert wurde.

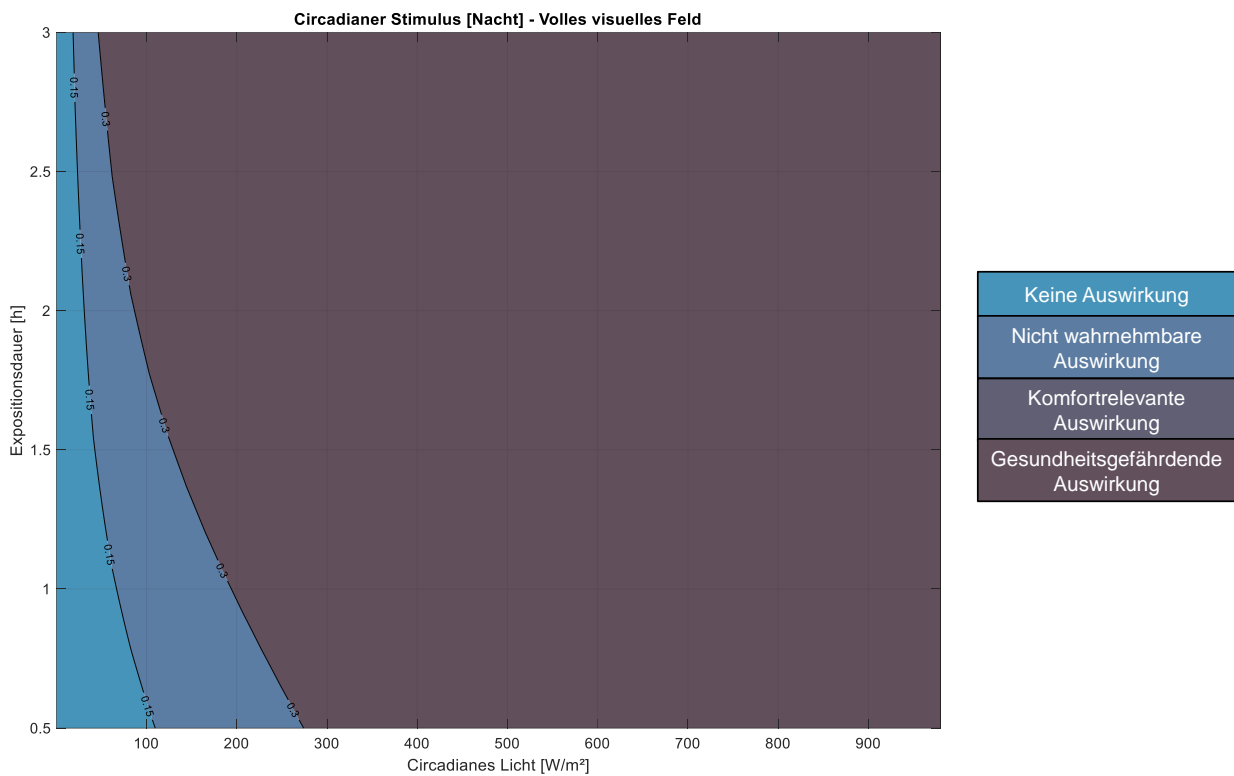


Abbildung 84: Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus: volles visuelles Feld in Abhängigkeit von der Expositionsdauer

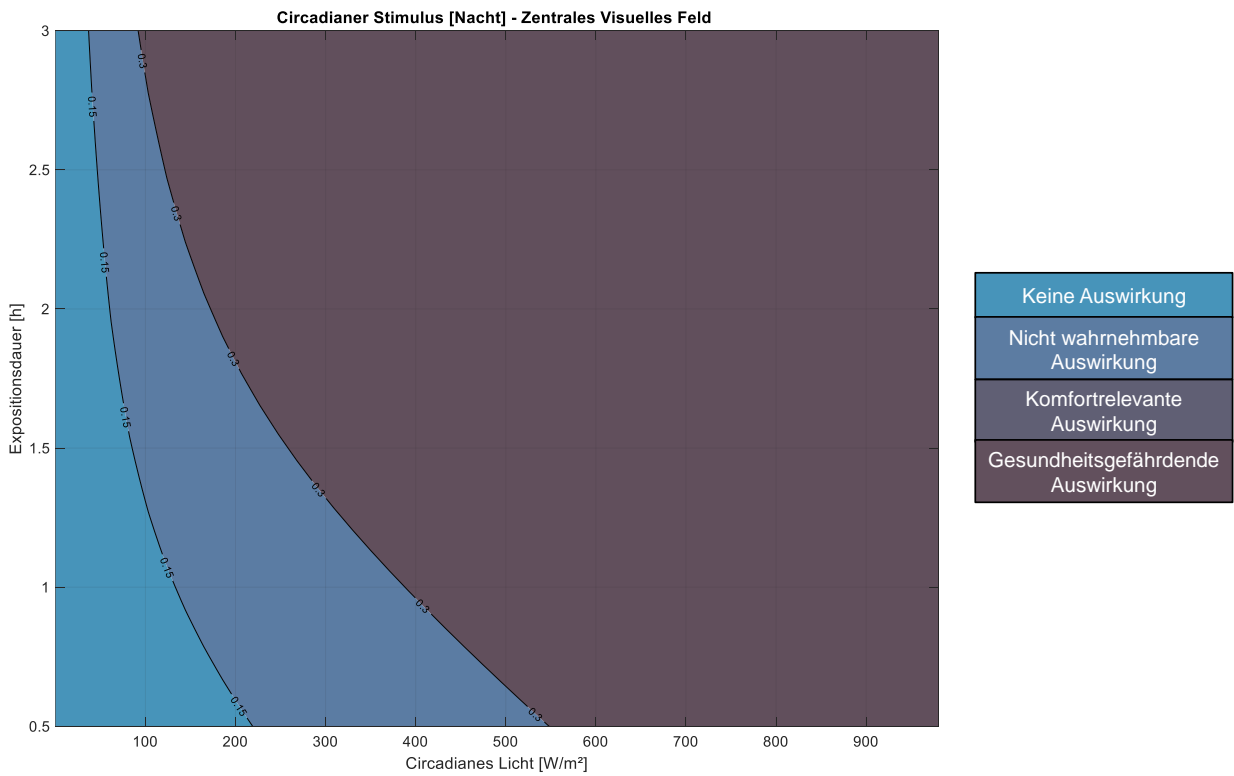


Abbildung 85: Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus: zentrales visuelles Feld in Abhängigkeit von der Expositionsdauer

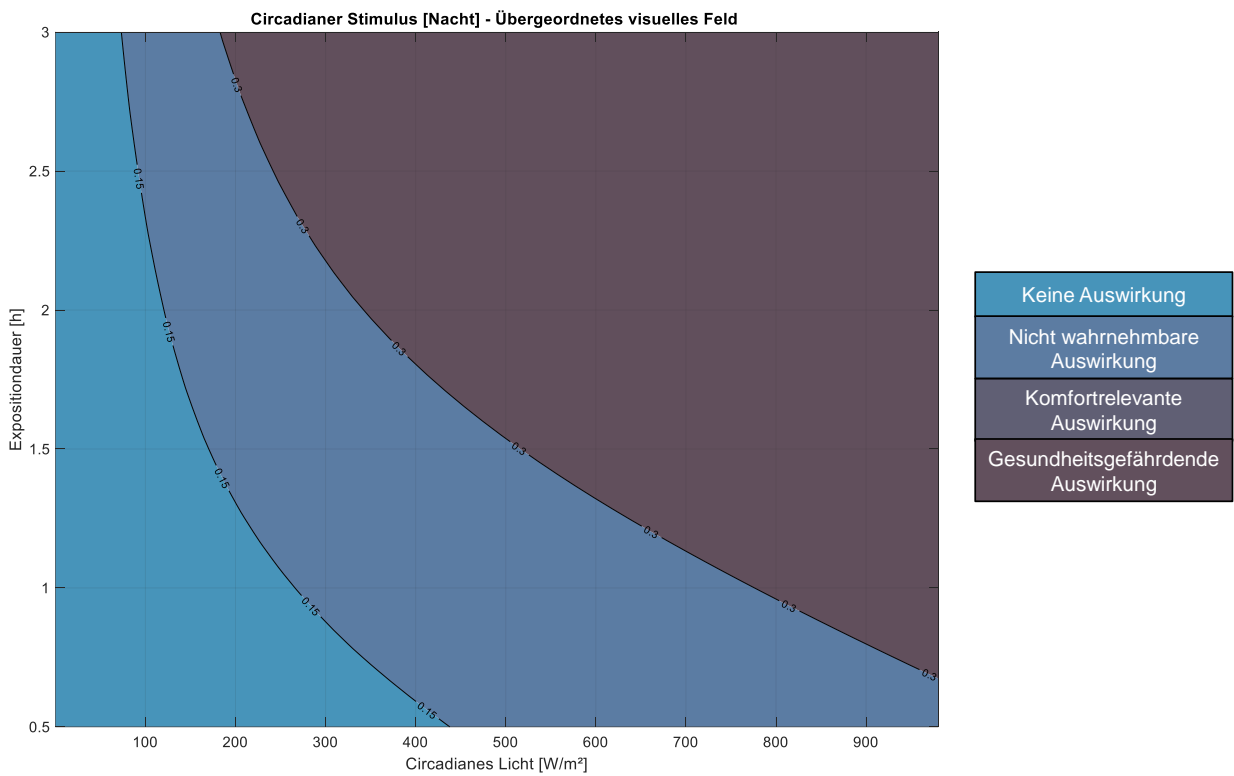


Abbildung 86: Anwendung des biologischen Wirkungsmechanismus: übergeordnetes visuelles Feld in Abhängigkeit von der Expositionsdauer

5.5 Wirkungskategorie: Akustische Umgebung

Nach Kapit, Macey und Meisami (2007) befinden sich Mechanorezeptoren an unterschiedlichen Stellen im menschlichen Körper. Das folgende Kapitel beschränkt sich jedoch auf jene Rezeptoren, welche durch einen im Raum entstehenden Elementarstrom angesprochen werden. Dabei handelt es sich um die inneren und äußeren Haarzellen im menschlichen Ohr, welche auf ein Schallereignis reagieren und im Wesentlichen dafür sorgen, dass der Mensch seine Umgebung auditiv wahrnehmen kann.

5.5.1 Stand des Wissens: Mechanorezeption

Zur Herleitung des Wirkungsindikators sowie der Wirkungszonen und des Wirkungsmechanismus werden die Grundlagen der Mechanorezeption, die numerische Darstellung der physiologischen Vorgänge im menschlichen Ohr sowie der Einfluss möglicherweise vorliegender Hörschäden im Stand des Wissens abgebildet. Wie in den vorherigen Kapiteln wird der Stand des Wissens auf die für die Herleitung der Methode relevanten Inhalte begrenzt und aus diesem Grund an einzelnen Stellen durch einen methodischen Einschub ergänzt.

Anatomisch wird das Hörorgan in Außenohr, Mittelohr und Innenohr gegliedert. Das Außenohr besteht aus der Ohrmuschel sowie dem äußeren Gehörgang, der durch das Trommelfell, eine dünne Membran, vom Innenohr abgetrennt ist. Im Mittelohr, einem luftgefüllten Hohlraum, befinden sich die drei Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss, Steigbügel). (Fastl & Maschke, 2017) Das Außen- und das Mittelohr bilden somit ein Reiztransportorgan, welches zur Aufnahme eines Schallsignals und der Anpassung der akustischen Impedanz zwischen der Atmosphäre, die den Menschen umgibt, und der Flüssigkeit im Innenohr dient. (Baumgarte, 2000)

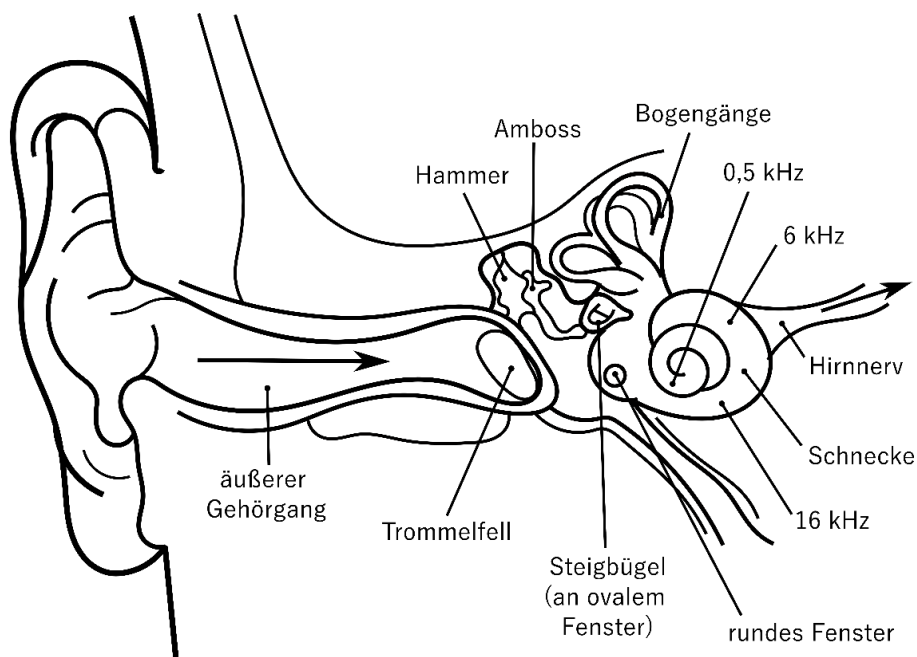


Abbildung 87: Vereinfachte Darstellung des menschlichen Gehörs (Chittka & Brockmann, 2005)

Das Mittelohr endet am ovalen Fenster. An dieser Stelle leitet der Steigbügel die Bewegungen des ovalen Fensters ein. Diese werden wiederum auf die Lymphflüssigkeit in der Cochlea im Innenohr übertragen. (Fastl & Maschke, 2017) In der Cochlea findet letztendlich mithilfe von Haarzellen die Transduktion des im Außen- und Mittelohr vorverarbeiteten Schallsignals in eine neuronale Codierung statt. Im zentralen Gehör werden abschließend die neuronalen Schallsignale aus dem linken und aus dem rechten peripheren Gehör zusammen verarbeitet. (Baumgarte, 2000)

Die Schallwellen werden vom menschlichen Gehör wahrgenommen. Dabei handelt es sich um periodische Druckänderungen, die sich durch die Amplitude, gemessen in Pascal und die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, gemessen in Hertz, beschreiben lassen. Während der Schalldruckpegel für das subjektive Lautstärkeempfinden verantwortlich ist, wird die Frequenz einer Schallwelle vom Gehirn als Tonhöhe interpretiert. Dennoch ist die Lautstärkewahrnehmung eines Tons ebenfalls von der Frequenz abhängig. (Feigenspan, 2017)

Die Ohrmuschel fokussiert die auftreffenden Schallwellen auf den äußeren Gehörgang, der nach etwa 2,5 Zentimeter im Inneren des Kopfes am Trommelfell endet. Hierbei lösen die Schallwellen einen bestimmten Druck am Trommelfell aus. Dieser kann vereinfacht nach Gambin (2019) erfasst werden. Die mathematisch relevanten Grundlagen befinden sich in Anhang C. Neben der Fokussierung filtert die Ohrmuschel die Frequenzen der auftreffenden Schallwellen. Aus diesem Filter kann das menschliche Gehör die Information der vertikalen Position einer Schallquelle im Raum erfassen. Im Gehörgang werden außerdem aufgrund der passiven Resonanzeffekte Frequenzen um die 3 kHz verstärkt. Dieser Effekt erklärt, warum Menschen besonders empfindlich gegenüber Frequenzen im Bereich zwischen 2 kHz und 5 kHz sind. (Feigenspan, 2017)

Ausgehend vom Trommelfell wird die Schallenergie durch Schwingungen über die drei Gehörknöchelchen ins Mittelohr fortgeleitet. (Moser & Zenner, 2019a) Der Hammergriff ist direkt mit dem Trommelfell verwachsen und überträgt somit die Schwingungen auf den Amboss und den Steigbügel. Letzterer ist wiederum mit dem ovalen Fenster des Innenohrs verwachsen. (Fastl & Maschke, 2017) Bei der Schallübertragung durch das Mittelohr wird der Schalldruck mindestens 18-fach verstärkt. Dies wird zum einen durch das Flächenverhältnis des Trommelfells zur Steigbügel Fußplatte (14:1) sowie die Hebelwirkung der Gehörknöchelchen begründet. Zusätzlich wird durch das Flächenverhältnis der niedrige Schallwellenwiderstand der Luft im Außenohr an den hohen Schallwellenwiderstand (Impedanz) des mit Lymphflüssigkeit gefüllten Innenohrs angepasst. Bei der Impedanz handelt es sich um das Verhältnis von Druck zur Geschwindigkeit. Da der Druck sich wiederum aus dem Verhältnis von Kraft zur Fläche ergibt, muss es zwangsläufig zu einer Impedanz-Erhöhung beim Schalldurchgang durch das Mittelohr kommen. Gleichzeitig kommt es zu einem Amplitudenverlust bei der Schallübertragung entlang der Gehörknöchelchen. Dieser Amplitudenverlust ist gleichzusetzen mit der Schwingungsgeschwindigkeit des Steigbügels. (Moser & Zenner, 2019a)

Durch die Bewegungen des ovalen Fensters werden die, durch das Schallereignis hervorgerufenen, Schwingungen auf die Lymphflüssigkeit des Innenohrs übertragen. (Fastl & Maschke, 2017) Das Innenohr an sich besteht aus zwei Hauptteilen, dem für den Gleichgewichtssinn relevanten Vestibularapparat, der in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt wird, und der Cochlea, welche für die Verarbeitung des Schalls verantwortlich ist. (Moser & Zenner, 2019a) Die Cochlea (dargestellt in entrollter Form in Abbildung 88) ist

innerhalb des Innenohrs schneckenförmig in zweieinhalb Windungen aufgerollt. Dieser durch eine sehr harte Knochensubstanz gebildete Kanalhohlraum wird längs durch die Reissnersche Membran und die Basilarmembran in insgesamt drei Kammern (Skalen) gegliedert (vereinfacht dargestellt in Abbildung 89). Die Scala vestibuli, welche durch das ovale Fenster vom Mittelohr abgegrenzt wird, befindet sich oberhalb der Reissnerschen Membran. Unmittelbar unter dieser und oberhalb der Basilarmembran liegt die Scala media und unterhalb der Basilarmembran ist die Scala tympani welche durch das runde Fenster abgeschlossen wird. An der Spitze der Cochlea, dem Helicotrema sind die Scala vestibuli und die Scala tympani durch eine Membranöffnung miteinander verbunden. Die verschiedenen Skalen unterscheiden sich durch die enthaltene Flüssigkeit und das sich daraus ergebende Potential. (Baumgarte, 2000) Die Scala media enthält Endolymphe (+ 80 mV, überwiegend Kaliumionen) die beiden anderen Skalen sind dagegen mit Perilymphe gefüllt (0 mV, überwiegend Natriumionen). Diese Ionenkonzentrationen liefern die Energie für die bioelektrischen Vorgänge der Schallrezeptoren. (Baumgarte, 2000; Fastl & Maschke, 2017)

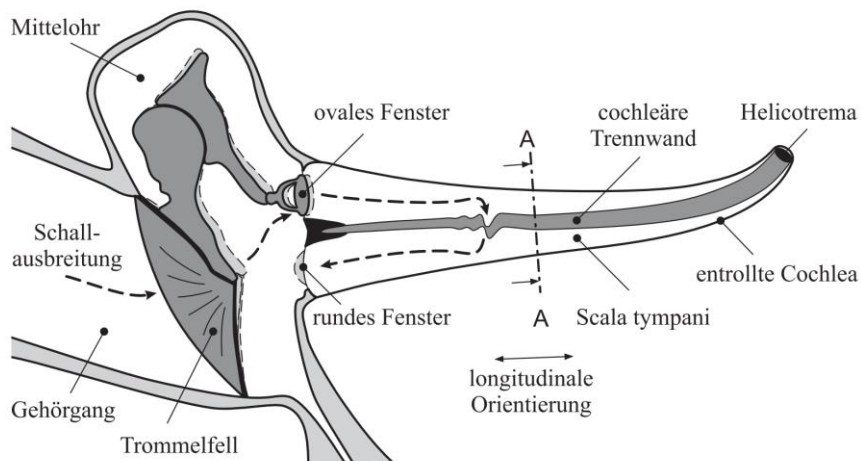


Abbildung 88: Schematischer Schnitt durch das Mittelohr und die entrollte Cochlea (Baumgarte, 2000)

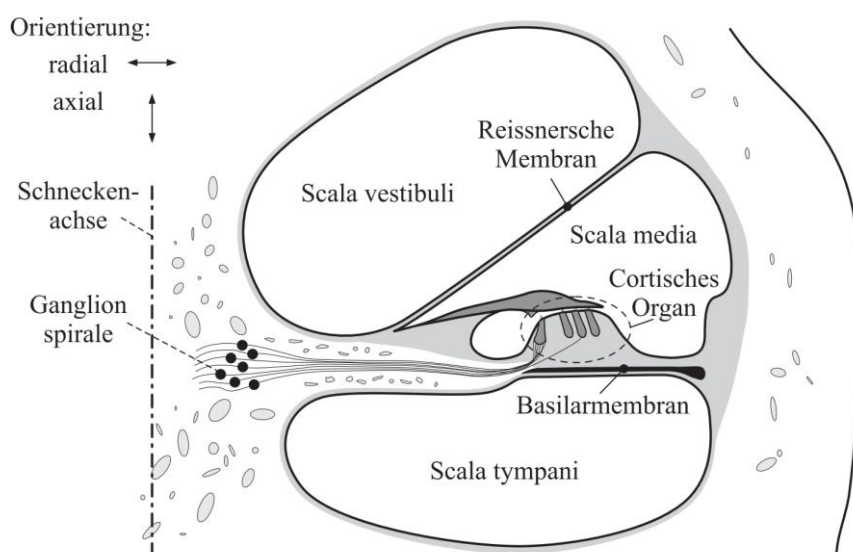


Abbildung 89: Querschnitt A – A der Cochlea aus Abbildung 88 (Baumgarte, 2000)

Die Schallsensoren, die Haarzellen, befinden sich im cortischen Organ, welches auf der Basilarmembran liegt. Für die letztendliche Schallempfindung wird zusätzlich die Tectorialmembran benötigt, welche das cortische Organ bedeckt. Gemeinsam werden die Basilarmembran, das cortische Organ und die Tectorialmembran als cochleäre Trennwand bezeichnet. Innerhalb dieses Organs befinden sich rund 3400 innere Haarzellen sowie etwa 13000 äußere Haarzellen. Die Sensorfunktion der inneren Haarzellen wird dadurch erkennbar, dass diese von rund 95 % der afferenten Nervenfasern innerviert werden, welche zum zentralen Gehör führen. Im Gegensatz dazu werden die äußeren Haarzellen von etwa 90 % der efferenten Nervenfasern kontaktiert. Für die letztendliche Signalverarbeitung wird jedes der beschriebenen Bestandteile des Innenohrs benötigt. Hierbei ist insbesondere die Hydromechanik in der Cochlea relevant; diese wird maßgeblich durch die Geometrie sowie die Materialeigenschaften bestimmt. (Baumgarte, 2000)

Die Schwingung des Steigbügels bringt die Membran des ovalen Fensters zum Schwingen, wodurch die zu übertragende Schallenergie in die Perilymphe der Scala vestibuli eingeleitet wird. Da diese Flüssigkeit inkompressibel ist, weicht sie aus, wodurch die Reissnersche Membran, die Scala media und das cortische Organ nach unten gedrückt werden. Durch diese Bewegung wird die ebenfalls inkompressible Flüssigkeit in der Scala tympani verdrängt, was dazu führt, dass die Membran des runden Fensters in die entgegengesetzte Richtung vom ovalen Fenster hin zum Mittelohr ausgelenkt wird. (Moser & Zenner, 2019a)

Bei einer solchen Schallübertragung entsteht eine Druckdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite der cochleären Trennwand. Erst, wenn die Schwingungsfrequenz des Schallereignisses und die ortsabhängige Resonanzfrequenz der cochleären Trennwand (charakteristische Frequenz) übereinstimmen, findet ein Druckausgleich zwischen den drei Skalen statt. Über diesen Ort hinaus ist bis zum Helicotrema keine Druckdifferenz mehr vorhanden. Die cochleäre Trennwand zeichnet sich durch eine abnehmende Steifigkeit bei zunehmender Breite bis hin zum Helicotrema aus. Aus diesem Grund nimmt die charakteristische Frequenz über die Länge kontinuierlich ab. (Baumgarte, 2000)

Somit führen die Wellenbewegungen von unterschiedlichen Schallereignissen mit verschiedenen Frequenzen zu örtlich unterschiedlichen maximalen Auslenkungen der Trennwand und der Basilarmembran. Je tiefer die Frequenz, desto näher liegen die Auslenkungsmaxima an der Schneckenspitze. Dieser Prozess wird als Frequenz-Orts-Transformation bezeichnet, aufgrund dessen das Gehör die Fähigkeit besitzt, Tonhöhen wahrzunehmen. Die beschriebene Auslenkung der cochleären Trennwand führt zudem zu einer Reizung der inneren Haarzellen, wodurch die Transduktion des akustischen Signals in ein neuronales Signal erfolgt. Die Lautstärkewahrnehmung wird durch die Anzahl der pro Zeiteinheit in der Hörbahn hervorgerufenen Aktionspotentiale codiert. (Baumgarte, 2000; Fastl & Maschke, 2017)

Der Prozess der Transduktion des mechanischen in ein elektrisches Signal ist im Detail nachzulesen in Gollisch (2004).

Die entstehenden Signale werden von der afferenten Hörbahn, von der Cochlea bis zur Großhirnrinde weitergeleitet. (Moser & Zenner, 2019b)

Neben den afferenten Nervenfasern umfasst die Hörbahn ebenfalls efferente Nervenfasern, welche ausgehend von höheren Verarbeitungsebenen sowohl an niedrigere Verarbeitungsebenen als auch zurück an das Innenohr (an die äußeren Haarzellen) gesendet werden. Im menschlichen Gehirn werden die Schallsignale beider Ohren zusammengeführt und gemeinsam weiterverarbeitet. In der sogenannten Vierhügelregion werden sowohl die Frequenz als auch die Intensität aufgelöst und die Schallquelle lokalisiert. In der Hörrinde, der Endstation der afferenten Hörbahn, findet letztendlich die bewusste Schallwahrnehmung statt. (Maschke & Fastl, 2017)

Evolutionär betrachtet dient das Gehör neben der Funktion zur Kommunikation und Orientierung als Warnsystem für den Menschen. Abhängig vom Bedeutungsgehalt und der Intensität des wahrgenommenen Schalls werden somit Teile des zentralen und peripheren Nervensystems aktiviert. Wird der Körper in einen solchen Stresszustand überführt, kann es zu einer Reihe von messbaren körperlichen Veränderungen kommen; dazu zählen die verstärkte Hormonausschüttung, Herz-Kreislaufveränderungen, Magen-Darmveränderungen, Erhöhung des Muskeltonus, Veränderung der Atemfrequenz und eine Stoffwechselveränderung. (Lercher, 1998) Mehrere aktuellere Studien befassen sich mit der Auswirkung von Schall auf das zentrale und das periphere Nervensystem (Erfanian et al., 2019) und den damit verbundenen unbewussten physiologischen Reaktionen im menschlichen Körper. Ausgelöst werden diese physiologischen Reaktionen jedoch erst durch die von der Wahrnehmung hervorgerufenen Emotionen (z. B. Bedrohung, Frustration, Ärger, Erschrecken oder Freude). (Park, 2018) Als physiologische Messgrößen kommen üblicherweise die Herzfrequenz und Herzfrequenz-Variabilität (Gomez & Danuser, 2004; Raggam et al., 2007; Griefahn et al., 2008; Hume et al., 2008; Irwin et al., 2011; Hume & Ahtamad, 2013; Lindborg, 2013; Medvedev, Shepherd & Hautus, 2015; El Aarbaoui et al., 2017, Park & Lee, 2017; Park, Lee & Jeong, 2018), die Atemfrequenz (Gomez & Danuser, 2004; Hume et al., 2008; Hume & Ahtamad, 2013; Park & Lee, 2017; Park, Lee & Jeong, 2018; Raggam et al., 2007), der Hautleitwert (Alvarsson, Wiens & Nilsson, 2010; Park & Lee, 2017; Park, Lee & Jeong, 2018), der Blutdruck (Chang et al., 2012; Babisch et al., 2014; Lee et al., 2019) oder der Muskeltonus (Trapanotto et al., 2004; Hume & Ahtamad, 2013) in Frage. Daneben bietet sich die Messung von Hormonen, insbesondere Adrenalin, Noradrenalin und Kortisol an. (Evans & Johnson, 2000; Waye et al., 2003; Yaghoubi et al., 2020)

Die Problematik bei Messungen der Veränderung dieser physiologischen Parameter besteht jedoch darin, dass die Daten nur sehr schwer von anderen Einflüssen bereinigt werden können. Neben der akustischen Umgebung können andere Stressoren ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Veränderung dieser Messgrößen nehmen. Die beschriebenen Reaktionen sind somit nicht lärmspezifisch und können nicht unabhängig von anderen Stressoren betrachtet werden. (Lercher, 1998) Dieser Zusammenhang erklärt, warum Studien, die den gleichen physiologischen Parameter untersuchen, zu teils sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen. (Erfanian et al., 2019) Gomez und Danuser (2004) haben beispielsweise einen Zusammenhang zwischen der Erhöhung der Herzrate und Geräuschen mit einem hohen Erregungspotential (z. B. Sirenen) gefunden, während Medvedev, Shepherd und Hautus (2015) gar keinen Zusammenhang zwischen diesen zwei Parametern nachweisen konnten. Hume und Ahtamad (2013) kamen dagegen zu dem Schluss, dass unangenehme Geräusche eher zu einer niedrigeren Herzfrequenz führen. Ähnlich verhält es sich bei den restlichen betrachteten Studien. Zängler (2021) kam unter anderem zu dem Schluss, dass eine alleinige Betrachtung von physiologischen Reaktionen des Körpers nicht ausreicht, um Zusammenhänge zu einer akustischen Umgebung herzustellen. Ausschlagend für die Reaktion des Körpers auf eine akustische Umgebung ist dagegen vielmehr die individuelle subjektive Wahrnehmung.

5.5.1.1 Numerische Darstellung der Lautheitswahrnehmung

Bei der Lautheit handelt es sich um eine normierte Größe der Psychoakustik. In der DIN ISO 16832 (2007) wird die Lautheit definiert als ein „Merkmal der Hörempfindung, mit dessen Hilfe Schall auf einer Skala von leise nach laut angeordnet werden kann.“

Nach Schmidt (2019) lassen sich drei zeitliche Arten der Lautheit unterscheiden. Die Kurzzeit-Lautheit bildet die momentane Impression und somit eine sehr feine Struktur der Lautheit ab. Dagegen wird bei der Langzeit-Lautheit die feine Struktur nebensächlich, während der Gesamt-Lautheitseindruck eines Segmentes entscheidend wird, und als drittes die Gesamtlautheit, welche einer zusammenfassenden Bewertung der wahrgenommenen akustischen Umgebung aus einer Reihe von Langzeit-Lautheitsbeurteilungen entspricht. Um die Gesamtlautheit einer Umgebung bestimmen zu können, stehen diverse Lautheitsmodelle zur Verfügung. Ein Modell, welches die Gesamtlautheit bestimmt und zusätzlich das binaurale Hören berücksichtigt, wird von Moore et al. (2016) beschrieben.

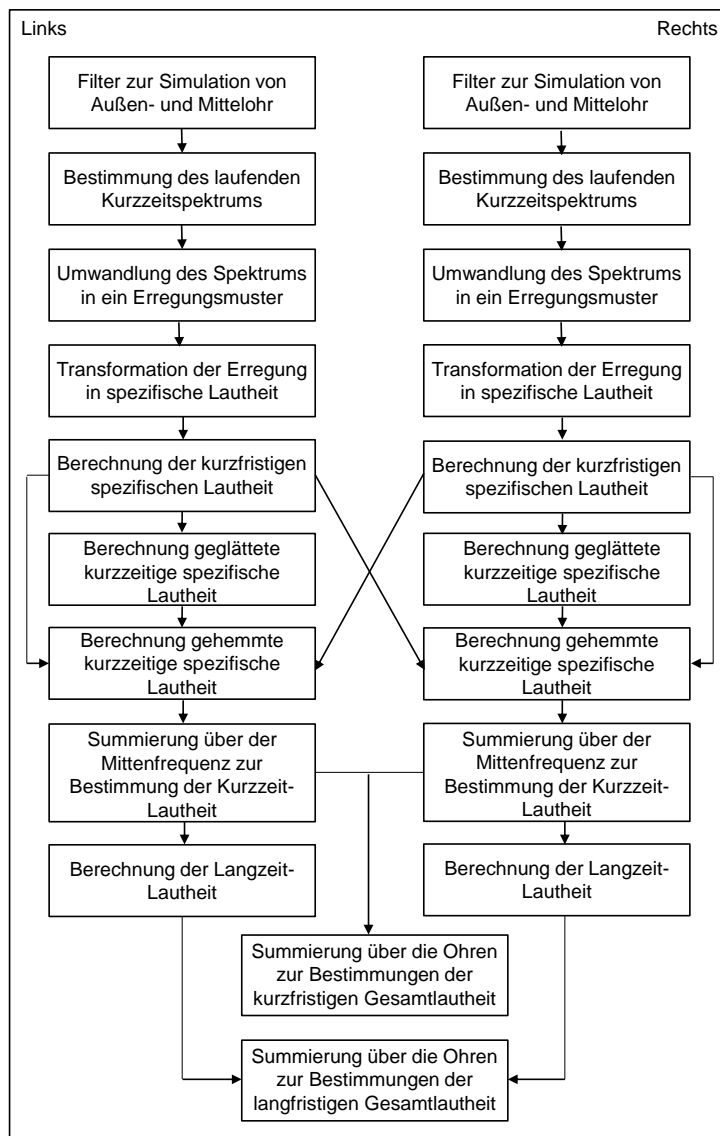


Abbildung 90: Blockdiagramm der binauralen zeitverändernden Lautheit (nach Moore et al., 2016)

Das Modell beruht auf dem Modell nach Moore, Glasberg und Baer (1997), welches ein Modell für binaurales Hören darstellt, das jedoch lediglich die Lautheit über beiden Ohren aufsummiert. Durch die Anpassung nach Moore und Glasberg (2007) wurde das Modell dahingehend erweitert, dass die Lautheit nicht mehr vereinfacht über beide Ohren aufsummiert wird, da festgestellt wurde, dass ein Geräusch, das mit beiden Ohren gehört wird, nicht doppelt so laut ist wie das gleiche Geräusch, das mit einem Ohr gehört wird. Dieses Verfahren wurde ebenfalls in der ISO 532-2 (2017) festgehalten und dient als Bewertungsgrundlage für das binaurale Hören von stationären Geräuschen. Da jedoch in Innenräumen die Geräusche selten stationär sind und es sich viel eher um zeitvariierende Geräusche handelt, wird an dieser Stelle das an diese Bewertungssituation angepasste Modell von Moore et al. (2016) genutzt.

In Abbildung 90 ist der schematische Ablauf des Berechnungsvorgangs dargestellt. Entsprechend der Beschreibung des Stands des Wissens der Mechanorezeption folgen die einzelnen Berechnungsschritte dem Weg des Schalls vom Außenohr bis hin zur Lautheitswahrnehmung. Eine detaillierte Beschreibung des Lautheitsmodells findet sich in Moore et al. (2016). Der dargestellte Algorithmus ist Bestandteil der *The Auditory Modeling Toolbox (AMT)*. Dabei handelt es sich um freizugängliche *Matlab*-Skripte, welche die Modellierung des menschlichen Gehörs ermöglichen. (Majdak, Hollomey & Baumgartner, 2022)

Neben der Beschreibung der Lautheit in Phon und Sone bietet sich die kategoriale Lautheitsskalierung an. Für die kategoriale Lautheitsskalierung stehen zwei unterschiedliche Skaleneinteilungen zur Verfügung, zum einen die nach der DIN ISO 16832 (2007), übernommen von Brand und Hohmann (2002), und zum anderen die nach Hawkins et al. (1987). Diese eignen sich zur verbalen Bewertung von gehörten Tönen. Die Lautheitsskalierung nach der DIN ISO 16832 (2007) besteht aus elf Abstufungen von *nicht gehört* bis *extrem laut*. Die Skalierung nach Hawkins et al. (1987) bezieht sich eher auf den Komfort und somit auf die Bewertung der Wahrnehmung und bietet neun Auswahlmöglichkeiten von *sehr sanft* bis *schmerzhaft laut*.

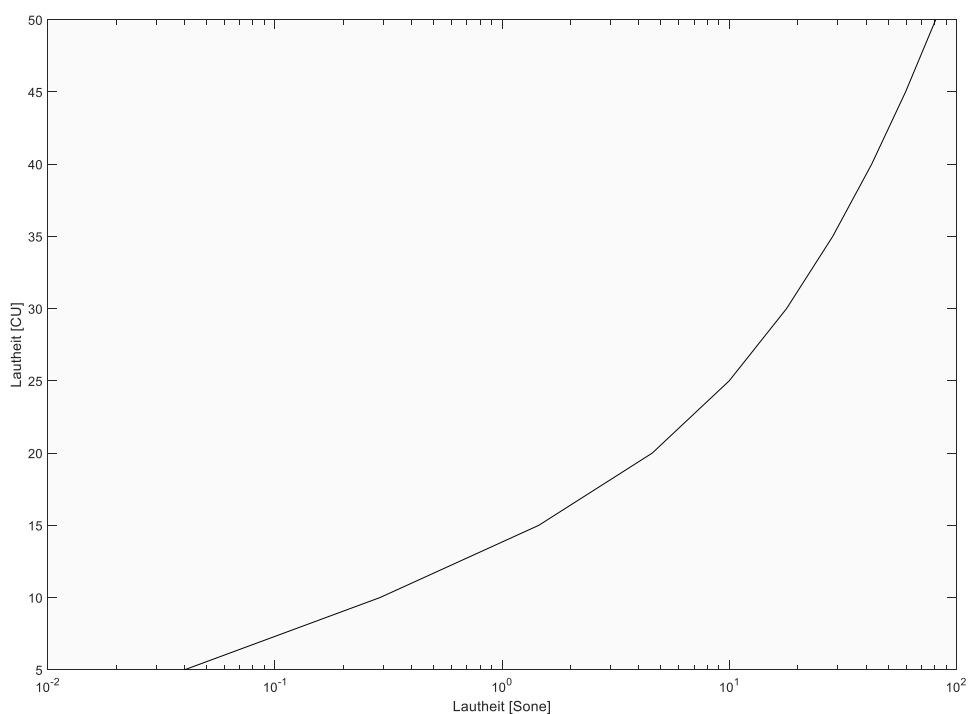


Abbildung 91: Verhältnis zwischen der Lautheit in Sone und der Lautheit in *Categorical Units*

Für die Bewertung einer akustischen Umgebung kann demnach die CU-Einheit in Abhängigkeit von der vorherrschenden akustischen Umgebung, welche durch die Intensität und die Frequenz definiert wird, bestimmt werden. Heeren et al. (2013) liefern hierfür den passenden Ansatz, der es erlaubt, die Lautheit in Sone in die hier benötigten *Categorical Units* umzuwandeln.

$$CU = 2.6253 * \log(\text{sone} + 0.0887)^3 + 0.7799 * \log(\text{sone} + 0.0887)^2 + 8.0856 * \log(\text{sone} + 0.0887) + 13.4493 [CU] \tag{90}$$

5.5.1.2 Numerischer Einfluss eines Hörschadens auf die Lautheitswahrnehmung

Der beschriebene Algorithmus berechnet die Lautheit ausschließlich für normalhörende Personen. Jedoch kann sich das Gehör entweder aufgrund des Alters oder aufgrund von Krankheiten verschlechtern. Hierfür gibt es ebenfalls Ansätze, welche die Lautheit modellieren. Die Hörfähigkeit einer Person hat den größten Einfluss auf die individuelle Wahrnehmung einer akustischen Umgebung, während weder beim Alter noch beim Geschlecht ein Einfluss festgestellt werden konnte. (Bentler & Cooley, 2001) Pieper (2020) verweist auf Oetting et al. (2013) und legt dar, dass es noch kein Lautheitsmodell gibt, das für sämtliche Personen mit einem Hörverlust die Lautheit ausreichend genau beschreiben kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Hörverlust unterschiedliche Gründe haben kann, welche sich durch unterschiedliche physiologische Veränderungen ausdrücken und sich somit an unterschiedlichen Stellen der Schallwahrnehmung auswirken. Hauptsächlich wird hierbei zwischen dem Verlust von inneren und äußeren Haarzellen unterschieden. (Chen et al., 2011)

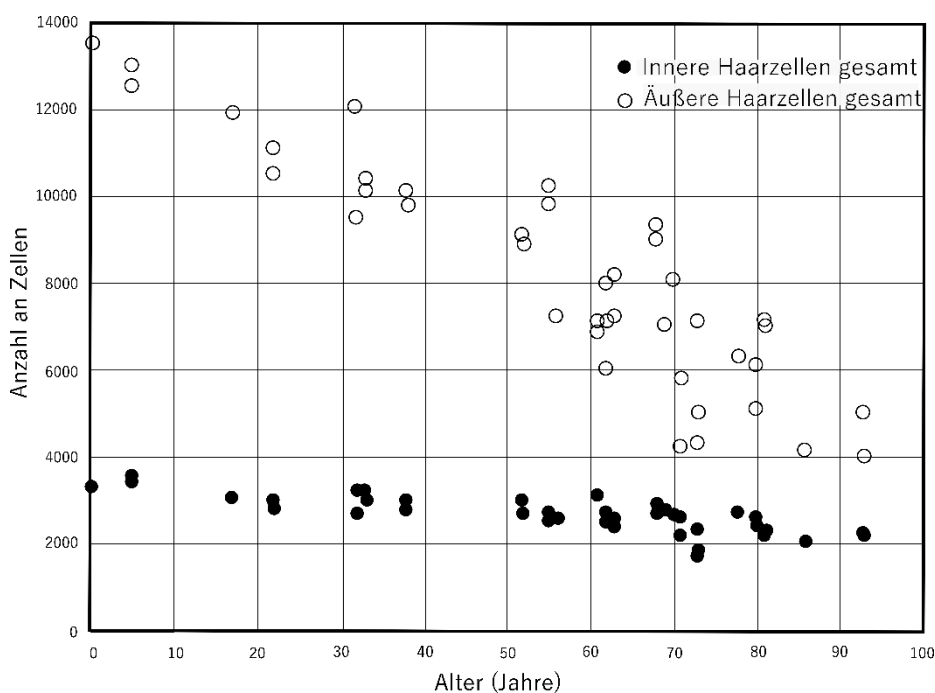


Abbildung 92: Anzahl der inneren und äußeren Haarzellen mit zunehmendem Alter (Keithley, 2020 nach Bredberg, 1968)

Sowohl die Anzahl an äußeren als auch an inneren Haarzellen nehmen mit zunehmendem Alter ab. In Abbildung 92 ist jedoch deutlich sichtbar, dass sich die Anzahl der äußeren Haarzellen stärker reduziert als die der inneren Haarzellen. Bei der Abnahme der Haarzellen handelt es sich um einen stetigen Prozess, der bereits im jungen Alter beginnt. (Keithley, 2020 nach Bredberg, 1968)

Neben dem altersbedingten Hörverlust gibt es unterschiedliche gesundheitliche Ursachen für die Reduzierung der wahrgenommenen Lautheit. Eine davon ist die Schalleitungsschwierigkeit (konduktive Schwerhörigkeit). Dabei handelt es sich um eine gestörte Übertragung der Schalldruckwellen im Außen- und Mittelohr. Ursachen hierfür sind ein blockierter Gehörgang oder eine Störung der Bewegung der Gehörknöchelchen. (Pieper, 2020) Daneben gibt es die Schallempfindungsschwierigkeit, welche durch eine Schädigung des Innenohrs, der schallübertragenden Nerven oder der zentralen Verarbeitungszentren des Gehirns entsteht. Somit gehört der altersbedingte Hörverlust ebenfalls zu den Empfindungsstörungen. Beide Arten des Hörverlustes können zudem gemeinsam auftreten. Daneben kann die Verwendung von ototoxischen Medikamenten ebenfalls zu einem vorübergehenden oder dauerhaften Hörverlust führen. (Liu et al., 2020)

Hörgeschädigte Personen haben für gewöhnlich eine höhere Hörschwelle, wohingegen unkomfortable Lautheitslevel für normalhörende und hörgeschädigte Personen identisch bleiben. (Bentler & Cooley, 2001) Diese Gegebenheit lässt sich ebenfalls nach Rasetshwane et al. (2015) ableiten.

Ob eine Schwerhörigkeit bei einer Person vorliegt, lässt sich normalerweise ausschließlich mit aufwendigen audiometrischen Tests bestimmen. (Ventry & Weinstein, 1982) Da solche Tests jedoch im Rahmen der Wirkungsabschätzung zu aufwendig wären und dennoch eine Einschätzung des Hörvermögens der individuellen Personen benötigt wird, da diese die wahrgenommene Lautheit maßgeblich beeinflusst, wird auf die Fragebögen von Ventry und Weinstein (1982) *Hearing Handicap Inventory for the Elderly* (HHIE) sowie Newman et al. (1990) *Hearing Handicap Inventory for Adults* (HHIA) zurückgegriffen. Diese Fragebögen finden auch heute noch wegen der einfachen und schnellen Handhabung eine Anwendung in der Bewertung der Hörfähigkeit der Menschen. Ventry und Weinstein (1982), mit Verweis auf Noble (1978) postulieren, dass Gehörtests lediglich eine Schalleitungs- oder Schallempfindungsstörung feststellen können, jedoch keine Möglichkeit der Quantifizierung des dadurch für die entsprechende Person entstehenden Handicaps im alltäglichen Leben bieten. Aus diesem Grund wurde ein Fragebogen zur Selbstevaluierung der Auswirkungen einer Gehörschädigung entwickelt. Dieser beinhaltet insgesamt 25 Fragen, die jeweils mit „ja“, „gelegentlich“ oder „nein“ zu beantworten sind. Dreizehn der Fragen beziehen sich auf die emotionalen Auswirkungen, die zwölf übrigen auf die sozialen und situationsabhängigen Auswirkungen. Der ursprüngliche Fragebogen von Ventry und Weinstein (1982) war ausschließlich für Personen älter als 65 Jahre gedacht. Im überarbeiteten Fragebogen von Newman et al. (1990) wurden einzelne Fragen ausgetauscht, um diesen besser an die Lebenssituation von Erwachsenen jedes Alters anzupassen. Der Fragebogen befindet sich in Anhang D. Zusätzlich wurden audiometrische Korrelationen abgeleitet (Ventry & Weinstein, 1982; Weinstein & Ventry, 1983; Newman et al., 1990), die es ermöglichen, die im Fragebogen erreichte Punktzahl einem quantitativen Hörverlust in Dezibel zuzuordnen. Diese quantitative Zuordnung kann für die Wirkungsbilanzierung genutzt werden, indem die entsprechenden Personen einer bestimmten Hörverlustkategorie (20 dB, 40 dB, 60 dB)

zugeordnet werden können. Dabei handelt es sich nur um eine Abschätzung des möglicherweise vorhandenen Hörverlustes, nicht jedoch um eine exakte Bestimmung dessen.

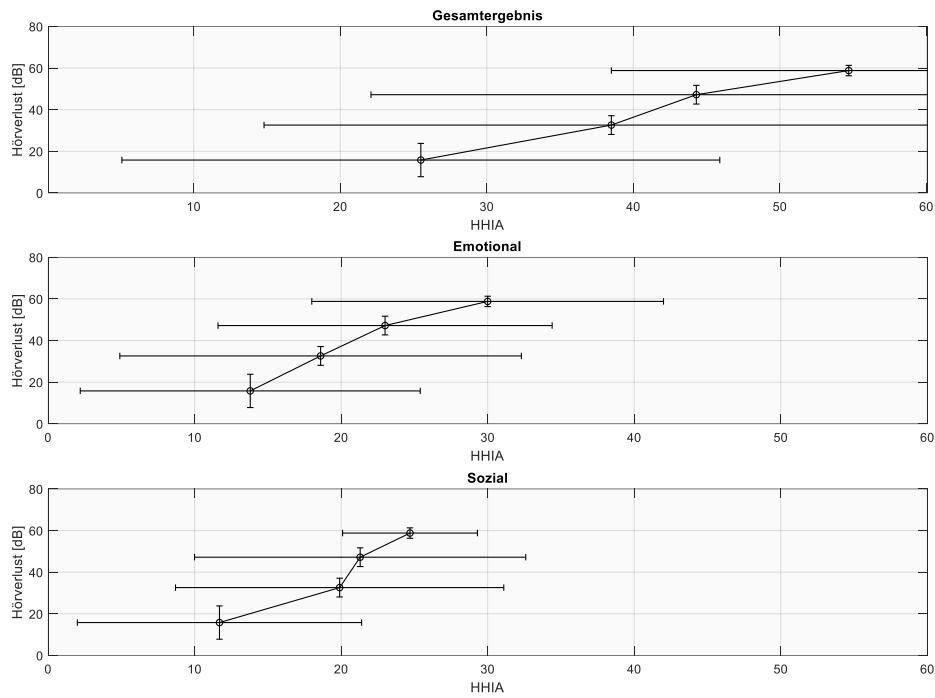


Abbildung 93: Korrelation zwischen dem audiometrisch gemessenen Hörverlust und den Ergebnissen des HHIA (nach Newman et al., 1990)

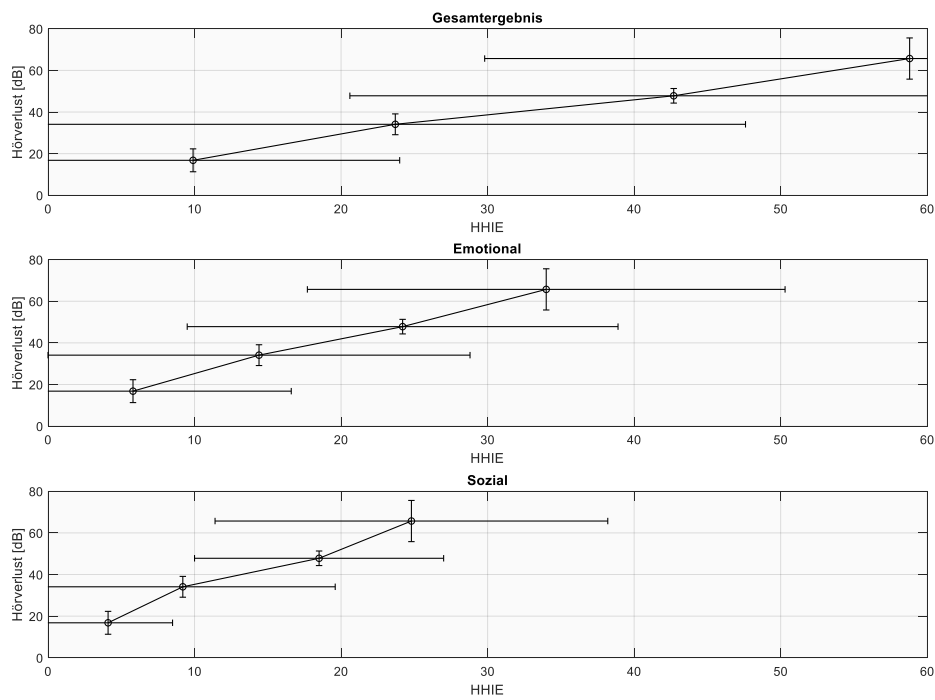


Abbildung 94: Korrelation zwischen dem audiometrisch gemessenen Hörverlust und den Ergebnissen des HHIE (nach Weinstein & Ventry, 1983)

Die in Anhang D dargestellten Fragen sind der Reihe nach mit den drei Antwortmöglichkeiten zu beantworten. Die Antwort „ja“ bringt vier Punkte, „gelegentlich“ zwei Punkte und „nein“ null Punkte. Es können maximal können 100 Punkte (52 emotional, 48 sozial) erreicht werden.

Ausgehend vom Ergebnis des Fragebogens kann der vorliegende Hörverlust der jeweiligen Person bestimmt werden. Dies erfolgt anhand der in Weinstein und Ventry (1983) und Newman et al. (1990) gegebenen Daten (Abbildung 93 und 94), welche einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen dem Ergebnis des Fragebogens und dem tatsächlich gemessenen Hörverlust nachweisen konnten.

5.5.2 Definition des akustischen Wirkungsindikators und der Wirkungszonen

Zur Herleitung des Indikators zur Bewertung der Wirkung der akustischen Umgebung auf einen Menschen wird die Wirkungskette zwischen dem Reiz auslösenden Schallereignis bis hin zur neuronalen Verarbeitung betrachtet. Diese Betrachtung entspricht dem Weg des Schalls vom Außenohr bis hin zur Bewertung des Schallempfindens durch die jeweilige Person. Diese Wirkungskette wandelt die vom Gehör empfangenen Schalldruckschwankungen einer akustischen Umgebung in auditive Wahrnehmungen um. Im Gegensatz zu den anderen Wirkungskategorien wird der zu bewertende Elementarstrom nicht direkt von den Rezeptoren aufgenommen, sondern erst nach der Vorverarbeitung im peripheren und im zentralen Gehör wird bei entsprechender Konzentration an Botenstoffen ein Aktionspotential ausgelöst (Fastl & Maschke, 2017).

Im Vergleich dazu wird eine thermische Umgebung ohne vorherige Verarbeitung von den Temperatursensoren erfasst, die Erfassung der visuellen und der lufthygienischen Umgebung erfolgt mit den hier vorgestellten Ansätzen ebenso direkt. An dieser Stelle lässt sich somit der erste wesentliche Unterschied der Wirkungskategorie der akustischen Umgebung zu den drei Vorherigen feststellen. Aus diesem Aspekt heraus wird die gesamte Wirkungskette zur Identifizierung eines geeigneten Indikators betrachtet.

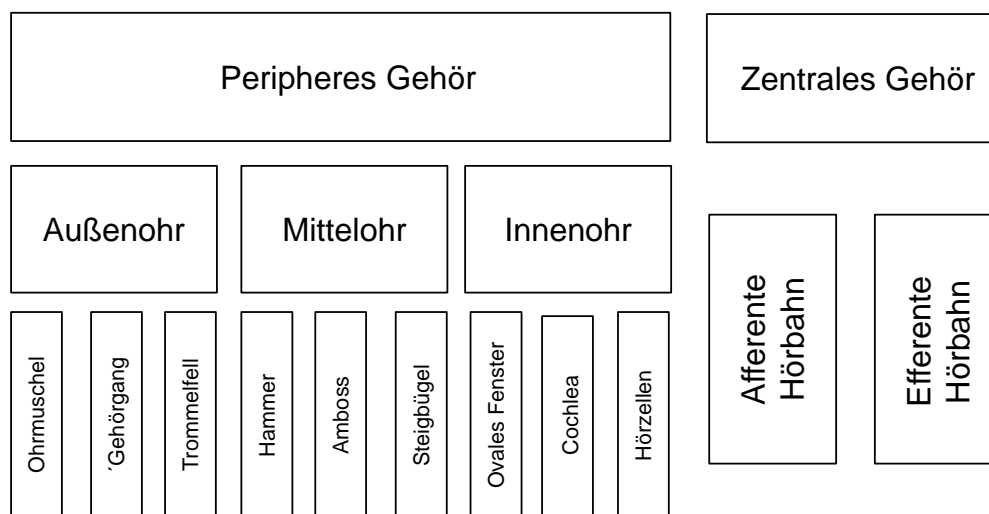


Abbildung 95: Wirkungskette zur Identifizierung eines Wirkungsindikators zur Bewertung der Auswirkung der akustischen Umgebung auf einen Menschen

Die anatomischen Bestandteile des peripheren Gehörs interagieren auf unterschiedliche Weise mit dem Schalldruck und der Frequenz eines Schallereignisses. Am Ende des äußeren Gehörgangs trifft die fokussierte und gefilterte Schallwelle auf das Trommelfell und löst hier einen bestimmten Druck aus. Weder die Ohrmuschel noch der äußere Gehörgang kommen als Grundlage für einen Wirkungsindikator in Frage, da es hier keine konkreten Wirkungsgrößen gibt. Lediglich der am Trommelfell, durch eine eintretende Schallwelle, entstehende Druck bietet einen ersten Ansatz für einen möglichen Wirkungsindikator.

Die am Trommelfell ankommende Kraft lässt sich mit dem Ansatz nach Gambin (2019) mathematisch bestimmen; diese berücksichtigt jedoch lediglich den Schalldruck als Auslöser und nicht die Frequenz des Schallereignisses. Die Frequenz wird erst bei der Verarbeitung des Schalls im Mittelohr relevant.

Eine entscheidende Größe bei der Bestimmung des am Trommelfell entstehenden Drucks ist die geometrische Abmessung des Ohrs. Wie unter anderem Stinson & Lawton (1989) sowie Voss et al. (2020) darstellen, gibt es große individuelle Abweichungen sowohl bei den Querschnittsflächen als auch bei der Tiefe des Ohrkanals. Die folgenden Abbildungen 96 und 97 stellen den entstehenden Druck am Trommelfell für einen ansteigenden Schalldruckpegel dar. Dabei wird von dem von Gambin (2019) genannten Wert für die Querschnittsfläche vor dem Trommelfell ausgegangen und beispielhaft eine Variation von $\pm 2 \text{ mm}^2$ berücksichtigt. Anzumerken ist, dass die genannten Studien sich auf erwachsene Personen konzentrieren und von einer deutlich größeren Abweichung bei Kindern ausgegangen werden muss.

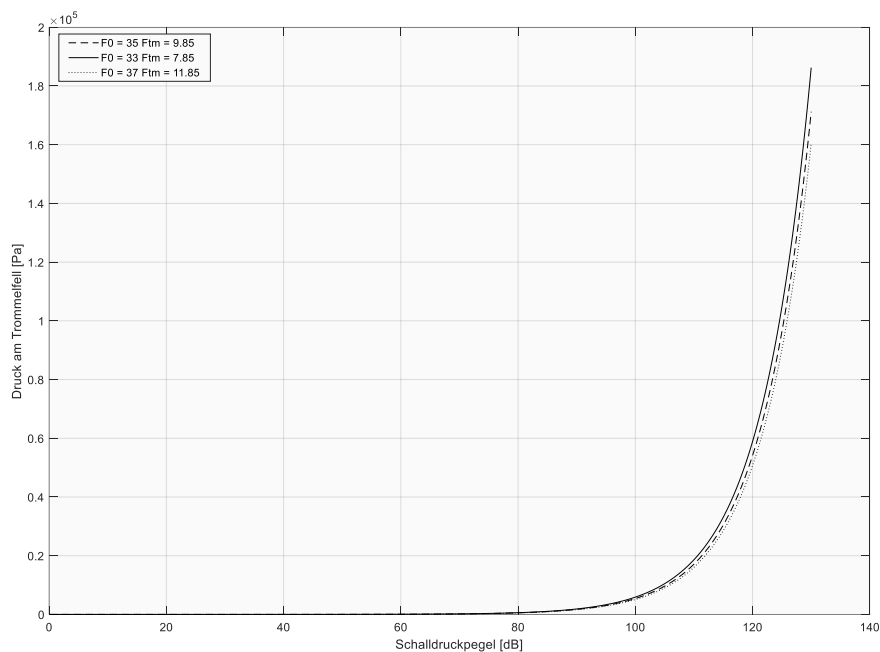


Abbildung 96: Veränderung des Drucks am Trommelfell bei steigendem Schalldruck

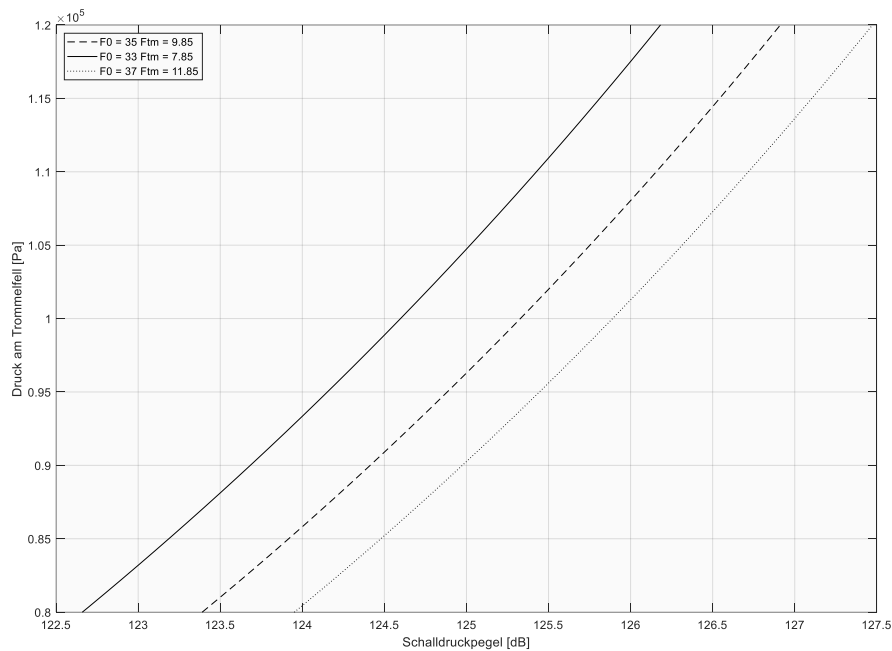


Abbildung 97: Veränderung des Drucks am Trommelfell bei steigendem Schalldruck (vergrößerte Darstellung)

Aus den grafischen Darstellungen ist erkennbar, dass mit einem steigenden Schalldruckpegel der Druck am Trommelfell exponentiell zunimmt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ab 100 000 Pascal mit einer Schädigung des Trommelfells zu rechnen ist (Hirsch, 1966), ergeben sich für die drei verschiedenen Betrachtungsbereiche leicht unterschiedliche Schalldruckpegel (124.6 dB – 125.9 dB). Unter der Voraussetzung, dass die geometrischen Abmessungen des Außenohrs einzelner Personen bekannt sind, besteht die Möglichkeit, alleine anhand des Drucks am Trommelfell den für die individuelle Person maximal zulässigen Schalldruckpegel zu bestimmen. Als alleiniger Wirkungsindikator zur Beurteilung einer Innenraumumgebung reicht der Druck am Trommelfell jedoch nicht aus; dieser kann lediglich als Grenzwert zur Gesundheitsgefährdung berücksichtigt werden.

Anzumerken ist, dass es sich bei dem Berechnungsmodell nach Gambin (2019) um einen stark vereinfachten Ansatz handelt. Eine detailliertere Betrachtung der Auswirkungen eines Schallereignisses auf das Trommelfell ist an dieser Stelle jedoch nicht zielführend, da die quantitative Darstellung der Auswirkungen auf das Trommelfell als alleiniger Wirkungsindikator ausgeschlossen werden kann.

Im weiteren Verlauf der Schallwelle durch das Innenohr verändert sich nicht nur der Schalldruck, sondern ebenfalls die Amplitude der Schallwelle. Mit dem vereinfachten Modell von Gambin (2019) lassen sich diese beiden Phänomene abbilden. Jedoch erscheint eine detaillierte Darstellung der Berechnung an dieser Stelle nicht zielführend, da weder der veränderte Schalldruck noch die reduzierte Amplitude des Schallsignals für die Beurteilung der Wirkung eines Schallereignisses auf einen Menschen genutzt werden können. Dabei handelt es sich lediglich um alleinstehende Größen, die im Verlauf der Wirkungskette eine wesentliche Rolle spielen, deren alleinige Beurteilung jedoch keine Aussagekraft hat, die über die des Drucks am Trommelfell hinausgehen würde.

Ein denkbarer Ansatz zur Bewertung der Auswirkung der akustischen Umgebung eines Menschen wäre die Bestimmung des Orts der maximalen Auslenkung der Basilarmembran in der Cochlea sowie die Häufigkeit der Auslenkung, welche auch als Basilarmembran-Geschwindigkeit definiert wird. Ein erster Versuch eines solchen Ansatzes wird von Wang et al. (2021) präsentiert. Dabei wurde für bestimmte Frequenzbänder das Verhältnis zwischen der Größe und dem Ort der Auslenkung zu einzelnen subjektiven Empfindungsbewertungen geprüft, mit dem letztendlichen Ziel anhand eines vereinfachten Ohr-Modells, ausgehend von den physiologischen Reaktionen im Ohr, direkt das vom Schall ausgelöste subjektive Gefühl vorherzusagen. Dabei kamen die Autoren zu dem Schluss, dass die Auslenkung der Basilarmembran besser für die Vorhersage der ausgelösten Empfindung geeignet ist als die klassischen psychoakustischen Größen Lautheit und Schärfe. (Wang et al., 2021) Bei diesem Ansatz handelt es sich um den ersten dieser Art, weswegen die Datengrundlage nicht ausreichend ist, um diesen weiterzuverwenden. Dennoch wird hiermit bewiesen, dass die individuellen physiologischen Reaktionen im menschlichen Ohr, insbesondere die Auslenkung der Basilarmembran eine wesentliche Rolle spielen und in Zukunft deutlich mehr Berücksichtigung finden sollten. Der bestehende Ansatz beschränkt sich auf einzelne Tonbeispiele und wird anhand eines neuronalen Netzwerks gelöst, weswegen die Weiterverwendung an dieser Stelle ausgeschlossen wird. Entgegen Wang et al. (2021) bietet es sich an dieser Stelle an, die Lautheit genauer zu betrachten.

Nach Lentz (2020) stellt die Lautheit die Korrelation zwischen der wahrgenommenen Schallintensität und der Codierung dieser im menschlichen Ohr her. Somit wird ein Bezug zwischen der psychoakustischen Größe der Lautheit und der Basilarmembran-Geschwindigkeit geschaffen. Zur Darstellung der Theorie, dass an dieser Stelle ein Zusammenhang zwischen den physiologischen Reaktionen und der Wahrnehmung bestehen muss, soll die folgende Abbildung 98 dienen.

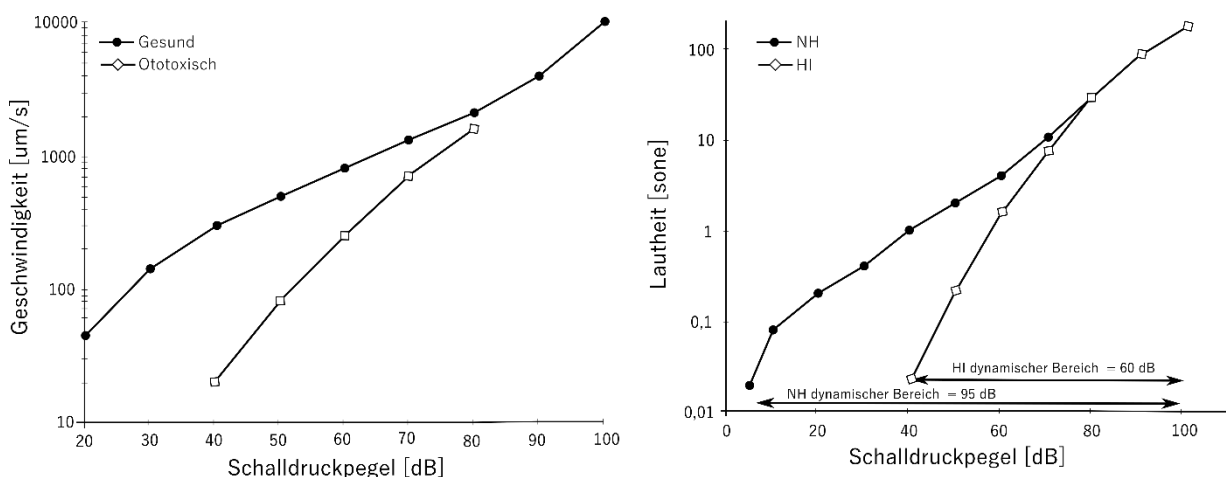


Abbildung 98: Links: Basilarmembran-Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel (Ruggero & Rich, 1991; nach Lentz 2020) Rechts: Lautheitsfunktion für Normalhörende und Hörgeschädigte (Lentz 2020)

Lentz (2020) spricht hierbei von der erkennbaren Ähnlichkeit dieser beiden Messgrößen, die darauf schließen lässt, dass die Vibration der Basilarmembran einen wesentlichen Beitrag zur Lautheitswahrnehmung leistet. Somit sind Töne, die mehr Vibrationen auf der Basilarmembran auslösen, lauter als Töne die weniger Vibrationen auslösen.

Es ist deutlich erkennbar, dass es eine Korrelation zwischen der Geschwindigkeit der Basilarmembran und der letztendlich wahrgenommenen Lautheit geben muss. Zusätzlich gilt dies sowohl für normalhörende NH als auch für hörgeschädigte HI Personen, die einen deutlich kleineren Hörbereich ausweisen als normalhörende Personen.

Somit stellt die Vibration der Basilarmembran und die dazugehörige wahrgenommene Lautheit potentiell einen nützlichen Wirkungsindikator dar; jedoch handelt es sich bei den oben gezeigten Darstellungen ebenfalls um die Betrachtung von einzelnen Reintönen, welche keiner realen Bewertungssituation entsprechen. Aus diesem Grund wird vorerst die weitere Verarbeitung des Schalls ausgehend vom Innenohr betrachtet, damit keine Bewertungsmöglichkeit ausgeschlossen wird. Ausgehend von den Haarzellen findet der Transduktionsprozess des akustischen Signals statt, welcher zum Austausch von Ionen und der Freisetzung von Glutamat an den Synapsen führt. (Moser & Zenner, 2019b) Die Nutzung dieses Prozesses als Wirkungsindikator kann ähnlich wie bei den vorherigen Wirkungsindikatoren ausgeschlossen werden, da eine Bestimmung der elektrischen Potentiale im menschlichen Innenohr in Abhängigkeit von bestimmten Schallereignissen als nicht realisierbar gewertet wird.

Am Ende der Ursache-Wirkungs-Kette stehen die beschriebenen physiologischen Reaktionen des Körpers. Hierbei handelt es sich um die Veränderung der Herzfrequenz sowie die Herzfrequenz-Variabilität, die Atemfrequenz, den Hautleitwert, den Blutdruck und den Muskeltonus. Die Problematik bei Messungen der Veränderung dieser physiologischen Parameter besteht jedoch darin, dass die Daten nur sehr schwer von anderen Einflüssen bereinigt werden können. Neben der akustischen Umgebung können andere Stressoren ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Veränderung dieser Messgrößen nehmen. Somit bieten sich ebenfalls die physiologischen Endreaktionen des Körpers nicht als einheitlicher Wirkungsindikator zur Beurteilung der akustischen Umgebung an.

Aus der vorherigen Beschreibung des Weges des Schalls durch das menschliche Ohr und den daraus folgenden Reaktionen kann geschlossen werden, dass eine Herleitung eines physiologischen Wirkungsindikators nicht analog zu den drei bereits betrachteten Wirkungskategorien erfolgen kann und die akustischen Auswirkungen auf andere Weise beurteilt werden müssen. Bislang steht lediglich der Schalldruck am Trommelfell, der als oberer Grenzwert für eine Schallbelastung definiert werden kann und die Geschwindigkeit der Basilarmembran-Bewegung zur Verfügung. Der Schalldruckpegel am Trommelfell gibt jedoch nicht ausreichend Aufschluss über die Auswirkungen, die real in Innenräumen auftreten, da solch hohe Schalldruckpegel nicht dem entsprechen, was üblicherweise in Innenräumen auftritt. Die Betrachtung der Basilarmembran scheint dagegen eher geeignet zu sein, um die Auswirkungen bewerten zu können. Die Problematik hierbei ist jedoch die große Dynamik, die eine Schallsituation mit sich bringt. Berechnungen der Geschwindigkeit der Basilarmembran sind lediglich möglich für Töne mit einer bestimmten Frequenz (Frequenzband) und einem bestimmten Schalldruckpegel; auch diese Gegebenheiten entsprechen nicht den realen Bedingungen, die in Innenräumen aufzufinden sind. Zudem

wird für diese Berechnung jedes Ohr einzeln betrachtet. Sind jedoch beide Ohren in den Prozess des Hörens involviert, ist die alleinige Betrachtung einer Basilmembran nicht zielführend.

Für das weitere Vorgehen wird deswegen zuerst betrachtet, welcher Zustand anzustreben ist, damit der Mensch sich in einer neutralen akustischen Umgebung befindet, analog zu den neutralen Wirkungszonen der bereits beschriebenen Wirkungskategorien. Aus physiologischer Sicht ist Schall eine wahrnehmbare Veränderung in der menschlichen Umgebung, die eine Reihe von unbewussten Reaktionen hervorrufen kann, welche die Homöostase, also den neutralen Zustand aus seinem Gleichgewicht bringen kann. (Erfanian et al. 2019) Park (2018) hat aufbauend auf dem Stressmodell von Bell et al. (1990) das Modell zur Darstellung der Homöostase innerhalb einer akustisch wahrnehmbaren Umgebung aufgestellt. Das Modell berücksichtigt als Eingangsfaktoren sowohl akustische wie auch nicht akustische Faktoren. Das Modell wird ausgehend von Park (2018) für die konkrete Anwendung in dieser Arbeit wie folgt beschrieben. Bei den akustischen Faktoren handelt es sich um objektiv messbare Größen, die einen Einfluss auf den entstehenden Schall haben. Für die Anwendung in dieser Arbeit wird den akustischen Faktoren somit der Schalldruckpegel und die Frequenz eines Schallereignisses zugeordnet. Den nicht-akustischen Faktoren werden sämtliche personenbezogene Größen zugeordnet; dies kann beispielsweise der Hörverlust im Alter sein. Diese beiden Parameterkategorien führen dazu, dass der Schall in der Cochlea verarbeitet und an das Hörzentrum weitergeleitet wird; an dieser Stelle kommt es zu der Wahrnehmung des Schalls (oder Geräuschs). Es erfolgt entweder eine bewusste oder unbewusste Bewertung des wahrgenommenen Schalls. Zumeist ist diese Bewertung unbewusst, wenn das gehörte Geräusch den Menschen nicht stört. Jedoch gibt es auch die bewusste positive Bewertung des Gehörten. Sowohl die positive als auch die unbewusste Wahrnehmung führen zum Zustand der Homöostase, welcher als der neutrale akustische Zustand bezeichnet werden kann. Wird dagegen ein Geräusch als störend bewertet, dann erfolgt die Bewertung bewusst und löst eine emotionale Reaktion aus, die wiederum zu physiologischen Veränderungen im menschlichen Körper führt. Konkret bedeutet dies, dass bis hierhin zwischen zwei Wirkungszonen unterschieden werden muss, der neutralen Zone und der Zone der emotionalen und physiologischen Reaktionen.

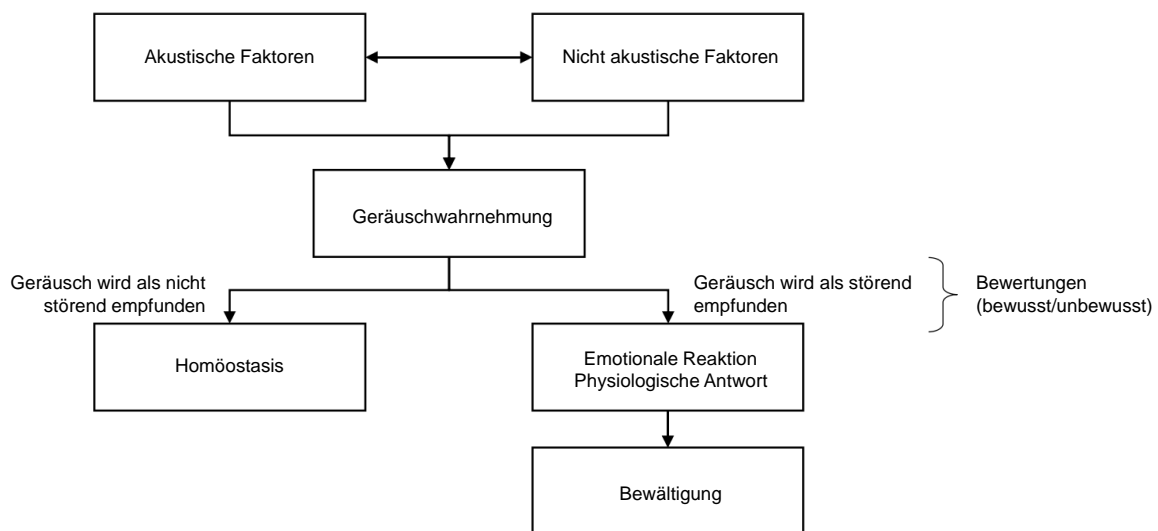


Abbildung 99: Schall als Stressor für den Menschen (Park, 2018 eigene Ergänzungen)

Um diese Einteilung der Wirkungszonen objektiv bewerten zu können, wird jedoch ein konkreter Berechnungswert benötigt. Aus den beschriebenen Grundlagen bietet sich hierfür die Lautheit an. Zwar handelt es sich hierbei im Gegensatz zu den vorherigen Wirkungsindikatoren nicht direkt um eine physiologische Größe im menschlichen Körper, jedoch scheint es nach der Darstellung von Lentz (2020) als würde diese Größe das widerspiegeln, was im Körper vor der bewussten oder unbewussten Schallwahrnehmung passiert. Dazu kommt, dass die wahrgenommene Lautheit sich in Abhängigkeit von der Hörfunktion des individuellen Menschen verändert. Diese Tatsache liefert ein zusätzliches Argument zur Unterstützung der Aussage, dass sich die Lautheit dazu eignet, die physiologischen Vorgänge im menschlichen Ohr abzubilden.

Die alleinige Bestimmung der Lautheit von reinen Tönen für bestimmte Schalldruckpegel und Frequenzen für unterschiedliche Hörvermögen reicht nicht, um den Zustand der Homöostase für jeden Menschen in einer akustischen Umgebung festlegen zu können, und basierend darauf mögliche Wirkungszonen festzulegen. Aus diesem Grund muss auf die kategoriale Lautheitsskalierung zurückgegriffen werden. Während die Lautheitsskalierung nach der DIN ISO 16832 (2007) auf elf Abstufungen von *nicht gehört* bis *extrem laut* besteht, bezieht sich die neun-stufige Skalierung nach Hawkins et al. (1987) auf den Komfort und bietet Auswahlmöglichkeiten von *sehr sanft* bis *schmerzend laut*. Im Gegensatz zu der normierten Skalierung fehlen bislang bei der Komfortbewertung die konkreten Zahlenwerte für die kategoriale Einheit CU (*categorical unit*), die den einzelnen Bewertungen entsprechen.

Tabelle 6: Kategoriale Lautheitsskalierung nach der DIN ISO 16832 (2007) und nach Hawkins et al. (1987)

DIN ISO 16832 (2007)	Numerische Skala	Hawkins et al. (1987)
Extrem laut	50	Schmerzend laut
Sehr laut	45	Extrem unkomfortabel
----	40	----
Laut	35	Unkomfortabel laut
----	30	----
Mittel	25	Laut aber in Ordnung
----	20	Komfortabel
Leise	15	Komfortabel aber leicht sanft
----	10	Sanft
Sehr leise	5	Sehr sanft
Nicht gehört	0	----

Die grau hinterlegten Spalten der Tabelle 6 sind der DIN ISO 16832 (2007) zu entnehmen. Die kategorialen Bezeichnungen lassen sich ebenso in Hawkins et al. (1987) finden. Für die Anwendung in der Auswirkungsbewertung müssen diese verbalen Bewertungen jedoch numerischen Werten zugeordnet werden. Es ist anzunehmen, dass die Kategorien extrem laut und schmerzend laut sowie sehr laut und

extrem unkomfortabel gleichzusetzen sind. Für die weitere Einteilung wird angenommen, dass Geräusche, die als laut beschrieben werden, bei einer Bewertung der Wahrnehmung als unkomfortabel laut beschrieben werden und Töne, die mittellaut sind, als laut aber in Ordnung zu bewerten sind. Um letztendlich den komfortablen Bereich, welcher dem Zustand der Homöostase gleichzusetzen ist, zu definieren, werden die Kategorien ausgehend von dem kleinsten numerischen Wert betrachtet. Die unterste normierte Kategorie *nicht gehört*, gibt es bei der Einteilung nach Hawkins et al. (1987) nicht, somit ist die Kategorie sehr leise, der Bewertung sehr sanft zuzuordnen. Oberhalb dieser liegt die Bewertung sanft, gefolgt von komfortabel aber leicht sanft. Somit verbleibt der Bereich zwischen komfortabel aber leicht sanft und komfortabel als der neutrale Bereich. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die kategoriale Lautheitsskalierung für gewöhnlich als Hörtest oder zur Anpassung von Hörgeräten verwendet wird; aus diesem Grund macht es Sinn, die Kategorien anwendungsbezogen weiter anzupassen.

In einer Bewertungssituation in Innenräumen, in der es darum geht, die Gesamtwirkung der akustischen Umgebung zu bewerten, werden die drei Kategorien unterhalb der komfortablen Kategorie nicht weiter benötigt, da in diesen Kategorien die Lautheit so gering sein wird, dass der Mensch nicht in seinem Zustand der Homöostase gestört wird. Nach oben hin werden die Kategorien so angepasst, dass es keine Zwischenbereiche mehr gibt und insgesamt nur noch vier numerische Bereiche, welche der Abstufung der Wirkungszonen entsprechen und sich somit in die neutrale Zone, die unbewusste oder bewusste Wahrnehmungszone, die komfortrelevante und die gesundheitsgefährdende Zone aufgliedern lassen. An dieser Stelle gibt es einen weiteren Unterschied zwischen der Auswirkungsbewertung der akustischen Umgebung im Vergleich zu den vorherigen Wirkungskategorien. Die Zone der unbewussten Wahrnehmung wird durch die bewusste Wahrnehmung ergänzt. Diese bewusste Wahrnehmung stört den Menschen jedoch nicht in seinem Komfort.

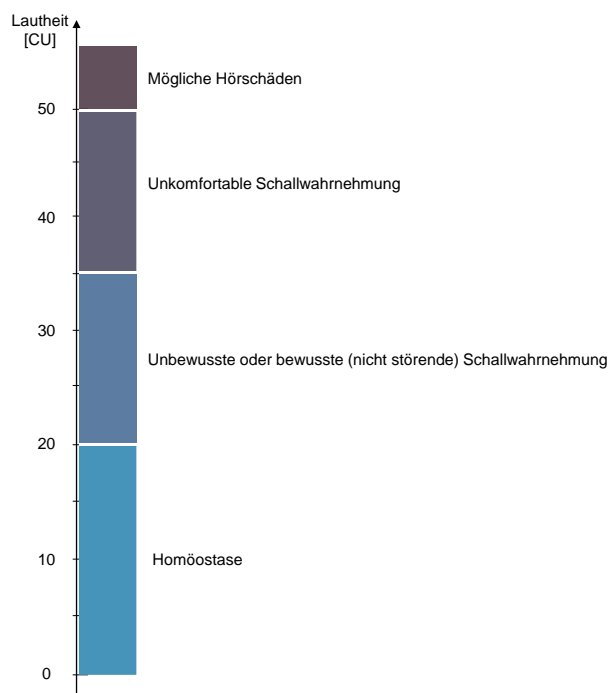


Abbildung 100: Wirkungszonen der akustischen Umgebung tagsüber

Für die Beurteilung einer akustischen Umgebung spielt neben der Bewertung des Schalldruckpegels und der Frequenz, welche die Elementarströme dieser Wirkungskategorie repräsentieren, auch der Umgebungsparameter Tageszeit eine entscheidende Rolle. Während Geräusche tagsüber in der neutralen Wirkungszone liegen, können diese, insbesondere, wenn der Schlaf gestört wird, in der Wirkungszone der komfortrelevanten Auswirkungen liegen. Aus dieser Auswirkung resultieren weitere sekundäre und möglicherweise tertiäre Auswirkungen, sodass durch die Störung des Schlafs gesundheitliche Folgen entstehen können. Diese weiteren Auswirkungen sind nicht Bestandteil dieser Methode, jedoch können sie vermieden werden, wenn die Wirkungszone für die nächtliche Bewertung der akustischen Umgebung entsprechend angepasst werden.

Die Wirkungszone der gesundheitsgefährdenden Auswirkungen bleibt identisch, da es sich hier lediglich um die gesundheitlichen Folgen für das Gehör des Menschen handelt, nicht jedoch um gesundheitliche Folgen, die aus einem gestörten Schlaf resultieren. Die anderen Wirkungszone müssen jedoch entsprechend der Empfindlichkeit des Menschen beim Schlafen angepasst werden. Somit wird die neutrale Wirkungszone auf den Bereich von 0 CU bis 5 CU reduziert und beinhaltet lediglich Geräusche, die kaum hörbar sind. Die Wirkungszone der unbewussten und bewussten Wahrnehmung wird auf den Bereich 5 CU bis 15 CU verschoben. Die 15 CU entsprechen den 35 dB, die nach Caddick et al. (2018) als Grenzwert gelten. Unterhalb von 35 dB können Geräusche gegebenenfalls vom Menschen wahrnehmbar sein, sind jedoch sanft genug, dass der Schlaf nicht zwangsläufig gestört wird. Oberhalb von 35 dB wird, insbesondere bei intermittierenden Geräuschen (Flugzeuge, Züge, Nachtverkehr, Glocken läuten), die Schlafqualität und -quantität reduziert. Die Wirkungszone der komfortrelevanten Veränderungen vergrößert sich auf den Bereich von 15 CU bis 50 CU. Innerhalb dieser Wirkungszone würde der Mensch die Geräusche wahrnehmen und sich zwangsläufig in seinem Komfort beeinflusst fühlen.

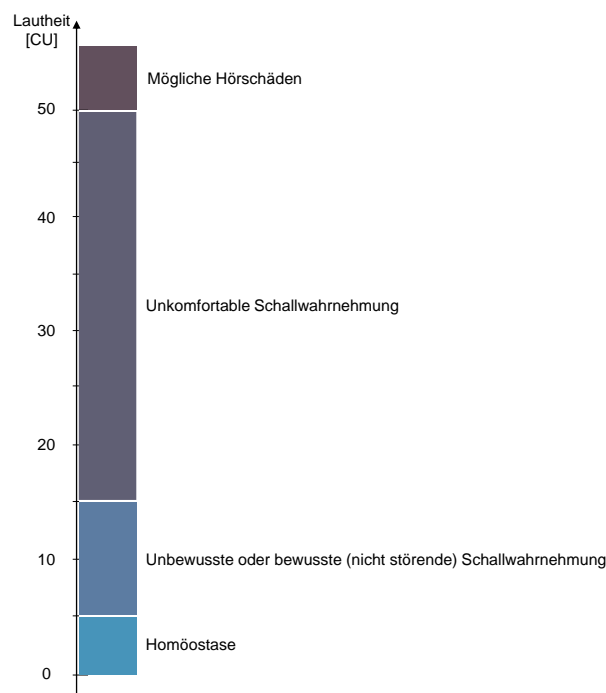


Abbildung 101: Wirkungszone der akustischen Umgebung nachts

Die Abbildungen 102 bis 105 stellen die grafische Einteilung der Wirkungszonen tagsüber in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Schalldruckpegel dar. Hierbei wird jedoch nur der Bereich bis zu 8 kHz abgebildet.

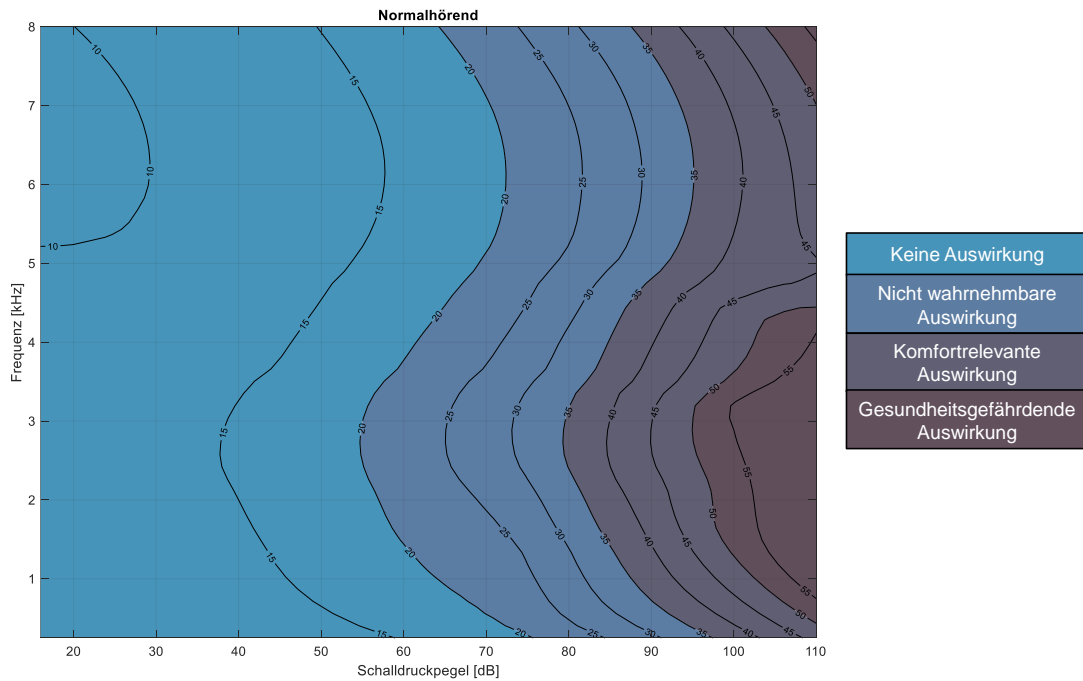


Abbildung 102: Lautheit [CU] tagsüber in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel [dB] und der Frequenz [kHz] (Weiterverarbeitete Rohdaten nach Rasetshwane et al., 2015)

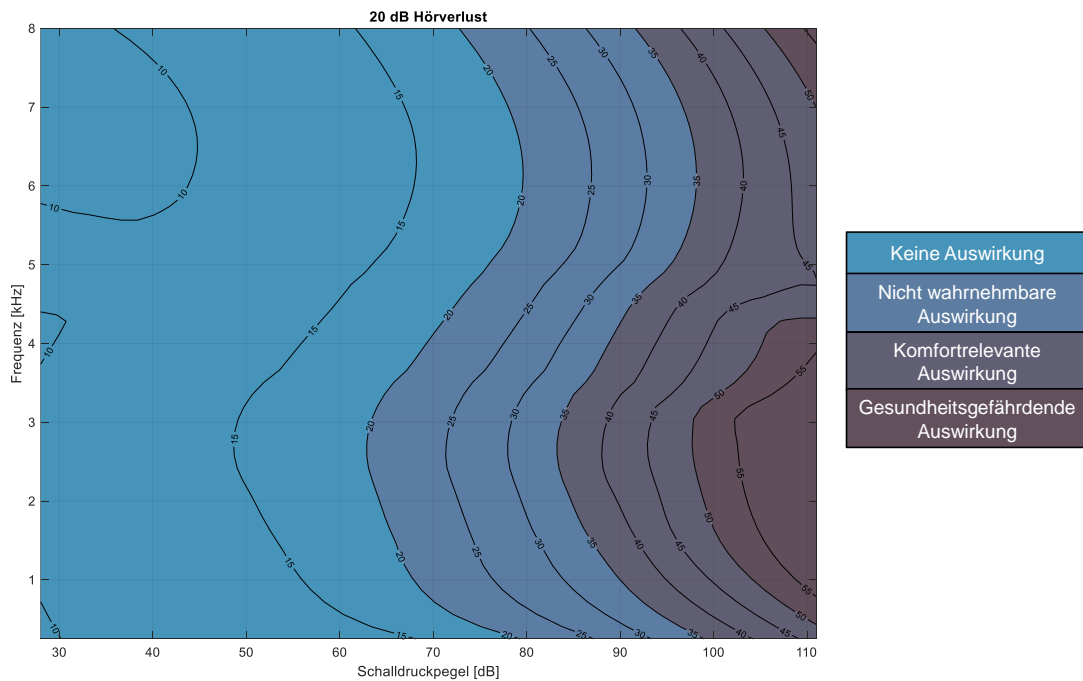


Abbildung 103: Lautheit [CU] tagsüber in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel [dB] und der Frequenz [kHz] für Personen mit einem Hörverlust von 20 dB (Weiterverarbeitete Rohdaten nach Rasetshwane et al., 2015)

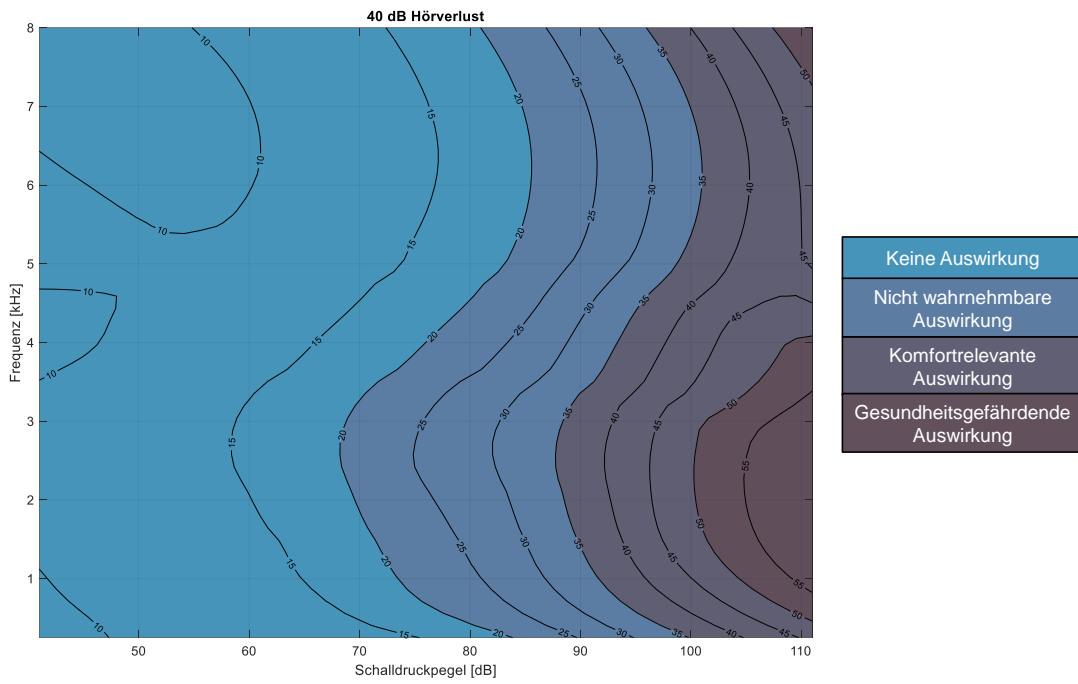


Abbildung 104: Lautheit [CU] tagsüber in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel [dB] und der Frequenz [kHz] für Personen mit einem Hörverlust von 40 dB (Weiterverarbeitete Rohdaten nach Rasetshwane et al., 2015)

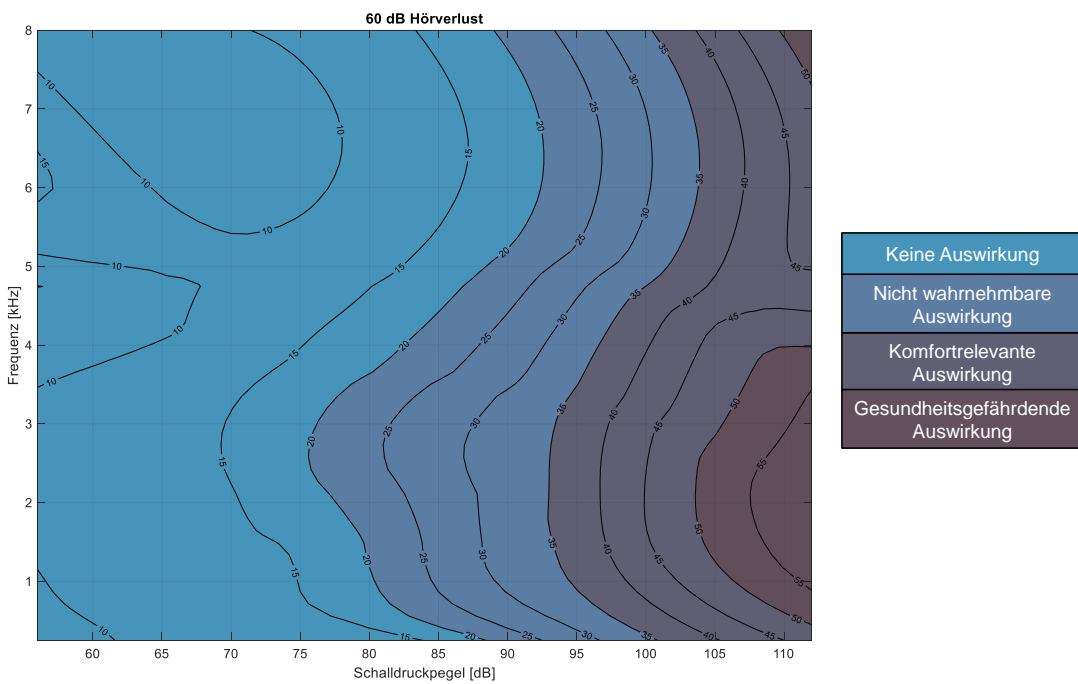


Abbildung 105: Lautheit [CU] tagsüber in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel [dB] und der Frequenz [kHz] für Personen mit einem Hörverlust von 60 dB (Weiterverarbeitete Rohdaten nach Rasetshwane et al., 2015)

5.5.3 Herleitung des akustischen Wirkungsmechanismus

Um ausgehend von einer akustischen Umgebung die zugehörige Lautheit in CU zu bestimmen, gilt es zwei Punkte zu beachten. Zum einen, da die Lautheit aus der Bewegung der Basilarmembran resultiert, würde sich diese im Prinzip in einer alltäglichen akustischen Umgebung zu jedem Moment ändern und keine stationäre Betrachtung zulassen.

Um den Grundsatz der stationären Betrachtung beizubehalten, wird demnach für die Bewertung der akustischen Umgebung die Gesamtlautheit berücksichtigt. Diese kann theoretisch auf einen endlos langen Zeitraum ausgedehnt werden. Sinnvoller wäre es jedoch, diese auf eine begrenzte Zeitperiode festzulegen, beispielsweise für jede Stunde zu bestimmen.

Der zweite zu beachtende Punkt ist, dass zumindest ein Mensch mit einem gesunden Gehör seine Umgebung mit beiden Ohren wahrnimmt. Das bedeutet, dass die Lautheit sich nicht nur aus der Bewegung einer Basilarmembran ergibt, sondern aus den Membranen in beiden Ohren. Um somit in einer bestimmten akustischen Umgebung die Lautheit zuerst in Sone und anschließend in CU bestimmen zu können, wird ein Modell benötigt, mit welchem sich die wahrgenommene binaurale Lautheit bestimmen lässt. Aufgrund der Berücksichtigung des physiologischen Hintergrundes wurde das Modell nach Moore et al. (2016) gewählt. Hiermit lässt sich in einer definierten Umgebung in Abhängigkeit vom Schalldruckpegel sowie der Frequenz die vorhandene Gesamtlautheit errechnen. Diese lässt sich wiederum durch Anwendung der Gleichung 90 in CU umwandeln und kann somit, unter Berücksichtigung des Bewertungszeitpunkts, den beschriebenen Wirkungszonen zugeordnet werden. Diese Zuordnung gilt jedoch ausschließlich für Personen mit einem gesunden Gehör.

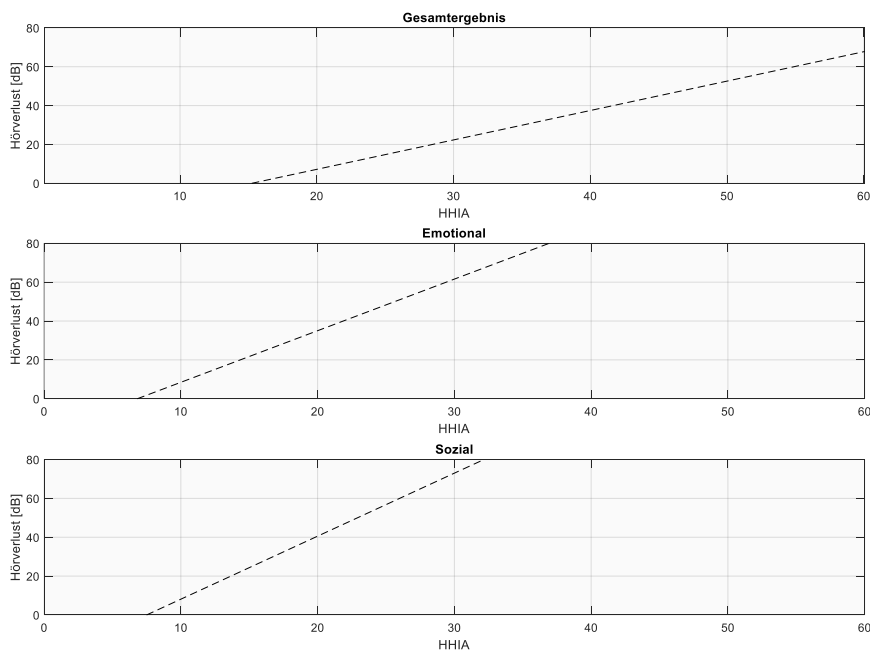


Abbildung 106: Regressionsfunktion zur Darstellung der Korrelation zwischen dem audiometrisch gemessenen Hörverlust und den Ergebnissen des HHIA (nach Newman et al., 1990)

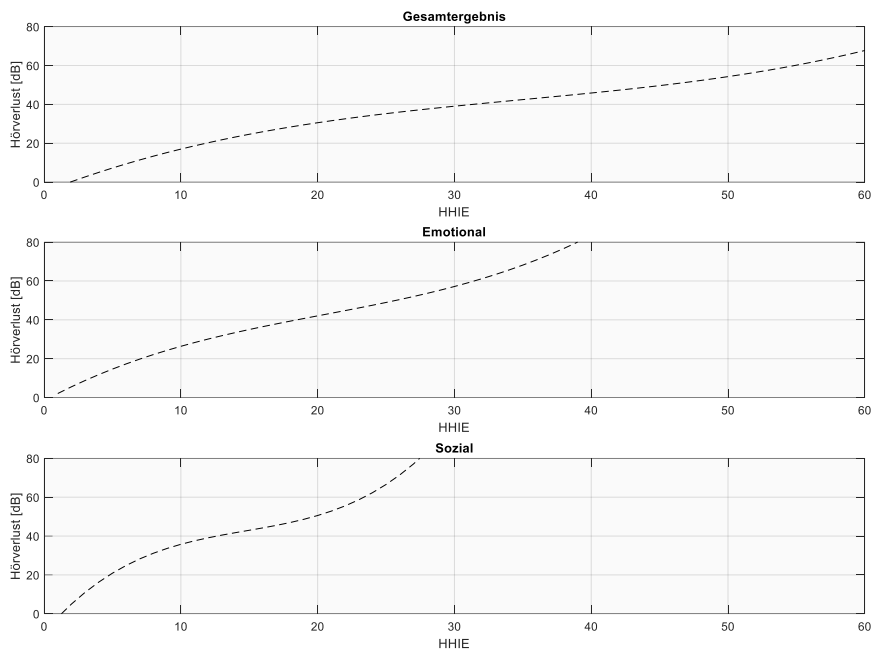


Abbildung 107: Regressionsfunktion zur Darstellung Korrelation zwischen dem audiometrisch gemessenen Hörverlust und den Ergebnissen des HHIE (nach Weinstein & Ventry, 1983)

$$Gesamtergebnis = 1.514 * HHIA - 23.1 \text{ [dB Hörverlust]} \tag{91}$$

$$Emotional = 2.657 * HHIA - 18.12 \text{ [dB Hörverlust]} \tag{92}$$

$$Sozial = 3.244 * HHIA - 24.33 \text{ [dB Hörverlust]} \tag{93}$$

$$Gesamtergebnis = 0.0005597 * HHIE^3 - 0.05894 * HHIE^2 + 2.734 * HHIE - 5.028 \text{ [dB Hörverlust]} \tag{94}$$

$$Emotional = 0.001958 * HHIE^3 - 0.1203 * HHIE^2 + 3.806 * HHIE - 1.611 \text{ [dB Hörverlust]} \tag{95}$$

$$Sozial = 0.01067 * HHIE^3 - 0.4727 * HHIE^2 + 8.194 * HHIE - 9.584 \text{ [dB Hörverlust]} \tag{96}$$

Um einen möglicherweise vorliegenden Hörverlust festzustellen, wird in Abhängigkeit vom Alter der betrachteten Person entweder der HHIA oder der HHIE Fragebogen verwendet und entsprechend der Regressionsgleichungen 91 bis 96, dargestellt in Abbildung 106 und in Abbildung 107, bewertet.

Mithilfe der dargestellten Zusammenhänge kann aus dem Ergebnis des Fragebogens der mutmaßliche Hörverlust quantitativ berechnet werden. Dabei gilt es, die drei Bereiche Gesamtergebnis, Ergebnis der emotionalen Kategorie und Ergebnis der sozialen Kategorie getrennt zu betrachten. Die einzelnen Ergebnisse werden den in Tabelle 7 dargestellten übergeordneten Hörverlustkategorien zugeordnet. Liegen alle drei Ergebnisse in der gleichen Kategorie, ist die Zuordnung eindeutig. Liegen jedoch nur zwei der drei Ergebnisse in der gleichen Kategorie wird angenommen, dass die Mehrheit überwiegt und dementsprechend diese Hörverlustkategorie gewählt wird. Im unwahrscheinlichen Fall, dass die drei Ergebnisse in drei unterschiedlichen Kategorien liegen, ist die mittlere der drei berechneten Kategorien die entscheidende für die Zuordnung. Diese grobe Zuordnung zu den Hörverlustgruppen wird letztendlich dadurch gerechtfertigt, dass die Originaldaten, auf welche sich diese Zuordnung stützt, sehr große Spannweiten abdecken und sich teilweise überschneiden, weswegen auch bei den Originaldaten eine eindeutige Abgrenzung der Bereiche nicht möglich ist.

Tabelle 7: Zuordnung des berechneten Hörverlustes zur Hörverlustkategorie

Berechneter Hörverlust [dB]	Hörverlustkategorie
< 10	0 dB
11 - 30	20 dB
31 - 50	40 dB
> 51	60 dB

Einen direkten Zusammenhang zwischen dem Hörverlust und der im Verhältnis zu Normalhörenden entstehenden Lautheit in *Categorical Units* gibt es nicht. Deswegen muss hier auf die Daten nach Rasetshwane et al. (2015) zurückgegriffen werden und diese entsprechend verarbeitet werden, um diesen Zusammenhang abbilden zu können. Das gemittelte Ergebnis über die Frequenzbereiche 0.25 kHz bis 8 kHz ist in Abbildung 108 dargestellt. Weitere Frequenzbereiche, die darüber hinausgehen, können derzeit nicht detailliert berücksichtigt werden. Die Darstellung der Anpassung der Lautheit [CU] kann dennoch als vollständig für den kompletten Frequenzbereich des menschlichen Hörens erachtet werden, da es sich hierbei lediglich um eine Abminderung der berechneten Lautheit [CU] handelt und hierfür keine exakten Zahlenwerte verwendet werden, sondern lediglich die Wirkungszonen bestimmt werden soll, die sich über weite Lautheitsbereiche erstrecken. Nach Chalupper (2008) lässt sich der Zusammenhang zwischen der Lautheit [CU] und dem frequenz-unbewerteten Schalldruckpegel darstellen, denn der Schalldruckpegel hat im Vergleich zur Frequenz den deutlich größeren Einfluss auf die Lautheit [CU].

Abbildung 108 ermöglicht die Bestimmung der Lautheit für jede Hörverlustkategorie ausgehend von der für Normalhörende berechneten Lautheit. Zusätzlich kann hier der unbewertete Schalldruckpegel berücksichtigt werden. Dieser wird aber nicht zwangsläufig benötigt, da der Schalldruckpegel bereits in die Berechnung der Lautheit einfließt.

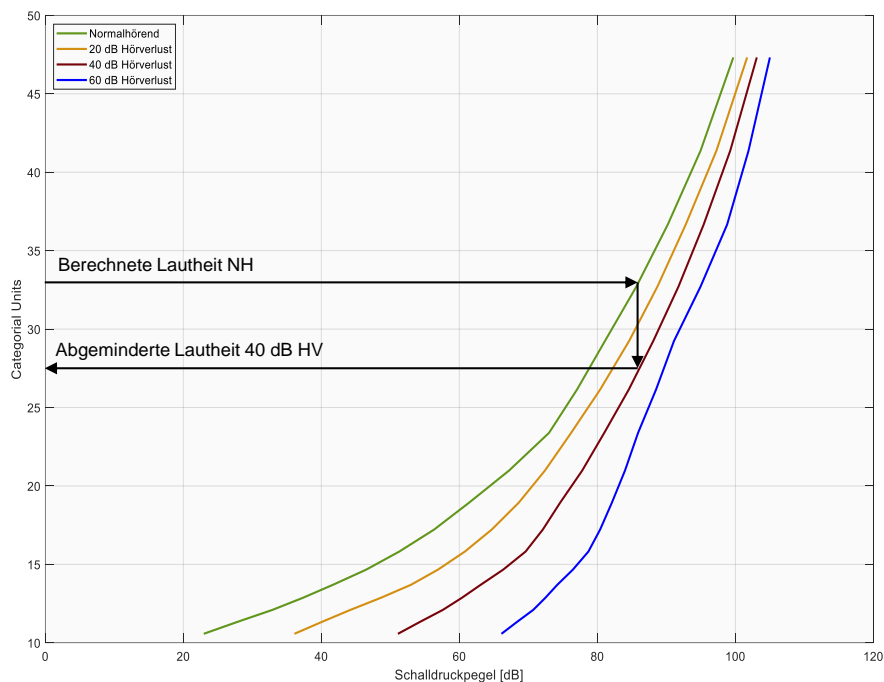


Abbildung 108: Zusammenhang zwischen der Lautheit [CU] für Normalhörende und der Lautheit [CU] der Hörverlustkategorien 20 dB, 40 dB und 60 dB

Eine Differenzierung der betrachteten Personen hinsichtlich ihrer Lärmsensitivität nach Weinstein (1978) wäre ebenfalls möglich gewesen, jedoch haben Ellermeier, Eigenstetter und Zimmer (2001) nachweisen können, dass es keine Korrelation zwischen psychoakustischen Messgrößen und der Lärmsensitivität gibt. Sie kamen zu dem Schluss, dass die selbstbewertete Lärmsensitivität viel eher die individuelle Bewertung des Gehörten darstellt, als die sensorischen Prozesse des Hörens.

Für die Berechnung der Lautheit wird letztendlich ein Mikrofon benötigt, welches sich an der ungefähren Position des menschlichen Kopfes befindet. Anhand dieser Messdaten und dem genannten Algorithmus kann die Lautheit in Sone bestimmt werden. Dieser Wert kann nach anschließender Umwandlung in *Categorical Units* als Wirkungsindikator für die Bewertung der Auswirkungen von akustischen Umgebungen verwendet werden.

5.5.4 Anwendung des akustischen Wirkungsmechanismus

Der Wirkungsindikator sowie der Wirkungsmechanismus der akustischen Umgebung unterscheiden sich an mehreren Stellen von den übrigen Wirkungsindikatoren, so auch in der Anwendung. Als Input-Parameter werden lediglich die Frequenz und der Schalldruckpegel benötigt. Werden diese gemessen, muss der Ersteller der Bilanz bereits entscheiden, für welchen Zeitrahmen er diese bestimmen will, da sich die Gesamtlautheit ebenfalls auf diesen Zeitraum bezieht. So würde beispielsweise eine stündliche Bestimmung der Gesamtlautheit sinnvoll erscheinen. Diese kann den akustischen Eindruck einer Umgebung sinnvoll abbilden. Unter bestimmten Bedingungen kann es jedoch passieren, dass nicht die Gesamtlautheit ausschlaggebend ist, sondern vielmehr ein kurzfristiges akustisches Signal, das die durchschnittliche Lautheit derart überschreitet, dass dieses dafür sorgen kann, dass der Mensch sich nicht

mehr im Zustand der Homöostase befindet. Da bei der Anwendung des Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Gesamtlautheit nach Moore et al. (2016) sowohl die langfristige Gesamtlautheit als auch die kurzfristige Lautheit bestimmt wird, ist es sinnvoll, diese beiden Parameter zu überprüfen. Zusätzlich kann somit die maximale kurzfristige Lautheit bestimmt werden. Weicht diese deutlich von der langfristigen Gesamtlautheit ab, wird diese Größe als Grundlage zur Bewertung herangezogen. Die Entscheidung, ob der Anwender der raumphysiologischen Bilanz ausschließlich die Gesamtlautheit berücksichtigen will oder sich auf die maximale kurzfristige Lautheit beziehen will, liegt beim Anwender selber und muss in der Beschreibung des Untersuchungsrahmens erfasst werden. Die Nutzung der maximalen kurzfristigen Lautheit erscheint ausschließlich sinnvoll in akustischen Umgebungen, in denen es Schallereignisse gibt, welche von der gewöhnlichen monotonen Umgebung abweichen. In diesem Fall bewertet der Mensch die Lautheit nach dem Geräusch, das er als am lautesten empfindet und damit als störend einordnet.

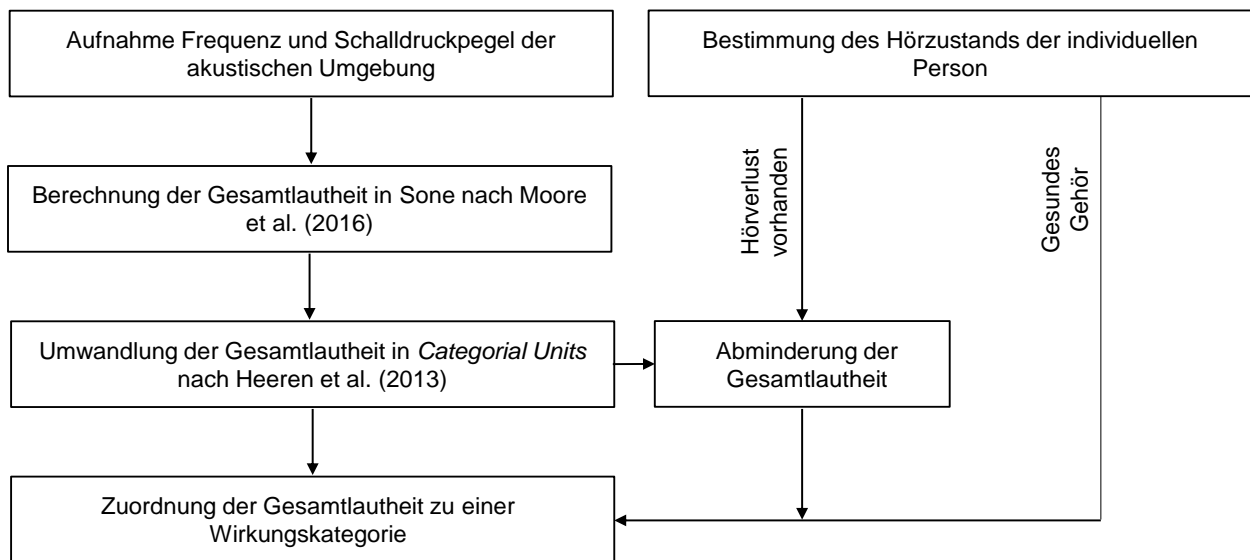


Abbildung 109: Algorithmus des akustischen Wirkungsmechanismus

Der Ablauf zur Bestimmung der Auswirkung einer akustischen Umgebung ist in Abbildung 109 dargestellt. Somit werden sowohl die Frequenz und der Schalldruckpegel aufgenommen, um anschließend die Gesamtlautheit zu bestimmen. Die Gesamtlautheit in Sone kann in die Lautheit in *Categorical Units* umgewandelt werden. Für Personen mit einem gesunden Gehör kann diese Gesamtlautheit bereits als Wirkungsindikator dienen und einer Wirkungskategorie zugeordnet werden. Falls es sich um eine Person mit einem geschwächten Gehör handelt, muss die Gesamtlautheit unter Nutzung von Abbildung 108 entsprechend abgemindert werden. Zusätzlich zu diesen Schritten ist darauf zu achten, ob das Bewertungsschema für die Tages- oder die Nachtzeit gewählt wird, da sich in diesem Fall die Grenzen der Wirkungszonen unterscheiden. Das Ergebnis dieser Anwendung ist in den Abbildungen 110 und 111 in einem Zwei-Achsen-System für sämtliche Personen dargestellt, da die Differenzierung der Personen bereits bei der Bestimmung der Lautheit stattfindet. Auf der x-Achse ist die Lautheit in Sone eingetragen, auf der y-Achse die Lautheit in *Categorical Units*. Zusätzlich sind die Grenzen der Wirkungszonen in Abhängigkeit von der Lautheit in *Categorical Units* eingetragen. Wie bei den übrigen Wirkungsindikatoren

handelt es sich bei der Anwendung des akustischen Wirkungsindikators um eine stationäre Betrachtung der gegebenen Situation. Jedoch gilt auch in diesem Fall, dass das Verfahren beliebig oft hintereinander angewandt werden kann und somit mehrere unterschiedliche Situationen erfasst werden können, die eine ganzheitliche Bewertung ermöglichen. Für die Bestimmung der Lautheit nach Moore et al. (2016) kann auf die *The Auditory Modeling Toolbox* zurückgegriffen werden. Wie bei den vorherigen Wirkungskategorien erfolgt die weitere Bestimmung des Wirkungsindikators in einem *Matlab*-Skript.

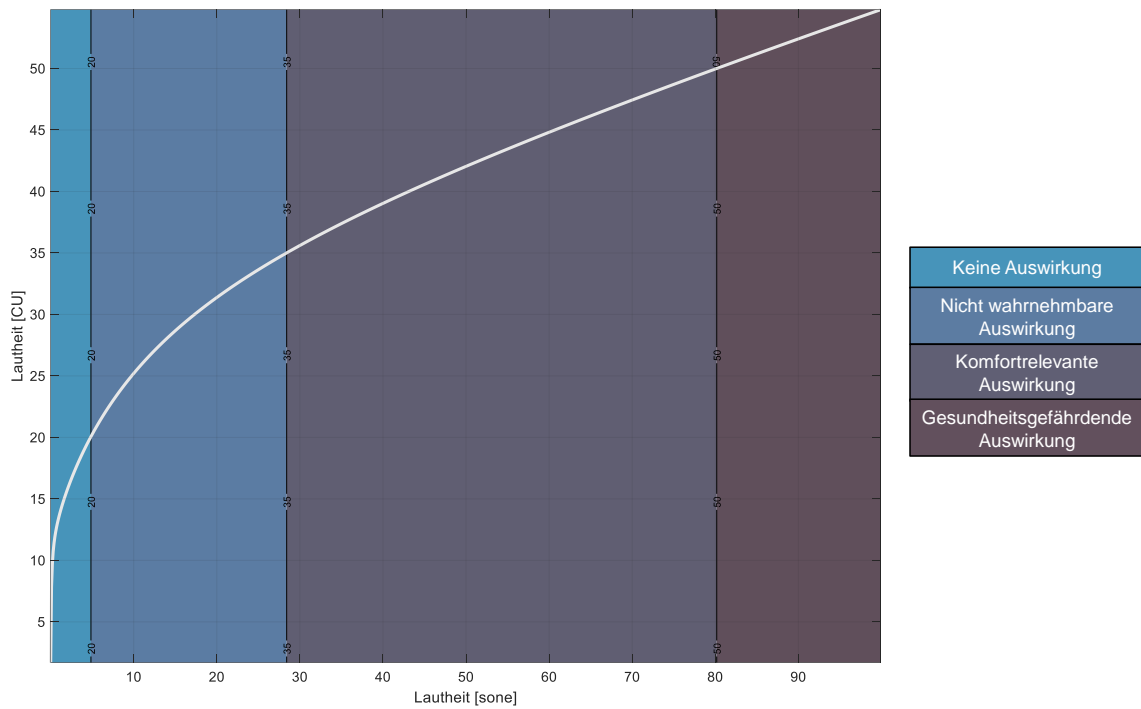


Abbildung 110: Anwendung des akustischen Wirkungsindikators für den Wachzustand

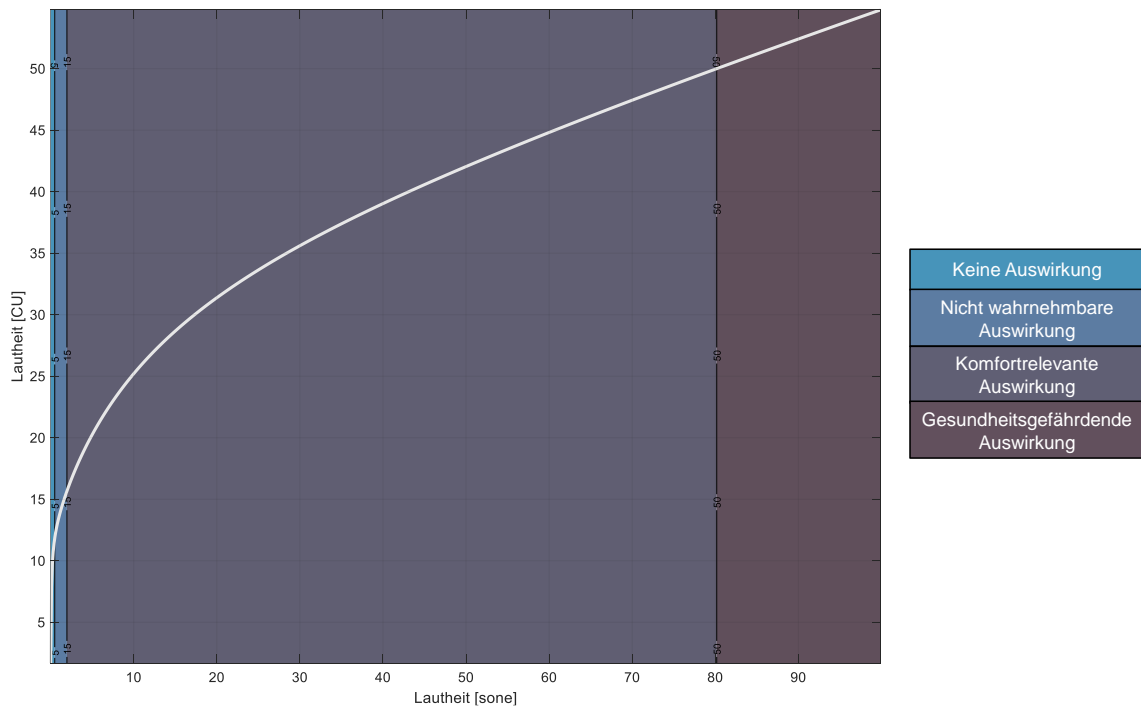


Abbildung 111: Anwendung des akustischen Wirkungsindikators für den schlafenden Zustand

5.6 Auswertung der Wirkungsabschätzung

Die Auswertung der Wirkungsabschätzung ist entscheidend für die Verwendbarkeit der Ergebnisse. In der Ökobilanzierung umfasst diese Auswertung mehrere Bestandteile, wozu die Sensitivitätsanalyse und -prüfung, die Fehlerabschätzung, die Vollständigkeitsprüfung, die Konsistenzprüfung und die Beurteilung gehören. Die Sensitivitätsanalyse beschreibt „ein systematisches Verfahren zur Einschätzung der Wirkungen der getroffenen Auswahl an Methoden und Daten auf die Ergebnisse der Studie.“ (DIN EN ISO 14040, 2021) Ein solch systematisches Vorgehen ist im Rahmen der raumphysiologischen Bilanz aufgrund einer fehlenden Datengrundlage nicht umsetzbar, da es zum jetzigen Zeitpunkt für jede Wirkungskategorie lediglich eine Methode für das Vorgehen gibt. Die Sensitivitätsprüfung, welche die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse überprüft, entfällt somit ebenfalls.

Bei der Fehlerabschätzung handelt es sich um ein „systematisches Verfahren zur Quantifizierung der Unsicherheit in den Ergebnissen der Sachbilanz aufgrund kumulativer Effekte der Ungenauigkeit des Modells von Input-Unsicherheiten und der Variabilität der Daten.“ (DIN EN ISO 14040, 2021) Auch hierfür gibt es in der raumphysiologischen Bilanz kein systematisches Vorgehen; dennoch sollten an dieser Stelle der Auswertung die Unsicherheiten der Ergebnisse aufgrund der Ungenauigkeit der Wirkungsmechanismen und der zugrundeliegenden geringen Datenbasis erwähnt werden. So sollte beispielsweise beschrieben werden, dass die Auswirkungen der visuellen Umgebung lediglich für bestimmte Alterskategorien, jedoch nicht für ein konkretes Alter bestimmt werden und es somit zu Abweichungen kommen kann. Eine Fehlerabschätzung in quantitativen Größen ist jedoch derzeit nicht umsetzbar.

Die Vollständigkeitsprüfung dient zur Überprüfung, ob die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung ausreichend sind, um in Übereinstimmung mit den Bestimmungen des Ziels und des Untersuchungsrahmens Schlussfolgerungen abzuleiten. (DIN EN ISO 14040, 2021) Die Vollständigkeitsprüfung kann somit ebenfalls Bestandteil der Auswertung der raumphysiologischen Bilanz sein. Fehlen möglicherweise Daten, um einen in der ersten Phase geforderten Wirkungsindikator zu bestimmen, würde die Vollständigkeit der Ergebnisse nicht gewährleistet werden.

Die Konsistenzprüfung überprüft, ob die Annahmen, Methoden und Daten im Verlauf der Studie einheitlich angewandt wurden. (DIN EN ISO 14040, 2021) Während es in der Ökobilanzierung definierte Verfahren gibt, die zur Konsistenzprüfung angewandt werden können, kann die Konsistenzprüfung in der raumphysiologischen Bilanz anhand der Überprüfung der Dokumentation der einzelnen Schritte, Daten und Annahmen durchgeführt werden.

Der letzte Bestandteil der Auswertung, die Beurteilung, wird nach der DIN EN ISO 14040 (2021) definiert als „Bestandteil in der Auswertungsphase, der dazu dient, Vertrauen in die Ergebnisse der Ökobilanz zu setzen.“ Hierfür gibt es kein konkretes Vorgehen. Die Beurteilung der Ergebnisse in der raumphysiologischen Bilanz bezieht sich somit auf die Darstellung der wesentlichen Ergebnisse der Studie, so dass diese für jede Person verständlich sind. Eine beispielhafte Beurteilung könnte damit wie folgt aussehen.

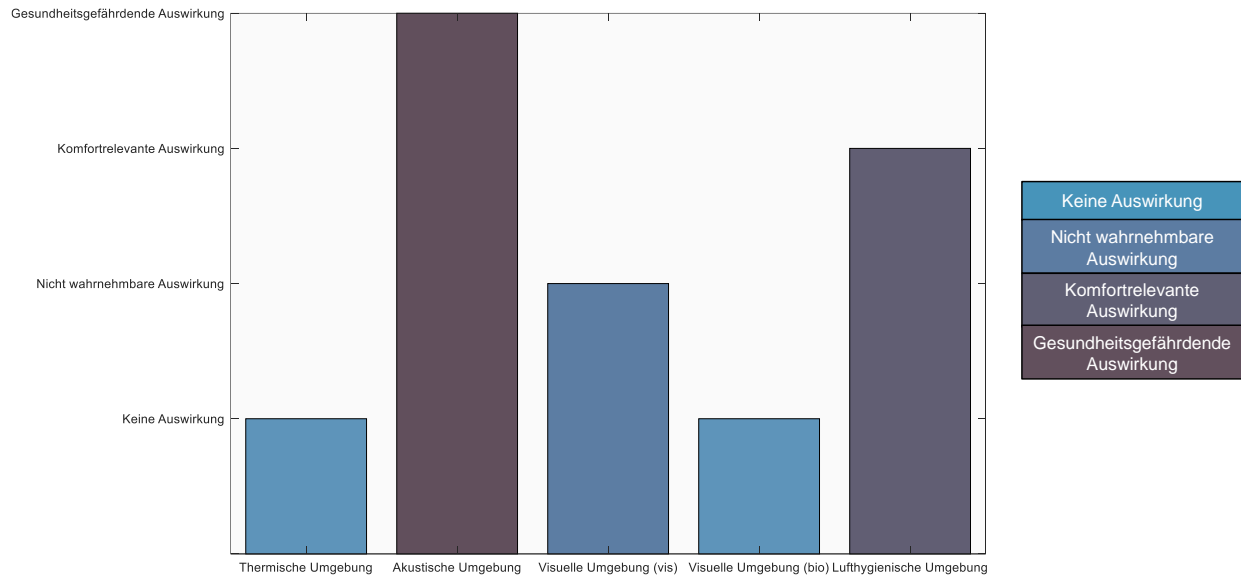


Abbildung 112: Beispielhafte Auswertung der Wirkungsabschätzung für einen einzelnen Bilanzierungszeitpunkt

Abbildung 112 zeigt eine beispielhafte Auswertung der Wirkungsabschätzung für eine einzelne Person, wenn lediglich ein einzelner, definierter Zeitpunkt bilanziert werden soll. Dargestellt ist die Schwere der fünf Wirkungsindikatoren, die im Rahmen der Wirkungsabschätzung ermittelt werden. Aus einer solchen Auswertung ist klar erkennbar, dass die akustische, aber auch die lufthygienische Umgebung dringend verbessert werden sollten.

Wird die Bilanz an mehreren Zeitpunkten innerhalb eines Tages durchgeführt, empfiehlt sich die Darstellung der Auswertung entsprechend der folgenden Abbildung 113. In diesem Fall wurde die Wirkungsabschätzung mit den entsprechenden Messdaten an zehn aufeinander folgenden Stunden eines Tages durchgeführt. Diese Stunden sind der x-Achse zu entnehmen. Auf der y-Achse befindet sich in diesem Fall nicht die Schwere der Auswirkung, sondern die jeweilige Wirkungskategorie. Die Schwere der jeweiligen Auswirkung ist in dieser Form der Darstellung lediglich anhand der Farbe erkennbar. Jedes Rechteck repräsentiert dabei die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die einzelne Wirkungskategorie zu einem definierten Zeitpunkt.

Aus dieser beispielhaften Auswertung ist erkennbar, dass insbesondere die Auswirkung der Luftqualität im Verlauf des Tages komfortrelevant oder sogar gesundheitsgefährdend ist. Sowohl die Auswirkungen der thermischen, der visuellen als auch der akustischen Umgebung liegen in einzelnen Stunden im komfortrelevanten Bereich. Die Wirkungsmechanismen wurden für diese beispielhafte Anwendung stationär angewandt und beschreiben somit den zu erwartenden physiologischen Zustand des Körpers in dem gegebenen Zeitraum. Summarische Effekte zwischen den Wirkungskategorien wurden dabei nicht berücksichtigt, da sich die einzelnen Wirkungsindikatoren unabhängig von anderen Wirkungskategorien bestimmen lassen.

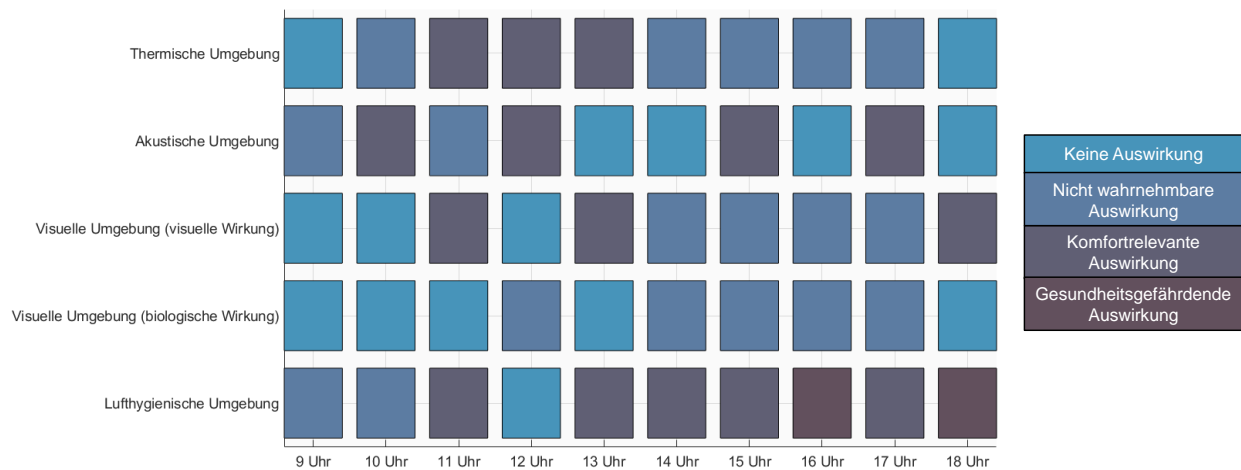


Abbildung 113: Beispielhafte Auswertung der Wirkungsabschätzung für mehrere Bilanzierungszeitpunkte innerhalb eines Tages

Wird die raumphysiologische Bilanzierung für ein gesamtes Gebäude erstellt, dann muss dennoch jeder Referenzraum (Definition S. 214) bei der Auswertung der Ergebnisse einzeln dargestellt werden. Die Aussagekraft der Ergebnisse würde maßgeblich reduziert werden, wenn aus den berechneten Ergebnissen der einzelnen Räume flächenmäßig gewichtete Ergebnisse für das gesamte Gebäude erstellt werden. Dennoch kann dieses Vorgehen, insbesondere beim Vergleich von Gebäuden hilfreich sein, um eine direkte Gegenüberstellung zu erhalten.

5.7 Überprüfung der methodischen Validität der Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung der raumphysiologischen Bilanz wurde in Kapitel 4 definiert als die Phase, die dem Erkennen und Beurteilen der Größe und der Bedeutung von potentiellen Auswirkungen eines Gebäudes auf den Menschen während dessen Nutzung dient. Es handelt sich somit hierbei um die Berechnung von Wirkungsindikatoren mit den gegebenen Eingangsgrößen und der Zuordnung des quantitativen Wirkungsindikators zu einer definierten Wirkung.

Die DIN EN ISO 14044 (2021) definiert für die Durchführung der Wirkungsabschätzung drei verbindliche sowie vier optionale Bestandteile.

Verbindliche Bestandteile:

- Auswahl der Wirkungskategorien, der Wirkungsindikatoren und der Wirkungsmechanismen (in der DIN EN ISO 14044 (2021) als Charakterisierungsmodelle beschrieben)
- Klassifizierung: Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien
- Charakterisierung: Berechnung der Wirkungsindikatorwerte

Optionale Bestandteile:

- Normierung: Größenordnung der Wirkungsindikatorwerte in Bezug zu einem Referenzsystem
- Ordnung: Gewichtung und Rangfolge der Wirkungskategorien
- Gewichtung: Zusammenfassung mehrerer Wirkungsindikatorwerte über die Wirkungskategorien hinweg (Anmerkung: nach Rosenbaum et al. (2018) als Gruppierung bezeichnet)
- Analyse der Datenqualität: verbessertes Verständnis für die Zuverlässigkeit der Werte der Wirkungsindikatoren

Der erste verbindliche Bestandteil der Wirkungsabschätzung ist die Auswahl der Wirkungskategorien. Diese wurden auf der Grundlage der sensorischen Wahrnehmung des Menschen als die thermische, die lufthygienische, die visuelle sowie die akustische Umgebung identifiziert. Für jede dieser Wirkungskategorien wurden geeignete Wirkungsindikatoren aus den Ursache-Wirkungs-Ketten identifiziert, die ausgehend von den Ergebnissen der Sachbilanz mit einem entsprechenden Wirkungsmechanismus bestimmt werden können. Bei der Erstellung einer raumphysiologischen Bilanz steht es dem Studienersteller demnach frei, eine Auswahl der vorhandenen Wirkungskategorien zu treffen, die in einer konkreten Studie berücksichtigt werden sollen. Jedoch gibt es keine Möglichkeit der Auswahl von unterschiedlichen Wirkungsindikatoren und Wirkungsmechanismen, da zu dem jetzigen Zeitpunkt jeweils ein Mechanismus für jede Wirkungskategorie abgeleitet wurde. Lediglich die Wirkungskategorie der visuellen Umgebung kann anhand von zwei Wirkungsindikatoren bewertet werden. Diese beziehen sich jedoch grundsätzlich auf unterschiedliche Wirkungen. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass in Zukunft durch die gezielte Erforschung und Quantifizierung der einzelnen Ursache-Wirkungs-Ketten die Wirkungsmechanismen weiter ausgedehnt werden und somit die Bestimmung weiterer Wirkungsindikatoren ermöglichen.

Eine Klassifizierung der Sachbilanzergebnisse zu den vier Wirkungskategorien ist ebenfalls bei der Durchführung einer konkreten Studie möglich. Diese wurde bei der Herleitung der Wirkungsabschätzung nicht weiter explizit betrachtet, da die für die Wirkungsmechanismen benötigten Umgebungs- und Personenparameter sich implizit herausgestellt haben. Die Charakterisierung beantwortet nach Rosenbaum et al. (2018) die Frage, wie viel jedes Sachbilanz-Ergebnis zu den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung beiträgt. Diese Charakterisierung findet ebenfalls implizit bei der Quantifizierung der Wirkungsmechanismen statt. Durch die Wechselwirkungen der einzelnen physikalischen Größen, die jeweils an einer Auswirkung beteiligt sind, werden jedoch keine Charakterisierungsfaktoren entsprechend dem Vorgehen in der Ökobilanzierung definiert. Diese Charakterisierungsfaktoren stellen den mengenmäßigen Beitrag jedes Elementarflusses zu einer bestimmten Wirkungskategorie dar. (Rosenbaum et al., 2018) Da eine solch detaillierte Quantifizierung der einzelnen Elementarströme in der raumphysiologischen Bilanz wenig zielführend ist, wird der Wirkungsindikator aus der numerischen Betrachtung des Wirkungsmechanismus und nicht anhand von definierten Charakterisierungsfaktoren berechnet. Da sich letztendlich Wirkungsindikatorwerte berechnen lassen, können alle verbindlichen Bestandteile der Wirkungsabschätzung mit der gegebenen Herleitung der Wirkungsabschätzung erfüllt werden.

Die optionalen Bestandteile wurden bislang nicht thematisiert. Die Normierung soll die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, welche in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt werden, auf eine gemeinsame Skala beziehen, um diese vergleichbar zu machen und um festzustellen, bei welchen es sich um größere oder eher geringere Auswirkungen handelt. (Rosenbaum et al., 2018) Da die raumphysiologische Bilanz für alle Wirkungskategorien die gleichen Wirkungszonen definiert, können ohne eine weitere Normierung die Ergebnisse der unterschiedlichen Wirkungskategorien sowie die Ergebnisse von unterschiedlichen Studien miteinander verglichen werden. Somit ist dieser in der Ökobilanzierung optionaler Bestandteil in der raumphysiologischen Bilanzierung bereits integriert.

Die Ordnung wird im Folgenden als die Gewichtung bezeichnet. Diese dient der Differenzierung von bedeutenden und weniger wichtigen Auswirkungen. Dieser Schritt kann nur durchgeführt werden, wenn eine Normierung stattgefunden hat. Auch in der Ökobilanzierung gibt es für diesen Bestandteil der Wirkungsabschätzung keine wissenschaftlich objektiven Verfahren, sondern die Gewichtung basiert auf subjektiven Entscheidungen von Einzelpersonen. (Rosenbaum et al., 2018) Da eine Normierung in der raumphysiologischen Bilanz stattfindet, können die Ergebnisse ebenfalls gewichtet werden. Aus dem Stand des Wissens zur Bewertung der Auswirkungen des erweiterten Raumklimas auf den Menschen geht hervor, dass sowohl physiologische, physische und psychologische Aspekte das Wohlbefinden des Menschen beeinflussen. Sowohl die physiologischen als auch die physischen Einflüsse wurden weitestgehend in den Wirkungsmechanismen berücksichtigt. Lediglich der psychologische Einfluss, welcher sich hauptsächlich aus der Persönlichkeit, den Erfahrungen und Erwartungen zusammensetzt, wurde nicht berücksichtigt. Eine subjektive Bewertung der Raumumgebung, in welcher sich der Mensch befindet, bietet hierzu die Möglichkeit. Entgegen der vorgestellten subjektiven sowie der subjektiv-objektiven Bewertungsmethoden wird an dieser Stelle jedoch kein vollumfassender Fragebogen zur Beurteilung des erweiterten Raumklimas erstellt. Da es bei der Bilanzierung der raumphysiologischen Auswirkungen hauptsächlich darum geht, insbesondere die komfortrelevanten sowie die gesundheitsgefährdenden Auswirkungen zu identifizieren und diese bestenfalls durch entsprechende Anpassungen im Raum zu eliminieren, wird für jede Wirkungskategorie lediglich die subjektiv bewertete Wichtigkeit sowie die Leistung der jeweiligen Wirkungskategorie abgefragt. Eine Möglichkeit der Gewichtung bietet die *Importance-Performance-Matrix*. Bei der *Importance-Performance-Matrix* handelt es sich ursprünglich um ein Werkzeug aus dem Marketing. (Martilla & James, 1977) Das Modell lässt sich, entsprechend Abbildung 114, sehr gut für die Gewichtung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung anpassen.

Ein Raumnutzer muss statt dem Ausfüllen eines langen Fragebogens lediglich in dieser Matrix für jede der vier Wirkungskategorien markieren, wie er die Leistung dieser Umgebung, somit seine Zufriedenheit und die Wichtigkeit dieser Kategorie bewertet. Folglich müssen für jede Auswertung der Wirkungsabschätzung lediglich vier Kreuze in der Matrix gesetzt werden. Wird eine Wirkungskategorie mit einer unzureichenden Leistung und noch dazu als außerordentlich wichtig eingestuft, dann kann davon ausgegangen werden, dass an dieser Stelle ein dringender Handlungsbedarf besteht. Ergibt sich zusätzlich aus der Wirkungsabschätzung, dass diese Wirkungskategorie, auch physiologisch und physisch betrachtet, zu einer Abweichung vom neutralen Zustand des Körpers führt, sollte anhand der Ergebnisse der Sachbilanz nach einem möglichen Auslöser gesucht werden. Umgekehrt wird eine Wirkungskategorie mit einer

hervorragenden Leistung und noch dazu als geringfügig wichtig betrachtet, obwohl die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung anzeigen, dass die Wirkungskategorie zu einer Abweichung des neutralen Zustands führt, dann kann der Einfluss dieser Wirkungskategorie als weniger bedeutend gewertet werden als der der Wirkungskategorie, bei der dringender Handlungsbedarf besteht. Es ist jedoch anzumerken, dass eine solche Gewichtung nicht für jedes Anwendungsszenario realisierbar ist. Bei der Anwendung der raumphysiologischen Bilanz für Standardpersonen, kann die subjektive Wichtigkeit und Leistung der einzelnen Wirkungskategorien nicht erfragt werden. Somit bleibt die Gewichtung als optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz erhalten.

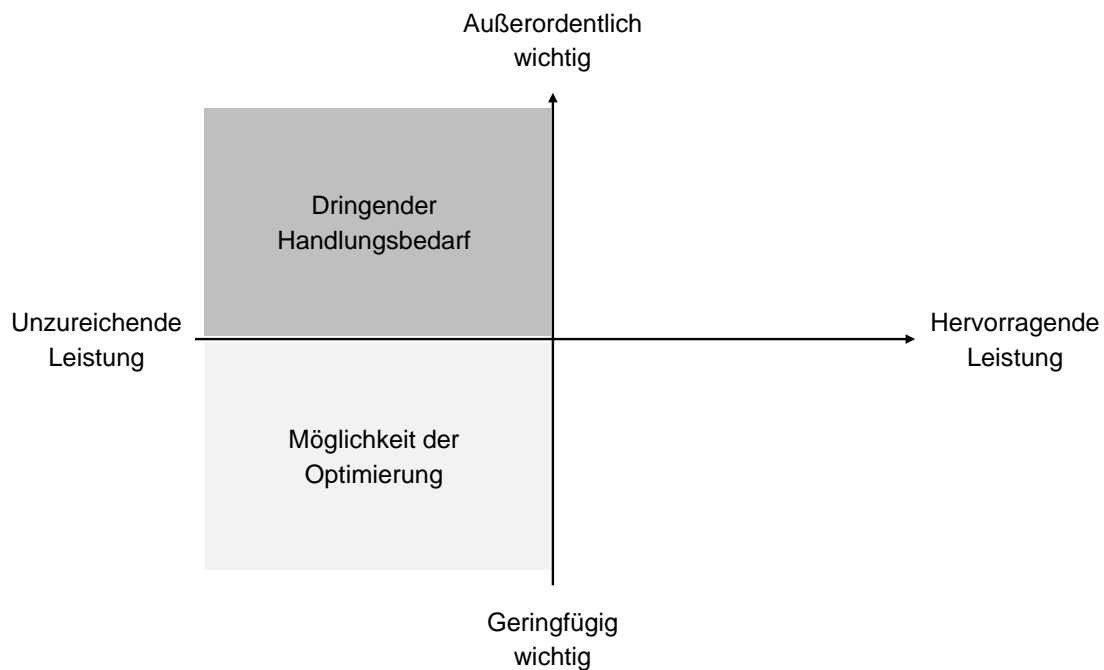


Abbildung 114: Importance-Performance-Matrix nach Martilla & James (1977)

Bei der Gruppierung in der Ökobilanzierung werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung einer oder mehrerer Gruppen, beispielsweise nach emissionsbezogenen und ressourcenbezogenen Merkmalen zugeordnet. Somit handelt es sich um die Aggregation mehrerer Wirkungsindikatorergebnisse. (Rosenbaum et al., 2018) Eine solche Aggregation wird zum jetzigen Zeitpunkt nicht in der raumphysiologischen Bilanz durchgeführt, weil sich jeder Wirkungsindikator auf eine sehr spezifische Auswirkung bezieht. Ein Zukunftsausblick könnte es hier sein, zum Beispiel die Wirkungskategorie der lufthygienischen Umgebung, um die raumphysiologischen Auswirkungen weiterer Luftschadstoffe zu ergänzen und letztendlich diese Ergebnisse zu einer Gruppe zusammenzuführen. Die Gruppierung wird somit zum jetzigen Zeitpunkt auch als optionaler Bestandteil der Wirkungsabschätzung nicht angewandt. Als letzter optionaler Bestandteil bleibt die Überprüfung der Datenqualität. Nach der DIN EN ISO 14044 (2021) zählen zu den Schritten der Überprüfung der Datenqualität die Schwerpunktanalyse, die Fehlerabschätzung und die Sensitivitätsanalyse. Sowohl die Fehlerabschätzung als auch die Sensitivitätsanalyse wurden bereits bei der Auswertung der Wirkungsabschätzung erläutert und werden

an dieser Stelle nicht weiter thematisiert. Bei der Schwerpunktanalyse handelt es sich um die Identifizierung der Daten, die für die einzelnen Wirkungsindikatoren den größten Beitrag verursachen. Hierfür sollen statistische Verfahren, beispielsweise eine Pareto-Analyse, genutzt werden. (DIN EN ISO 14044, 2021) Aufgrund der vorherrschenden Wechselwirkungen zwischen den physikalischen Parametern in den einzelnen Wirkungskategorien ist es schwierig, den Beitrag der einzelnen Einflüsse detailliert zu bestimmen. Trotzdem können an dieser Stelle die Größen einzelner Elementarflüsse variiert werden, um quantitativ zu bestimmen, wie sich die raumphysiologischen Auswirkungen verändern. Auf diesem Weg kann ebenfalls bestimmt werden, in welchem Bereich die einzelnen Elementarströme liegen müssen, damit die in einer gegebenen Situation betrachtete Person sich in jeder Wirkungskategorie in einem neutralen Zustand befindet. Es handelt sich jedoch nicht um eine Analyse der Datenqualität. Vielmehr handelt es sich hierbei um eine Analyse der Neutralität, die als optionaler Bestandteil in die Wirkungsabschätzung der raumphysiologischen Bilanz mitaufgenommen werden kann.

Während die Wirkungsabschätzung in der Ökobilanzierung sich aus drei verbindlichen und vier optionalen Bestandteilen zusammensetzt, wird die Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz auf der Grundlage von vier verbindlichen und zwei optionalen Bestandteilen durchgeführt. Diese Schritte wurden aus den vorherigen Beschreibungen identifiziert und sind in der folgenden Abbildung 115 zusammenfassend abgebildet.



Abbildung 115: Verbindliche und optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung in der raumphysiologischen Bilanz

6 Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz

Die Sachbilanz ist die zweite von drei Phasen sowohl in der Ökobilanzierung als auch in der raumphysiologischen Bilanz. Der Begriff der Sachbilanz wurde bereits definiert als Bestandteil der raumphysiologischen Bilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung der Gestaltungs- und Umgebungsparameter und den daraus resultierenden raumphysiologisch relevanten Einflüssen eines gegebenen Gebäudes während dessen Nutzung umfasst. Im vorherigen Kapitel wurden zudem sämtliche Auswirkungen der definierten vier Wirkungskategorien beschrieben. Ausgehend hiervon konnten die relevanten Elementarflüsse bestimmt werden. Diese sind gleichzusetzen mit den in der Definition der Sachbilanz genannten raumphysiologisch relevanten Einflüssen und bilden die Grundlage für die Durchführung der Sachbilanz. Im folgenden Kapitel werden die Definitionen der Sachbilanz vorerst von der Ökobilanzierung auf die raumphysiologische Bilanz übertragen. Anschließend wird ein Stand des Wissens zum einen bezogen auf das Vorgehen zur Erstellung einer Sachbilanz in der Ökobilanzierung und zum anderen bezogen auf die für die Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz relevanten Gestaltungs- und Umgebungsparameter, welche anhand von Gebäudemodellen beschrieben werden können, präsentiert. Darauf aufbauend werden das Vorgehen zur Erstellung einer Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz sowie die zu berücksichtigten Parameter mit ihren jeweiligen Eigenschaften erläutert. Auch hier wird der Bezug zu der in Kapitel 5 beschriebenen Definition von Wirkung/Auswirkung gemacht, denn die Elementarströme ergeben sich aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Auslösern, welche letztendlich gemeinsam zu einem Elementarstrom beitragen.

6.1 Bestandteile der Sachbilanz

Bereits bei den grundlegenden Definitionen der raumphysiologischen Bilanz wurde der Begriff des Elementarstroms mit weiteren dazugehörigen Begriffen beschreiben. Zur Herleitung des Vorgehens in der Sachbilanz im Rahmen der raumphysiologischen Bilanz werden jedoch noch weitere Begriffsdefinitionen benötigt. Sämtliche Definitionen des folgenden Unterkapitels sind der DIN EN ISO 14040 / DIN EN ISO 14044 (2021) entnommen.

Bei der Definition des Produktsystems (S. 58) wurde die „festgelegte Funktion“ genannt, welche als funktionelle Einheit die nächste Größe ist, die es für die raumphysiologische Bilanzierung zu definieren gilt.

Funktionelle Einheit Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit.

Aus dieser Definition ist vorerst erkennbar, dass die funktionelle Einheit quantifizierbar ist, sich auf das betrachtete, zu bewertende System bezieht und als Vergleichseinheit genutzt werden soll. Die Angaben dieser knappen Definition reichen nicht aus, um alleine auf dieser Grundlage anhand einer ausreichenden Analogie eine Definition für die raumphysiologische Bilanzierung abzuleiten.

Die funktionelle Einheit ergibt sich aus der Funktion des untersuchten Systems. Die Hauptaufgabe der funktionellen Einheit ist die Angabe einer Bezugsgröße, die zur mathematischen Normierung der Inputs und Outputs des betrachteten Systems dient. (DIN EN ISO 14044, 2021) Ohne die Funktion und die daraus abgeleitete funktionelle Einheit sind die Ergebnisse der Ökobilanz, insbesondere, wenn es um den Vergleich der Auswirkungen von mehreren Produkten geht, nicht aussagekräftig. Ein Vergleich ist nur dann nützlich, wenn die betrachteten Systeme dem Nutzer die gleichen Funktionen bieten. Beispielsweise ist ein Vergleich der Umweltauswirkungen von einem Tablett und einer Zeitung nicht aussagekräftig. Beide Systeme erfüllen die Funktion eines Nachrichtenmediums, jedoch hat ein Tablett viele weitere Funktionen. (Bjorn et al., 2018a) Die Verankerung der Ökobilanz in einer präzisen, quantitativen Beschreibung der Funktionen des zu untersuchenden Produktsystems ist daher unumgänglich. Die Spezifizierung einer Funktion im Sinne der Ökobilanzierung bedeutet daher, das betrachtete Objekt quantitativ und qualitativ zu spezifizieren. (ILCD Handbook, 2010)

Um sowohl die qualitativen und quantitativen Aspekte der Funktion zu definieren, muss die funktionelle Einheit die Beantwortung der folgenden Fragen gewährleisten:

- Was?
- Wie viel?
- Wie lange / wie oft?
- Wo?
- Wie gut?

Zum verbesserten Verständnis soll das folgende Beispiel dienen. Beim Vergleich der Umweltauswirkungen von zwei Außenwandanstrichen ist eine funktionelle Einheit von je einem Liter Farbe nicht aussagekräftig, da die gleiche Quantität an Farbe unterschiedliche Funktionen erfüllen kann, beispielsweise in Bezug auf die Fläche der Wand, die mit einer bestimmten Qualität und für eine bestimmte Dauer abgedeckt werden kann. Die geeignete funktionelle Einheit wäre demnach die folgende:

- Was? Vollständige Abdeckung einer grundierten Außenwand
- Wie viel? 1 m²
- Wie lange / wie oft? Für 10 Jahre
- Wo? In Deutschland
- Wie gut? In einer einheitlichen Farbe mit einer Deckkraft von 99.9 %

Eine solch detaillierte Beschreibung der funktionellen Einheit ermöglicht den aussagekräftigen Vergleich der Umweltauswirkungen von unterschiedlichen Produkten. (Bjorn et al., 2018a nach ILCD Handbook, 2010) Auf dieser Grundlage lässt sich ebenfalls eine Definition der funktionellen Einheit in der raumphysiologischen Bilanz ableiten. In Anlehnung an die Vorgaben aus den europäischen Richtlinien (ILCD Handbook, 2010) soll die Funktion das betrachtete Objekt qualitativ und quantitativ spezifizieren. Daraus würden sich für Gebäude folgende Grundlagen zur Erstellung einer funktionellen Einheit anbieten:

- Was? Gebäudenutzung
- Wie viel? Nutzungsfläche / Anzahl der Nutzer
- Wie lange / wie oft? Baujahr / letzte Sanierung
- Wo? Standort
- Wie gut? Vorhandene Zertifizierungen / Auszeichnungen

Würden nur einzelne Räume innerhalb eines Gebäudes betrachtet werden (ähnlich wie die Betrachtung eines einzelnen Prozesses in einem Produktsystem) können diese Komponenten der funktionellen Einheit beibehalten werden. Anzumerken ist, dass die Wahrscheinlichkeit, dass zwei oder mehrere Gebäude eine identische funktionelle Einheit haben sehr gering ist, jedoch sollten beim Vergleich von verschiedenen Gebäuden die einzelnen Größen in einem ähnlichen Bereich liegen und die Standortbedingungen insbesondere wegen des Bezugs zum Außenklima identisch sein.

Um dennoch eine allgemeine Definition der funktionellen Einheit für die raumphysiologische Bilanz zu verfassen, wird auf die ursprüngliche Definition aus der Ökobilanz zurückgegriffen. Die entscheidenden Merkmale der funktionellen Einheit sind laut dieser Definition die Quantifizierbarkeit, der Bezug zum betrachteten System und die Verwendung als Vergleichseinheit. Für die hier zu entwickelnde Methode ist die Nutzungsart die entscheidende Größe, um einen möglichen Vergleich zwischen Gebäuden zu ziehen. Alle anderen Parameter der funktionellen Einheit erscheinen dennoch nützlich, um den Vergleich auf einer tieferen Ebene abzubilden.

Funktionelle Einheit Quantifizierter Nutzen eines Gebäudes für die Verwendung als Vergleichseinheit.

Der nächste zu definierende Begriff ist der Referenzfluss; dieser steht in direktem Bezug zur funktionellen Einheit.

Referenzfluss Maß für die Outputs von Prozessen eines vorhandenen Produktsystems, die zur Erfüllung der Funktion, ausgedrückt durch die funktionelle Einheit, erforderlich sind.

Jedes Produktsystem erfüllt eine bestimmte Funktion, welche durch die funktionelle Einheit eindeutig beschrieben wird. Aus der Definition des Referenzflusses kann abgeleitet werden, dass es sich hierbei um ein Maß, also eine Größe handelt, die für die Erfüllung der spezifischen Funktion benötigt wird. Dieser Zusammenhang kann anschaulicher mit dem zuvor genannten Beispiel der Außenwandfarbe dargestellt werden. Um die genannte funktionelle Einheit zu erfüllen, wird von Farbe A lediglich ein halber Liter, von Farbe B aber ein ganzer Liter benötigt. Somit ist der Referenzfluss die Produktmenge, die zur Realisierung der funktionellen Einheit benötigt wird. Üblicherweise unterscheiden sich die Referenzflüsse von unterschiedlichen Produkten in Bezug auf die funktionelle Einheit sowohl qualitativ als auch quantitativ.

Sämtliche Input- und Output-Flüsse der einzelnen Prozesse innerhalb eines Produktsystems müssen auf die Größe des Referenzflusses skaliert werden. Der Referenzfluss stellt somit den Ausgangspunkt der Sachbilanz dar, da er die Größe sämtlicher Produktflüsse während des gesamten Lebenszyklus und somit

auch die Elementarflüsse, aus denen die Umweltauswirkungen ermittelt werden, bestimmt. (Bjorn et al., 2018a)

An dieser Stelle wird ersichtlich, dass der Referenzfluss im Rahmen der raumphysiologischen Bilanzierung anders interpretiert werden muss, da es sich hier nicht um Produkte handelt, die mit einem konkreten Maß bemessen werden können. Dennoch soll der Grundgedanke, dass der Referenzfluss zur Erfüllung der funktionellen Einheit beiträgt, erhalten bleiben. Da es sich bei Gebäuden ähnlich wie bei Produktsystemen um sehr komplexe Systeme mit vielen Inputs und Outputs handelt, erscheint die sinnvollste Lösung, die maßgeblichen Komponenten eines Gebäudes, die einzelnen Räume, als Referenzflüsse zu definieren. Damit wird jeder Raum innerhalb eines Gebäudes zu einem sogenannten Referenzfluss, der für sich betrachtet werden muss. In dem Sinne ist der Referenzfluss nach wie vor das Maß für die Größe der Outputs, also die Auswirkungen auf den Menschen, da jeder Raum für sich betrachtet andere Eigenschaften hat, beispielsweise spielen die Größe der Fenster- und der Heizflächen oder die Orientierung des Raums hier eine entscheidende Rolle.

Es ist offensichtlich, dass sich die raumphysiologische Bilanzierung an dieser Stelle wesentlich von der Ökobilanzierung unterscheidet, da nicht nur ein Referenzfluss für die Bemessung der Auswirkungen genutzt wird. Für die Bestimmung der Auswirkungen werden eine Vielzahl an Referenzflüssen berücksichtigt, um letztendlich das Gebäude insgesamt bezüglich seiner potentiellen Auswirkungen auf den Menschen bewerten zu können. Anzumerken ist, dass natürlich die Möglichkeit besteht, nur einen einzelnen Referenzfluss zu berücksichtigen. In dem Fall würde der Referenzfluss der funktionellen Einheit entsprechen und es können lediglich Aussagen über die Auswirkungen eines einzelnen Raums getroffen werden. Die Festlegung, welche Räume als Referenzfluss zu betrachten sind, erfolgt in der ersten Phase der raumphysiologischen Bilanzierung und wird somit bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens definiert.

Der Begriff „Referenzfluss“ wird aufgrund der Verwendung von „Fluss“ als nicht passend für die Nutzung in der raumphysiologischen Bilanzierung erachtet. Dieser Begriff wird lediglich durch den Begriff „Referenzraum“ ausgetauscht und in Analogie zur ursprünglichen Definition wie folgt definiert.

Referenzraum Maß für die Outputs von Räumen eines vorhandenen Gebäudesystems, die zur Erfüllung der Funktion, ausgedrückt durch die funktionelle Einheit, beitragen.

Es wird explizit darauf verzichtet zu sagen, dass diese Outputs erforderlich sind, um die Funktion zu erfüllen (vgl. Definition Referenzfluss). Die einzelnen Referenzräume tragen lediglich dazu bei, dass ein Gebäude wie vorgesehen genutzt werden kann und dem entspricht, was in der funktionellen Einheit beschrieben wird.

Ein wesentlicher Unterschied zur Ökobilanzierung besteht darin, dass jeder Referenzraum für sich alleine betrachtet werden muss und die Auswirkungen in diesem Raum gesondert bilanziert werden. Damit die Ergebnisse dieser Bewertung für den Vergleich von unterschiedlichen Referenzräumen genutzt werden können, ist es erforderlich, den quantifizierten Nutzen eines Referenzraums für die Verwendung als Vergleichseinheit, ähnlich der Definition der funktionellen Einheit, zu beschreiben.

Genau wie die funktionelle Einheit, die das Gebäude beschreibt, soll der quantifizierte Nutzen des Referenzraums ebenfalls entsprechende Fragen beantworten, die es ermöglichen, diese Einheit als Vergleichsmaßstab für die Referenzräume heranzuziehen. Im Gegensatz zur funktionellen Einheit ermöglicht die Quantifizierung des Nutzens des Referenzraums lediglich die Beantwortung von vier der insgesamt fünf Fragen. Die Frage nach „Wie gut?“, welche sich bei der funktionellen Einheit auf eine mögliche Zertifizierung bezieht, lässt sich nicht auf einzelne Räume anpassen; somit wird diese aus den zu beantwortenden Fragen entfernt.

Der Referenzraum wird durch die Beantwortung der folgenden Fragen beschrieben:

- Was? Raumnutzung
- Wie viel? Nutzungsfläche / Anzahl der Nutzer
- Wie lange/ wie oft? Nutzungsdauer / Nutzungshäufigkeit
- Wo? Standort im Gebäude, Orientierung

Bezogen auf die zuvor beschriebenen Aspekte und auf das Produktsystem an sich gibt es noch drei weitere Begriffe, die definiert werden müssen. Dabei handelt es sich zum einen um die Systemgrenzen, die Allokation und die Abschneidekriterien.

Systemgrenze Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind.

Die Systemgrenzen legen fest, welche Module des Lebenszyklus eines Produktsystems in der Studie berücksichtigt werden und welche vernachlässigt werden können. Im Idealfall werden Produktsysteme entsprechend ihren Grenzen so modelliert, dass die Inputs und Outputs an ihren Grenzen Elementarströme sind. (DIN EN ISO 14040, 2021)

Für die Erstellung der raumphysiologischen Bilanz müssen ebenso Systemgrenzen definiert werden. Innerhalb dieser Systemgrenzen werden die für die Sachbilanz benötigten Parameter erfasst; alles außerhalb der definierten Systemgrenzen kann dagegen vernachlässigt werden. Die Systemgrenzen beschreiben somit, inwieweit die Umgebung des betrachteten Referenzraums berücksichtigt werden muss.

Systemgrenze Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Gestaltungs- und Umgebungsparameter Teil eines Gebäudesystems sind.

Ein möglicher Ansatz, um die Systemgrenzen zu definieren, ist die Nutzung der Einteilung nach Weischert und Endlicher (2018) bezüglich dem Mikro-, Meso- und Makroklima. Die Einteilung dieser Klimata erfolgt über externe Faktoren. So hat jedes dieser Klimata drei Dimensionen: eine zeitliche, eine horizontale und eine vertikale.

Horizontale Skala	1 cm	100 m	1 km	10 ² km	10 ⁴ km
Vertikale Skala	1 cm	10 m	100 m	10 km	10 ⁴ km
Zeitliche Skala	1 sek	1 min	1 Std	1 Tag	1 Woche
	Mikroklima	Mesoklima		Makroklima	
	Klima eines Baumes oder Baublockes	Klima eines Tales oder einer Landschaft		Klima der mittleren Breiten	

Abbildung 116: Definition der Systemgrenzen für die Sachbilanz (nach Weischert & Endlicher, 2018)

Für die Herleitung der Sachbilanz wird die Systemgrenze des Mikroklimas verwendet. Es ist allerdings einem Anwender der Methode offengelassen, diese Systemgrenze auf das Meso- oder das Makroklima zu erweitern. Entsprechend der Definition des Mikroklimas für die Außenumgebung, wird das Mikroklima ebenfalls für die Umgebung innerhalb des Gebäudes verwendet. Somit werden mögliche Nachbarräume sowie darüber und darunterliegende Räume innerhalb dieser Systemgrenze berücksichtigt. Die Systemgrenzen für die innere und die äußere Umgebung müssen nicht identisch gewählt werden.

Zusätzlich ist anzumerken, dass diese Systemgrenze lediglich für die Erstellung der Sachbilanz benötigt wird. Dabei handelt es sich jedoch in der raumphysiologischen Bilanzierung nicht um die Grenze, die zwischen der Sphäre des Menschen und der Technosphäre / Ökosphäre besteht und somit von den Elementarströmen durchquert wird.

Viele der Prozesse, aus denen sich Produktsysteme zusammensetzen, sind multifunktional. Das bedeutet, dass sie nicht nur einen einzigen Output hervorrufen und auch nicht unbedingt ein linearer Zusammenhang zwischen den Rohstoff-Inputs und den Outputs besteht. Daher werden Allokationsverfahren benötigt, mit deren Hilfe die Inputs und Outputs den verschiedenen Produkten eindeutig zugeordnet werden können. (Bjorn et al., 2018a)

In der raumphysiologischen Bilanzierung spielt die Allokation eine untergeordnete Rolle, da es zwar vorkommt, dass ein Input zu mehreren Outputs führt, es jedoch für die Bewertung der Wirkung auf den Menschen keine Rolle spielt, zu wie viel Prozent dieser Input zum Output beiträgt. Beispielsweise scheint das Sonnenlicht durch das Fenster; diese Strahlung trägt sowohl zur visuellen Umgebung und als auch zur thermischen Umgebung eines Raums bei. Somit sind diese beiden Größen Outputs vom Parameter „Fenster“ und kommen letztendlich als Elementarstrom beim Menschen an. Eine Allokation der Input- und Output-Ströme zu den Raumkomponenten wird jedoch nicht benötigt; daher wird der Begriff auch hier nicht näher definiert.

Entsprechend der DIN EN ISO 14044 (2021) müssen Produktsysteme in der Ökobilanzierung in dem Sinne beschrieben werden, „dass alle relevanten Informationen und die für die Auswertung benötigten Daten zur Verfügung stehen und vollständig sind.“ Nach Schebek (2015) wird diese Relevanz anhand der Abschneidekriterien beurteilt. Dabei handelt es sich um einen konkreten Prozentsatz, welcher den Schwellenwert vorgibt, den ein bestimmter Input oder Output überschreiten muss, um in der Ökobilanzierung berücksichtigt zu werden. Beispielsweise werden Stoffströme, deren Anteil kleiner als 1 % der kumulierten Masse aller Stoffströme ist, aus der Sachbilanz abgeschnitten. Die DIN EN ISO 14044 (2021) empfiehlt entsprechend Schebek (2015) neben der Berücksichtigung der Masse als

Abschneidekriterium die zusätzliche Betrachtung der Umweltrelevanz, ohne dass dieser Begriff selber jedoch definiert wird.

In der raumphysiologischen Bilanz lässt sich die Masse eines Stoffstroms nicht als Abschneidekriterium verwenden, da keine der raumphysiologischen Wirkungen aufgrund der Masse der Elementarströme entsteht. Ob ein bestimmter Elementarstrom eine gewisse Relevanz für die Auswirkungen auf den Menschen hat, sollte ebenfalls kein Abbruchkriterium darstellen. Im Gegensatz zur Ökobilanzierung, die aus überaus komplexen Prozessen besteht, bei denen es Sinn macht, diese nicht bis ins letzte Detail abzubilden, wird die raumphysiologische Bilanz so aufgebaut, dass lediglich die Parameter erfasst werden, die tatsächlich einen Impact auf die sich ergebenden Elementarströme haben. Dabei wird jedoch nicht unterschieden, zu wie viel Prozent die Heizung oder das Fenster zum Elementarstrom der Lufttemperatur im Raum beitragen, da sich diese Temperatur aus den komplexen thermodynamischen Prozessen im Raum ergibt. Somit werden für die Erstellung der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz weder Abschneidekriterien aufgrund der Masse eines Stoffstroms noch aufgrund der Relevanz für die letztendlichen Auswirkungen definiert.

Anstelle der Nutzung von Abschneidekriterien können in der raumphysiologischen Bilanz jedoch Abbruchkriterien genutzt werden. Diese beziehen sich ebenfalls auf die Erstellung der Sachbilanz und dienen dem sofortigen Abbruch der Studie. Somit entsteht ein Bezug zur Gebrauchstauglichkeit der Referenzräume. Werden im Rahmen der Sachbilanz gravierende Mängel an dem betrachteten Referenzraum festgestellt, führt dies zum Abbruch der Durchführung der raumphysiologischen Bilanz. Als Abbruchkriterium kann somit jede Eigenschaft des Referenzraums gewertet werden, die den Menschen in seinem Wohlbefinden oder seiner Gesundheit soweit beeinflussen kann, dass die Anwendung der Wirkungsabschätzung keinen Zweck mehr hat, da sich die Person in diesem Raum nicht aufhalten soll oder will. Beispielsweise wäre hier eine Asbestbelastung oder der Verlust der Regensicherheit zu nennen. Der letzte Begriff, der im Rahmen der Sachbilanz definiert werden muss, ist das Sachbilanzergebnis.

Sachbilanzergebnis Ergebnis der Sachbilanz, das die Flüsse katalogisiert, die die Systemgrenze überschreiten und das den Ausgangspunkt für die Wirkungsabschätzung darstellt.

Diese Definition kann als Originaldefinition erhalten bleiben, da sie inhaltlich weder einen Bezug zu Umweltauswirkungen noch zu Produktsystemen hat. Dennoch sollte angemerkt werden, dass bei der Ökobilanzierung das Ergebnis der Sachbilanz auf der Größe des Referenzflusses basiert. Dies ist bei der raumphysiologischen Bilanzierung ebenfalls der Fall; jedoch wird es nicht für jeden Elementarfluss ein Ergebnis geben. Vielmehr muss für jeden Referenzraum eine einzelne Sachbilanz erstellt werden, die sich aus den resultierenden Elementarströmen ergibt. Die einzelnen Sachbilanzergebnisse stellen nach wie vor den Ausgangspunkt der Wirkungsabschätzung dar. Diese bezieht sich jedoch ebenfalls nicht mehr auf einen Referenzfluss für das gesamte Produktsystem, sondern muss für jeden Referenzraum des Gebäudesystems erstellt werden.

6.2 Stand des Wissens zur Erstellung der Sachbilanz

Zur Erstellung der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz werden im folgenden Unterkapitel, die im Stand des Wissens vorhandenen Grundlagen zum Vorgehen zur Erstellung einer Sachbilanz in der Ökobilanzierung, zu den verwendeten Gebäudemodellen sowie zur Beschreibung der für die Bilanz relevanten Umgebungs-, Gebäude und Raumparameter dargestellt. Hierbei soll nicht der voll umfassende Stand des Wissens abgebildet werden, sondern lediglich die Aspekte, die für die Erstellung der Sachbilanz entsprechend der definierten mikroklimatischen Systemgrenzen relevant sind. Aus diesem Grund wird der Stand des Wissens mit einzelnen methodischen Einschüben ergänzt.

6.2.1 Vorgehen zur Erstellung der Sachbilanz in der Ökobilanzierung

Nach Bjorn et al. (2018b) dient die Sachbilanz der Modellierung sämtlicher innerhalb der Systemgrenzen stattfindenden Flüsse, welche dem Produktsystem zugeordnet werden können. Das Ergebnis der Sachbilanz stellt am Ende eine Liste von quantitativen Elementarströmen dar, welche als Eingangsgrößen für die Wirkungsabschätzung dienen. Insgesamt setzt sich die Sachbilanz aus sechs Arbeitsschritten zusammen.

1. Identifizierung von Prozessen für das Sachbilanzmodell
2. Planung der Datenerhebung und Datenerfassung
3. Konstruktion und Qualitätsprüfung von Prozessmodulen
4. Konstruktion des Sachbilanzmodells und Berechnung der Sachbilanzergebnisse
5. Vorbereitung der Grundlagen für die Fehlerabschätzung und die Sensitivitätsanalyse
6. Berichterstattung

Der erste Schritt bei der Durchführung einer Sachbilanz besteht darin, die für das Sachbilanzmodell benötigten Prozesse zu identifizieren. Um diese Identifizierung strukturierter zu gestalten, wird zwischen dem Vordergrund- und dem Hintergrundsystem unterschieden. Das Hintergrundsystem beinhaltet sämtliche Prozesse, die nicht spezifisch für das betrachtete Produkt sind (z. B. die Stromversorgung durch einen lokalen Anbieter). Das Vordergrundsystem, welches an das Hintergrundsystem angrenzt, beinhaltet dagegen alle Prozesse, die spezifisch für das betrachtete Produkt sind. Zur weiteren Strukturierung gilt es eine fünfstufige Hierarchie innerhalb des Vordergrundsystems zu berücksichtigen. Diese wird im Folgenden am Beispiel für den Referenzfluss Fenster dargestellt.

- Level 0: Prozessmodule, die den Referenzfluss als Produktausgabe haben
Montage des Fensters
- Level 1: Prozesse, die ein Output haben, welches physisch im Referenzfluss verankert wird
Herstellung des Glases und des Fensterrahmens
- Level 2: Prozesse, die eine unterstützende Funktion für die Level 0 Prozesse erfüllen
Lieferung der Elektrizität für die Montage des Fensters

- Level 3: Prozesse, die für die Bereitstellung von Dienstleistungen für die Level 0 Prozesse erforderlich sind
Verwaltung oder Marketing
- Level 4: Prozesse, die für die Herstellung und Wartung der Infrastruktur benötigt werden
Produktion und Wartung der Montagemaschinen

Die Identifizierung sämtlicher relevanter Prozesse beginnt mit dem Referenzfluss, um welchen die Prozesse des Vordergrund- sowie des Hintergrundsystems modelliert werden. (Bjorn et al., 2018b)

Im Anschluss an die Identifizierung der Prozesse soll eine übersichtliche Planung der Datenerhebung in Form einer Tabelle erfolgen. Diese soll für jeden Datenpunkt die benötigte Qualität der Daten, den Datentyp sowie die Datenquellen und den Zugang zu dieser Quelle enthalten. Die Datenqualität der in der Sachbilanz von Ökobilanzierungen verwendeten Daten kann in fünf Stufen kategorisiert werden. (Wenzel, Hauschild & Alting, 2001)

Tabelle 8: Klassifikation der Datenspezifität in der Ökobilanzierung (Bjorn et al., 2018b; Wenzel, Hauschild & Alting, 1997)

Datenspezifität	Erklärung
Sehr hoch	Direkt an einem bestimmten Prozessstandort gemessen oder aus einer Messung skaliert
Hoch	Durch Modellierung einer Messung an einem bestimmten Prozessstandort hergeleitet
Mittel	Sachbilanz-Datenbankprozesse oder prozessspezifische Daten aus der Literatur
Niedrig	Generische Sachbilanz-Datenbankprozesse oder Daten aus der Literatur
Sehr niedrig	Einschätzung durch einen Experten oder Ökobilanz-Anwender

Neben der Datenqualität gibt es nach Bjorn et al. (2018b) drei Ausprägungen der Daten, die den Aufwand der Beschaffung beschreiben. Dazu zählen der Datentyp, die Datenquelle und der Zugang zu den Daten. Eine Reihe von Beispielen sind der Tabelle 9.4 (Bjorn et al. 2018b, S. 140 – 141) zu entnehmen.

Anschließend folgt die Konstruktion und Qualitätsprüfung von Prozessmodulen. In diesem Schritt sollen die gesammelten Daten zu einzelnen Prozessmodulen, die den Lebensweg des Produktes darstellen, modelliert werden. Sämtliche Flüsse müssen dabei auf den Referenzfluss skaliert werden.

Im vierten Schritt folgen die Konstruktion des Sachbilanzmodells und die Berechnung der Sachbilanzergebnisse. Das Ergebnis dieses Schritts ist die Zusammenstellung sämtlicher Elementarflüsse über alle relevanten Prozesse. Dazu werden im Sachbilanzmodell das Produktsystem sowie die Verbindungen der relevanten Prozessmodule mit den relevanten Datenbanken verkoppelt, um zu den Sachbilanzergebnissen zu gelangen.

Der vorletzte Schritt, die Vorbereitung der Grundlagen für die Fehlerabschätzung und Sensitivitätsanalyse, dient zur Darstellung der Robustheit der Ergebnisse. Zudem soll durch die Veränderung der Sachbilanzeingangsdaten (maximale und minimale Werte, hohes und niedriges Perzentil) die Veränderung der Ergebnisse der Sachbilanz dargestellt werden, um auf diese Weise die Prozessströme zu identifizieren, die den größten Einfluss auf die Elementarströme haben.

Der letzte Schritt, die Berichterstattung, dient zur übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse; diese soll die Nachvollziehbarkeit sowie die Reproduzierbarkeit der Sachbilanzergebnisse gewährleisten. Hierfür

gibt es jedoch keine konkrete Vorlage; es sollen lediglich sämtliche genutzten Quellen und die entsprechenden Daten dargestellt werden. (Bjorn et al., 2018b)

6.2.2 Gebäudemodelle zur Gliederung der Sachbilanzparameter in der raumphysiologischen Bilanz

Zur Identifizierung der relevanten Bestandteile der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanzierung muss die objektive Realität, welche den Menschen umgibt, beschrieben werden. Sowohl Grabe (2012) als auch Heichele (2021) haben entsprechende Realitätsbeschreibungen durchgeführt. Dabei nutzte Grabe (2012) eine umfassende Realitätserzählung und Heichele (2021) eine erweiterte Raumbuchmethode, um sämtliche relevanten Komponenten der menschlichen Umgebung zu identifizieren und in einem Gebäudemodell zu beschreiben.

Heichele (2021) zeigt, dass insbesondere die raumklimatische Realität des Menschen durch unterschiedliche Faktoren bestimmt wird. Dabei werden die Umgebungsbedingungen im Außenbereich (z. B. Außenluftqualität, Außenlärm), das Gebäude und dessen Bausubstanz (z. B. Bauteilaufbauten, Baumaterialien), die Ausstattungselemente (z. B. Schreibtische, Lampen), der Nutzer im Gebäude (z. B. Aktivitäten) sowie ergänzende Parameter, welche keinem der anderen Bereiche zuordenbar sind, genannt.

Grabe (2012) beschreibt ebenfalls die objektive Realität in Bezug auf die Interaktion von Menschen und Gebäuden und nutzt hierfür die Kategorialbereiche energetische und materielle Umgebungsbedingungen (z. B. Wärme, Wind, Schall), gebäudespezifische Merkmale (z. B. Lage des Gebäudes, Lage des Raums, Baumaterialien, Ausstattungselemente), individualspezifische Merkmale (z. B. Geschlecht, Alter, Kleidung) und Merkmale überindividueller Nutzungssysteme (z. B. Gebäudetyp, Gebäudenutzung). Heichele (2021) und Grabe (2012) verfolgen damit unterschiedliche Ansätze, in denen jedoch die gleichen Komponenten berücksichtigt werden.

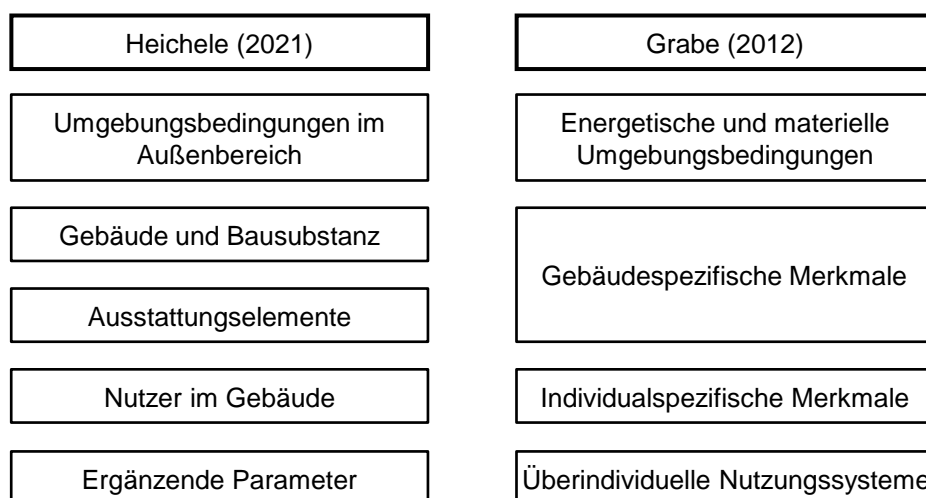


Abbildung 117: Berücksichtigte Parameter in den Gebäudemodellen nach Grabe (2012) und Heichele (2021)

An dieser Stelle bedarf es einem methodischen Einschub. Aus den beiden genannten Modellen lässt sich die objektive Realität des Menschen in einem Gebäude durch seine Umgebung, die Gebäudemerkmale sowie die Ausstattungselemente und weitere ergänzende oder überindividuelle Nutzungssysteme beschreiben. Der Nutzer im Gebäude ist letztlich die Person, auf die sich die raumphysiologische Bilanz bezieht. Zur Herleitung der Sachbilanz bedarf es demnach einem Stand des Wissens in Bezug auf die Umgebungs- und Gebäudeparameter sowie die Ausstattungselemente, welche sich auf einen Raum beziehen und somit im Folgenden als Raumparameter beschrieben werden. Im Stand des Wissens wird immer wieder eine Relation zu den beiden genannten Gebäudemodellen hergestellt, weswegen diese hier nicht weiter beschrieben werden. Der Nutzer im Gebäude sowie die ergänzenden Parameter werden an späterer Stelle näher erläutert.

6.2.2.1 Umgebungsparameter

Während Heichele (2021) zwischen den Parametern der äußeren Umgebung und den Parametern der inneren Umgebung unterscheidet, ohne Letztere im Gebäudemodell zu integrieren, beschreibt Grabe (2012) die innere und äußere Umgebung anhand der materiellen und energetischen Umgebungsbedingungen. Jedoch kamen beide Autoren zu dem Schluss, dass zwischen energetischen und materiellen Umgebungsbedingungen differenziert werden kann. Das Ergebnis in Bezug auf die äußeren Umgebungsbedingungen von Grabe (2012) mit entsprechenden Ergänzungen nach Heichele (2021) ist in der folgenden Tabelle 9 dargestellt. Zu den materiellen Umgebungsbedingungen werden solche gezählt, die überwiegend konvektiv über das Trägermedium Luft transportiert werden, während die energetischen Bedingungen immateriell sind und sich in ihrer Energieart unterscheiden. (Grabe, 2012)

Tabelle 9: Materielle und energetische Umgebungsbedingungen nach Grabe (2012) und Heichele (2021)

	Materiell	Energetisch
Grabe (2012)	Bewölkung	Temperatur
	Niederschlag	Sonnenstrahlung
	Wind	Licht
	Luftbewegung	Schall
	Luftqualität	
Heichele (2021)	Relative Luftfeuchte	Lärm
	Luftdruck	
	Verdunstung	

Anhand der Bestimmung dieser materiellen und energetischen Umgebungsbedingungen lässt sich die objektive äußere Umgebung von jedem Gebäude beschreiben. Zusätzlich zu der Art der Umgebungsbedingungen haben beide Autoren als entscheidenden Einfluss die Intensität in Abhängigkeit von Zeitkomponenten für die unterschiedlichen Bedingungen definiert. Dabei wird sowohl die zeitliche Verortung (vergangener, aktueller, zukünftiger Zustand) berücksichtigt als auch die Dauer, die Häufigkeit und die Regelmäßigkeit sowie mögliche Tages- und Jahresverläufe.

6.2.2.2 Gebäudeparameter

Zur Beschreibung der objektiven Realität, welche den Menschen in einem Gebäude umgibt, muss das Gebäude selber anhand seiner Eigenschaften erfasst werden. Diese Gebäudeeigenschaften werden im Folgenden als Gebäudeparameter beschrieben. Nach Heichele (2021) zählen hierzu die Bausubstanz der Gebäudehülle und der inneren Struktur sowie die technischen Gebäudeausstattungen, welche zentral verschaltet sind. An dieser Stelle bedarf es wiederum einem methodischen Einschub. Aufgrund der Definition der Systemgrenzen, die im Falle dieser Herleitung der mikroklimatischen Umgebung entsprechend, werden die zentral verschalteten technischen Gebäudeausstattungen an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt. Im Folgenden werden als Gebäudeparameter lediglich die Eigenschaften der Bausubstanz der Gebäudehülle sowie der inneren Struktur beschrieben.

Zu den wesentlichen Merkmalen, um sowohl die Gebäudehülle als auch die inneren Strukturen beschreiben zu können, gehören die topologischen Eigenschaften des Gebäudes. (Gessmann, 2008) Nach Grabe (2012) handelt es sich dabei um die räumliche Anordnung der Gebäudeelemente. Die Topologie des Gebäudes setzt sich nach Grabe (2012) sowie Heichele (2021) aus der Gebäudehülle, der Form und Geometrie des Gebäudes sowie der horizontalen und der vertikalen Struktur zusammen. Im Folgenden werden diese Komponenten des Gebäudes im Detail betrachtet, angefangen mit der Gebäudehülle, welche ebenfalls zur vertikalen Struktur des Gebäudes gezählt werden kann.

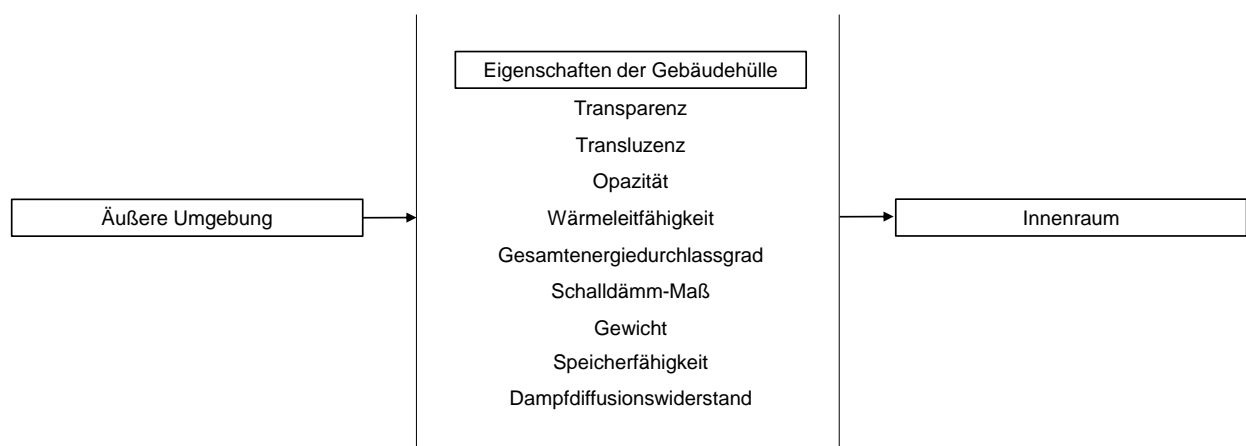


Abbildung 118: Eigenschaften der Gebäudehülle (Hegger et al., 2007)

Eine Gebäudehülle weist nach Hegger et al. (2007) eine Reihe von Eigenschaften auf, die für die Erbringung bestimmter Schutz- und Versorgungsfunktionen benötigt werden.

Die ersten drei Eigenschaften, die Transparenz, die Transluzenz und die Opazität beziehen sich alle auf die Permeabilität von Licht. Während opake Bauteile keinen Durchgang von Licht, sondern lediglich von Wärmeenergie ermöglichen, erlauben sowohl transparente als auch transluzente Bauteile den Durchgang des Lichts von der äußeren Umgebung in einen Innenraum. Zusätzlich werden nach Herzog, Krippner und Lang (2016) semitransparente Oberflächen genannt, welche dem Sonnen- oder Blendschutz dienen. Der wesentliche Unterschied zwischen transparenten oder semitransparenten und transluzenten Oberflächen ist die Möglichkeit von Durchsicht. Während transparente und semitransparente Materialien eine

Durchsicht ermöglichen, tun transluzente Materialien dies nicht, obwohl alle drei Oberflächen gleichermaßen die Lichtdurchlässigkeit ermöglichen. (Kaltenbach, 2003)

Nach der Unterscheidung der Lichtdurchlässigkeit folgt die Wärmeleitfähigkeit. Dabei handelt es sich um eine Werkstoffeigenschaft, die von der Rohdichte des verwendeten Materials abhängig ist. (Herzog, Krippner & Lang, 2016) Die Wärmeleitfähigkeit gibt an, welche Wärmemenge bei einer Temperaturdifferenz von einem Kelvin pro Sekunde durch einen 1 m³ großen Würfel des Materials strömt. Somit ist diese Eigenschaft sowohl für opake als auch lichtdurchlässige Oberflächen für die Darstellung des Wärmedurchgangs von Bedeutung. Aus der Wärmeleitfähigkeit lässt sich der Wärmedurchgangskoeffizient U-Wert eines jeden Bauteils unter Berücksichtigung der jeweiligen Schichtdicke bestimmen. Zusätzlich hierzu werden die normierten Wärmeübergangswiderstände zwischen dem Bauteil und der Luft berücksichtigt. (Hegger et al., 2007)

U-Werte für Fenster werden auf der Grundlage der DIN EN ISO 10077-1 (2020) und DIN EN ISO 10077-2 (2017) bestimmt. Dafür werden die U-Werte des Glases, des Rahmens, des Randverbundes sowie der U-Wert der Gasfüllung zwischen einzelnen Scheiben benötigt. Dieses aufwendige Verfahren kann jedoch durch die Nutzung von Herstellerangaben ersetzt werden. Die Berechnung der U-Werte der opaken Bauteile erfolgt entsprechend den Vorgaben der DIN EN ISO 6946 (2018). Für die Berechnung der U-Werte muss sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch die Dicke jeder Baustoffschicht bekannt sein. Während die Dicke den Planungsunterlagen eines Gebäudes entnommen werden kann, sind die Bemessungswerte für die Wärmeleitfähigkeit in der DIN 4108-4 (2020) und der DIN EN ISO 10456 (2010) definiert. Zusätzlich muss bei der U-Wert-Berechnung der Einfluss möglicher Wärmebrücken berücksichtigt werden, welche beispielsweise dem Beiblatt 2 der DIN 4108 (2019) entnommen werden können.

Die nächste Eigenschaft, der Gesamtenergiedurchlassgrad, bezieht sich ausschließlich auf den Wärmedurchgang durch die lichtdurchlässigen Bauteile. Der Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert beschreibt die Summe aus direkter Transmission der solaren Strahlung sowie der Abstrahlung und Konvektion der von den Glasschichten absorbierten Wärmeenergie. (Hegger et al., 2007; Hausladen, Liedl & Saldanha, 2012) Der g-Wert verändert sich in Abhängigkeit der Anzahl an Glasscheiben sowie der Beschichtungen und muss somit als Herstellerangabe mitgeliefert werden. Je kleiner der Wert, desto weniger Wärmeenergie kann von außen in den Innenraum gelangen; dabei besteht jedoch die Gefahr, dass der Strahlungsdurchgang im sichtbaren Bereich ebenfalls reduziert wird. (Hausladen, Liebl & Saldanha, 2012) Der Lichttransmissionsgrad des sichtbaren Lichts ist somit ebenfalls eine entscheidende Größe für die Erstellung der Sachbilanz, auch wenn dieser nach Hegger et al. (2007) nicht zu den Eigenschaften der Fassade gezählt wird.

Sowohl der Gesamtenergiedurchlassgrad als auch der Lichttransmissionsgrad werden für eine Reihe von unterschiedlichen Fenstern in der DIN 4108-4 (2020) aufgeführt. Daneben kann für beide Parameter ebenfalls auf Herstellerangaben und für den g-Wert zusätzlich auf vergangene und aktuelle Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnungen zurückgegriffen werden.

Als Eigenschaft zur Beschreibung der akustischen Umgebung wird nach Hegger et al. (2007) das Schalldämm-Maß genannt. Die Fassade soll die Geräusche des Außenraums dämpfen und somit verhindern, dass diese im Innenraum als störend empfunden werden. Bei der Beurteilung des

Schallschutzes von Bauteilen wird in der Bauakustik im Allgemeinen zwischen dem Luft- und dem Trittschallschutz unterschieden. Für die Beurteilung des Schallschutzes der Fassade kann der Trittschallschutz vernachlässigt werden. Um den Menschen im Innenraum wirksam vor unzumutbaren Schalleinwirkungen zu schützen, muss jedes Bauteil über ein angepasstes Schalldämm-Maß verfügen.

Das Schalldämm-Maß von Bauteilen zur Dämmung von Luftschall wird über das bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_w beschrieben. Die Anforderungen an diesen Parameter für unterschiedliche Bauteile und Gebäude werden in der DIN 4109-1 (2018) genannt. Grundsätzlich kann das Schalldämm-Maß entweder rechnerisch oder messtechnisch bestimmt werden. Die messtechnische Ermittlung der Fassadendämmung wird in der DIN EN ISO 16283-3 (2016) beschrieben. Da sämtliche Verfahren jedoch mit einem erheblichen Messaufwand verbunden sind, besteht ebenfalls die Möglichkeit der rechnerischen Bestimmung dieses Parameters. Die entsprechenden Nachweise sind in der DIN 4109-2 (2018) festgehalten. Dabei wird sich auf die dazugehörigen Bauteilkataloge DIN 4109 Teil 32 bis Teil 36 bezogen. Für den rechnerischen Nachweis müssen sowohl die Konstruktionsmerkmale als auch die Eigenschaften der verbauten Materialien bekannt sein. Sollte dies nicht der Fall sein, kann auf die Mindestanforderungen der DIN 4109-1 (2018) zurückgegriffen werden.

Das Gewicht eines Bauteils bezieht sich direkt auf das verwendete Material. So kann zwischen leichten, bspw. Holzbauweisen und schweren, bspw. Massivbauweisen unterschieden werden. Das Gewicht eines Baustoffs wird maßgeblich durch die Rohdichte bestimmt. Somit ist das Gewicht nicht nur für die Wärmeleitfähigkeit, welche von der Rohdichte abhängig ist, von Bedeutung, sondern hat ebenfalls einen Einfluss auf weitere thermodynamische Eigenschaften der Bauteile. Im Zusammenhang mit dem Gewicht der Gebäudehülle wird ebenfalls die Speicherfähigkeit, welche die Fähigkeit zur Wärmespeicherung eines Baustoffs beschreibt, genannt. Diese verändert sich in Abhängigkeit vom Gewicht oder besser der Rohdichte. Um die Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils bestimmen zu können, wird neben der Rohdichte und der Dicke des Materials die spezifische Wärmekapazität benötigt. Diese gibt an, welche Wärmemenge benötigt wird um 1 kg des betrachteten Stoffs um 1 Kelvin zu erwärmen. Je größer die spezifische Wärmekapazität, desto mehr Wärme lässt sich in diesem Baumaterial speichern. (Hegger et al., 2013)

Als letzte Eigenschaft zur Beschreibung der Gebäudehülle bleibt somit der Dampfdiffusionswiderstand. Dieser ist das Maß für die Dampfdichtheit von Baustoffen und dient als Vergleichszahl. Der Widerstand beschreibt, um wie viel der Wasserdampfdiffusionswiderstand des betrachteten Materials größer ist als der in einer gleich dicken Luftschicht. Der Dampfdiffusionswiderstand vieler Baustoffe verändert sich in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchte, wodurch als Materialkennwerte häufig ein oberer und ein unterer Grenzwert angegeben werden. (Hegger et al., 2013) Der Dampfdiffusionswiderstand muss innerhalb einer Konstruktion von innen nach außen abnehmen, da sich ansonsten Kondensat im Bauteil ansammeln kann. (Herzog, Krippner & Lang, 2016) Eine solche Feuchtigkeitsansammlung kann die thermodynamischen Eigenschaften der Baumaterialien verschlechtern.

Analog zur Wärmeleitfähigkeit sind die Wärmespeicherfähigkeit und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in der DIN EN ISO 10456 (2010) für eine Reihe von Baumaterialien aufgelistet. Letztere wird ebenfalls in den DIN 4108-4 (2020) neben der Wärmeleitfähigkeit für eine Reihe von Baustoffen genannt.

Mithilfe dieser Eigenschaften muss die äußere Gebäudehülle die in Abbildung 119 genannten Schutzfunktionen erfüllen. Ausgegraut wurden die Funktionen, die ein Gebäude zwar im Allgemeinen erfüllen muss (z. B. Einbruchschutz) oder erfüllen kann (z. B. solare Stromgewinne), die jedoch im Rahmen der raumphysiologischen Bilanz keine Relevanz haben.

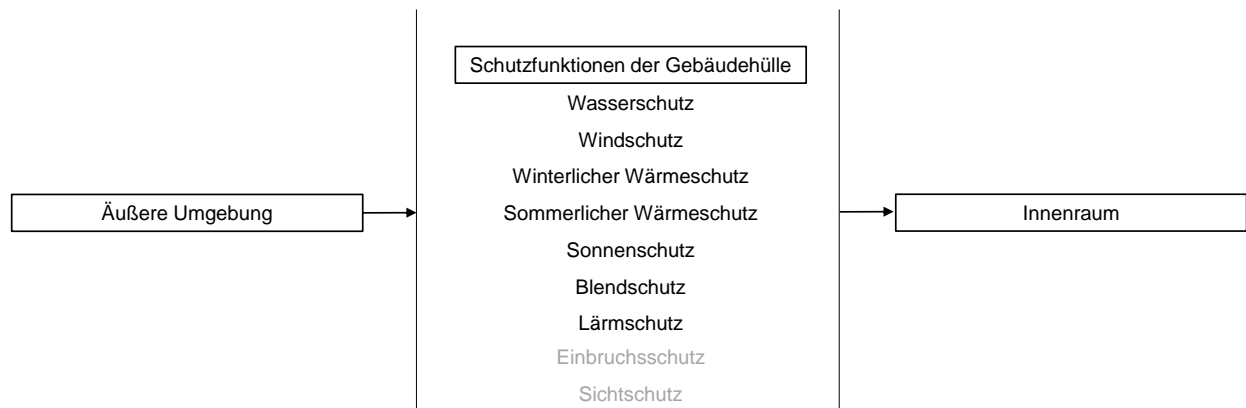


Abbildung 119: Schutzfunktionen der Gebäudehülle (Hegger et al., 2007)

Um mögliche weitere relevante Eigenschaften für die Erstellung der Sachbilanz zu identifizieren, werden die Schutzfunktionen im Folgenden im Detail betrachtet. Es lässt sich feststellen, dass nicht alle Schutzfunktionen mithilfe der Eigenschaften der Gebäudehülle abgebildet werden können. Die Wasserschutzfunktion kann hauptsächlich auf den Durchgang von Feuchte, welcher durch den Wasserdampfdiffusionswiderstand beschrieben wird, bezogen werden. Zusätzlich wird hierunter der Schutz vor Regen und insbesondere Schlagregen verstanden. Die Windschutzfunktion wurde mit keiner der genannten Eigenschaften beschrieben. In Bezug auf die raumklimatische Umgebung im Referenzraum ist hier die Luftdichtheit des Gebäudes zu nennen.

Die Luftdichtheit eines Gebäudes kann anhand von zwei verschiedenen Parametern dargestellt werden, zum einen durch die Luftdichtheit bei einer Druckdifferenz von 50 Pascal n_{50} und zum andern durch den natürlichen Luftwechsel. Beide Parameter können sowohl anhand eines messtechnischen Verfahrens ermittelt werden, als auch anhand von geforderten Normwerten geschätzt werden. Die DIN EN ISO 9972 (2018) gibt das Messverfahren des *Blower-Door-Tests* zur Bestimmung der Luftdichtheit von Gebäuden vor. Dabei wird sich jedoch nicht auf einzelne Räume, sondern auf sämtliche Räume, die innerhalb der thermischen Hüllfläche liegen, bezogen. Daneben stellt die DIN 4108-7 (2011) die Anforderung, dass bei Gebäuden ohne raumluftechnische Anlagen ein n_{50} -Wert von 3.0 h^{-1} und bei Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen ein n_{50} -Wert von 1.5 h^{-1} nicht überschritten wird. Ausgehend von der Luftdichtheitsmessung kann die rechnerische Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels entsprechend der DIN 1946-6 (2019) erfolgen. Wurde keine Luftdichtheitsmessung durchgeführt, dann kann der Infiltrationsluftwechsel anhand der von der DIN 4108-7 (2011) geforderten n_{50} -Werte angenommen und vereinfacht nach der DIN 1946-6 (2019) berechnet werden. Für die Berechnung werden zusätzlich das Gebäudevolumen sowie fünf Korrekturfaktoren für den Gebäudestandort, die Gebäudelage, die Höhe der Nutzungseinheit über Grund, die Fassadenanzahl für einseitig-orientierte Nutzungseinheiten sowie der

Korrekturfaktor für den Einfluss des thermischen Auftriebs benötigt (Tabelle 8, DIN 1946-6, 2019). Neben der mathematischen Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels kann entsprechend den Vorgaben der VDI 4300 (2001), eine Tracergas-Messung zur messtechnischen Bestimmung des Infiltrationsluftwechsels durchgeführt werden.

Sowohl der winterliche als auch der sommerliche Wärmeschutz sind durch die thermodynamischen Eigenschaften der Gebäudehülle beschrieben worden. Dahingegen wurden der Sonnen- und Blendschutz noch nicht vollständig dargestellt. Sonnenschutzvorrichtungen sind außenseitig am Gebäude am wirkungsvollsten, da auf diese Weise der Energieeintrag über die strahlungsdurchlässigen Schichten reduziert wird. Zum außenseitigen Sonnenschutz lassen sich unterschiedliche Systeme nutzen, z. B. Auskragungen zum Ausblenden oder zur Reflexion von Tageslicht in den Raum, Lamellenstrukturen zum Ausblenden oder zur Reflexion, Abdeckungen oder Filter durch Perforation. Außerdem kann zwischen starren und veränderbaren Elementen unterschieden werden. Während die Sonnenschutzsysteme vor der Überhitzung schützen, dienen die Blendschutzsysteme der Vermeidung von visuellen Störeinflüssen. Der Blendschutz muss zwingend windgeschützt angebracht werden, damit die Sehaufgabe des Menschen auch bei starkem Wind nicht beeinträchtigt wird. Somit wird dieser immer raumseitig oder im Fassadenzwischenraum angeordnet. (Herzog, Krippner & Lang, 2016)

Der Gesamtenergiedurchlassgrad, der Lichttransmissionsgrad und der Wärmedurchgangskoeffizient können sich bei der Nutzung eines Sonnen- oder Blendschutzsystems verändern. Diese Veränderung ist abhängig von der Art des Systems. Hierbei spielen insbesondere die Materialeigenschaften eine Rolle. Während beispielsweise ein Rollladen aus Holz, Metalljalousien oder Stoffrollos den U-Wert wesentlich verändern können, ist der Einfluss auf die Veränderung des U-Werts beispielsweise bei einem System mit leichtem Material vernachlässigbar gering. Die Messung des veränderten Gesamtenergiedurchlassgrads und des Lichttransmissionsgrads erfolgt auf der Grundlage der DIN EN 14500 (2021). Für die vereinfachte Berechnung auf der Grundlage von Standardwerten kann auf die DIN CEN ISO/TR 52022-2 (2018) zurückgegriffen werden. Diese beinhaltet ebenfalls die Berechnungswerte zur Bestimmung eines veränderten U-Werts.

Neben den genannten Schutzfunktionen muss eine Gebäudehülle Versorgungsfunktionen erfüllen. Hegger et al. (2007) nennen als Versorgungsfunktionen die Beleuchtung, die Belüftung, der Ausblick, der Einblick, passive und aktive Wärmegewinne sowie solare Stromgewinne. Für die raumphysiologische Bilanz sind lediglich die Beleuchtung und die Belüftung relevant, welche bereits im Zusammenhang mit den Eigenschaften der Gebäudehülle und den Schutzfunktionen thematisiert wurden.

Somit wurden sämtliche Eigenschaften und Funktionen der Fassade als Bestandteil der Gebäudehülle, die nach Hegger et al. (2007) identifiziert werden können, dargestellt. Es gibt dennoch zwei weitere Eigenschaften der raumabgrenzenden Flächen, die für die Beschreibung des Referenzraums benötigt werden. Hierbei handelt es sich um den Schallabsorptionsgrad und den Lichtreflexionsgrad. Beide haben keinen direkten Bezug zu der Fassade an sich, ergeben sich jedoch aus den Eigenschaften der raumzugewandten Oberflächen. Aus den Schallabsorptionsgraden, die sich für jede Oberfläche bestimmen lassen, kann die Nachhallzeit des Raums beschrieben werden. (Ganslandt & Hofmann, 2012) Jede raumabgrenzende Fläche muss mit ihrem Schallabsorptionsgrad erfasst werden. Entsprechende Werte für unterschiedliche Oberflächen finden sich in der DIN 18041 (2016) und der DIN

EN 12354-6 (2004). Ausgehend von den Schallabsorptionsgraden der einzelnen Oberflächen kann die Nachhallzeit bestimmt werden. Die hierfür benötigten Berechnungsgrundlagen finden sich ebenfalls in der DIN EN 12354-6 (2004). Die Nachhallzeit kann auch ohne die Absorptionsgrade der einzelnen Flächen messtechnisch entsprechend dem Vorgehen der DIN EN ISO 3382-2 (2008) bestimmt werden.

Der Lichtreflexionsgrad kann ebenfalls zur Beschreibung der inneren Oberflächen genutzt werden und wirkt sich maßgeblich auf die Verteilung des Lichts im Raum aus. (Ganslandt & Hofmann, 2012) In Bezug auf den Lichtreflexionsgrad fordert die DIN 5034-1 (2021) einen Reflexionsgrad von mindestens 0.7 für die Decke, 0.5 für die Wände und 0.2 für den Fußboden. Liegen keine exakten Werte vor, kann auf durchschnittliche Reflexionsgrade von Baustoffen und Farbanstrichen z. B. nach Ganslandt und Hofmann (2012) zurückgegriffen werden.

Nach Heichele (2021) und Grabe (2012) sind neben der Gebäudehülle die Form und die Geometrie des Gebäudes für die Beschreibung der Topologie des Gebäudes entscheidend. Die innere Struktur eines Gebäudes lässt sich auf der horizontalen Ebene durch die einzelnen Räume und Flure strukturieren, während die vertikale Struktur sich durch die einzelnen Geschosse sowie die Treppenhäuser und Aufzugsschächte ergibt, die diese miteinander verbinden.

Die vertikale Struktur kann somit durch die Gebäudehülle oder durch die innen liegenden Trennwände beschrieben werden. Entsprechend den Eigenschaften der Gebäudehülle haben auch innere Trennwände gewisse Eigenschaften. Jedoch werden für gewöhnlich an Innenwände ausschließlich Anforderungen an den Brandschutz und den Schallschutz gestellt. Da der Brandschutz in der raumphysiologischen Bilanz keine Relevanz hat, kann dieser vernachlässigt werden. Um den Schallschutz zu beschreiben, wird wiederum das Schalldämm-Maß verwendet. Trennt eine Wand einen beheizten von einem unbeheizten Raum, werden zusätzlich Anforderungen an den Wärmeschutz gestellt. Auch diese können entsprechend den Anforderungen an die Gebäudehülle mit dem U-Wert der Innenwand beschrieben werden. (Tichelmann & Ziegler, 2013)

Die horizontale Struktur eines Gebäudes wird durch Decken, Böden, das Dach und die Bodenplatte beschrieben. Im Gegensatz zu den vertikalen Flächen wird für die Erfassung des Schallschutzes von Decken nicht nur die Luftschalldämmung, sondern zusätzlich die Trittschalldämmung beschrieben. Das Maß für die Bewertung der Schalldämmung bleibt jedoch das Schalldämm-Maß. Das Schalldämm-Maß wird an der Oberseite der Decke, also dem Raum oberhalb des Referenzraums, gemessen. (Tichelmann & Ziegler, 2013) Während die Luftschalldämmung über das bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_w beschrieben wird, wird die Trittschalldämmung für Decken durch den bewerteten Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ beschrieben. Die Anforderungen für beide Parameter werden ebenfalls in der DIN 4109-1 (2018) genannt. Die messtechnische Ermittlung ist für die Luftschalldämmung in der DIN EN ISO 16283-1 (2018) und für die Trittschalldämmung in der DIN EN ISO 16283-2 (2020) festgehalten. Zudem können der DIN 4109-1 (2018) Mindestanforderungen für den Trittschallschutz und den Luftschallschutz entnommen werden. Trennt eine Decke zudem einen beheizten von einem unbeheizten Raum, kann der Wärmeschutz wiederum über den U-Wert beschrieben werden.

Für Böden gilt ebenfalls der Grundsatz, dass sowohl der Brandschutz als auch der Schallschutz wichtiger sind als der Wärmeschutz, außer in dem bereits bei den Wänden und Decken genannten Fall. Böden erfüllen ebenfalls die Funktion des Luft- und Trittschallschutzes. (Tichelmann & Ziegler, 2013)

Das Dach als oberer Gebäudeabschluss ist ein wesentlicher Bestandteil der Gebäudehülle und erfüllt als Außenhaut eines Gebäudes unterschiedliche Aufgaben. Die wichtigste Funktion besteht darin, den darunterliegenden Raum vor Witterungseinflüssen zu schützen. In Abhängigkeit von den Anforderungen, die sich aus den klimatischen Verhältnissen und der Nutzung ergeben, können unterschiedliche Dachformen und Konstruktionen genutzt werden. Bei der Aufgliederung des Parameters „Dach“ in übersichtliche Kategorien entsteht die wichtigste Unterscheidung bei der Dachform. Hier wird zwischen dem geneigten Dach und dem Flachdach unterschieden. Im Wesentlichen gilt die Regel, dass es sich ab einer Dachneigung von 5° um ein geneigtes Dach handelt. (Brotrück, 2017)

Dächer, unterhalb denen sich beheizte Räume befinden, müssen eine Wärmeschutzfunktion erfüllen. Diese kann wiederum mit der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke der einzelnen Schichten, also dem U-Wert, beschrieben werden. (Bludau & Künzel, 2010) Darüber hinaus müssen Dächer die Anforderungen an den Feuchteschutz erfüllen. Hier wird wie bei der Gebäudehülle die Eigenschaft des Dampfdiffusionswiderstands genutzt. (Künzel, 2010) Neben diesen beiden Anforderungen müssen begehbare Flachdächer zusätzlich die Funktion des Trittschallschutzes erfüllen und somit mit dem Schalldämm-Maß und dem Trittschallpegel beschrieben werden. (Leistner & Weber, 2010) Zusätzlich müssen mögliche transparente Flächen innerhalb der Dachflächen berücksichtigt werden, weswegen analog zur vertikalen äußeren Gebäudehülle zwischen opaken und transparenten Flächen unterschieden werden muss. Als beispielhafte Ausstattung für das Dach werden Lichtlenksysteme mit aufgeführt, welche das Licht im Dachbereich bündeln und einem bestimmten Raum innerhalb des Gebäudes zuführen. (Haas-Arndt & Ranft, 2007)

Als letzte Komponente der horizontalen Gebäudestruktur bleibt die Bodenplatte. Anders als Bauteile, die sich oberhalb des Bodenniveaus befinden, sind erdberührende Bauteile Erddrücken, hydrostatischen Drücken und einer besonderen Feuchtelast ausgesetzt. Neben den statischen Anforderungen ergeben sich zusätzlich Anforderungen an die Fugenarmut und die Abdichtungsart. Die Anforderungen an solche Bauteile weichen deutlich von denen an luftberührende Bauteile ab. Außenwände und Bodenplatten werden durch ständig wirkende Bodenfeuchte beansprucht. Zusätzlich gibt es eine Beanspruchung durch den Erddruck, der den außenseitigen Aufbau unter Pressung setzt, sowie die Gefahr der mechanischen Beanspruchung, die sowohl durch den Erddruck als auch durch das Vorhandensein von scharfkantigen Bodenbestandteilen hervorgerufen wird. Der letzte wesentliche Unterschied besteht darin, dass aufgrund der Sättigungsdrücke die Wasserdampfdiffusion nur zum Innenraum hin möglich ist. (Moro, 2019a) Unabhängig von der konstruktiven Ausführung der erdberührenden Bauteile müssen diese immer das Eindringen von Feuchtigkeit verhindern. Somit ist eine entscheidende Eigenschaft der Bodenplatte der Dampfdiffusionswiderstand. Grenzt die Bodenplatte zudem an einen beheizten Raum, muss zusätzlich die Wärmedämmfähigkeit als Eigenschaft berücksichtigt werden. Somit müssen diese beiden Eigenschaften für die Beschreibung der Bodenplatte erfasst werden. (Moro, 2019b) Die gleichen Eigenschaften müssen für Außenwände im Erdreich, welche der vertikalen Struktur des Gebäudes zuzuordnen sind, berücksichtigt werden.

6.2.2.3 Raumparameter

Als Raumparameter werden Ausstattungselemente definiert, die in ihrem Zustand variabel und einstellbar sind, wodurch sie sich sowohl in ihrem Zustand als auch in ihren Eigenschaften von den anderen Bestandteilen des Raums unterscheiden. (Grabe, 2012) Dies kann nach Heichele (2021) dadurch begründet werden, dass die Bedieneinheiten solcher Ausstattungselemente an der raumzugewandten Seite der Außenfassade aufzufinden sind.

Nach Heichele (2021) und Grabe (2012) lassen sich für sämtliche regulativen Ausstattungselemente eine Reihe von Merkmalen definieren, hierzu zählen die Art des Systems, die Position sowohl des betrachteten Systems als auch der Bedieneinheit, die Dimension, mögliche Schäden des Systems, die Zugänglichkeit sowie der aktuelle Zustand zum Zeitpunkt der Sachbilanz. Des Weiteren müssen die Art und die Anzahl der Leistungsstufen bei Ausstattungselementen mit einem Energieumsatz sowie die Art und Anzahl der einstellbaren Zustände bei Ausstattungselementen ohne Energieumsatz beschrieben werden.

An dieser Stelle bedarf es wiederum eines methodischen Einschubs. Um nicht alle Raumparameter im Stand des Wissens zu beschreiben, werden lediglich solche abgebildet, die einen Einfluss auf die beschriebenen Elementarströme haben können. Hierzu zählen im wesentlichen Ausstattungselemente zur Raumkonditionierung sowie zur Beleuchtung. Systeme zum Schallschutz bspw. Schallabsorber sind in ihrem Zustand nicht veränderbar und entsprechen damit nicht der Definition der Raumparameter.

Zur Raumkonditionierung werden alle Ausstattungselemente gezählt, die einen Raum mit ausreichend Frischluft und Wärme oder Kälte versorgen sowie für eine angenehme Luftfeuchtigkeit sorgen. (Jung, Rössel & Steinwallner, 2009) Angefangen mit der Lüftung, welche die Luftqualität im Innenraum maßgeblich bestimmt. Als Lüftungssysteme können neben der natürlichen Lüftung, Abluftanlagen, Zu- und Abluftanlagen, eine Mischlüftung, eine Quellaufströmung oder eine Verdrängungslüftung genutzt werden. Somit kann die Lüftung sowohl ohne als auch mit Energieumsatz erfolgen. Jedes dieser Systeme ist auf unterschiedliche Raumnutzungen ausgelegt, welche nach Jung, Rössel und Steinwallner (2009) beschrieben werden. Wie gut ein Raum durchlüftet wird, lässt sich letztendlich anhand der Luftwechselzahl beschreiben, welche von dem Zustand der einzelnen Systeme abhängig ist. Während die mechanischen Lüftungsanlagen anhand ihrer Leistungsstufen reguliert werden, können Fenster zur natürlichen Lüftung in ihrem Zustand verändert werden. Nach Bonfig (2015) können Fenster oder Fensterflügel gedreht, gewendet, gekippt, geklappt, geschwungen, horizontal oder vertikal verschoben und ausgestellt werden. Die zweite wichtige Komponente der Raumkonditionierung ist die Regulierung der Temperatur; dabei kann zwischen der Heizung und der Kühlung unterschieden werden. Bei den Heizungssystemen lassen sich nach Jung, Rössel und Steinwallner (2009) unterschiedliche Arten von Wärmeübergabesystemen in Abhängigkeit von der Art der Wärmeübergabe, Strahlung oder Konvektion, unterscheiden. Es wird zudem differenziert zwischen den Einzelfeuerstätten, den Flachheizkörpern, den Radiatoren, den Konvektoren, den Flächenheizungen, der Betonkernaktivierung, der Deckenstrahlplatte und der Luftheizung. Auch hier gilt, dass sich die Systeme unterschiedlich gut für die Nutzung in verschiedenen Räumen eignen. Ein wichtiger Punkt in Bezug auf die Veränderbarkeit der Systeme ist ihre Regelbarkeit. Nach Jung, Rössel und Steinwallner (2009) sind alle Systeme bis auf die Flächenheizungen und die Betonkernaktivierung gut regelbar. Flächenheizungen sind dagegen sehr träge, wodurch sich die Gesamttemperatur schwer regeln

lässt. Betonkernaktivierungen unterliegen der Selbstreglung, sodass der Mensch hier keinen Einfluss darauf hat.

Systeme, die zur Kühlung von Innenräumen dienen, lassen sich ähnlich der Heizsysteme durch ihre Art der Kälteübergabe unterscheiden. Jung, Rössel und Steinwallner (2009) nennen als mögliche Systeme die Kühldecke, die Betonkernaktivierung, die Flächenkühlung, die Fallstromkühlung, die Kühlung mittels Induktionsgeräte, die Umluftkühlung und Klimaanlage (Luftkühlung). Auch hier gilt für alle Systeme bis auf die Flächenkühlung und die Betonkernaktivierung, dass diese sehr gut regulierbar sind.

Die nach Jung, Rössel und Steinwallner (2009) genannten Systeme können durch den Ventilator ergänzt werden. Bei diesem handelt es sich nicht direkt um ein System zur Kühlung und dennoch werden Ventilatoren in Innenräumen genutzt, um das Temperaturempfinden durch eine gesteigerte Luftbewegung bei hohen Temperaturen zu senken. Zusätzlich wird der Klimabrunnen ergänzt. Dabei handelt es sich um ein vertikales Flächenelement, das in einem Raum platziert werden kann und über welches temperiertes Wasser fließt. Dieses System kann sowohl zur Kühlung als auch zu Be- und Entfeuchtung der Raumluft genutzt werden. (Grimme et al., 2018)

Der nächste Parameter, der zur Raumkonditionierung gezählt werden kann und durch die Klimaanlage und den Klimabrunnen bereits angesprochen wurde, ist die Be- und Entfeuchtung der Raumluft. Da eine Klimaanlage stets alle vier Luftbehandlungsfunktionen kombiniert, ist in diesem Fall ein Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit im Raum gewährleistet. Handelt es sich jedoch nur um eine Teil-Klimaanlage, welche lediglich zwei oder drei der vier Luftbehandlungsfunktionen erfüllt, dann kann es sich in diesem Fall um eine Anlage handeln, die keinen Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit hat. (Pistohl, Rechenauer & Scheuerer, 2013) Es gibt eine Reihe von unterschiedlichen Be- und Entfeuchtungssystemen, die Bestandteil der raumluftechnischen Anlagen sein können (z. B. Verdunstungsluftbefeuchter, Zerstäubungsluftbefeuchter, Dampfsluftbefeuchter, Luftentfeuchtung durch Adsorption oder Absorption). (Albers, 2015) Neben der Luftbe- oder Luftentfeuchtung, welche in eine raumluftechnische Anlage integriert ist, gibt es weitere Einzelsysteme. Beispielsweise ist hier der bereits erwähnte Klimabrunnen zu nennen.

Ebenfalls relevant für die Raumkonditionierung und die Innenraumbeleuchtung sind bewegliche Sonnen- und Blendschutzsysteme. Sonnenschutzsysteme ermöglichen es, die solaren Wärmegewinne im Sommer zu reduzieren und dennoch ausreichend Tageslicht in den Raum zu lassen. (Mandalaki & Tsoutsos, 2020) Als bewegliche Systeme werden beispielsweise Jalousien, Rollos oder Falldäden genutzt. Im Gegensatz zum Sonnenschutz wird der Blendschutz nicht für die Raumkonditionierung, sondern zur Gewährleistung der Lichtqualität, der Lichtquantität sowie zur Vermeidung von zu hohen Leuchtdichtekontrasten eingesetzt. Solche Systeme können in ihrem Zustand verändert werden, in dem sie entweder geschoben, senkrecht zur Fassadenebene ausgestellt, gedreht, gefaltet, gerafft oder gerollt werden. Dabei wird zusätzlich unterschieden, ob es sich um eine horizontale, eine vertikale oder eine zirkuläre Veränderung handelt. (Herzog, Krippner & Lang, 2016)

Für die künstliche Beleuchtung von Innenräumen werden üblicherweise Leuchtmittel eingesetzt, welche einen der vier Vorgänge Temperaturstrahlung (Glühlampe), Gasentladung (Entladungslampe), Bestrahlung von Leuchtstoffen (Leuchtstofflampe) oder elektrische Entladung in Halbleitern (LED) nutzen. Die dazugehörigen Leuchten dienen nicht nur zur Halterung der Lampen und zur Stromzuführung, sondern ebenfalls zur Lenkung des Lichtstroms und zur Vorbeugung von Blendung. Lampen lassen sich anhand

ihrer Beleuchtungsmethode unterscheiden. Es kann zwischen der direkten, vorwiegend direkten, gleichförmigen, vorwiegend indirekten und indirekten Beleuchtungsmethode differenziert werden. (Krimmling et al., 2014)

Tabelle 10: Beleuchtungsmethoden von Lampen und beispielhafte Montagearten (Krimmling et al., 2014)

Beleuchtungsmethode	Lage im Raum / Montageart
Direkt	Deckeneinbauleuchte mit Spiegelraster Pendel- oder Hängeleuchte mit verspiegeltem Parabolreflektor Arbeitstischlampe
Vorwiegend direkt	Deckenanbauleuchte mit Trübglassabdeckung
Gleichförmig	Pendelleuchte mit Trübglasskugel oder Papierkugel
Vorwiegend indirekt	Standleuchte mit nach oben gerichtetem, teilverspiegeltem Glasreflektor Wandleuchte mit flachem, diffus reflektierendem Schirm
Indirekt	Wandleuchte mit nach oben gerichtetem Spiegelreflektor und Klarglassabdeckung

6.3 Herleitung der Anwendung der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz

Die Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanzierung lässt sich im Gegensatz zur Sachbilanz in der Ökobilanzierung in drei Teile untergliedern. Das Ziel des ersten Abschnitts ist die Generierung eines Sachbilanzmodells, welches die, bei der Herleitung der Wirkungsabschätzung, definierten neun physikalischen Elementarströme (Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte, Luftdruck, CO₂-Konzentration, Emissionsspektrum der Lichtquelle, Schalldruckpegel, Frequenz) entsprechenden Umgebungs-, Gebäude- und Raumparametern zuordnet, die einen Einfluss auf diese Elementarströme haben. Der zweite Teil dient zur Darstellung der Person, für die die Wirkungsabschätzung durchgeführt wird und der dritte Teil beschreibt weitere ergänzende Parameter, die die beiden vorherigen Sachbilanzteile beeinflussen können, jedoch keinem Abschnitt direkt zuzuordnen sind. Der erste Abschnitt der Sachbilanz sowie die Erstellung des Sachbilanzmodells werden in Kapitel 6.3.1, der Zweite in Kapitel 6.3.2 und der Dritte in Kapitel 6.3.3 dargestellt.

Das folgende Unterkapitel dient der Übertragung der im Stand des Wissens beschriebenen sechs Arbeitsschritte zur Erstellung einer Sachbilanz auf das Vorgehen in der raumphysiologischen Bilanz. Ähnlich dem Vorgehen in der Ökobilanzierung sollen in einem ersten Schritt die relevanten Bestandteile des Sachbilanzmodells in der raumphysiologischen Bilanz identifiziert werden. Um die zu den Elementarströmen beitragenden Auslöser zu identifizieren, muss die objektive Realität, welche den Menschen umgibt, beschrieben werden.

Die Modelle nach Heichele (2021) und Grabe (2012) können als Grundlage für die Eingliederung der für die Sachbilanz benötigten Realitätskomponenten sowohl in das Hintergrund- als auch das Vordergrundsystem und dessen Hierarchie dienen.

Heichele (2021) nennt die Umgebungsbedingungen im Außenbereich, während Grabe (2012) die gleichen Parameter in der Kategorie energetische und materielle Umgebungsbedingungen sowie in der Kategorie der gebäudespezifischen Merkmale berücksichtigt. Da sich das Hintergrundsystem nicht wie bei der Ökobilanzierung auf Hintergrundprozesse bezieht, sondern auf physikalische Hintergrund-Komponenten, die einen Einfluss auf die erweiterte raumklimatische Umgebung innerhalb des Referenzraums haben, auf welche der Mensch keinen Einfluss nehmen kann, erscheint es sinnvoll, sämtliche Umgebungsparameter einer Kategorie zuzuordnen, welche dem Hintergrundsystem entspricht. Die Umgebungsparameter beschreiben somit die äußere Umgebung des Gebäudes. Hierbei werden sowohl beschreibende Parameter als auch energetische und materielle (quantitative) Parameter berücksichtigt. Wie weit die Umgebung des Gebäudes in einer weiter übergeordneten ausgedehnten Umgebung zu betrachten ist, wird von den im Untersuchungsrahmen festgelegten Systemgrenzen definiert. Entsprechend den definierten Systemgrenzen, welche um den Referenzraum verlaufen, muss neben dem äußeren Hintergrundsystem zusätzlich das innere Hintergrundsystem erfasst werden. Dieses beschreibt im Wesentlichen die gleichen Größen die im äußeren Hintergrundsystem erfasst werden müssen, bezieht sich jedoch auf die Umgebung innerhalb des Gebäudes, in den an den Referenzraum angrenzenden Innenräumen.

Anschließend an das Hintergrundsystem folgen die Level 0 Prozesse des Vordergrundsystems. Diese beschreiben Prozessmodule, die den Referenzfluss als Produktausgabe haben (Bjorn et al., 2018b). Da in der raumphysiologischen Bilanz keine Referenzflüsse, sondern Referenzräume betrachtet werden und diese im weitesten Sinne als Ausgabe von Gebäuden verstanden werden können, werden im Vordergrundsystem auf Level 0 sämtliche Gebäudeparameter berücksichtigt. Diese entsprechen nach Heichele (2021) der Kategorie des Gebäudes und dessen Bausubstanz und nach Grabe (2012) der Kategorie der gebäudespezifischen Merkmale und Merkmale überindividueller Nutzungssysteme. In der Kategorie der Gebäudeparameter werden demnach sämtliche Parameter berücksichtigt, die das Gebäude und dessen materialspezifische Eigenschaften beschreiben.

Anschließend werden die Level-1-Parameter aufgeführt. Nach Bjorn et al. (2018b) handelt es sich hierbei um Prozesse, deren Outputs physisch im Referenzfluss verankert sind. Entsprechend der Definition des Referenzraums handelt es sich bei den Level-1-Parametern um alle Realitätskomponenten die Bestandteil des Raums sind. Hierbei ist es wichtig, eine klare Unterscheidung zwischen den Level-0- und den Level-1-Parametern zu definieren. Sämtliche Gebäudeparameter werden als unveränderlich definiert, während sämtliche Raumparameter als veränderlich definiert werden. Somit müssen beispielsweise die Materialeigenschaften eines Fensters (U-Wert, g-Wert) sowie die Größe und die Form, welche unveränderlich sind, bei den Level-0-Parametern erfasst werden, während die möglichen Positionsänderungen des Fensters bei den Level-1-Parametern berücksichtigt werden. Nach Heichele (2021) zählen zu den Level-1-Parametern die Ausstattungselemente und nach Grabe (2012) sowohl gebäudespezifische Merkmale als auch energetische und materielle Merkmale. Diese letzte Kategorie der energetischen und materiellen Merkmale entspricht den Elementarströmen, die im Referenzraum gemessen werden müssen. Somit werden diese ebenfalls zur Sachbilanz gezählt, müssen jedoch auf eine andere Weise erfasst werden, wie die Komponenten, welche für die Entstehung der Elementarströme verantwortlich sind.

In Bezug auf die Level-2-Parameter beschreiben Bjorn et al. (2018b), dass es sich hierbei um Prozesse handelt, die eine unterstützende Funktion für die Prozessmodule haben, welche den Referenzfluss als Ausgabe haben. Damit ein Gebäude überhaupt eine Bedeutung hat, braucht es Nutzer in diesem Gebäude. Aus diesem Grund zählen zu den Level-2-Parametern sämtliche individuellen Parameter, die für die Durchführung der Wirkungsabschätzung benötigt werden. In diesem Fall herrscht Einigkeit zwischen der Kategorie Nutzer im Gebäude von Heichele (2021) und nutzerspezifische Merkmale von Grabe (2012). Sämtliche Kategorialbereiche nach Grabe (2012) wurden somit in der Prozess-Hierarchie berücksichtigt, einzig die Kategorie der ergänzenden Parameter nach Heichele (2021) wurde in keine der Parameter-Kategorien integriert. Entsprechend der Hierarchie der Ökobilanzierung werden diese Parameter als Level-3-Parameter bezeichnet, weil diese lediglich eine unterstützende Wirkung haben. Auf dieser Ebene befinden sich sämtliche Parameter, die für die Sachbilanz relevant sind, jedoch entsprechend der Definition keiner der vorherigen Kategorien zugeordnet werden können. Level 4 Parameter wird es in der raumphysiologischen Bilanz nicht geben. Anzumerken ist, dass nach Bjorn et al. (2018b) in den meisten Fällen die Prozesse der 3. und 4. Ebene nicht mit in die Sachbilanz aufgenommen werden, da diese zu wenig Relevanz für das Gesamtergebnis haben. Aus diesem Grund erscheint es vertretbar, dass es in der raumphysiologischen Bilanz keine Level-4-Parameter gibt und die Level-3-Parameter sich lediglich auf ergänzende Parameter beziehen.

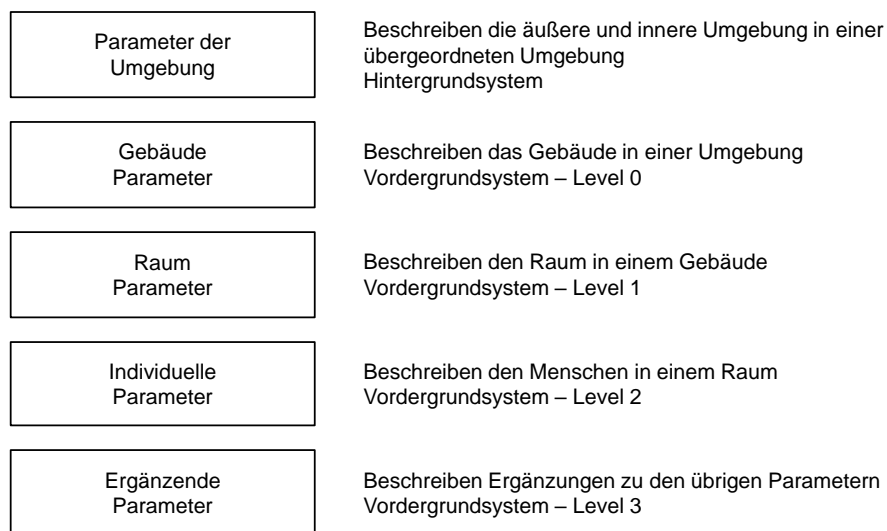


Abbildung 120: Kategorisierung der relevanten Parameter für die Sachbilanz

Der Aufbau der Sachbilanz kann sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsszenario unterscheiden. An dieser Stelle werden deswegen zwei mögliche Anwendungsszenarien definiert. Eine raumphysiologische Bilanz kann entweder zum Zweck der Optimierung von Gebäuden / Räumen oder zum Vergleich von einzelnen Gebäuden / Räumen durchgeführt werden.

Anhand der unterschiedlichen Anwendungsszenarien lässt sich beschreiben, welche Parameter in der Sachbilanz erfasst werden müssen. So macht es beispielsweise bei der Optimierung eines Bestandsgebäudes keinen Sinn, die Parameter des Levels 0 sowie die Hintergrundparameter zu erfassen. Erstere lassen sich nicht ohne baulichen Aufwand verändern, und Letztere wären lediglich eine

Zusatzinformation, deren Relevanz im Einzelfall abgewogen werden muss. Viel entscheidender sind für dieses Anwendungsszenario die Level-1-Parameter, welche verändert werden können und wodurch möglicherweise die Auswirkungen auf den Menschen im Innenraum reduziert werden.

In diesem Zusammenhang muss eine weitere Unterscheidung bezüglich der Anwendungsszenarien erfolgen. Soll ein Bestandsgebäude optimiert werden, dann soll dies im besten Fall für den tatsächlichen Nutzer und nicht für eine Standardperson erfolgen. Sollen jedoch Bestandsgebäude miteinander verglichen werden, dann muss sich die raumphysiologische Bilanz auf dieselbe Person beziehen, da ansonsten keine Vergleichbarkeit gewährleistet werden kann. Somit muss in diesem Fall auf eine standardisierte Person zurückgegriffen werden. Die unterschiedlichen Szenarien sowie die zu berücksichtigenden Sachbilanzparameter werden im Folgenden ausführlich erläutert. Für das Szenario der Optimierung muss dafür zusätzlich zwischen der Ausgangssituation und der möglichen Anpassungssituation unterschieden werden. Dieses Anwendungsszenario ist in Abbildung 121 dargestellt. Grundlegend gilt, dass das Hintergrundsystem die Level-0-Parameter beeinflusst, welche wiederum gemeinsam die Level-1-Parameter und letztlich die Level-2-Parameter, also den Menschen beeinflussen, in dem Sinne, dass sie sich auf ihn auswirken. Die Level-3-Parameter haben eine Sonderstellung, die übergeordnet zu betrachten ist, da diese auf sämtliche anderen Parameter-Level einen Einfluss haben können.

Für Szenario 1 - die Optimierung eines Bestandsgebäudes - gilt, dass sämtliche Parameter des Hintergrundsystems sowie Level-0-Parameter nicht veränderbar sind. Sollte die raumphysiologische Bilanz aufzeigen, dass in einer gegebenen Situation mögliche komfortrelevante oder gesundheitsgefährdende Auswirkungen vorliegen, dann sind diese Parameter unveränderbar, da der Mensch weder einen Einfluss auf das Hintergrundsystem hat, noch etwas an der Bausubstanz verändern kann. Dies gilt ebenfalls für die Level-3-Parameter. Alle unveränderbaren Einflüsse sind in Abbildung 121 mit gestrichelten Linien abgebildet. Dem gegenüber stehen die veränderbaren Parameter des Levels 1 und des Levels 2. Bei den Level-2-Parametern handelt es sich um den Menschen selber. Dieser wird sowohl durch veränderbare wie auch unveränderbare Parameter beschrieben. So kann er beispielsweise seine Kleidung anpassen, falls die Bekleidungsvorschrift (Level 3) nichts Gegenteiliges vorschreibt; sein Alter hingegen kann er nicht beeinflussen. Aus diesem Grund werden die Level-2-Parameter zu veränderbar gezählt und dennoch als unveränderbar mit einer gestrichelten Umrandung dargestellt. Für die Sachbilanz entscheidend sind letztendlich die Level-1-Parameter und die veränderbaren Level-2-Parameter. Dabei handelt es sich um sämtliche Komponenten des Raums und des Menschen, welche in ihrem Zustand veränderbar sind. Wird bei der Durchführung der raumphysiologischen Bilanz demnach eine negative Auswirkung festgestellt, können die Level-1- oder Level-2-Komponenten möglicherweise entsprechend angepasst werden, sodass diese Auswirkung nicht mehr auftritt und dementsprechend der betrachtete Referenzraum optimiert wird. Aus der möglichen Anpassungssituation ergibt sich somit, dass für die Erstellung der Sachbilanz für Szenario 1 lediglich die Level-1-, Level-2- und die Level-3-Parameter, welche einen Einfluss auf die vorher genannten Parameter haben, erfasst werden müssen. Die Erfassung der Parameter des Hintergrundsystems sowie der Level-0-Parameter hat in diesem Fall keinen Mehrwert, da diese als stationäre Größen betrachtet werden. Die Ausnahme bildet die Durchführung der raumphysiologischen Bilanz mit dem Ziel der baulichen Optimierung eines

Bestandsgebäudes. In diesem Fall müssen die Level-0-Parameter ebenfalls in der Sachbilanz erfasst werden.

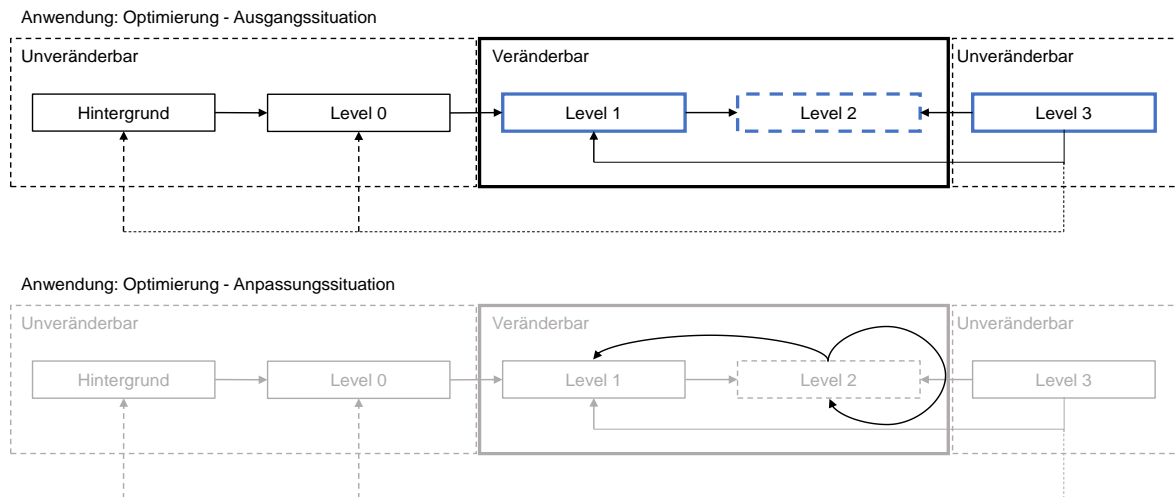


Abbildung 121: Ausgangs- und Anpassungssituation für die Anwendung der Optimierung von Referenzräumen

Das zweite Anwendungsszenario unterscheidet sich wesentlich von dem ersten, da hier der Referenzraum nicht optimiert werden soll, sondern die Anwendung der raumphysiologischen Bilanz lediglich zum Vergleich von Referenzräumen dient. Die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Gebäuden und Referenzräumen kann anhand der Beschreibung der funktionellen Einheit und der Referenzräume grundlegend gewährleistet werden; dennoch müssen weitere Faktoren der Unterscheidung berücksichtigt werden.

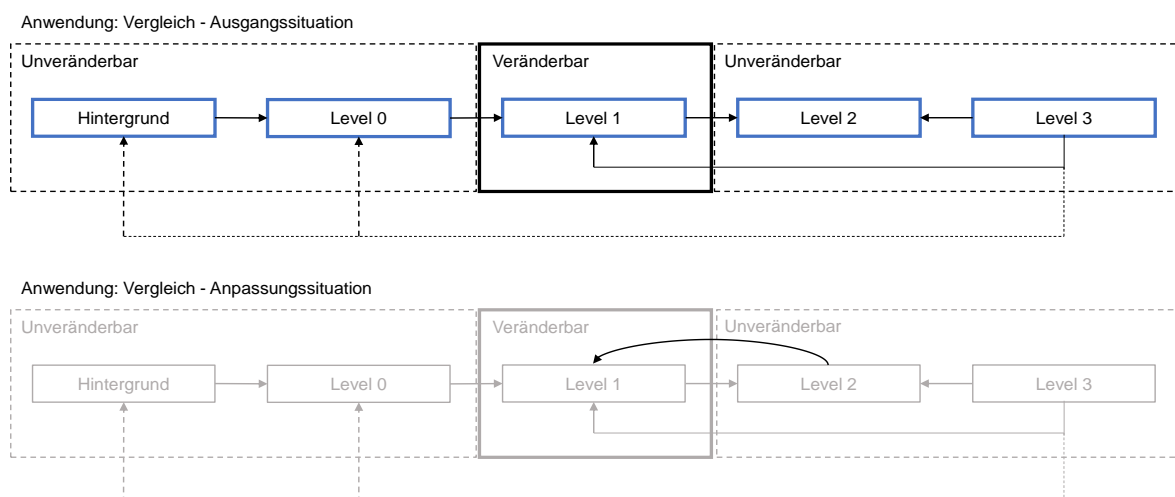


Abbildung 122: Ausgangs- und Anpassungssituation für die Anwendung des Vergleichs von Referenzräumen

Auch in diesem Fall kann eine Ausgangs- und eine Anpassungssituation beschrieben werden. Während die grundlegende Struktur identisch bleibt, ändern sich die veränderbaren und die unveränderbaren Parameter. Beim Vergleich von unterschiedlichen Referenzräumen macht es Sinn, diesen Vergleich auf eine Standardperson zu beziehen, da ansonsten der Vergleich nicht aussagekräftig ist. Somit werden die

Level-2-Parameter in Abbildung 122 als unveränderbar dargestellt. Lediglich die Level-1-Parameter bleiben veränderbar. Um dennoch unterschiedliche Referenzräume oder gar Gebäude miteinander vergleichen zu können, reicht es nicht aus, nur die veränderbaren Parameter zu erfassen. Es müssen somit sämtliche Parameter, die in Abbildung 122 dargestellt sind, für den Vergleich von Bestandsgebäuden erfasst werden.

Den Abbildungen 121 und 122 ist zu entnehmen, dass für die Erstellung der Sachbilanz der zwei verschiedenen Szenarien jeweils die in blau umrandeten Bestandteile erfasst werden müssen.

Somit wurden die relevanten Bestandteile für die Erstellung der Sachbilanz identifiziert. Diese werden in den anschließenden Kapiteln anhand von beispielhaften Beschreibungen näher erläutert. Vorerst werden jedoch die restlichen Schritte zur Erstellung einer Sachbilanz, ausgehend von den Grundlagen nach Bjorn et al. (2018b), beschrieben.

Der zweite Schritt, die Planung der Datenerhebung und die Datenerfassung, wird für die Erstellung der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz ebenfalls durchgeführt. Sowohl die Datenspezifität als auch die drei Dimensionen zur Beschreibung der Aufwandsbeschaffung der Daten sollen berücksichtigt werden. Die genaue Auslegung dieser Datenspezifität wird für jede Parameterkategorie in den einzelnen Unterkapiteln beschrieben.

In dem darauffolgenden Schritt, der Konstruktion und der Qualitätsprüfung von Prozessmodulen, wird in der Ökobilanzierung der Lebensweg des Produktes dargestellt und sämtliche Flüsse werden auf den Referenzfluss skaliert. Dieser Schritt entfällt in der raumphysiologischen Bilanzierung. Zum einen aus dem Grund, dass nicht der Lebensweg des Gebäudes betrachtet wird, sondern es sich lediglich um eine Momentaufnahme handelt. Zum andern gibt es in der raumphysiologischen Bilanz keine Referenzflüsse, auf welche die in der Sachbilanz berücksichtigten Parameter skaliert werden müssen. Für jeden betrachteten Referenzraum wird eine einzelne Sachbilanz angefertigt, welche diesen konkreten Raum beschreibt, somit müssen die berücksichtigten Eingangsgrößen nicht in einem gesonderten Schritt auf diesen Raum angepasst werden.

Der vierte Schritt, die Konstruktion des Sachbilanzmodells sowie die Berechnung der Sachbilanzergebnisse, muss für die Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz entsprechend angepasst werden. Die Sachbilanzergebnisse, welche die Elementarströme darstellen, werden im Referenzraum gemessen und müssen nicht berechnet werden. Dennoch muss ein Sachbilanzmodell erstellt werden, welches sämtliche Eingangsdaten des Hintergrund- und des Vordergrundsystems abbildet und den daraus resultierenden Elementarströmen zuordnet.

Im vorletzten Schritt, der Vorbereitung der Grundlagen für die Fehlerabschätzung und die Sensitivitätsanalyse, sollen durch die Veränderung der Ergebnisse der Sachbilanz die Prozessströme identifiziert werden, die den größten Einfluss auf die Elementarströme haben. Ein derartiger Schritt ist jedoch nur bei der Anwendung der raumphysiologischen Bilanz durch Simulation möglich, da ansonsten die Elementarströme im Raum gemessen und nicht anhand der Eingangsdaten der Sachbilanz modelliert werden. Werden einzelne Wirkungskategorien in Zukunft simuliert, kann ebenfalls eine Sensitivitätsanalyse innerhalb der Sachbilanz durchgeführt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt steht keine Software zur Verfügung, die sämtliche erweiterten raumklimatischen Einflüsse in Abhängigkeit der Umgebungs-, Gebäude- und Raumparameter simuliert.

Der letzte Schritt, die Berichterstattung, wird ebenfalls in der raumphysiologischen Bilanz durchgeführt. Hierfür gibt es jedoch analog zur Ökobilanzierung keine konkreten Vorgaben. Der Bericht soll lediglich dem Ziel- und Untersuchungsrahmen angepasst werden und möglichst übersichtlich die relevanten Ergebnisse der Sachbilanz abbilden.

Somit werden zur Erstellung der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz statt den sechs Schritten, die in der Sachbilanzerstellung in der Ökobilanz durchgeführt werden, lediglich vier Schritte benötigt.

6.3.1 Sachbilanz zur Bestimmung der Elementarströme

Im Rahmen der Herleitung der Wirkungsabschätzung wurde bereits festgestellt, dass es sich bei sämtlichen Elementarströmen um dynamische Variablen handelt. Da jedoch der Ansatz verfolgt wird, eine Momentaufnahme zu erstellen, werden diese für den Zeitpunkt der Betrachtung als stationär angenommen. Dieser Betrachtungszeitpunkt kann jedoch beliebig oft innerhalb einer Zeitperiode wiederholt werden. Sowohl die Betrachtungszeitpunkte als auch der Zeitrahmen der Betrachtungsperiode werden in der ersten Phase, der Phase der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens definiert. Entsprechend diesem Vorgehen wird die Sachbilanz ebenfalls für den stationären Betrachtungszeitpunkt erstellt. Es ist allerdings anzumerken, dass in der Sachbilanz sowohl dynamische als auch stationäre Parameter vorhanden sind (dynamisch: z. B. Solareinstrahlung; stationär: z. B. g-Wert des Fensters). Die Identifizierung der für die Sachbilanz relevanten Parameter erfolgt auf der Grundlage der für die Wirkungsabschätzung benötigten Elementarströme. Somit ist der Anspruch der Sachbilanz keinesfalls ein vollumfängliches Gebäudemodell abzubilden. Vielmehr sollen die für die einzelnen Elementarströme relevanten Einflüsse, sowohl die dynamischen physikalischen Größen als auch die unveränderlichen Bestandteile des Referenzraums, dargestellt werden. Dabei handelt es sich um die Beschreibung und objektive Erfassung der Parameter der Umwelt des Menschen. An geeigneten Stellen können somit Parameter mithilfe eines numerischen Werts beschrieben werden, während andere ausschließlich qualitativ in Wortform ausgedrückt werden.

6.3.1.1 Sachbilanz des Hintergrundsystems

Das Hintergrundsystem, definiert als die Umgebungsparameter, beschreibt sämtliche Komponenten, die sich außerhalb des Referenzraums befinden und dennoch einen Einfluss auf die erweiterte raumklimatische Umgebung im Referenzraum haben können. Sämtliche im Raum zu betrachtende Elementarströme sind als physikalische Größen ebenfalls außerhalb des Raums und des Gebäudes vorhanden. Die Systemgrenzen des Referenzraums wurden so definiert, dass im Hintergrundsystem sowohl die Außenumgebung als auch die Innenumgebung des Referenzraums berücksichtigt werden muss. Demnach muss beim Hintergrundsystem zwischen dem inneren und dem äußeren Hintergrundsystem unterschieden werden. Deren Erfassung, die auf unterschiedliche Weise erfolgen muss, wird im Folgenden beschrieben.

Es ist davon auszugehen, dass die physikalischen Parameter der Außenumgebung einen Einfluss auf die Elementarströme im Raum haben. So hat beispielsweise die Außenluft eine bestimmte Temperatur und die Innenraumluft hat gegebenenfalls eine davon abweichende Temperatur. Da die Lufttemperatur des

Innenraums ein für die Wirkungsabschätzung relevanter Elementarstrom ist, ist davon auszugehen, dass die Lufttemperatur des Außenraums in der Sachbilanz berücksichtigt werden muss. Ähnlich verhält es sich mit den übrigen neun Elementarströmen des Innenraums.

Die im Stand des Wissens beschriebenen materiellen und energetischen äußeren Umgebungsbedingungen können in einen direkten Bezug zu den Elementarströmen im Innenraum gesetzt werden; dennoch bedürfen diese einer genaueren Betrachtung, um sie in der Sachbilanz erfassen zu können. Die beschriebenen Zeitkomponenten werden dagegen aus dem Grund der stationären Betrachtung vernachlässigt. Zur übersichtlicheren Darstellung wird die Erstellung der Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems entsprechend den vier definierten Wirkungskategorien gegliedert. Somit werden die energetischen und materiellen Umgebungsbedingungen in Abbildung 123 den vier Wirkungskategorien zugeordnet. Dabei ist anzumerken, dass die Gliederung anhand der Eingangsgrößen der Wirkungsmechanismen für jede Wirkungskategorie erfolgt. So kann beispielsweise die relative Luftfeuchte ebenfalls einen Einfluss auf die Luftqualität haben, jedoch wird die relative Luftfeuchte nicht für den Wirkungsmechanismus zur Bewertung der Luftqualität verwendet und deswegen bei der Erstellung der Sachbilanz dieser Wirkungskategorie auch nicht zugeordnet.

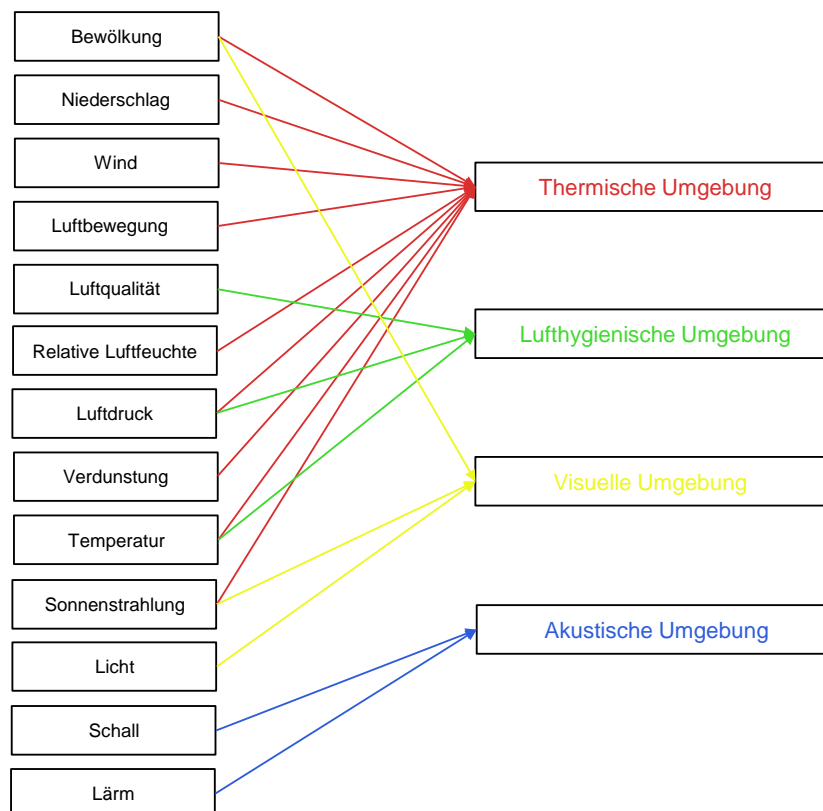


Abbildung 123: Zuordnung der materiellen und energetischen äußeren Umgebungsbedingungen nach Grabe (2012) und Heichele (2021) zu den vier Wirkungskategorien

Für die Wirkungskategorie der thermischen Umgebung werden eine Reihe von Umgebungsbedingungen als relevant genannt. Bei diesen Umgebungsbedingungen sind jedoch welche vorhanden, die sich gegenseitig bedingen und somit in Abhängigkeit von der Definition der Systemgrenze nicht alle erfasst

werden müssen. Durch die Betrachtung der Realitätsbeschreibungen von Heichele (2021) kann dies verdeutlicht werden. So schreibt Heichele (2021) beispielsweise „[...] scheinen **Sonnenstrahlen** durch die ansonsten dichte **Wolkendecke**“ und „die **Sonnenstrahlung** fühlt sich [...] intensiv auf der Haut an“. Letzteres stellt den Bezug zur Temperaturempfindung dar. Somit stehen die Bewölkung, die Sonnenstrahlung und die Außentemperatur in einem direkten Bezug zueinander. Dieser Bezug geht so weit, dass die Außentemperatur als eine von der Bewölkung und der Sonnenstrahlung abhängige Variable definiert werden kann. Somit wird im Sinne der Systemgrenze für die thermische Umgebung vorerst weder die Bewölkung noch die Solarstrahlung direkt berücksichtigt, sondern lediglich die Außentemperatur in der Sachbilanz erfasst. Dabei wird lediglich die Außentemperatur berücksichtigt und nicht weiter zwischen der Lufttemperatur und der Oberflächentemperatur unterschieden. Die Sonnenstrahlung kann dennoch nicht vollständig in der Sachbilanz vernachlässigt werden. Heichele (2021) schreibt in ihrem Raumbuch „**direkte Sonne** bekommt der Raum im Jahresverlauf nicht ab, weil er nach Norden orientiert ist“. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass es Räume gibt, in welche die Sonne in Abhängigkeit von der Orientierung und der Jahreszeit direkt hineinstrahlt. Somit muss in der Sachbilanz erfasst werden, ob zum Zeitpunkt der Bilanzerstellung die Sonne in Abhängigkeit von der Orientierung und der Jahreszeit in den Raum strahlt oder ob lediglich diffuses Sonnenlicht oder gar kein Sonnenlicht (nachts) vorhanden ist.

Die nächsten zwei Parameter der thermischen Umgebung sind der Wind und die Luftbewegung. Diese beiden Begriffe beschreiben nach Grabe (2012) und Heichele (2021) die physikalische Bewegung von Luft. Nur, dass der Wind für gewöhnlich für die Beschreibung der meteorologischen Phänomene außerhalb eines Gebäudes genutzt wird, während der Begriff Luftbewegung eher die Luftströmung innerhalb eines Raums beschreibt. Da beide Arbeiten die energetischen und materiellen Umgebungsbedingungen sowohl für innen und außen in einer Parameterkategorie beschreiben, wurden beide Begriffe verwendet. Diese sind somit als identisch zu betrachten. Für die Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems der thermischen Umgebung wird somit die Luftbewegung außerhalb des Gebäudes erfasst.

Die nächsten drei Parameter, die gemeinsam betrachtet werden können, sind der Niederschlag, die Verdunstung und die relative Luftfeuchte. Der Einfluss der Außentemperatur auf die Verdunstung und die Luftfeuchte wird an dieser Stelle vernachlässigt, da die Temperatur bereits in der Sachbilanz berücksichtigt wird. Heichele (2021) schreibt im erweiterten Raumbuch „nach einiger Zeit sind diese jedoch wieder trocken, sodass davon auszugehen ist, dass die **Feuchtigkeit verdunstet** ist“. In diesem Zitat bezieht sich die Autorin auf eine vom Niederschlag feuchte Fläche, welche anschließend trocknet. Somit, insbesondere unter Berücksichtigung der zeitlichen Systemgrenze, können die Parameter Niederschlag und Verdunstung vernachlässigt werden. Diese tragen beide zu der relativen Luftfeuchte der Außenumgebung bei, welche somit in der Sachbilanz aufgenommen werden muss. Als letzter Parameter bleibt der Luftdruck der Außenumgebung. Dieser hat jedoch eine Sonderstellung, da sich der Luftdruck insbesondere in Abhängigkeit von der Höhenlage ergibt und zudem der Luftdruck außerhalb und innerhalb des Gebäudes identisch ist. Dennoch wird der Luftdruck sowohl für den thermischen als auch für den lufthygienischen Wirkungsmechanismus benötigt und muss deswegen in der Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems erfasst werden.

Zur Wirkungskategorie der lufthygienischen Umgebung werden lediglich drei der von Grabe (2012) und Heichele (2021) definierten Parameter gezählt, von denen zwei ebenfalls der thermischen Umgebung

zugeordnet werden. Neben der Temperatur und dem Luftdruck wird die Luftqualität zur Beschreibung des Hintergrundsystems der lufthygienischen Umgebung benötigt. Für die Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz wird die Luftqualität ausschließlich über den Parameter der CO₂-Konzentration im Innenraum betrachtet. Somit ist es ausreichend, die Luftqualität des äußeren Hintergrundsystems ebenfalls nur über diesen numerischen Parameter zu erfassen.

Der Wirkungskategorie der visuellen Umgebung können die Parameter Bewölkung, Sonnenstrahlung und Licht zugeordnet werden. Dabei wurden Bewölkung und Sonnenstrahlung bereits für die Sachbilanz der thermischen Umgebung thematisiert. Die Solarstrahlung wurde bereits in den drei Zuständen diffus, direkt oder gar nicht vorhanden in Abhängigkeit von der Orientierung des Referenzraums und der Jahreszeit beschrieben. Somit kann diese Beschreibung Aufschluss darüber geben, wie viel natürliches Licht von außen in den Referenzraum eindringen kann. Das Gleiche gilt für künstliches Licht, das von außerhalb in den Raum einfallen kann; auch dieses kann einen Einfluss auf den spektralen Strahlungsfluss sowie die beleuchtete Fläche im Raum haben. Aus diesem Grund wird der Parameter Licht im weiteren Verlauf als künstliches Licht beschrieben, welches ebenfalls für die Erstellung der Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems erfasst werden muss.

Als letzter Bestandteil der Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems bleibt die akustische Umgebung, welche nach Heichele (2021) mit dem Parameter Lärm und nach Grabe (2012) mit dem Parameter Schall beschrieben wird. Da jedoch die Bezeichnung Lärm auf eine negative Beurteilung des vorhandenen Schalls hindeutet, wird dieser Parameter als ungeeignet zur Erstellung eines objektiven Sachbilanzmodells betrachtet. Der Parameter Schall hingegen gestaltet sich selbst in einer stationären Momentaufnahme als schwierig, da es sich beim Schall um eine höchst dynamische Größe handelt und der Schall sich in jeder Sekunde beispielsweise aufgrund von vorbeifahrenden Autos oder bellenden Hunden verändern kann. Dennoch muss der Schall, der durch die äußere Umgebung des Gebäudes entsteht, in der Sachbilanz erfasst werden.

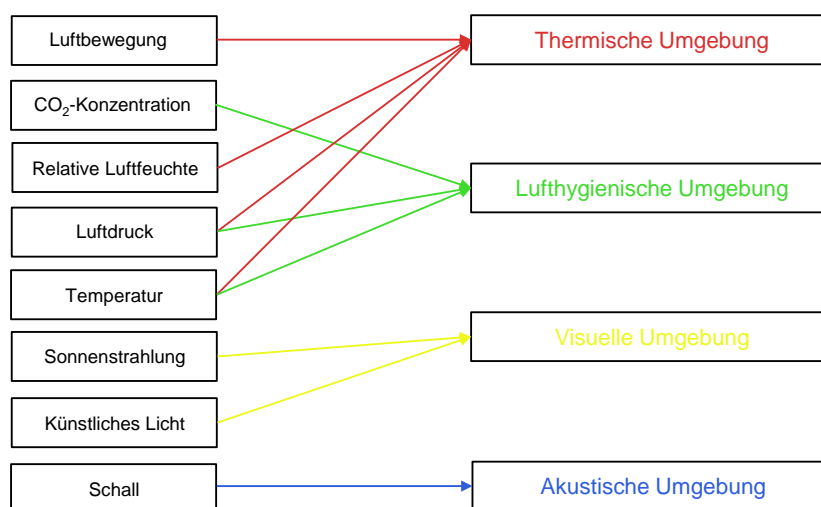


Abbildung 124: Relevante Größen der Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems innerhalb der Systemgrenzen des Mikroklimas mit der Zuordnung zu den Wirkungskategorien

Somit konnten für jede Wirkungskategorie die, entsprechend den definierten Systemgrenzen, relevanten Parameter des äußeren Hintergrundsystems identifiziert werden. In dem nächsten Schritt sollen diese anhand der Datenspezifität, des Datentyps, der Datenquellen und des Datenzugangs dargestellt werden. Der Großteil dieser Eingangsdaten der Sachbilanz kann mit Messungen am Gebäudestandort erfasst werden. Im Wesentlichen handelt es sich bei den messbaren Parametern um die Luftbewegung, die CO₂-Konzentration, die relative Luftfeuchte, den Luftdruck und die Temperatur, welche als quantitative Größen erfasst werden können. Im Gegensatz dazu stehen die Sonnenstrahlung, das künstliche Licht und der Schall. Für die Bewertung der visuellen Umgebung in der raumphysiologischen Bilanz ist es wenig zielführend, die Beleuchtungsstärke im Außenraum zu kennen, da lediglich der spektrale Strahlungsfluss der Lichtquelle sowie die Größe der beleuchteten Fläche für die Wirkungsabschätzung benötigt werden. Somit wird der Einfall an Tageslicht sowie der Einfall an Kunstlicht beschreibend in der Sachbilanz erfasst. Dabei kann nicht die gleiche Datenqualität wie bei den Messungen vor Ort beibehalten werden, jedoch ist eine solche Beschreibung für die Bewertung der Auswirkung zielführender als eine konkrete Messung dieser beiden Größen außerhalb des Referenzraums. Sowohl für das natürliche als auch für das künstliche Licht kann zwischen drei Situationen unterschieden werden. Entweder gibt es einen direkten Lichteinfall, einen diffusen Lichteinfall oder gar keinen Lichteinfall in den Raum. Diese drei Szenarien müssen für jede lichtdurchlässige Fläche des Referenzraums bewertet werden. Zur Erfassung des Schalls kann ebenfalls auf eine Messung verzichtet werden. Zur Wirkungsabschätzung der akustischen Umgebung wird der Schalldruckpegel und die Frequenz im Innenraum benötigt. Die Bestimmung der Lautheit außerhalb des Referenzraums wäre ebenfalls denkbar, gibt jedoch keinen Aufschluss darüber, um welche Geräusche es sich handelt. Aus diesem Grund wird der Schall des Außenraums nicht numerisch über eine Messung erfasst, sondern lediglich durch eine Beschreibung berücksichtigt. In dieser Beschreibung soll das Seh- und Hörbare beschrieben werden. Diese Beschreibung beinhaltet das objektiv Gesehene z. B. eine zweispurige Straße an der Ostseite. Das Hörbare in der Beschreibung soll lediglich ergänzen, was nicht offensichtlich in der gewöhnlichen Kulisse sichtbar ist, z. B. ein Laubbläser oder Sirenen vorbeifahrender Notfallwagen. Auf diese Weise kann dennoch eine objektive Betrachtung ermöglicht werden und es können, sofern mehrere Wirkungsabschätzungen durchgeführt werden, unterschiedliche akustische Szenarien miteinander verglichen werden.

Falls jedoch keine Messungen der genannten Parameter möglich sind, kann beispielsweise auf die Daten von Meteorolog zurückgegriffen werden, welche für einen beliebigen Standort Mittelwerte sowohl für die Außentemperatur, den Luftdruck, die Luftgeschwindigkeit und die relative Luftfeuchte angeben. Die CO₂-Konzentration kann entweder mithilfe von Standardwerten oder von Messungen des Umweltbundesamtes oder des Deutschen Wetterdienstes bestimmt werden. Aus den genannten Beispielen wird ersichtlich, dass unterschiedliche Datenquellen verwendet werden können. In der nachfolgenden Tabelle ist entsprechend den Grundlagen zur Sachbilanz nach Bjorn et al. (2018b) die Datenspezifität für die Daten des äußeren Hintergrundsystems in der raumphysiologischen Bilanz eingetragen.

Tabelle 11: Datenspezifität der Sachbilanzdaten des äußeren Hintergrundsystems

Datenspezifität	Erklärung
Sehr hoch	Messungen am Gebäudestandort
Hoch	Verlässliche Messungen Dritter (z. B. Daten der nächstgelegenen Wetterstation oder Luftschadstoffmessstation)
Mittel	Daten Dritter, die nicht gemessen wurden, sondern anhand der Wetterlage der vorherigen Tage vorhergesagt werden (z. B. Wetterdienst)
Niedrig	Generische Daten (z. B. Meteonorm, Lärmkarten)
Sehr niedrig	Abschätzung oder objektive Beschreibung (z. B. Beschreibung der Schallumgebung oder des Lichteinfalls)

Bei diesem Vorgehen bezüglich der Erfassung der Parameter des äußeren Hintergrundsystems handelt es sich lediglich um eine Empfehlung. Der Studierersteller kann selber darüber entscheiden, dass beispielsweise die Lautheit oder die Beleuchtungsstärke im Außenraum dennoch messtechnisch erfasst werden sollen. In jedem Fall ist die Datenqualität der entsprechenden Daten im Bericht anzumerken.

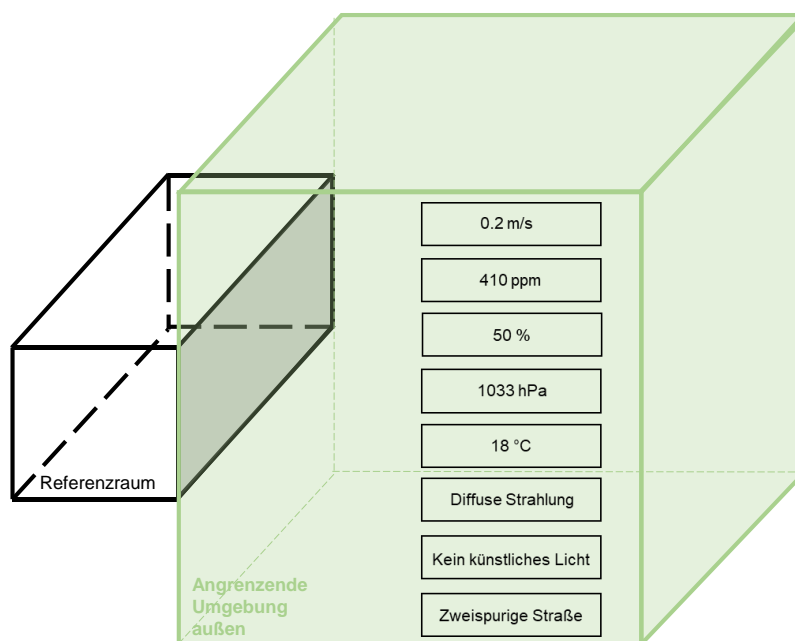


Abbildung 125: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanz des äußeren Hintergrundsystems

Die Abbildung 125 stellt beispielhaft das äußere Hintergrundsystem eines Referenzraums dar. Dabei wurden die Luftgeschwindigkeit (0.2 m/s), die CO₂-Konzentration (410 ppm), die relative Luftfeuchte (50 %), der Luftdruck (1033 Pa) sowie die Außentemperatur (18 °C) gemessen. Die Solarstrahlung wird beschrieben als diffuse Strahlung, die in den Referenzraum einfällt. Diese wird bei den Level-1-Parametern erneut aufgegriffen und weitere Eigenschaften der Fenster, durch die das Licht einfällt, werden spezifiziert. Da es sich um eine Betrachtung tagsüber handelt, gibt es keinen Einfall von künstlichem Licht aus dem äußeren Hintergrundsystem. Der Schall wird beschrieben anhand von dem, was gesehen und gehört werden kann, somit ist in diesem Fall eine zweispurige Verkehrsstraße mit mäßigem Verkehr vorhanden.

Wird für die Durchführung der raumphysiologischen Bilanz die Systemgrenze auf das Meso- oder das Makroklima erweitert, dann müssen noch weitere Parameter wie beispielsweise die Großwetterlage oder die Auslöser für die CO₂-Konzentration erfasst werden, da diese Bestandteile der Ursache-Wirkungs-Kette sind und letztendlich entscheidend sind für die im Raum entstehenden Elementarströme. Zudem müsste bei erweiterten Systemgrenzen sowohl auf die geografische Lage, die Höhenlagen, die Lage zu Gebirgen, die Lage zum Meer, die Kontinentalität sowie regionale und überregionale Windsysteme und die regionale Einbindung des Gebäudes (definiert nach Heichele, 2021), in dem sich der Referenzraum befindet, eingegangen werden. Entsprechend den Systemgrenzen, die für die Herleitung der Sachbilanz definiert wurden, werden ausschließlich die direkt am Gebäude auftretenden Parameter sowie die lokale Einbindung benötigt und nicht die Parameter, die als Auslöser für die Datenpunkte und die Einbindung in ein übergeordnetes Bezugssystem betrachtet werden müssen.

Neben dem äußeren Hintergrundsystem muss ebenfalls das innere Hintergrundsystem in der Sachbilanz berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die Elementarströme, die in den umgebenden Räumen vorhanden sind. Somit müssen diese in jedem an den Referenzraum angrenzenden Raum erfasst werden. Jedoch muss hier in Abhängigkeit von der physikalischen Größe unterschieden werden, wie groß der Einfluss ist. Beispielsweise ist der Luftdruck für alle Räume in einem Gebäude sowie außerhalb des Gebäudes identisch; wurde dieser somit für das äußere Hintergrundsystem bestimmt, kann dieser nicht nur für den Referenzraum, sondern ebenfalls für die angrenzenden Räume als gegeben betrachtet werden. Die Außentemperatur wurde ausschließlich mit einem Wert angenommen und es wurde nicht zwischen der Luft- und der Strahlungstemperatur unterschieden. Diese Unterscheidung sollte jedoch bei der Aufnahme von angrenzenden Räumen erfolgen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Referenzraum und die angrenzenden Räume größtenteils ein ausgeglichenes Temperaturfeld aufweisen. Jedoch würden beispielsweise ungeheizte Räume diesen Zustand nicht erfüllen; aus diesem Grund wird für jeden angrenzenden unbeheizten Raum die Oberflächentemperatur der raumabschließenden Flächen und die Lufttemperatur erfasst. Anders als mit diesen beiden Parametern verhält es sich mit der Luftfeuchte, der CO₂-Konzentration sowie der Luftgeschwindigkeit. Diese können lediglich einen Einfluss auf den Referenzraum haben, wenn es einen offenen Durchgang zwischen dem Referenzraum und dem angrenzenden Raum gibt. So beeinflussen sich die CO₂-Konzentrationen von zwei übereinanderliegenden Räumen, zwischen denen kein Luftwechsel stattfindet, nicht gegenseitig. Die Luftgeschwindigkeit, der CO₂-Gehalt sowie die Luftfeuchte müssen somit ausschließlich erfasst werden, wenn es einen Luftwechsel zwischen dem Referenzraum und den angrenzenden Räumen gibt.

Zur Beschreibung des Einflusses des Lichts von angrenzenden Räumen ist es nicht zielführend, den spektralen Strahlungsfluss im angrenzenden Raum zu messen. Wichtiger ist, den möglichen Lichteinfall eines angrenzenden Raums in den Referenzraum beschreibend zu erfassen. Hierfür können ebenfalls die Beschreibungen direktes, diffuses oder kein Sonnenlicht sowie das Vorhandensein von einem künstlichen Lichteinfall genutzt werden. Damit es überhaupt einen Lichteinfall in den Referenzraum geben kann, wird beispielsweise eine offene Tür zwischen dem Referenzraum und dem angrenzenden Raum benötigt.

Als letzte Komponente des inneren Hintergrundsystems bleibt der Schall. Dabei kann allgemein zwischen dem Luftschall und dem Trittschall unterschieden werden. Für die letztendliche Lautheit im Raum ist es nicht relevant, ob es eine Öffnung zwischen dem Referenzraum und den angrenzenden Räumen gibt.

Somit kann an dieser Stelle wieder auf Beschreibungen des Hörbaren zurückgegriffen werden (z. B. angrenzender Raum oben: spielende Kinder, angrenzender Raum links: zwei Personen arbeiten am Computer).

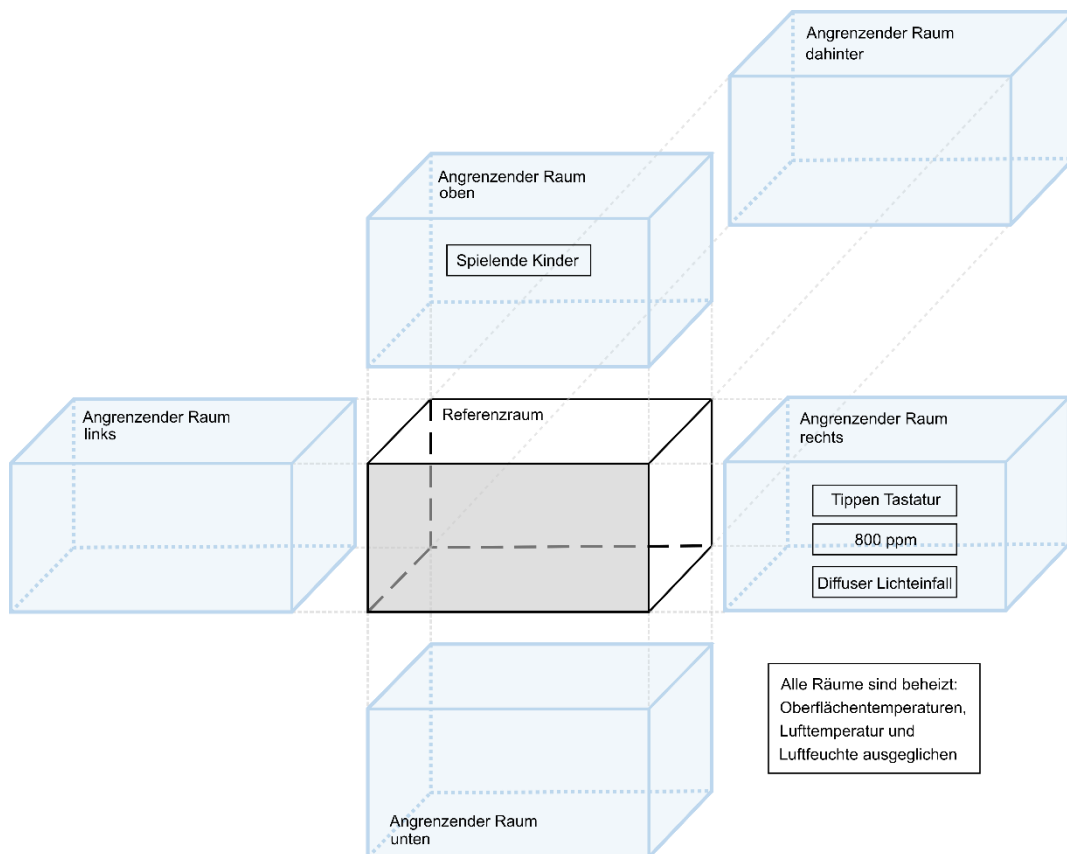


Abbildung 126: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanz des inneren Hintergrundsystems

In Abbildung 126 ist das innere Hintergrundsystem eines Referenzraums beispielhaft abgebildet. Dabei besteht ein Luftaustausch zwischen dem angrenzenden rechten Raum und dem Referenzraum, weswegen sowohl die CO₂-Konzentration als auch der Lichteinfall und die Geräuschkulisse relevant sind. Die graue Fläche des Referenzraums in Abbildung 126 entspricht der grauen Fläche in Abbildung 125, wodurch hier das äußere Hintergrundsystem angrenzt.

Es wird dem Ersteller der raumphysiologischen Bilanz überlassen, wie die benötigten Daten generiert werden; entscheidend ist dabei, dass dem Ersteller die Qualität der jeweiligen Datenquellen bewusst ist. Die Datenspezifität der Daten des inneren Hintergrundsystems orientiert sich an den in Tabelle 11 beschriebenen Datenspezifitäten des äußeren Hintergrundsystems.

6.3.1.2 Sachbilanz des Vordergrundsystems Level 0

Die Sachbilanz der Level-0-Parameter des Vordergrundsystems soll das Gebäude, welches in dem beschriebenen äußeren Hintergrundsystem liegt und innerhalb welchem sich der oder die zu betrachtenden Referenzräume befinden, beschreiben. Um sämtliche Parameter identifizieren zu können, die dieser Parametergruppe zugeordnet werden, braucht es eine klare Definition zur Abgrenzung der Level-0- von den Level-1-Parametern. Die Abgrenzung erfolgte bis jetzt anhand der Veränderbarkeit der Komponenten. Dies alleine reicht jedoch nicht aus, um jeden Bestandteil des Referenzraums eindeutig zuordnen zu können. Somit werden im Folgenden die Level-0-Parameter definiert als die Eigenschaften der unveränderbaren Flächen, welche den Referenzraum umgeben, sowie die Materialeigenschaften der Ausstattungselemente, die in ihrem Zustand veränderbar sind, die jedoch innerhalb dieser Flächen verbaut sind und somit den Durchgang von Wärme, Licht, Luft und Schall durch diese Flächen beeinflussen. Das bedeutet, dass beispielsweise die Materialeigenschaften eines Fensters zu den Level-0-Parametern gezählt werden, während die Zustandsveränderung des Fensters zu den Level-1-Parametern zählt. Das Gleiche gilt für eine Fußbodenheizung oder eine Wandheizung, die sich innerhalb einer raumabgrenzenden Fläche befindet. Wohingegen die Materialeigenschaften von einem an der Innenwand verbauten Radiator oder einer an der Decke angebrachten Leuchte nicht bei den Level-0-Parametern erfasst werden, weil diese keinen Einfluss auf den Durchgang von Wärme, Licht, Luft oder Schall durch die raumabgrenzenden Bauteile haben.

Das äußere Hintergrundsystem deckt den Bereich bis zur äußeren Fassade des Gebäudes ab, während das innere Hintergrundsystem den Bereich bis zu den inneren raumabgrenzenden Flächen darstellt. Im Vordergrundsystem muss somit die objektive Realität, welche im Hintergrundsystem innerhalb der Systemgrenzen liegt, erfasst werden.

Das Level-0-Vordergrundsystem unterscheidet sich wesentlich vom Hintergrundsystem. Das Hintergrundsystem innerhalb der mikroklimatischen Systemgrenze besteht aus physikalischen Flüssen, die entweder quantitativ erfasst werden oder vereinfacht anhand einer erklärenden Beschreibung dargestellt werden. Die Level-0-Parameter beschreiben dagegen das Gebäude. Das Gebäude stellt, vereinfacht betrachtet, die Grenze zwischen dem Hintergrundsystem und dem Referenzraum dar. Das heißt, dass in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Gebäudes sich die physikalischen Flüsse des Hintergrundsystems auf ihrem Weg in den Referenzraum verändern können. Zu den Gebäudeparametern zählt demnach alles Gegenständliche, sowohl der Gebäudehülle als auch des Gebäudeinneren. Entgegen dem Vorgehen von Heichele (2021) wird aufgrund der Definition der Systemgrenzen des Referenzraums die zentral verschaltete Gebäudetechnik nicht bei den Level-0-Parametern integriert. An späterer Stelle bei den Level-3-Parametern, welche alles Übergeordnete möglicherweise außerhalb der Systemgrenze liegende mitaufnehmen, kann dennoch die Information der zentral verschalteten Gebäudetechnik erfasst werden.

Aus dem beschriebenen Stand des Wissens lassen sich eine Reihe von materialspezifischen Eigenschaften, die zur Erfüllung der Schutz- und Versorgungsfunktionen der äußeren Gebäudehülle beitragen, identifizieren.

Eine erste Unterscheidung der Materialien der Gebäudehülle erfolgt hinsichtlich der Permeabilität von Licht, welche anhand der Untergliederung zwischen opaken und transparenten Oberflächen in der

Sachbilanz erfasst werden. Unabhängig davon, ob es sich um eine transparente oder eine opake Fläche handelt, muss die Wärmeleitfähigkeit beschrieben werden. Ohne die zusätzliche Angabe einer Schichtdicke hat die Wärmeleitfähigkeit jedoch keine Aussagekraft. Aus diesem Grund werden in der Sachbilanz die Wärmedurchgangskoeffizienten sowohl der transparenten als auch der opaken Bauteile erfasst. Auch hier handelt es sich wiederum um eine Empfehlung für die Erstellung der Sachbilanz. Es obliegt dem Studienersteller, ob lediglich die U-Werte jedes Bauteils angegeben werden oder ob jedes Bauteil in einzelne Schichten aufgegliedert wird und jeweils anhand der Schichtdicke und der Wärmeleitfähigkeit beschrieben wird.

Anschließend wurden im Stand des Wissens der Gesamtenergiedurchlassgrad sowie der Lichttransmissionsgrad als relevante Eigenschaften der transparenten Flächen genannt. Da der Lichttransmissionsgrad als Eingangsgröße für die visuelle Wirkungskategorie benötigt wird, während der Gesamtenergiedurchlassgrad die thermische Umgebung im Innenraum beeinflusst, müssen beide Eigenschaften in der Sachbilanz erfasst werden.

Die Unterscheidung zwischen einer schweren und einer leichten Bauweise wird nicht explizit über das Gewicht oder die Rohdichte der Bauteile berücksichtigt. Es werden lediglich die dadurch maßgeblich beeinflussten Eigenschaften, das Schalldämm-Maß und die Wärmespeicherfähigkeit in die Sachbilanz mitaufgenommen.

Als letzte Materialeigenschaft muss der Dampfdiffusionswiderstand berücksichtigt werden. Sowohl dieser als auch die Wärmespeicherfähigkeit müssen ausschließlich für opake Bauteile beachtet werden. Sind jedoch keine Konstruktionsunterlagen vorhanden, die einen Aufschluss über die verwendeten Materialien geben können, muss auf eine Schätzung der verwendeten Baustoffe zurückgegriffen werden. Wird eine Abschätzung dieser beiden Parameter mit einer zu großen Unsicherheit bewertet, können diese bei der Erstellung der Sachbilanz vernachlässigt werden. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Wärmespeicherkapazität überwiegend für den sommerlichen Wärmeschutz und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl für die Vermeidung von Tauwasserausfall relevant ist. Sollte es demnach zur Überhitzung im Sommer oder zum Tauwasserausfall an den Innenwänden kommen, dann sollten diese Parameter weiter im Detail betrachtet werden.

Zusätzlich zu den Eigenschaften, die den Durchgang von Wärme, Licht und Schall beschreiben, muss die Luftdichtheit der Gebäude, welche dem natürlichen Durchgang von Luft zugrunde liegt, berücksichtigt werden. Diese wird durch die Luftwechselzahl beschrieben und bezieht sich auf den betrachteten Referenzraum. Die Luftwechselzahl hat dabei eine Sonderstellung und entsteht zum einen durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle und kann zudem sowohl durch die natürliche Fensterlüftung als auch durch Lüftungssysteme verändert werden. Da sowohl die natürliche Lüftung als auch die mechanische Lüftung zu den Level-1-Parametern gezählt werden, wird an dieser Stelle nur der nicht durch den Menschen veränderbare Luftwechsel durch Undichtigkeiten im Gebäude berücksichtigt. Hierbei ist davon auszugehen, dass die für das Gebäude ermittelte Luftdichtheit stellvertretend für die Luftdichtheit des Referenzraums angesetzt werden kann. Für die Bewertung der Auswirkungen von Innenräumen hat die Luftdichtheit letztendlich nur eine untergeordnete Bedeutung, da vielmehr der natürliche und mechanische Luftwechsel innerhalb des Referenzraums für die Wirkungsabschätzung von Bedeutung sind. Dennoch kann die Durchführung des *Blower-Door*-Tests, insbesondere beim Überschreiten der Grenzwerte, einen

Hinweis auf mögliche Schwachstellen im Referenzraum geben, was beispielsweise zu Feuchteschäden führen kann, die wiederum eine Auswirkung auf die U-Werte der Konstruktion haben können. Zusätzlich wird insbesondere bei Neubauten ein *Blower-Door-Test* bei Fertigstellung des Gebäudes gefordert, sodass gegebenenfalls auf bereits vorhandene Messergebnisse zurückgegriffen werden kann.

Im Stand des Wissens wurden zwei weitere Eigenschaften beschrieben, die nicht veränderbar sind und sich auf die raumzugewandte Oberfläche der raumabschließenden Flächen beziehen. So müssen als Materialeigenschaften zusätzlich der Schallabsorptionsgrad zur Berechnung der Nachhallzeit und der Lichtreflexionsgrad der inneren Oberflächen in der Sachbilanz numerisch abgebildet werden.

Aus den gegebenen Beschreibungen können acht Materialeigenschaften der raumabgrenzenden Flächen sowie der Infiltrationsluftwechsel identifiziert werden. Diese Parameter müssen für die Sachbilanz erfasst werden und sind in der folgenden Grafik den entsprechenden Wirkungskategorien zugeordnet.

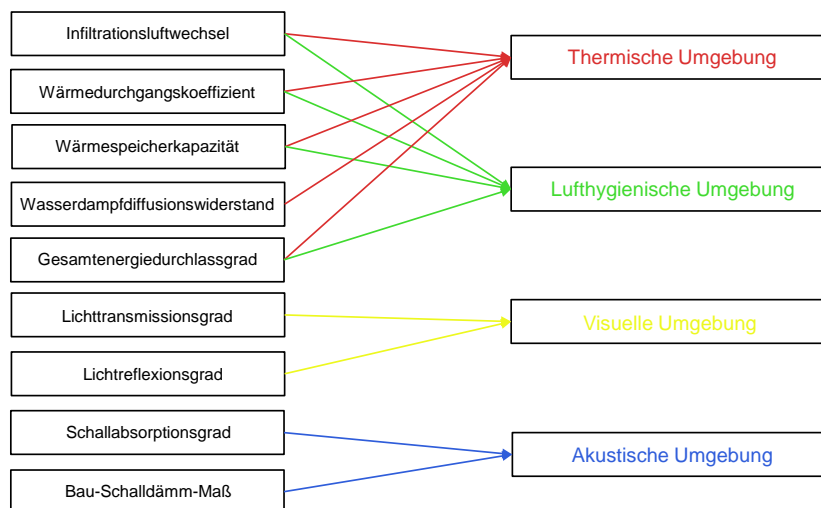


Abbildung 127: Zuordnung der Level-0-Sachbilanz-Parameter zu den vier Wirkungskategorien

Der Infiltrationsluftwechsel muss für jeden einzelnen Referenzraum angegeben werden. Die übrigen Materialeigenschaften müssen nicht für sämtliche Oberflächen angegeben werden, sondern ergeben sich aus der horizontalen und der vertikalen Struktur des Gebäudes. Demnach muss jede raumabschließende Fläche für sich alleine beschrieben werden.

Nach Heichele (2021) und Grabe (2012) sind die Form und die Geometrie des Gebäudes für die Beschreibung der Topologie des Gebäudes entscheidend. Da jedoch innerhalb der Systemgrenzen weder die Form noch die Geometrie des gesamten Gebäudes von Bedeutung sind, kann dieser Aspekt bei den Level-0-Parametern vernachlässigt werden. Entscheidender ist hingegen die Form und Geometrie des zu untersuchenden Referenzraums. Da sich diese Form aus den Oberflächen ergibt, welche den Referenzraum abgrenzen, zählt die Form und Geometrie des Referenzraums ebenfalls zu den Level-0-Parametern. Diese kann anhand der Kubatur des Referenzraums beschrieben werden. Dabei werden die Form, die Länge, die Breite und die Fläche jeder einzelnen Oberfläche erfasst.

Zusätzlich zur Kubatur und den in Abbildung 127 dargestellten Eigenschaften können die raumabschließenden Flächen über Ausstattungselemente verfügen, die der Regulierung des erweiterten

Raumklimas dienen und die einen Einfluss auf den Durchgang von Wärme, Licht, Luft oder Schall haben. Die Veränderungen der Materialeigenschaften aufgrund dieser Systeme müssen ebenfalls bei den Level-0-Parametern beschrieben werden. Zudem müssen sämtliche Ausstattungselemente, die in ihrem Zustand nicht veränderbar sind und Bestandteil der raumabgrenzenden Flächen sind, ebenfalls mit der Art des Systems und gegebenenfalls mit ihren Abmessungen oder ihrer Position berücksichtigt werden.

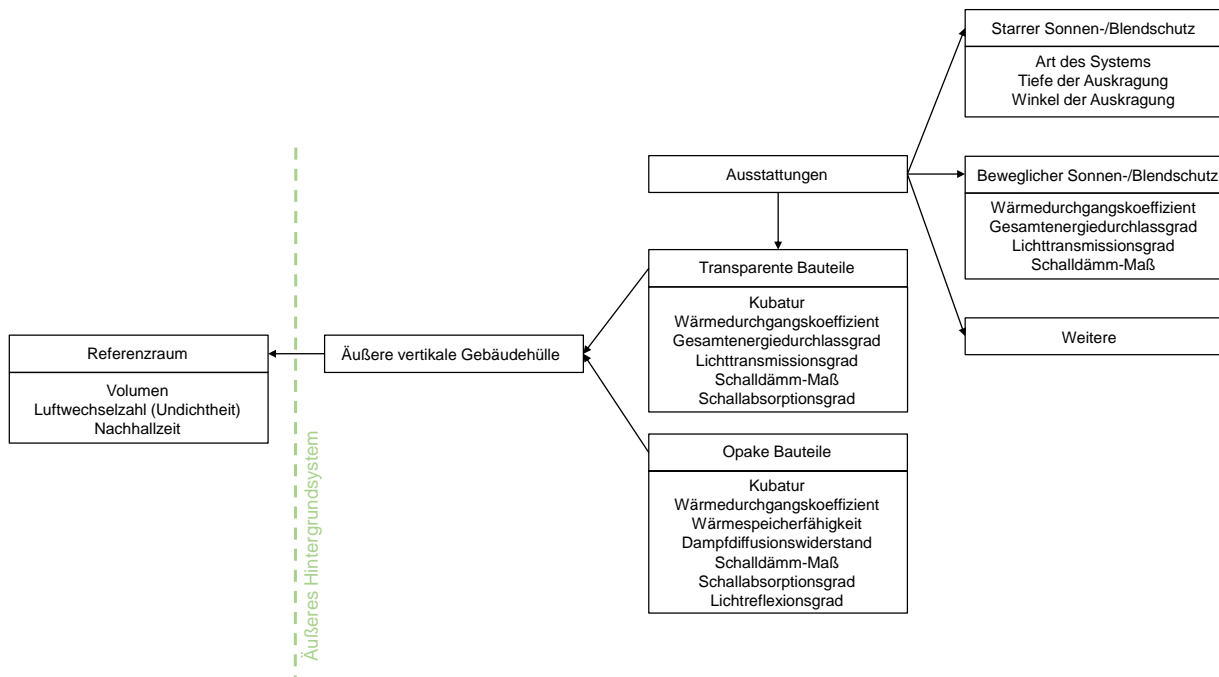


Abbildung 128: Sachbilanz der äußeren vertikalen Gebäudehülle

Ausgehend von den beschriebenen Grundlagen können die verschiedenen raumabgrenzenden Flächen in der Sachbilanz beschrieben werden. Abbildung 128 zeigt die zu berücksichtigenden Parameter der äußeren vertikalen Gebäudehülle. So muss der Referenzraum durch das Volumen, den Infiltrationsluftwechsel und die Nachhallzeit beschrieben werden. Weiterhin muss zwischen transparenten und opaken Bauteilen differenziert werden, die jeweils mit den relevanten Eigenschaften beschrieben werden. Als mögliche Ausstattungen werden beispielhaft ein starrer und ein beweglicher Sonnen- und Blendschutz genannt. Sollten weitere Ausstattungen vorhanden sein, obliegt es dem Studierersteller, diese in entsprechendem Umfang zu erfassen.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der starre Sonnenschutz neben der Art des Systems, der Tiefe und dem Winkel der Auskrägung durch die Wirksamkeit zum Betrachtungszeitpunkt beschrieben wird. Letzteres bezieht sich auf die veränderte Position der Sonne in Abhängigkeit vom Tages- und Jahresverlauf, sodass bei starren Systemen zeitweise ein Teil der direkten Sonnenstrahlung in den Raum gelangen kann. Auch wenn der Mensch keinen Einfluss auf diese Veränderbarkeit der Wirksamkeit hat, wird diese bei den Level-1-Parametern erfasst. Aus dem Grund, dass im Anwendungsszenario der Optimierung von Bestandsgebäuden die Level-0-Parameter nicht erfasst werden müssen, die Information über die Wirksamkeit an dieser Stelle jedoch entscheidend ist, weswegen die Veränderung der

Wirksamkeit des starren Sonnenschutzes zu den veränderlichen Parametern gezählt wird. Die veränderlichen Sonnenschutzsysteme, welche sich vor oder hinter den transparenten Bauteilen befinden, können in Abhängigkeit von ihrem Zustand einen Einfluss auf die Übertragung von Wärme, Licht, Luft und Schall haben. Aus diesem Grund müssen die relevanten Materialeigenschaften an dieser Stelle in der Sachbilanz erfasst werden. Dabei handelt es sich um den Wärmedurchgangskoeffizienten, den Gesamtenergiedurchlassgrad, den Lichttransmissionsgrad und das Schalldämm-Maß.

Innerhalb der definierten Systemgrenzen müssen in der Sachbilanz sowohl vertikal als auch horizontal sämtliche Räume oder Nutzflächen, welche an den Referenzraum angrenzen, erfasst werden. Das Innere dieser Räume zählt zum Hintergrundsystem. Zum Level 0 gehören dagegen die Oberflächen, die den Referenzraum von dem Hintergrundsystem trennen. Ähnlich wie die Gebäudehülle, welche den Referenzraum von dem äußeren Hintergrundsystem trennt, trennen die Wände, Decken und Böden den Referenzraum vor dem inneren Hintergrundsystem.

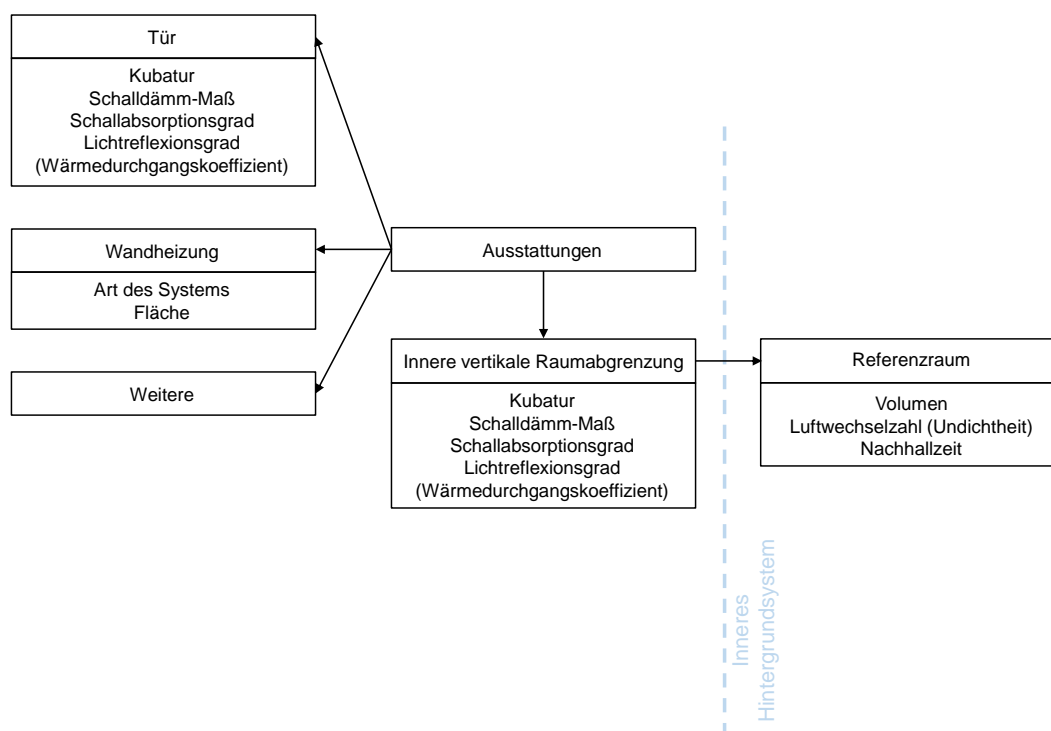


Abbildung 129: Sachbilanz der inneren vertikalen Raumabgrenzung

Die zu erfassenden Parameter von inneren vertikalen Raumabgrenzungen sind beispielhaft in Abbildung 129 dargestellt. Als Ausstattungselemente werden eine Tür und eine Wandheizung beschrieben. Die wesentlichen Eigenschaften der Innentüren sind das Schalldämm-Maß bzgl. Luftschall sowie der Wärmedurchgangskoeffizient. Beide Werte können für eine Reihe von Innentüren der DIN EN 14351-2 (2019) entnommen werden oder durch vorhandene Herstellerangaben bestimmt werden.

Bei der vertikalen Struktur muss zwischen vier möglichen vertikalen Abtrennungen unterschieden werden. Eine vertikale Abtrennung kann somit nicht nur durch Decken und Böden, sondern auch durch die

Bodenplatte zum Untergrund oder durch das Dach erfolgen. Diese vier Möglichkeiten müssen getrennt voneinander beschrieben werden, da diese Bauteile unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Die in der Sachbilanz zu berücksichtigenden Eigenschaften von Decken und Böden sind in der folgenden Abbildung 130 dargestellt. Für die obere Raumabgrenzung muss zusätzlich der Trittschallpegel berücksichtigt werden, während dieser für die untere Raumabgrenzung vernachlässigt werden kann. Da für die Wirkungsabschätzung lediglich die Lautheit im Referenzraum, nicht jedoch die durch Trittschall entstehende Lautheit im darunterliegenden Raum von Relevanz ist. Als beispielhafte Ausstattungen werden für den oberen Raumabschluss die Deckenheizung und -kühlung, die Bauteilaktivierung sowie Schallabsorber genannt. Schallabsorber zählen zu den Ausstattungselementen, die nicht veränderlich sind und haben einen direkten Einfluss auf den Schallabsorptionsgrad der Decke, wodurch die Nachhallzeit verbessert werden kann. Deswegen werden diese Ausstattungselemente zu den Level-0-Parametern gezählt. Als mögliches Ausstattungselement in der unteren horizontalen Raumabgrenzung wird die Fußbodenheizung genannt.

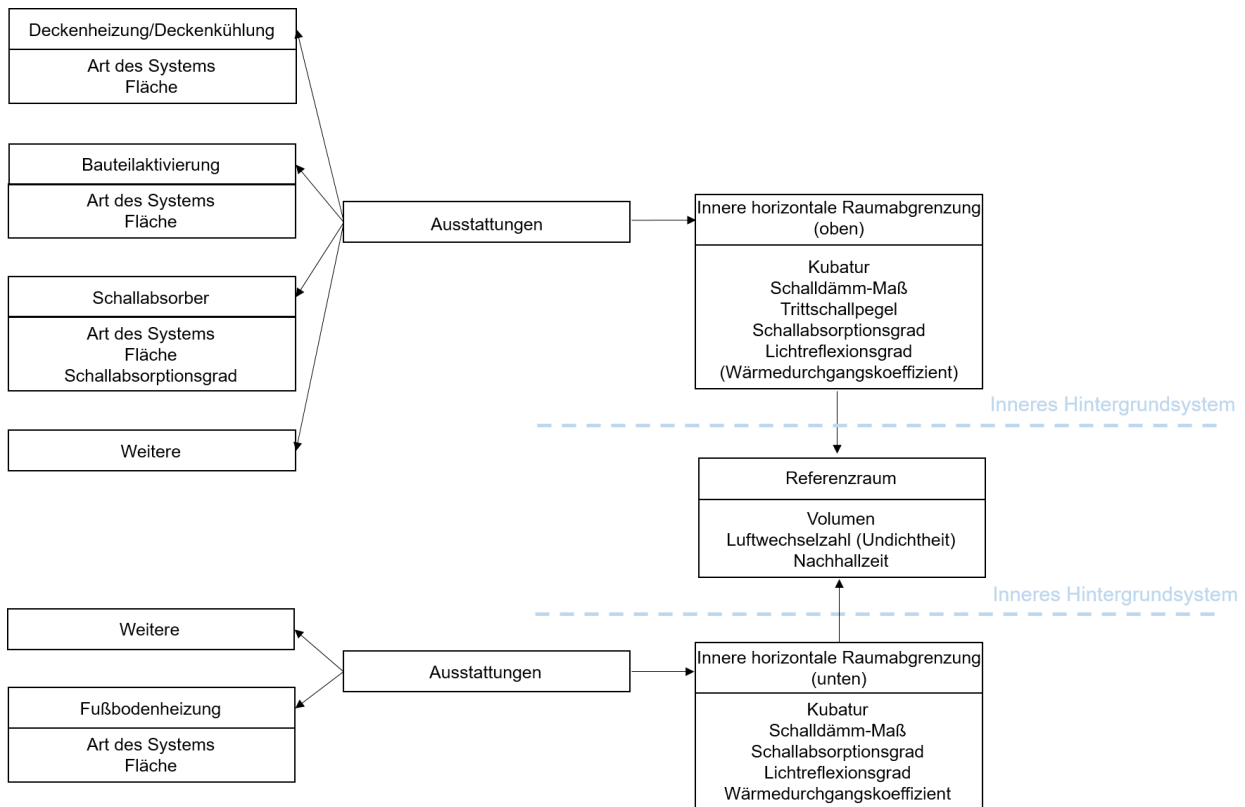


Abbildung 130: Sachbilanz der inneren horizontalen oberen und unteren Raumabgrenzung

Somit fehlen lediglich der obere und der untere Gebäudeabschluss. Zur Beschreibung vom Dach muss wiederum zwischen opaken und transparenten Flächen unterschieden werden. Zudem muss im Falle eines begehbaren Flachdaches der Trittschallschutz beschrieben werden. Als mögliche Ausstattungen von Dachflächen werden beispielhaft Lichtlenksysteme genannt. Diese werden mit der Art des Systems sowie der Position beschrieben. Auch hier gilt, dass der Nutzer keinen direkten Einfluss auf die

Lichtlenkung hat und somit in Abhängigkeit vom Sonnenstand sowie der Wetterlage die Wirksamkeit des Systems, als veränderbarer Zustand, bei den Level-1-Parametern erfasst werden muss.

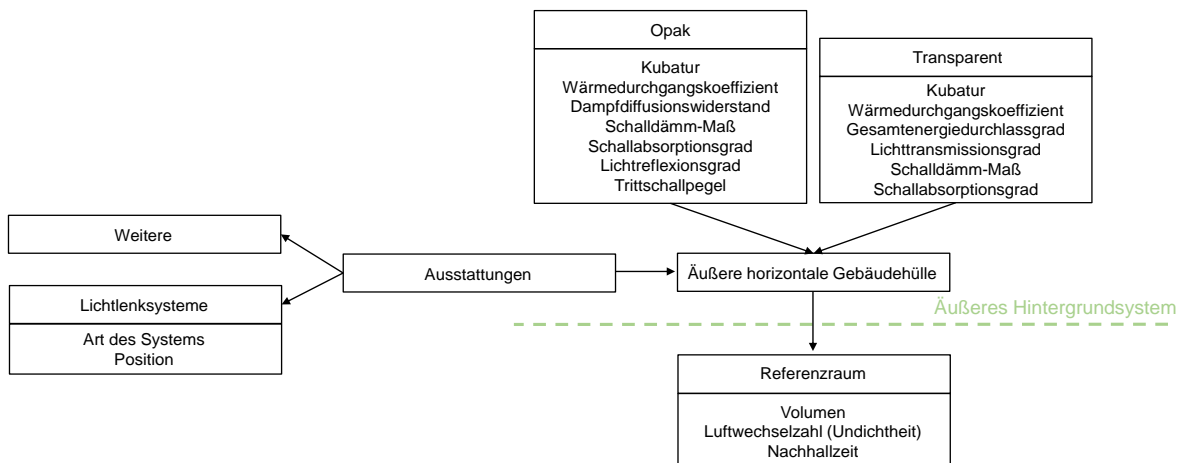


Abbildung 131: Sachbilanz der äußeren horizontalen Gebäudehülle

Zum unteren Gebäudeabschluss wird nicht nur die Bodenplatte, sondern auch die horizontalen Wände, welche sich im Erdreich befinden, gezählt. Im Gegensatz zu allen anderen Flächen sind die bauakustischen Eigenschaften von erdberührenden Bauteilen nicht von Relevanz. Die aufgehenden Bauteile werden direkt von Außenlärm beschallt, im Boden gibt es dagegen keine Schallübertragung, deswegen kann diese Materialeigenschaft hier außer Acht gelassen werden. In Abbildung 132 werden die nach dem Stand des Wissens als relevant erachteten Eigenschaften der erdberührenden Bauteile dargestellt.

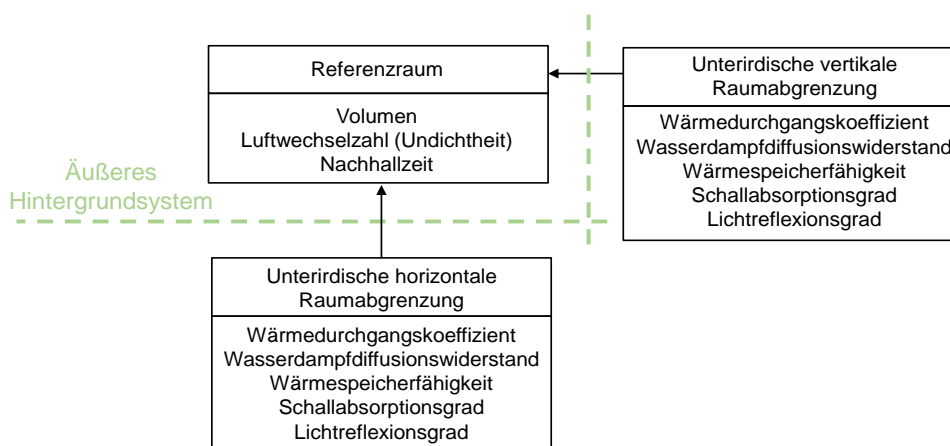


Abbildung 132: Sachbilanz der unterirdischen horizontalen und vertikalen Gebäudehülle

Die Abbildungen 128 bis 132 stellen beispielhaft die relevanten Materialeigenschaften dar. In jeder Sachbilanz müssen lediglich die Eigenschaften erfasst werden, die der Erfüllung des Ziels der raumphysiologischen Bilanz dienen. Wird das Ziel formuliert, dass die Auswirkungen der thermischen Umgebung bewertet werden sollen, dann müssen lediglich die Eigenschaften erfasst werden, die in

Abbildung 127 der thermischen Wirkungskategorie zugeordnet sind. Zudem sind für sämtliche raumabgrenzenden Flächen beispielhafte Ausstattungselemente dargestellt. Es ist nicht auszuschließen, dass bei der Durchführung der raumphysiologischen Bilanz andere Ausstattungselemente vorhanden sind. Diese müssen nach dem gleichen Vorgehen mit den Eigenschaften erfasst werden, die einen Einfluss auf den Durchgang von Wärme, Licht, Luft und Schall zwischen dem Hintergrundsystem und dem Referenzraum haben.

Zur Erfassung der Level-0-Parameter stehen ebenfalls unterschiedliche Datenquellen zur Verfügung, die wiederum einen Einfluss auf die Datenspezifität und somit die Aussagekraft der Ergebnisse haben. Diese Datenquellen unterscheiden sich jedoch wesentlich von denen der Sachbilanz des Hintergrundsystems und werden deswegen im Folgenden dargestellt. Der Referenzraum wird durch das Volumen sowie durch den Luftwechsel in Folge von Undichtheit dargestellt. Zur Erfassung des Volumens stehen grundlegend drei Möglichkeiten zur Verfügung. So kann das Volumen anhand von Gebäudeplänen oder durch das Abmessen des Referenzraums bestimmt werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Raumvolumen vereinfacht abzuschätzen. Diese Methode führt jedoch zu einer verringerten Datenspezifität. Anschließend wird die Kubatur jeder raumabgrenzenden Fläche für die Erstellung der Sachbilanz benötigt. Zusätzlich müssen Ausstattungselemente wie Fenster oder Türen ebenfalls in ihrer Kubatur erfasst werden. Ähnlich der Bestimmung des Raumvolumens stehen hier die Entnahme der Daten aus den Gebäudeplänen, das Abmessen oder Abschätzen der einzelnen Bauteile zur Verfügung.

Die U-Wert-Berechnung sowohl der opaken als auch der transparenten Bauteile mit der zusätzlichen Berücksichtigung von Wärmebrücken setzt eine gewisse Datengrundlage voraus und geht mit einem erheblichen Berechnungsaufwand einher. Daher gibt es zusätzlich die Möglichkeit, auf Bauteilkataloge (Thiel & Riedel, 2011) zurückzugreifen. Daneben kann ebenfalls auf vergangene Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnungen (WSchVO 1977, 1984, 1995; EnEV 2002, 2007, 2009, 2014) sowie das geltende Gebäudeenergiegesetz (GEG) zurückgegriffen werden. Diese geben Maximalwerte für die U-Werte vor, von denen anzunehmen ist, dass diese bei der Errichtung eingehalten wurden. Nach Bjorn et al. (2018b) sollen der Beschaffungsaufwand der Daten und deren Bedeutung für die Wirkungsabschätzung in einem angemessenen Verhältnis zueinanderstehen. Da die Wärmedurchgangskoeffizienten vorrangig dafür benötigt werden, um eine Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Referenzräumen zu ermöglichen und zusätzlich ein Verständnis für das Verhältnis zwischen der Außentemperatur und der Innentemperatur zu schaffen, empfiehlt es sich bei mangelnder Datengrundlage, die U-Werte nicht rechnerisch einzeln zu erfassen, sondern auf die entsprechend der Baualtersklasse vorgeschriebenen U-Werte zurückzugreifen.

Alle weiteren Materialeigenschaften können entweder den Gebäudeplänen oder den Herstellerangaben entnommen werden. Zudem lassen sich die Eigenschaften anhand der im Stand des Wissens beschriebenen normativen Vorgaben berechnen.

Tabelle 12: Datenspezifität der Sachbilanzdaten des Level-0-Vordergrundsystems

Datenspezifität	Erklärung
Sehr hoch	Gebäudepläne, eigene Messungen und Berechnungen
Hoch	Verlässliche Messungen Dritter (z. B. <i>Blower-Door-Test</i>)
Mittel	Vergleichbare Aufbauten aus Bauteilkatalogen
Niedrig	Standard Norm- und Gesetzeswerte
Sehr niedrig	Abschätzung

Die Sachbilanz des in Abbildung 133 beispielhaft beschriebenen Referenzraums wurde anhand von Standardwerten sowie geforderten Normwerten für den Schallschutz und die Energieeinsparung erstellt. Der Raum hat eine Breite von 5 m, eine Länge von 10 m und eine Höhe von 3 m. Dementsprechend ergeben sich die Flächen der einzelnen raumabgrenzenden Bauteile. Die drei Fenster sind identisch groß mit einer Breite von 1.5 m und einer Höhe von 2 m, die Innentür hat eine Breite von 1 m und eine Höhe von 2.25 m. Es wurde kein *Blower-Door-Test* durchgeführt; somit wird ein n_{50} -Wert entsprechend der Forderung der Norm von 3.0 h^{-1} angenommen. Basierend hierauf lässt sich der Infiltrationsluftwechsel unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren für einen windschwachen Ort, eine normale Gebäudelage, eine Höhe des Referenzraums von weniger als 15 Meter über dem Grund, eine Nutzungseinheit mit nur einer windausgesetzten Fassade und keinem thermischen Auftrieb zu $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ berechnen. Für die U-Werte wurden die Forderungen der EnEV 2016 angesetzt, die für das Baujahr 2018 des Gebäudes gelten. Bei den Fenstern handelt es sich um eine Zwei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, die Innentür ist aus Holz, der Boden gefliest und die Wände und die Decke verputzt. Zusätzlich gibt es im Referenzraum eine Fußbodenheizung und einen innen liegenden Blendschutz aus einem mittel-durchscheinenden Material. Anhand dieser Vorgaben lassen sich sämtliche relevanten Level-0-Parameter bestimmen.

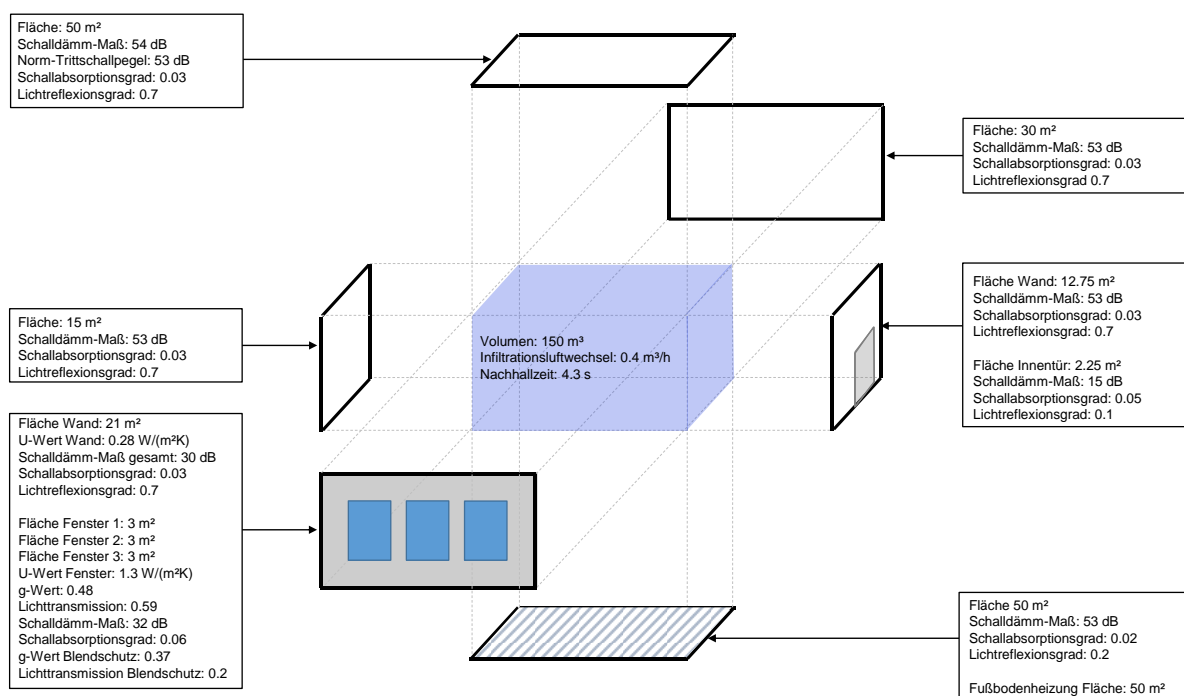


Abbildung 133: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanz des Level-0-Vordergrundsystems

6.3.1.3 Sachbilanz des Vordergrundsystems Level 1

Die Level-1-Parameter des Vordergrundsystems beziehen sich auf die im Stand des Wissens beschriebenen Raumparameter. Das Unterscheidungsmerkmal zwischen den Parametern des Levels 1 und des Levels 0 liegt, wie beschrieben in der Veränderbarkeit der Parameter. Somit ist das Fenster ein Bestandteil der vertikalen oder der horizontalen Gebäudehülle, welches jedoch nur von der Innenseite des Raums bedient werden kann. Diese Bedienbarkeit hat einen Einfluss auf die bauphysikalischen Größen im Raum, ohne die materialspezifischen Eigenschaften der Gebäudehülle zu verändern. Dies gilt gleichermaßen für weitere Parameter des Levels 1, wie beispielsweise den Blendschutz oder den Sonnenschutz, die ebenfalls im Innenraum bedient werden müssen. Somit können die Parameter, welche dem Level 1 zugeordnet werden, insgesamt als Ausstattungselemente definiert werden, da alle die Eigenschaft aufweisen, in ihrem Zustand variabel und einstellbar zu sein, wodurch sie sich sowohl in ihrem Zustand als auch in ihren Eigenschaften von den anderen Bestandteilen des Raums unterscheiden. (Grabe, 2012) Entsprechend der bei den Level-0-Parametern gegebenen Definition wird eine Flächenheizung, die sich innerhalb einer der raumabschließenden Flächen befindet, ebenfalls bereits bei den Level-0-Parametern erfasst, während der Zustand dieser Systeme erst bei den Level-1-Parametern beschrieben wird.

Aus den genannten Beispielen lässt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen den Parametern des Levels 1 erkennen. Das Fenster lässt sich in seinem Zustand verändern; hierfür wird jedoch kein Energieumsatz benötigt, während der Betrieb einer Heizung mit einem Energieumsatz einhergeht. Ähnliche Differenzierungen lassen sich in Heichele (2021) sowie Grabe (2012) finden. Anzumerken ist, dass eine solche Differenzierung nicht zwangsläufig für die Erstellung der Sachbilanz benötigt wird. Jedoch im Hinblick auf eine mögliche Optimierung der Auswirkungen von Innenräumen auf einen Menschen sollten im Sinne der Energieeinsparung möglichst Optimierungen gefunden werden, welche keinen zusätzlichen Energieverbrauch erzeugen.

Für das weitere Vorgehen müssen die Merkmalsausprägungen sowohl der Ausstattungselemente mit einem Energieumsatz sowie derer ohne Energieumsatz bestimmt werden. Im Folgenden werden diese dargestellt, jedoch ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit. Der Ersteller der Studie muss den Anspruch auf Vollständigkeit gewährleisten und entsprechend der Definition der Level-1-Parameter ohne Energieumsatz und der Level-1-Parameter mit Energieumsatz möglicherweise fehlende Ausstattungselemente für den konkreten Referenzraum identifizieren. Zusätzlich muss eine klare Grenze gezogen werden, welche Ausstattungselemente zu den Level-1-Parametern zählen und welche nicht. Beispielsweise wäre hier ein Schreibtisch oder ein Computer zu nennen, welche sich typischerweise in einem Büroraum befinden. Solche Benutzungsgegenstände, welche nur einen untergeordneten Einfluss auf die bauphysikalischen Elementarströme im Raum haben, werden in der Sachbilanz nicht beachtet. Es werden lediglich die Elemente erfasst, deren Funktion es ist, die Elementarströme im Raum zu regulieren. So hat beispielsweise ein Computer einen Energieumsatz und kann als interne Wärmequelle betrachtet werden; jedoch ist die Regulierung der Temperatur in einem Raum nicht die Funktion eines Computers, weswegen der Beitrag zur thermischen Umgebung in der Sachbilanz als vernachlässigbar betrachtet wird. Für die Erstellung der Sachbilanz des Levels 1 gilt somit der Grundsatz, dass sämtliche

Ausstattungs-elemente, die eine Nutzungsfunktion erfüllen, vernachlässigt werden können, während sämtliche Ausstattungselemente, die eine regulative Funktion erfüllen, berücksichtigt werden müssen. Nach Heichele (2021) und Grabe (2012) lassen sich für sämtliche regulativen Ausstattungselemente eine Reihe von Merkmalen definieren, die zur Beschreibung der konkreten Auswirkung der Elemente auf die bauphysikalischen Größen benötigt werden. Diese müssen für jedes einzelne Element beschrieben werden, wenn beispielsweise ein Raum über mehrere Heizkörper oder mehrere Fenster verfügt. Zu den Merkmalen zählen die Art des Elements, die Position sowohl des betrachteten Elements als auch der Bedieneinheit, die Dimension, mögliche Schäden des Elements, die Zugänglichkeit sowie der aktuelle Zustand zum Zeitpunkt der Sachbilanz. Des Weiteren müssen die Art und die Anzahl der Leistungsstufen bei Ausstattungselementen mit einem Energieumsatz sowie die Art und Anzahl der einstellbaren Zustände bei Ausstattungselementen ohne Energieumsatz beschrieben werden.

Zur Beschreibung der Level-1-Parameter müssen somit die Ausstattungselemente identifiziert werden, welche durch ihre Regulierbarkeit die Elementarströme im Raum beeinflussen können. Sowohl die thermische als auch die lufthygienische Umgebung werden durch die Elemente der Raumkonditionierung bestimmt, die visuelle Umgebung dagegen durch die natürliche und die künstliche Beleuchtung und die akustische Umgebung durch mögliche raumakustische Elemente. Da es sich bei den raumakustischen Elementen für gewöhnlich um nicht veränderbare Elemente handelt (z. B. Schallabsorber), werden diese lediglich im Rahmen der Level-0-Parameter beschrieben und können an dieser Stelle vernachlässigt werden.

In Abbildung 134 sind die möglichen Lüftungssysteme des Referenzraums sowie die Elementarströme, welche möglicherweise durch eine Anpassung der Luftwechselzahl beeinflusst werden, dargestellt.

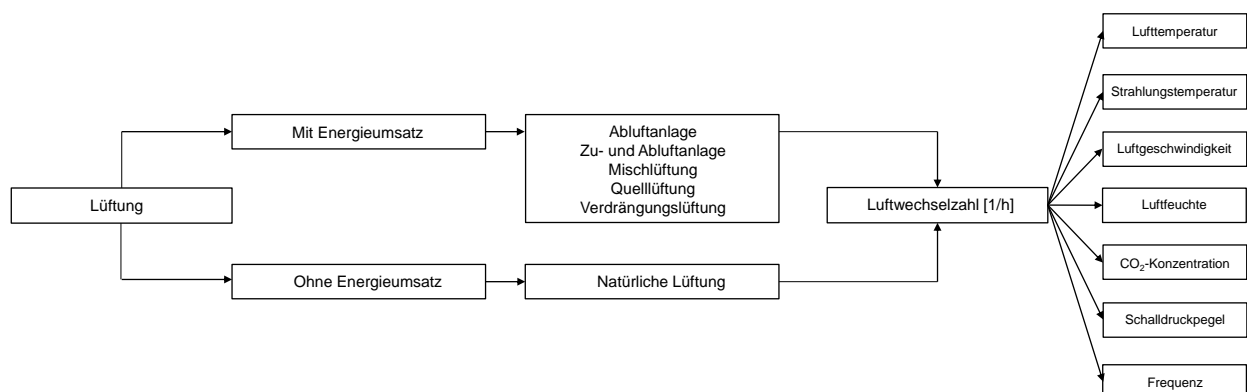


Abbildung 134: Lüftungssysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme

Sowohl die Lufttemperatur als auch die Strahlungstemperatur können durch die Lüftung verändert werden, dies sowohl bei der natürlichen Lüftung als auch bei der mechanischen Lüftung, falls die Temperaturdifferenz zwischen der Zuluft und der Raumluft entsprechend groß ist. Die Luftgeschwindigkeit im Raum vergrößert sich gleichermaßen, wenn sich die Luftwechselzahl erhöht. Die Luftfeuchte sowie die CO₂-Konzentration verändern sich dadurch, dass ein Austausch mit Frischluft oder Umluft stattfindet, welche gegebenenfalls einen von der Raumluft abweichenden Feuchtegehalt oder CO₂-Gehalt aufweist. Der Schalldruckpegel sowie die Frequenz können durch geöffnete Fenster verändert werden, wohingegen

die mechanische Lüftung durch den Einsatz von Ventilatoren einen Einfluss auf diese Elementarströme haben kann. Lediglich der Luftdruck und der spektrale Emissionsgrad werden nicht durch die Luftwechselzahl verändert. Der durch die Lüftung entstehende Luftwechsel kann zum Infiltrationsluftwechsel, welcher bei den Level-0-Parametern bestimmt wurde, dazu addiert werden.

Als weiteres Ausstattungselemente der Raumkonditionierung wurde im Stand des Wissens die Heizung genannt. Wie in Abbildung 135 dargestellt, haben alle Heizsysteme einen Energieumsatz und können durch ihren Betrieb sowohl die Lufttemperatur, die Strahlungstemperatur und die Luftfeuchte im Innenraum beeinflussen. Darüber hinaus hat die Platzierung des Heizsystems einen Einfluss auf die Zirkulation der Luft im Raum. Da hieraus nur ein minimaler Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit entsteht, kann dieser vernachlässigt werden. Die Einzelfeuerstätten können durch ihren Betrieb zusätzlich die CO₂-Konzentration im Innenraum verändern. Da jedoch die Nutzung von Einzelfeuerstätten in den Anwendungsfällen der raumphysiologischen Bilanz eine untergeordnete Rolle spielt, kann die CO₂-Konzentration an dieser Stelle ebenfalls vernachlässigt werden. Im Gegensatz zu den Lüftungssystemen, bei denen die Luftwechselzahl grafisch zwischen den Systemen an sich und den Elementarströmen steht, gibt es bei den Heizungen keinen solchen allgemein anerkannten Parameter, mit dem eine Relation zwischen dem Zustand der Heizsysteme und den Elementarströmen hergeleitet werden kann. Die Elementarströme ergeben sich lediglich aus dem Zustand des Heizsystems.

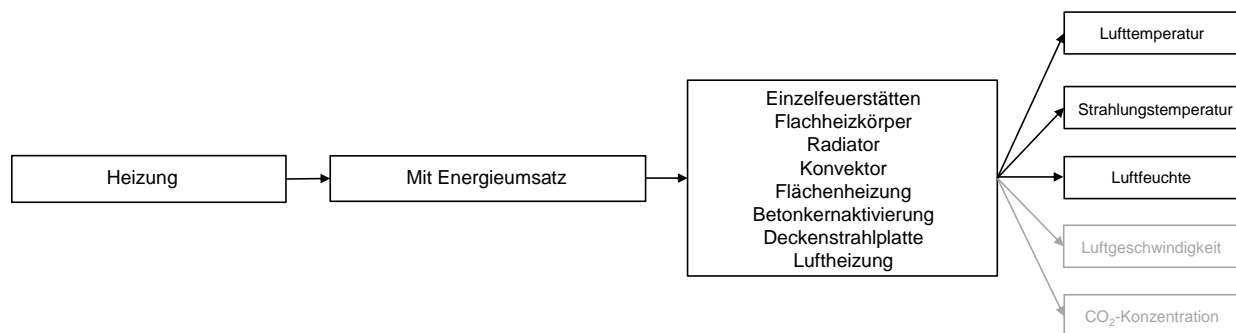


Abbildung 135: Heizsysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme

Die Systeme zur Kühlung sind in Abbildung 136 dargestellt. Auch hier ist nicht auszuschließen, dass es weitere Systeme wie den Klimabrunnen gibt, welche derzeit noch weniger verbreitet sind als die herkömmlichen Kühlungssysteme; die Einbindung dieser unterliegt dem Studienersteller. Die in Abbildung 136 dargestellten Kühlungssysteme können sich auf die angegebenen Elementarströme auswirken. Hierzu zählen sowohl die Luft- und die Strahlungstemperatur als auch die Luftgeschwindigkeit, die Luftfeuchte und die CO₂-Konzentration. Der Schalldruckpegel und die Frequenz können durch den Betrieb des Kühlsystems beeinflusst werden. Dies ist insbesondere auf die Ventilatoren, welche sich in den Schächten befinden, um die Luftbewegung zu generieren, zurückzuführen. Der Luftdruck und der spektrale Emissionsgrad werden nicht durch den Betrieb eines Kühlsystems verändert.

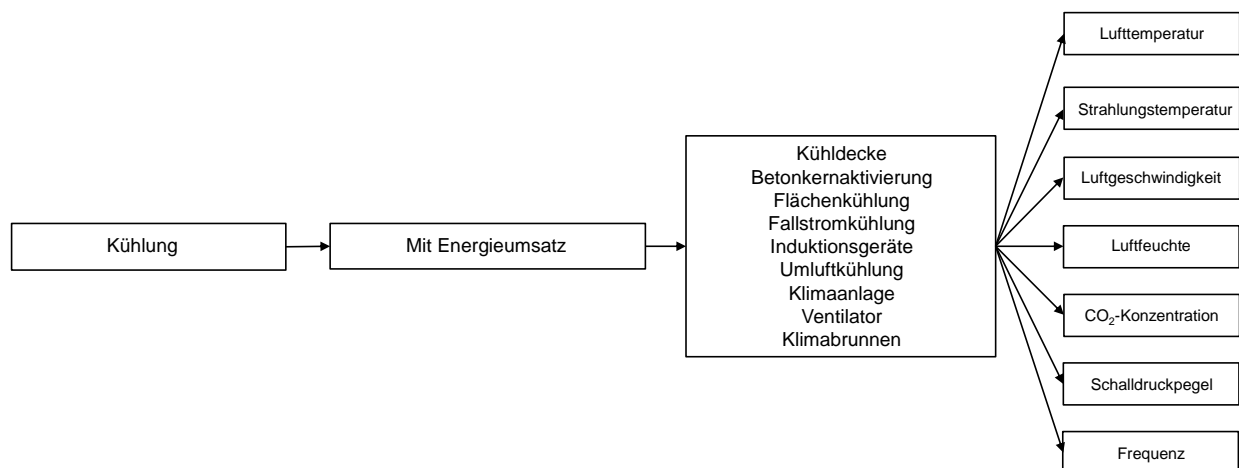


Abbildung 136: Kühlsysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme

Die Systeme zur Feuchteregulierung können durch ihren Betrieb nicht nur die Luftfeuchte, sondern ebenfalls die Lufttemperatur verändern. Zusätzlich kann bei der Nutzung von Ausstattungen zur Regulierung der Raumluftfeuchte ein gewisser Schalldruckpegel mit einer dazugehörigen Frequenz entstehen, der vom Menschen im Referenzraum wahrgenommen werden kann.

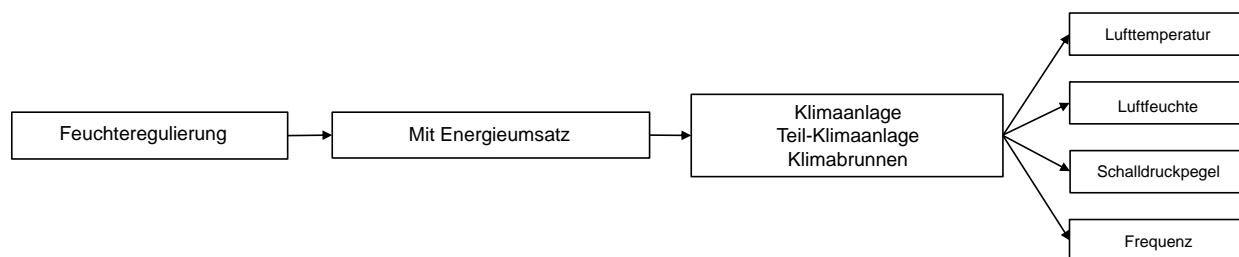


Abbildung 137: Feuchteregulierungssysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme

Ein weiteres Ausstattungselement, das einen Einfluss auf die Raumkonditionierung hat, ist der Sonnenschutz. Die starren Systeme, welche keine Veränderung zulassen, wurden bereits bei den Level-0-Parametern beschrieben und werden bei den Level-1-Parametern lediglich mit der Veränderbarkeit ihrer Wirksamkeit erfasst. Dennoch gibt es auch Sonnenschutzsysteme, die sich aus dem Innenraum heraus bedienen lassen und somit in ihrem Zustand oder ihrer Position veränderbar sind und an dieser Stelle in der Sachbilanz erfasst werden müssen. Da der gleiche Grundsatz für den Blendschutz gilt und dieser mit ähnlichen Systemen erbracht wird, macht es Sinn, den Blendschutz und den Sonnenschutz gemeinsam zu betrachten. Somit können Jalousien, Rollos und Faltdäden sowohl zum Sonnenschutz als auch zum Blendschutz genutzt werden. Die primäre Funktion des Sonnenschutzes ist es, den Raum vor Überhitzung zu schützen; dabei wird aber ebenfalls die Lichtquantität und -qualität beeinflusst. Der Sinn des Blendschutzes ist es, die Lichtquantität die von außen in den Raum einfällt, zu kontrollieren. Dabei wird der Blendschutz jedoch ebenfalls einen Einfluss auf die solaren Wärmegewinne im Raum haben. Die Elementarströme, die sowohl durch den Blendschutz als auch durch den Sonnenschutz beeinflusst werden, sind die Luft- und Strahlungstemperatur sowie der spektrale

Strahlungsfluss. Zusätzlich kann sich der Blend- oder Sonnenschutz auf die Luftbewegung im Raum auswirken, weil möglicherweise bei geschlossenen Systemen der Luftaustausch durch ein davor- oder dahinterliegendes geöffnetes Fenster erschwert wird. Diese Veränderung des Luftaustauschs kann sich weiterhin sowohl auf die Luftfeuchte als auch auf die CO₂-Konzentration auswirken. Zudem kann sich das Schalldämm-Maß durch das Schließen eines Sonnen- oder Blendschutzes verändern, wodurch der Schalldruckpegel und die dazugehörige Frequenz durch den Sonnen- und Blendschutz beeinflusst werden.

Die Sonnen- und Blendschutzsysteme werden als Systeme ohne Energieumsatz beschrieben. Das bedeutet jedoch nicht, dass keine Energie verwendet wird, um die Systeme in ihre Position zu bringen. Um die Systeme in ihrer Position zu verändern, wird entweder menschliche Kraft oder ein elektrischer Antrieb benötigt; jedoch verbrauchen diese Systeme keine Energie, um ihre regulative Funktion zu erfüllen. Somit werden die Sonnen- und Blendschutzsysteme nicht anhand ihrer Leistungsstufe beschrieben, sondern anhand ihres Zustands.

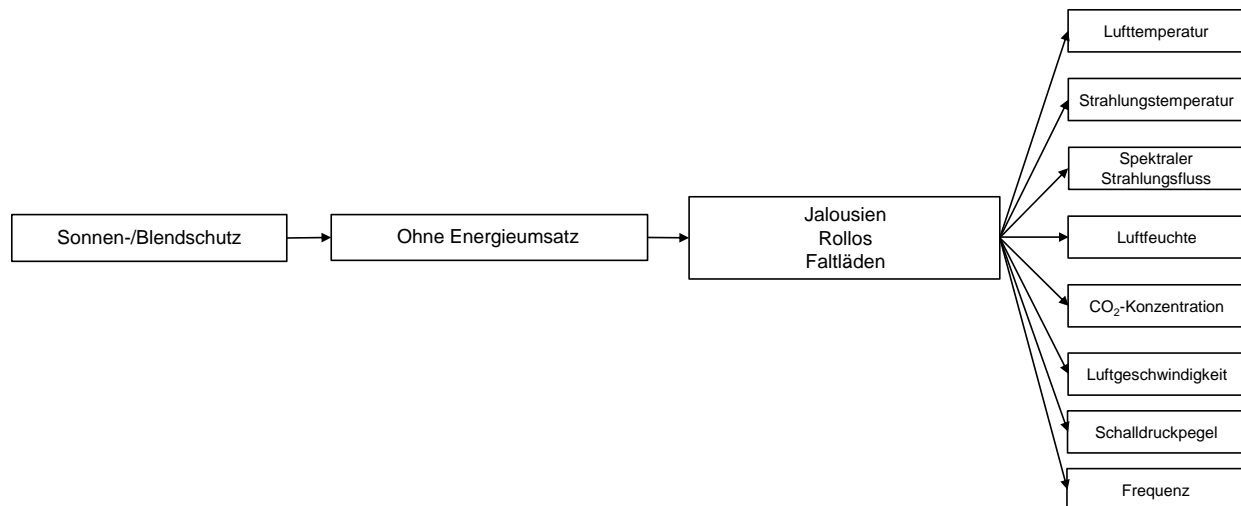


Abbildung 138: Blendschutz- und Sonnenschutzsysteme im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme

Das nächste Ausstattungselement von Räumen, das einen Einfluss auf alle vier Wirkungskategorien hat, ist das Fenster, welches bereits bei der natürlichen Lüftung von Räumen erwähnt wurde. Da das Fenster aber nicht ausschließlich eine Lüftungsfunktion erfüllt, sondern darüber hinaus einen Einfluss auf die Temperatur, die Lichtverhältnisse und den Schallpegel im Raum haben kann, muss das Fenster an dieser Stelle detaillierter betrachtet werden. Neben den Materialeigenschaften, welche sowohl die Wärme-, Schall- und Lichtdurchlässigkeit von Fenstern bestimmen, lassen sich die meisten Fenster in ihrem Zustand verändern. Eine Veränderung von einem geschlossenen hin zu einem offenen Fenster ermöglicht es den Außenumgebungsbedingungen, ungestört in den Raum einzudringen. Somit wirkt sich die Veränderung des Zustands des Fensters auf die Lufttemperatur und die Strahlungstemperatur, aber auch auf die Luftfeuchte und die Luftbewegung aus. Zusätzlich verändert sich die CO₂-Konzentration im Innenraum, wenn sich die Luftwechselrate verändert. Und letztlich können auch Geräusche von draußen ungehindert in den Raum gelangen, wodurch der Einfluss der Veränderung des Zustands des Fensters

sich auf den Schalldruckpegel und die dazugehörige Frequenz im Referenzraum auswirkt. Lediglich der spektrale Strahlungsfluss wird in den meisten Fällen nicht verändert werden, außer es handelt sich um ein besonders beschichtetes Glas, welches durch vollständiges Öffnen des Fensters keinen Einfluss mehr auf den spektralen Strahlungsfluss hat.

Analog zu den Sonnen- und Blendschutzsystemen handelt es sich bei Fenstern um Ausstattungselemente, die keinen Energieumsatz benötigen, um ihre regulative Funktion zu erfüllen. Während Fenster die Verbindung zum äußeren Hintergrundsystem abbilden, können Türen entweder eine Verbindung zum äußeren oder zum inneren Hintergrundsystem darstellen. Türen können in ihrer Position ebenfalls verändert werden (auf/zu). Jedoch ist hier die zeitliche Komponente von denen eines Fensters zu unterscheiden. Während eine Außentür mit großer Wahrscheinlichkeit nicht über einen längeren Zeitraum geöffnet wird, kann eine Innentür zu einem benachbarten Raum ähnlich wie ein Fenster über einen vom Nutzer bestimmten Zeitraum in einem bestimmten Zustand sein. An dieser Stelle wird daher die Außentür nicht weiter betrachtet, da diese bei einer Veränderung der Position sich auf die gleichen Elementarströme auswirkt wie das Fenster.

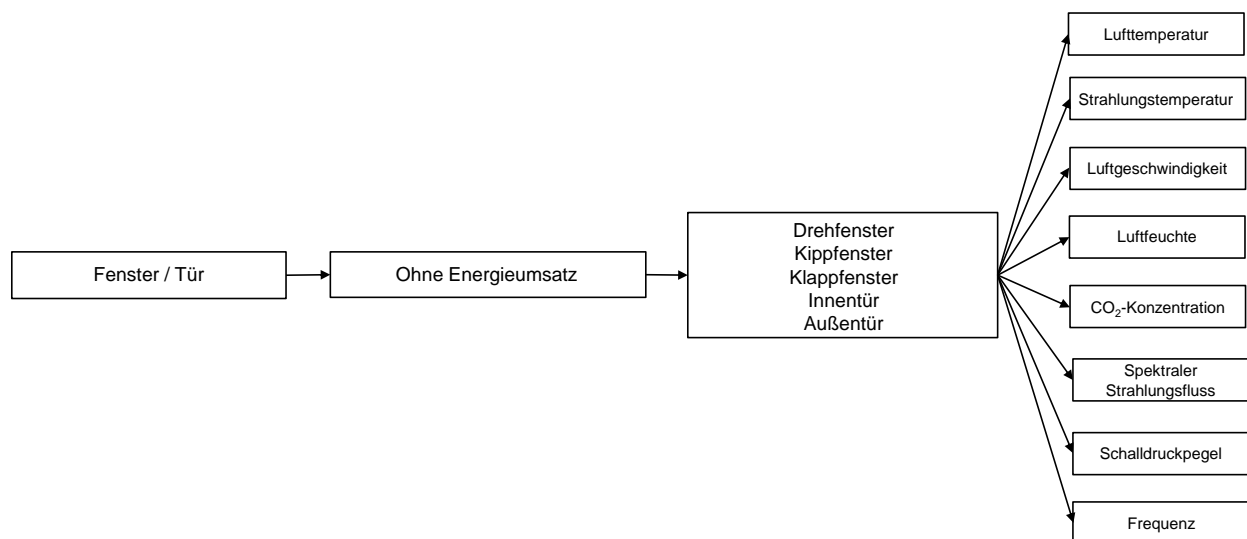


Abbildung 139: Fenster und Türen im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme

Innentüren stellen die Verbindung vom Referenzraum zu benachbarten Räumen dar. Hierbei findet ein Austausch zwischen den Elementarströmen beider Räume statt. Dabei gibt es jedoch in Abhängigkeit von der Zeitkomponente, wie lange die Tür zwischen den benachbarten Räumen offen ist, Unterschiede. Bei einem kurzen Öffnen der Innentür wird sich kaum ein Austausch zwischen den Räumen ergeben und der Einfluss der Innentür auf die Elementarströme kann als vernachlässigbar betrachtet werden. Wird die Verbindungstür jedoch länger nicht geschlossen, dann stellt sich für die meisten Elementarströme ein konstanter Zustand ein. Dies gilt für die Lufttemperatur, die Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit, die Luftfeuchte und die CO₂-Konzentration. Dagegen sind der spektrale Strahlungsfluss sowie der Schalldruckpegel und die Frequenz durch die Nutzung des Nachbarrums stärker veränderbar. Schaltet beispielsweise jemand die Deckenleuchten im Nachbarrum an oder führt ein lautes Telefonat, so kann dies ebenfalls einen Einfluss auf die Elementarströme im Referenzraum haben. Somit sind die

Elementarströme, die durch eine Innentür beeinflusst werden können, ebenfalls identisch zu denen, die durch die Veränderung des Zustands eines Fensters oder einer Außentür beeinflusst werden. Deswegen bezieht sich Abbildung 139 sowohl auf Fenster als auch auf Türen, da dieselben Elementarströme durch eine Veränderung des Zustands beeinflusst werden können.

Als letztes veränderbares Ausstattungselement in einem typischen Innenraum bleibt die künstliche Beleuchtung. Jede der im Stand des Wissens beschriebenen Lampen hat einen unterschiedlichen spektralen Strahlungsfluss. Dieser Elementarstrom alleine reicht jedoch nicht aus, um die visuelle Wirkungskategorie bewerten zu können. Zusätzlich hierzu wird die beleuchtete Fläche benötigt, welche wiederum durch die Leuchten, in denen die Lampen verwendet werden, definiert wird.

Jede Leuchte im Referenzraum lässt sich einer der in Tabelle 10 beschriebenen Beleuchtungsmethoden zuordnen. Zusätzlich wird die in der Leuchte verwendete Lampe für die Sachbilanz benötigt. Der veränderbare Zustand hängt letztendlich davon ab, ob die Leuchte ein- oder ausgeschaltet ist und das Licht möglicherweise dimmbar ist, nicht jedoch davon, ob es sich um eine in ihrer Position veränderliche Lampe handelt. Bei der Erstellung der Sachbilanz kann die Position der Leuchte grafisch dargestellt werden; sollte sich diese Position bei der erneuten Durchführung der Bilanz verändert haben, muss die Leuchte mit ihrer neuen Position mitaufgenommen werden.

Unabhängig davon, ob es sich um eine bewegliche oder unbewegliche Leuchte handelt, hat der Zustand, ob diese an- oder ausgeschaltet ist, primär einen Einfluss auf den spektralen Strahlungsfluss sowie die dazugehörige beleuchtete Fläche. Daneben können insbesondere die Temperaturstrahler die Strahlungstemperatur verändern. Neuere Lampen wie die LEDs haben jedoch keinen Einfluss auf die Strahlungstemperatur.

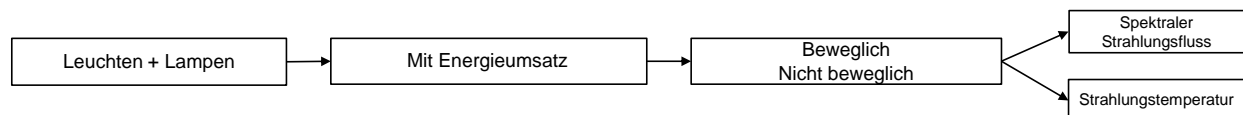


Abbildung 140: Leuchten und Lampen im Referenzraum mit ihrem Einfluss auf die Elementarströme

Alle grundlegenden Ausstattungselemente, die in ihrem Zustand oder ihrer Position variabel sind, wurden somit erfasst. Es wird dem Ersteller der raumphysiologischen Bilanz überlassen mögliche weitere Ausstattungselemente, die eine regulative Funktion erfüllen, zu identifizieren und anhand der genannten Kenngrößen bei der Durchführung der Sachbilanz zu beschreiben.

Weiterhin ist anzumerken, dass sämtliche zentralen Systeme, die Heizung, die Lüftung, die Kühlung, die Be- und Entfeuchtung möglicherweise so geregelt werden, dass der Nutzer im Raum keinen Einfluss auf deren Einstellung hat. Diese übergeordneten Regulierungen zählen in diesem Fall zu den Level-3-Parametern, welche die Parameter definieren, die einen Einfluss auf Parameter einer anderen Kategorie haben, ohne direkt dieser Kategorie zugeordnet zu werden. Es wird an dieser Stelle auch keine allgemeine Definition für die Einstellung der Leistungsstufen für die Systeme mit einem Energieumsatz getroffen, da diese in Abhängigkeit von dem verwendeten System unterschiedlich sein können. Dennoch ist es entscheidend, bei der Erstellung der Sachbilanz für jedes Raumkonditionierungssystem den Zustand zum Zeitpunkt der Bilanzerstellung und die Anzahl der Leistungsstufen zu erfassen.

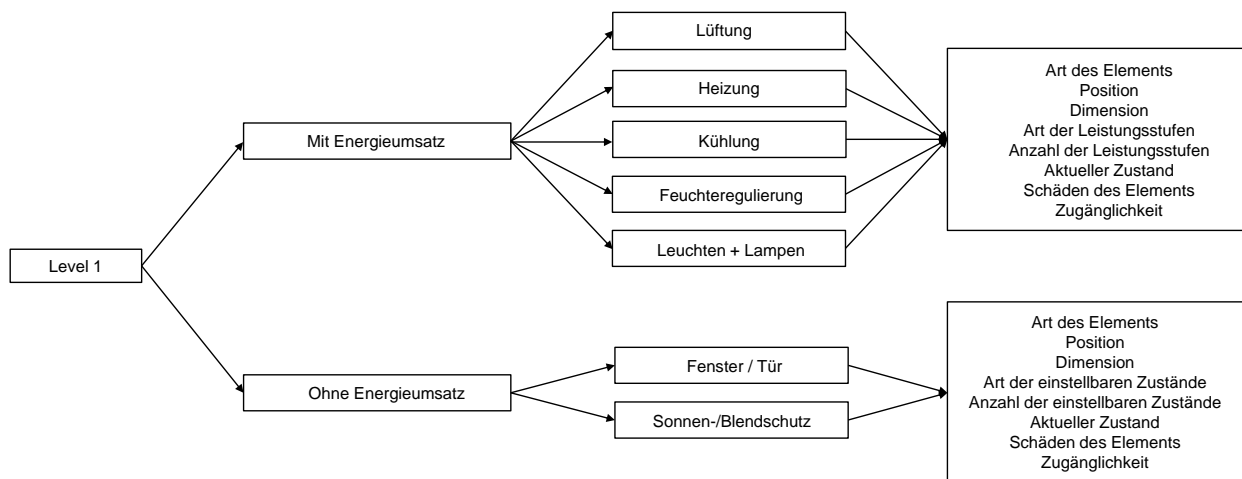


Abbildung 141: Grundstruktur zur Erstellung der Sachbilanz der Level-1-Parameter

Die in der Abbildung 141 dargestellten Ausstattungselemente müssen mit den angegebenen Eigenschaften für jeden Referenzraum erfasst werden, sofern diese vorhanden sind.

Während die Abmessungen von Fenstern, Türen oder Flächenheizungen bereits bei den Level-0-Parametern erfasst wurden, werden die Abmessungen von weiteren Ausstattungselementen bei den Level-1-Parametern registriert. Dabei muss für jedes einzelne Element nicht nur die Art des Elements, sondern auch die Position und die Dimension beschrieben werden. So kann beispielsweise ein Raum über mehrere Radiatoren, Luftauslässe oder Lampen und Leuchten verfügen.

Die Ausstattungselemente mit Energieumsatz werden anschließend anhand der Art und der Anzahl an Leistungsstufen beschrieben. Während diese für die einen Elemente sichtbar und leicht zu identifizieren sind (z. B. Radiator) ist dies bei wieder anderen Elementen nicht der Fall (z. B. Lüftungsauslass). Sind in diesem Fall keine Informationen vorhanden, wird lediglich der aktuelle Zustand beschrieben. Dabei gilt es, zwischen den Ausstattungselementen zu unterscheiden. Bei einem Radiator wird beispielsweise der aktuelle Zustand erfasst, indem der Thermostat auf Stufe 2 gestellt ist. Um diese Stufe einordnen zu können, ist es entscheidend, die Anzahl und die Art der Leistungsstufen zu kennen. Ein Luftauslass ohne direkten Zugriff auf die Steuerung lässt sich über den Volumenstrom, welcher einem Raum zugeführt wird, beschreiben, wodurch in diesem Fall die Angabe über die Anzahl an Leistungsstufen nur von geringer Bedeutung ist. Aus dem genannten Volumenstrom kann wiederum die Luftwechselzahl bestimmt werden. Ist die Quantifizierung des Volumenstroms nicht möglich, muss mindestens angegeben werden, ob das betrachtete Ausstattungselement zum Zeitpunkt der Sachbilanz in Betrieb ist. Weitere detaillierte Messungen, beispielsweise der Temperatur und der Feuchte des Zuluft-Stroms können ebenfalls angefertigt werden, um eine bessere Vergleichbarkeit von Referenzräumen zu ermöglichen und eine bessere Ausgangslage für eine mögliche Optimierung zu schaffen. Dies gilt neben der Lüftungsanlage für alle weiteren Ausstattungselemente mit einem Energieumsatz.

Die Ausstattungselemente ohne Energieumsatz lassen sich dagegen durch die Anzahl der möglichen Zustände sowie den zum Zeitpunkt der Erstellung der Sachbilanz vorhandenen Zustand beschreiben. So kann es sich beispielsweise um ein Dreh-/Kippenfenster handeln, wodurch die möglichen Zustände beschrieben werden, welches zum Zeitpunkt der Sachbilanz in gekippter Position ist.

Abschließend muss für jedes Ausstattungselement das Vorhandensein möglicher Schäden sowie die Zugänglichkeit der Bedieneinheit erfasst werden. Neben sichtbaren Schäden, die der Sachbilanzersteller erfassen kann, können hierfür die Nutzer befragt werden. Die Zugänglichkeit der Bedieneinheit kann zum einen über die Beschreibung der Position der Bedieneinheit und zum anderen über die Befragung der Nutzer erfolgen.

Die Beschaffung der Daten des Levels 1 findet somit direkt im Referenzraum statt und kann sowohl durch Messungen, Beschreibung des Sichtbaren und durch Befragung der Nutzer durchgeführt werden. Auch hier ergeben sich jedoch wiederum Abzüge bei der Datenspezifität, welche in der folgenden Tabelle abgebildet sind.

Tabelle 13: Datenspezifität der Sachbilanzdaten des Level-1-Vordergrundsystems

Datenspezifität	Erklärung
Sehr hoch	Gebäudepläne, eigene Messungen und Berechnungen
Hoch	Verlässliche Messungen Dritter / Befragung der Nutzer
Mittel	Standard-Werte
Niedrig	Abschätzung
Sehr niedrig	Beschreibung: Element in Betrieb oder nicht

Die alleinige Erfassung der Ausstattungselemente reicht für eine aussagekräftige Sachbilanz jedoch meistens nicht aus. Diese müssen in dem Kontext des Referenzraums beschrieben werden. So ist es sinnvoll, die Position der grundlegenden Möblierung darzustellen. Dies wäre bei einem Arbeitsraum die Anordnung der Schreibtische oder in einem Altenheim die Position der Sitzmöglichkeiten und des Bettes.

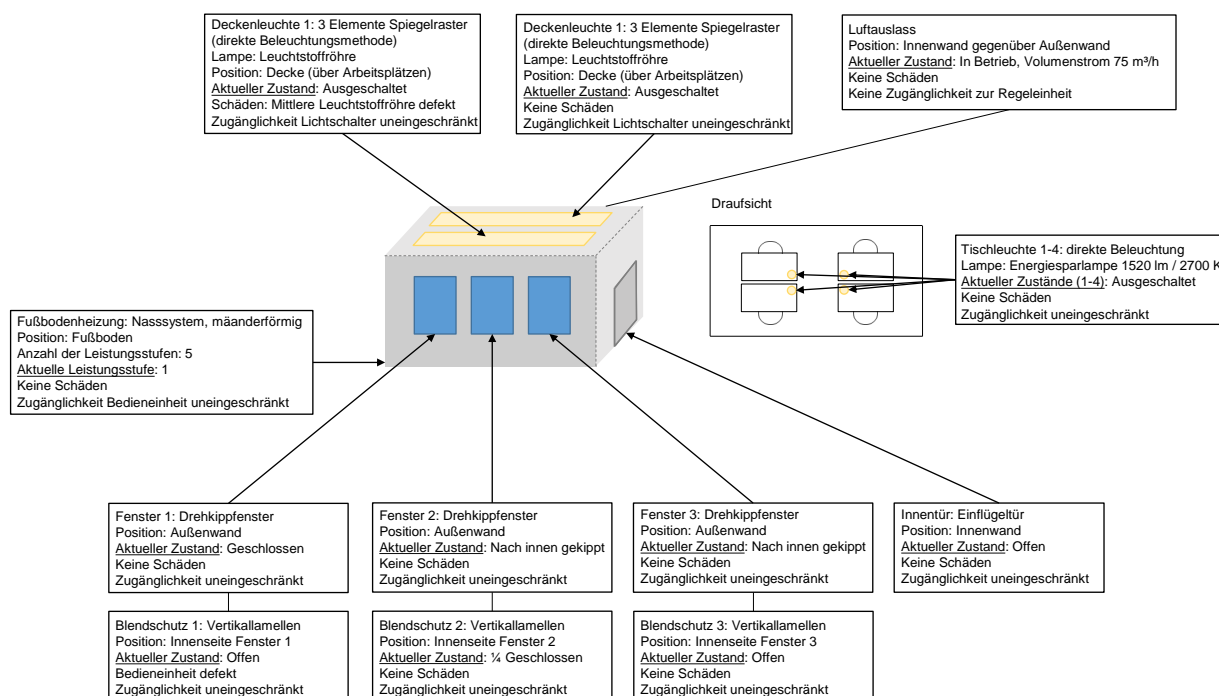


Abbildung 142: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanz des Level-1-Vordergrundsystems

Abbildung 142 zeigt die beispielhafte Sachbilanz der Level-1-Parameter für den betrachteten Referenzraum. Wird die Sachbilanz zu mehreren Zeitpunkten wiederholt, dann ist der aktuelle Zustand die einzige Eigenschaft die erneut erfasst werden muss, es sei denn, eines der Ausstattungselemente wurde aus dem Raum entfernt oder Bestandteile des Elements ausgetauscht (z. B. Austausch der Lampe in der Leuchte).

Sämtliche Ausstattungselemente wurden anhand der Parameter beschrieben, die in Abbildung 141 aufgelistet sind. In Abhängigkeit von der Datengrundlage können die Daten die entsprechend Tabelle 13 definierten Spezifitäten aufweisen. Diese muss ebenfalls dokumentiert werden und bei der Auswertung der Ergebnisse eine Berücksichtigung finden.

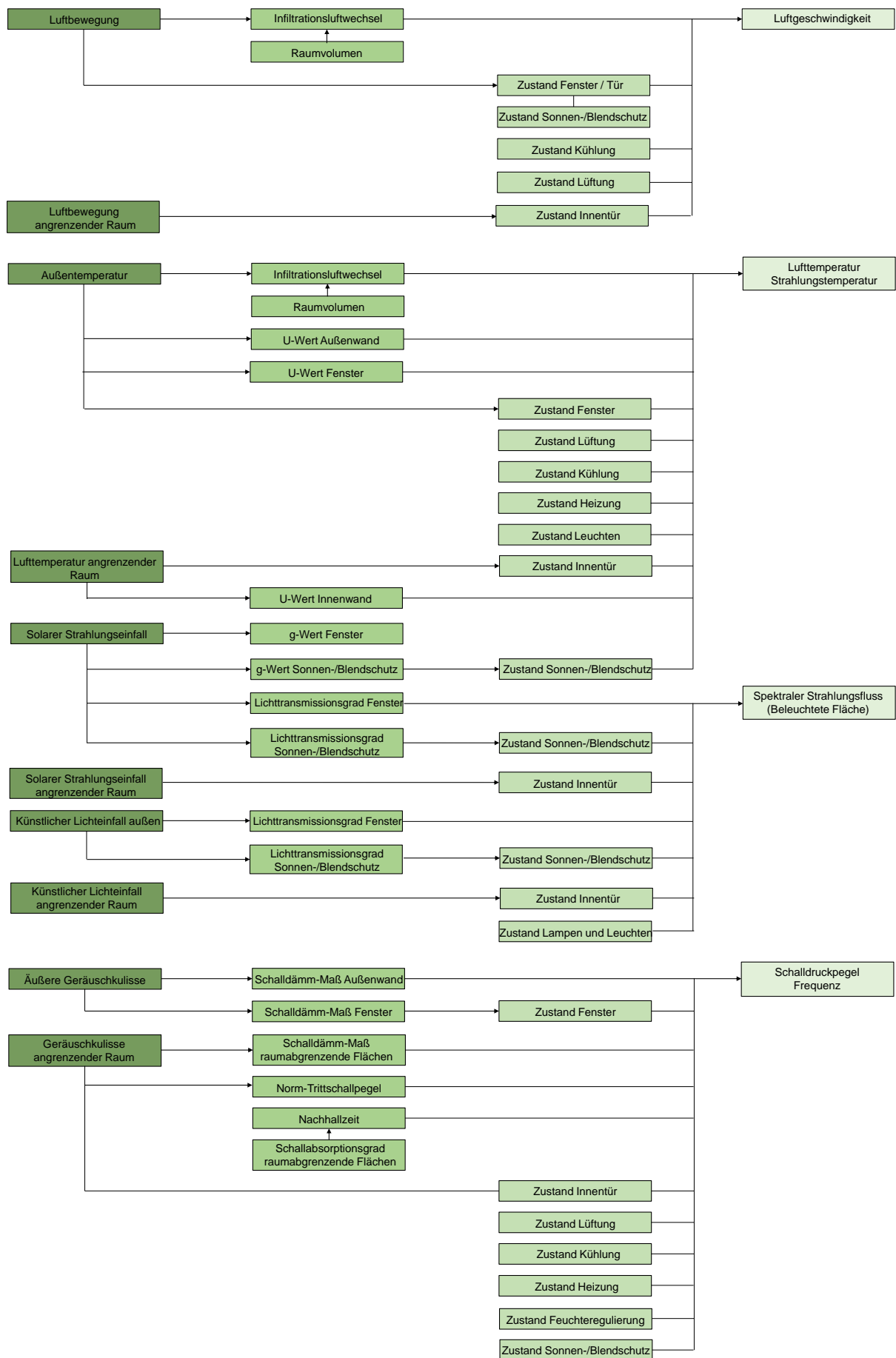
6.3.1.4 Messung der Elementarströme im Raum und Konstruktion des Sachbilanzmodells

Sämtliche Hintergrund- und Vordergrundparameter, die einen Einfluss auf die Elementarströme im Raum haben, wurden identifiziert. Als letzter Punkt bleibt somit das Messen der Elementarströme im Raum und die Zuordnung dieser zu den einzelnen Parametern der Sachbilanz.

Für die Messung der Elementarströme kann der Sachbilanzersteller, die ihm zur Verfügung stehende Messtechnik verwenden. Es wird keine konkrete Vorgabe dazu gemacht, welche Geräte zum Einsatz kommen müssen. Sollte eine Messung nicht möglich sein, kann auf Schätz- oder Erfahrungswerte zurückgegriffen werden, welche jedoch zu einer niedrigeren Datenspezifität führen, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung verloren geht.

Als letzter Schritt der Sachbilanz der Technosphäre und der Ökosphäre werden die Sachbilanzergebnisse den Elementarströmen zugeordnet. Die Zuordnung ist beispielhaft in Abbildung 143 dargestellt. Diese ist vollständig in Bezug auf sämtliche Hintergrund- sowie Level-0- und Level-1-Parameter, welche in den vorherigen Kapiteln vorgestellt wurden; jedoch gilt auch hier, dass kein Anspruch auf eine allgemeingültige Vollständigkeit erhoben wird. Sollten sich weitere Level-0- oder Level-1-Parameter in dem betrachteten Referenzraum befinden, sind diese, in identischem Vorgehen, den Elementarströmen zuzuordnen. In Abbildung 143 sind die relevanten Sachbilanzparameter entsprechend den Farben von dunkel zu hell, geordnet in das äußere und innere Hintergrundsystem, mit dunkelgrün auf der linken Seite, daran anschließend die Level-0-Parameter, die Level-1-Parameter und schließlich die daraus resultierenden Elementarströme. Um die Darstellung dennoch übersichtlich zu gestalten, wurde diese möglichst vereinfacht. So wurden beispielsweise die Kubatur der einzelnen raumabschließenden Flächen oder die Art der jeweiligen Raumausstattungen nicht mit aufgenommen, wohl wissend, dass diese einen Einfluss haben. Als entscheidende Faktoren wurden ausschließlich die Materialeigenschaften sowie die Zustände berücksichtigt.

Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz



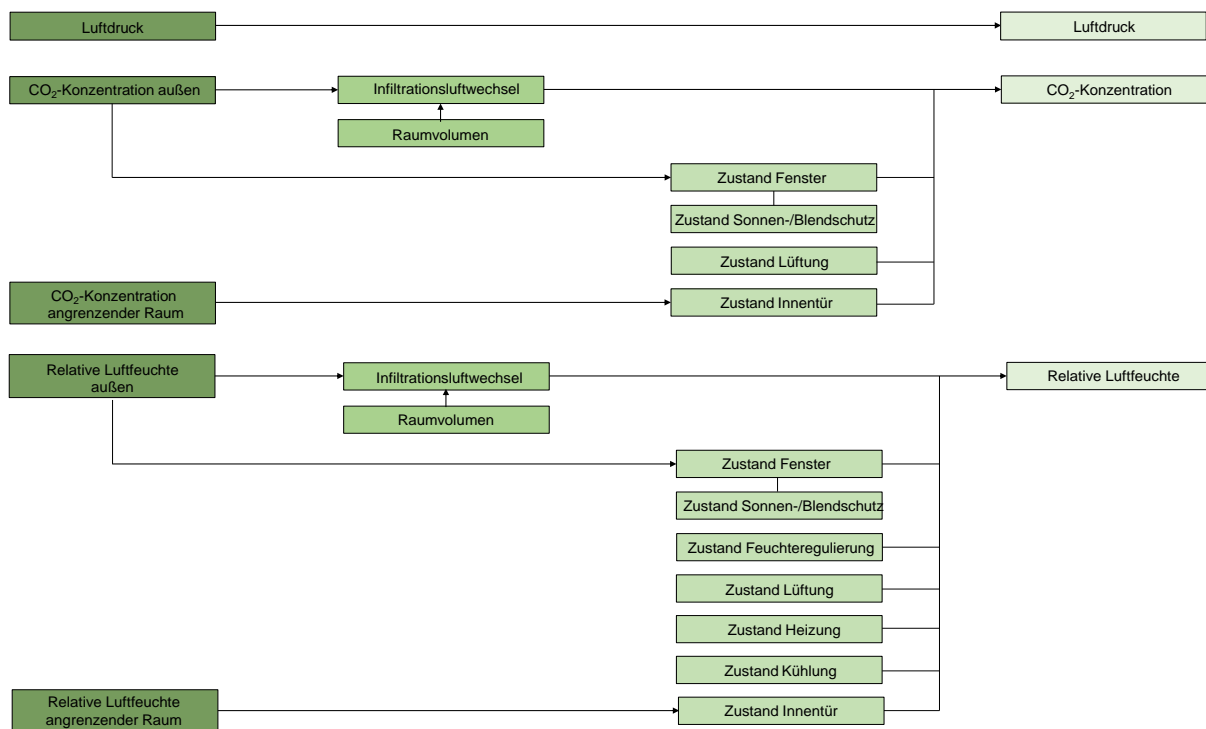


Abbildung 143: Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den Elementarströmen (Sachbilanzmodell)

6.3.2 Sachbilanz der individuellen Parameter

Zur Bestimmung der Wirkungsindikatoren werden neben den Elementarströmen auch personenbezogenen Daten benötigt, die den physiologischen und den aktivitätsabhängigen Zustand des Menschen im Raum beschreiben. Ohne diese Eingangsgrößen lassen sich, die Wirkungsindikatoren nicht berechnen. Bei der Durchführung der raumphysiologischen Bilanz kann zwischen den beschriebenen Anwendungsszenarien unterschieden werden, welche sich entweder auf eine individuelle Person oder auf eine vordefinierte Standardperson beziehen. Zur Optimierung von einzelnen Referenzräumen empfiehlt es sich, die Wirkungsabschätzung für individuelle Personen, die diesen Raum tatsächlich nutzen, durchzuführen. Sollen jedoch Referenzräume oder unterschiedliche Gebäude miteinander verglichen werden, muss sich dieser Vergleich auf ein und dieselbe Person beziehen, da ansonsten der Vergleich an Aussagekraft verliert. Somit wird in diesem Fall auf Standardpersonen zurückgegriffen, welche der durchschnittlichen Person entsprechen, die den betrachteten Referenzraum nutzen würde (z. B. Büroangestellte, Schulkind, Altenheimbewohner). Unabhängig davon, ob die Wirkungsabschätzung auf eine individuelle oder eine standardisierte Person bezogen wird, müssen in der Sachbilanz die in der folgenden Abbildung 144 dargestellten Parameter erfasst werden. Bei den Level-2-Parametern kann ebenfalls zwischen den veränderbaren und den nicht veränderbaren Parametern differenziert werden. Zu den unveränderbaren Parametern zählen das Alter, das Geschlecht, das Gewicht, die Größe und der Hörzustand. Bis auf das Geschlecht und die Größe ab dem ausgewachsenen Alter können sich diese physiologischen Parameter sehr wohl verändern, jedoch nicht während der Durchführung einer raumphysiologischen Bilanz und somit ebenso wenig im Hinblick auf eine mögliche Optimierung der gegebenen Bewertungssituation. Die veränderbaren Parameter können dagegen kurzfristig angepasst

werden. Die Aktivität beschreibt den Energieumsatz des Menschen. Daneben ergibt sich aus der Aktivität das visuelle Feld und meistens die getragene Bekleidung.

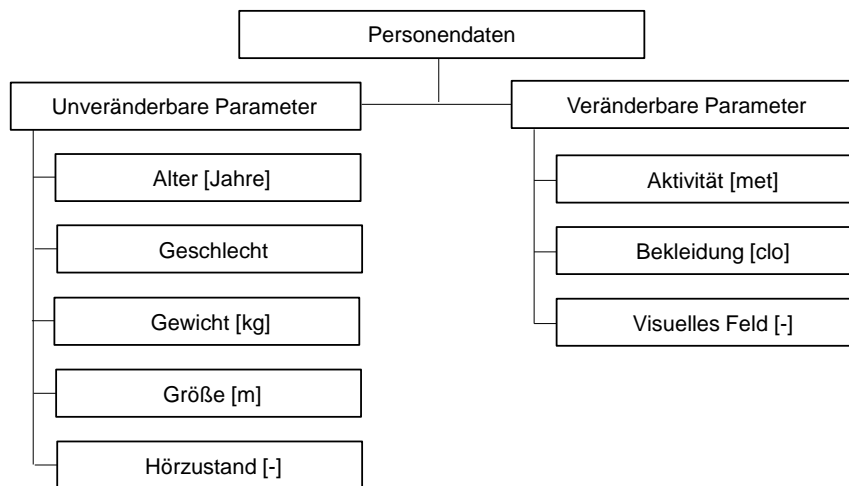


Abbildung 144: Personenbezogene (Level 2) Parameter in der Sachbilanz

6.3.2.1 Individuelle Person

Um die Personendaten individuell bestimmen zu können, wird ein Fragebogen benötigt, welcher eine möglichst einfache Abfrage erlaubt. Sowohl das Alter, das Geschlecht, das Gewicht und die Größe können als einzelne Abfrage formuliert werden. So lautet die Aufforderung z. B. „Nennen Sie Ihr Alter“. Der Hörzustand kann dagegen in der Form, in der dieser Parameter für die Sachbilanz benötigt wird, nicht vom Menschen beschrieben werden. Hierfür muss der in Kapitel 5.5.1.2 nach Weinstein und Ventry (1983) und Newman et al. (1990) beschriebene Fragebogen verwendet werden. Anschließend können die veränderbaren Parameter bestimmt werden. Diese könnten ebenfalls anhand von offenen Fragen erfasst werden, jedoch ist es zielführender, dem Menschen für das Ausfüllen dieses Teils des Fragebogens vordefinierte Antwortmöglichkeiten anzubieten, da es ansonsten zu Missverständnissen bezüglich der einzelnen Parameter kommen kann. Für die Durchführung der Wirkungsabschätzung wird die Aktivität [met] und die Bekleidung [clo] benötigt; somit muss gewährleistet werden, dass der Bilanzersteller diese Werte aus den von individuellen Personen gegebenen Antworten errechnen kann. Ebenso werden für das visuelle Feld Auswahlmöglichkeiten gegeben, welche die Abschätzung der tatsächlichen Feldgröße ermöglichen. Sowohl die Aktivität, die Kleidung und das visuelle Feld müssen nicht zwangsläufig vom Nutzer selber angegeben werden, sondern können ebenfalls von einem externen Beobachter entsprechend der zur Verfügung stehenden Auswahlmöglichkeiten abgeschätzt werden. Dazu kommt, dass es sich bei diesen Parametern um die wesentlichen Größen für die thermische, die lufthygienische und die visuelle Wirkungskategorie handelt, die einen Einfluss auf die Auswirkungen der Umgebung haben. Wird somit beispielsweise die Wirkungsabschätzung stündlich durchgeführt, müssten diese drei Parameter jedes Mal beschrieben werden.

Zur Beschreibung des Energieumsatzes kann auf Tabelle B.3 der DIN EN ISO 8996 (2005) zurückgegriffen werden. Diese bildet die Grundlage der vordefinierten Auswahlmöglichkeiten, die für die Erstellung der Sachbilanz gegeben werden. Sollte jedoch die passende Auswahl nicht vorhanden sein, kann diese durch

den Bilanzersteller ergänzt und der genannten Tabelle entnommen werden. Entsprechend den möglichen Anwendungen der raumphysiologischen Bilanz sind die Auswahlmöglichkeiten für bestimmte Tätigkeiten beschrieben. So kann aus denen in der folgenden Tabelle 14 angegebenen Tätigkeiten ausgewählt werden. Diese können für Büroräume, Klassenräume, Krankenhaus- oder Pflegeheimzimmer, Wohnräume und handwerkliche Arbeitsräume angewandt werden. Nach entsprechender Umrechnung wird der Energieumsatz [met] bestimmt.

Tabelle 14: Energieumsatz für bestimmte Tätigkeiten (DIN EN ISO 8996, 2005)

Tätigkeit	Energieumsatz [W/m ²]
Schlafen	40
Liegen	45
Ruhezustand, Sitzen	55
Ruhezustand, Stehen	70
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	70
Leichte Tätigkeit im Stehen (Einkaufen, Labor, Leichtindustrie)	95
Mäßig schwere Tätigkeit (Verkäufer, Hausarbeit, Arbeit mit Maschinen)	115

Die in der DIN EN ISO 8996 (2005) angegebenen Werte für den Energieumsatz beziehen sich auf eine Durchschnittsperson (Mann, 30 Jahre, 70 kg, 1.75 m; Frau, 30 Jahre, 60 kg, 1.70 m). Eine detailliertere Bestimmung ist entsprechend der nach Binsfeld (2018) gegebenen Methode mithilfe der Herzfrequenz ebenfalls möglich. Diese bedarf jedoch eines deutlich höheren Aufwands, da die entsprechende Messtechnik vorhanden sein muss und die Messung der Herzfrequenz für jede Person im Referenzraum einzeln durchgeführt werden muss. Insbesondere bei Kindern, älteren Menschen, Menschen mit einer Erkrankung/Behinderung, stark über- oder untergewichtigen Menschen empfiehlt es sich, dennoch auf die detaillierte Methode zurückzugreifen, da der Energieumsatz erheblich von den Durchschnittswerten abweichen kann.

Die Angabe über die getragene Bekleidung kann ähnlich dem Vorgehen zur Angabe der Aktivität erfolgen. Hierbei kann auf die Isolierungswerte aus der DIN EN ISO 9920 (2009) zurückgegriffen werden. Es wird auch an dieser Stelle auf eine vereinfachte Bestimmung entsprechend Tabelle B.1 verwiesen. Eine detailliertere Bestimmung entsprechend Tabelle B.2 und Tabelle B.3 könnte bei der Person, die den Fragebogen ausfüllt, zu Überforderung und somit zur Demotivation führen. Aus diesem Grund wird die Auswahl der Kleidungsstücke auf das Nötigste reduziert. Zu denen in Tabelle B.1 genannten Kleidungsstücken wurden lediglich Nachtwäsche, Bademäntel und Strumpfhosen hinzugefügt. Die Tabelle mit den clo-Werten der einzelnen Kleidungsstücke findet sich in Anhang E.

Die sich ergebende Wärmeisolierung kann anschließend anhand der clo-Werte der einzelnen Kleidungsstücke entsprechend der Vorgaben der DIN EN ISO 8996 (2005) mit Gleichung 97 berechnet werden.

$$I_{cl} = 0.161 + 0.862 \sum I_{clu} [clo] \quad (97)$$

Da sich die DIN EN ISO 9920 (2009) ausschließlich auf Kleidungsstücke bezieht, jedoch nicht auf die zusätzliche Wärmedämmung einer Person, die zugedeckt in einem Bett liegt, muss diese Dämmung gesondert berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit, diese Dämmung zu erfassen, wird nach Pan, Lin und Deng (2010) gegeben. Dabei wird nicht nur die Art der Decke und der Matratze, sondern zusätzlich die von der Decke bedeckte Körperfläche berücksichtigt.

Als letzter veränderbarer Parameter bleibt das visuelle Feld. Dieses wird nicht anhand eines genauen Zahlenwerts dargestellt, sondern lediglich dadurch definiert, ob der Nutzer ein kleines oder ein erweitertes visuelles Feld betrachtet. Das visuelle Feld hängt somit direkt mit der Aktivität zusammen. Betrachtet der Nutzer beispielsweise nur seinen Computer-Bildschirm, wird lediglich ein kleines visuelles Feld betrachtet. Folgt der Nutzer dagegen einer Präsentation, die auf einem Bildschirm oder einer Leinwand in einiger Entfernung gezeigt wird, dann würde das visuelle Feld durch ein erweitertes Feld beschrieben werden. Eine darüber hinaus detailliertere Bestimmung des visuellen Feldes bringt für die Wirkungsabschätzung keinen Mehrwert, da für die Berechnung der visuellen Wirkungsindikatoren lediglich die numerischen Grundlagen genutzt werden können, welche sich auf einen 2° oder einen 10° Beobachter stellvertretend für kleines und erweitertes visuelles Feld beziehen. Wichtiger ist dagegen die Fläche des betrachteten Feldes. Diese wird jedoch nicht vom Nutzer selber angegeben, sondern muss vom Ersteller der Bilanz gemessen oder abgeschätzt werden.

Somit wurden sämtliche, sowohl veränderbare als auch nicht veränderbare, personenbezogene Parameter bestimmt. An dieser Stelle kann darauf hingewiesen werden, dass eine individuelle Bestimmung des respiratorischen Quotienten ebenfalls denkbar ist, da sich dieser in Abhängigkeit der Ernährung und dem Anteil an Fett, Proteinen und Kohlenhydraten verändert. Da jedoch weder der Nutzer noch der Studierersteller diese Anteile genau abschätzen kann, kann für gewöhnlich von einer Mischkost mit einem RQ von 0.85 [-] ausgegangen werden.

Neben den bereits erwähnten Parametern, muss im Fragebogen die Position des jeweiligen Nutzers im Raum angegeben werden. Hierfür empfiehlt es sich, die Skizze entsprechend der Draufsicht zur Darstellung der Sachbilanz der Level-1-Parameter zu verwenden. Der für Erwachsene zu verwendende Fragebogen befindet sich in Anhang F. Für ältere Personen müssen die Fragen bezüglich des Hörverlustes entsprechend den Vorgaben nach Ventry und Weinstein (1982) angepasst werden. Soll die Anwendung für Kinder erfolgen, dann kann nach Lenarz & Boenninghaus (2012) davon ausgegangen werden, dass kein altersbedingter Hörverlust vorliegt und somit dieser Fragenteil aus dem Fragebogen gestrichen wird.

6.3.2.2 Standardperson

Für die Anwendung von Standardpersonen in der Sachbilanz wird der Fragebogen in Anhang F für vordefinierte Personen, die einer bestimmten Aktivität im Referenzraum nachgehen, ausgefüllt. Dabei handelt es sich für die zu vergleichenden Referenzräume (oder Gebäude) jeweils um die gleiche Person. Es wird lediglich für jede Wirkungsabschätzung zwischen Mann und Frau unterschieden, da sich das biologische Geschlecht insbesondere auf die physiologischen Merkmale des Körpers auswirken kann. An dieser Stelle werden drei beispielhafte Standardpersonen hergeleitet; sollten für die Anwendung der

raumphysiologischen Bilanz weitere Personentypen benötigt werden, sind diese entsprechend dem nachfolgenden Vorgehen gleichwertig herzuleiten.

Die erste Personengruppe, die repräsentiert werden soll, sind die Erwerbstätigen. In Deutschland gehören zu dieser Gruppe rund 45 Millionen Menschen. (Statistisches Bundesamt, 2022b) Von diesen arbeiteten, laut dem Industrieverband für Büro und Arbeitswelt (2020) vor der COVID-19-Pandemie rund 59 % überwiegend und 12 % gelegentlich an einem Büroarbeitsplatz. Unter Berücksichtigung der mittlerweile vermehrt zugänglichen Möglichkeit des *Home-Office* haben sich diese Zahlen verändert. Jedoch entsprechend der Angaben der Hans Böckler Stiftung (2021) lag der Anteil derer, die ausschließlich im *Home-Office* arbeiten im Juli 2021 gerade noch bei 15 %, während diese Zahl im April 2020 (erster *Lockdown*) bei 27 % lag. Somit hat sich zwar die Anzahl derer verändert, die überwiegend an einem Büroarbeitsplatz tätig sind, dennoch machen diese einen Großteil der Bevölkerung aus. Zusätzlich hat Union Investment (2011) die größten Störfaktoren am Arbeitsplatz ermittelt. Auf Platz eins liegt die Klimaanlage und die Raumtemperatur, gefolgt von der Geräuschkulisse auf Platz zwei. Lichtverhältnisse liegen zudem auf Platz sechs der häufigsten Beschwerden. Somit macht der Anteil an Beschäftigten in Bürogebäuden einen großen Anteil der Bevölkerung aus und zusätzlich gibt es konkrete störende Faktoren, die sich auf das erweiterte Raumklima beziehen. Unter der Berücksichtigung der durchschnittlichen Arbeitszeit pro Woche (41.0 Stunden bei Vollzeit- und 19.5 Stunden bei Teilzeiterwerbstätigen (Statistisches Bundesamt, 2022a)) kann geschlussfolgert werden, dass die Nutzung der raumphysiologischen Bilanz in Bürogebäuden einen Mehrwert erbringen kann. Aus diesem Grund werden als erste Standardpersonen Bürobeschäftigte definiert.

Die zweite Personengruppe bezieht sich nicht auf Erwachsene, sondern auf Kinder, die einen Großteil ihrer Kindheit in einem Klassenzimmer verbringen. Von den insgesamt etwas über 8 Millionen Schülern in Deutschland waren im Schuljahr 2020/2021 fast 3 Millionen in Grundschulen (Klassenstufe 1 – 4) eingeschrieben. Keine andere Schulform hat eine höhere Schülerzahl. (Statistisches Bundesamt, 2021b) Zusätzlich werden an den Grundschulen deutschlandweit wöchentlich rund 4.23 Millionen Schulstunden abgehalten, während es bei der zweithäufigsten Schulform, dem Gymnasium, rund 3.38 sind (Statistisches Bundesamt, 2021b). Aus diesen Gründen werden Grundschüler als Standardpersonen ausgewählt. Für die Anwendung der späteren Methode können weitere Standardpersonen für andere Schulformen hergeleitet werden. Dies würde sich dann nicht mehr auf Kinder, sondern auf Jugendliche oder junge Erwachsene, die sich in weiterführenden Schulen oder Universitäten aufhalten, beziehen.

Eine weitere Personengruppe, für die eine raumphysiologische Bilanz erstellt werden kann, sind ältere Menschen, die in Alten- oder Pflegeheimen untergebracht sind. Laut dem Statistischen Bundesamt (2021a) gehören 18.15 Millionen der deutschen Bevölkerung zu der Altersklasse 60 bis 79 Jahre und 5.94 Millionen zu der Altersklasse über 80 Jahre. Von diesen Personen sind rund 1 Million stationär pflegebedürftig, mit einer weiter steigenden Tendenz.

Diese Personengruppe umfasst deutlich weniger Menschen als die zwei vorherigen. Jedoch kommt hier erschwerend hinzu, dass diese Personen häufig ihre Umgebung kaum selber beeinflussen können und es somit sinnvoll ist, diese optimal auf die betroffenen Personen abzustimmen.

Für die drei beschriebenen Personentypen kann jeweils für eine weibliche und eine männliche Person der Fragebogen, zur Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz, unter der Verwendung von

Standardwerten ausgefüllt werden. Zudem wird für Büroangestellte zusätzlich zwischen zwei Alterskategorien unterschieden.

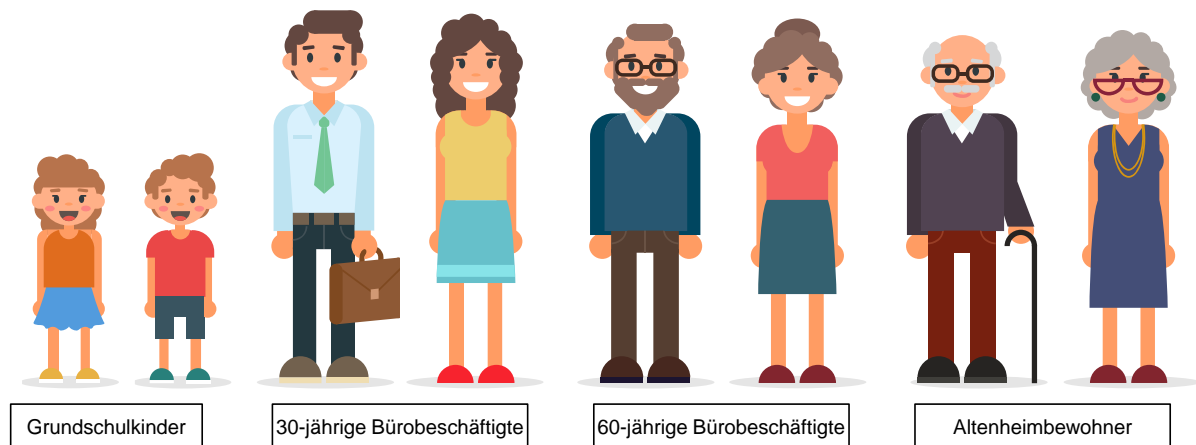


Abbildung 145: Übersicht der Standardpersonen zur Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz

Der erste Schritt zur Herleitung der Standardpersonen, die einen durchschnittlichen Bürobeschäftigten beschreiben sollen, ist die Ermittlung des Alters. Sowohl bei Männern als auch bei Frauen liegen die meisten Berufstätigen in der Altersklasse 55 bis 60 Jahre, gefolgt von der Gruppe 30 bis 35 Jahre (Statistisches Bundesamt, 2021c). Da diese beiden am meisten vertretenen Altersgruppen einen erheblichen Altersunterschied aufweisen, erscheint es sinnvoll für jedes Geschlecht zwei verschiedene Alter als Durchschnitt festzulegen. Somit wird für Bürobeschäftigte eine 30-jährige und eine 60-jährige Person betrachtet. Den Daten des Statistischen Bundesamtes (2017) können zusätzlich für jedes Alter und Geschlecht, die durchschnittliche Körpergröße und das Gewicht entnommen werden. Eine durchschnittliche 30-jährige Frau hat eine Größe von 1.67 m mit einem Gewicht von 67.0 kg, während eine 60-jährige Frau eine Größe von 1.66 m mit einem Gewicht von 70.4 kg hat. Ein männlicher 30-Jähriger kommt auf eine Größe von 1.80 m mit einem Gewicht von 84.4 kg und ein 60-Jähriger hat eine Größe von 1.79 m mit einem Gewicht von 87.7 kg. In Bezug auf den Hörverlust kann dieser bei den Standardpersonen lediglich über den altersbedingten Hörverlust beschrieben werden. Nach Lenarz und Boenninghaus (2012) ist festzustellen, dass 30-Jährige einen altersbedingten Hörverlust bei niedrigen Frequenzen von unterhalb 10 dB haben. Dieser hat sein Maximum bei 6000 Hz und fällt bei noch höheren Frequenzen wieder unterhalb von 10 dB. Da es zur Beschreibung des Hörverlustes lediglich vier mögliche Hörverlustgruppen gibt, wird in diesem Fall abgerundet, wodurch die 30-Jährigen mit einem gesunden Gehör beschrieben werden. Bei den 60-Jährigen liegt der altersbedingte Hörverlust, insbesondere bei Frequenzen über 2000 Hz, dagegen höher; deswegen wird für dieses Alter ein Hörverlust von 20 dB angenommen. Bei der Aktivität eines Bürobeschäftigten wird sich auf den nach der DIN EN ISO 8996 (2005) vorgegebenen Energieverbrauch für eine sitzende Aktivität bezogen. Hieraus erschließt sich ebenfalls das Blickfeld der Standardperson, welches sich auf den direkten Arbeitsplatz bezieht (kleines fokussiertes Feld). Für die Beschreibung der Bekleidung können die nach Häupl (2017) genannten clo-Werte genutzt werden. Eine typische Sommerbekleidung kommt somit auf 0.5 clo und eine typische Winterarbeitsbekleidung auf 1.5 clo. Für die Jahreszeiten dazwischen kann ein Durchschnitt von 1.0 clo

angenommen werden. Gibt es jedoch eine ganzjährig geltende Bekleidungs Vorschrift, welche das Tragen von Anzügen vorsieht, dann kann ganzjährig von einem clo-Wert von 1.0 clo bis 1.2 clo ausgegangen werden (DIN EN ISO 9920, 2009).

Angabe des Alters	30 Jahre	Angabe des Alters	60 Jahre
Angabe des Geschlechts	Weiblich	Angabe des Geschlechts	Weiblich
Angabe des Gewichts	67.0 kg	Angabe des Gewichts	70.4 kg
Angabe der Größe	1.67 m	Angabe der Größe	1.66 m
Angabe des Hörvermögens	Kein Hörverlust	Angabe des Hörvermögens	20 dB Hörverlust
Angabe der Aktivität	Sitzende Aktivität	Angabe der Aktivität	Sitzende Aktivität
Angabe der Bekleidung	0.5 clo / 1.0 clo / 1.2 clo / 1.5 clo	Angabe der Bekleidung	0.5 clo / 1.0 clo / 1.2 clo / 1.5 clo
Angabe des visuellen Blickfelds	Arbeitsplatz	Angabe des visuellen Blickfelds	Arbeitsplatz

Abbildung 146: Sachbilanz Level 2: Standardperson (30-jährige und 60-jährige Bürobeschäftigte)

Angabe des Alters	30 Jahre	Angabe des Alters	60 Jahre
Angabe des Geschlechts	Männlich	Angabe des Geschlechts	Männlich
Angabe des Gewichts	84.4 kg	Angabe des Gewichts	87.7 kg
Angabe der Größe	1.80 m	Angabe der Größe	1.79 m
Angabe des Hörvermögens	Kein Hörverlust	Angabe des Hörvermögens	20 dB Hörverlust
Angabe der Aktivität	Sitzende Aktivität	Angabe der Aktivität	Sitzende Aktivität
Angabe der Bekleidung	0.5 clo / 1.0 clo / 1.2 clo / 1.5 clo	Angabe der Bekleidung	0.5 clo / 1.0 clo / 1.2 clo / 1.5 clo
Angabe des visuellen Blickfelds	Arbeitsplatz	Angabe des visuellen Blickfelds	Arbeitsplatz

Abbildung 147: Sachbilanz Level 2: Standardperson (30-jähriger und 60-jähriger Bürobeschäftigter)

Laut dem Statistischen Bundesamt (2021b) liegt das Durchschnittsalter für Grundschüler bei 8 Jahren (männlich: 7.97 Jahre; weiblich: 7.92 Jahre). Dieses Alter sowie das Geschlecht bildet die Grundlage zur Bestimmung des Gewichts, der Größe und des Hörvermögens. Nach dem Robert Koch Institut (2013) liegt das 50 % Perzentil für die Größe von 8-jährigen Jungen bei 1.31 m und für das Gewicht bei 27.7 kg. Für 8-jährige Mädchen liegt das 50 % Perzentil für die Größe bei 1.30 m und für das Gewicht bei 27.0 kg. Das Hörvermögen wird ausschließlich in Funktion des Alters beschrieben. So weist eine durchschnittliche 8-jährige Person keinen altersbedingten Hörverlust auf. (Lenarz & Boenninghaus, 2012) Als durchschnittliche Aktivität eines Grundschulkindes kann davon ausgegangen werden, dass es sich um eine sitzende Aktivität handelt. Allerdings können hierfür nicht die nach der DIN EN ISO 8996 (2005) beschriebenen met-Werte genutzt werden. Kinder verbrauchen nach Kostyak et al. (2007) im Vergleich zu

Erwachsenen weniger Kilojoule pro Minute. Jedoch bezieht sich die met-Einheit auf die Körperoberfläche, welche bei 8-jährigen Kinder circa bei 1.0 m² liegt. Nach Kostyak et al. (2007) ist der Ruheumsatz von Kindern um 20 % höher als bei Erwachsenen. Somit wird der Umsatz eines typischen Schulkindes, welches einer sitzenden Aktivität in seiner Schulbank nachgeht, ebenfalls um 20 % höher angesetzt als der Normwert, womit sich ein Energieumsatz von 84 W/m² ergibt. In Bezug auf die Bekleidung sollte zwischen den Jahreszeiten unterschieden werden. Hier wird jedoch keine Unterscheidung zwischen Kindern und Erwachsenen gemacht, da sich die clo-Werte nicht aus physiologischen Parametern, sondern lediglich aus den Eigenschaften der Kleidungsstücke ergeben. Somit werden die gleichen clo-Werte wie für eine Büroumgebung angesetzt. Lediglich der clo-Wert für einen Anzug wird nicht berücksichtigt. Als letzter Parameter bleibt das visuelle Feld. Bei einem Schulkind, das einer sitzenden Aktivität nachgeht, kann davon ausgegangen werden, dass es zur Beschreibung des visuellen Feldes zwei Optionen gibt. Zum einen kann eine Tätigkeit auf der Schulbank bearbeitet werden, wobei es sich um ein kleines fokussiertes visuelles Feld handelt, und zum andern können Lehrinhalte auf einer weiter entfernten Tafel oder Leinwand betrachtet werden, wobei es sich um das entfernte, erweiterte visuelle Feld handelt.

Angabe des Alters	8 Jahre	Angabe des Alters	8 Jahre
Angabe des Geschlechts	Weiblich	Angabe des Geschlechts	Männlich
Angabe des Gewichts	27.0 kg	Angabe des Gewichts	27.7 kg
Angabe der Größe	1.30 m	Angabe der Größe	1.31 m
Angabe des Hörvermögens	Kein Hörverlust	Angabe des Hörvermögens	Kein Hörverlust
Angabe der Aktivität	Sitzende Aktivität	Angabe der Aktivität	Sitzende Aktivität
Angabe der Bekleidung	0.5 clo / 1.0 clo / 1.5 clo	Angabe der Bekleidung	0.5 clo / 1.0 clo / 1.5 clo
Angabe des visuellen Blickfelds	Schulbank / Tafel	Angabe des visuellen Blickfelds	Schulbank / Tafel

Abbildung 148: Sachbilanz Level 2: Standardperson (Grundschulkind)

Als letzte Standardperson werden Alten- oder Pflegeheimbewohner definiert. Nach Zielke (2020) (vgl. Gasser, Knöpfel & Seifert, 2015; Amrhein, 2013; Wahl & Rott, 2002) beginnt mit dem Bezug eines Alten- oder Pflegeheims die vierte und letzte Lebensphase des Menschen. Diese ist geprägt durch gesundheitliche Einschränkungen, die Pflegebedürftigkeit und endet mit dem Tod. Diese Lebensphase beginnt im Alter zwischen 80 und 85 Jahren. Diese Zahlen decken sich mit dem durchschnittlichen Einzugsalter in Altenheime in Deutschland, welches bei 84.2 Jahren bei Frauen und 80.4 Jahren bei Männern liegt. Innerhalb der ersten vier Wochen nach dem Einzug sterben rund 20 % der Bewohner. Weitere 24 % der Frauen und 41 % der Männer versterben bis zum dritten Monat. (Pabst, 2017) Somit wird ein Großteil der Bewohner nicht wesentlich älter, als sie beim Einzug waren. Aus diesem Grund wird das durchschnittliche Alter einer Altenheimbewohnerin auf 85 Jahre und eines Altenheimbewohners auf 81 Jahre festgelegt. Für die mittlere Größe und das mittlere Gewicht unterscheidet das Statistische

Bundesamt (2017) ab 75 Jahren nicht mehr zwischen den Alterskategorien. Deswegen wird auf die Arbeit von Bai (2009), welche sich ausschließlich auf Altenheimbewohner bezieht, zurückgegriffen. Nach Bai (2009) haben Frauen eine mittlere Größe von 1.54 m bei einem Gewicht von 61 kg, während Männer eine Größe von 1.67 m bei einem Gewicht von 74 kg haben. Für das Hörvermögen kann nach Lenarz und Boenninghaus (2012) ein Hörverlust von 40 dB angenommen werden. Zur Bestimmung der Aktivität muss festgelegt werden, auf welche Räume sich die raumphysiologische Bilanz beziehen soll. An dieser Stelle erscheint es nicht sinnvoll Gemeinschaftsräume zu betrachten, sondern lediglich die Wohnräume der einzelnen Heimbewohner. Somit kann angenommen werden, dass sämtliche Aktivitäten im Liegen oder im Sitzen stattfinden. Die erste Möglichkeit ist das Schlafen, welches auch tagsüber stattfinden kann. Ansonsten gibt es die Möglichkeit, im Liegen oder im Sitzen entweder Objekte in der Ferne (z. B. Fernseher, Außenwelt) oder in der Nähe (z. B. ein Buch) zu betrachten. Somit kann auch hier zwischen dem kleinen fokussierten und dem entfernten erweiterten Feld unterschieden werden. Als letzter Parameter bleibt der clo-Wert. Da sowohl beim Schlafen als auch im Ruhezustand liegend sich die Person im Bett befindet, muss neben der Bekleidung ebenfalls die thermische Isolierung der Matratze und der Decke berücksichtigt werden. Zudem tragen ältere Menschen für gewöhnlich keine leichte Sommerbekleidung mehr, weswegen lediglich zwischen der Übergangskleidung mit 1.0 clo, einer warmen Winterbekleidung mit 1.5 clo und Nachthemden mit 0.5 clo, welche gegebenenfalls auch tagsüber getragen werden, unterschieden wird. Für eine im Bett liegende zugedeckte Person können nach Pan, Lin und Deng (2010) im Durchschnitt zusätzlich 1.5 clo dazu addiert werden.

Angabe des Alters	85 Jahre	Angabe des Alters	81 Jahre
Angabe des Geschlechts	Weiblich	Angabe des Geschlechts	Männlich
Angabe des Gewichts	61.0 kg	Angabe des Gewichts	74.0 kg
Angabe der Größe	1.54 m	Angabe der Größe	1.67 m
Angabe des Hörvermögens	40 dB Hörverlust	Angabe des Hörvermögens	40 dB Hörverlust
Angabe der Aktivität	Schlafen / Liegen / Ruhezustand Sitzen	Angabe der Aktivität	Schlafen / Liegen / Ruhezustand Sitzen
Angabe der Bekleidung	0.5 clo / 1.0 clo / 1.5 clo (+ 1.5 clo)	Angabe der Bekleidung	0.5 clo / 1.0 clo / 1.5 clo (+ 1.5 clo)
Angabe des visuellen Blickfelds	Nah / Weit	Angabe des visuellen Blickfelds	Nah / Weit

Abbildung 149: Sachbilanz Level 2: Standardperson (Altenheimbewohner)

Die Position der jeweiligen Personen im Raum kann nicht anhand von Standardpositionen beschrieben werden. Die Standardpersonen sollen in der Wirkungsabschätzung an denen in dem jeweiligen Raum möglichen Positionen für die beschriebenen Aktivitäten betrachtet werden.

6.3.3 Sachbilanz der übergeordneten Parameter

Nach Bjorn et al. (2018b) werden unter den Level-3-Prozessen in der Ökobilanzierung solche Prozesse verstanden, die der Bereitstellung von Dienstleistungen, die für die Prozesse, welche auf Level 0 ablaufen, erforderlich sind (z. B. Verwaltung oder Marketing). Eine derartige Interpretation ist in der raumphysiologischen Bilanz nicht möglich. Im Gegensatz zur Ökobilanzierung beziehen sich die Level-3-Parameter in der raumphysiologischen Bilanz nicht ausschließlich auf die Level-0-Parameter, sondern auf sämtliche zuvor definierten Bestandteile der Sachbilanz. Ähnlich der Ökobilanzierung bilden die Level-3-Parameter einen übergeordneten Rahmen, der als zusätzliche Information für die erfassten Parameter benötigt wird, ohne dass dieser einer der zuvor erfassten Parameter-Kategorien zugeordnet werden kann. Die Level-3-Parameter dienen somit lediglich als Information, um mögliche vorhandene Zusammenhänge zu erklären. Beispielsweise wäre hier die Tatsache zu nennen, dass ein gegebenes Gebäude unter Denkmalschutz steht und aus diesem Grund beispielsweise keine moderneren Fenster eingebaut werden können. Dabei handelt es sich um einen Level-3-Parameter in Bezug auf die Level-0- und Level-1-Parameter. Weitere Beispiele sind in der folgenden Tabelle 15 für jedes der beschriebenen Level genannt.

Die dargestellten Level 3 Beispiele haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es unterliegt dem Studierender mögliche weitere Level-3-Parameter, die einen Einfluss auf eine der anderen Sachbilanzkategorien haben können, im Rahmen der vor Ort durchzuführenden Sachbilanz zu bestimmen. Nach Bjorn et al. (2018b) werden bei der Aufstellung der Sachbilanz im Rahmen der Ökobilanzierung die Prozesse der dritten Ebene häufig nicht in das Ergebnis der Sachbilanz mitaufgenommen, da ihr Beitrag zur Wirkungsabschätzung unbedeutend ist. Sollte der Ersteller der Sachbilanz im Rahmen der raumphysiologischen Bilanz somit feststellen, dass der Beitrag der Level-3-Parameter von keiner Relevanz für die Ergebnisse der raumphysiologischen Bilanz ist, kann er diese ebenfalls vernachlässigen. So werden beispielsweise bei der Erstellung der Sachbilanz zum Zwecke der Optimierung der Auswirkungen auf einen bestimmten Nutzer lediglich die Level-1- und Level-2-Parameter erfasst und somit müssen ebenfalls nur die Level-3-Parameter in Bezug auf diese zwei Kategorien, jedoch nicht in Bezug auf die weiteren Kategorien erfasst werden.

Tabelle 15: Beispielhafte Darstellung von Level-3-Parametern

Bezug zum	Level 3
Äußeren Hintergrundsystem	Angrenzende Fabrik mit erhöhtem CO ₂ -Ausstoß Angrenzendes Krankenhaus mit Betrieb einer Notaufnahme
Inneren Hintergrundsystem	Laute Kommunikation im Nachbarraum
Vordergrundsystem: Level 0	Denkmalgeschütztes Gebäude Bauordnungsrechtliche Vorschriften
Vordergrundsystem: Level 1	Zentrale Heizungs- und Lüftungsreglung Verbote Fenster zu öffnen aufgrund eines besonders geschützten Gebäudes in der Nachbarschaft
Vordergrundsystem: Level 2	Bekleidungs Vorschrift

6.4 Auswertung der Sachbilanz

Die Auswertung der Sachbilanz beinhaltet die gleichen Bestandteile wie die Auswertung der Wirkungsabschätzung. Somit können auch an dieser Stelle die Sensitivitätsanalyse und -prüfung vernachlässigt werden. Die Fehlerabschätzung, welche zur Quantifizierung der Unsicherheit dient, spielt ebenfalls für die Auswertung der Sachbilanz keine Rolle.

Im Gegensatz dazu kann eine Vollständigkeitsprüfung durchgeführt werden. Diese dient zur Überprüfung, ob im Rahmen der Sachbilanz sämtliche relevanten Größen für die Wirkungsabschätzung, entsprechend der Vorgaben des Ziels und des Untersuchungsrahmens, erfasst wurden. Die anschließende Konsistenzprüfung kann ähnlich wie bei der Auswertung der Wirkungsabschätzung durchgeführt werden. Hier gilt es zu überprüfen, ob die Annahmen, Methoden und Daten einheitlich angewandt wurden. Somit soll die Sachbilanz ebenfalls bestmöglich dokumentiert werden, damit diese Konsistenz bei der Erfassung der Daten überprüft werden kann. Hierfür gibt es jedoch kein definiertes Verfahren, welches das Vorgehen der Konsistenzprüfung festlegt.

Als letzter Bestandteil der Auswertung der Sachbilanz bleibt die Beurteilung der Ergebnisse. Diese wird jedoch ausschließlich in einem iterativen Prozess relevant, wenn zum Beispiel im Anwendungsszenario der Optimierung eines Raums im Laufe der Wirkungsabschätzung festgestellt wird, dass in einer Wirkungskategorie eine Abweichung vom neutralen Zustand des menschlichen Körpers vorliegt. Dann kann auf die Daten der Sachbilanz zurückgegriffen werden, um den Auslöser hierfür zu ermitteln. An erster Stelle liegt der Fokus auf einer Veränderung der Raumparameter (Level 1). Aus dem Sachbilanzmodell können die Raumparameter ermittelt werden, die für die gegebene Wirkungskategorie relevant sind. Anschließend können diese in ihrem aktuellen Zustand überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Liegt beispielsweise die visuelle Wirkung der visuellen Umgebung bei einer Bilanzierung tagsüber oberhalb der neutralen Zone in der Zone der komfortrelevanten Auswirkung, dann können anhand der Ergebnisse der Sachbilanz die Level-1-Parameter bestimmt werden, die einen Einfluss auf die visuelle Umgebung haben.

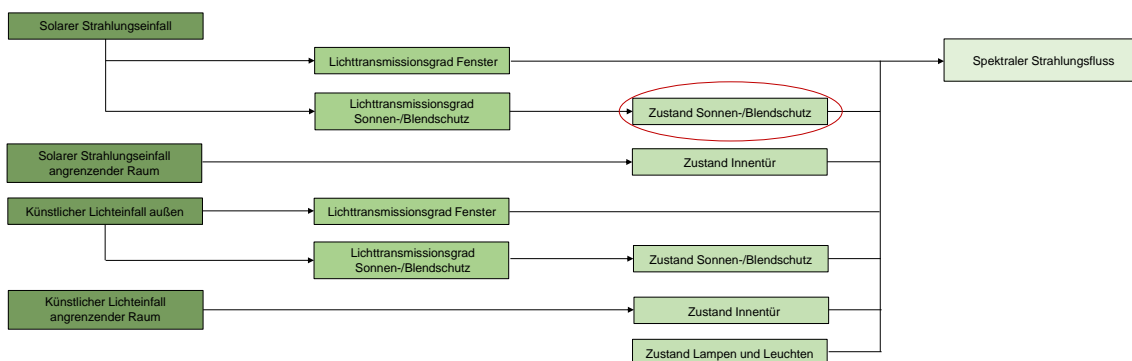


Abbildung 150: Auswertung des Sachbilanzmodells

Aus dem beispielhaften Sachbilanzmodell in Abbildung 150 kann festgestellt werden, dass der Zustand des Sonnen- und des Blendschutzes (rot umkreist) einen Einfluss auf den spektralen Strahlungsfluss hat. Somit sollte dieser Zustand überprüft und wenn möglich dahin gehend angepasst werden, dass keine

komfortrelevante Auswirkung mehr vorliegt. Der Zustand des Sonnen- und des Blendschutzes sollte an erster Stelle überprüft werden, da dieser im Vergleich zum Zustand der Innentür höchstwahrscheinlich einen größeren Einfluss auf den spektralen Strahlungsfluss hat. Zudem handelt es sich um eine Anwendung der raumphysiologischen Bilanz, die tagsüber durchgeführt wird, weswegen der künstliche Lichteinfall keine Relevanz hat.

6.5 Methodische Validität der Sachbilanz in der raumphysiologischen Bilanz

Die Sachbilanz in der Ökobilanzierung wird nach Bjorn et al. (2018b) in sechs Schritten durchgeführt. Diese sechs Schritte werden in der raumphysiologischen Bilanz auf die folgenden vier Schritte reduziert.

1. Identifizierung von Parametern für das Sachbilanzmodell
2. Planung der Datenerhebung und Datenerfassung
3. Messung der Elementarströme und Konstruktion des Sachbilanzmodells
4. Berichterstattung

Im ersten Schritt werden somit, entsprechend der Systemgrenzen und der zu berücksichtigenden Wirkungskategorien, die relevanten Parameter sowohl des Hintergrund- als auch des Vordergrundsystems identifiziert. Anschließend erfolgen die Planung der Datenerhebung sowie die Datenerfassung. Hierbei unterliegt es dem Ersteller der Sachbilanz den Datentyp, die Datenquelle, den Datenzugang sowie die Datenspezifität für jeden einzelnen Datenpunkt zu beschreiben. Diese Beschreibung erfolgt am besten in einer Tabelle, damit die Übersichtlichkeit gewährleistet werden kann und die Tabellen in der späteren Berichterstattung verwendet werden können.

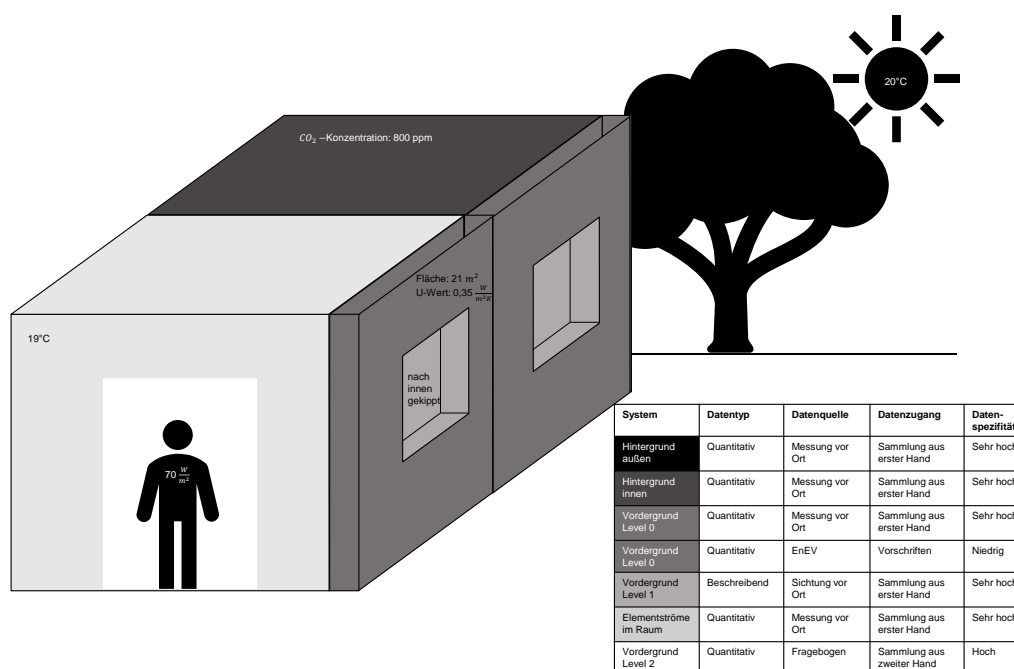


Abbildung 151: Beispielhafte Darstellung der Sachbilanzergebnisse

Abbildung 151 zeigt beispielhaft sowohl die grafische als auch die tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Sachbilanz. Im Bericht der Sachbilanz wird jede der Parameterkategorien mit einer einzelnen Tabelle dargestellt. Die Level-3-Parameter werden nicht in der Tabelle erfasst, da diese lediglich einen informativen Charakter haben und somit kein Datentyp, -quelle, -zugang oder -spezifität gegeben werden muss. Die Level-3-Parameter können als zusätzliche Beschreibung in einzelnen Sätzen im Bericht festgehalten werden.

Im dritten Schritt erfolgt die Erstellung des Sachbilanzmodells, welche die Zuordnung sämtlicher Sachbilanzparameter zu den im Raum gemessenen Elementarströmen, ermöglicht. Dieses Modell kann im vierten Schritt mit den bereits angefertigten Tabellen und den Fragebögen, der zu betrachtenden Personen, in den Bericht integriert werden. Zusätzlich hierzu kann der Bericht zur Verbildlichung entweder mit Grafiken entsprechend den Darstellungen in Abbildung 133 und 142 oder mit Photographien ergänzt werden.

7 Ziel und Untersuchungsrahmen der raumphysiologischen Bilanz

Die erste Phase der Ökobilanzierung sowie der raumphysiologischen Bilanz dient zur Beschreibung des Ziels sowie des Untersuchungsrahmens. In dieser Phase werden drei wesentliche Fragen beantwortet und eine Reihe von Begriffen, für die jeweils vorliegende Bilanz definiert. Diese Definitionen mussten bereits für die Herleitung der Methode beschrieben werden, weswegen sie an dieser Stelle nur kurz aufgegriffen werden, da ihre Bedeutung und Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz bereits erläutert wurde.

7.1 Ziel der raumphysiologischen Bilanz

Jede Ökobilanzierung beginnt mit einer umfassenden Definition des Ziels der Studie. Hiermit wird die beabsichtigte Anwendung, die Gründe der Durchführung sowie die angesprochene Zielgruppe definiert. (DIN EN ISO 14040, 2021). Nach Hauschild (2018) lassen sich nach der Festlegung des Ziels die folgenden drei Fragen beantworten:

- Warum wird diese Studie durchgeführt?
- Welche Frage(n) soll diese Studie beantworten?
- Für wen wird diese Studie durchgeführt?

Die Definition des Ziels der raumphysiologischen Bilanz erfolgt ebenfalls anhand der Beantwortung dieser drei Fragen. Zur Beantwortung der ersten Frage muss zwischen den zwei bereits beschriebenen Anwendungen unterschieden werden. So kann die raumphysiologische Bilanz entweder zu Vergleichs- oder zu Optimierungszwecken durchgeführt werden. Die Frage, die eine raumphysiologische Bilanz stets beantworten soll, ist die Identifizierung von möglichen negativen physiologischen Auswirkungen des Referenzraums für den sich darin befindenden Menschen. Und letztendlich die Frage, für wen diese Studie durchgeführt wird. Dabei handelt es sich, analog zur Ökobilanzierung, um den Auftraggeber, der die raumphysiologische Bilanz durchführen will. Die Zieldefinition legt durch die Beantwortung dieser drei Fragen den Kontext für die raumphysiologische Bilanz fest und dient als Basis für die darauffolgende Definition des Untersuchungsrahmens.

7.2 Untersuchungsrahmen der raumphysiologischen Bilanz

Der Untersuchungsrahmen definiert, welche Produktsysteme in der Ökobilanzierung bewertet werden sollen und wie diese Bewertung zu erfolgen hat (Bjorn et al., 2018a). In der raumphysiologischen Bilanz dient die Definition des Untersuchungsrahmens dem gleichen Zweck. Nach der DIN EN ISO 14040 (2021) gibt es 13 Punkte, die zur Definition des Untersuchungsrahmens gehören. Diese sind in der folgenden Tabelle sowohl für die Ökobilanzierung als auch für die Anwendung in der raumphysiologischen Bilanz abgebildet.

Tabelle 16: Bestandteile des Untersuchungsrahmens in der Ökobilanz und der raumphysiologischen Bilanz

Ökobilanz DIN EN ISO 14040 (2009)	Raumphysiologische Bilanz
Das zu untersuchende Produktsystem	Anschrift des zu untersuchenden Gebäudes
Funktionen des Produktsystems	Nutzungszweck des Gebäudes (Bestandteil der funktionellen Einheit)
Funktionelle Einheit z. B. Vollständige Abdeckung von 1 m ² einer grundierten Außenwand in Deutschland für die Dauer von 10 Jahren und mit einer einheitlichen Farbe mit einer Deckkraft von 99.9 %	Funktionelle Einheit (S. 213)
Referenzfluss z. B. Menge Wandfarbe zur Erfüllung der funktionellen Einheit	Referenzraum (S. 214)
Systemgrenze z. B. Auswahl von Lebenszyklusphasen	Systemgrenze (S. 215)
Allokationsverfahren z. B. Nutzung physikalischer Kausalitäten	Keine vordefinierten Allokationsverfahren
Die ausgewählten Wirkungskategorien z. B. Klimawandel	Auswahl der Wirkungskategorien (thermisch, lufthygienisch, visuell, akustisch)
Methode für die Wirkungsabschätzung und die anschließend anzuwendende Auswertung	Methode zur Wirkungsabschätzung entsprechend Kapitel 5 die anzuwendende Auswertung bezieht sich auf den gewählten Anwendungszeitraum
Anforderung an die Daten (Anfängliche Anforderungen an die Datenqualität) z. B. mittlere Datenqualität	Anforderungen an die Daten bezüglich der Datenspezifität und der Datenqualität
Annahmen	Vereinfachte Annahmen, die zur Durchführung der raumphysiologischen Bilanz getroffen werden
Einschränkungen	Vorliegende Einschränkungen für die Anwendung der raumphysiologischen Bilanz
Art der kritischen Prüfung, sofern vorgesehen	Keine kritische Prüfung vorgesehen
Art und Aufbau des für die Studie vorgesehenen Berichts	Aufbau des Berichts entsprechend der drei Phasen mit einer übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Phasen

Aus den Beschreibungen der vorherigen Kapitel sowie der Darstellung in Tabelle 16 geht hervor, dass keine Allokationsverfahren angewandt und keine kritische Prüfung durchgeführt wird. Somit können diese beiden Aspekte in der Beschreibung des Untersuchungsrahmens vernachlässigt werden. Gleiches gilt für die Methode der Wirkungsabschätzung, da zum jetzigen Zeitpunkt lediglich die in der vorliegenden Arbeit beschriebene Methode der Wirkungsabschätzung zur Verfügung steht.

Insbesondere in Bezug auf die Anforderungen an die Daten besitzt nicht nur die Ökobilanzierung, sondern ebenfalls die raumphysiologische Bilanz einen iterativen Charakter. Wurden die anfänglichen Anforderungen an die zu verwendenden Daten als „sehr hoch“ festgelegt und kann diese Anforderung bei

der Erstellung der Sachbilanz nicht eingehalten werden, dann kann der Untersuchungsrahmen entsprechend angepasst werden. Dabei sind jedoch die Einschränkungen zu erfassen, welche begründen warum, die verlangte Datenqualität nicht eingehalten werden kann.

Zusätzlich zu den in Tabelle 16 dargestellten Bestandteilen des Untersuchungsrahmens müssen drei weitere Faktoren berücksichtigt werden. Das ist der Referenzraum, die berücksichtigten Personen und der Anwendungszeitraum. Die Festlegung eines oder mehrerer Referenzräume in einem Gebäude ist entscheidend für die Erstellung der Sachbilanz. Wird mehr als ein Referenzraum festgelegt, dann sollte für alle Räume der gleiche Untersuchungsrahmen gelten. Ist dies nicht der Fall, dann muss für jeden Referenzraum ein eigener Untersuchungsrahmen definiert werden. Die Bestimmung des oder der Referenzräume unterliegt dem Studienersteller. Insbesondere bei der Optimierung des Raums empfiehlt es sich jedoch einen Raum auszuwählen, in dem es vermehrt zu Beschwerden bezüglich des erweiterten Raumklimas kommt.

Die genaue Beschreibung der berücksichtigten Personen erfolgt in der Sachbilanz. Im Untersuchungsrahmen muss lediglich festgehalten werden, ob individuelle Personen oder Standardpersonen berücksichtigt werden.

Der letzte Aspekt, der Anwendungszeitraum, muss ebenfalls durch den Studienersteller definiert werden. Hier kann beispielsweise festgelegt werden, dass es sich um eine einmalige Erstellung der Sachbilanz mit anschließender Wirkungsabschätzung handelt oder dass dieser Vorgang für jede Stunde oder ausgewählte Uhrzeiten eines Tages wiederholt wird. Es obliegt dem Studienersteller, den für die konkrete Anwendung am besten geeigneten Anwendungszeitraum zu bestimmen. Anzumerken ist, dass dies ausschließlich die veränderbaren Aspekte der Sachbilanz betrifft und somit nicht die unveränderbaren Gebäudeparameter bei jeder erneuten Durchführung erfasst werden müssen. Somit muss die Wirkungsabschätzung lediglich erneut durchgeführt werden, wenn sich eine der Eingangsgrößen im Vergleich zur vorherigen Bewertungssituation verändert hat.

8 Anwendung der raumphysiologischen Bilanz

Zur beispielhaften Darstellung des Vorgehens in der raumphysiologischen Bilanz soll das vorliegende Kapitel dienen. Während in der Herleitung der Methode in den einzelnen Unterkapiteln lediglich Auszüge der möglichen Anwendung dargestellt wurden, werden an dieser Stelle die zwei Anwendungsszenarien der Optimierung eines Referenzraums sowie des Vergleichs mehrerer Referenzräume abgebildet.

8.1 Anwendungsszenario: Optimierung eines Referenzraums

Das Anwendungsszenario der Optimierung soll im besten Fall für den tatsächlichen Raumnutzer durchgeführt werden. Anhand der Ergebnisse können insbesondere komfortrelevante sowie gesundheitsgefährdende Auswirkungen erkannt werden. Durch die zusätzliche Auswertung der Ergebnisse der Sachbilanz können die Auslöser für derartige Auswirkungen festgestellt und durch geeignete Maßnahmen vermieden werden.

8.1.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

In der Zieldefinition der raumphysiologischen Bilanz werden die folgenden drei Fragen beantwortet:

- Warum wird diese Studie durchgeführt?
Vorwiegend in den Sommermonaten klagen einzelne Mitarbeiter über zu hohen Temperaturen an ihrem Arbeitsplatz und im Verlauf des Tages auftretende Kopfschmerzen.
- Welche Frage soll diese Studie beantworten?
Es soll die Frage beantwortet werden, ob es mögliche negative raumphysiologische Auswirkungen in Bezug auf die thermische und die lufthygienische Umgebung gibt. Falls derartige Auswirkungen vorliegen, soll die Frage nach möglichen Optimierungsmaßnahmen ohne die Aufwendung von zusätzlicher Energie beantwortet werden.
- Für wen wird diese Studie durchgeführt?
Lehrstuhl für Bauphysik, Technische Universität München

Ausgehend von dieser Zieldefinition wird der Untersuchungsrahmen beschrieben; zur übersichtlichen Darstellung erfolgt die Beschreibung des Untersuchungsrahmens in tabellarischer Form. Da sich diese raumphysiologische Bilanz auf konkrete Büroräume bezieht und nicht dem Vergleich von Gebäuden dient, kann auf die Angabe der Anschrift des Gebäudes, des Nutzungszwecks sowie der funktionellen Einheit verzichtet werden.

Tabelle 17: Untersuchungsrahmen – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums

Referenzraum	Raumnutzung: Büroraum Nutzungsfläche: 30 m ² Anzahl der Nutzer: durchschnittlich zwei Personen Nutzungsdauer: 10 Stunden am Tag / 5 Tage die Woche Standort: 3. Stock Orientierung: Süd-Ost
Systemgrenzen	Mikroklima
Auswahl der Wirkungskategorien	Thermische Umgebung Lufthygienische Umgebung
Anzuwendende Auswertung	Auswertung bezüglich komfortrelevanter oder gesundheitsgefährdender Auswirkungen und Darstellung deren möglicher Auslöser
Anforderungen an die Daten	Mittlere Datenqualität
Vereinfachte Annahmen	Der Raum wird für den Nutzer bilanziert, der diesen Raum am häufigsten nutzt. Weitere Nutzer, die diesen Raum gelegentlich nutzen, werden nicht berücksichtigt.
Vorliegende Einschränkungen	Kein Zugriff auf Gebäudepläne
Anforderungen an den Bericht	Nachvollziehbare Darstellung der Ergebnisse Konkrete Optimierungsvorschläge bei Feststellung negativer Auswirkungen
Bilanzierungsperson	Tatsächlicher Raumnutzer (keine Standardperson)
Anwendungszeitraum	Wochentags im August von 9 Uhr bis 18 Uhr während einer Hitzeperiode; stündliche Aufnahme

8.1.2 Sachbilanz

Da es sich um das Anwendungsszenario der Optimierung handelt, müssen lediglich die Level-1- und Level-2-Parameter sowie die diese Parameter betreffenden Level-3-Aspekte bei der Erstellung der Sachbilanz berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen entspricht den Vorgaben der Erstellung der raumphysiologischen Bilanz. Da jedoch das Ziel die Identifizierung von Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf die thermische und die lufthygienische Umgebung im Sommer ist, werden zusätzlich die Temperatur, die Sonneneinstrahlung sowie die CO₂-Konzentration des äußeren Hintergrundsystems erfasst. Diese Parameter werden im stündlichen Takt entsprechend den Vorgaben des Anwendungszeitraums gemessen. Die relevanten Level-1- und Level-2-Parameter, die in der Sachbilanz erfasst werden müssen, sind den folgenden Abbildungen 152 und 153 zu entnehmen. Zudem sind in der Draufsicht die vier Arbeitsplätze im Referenzraum sowie die aktuelle Position der betrachteten Person abgebildet.

Der aktuelle Zustand der einzelnen Systeme ist in der Abbildung 152 nicht dargestellt, da dieser ebenfalls im stündlichen Takt erfasst werden muss. Es wurden die relevanten Ausstattungselemente, die sowohl die thermische als auch die lufthygienische Umgebung verändern können, berücksichtigt. Die künstliche Beleuchtung im Raum erfolgt mit Energiesparlampen, sodass ihre Nutzung, wovon tagsüber im August nicht auszugehen ist, keinen Einfluss auf die thermische Umgebung hat. Über eine Lüftungs- oder Klimaanlage verfügt der Raum nicht.

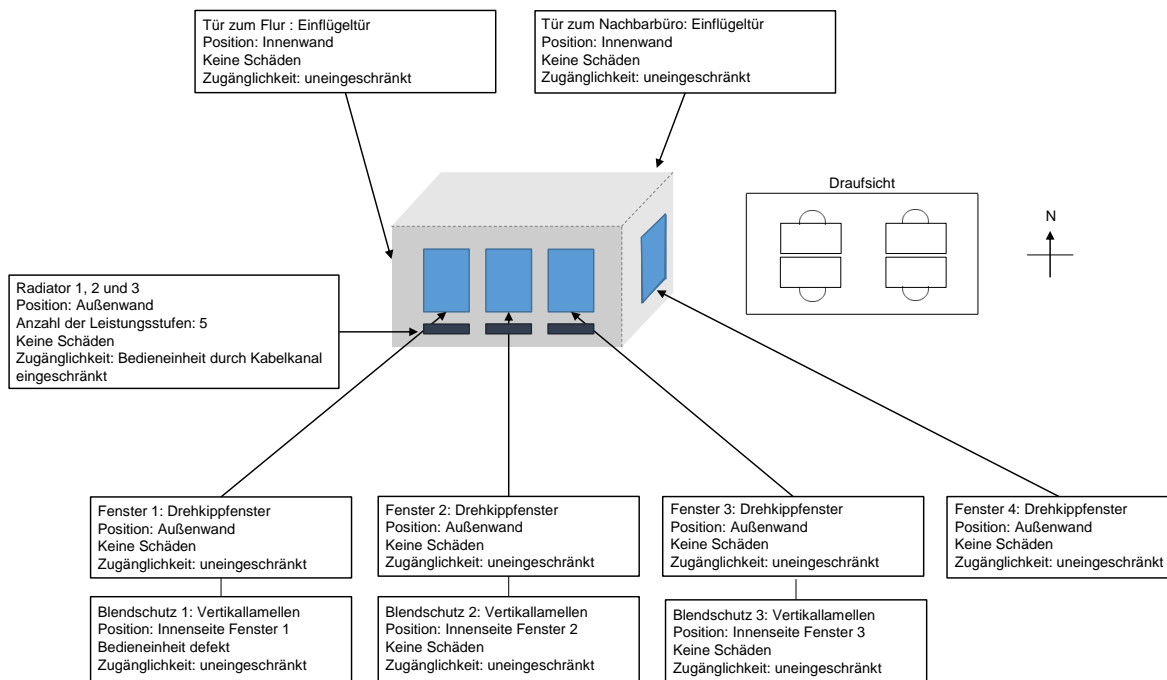


Abbildung 152: Sachbilanz Level 1 – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums

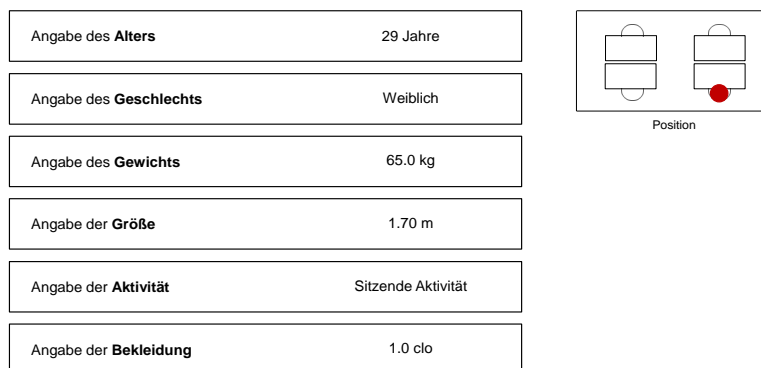


Abbildung 153: Sachbilanz Level 2 – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums

Die Bekleidung der Person wird sich im Verlauf des Tages nicht verändern, da diese der Bekleidungsvorschrift angepasst ist. Bei dieser Bekleidungsvorschrift handelt es sich um einen Level-3-Parameter, da dieser einen direkten Einfluss auf den Menschen hat, ohne dass der Mensch diesen selber verändern kann. Da es sich um einen Büroarbeitsplatz handelt, kann die Aktivität ebenfalls als unveränderbar im Verlauf des Tages angenommen werden. Sollte der Studiersteller etwas Gegenteiliges feststellen, z. B. die Nutzung des Arbeitsplatzes als Stehtisch, muss diese Änderung im Verlauf des Tages festgehalten werden. Aufgrund der Durchführung der Studie im Hochsommer sind die Radiatoren zentral verriegelt.

Die Sachbilanz wird im Folgenden für drei beispielhafte Zeitpunkte durchgeführt. Die vollständige raumphysiologische Bilanz würde entsprechend dem gleichen Vorgehen statt für die drei beschriebenen Zeitpunkte an zehn Zeitpunkten während des Tages stattfinden. Die Elementarströme dienen als direkte Input-Größen für die Wirkungsmechanismen. Die restlichen Parameter geben Aufschluss über mögliche Optimierungsmöglichkeiten.

Tabelle 18: Sachbilanz der veränderlichen Parameter zum Betrachtungszeitpunkt 9 Uhr

9 Uhr	Hintergrundsystem	Außentemperatur	26 °C
		Direkte Sonneneinstrahlung	Fenster 1: ja Fenster 2: ja Fenster 3: ja Fenster 4: nein
		CO ₂ -Konzentration	405 ppm
	Level 1	Zustand Fenster 1	Geschlossen
		Zustand Fenster 2	Geschlossen
		Zustand Fenster 3	Geschlossen
		Zustand Fenster 4	Geschlossen
		Zustand Tür zum Flur	Geschlossen
		Zustand Tür zum Nachbarbüro	Geschlossen
		Zustand Blendschutz 1	Offen
	Zustand Blendschutz 2	Offen	
	Zustand Blendschutz 3	Offen	
	Elementarströme	Lufttemperatur	31 °C
		Strahlungstemperatur	22 °C
		Luftgeschwindigkeit	0.01 m/s
Relative Luftfeuchte		40 %	
Luftdruck		1014 hPa	
CO ₂ -Konzentration	600 ppm		

Tabelle 19: Sachbilanz der veränderlichen Parameter zum Betrachtungszeitpunkt 13 Uhr

13 Uhr	Hintergrundsystem	Außentemperatur	32 °C
		Direkte Sonneneinstrahlung	Fenster 1: ja Fenster 2: nein Fenster 3: nein Fenster 4: nein
		CO ₂ -Konzentration	450 ppm
	Level 1	Zustand Fenster 1	Geschlossen
		Zustand Fenster 2	Geschlossen
		Zustand Fenster 3	Geschlossen
		Zustand Fenster 4	Gekippt
		Zustand Tür zum Flur	Mit Keil vollständig geöffnet
		Zustand Tür zum Nachbarbüro	Geschlossen
		Zustand Blendschutz 1	Offen
	Zustand Blendschutz 2	Geschlossen	
	Zustand Blendschutz 3	Geschlossen	
	Elementarströme	Lufttemperatur	33 °C
		Strahlungstemperatur	23 °C
		Luftgeschwindigkeit	0.2 m/s
Relative Luftfeuchte		40 %	
Luftdruck		1014 hPa	
CO ₂ -Konzentration	700 ppm		

Tabelle 20: Sachbilanz der veränderlichen Parameter zum Betrachtungszeitpunkt 17 Uhr

17 Uhr	Hintergrundsystem	Außentemperatur	33 °C
		Direkte Sonneneinstrahlung	Fenster 1: ja Fenster 2: nein Fenster 3: nein Fenster 4: nein
		CO ₂ -Konzentration	435 ppm
	Level 1	Zustand Fenster 1	Geschlossen
		Zustand Fenster 2	Geschlossen
		Zustand Fenster 3	Geschlossen
		Zustand Fenster 4	Vollständig offen
		Zustand Tür zum Flur	Mit Keil vollständig geöffnet
		Zustand Tür zum Nachbarbüro	Geschlossen
		Zustand Blendschutz 1	Offen
	Zustand Blendschutz 2	Geschlossen	
	Zustand Blendschutz 3	Geschlossen	
	Elementarströme	Lufttemperatur	31 °C
		Strahlungstemperatur	22 °C
		Luftgeschwindigkeit	0.8 m/s
Relative Luftfeuchte		40 %	
Luftdruck		1014 hPa	
CO ₂ -Konzentration	450 ppm		

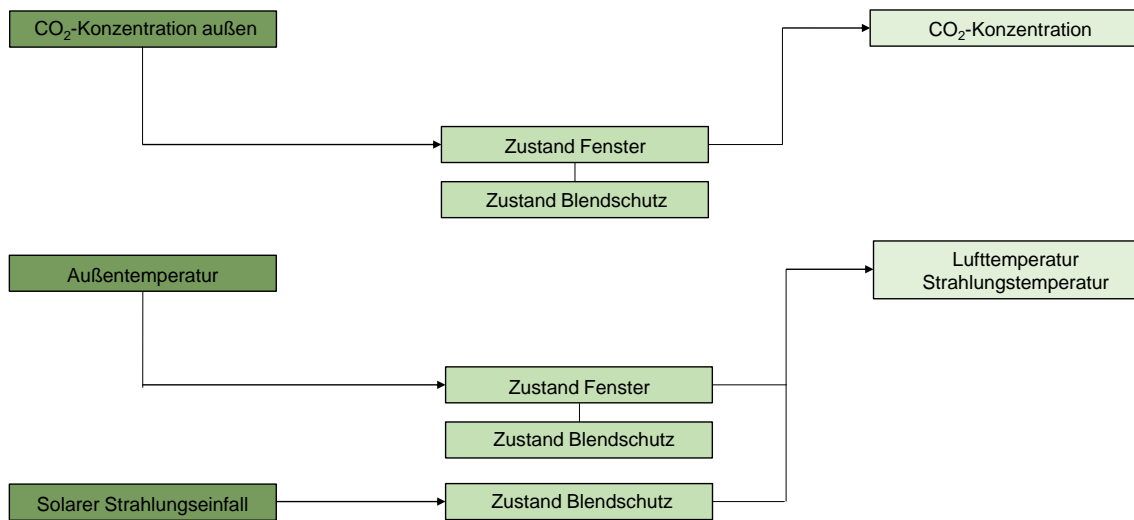


Abbildung 154: Sachbilanzmodell – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums

Das Sachbilanzmodell in Abbildung 154 beinhaltet lediglich die gemessenen Parameter des äußeren Hintergrundsystems sowie die daraus resultierenden Elementarströme im Referenzraum. Da in dieser Sachbilanz keine Level-1-Parameter erfasst wurden, liegen zwischen diesen Messgrößen und den Parametern des Hintergrundsystems lediglich die möglichen Zustandsänderungen der Ausstattungselemente, die den Level-2-Parametern zugeordnet werden.

8.1.3 Wirkungsabschätzung

Ausgehend von den in den Tabellen 18, 19 und 20 eingetragenen Messwerten kann die Wirkungsabschätzung durchgeführt werden. Anhand der Wirkungsmechanismen lassen sich die Wirkungsindikatoren der mittleren Körpertemperatur sowie des arteriellen CO₂-Partialdrucks, repräsentiert durch den Verhältnisfaktor der CO₂-Produktion zur alveolären Ventilation, berechnen. Die Ergebnisse beider Berechnungen für die Betrachtungszeitpunkte 9 Uhr, 13 Uhr und 17 Uhr sind in den folgenden Abbildungen 155 bis 160 dargestellt.

Es ist erkennbar, dass die thermische Umgebung bereits um 9 Uhr zu komfortrelevanten Veränderungen führt, während die Auswirkungen der lufthygienischen Umgebung sich auf den Bereich der nicht wahrnehmbaren physiologischen Veränderungen beschränken. Steigt die CO₂-Konzentration im Raum jedoch weiter an, dann wird die lufthygienische Umgebung ebenfalls zu komfortrelevanten Veränderungen führen. Dieser Zustand kann jedoch durch das Kippen (13 Uhr) und die anschließende vollständige Öffnung (17 Uhr) von Fenster 4 vermieden werden. In Bezug auf die thermische Umgebung ist die Luftbewegung um 13 Uhr zwar etwas höher, gleichzeitig ist aber auch die Temperatur weiter angestiegen, so dass nach wie vor mit komfortrelevanten Auswirkungen zu rechnen ist. Erst am Nachmittag durch die Nutzung der Querlüftung (17 Uhr) erhöht sich zum einen die Luftbewegung deutlich und die Temperatur kann leicht reduziert werden, womit die komfortrelevanten Auswirkungen vermieden werden können.

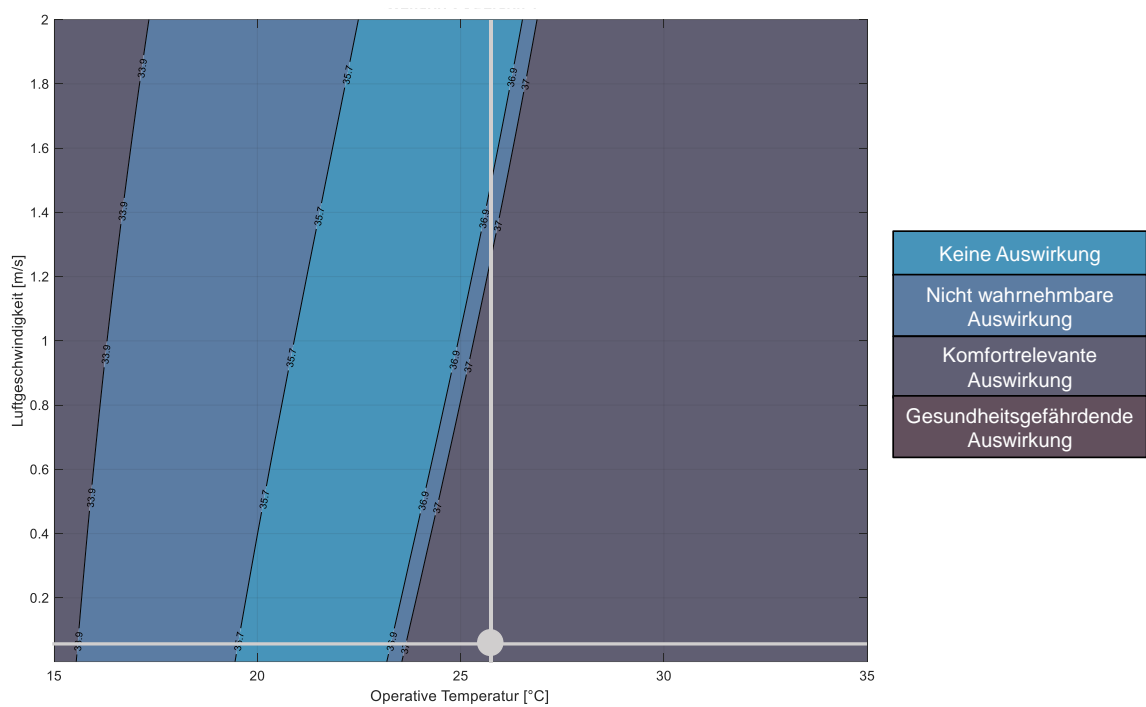


Abbildung 155: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der thermischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 9 Uhr

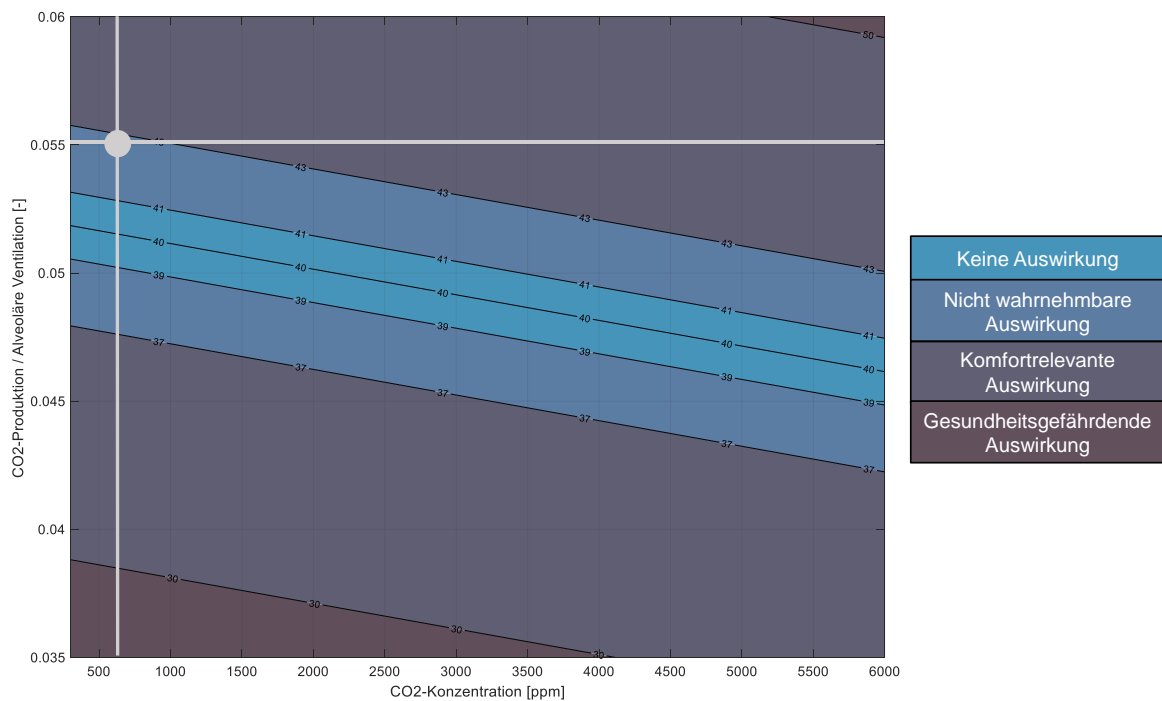


Abbildung 156: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der lufthygienischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 9 Uhr

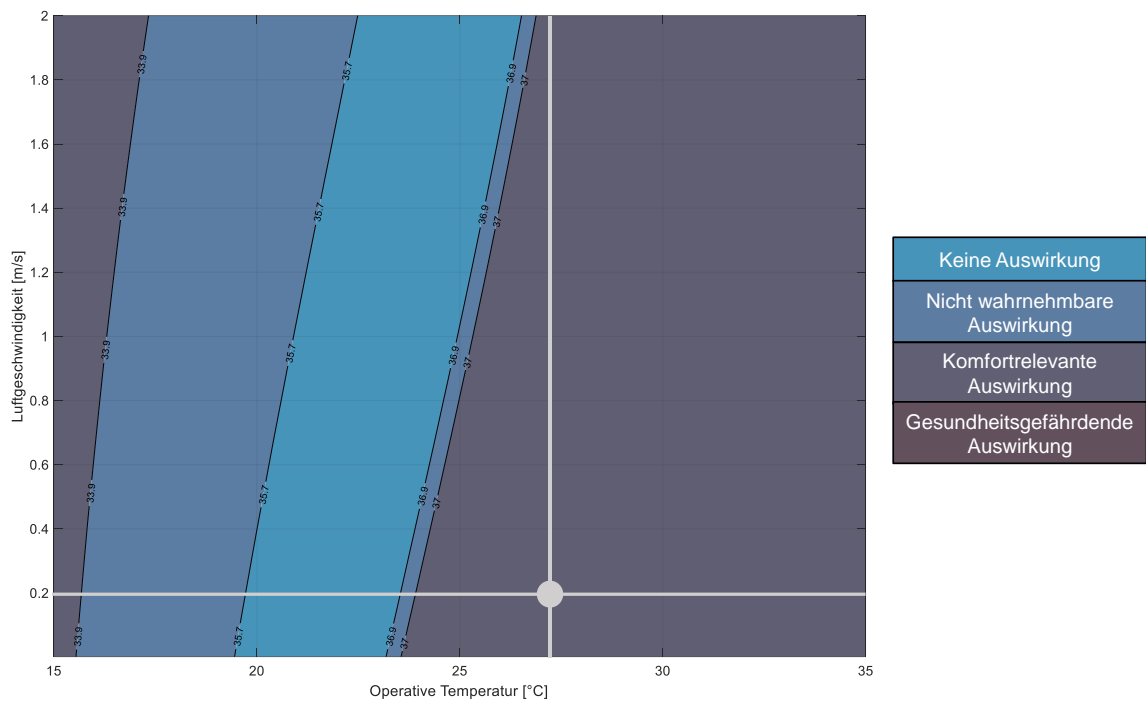


Abbildung 157: Grafische Darstellung des Wirkungsindicators der thermischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 13 Uhr

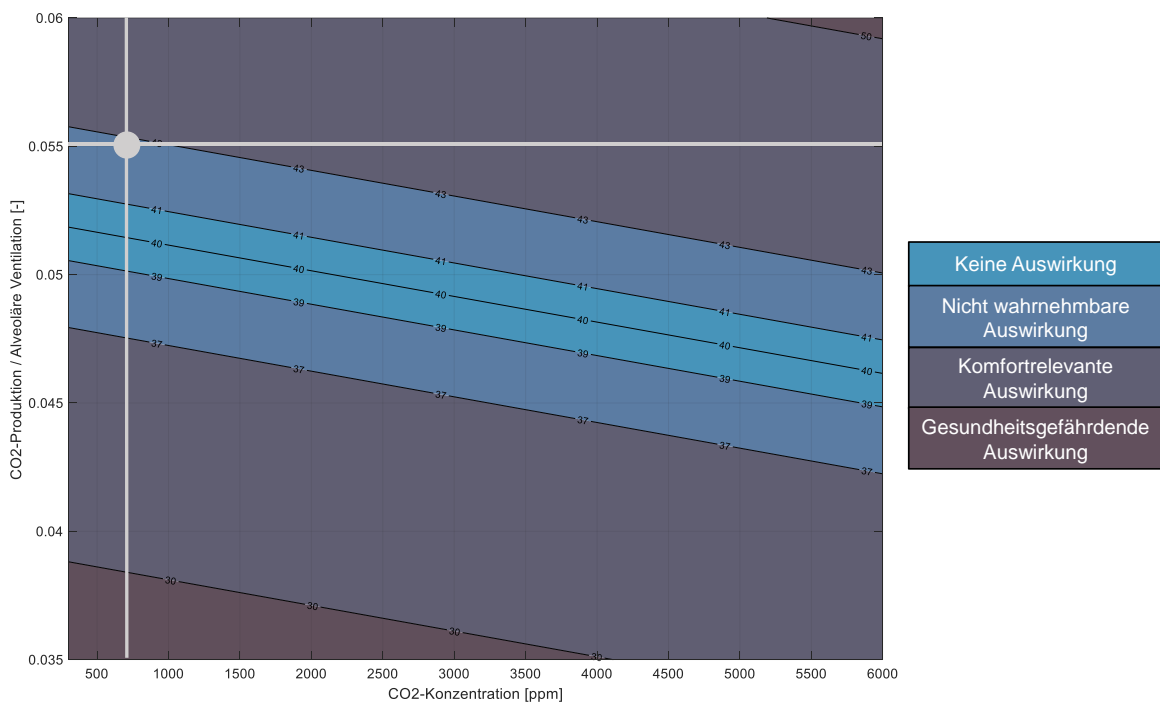


Abbildung 158: Grafische Darstellung des Wirkungsindicators der lufthygienischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 13 Uhr

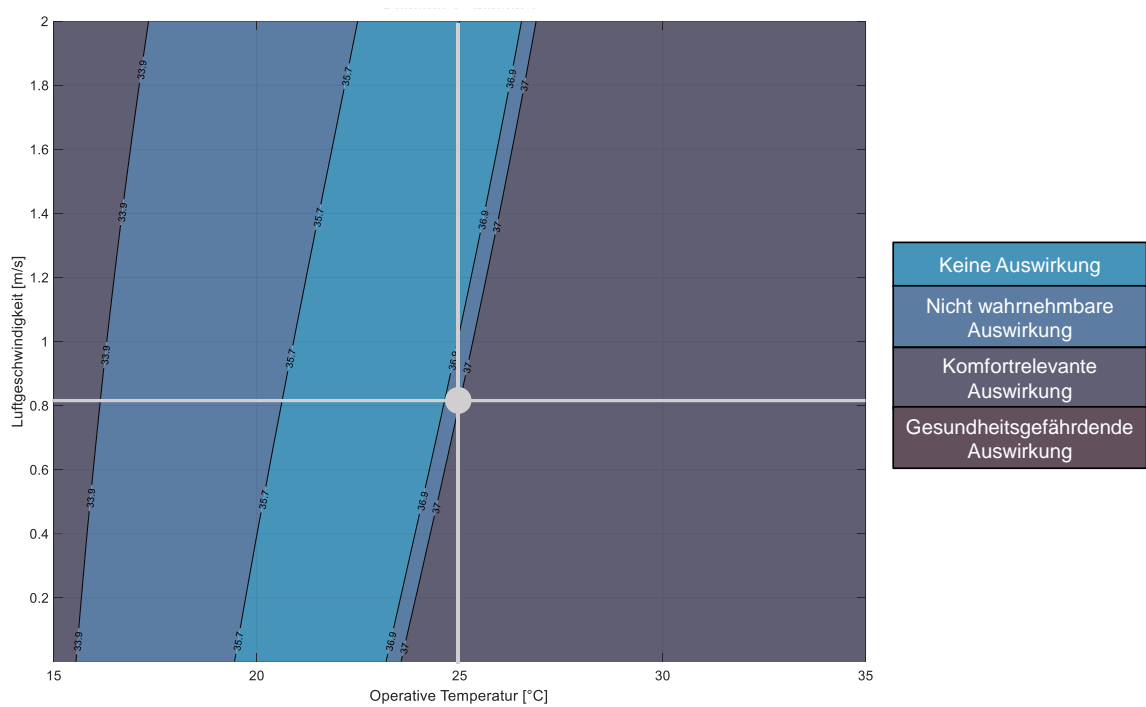


Abbildung 159: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der thermischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 17 Uhr

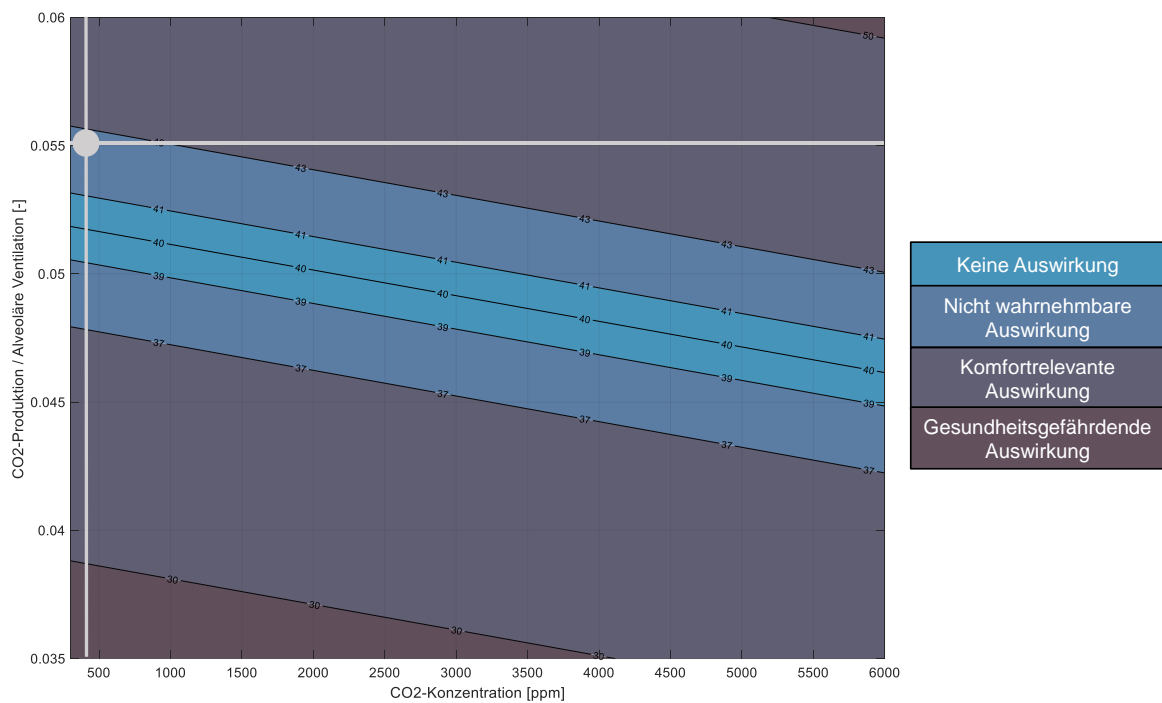


Abbildung 160: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der lufthygienischen Umgebung für den Betrachtungszeitpunkt 17 Uhr

8.1.4 Auswertung

Aus der stündlichen Durchführung der Wirkungsabschätzung kann letztendlich eine Übersicht erstellt werden, welche die Auswirkungen im Verlauf des Tages darstellt. Dieser Überblick gestaltet sich für die vorliegende Bewertungssituation entsprechend der folgenden Abbildung 161. Die thermischen Auswirkungen liegen von 9 Uhr bis 16 Uhr im Bereich der komfortrelevanten Auswirkungen. Erst am Nachmittag, mit der Nutzung der Querlüftung (Öffnen der Tür zum Flur und Fenster 4) und der Veränderung des Sonnenstands führt die thermische Umgebung nur noch zu Auswirkungen, die aus physiologischer Sicht als nicht wahrnehmbar zu bewerten sind. Die lufthygienische Umgebung führt dagegen im Verlauf des Morgens durch den Anstieg der CO₂-Konzentration zu komfortrelevanten Auswirkungen. Mit Beginn der Lüftung verringert sich die CO₂-Konzentration, sodass diese wiederum zu nicht wahrnehmbaren physiologischen Auswirkungen führt.

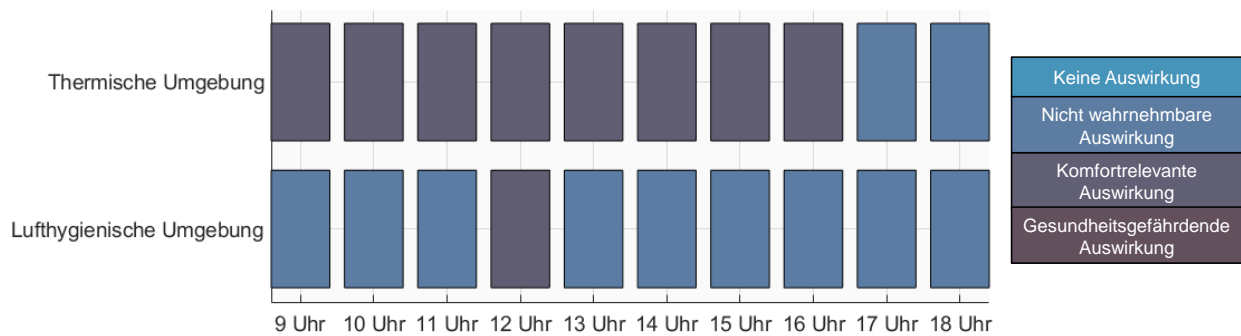


Abbildung 161: Auswertung der Wirkungsabschätzung – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums

Zur Herleitung von Optimierungsmaßnahmen müssen die Einträge in die Sachbilanz sowie die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung gemeinsam betrachtet werden. Aus dem Sachbilanzmodell wird erkennbar, dass lediglich der Zustand der Fenster sowie der Zustand des Blendschutzes einen Einfluss auf die relevanten Elementarströme haben. Aus den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung lässt sich jedoch schließen, dass die Luftbewegung im Raum ebenfalls einen wesentlichen Einfluss hat und diese somit im Sachbilanzmodell ergänzt werden sollte.

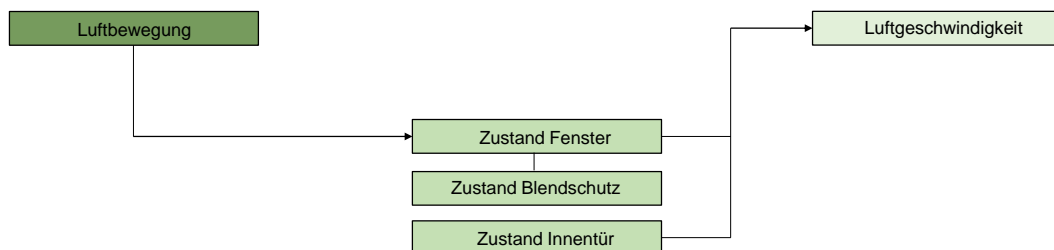


Abbildung 162: Ergänzung des Sachbilanzmodells – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums

Mithilfe der Querlüftung durch das Öffnen der Innentür zum Flur sowie von Fenster 4 wird nicht nur die CO₂-Konzentration im Raum reduziert, sondern ebenfalls durch die erhöhte Luftbewegung das Temperaturempfinden verbessert, so dass die komfortrelevanten Auswirkungen vermieden werden können. Es ist jedoch offensichtlich, dass der Raum in den Morgenstunden deutlich aufheizt; das Verschließen des Blendschutzes zum Schutz vor der direkten Sonneneinstrahlung ändert nichts an den Temperaturen im Raum. Bei den vorhandenen Gegebenheiten empfiehlt es sich daher dringend einen außenliegenden Sonnenschutz an alle Fenster anzubringen und diesen bestenfalls mittels automatischer Regelung zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs zu verschließen. Da die Möglichkeit der Querlüftung für diesen Raum besteht, sollte ebenfalls eine Nachtabkühlung in Erwägung gezogen werden, da das Öffnen der Fenster während des Tages bei derart hohen Außentemperaturen keine Verbesserung bringen wird. Wird die Querlüftung zusätzlich am Tag genutzt, dann muss zusätzlich der Sonnenschutz an Fenster 4 geöffnet werden, da ansonsten der Effekt der Querlüftung deutlich reduziert wird. Zudem sollte der Arbeitgeber nach Möglichkeit bei entsprechend sommerlichen Temperaturen die geltende Bekleidungs Vorschrift überdenken. Anhand einer Neutralitätsanalyse zeigt sich, dass eine Bekleidung mit einem clo-Wert von 0.5 statt 1.0 eine deutliche Verbesserung bringt. Im Vergleich zur 13-Uhr Darstellung der thermischen Auswirkung in Abbildung 157 würde sich mit einem clo-Wert von 0.5 das in Abbildung 163 dargestellte Ergebnis ergeben.

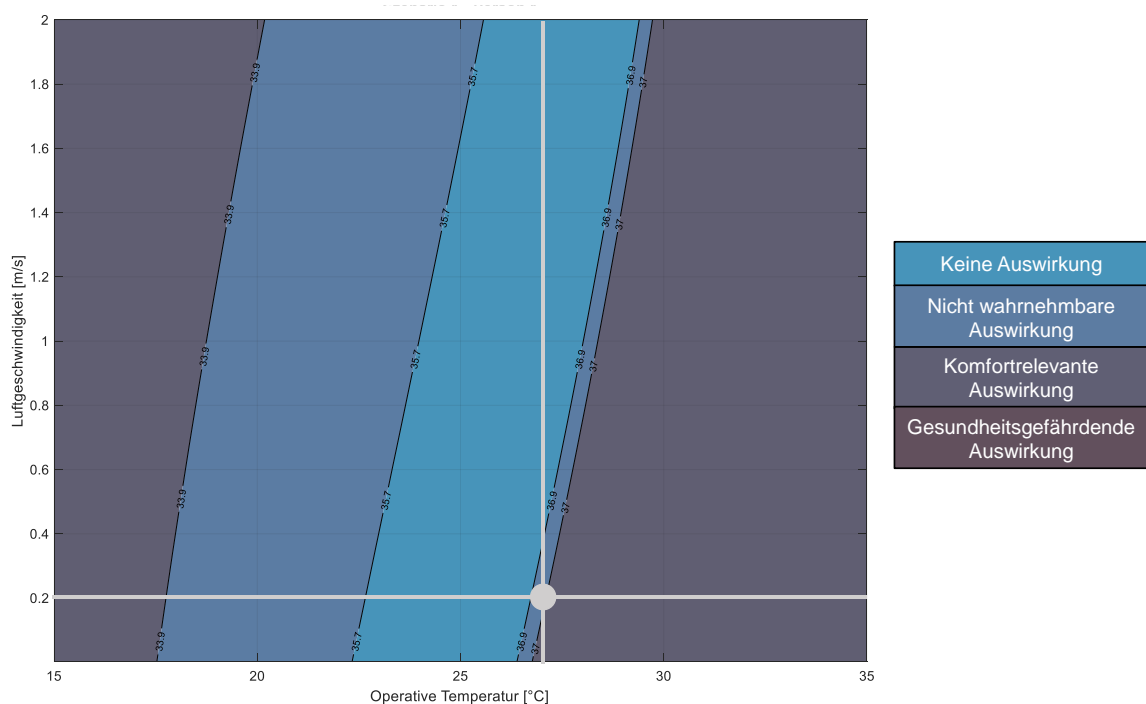


Abbildung 163: Analyse der Neutralität – Anwendungsbeispiel: Optimierung eines Referenzraums

Die CO₂-Konzentration im Innenraum lässt sich aufgrund der CO₂-Konzentration des Außenraums nicht weiter reduzieren. Somit werden die Auswirkungen für die betrachtete Person aufgrund der Lungenfunktion zu jedem Zeitpunkt mindestens im Bereich der nicht wahrnehmbaren Auswirkungen liegen, womit der neutrale Zustand ausgeschlossen ist.

8.2 Anwendungsszenario: Vergleich von Referenzräumen

Das Anwendungsszenario des Vergleichs zweier oder mehrerer Referenzräume dient insbesondere der Feststellung von raumphysiologischen Auswirkungen, welche sich auf einen Standardnutzer beziehen. Hiermit wird die Vergleichbarkeit einzelner Räume gewährleistet und es können Aussagen darüber getroffen werden, welcher der Referenzräume geringere raumphysiologische Auswirkungen für die definierten Personen hat. Die Räume für den Vergleich können sich entweder im gleichen oder in unterschiedlichen Gebäuden befinden.

8.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

In der Zieldefinition der raumphysiologischen Bilanz gilt es wiederum die folgenden drei Fragen zu beantworten:

- Warum wird diese Studie durchgeführt?
Einzelne Bewohner sowie das Pflegepersonal eines Alten- und Pflegeheims beschwerten sich in der Nacht über Schlafstörungen aufgrund von Verkehrslärm.
- Welche Frage soll diese Studie beantworten?
Es soll die Frage beantwortet werden, ob es mögliche negative raumphysiologische Auswirkungen in Bezug auf die akustische Umgebung gibt. Es sollen zudem vier Räume mit unterschiedlichen Ausrichtungen und Nutzungen bilanziert werden, um mögliche Unterschiede zwischen den Räumen feststellen zu können.
- Für wen wird diese Studie durchgeführt?
Alten- und Pflegeheim

Ausgehend von dieser Zieldefinition wird der Untersuchungsrahmen beschrieben; zur übersichtlichen Darstellung erfolgt die Beschreibung des Untersuchungsrahmens in tabellarischer Form. Da sich diese raumphysiologische Bilanz auf vier unterschiedliche Räume im gleichen Gebäude bezieht, kann auf die Angabe der Anschrift des Gebäudes, des Nutzungszwecks und der funktionellen Einheit verzichtet werden.

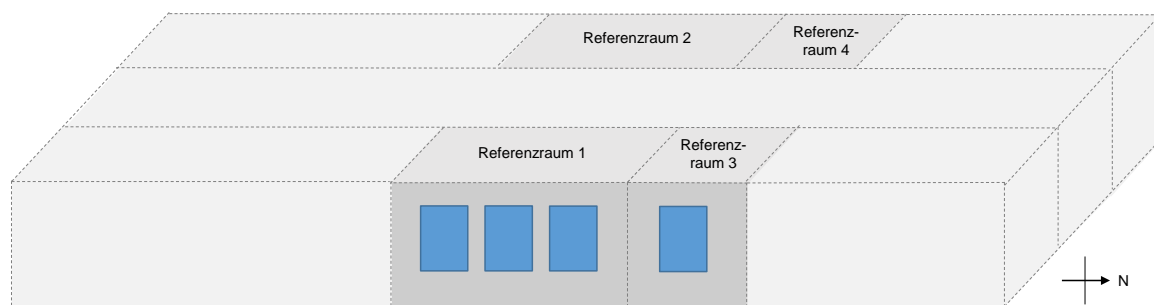
Tabelle 21: Untersuchungsrahmen – Anwendungsbeispiel: Vergleich von Referenzräumen

Referenzraum 1	Raumnutzung: Schlafraum Altenheimbewohner Nutzungsfläche: 32 m ² Anzahl der Nutzer: eine Person Nutzungsdauer: 24 Stunden am Tag / 7 Tage die Woche Standort: 3. Stock Orientierung: Osten
Referenzraum 2	Raumnutzung: Schlafraum Altenheimbewohner Nutzungsfläche: 32 m ² Anzahl der Nutzer: eine Person Nutzungsdauer: 24 Stunden am Tag / 7 Tage die Woche Standort: 3. Stock Orientierung: Westen
Referenzraum 3	Raumnutzung: Ruheraum Pflegepersonal Nutzungsfläche: 16 m ² Anzahl der Nutzer: zwei Personen Nutzungsdauer: 22 Uhr bis 6 Uhr, 7 Tage die Woche Standort: 3. Stock Orientierung: Osten
Referenzraum 4	Raumnutzung: Ruheraum Pflegepersonal Nutzungsfläche: 16 m ² Anzahl der Nutzer: zwei Personen Nutzungsdauer: 22 Uhr bis 6 Uhr, 7 Tage die Woche Standort: 3. Stock Orientierung: Westen
Systemgrenzen	Mikroklima
Auswahl der Wirkungskategorien	Akustische Umgebung
Anzuwendende Auswertung	Auswertung bezüglich komfortrelevanter oder gesundheitsgefährdender Auswirkungen
Anforderungen an die Daten	Mittlere Datenqualität
Vereinfachte Annahmen	Es wird angenommen, dass sich in den Ruheräumen ebenfalls nur eine Person aufhält. Zudem müssen über Nacht alle Fenster im Gebäude geschlossen sein.
Vorliegende Einschränkungen	Kein Zugriff auf Gebäudepläne
Anforderungen an den Bericht	Nachvollziehbare Darstellung der Ergebnisse
Bilanzierungsperson	Standardperson für Altenheimbewohner und Pflegepersonal
Anwendungszeitraum	Wochentags im April von 22 Uhr bis 6 Uhr; stündliche Aufnahme

8.2.2 Sachbilanz

Da sich dieses Anwendungsszenario auf den Vergleich von unterschiedlichen Referenzräumen bezieht, müssen entsprechend den Vorgaben der raumphysiologischen Bilanz alle relevanten Parameter des äußeren und inneren Hintergrundsystems sowie die Level-0- und Level-1-Parameter beschrieben werden. Zu den relevanten Parametern des äußeren und des inneren Hintergrundsystems zählt lediglich die Beschreibung der Schallquellen. Bei den Level-0-Parametern müssen das Schalldämm-Maß, die Nachhallzeit und der Schallabsorptionsgrad der Oberflächen beschrieben werden. Da das betrachtete Gebäude über keine raumluftechnischen Anlagen oder über Rollläden an den Fenstern verfügt, welche einen Einfluss auf die akustische Umgebung haben können und zusätzlich die Fenster nachts verschlossen sind, müssen keine Level-1-Parameter in der Sachbilanz beschrieben werden.

Das äußere Hintergrundsystem der Referenzräume welche nach Osten orientiert sind, wird geprägt durch eine Hauptverkehrsstraße, während das Hintergrundsystem der Referenzräume, die nach Westen orientiert sind, durch eine Grünanlage, welche ausschließlich von den Altenheimbewohnern genutzt wird, beschrieben werden kann. In Bezug auf das innere Hintergrundsystem gibt es insbesondere im definierten Anwendungszeitraum keine relevanten akustischen Einflüsse. Dies ist jedoch nur der Fall für den gewöhnlichen Betrieb des Heims. Sollte in der Nacht ein medizinischer Notfall auftreten, dann müsste das Bereitschaftspersonal, welches im Ruheraum schläft, ihrer Arbeit nachgehen. Hierdurch können für weitere Bewohner akustische Einflüsse entstehen, die ihre Schlafqualität beeinträchtigen. Aus diesem Grund muss an dieser Stelle das Auftreten eines Notfalls ausgeschlossen werden, sodass weder die Bewohner noch das Pflegepersonal durch einen medizinischen Notfall in ihrem Schlaf gestört werden. Diese Besonderheit kann nachträglich im Untersuchungsrahmen bei der Beschreibung der vorliegenden Einschränkungen ergänzt werden.



Referenzraum 1 Nachhallzeit 4.0 s Fläche Außenwand: 18 m ² Schalldämm-Maß gesamt: 35 dB Schallabsorptionsgrad: 0.03 Fläche Fenster 1: 2 m ² Fläche Fenster 2: 2 m ² Fläche Fenster 3: 2 m ² Schalldämm-Maß: 32 dB Schallabsorptionsgrad: 0.06 Schalldämm-Maß Innenwände und Decke: 53 dB	Referenzraum 2 Nachhallzeit 4.0 s Fläche Außenwand: 18 m ² Schalldämm-Maß gesamt: 35 dB Schallabsorptionsgrad: 0.03 Fläche Fenster 1: 2 m ² Fläche Fenster 2: 2 m ² Fläche Fenster 3: 2 m ² Schalldämm-Maß: 32 dB Schallabsorptionsgrad: 0.06 Schalldämm-Maß Innenwände und Decke: 53 dB	Referenzraum 1 Nachhallzeit 4.1 s Fläche Außenwand: 10 m ² Schalldämm-Maß gesamt: 35 dB Schallabsorptionsgrad: 0.03 Fläche Fenster 1: 2 m ² Schalldämm-Maß: 32 dB Schallabsorptionsgrad: 0.06 Schalldämm-Maß Innenwände und Decke: 53 dB	Referenzraum 1 Nachhallzeit 4.1 s Fläche Außenwand: 10 m ² Schalldämm-Maß gesamt: 35 dB Schallabsorptionsgrad: 0.03 Fläche Fenster 1: 2 m ² Schalldämm-Maß: 32 dB Schallabsorptionsgrad: 0.06 Schalldämm-Maß Innenwände und Decke: 53 dB
---	---	---	---

Abbildung 164: Sachbilanz Level 1 – Anwendungsbeispiel: Vergleich von Referenzräumen

Ausgehend von diesen Daten können die für die Wirkungsabschätzung relevanten Größen im stündlichen Takt für jeden der Referenzräume erfasst werden. Hierbei handelt es sich um die akustischen Einflüsse des äußeren und des inneren Hintergrundsystems sowie der Schalldruckpegel und die Frequenz im Raum, welche durch der Langzeitlautheit, bezogen auf eine Stunde, repräsentiert werden.

Tabelle 22: Sachbilanz der veränderlichen Parameter in den Referenzräumen 1 und 3

22 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Starker Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	18 sone
23 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Mäßiger Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	12 sone
24 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Mäßiger Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	12 sone
1 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Kaum Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	6 sone
2 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Kaum Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	6 sone
3 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Kaum Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	6 sone
4 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Kaum Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	6 sone
5 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Mäßiger Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	12 sone
6 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Starker Straßenverkehr
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	18 sone

Tabelle 23: Sachbilanz der veränderlichen Parameter in den Referenzräumen 2 und 4

22 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	2 Sone
23 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	1 Sone
24 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	1 Sone
1 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	0.5 Sone
2 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	0.5 Sone
3 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	0.5 Sone
4 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	0.5 Sone
5 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	1 Sone
6 Uhr	Hintergrundsystem	Außen	Keine akustischen Einflüsse
		Innen	Keine akustischen Einflüsse
	Elementarstrom	Lautheit	2 Sone

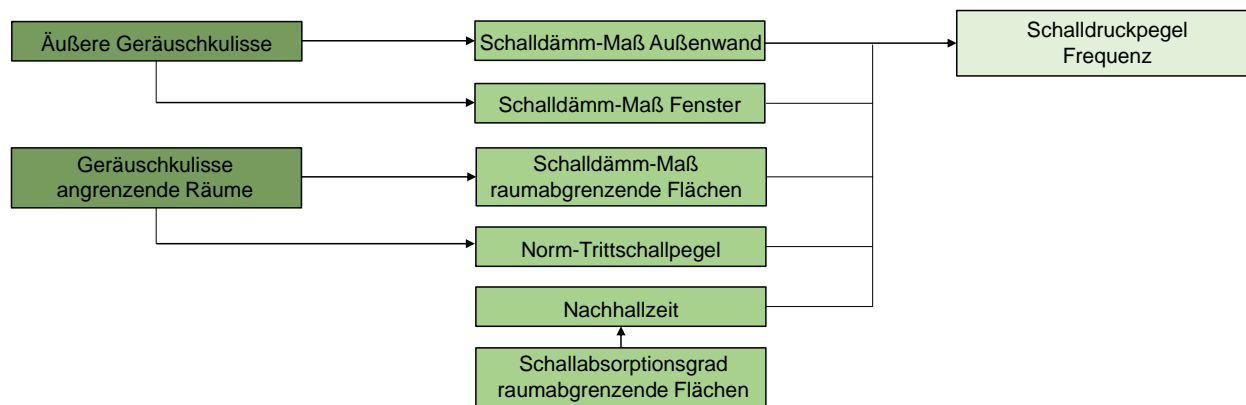


Abbildung 165: Sachbilanzmodell – Anwendungsbeispiel: Vergleich von Referenzräumen

Das Sachbilanzmodell setzt sich in der vorliegenden Anwendung lediglich aus den Einflüssen des äußeren und inneren Hintergrundsystems sowie den Eigenschaften der Level-0-Parametern und den daraus resultierenden Elementarströmen zusammen.

Bezüglich der Level-2-Parameter ist das Hörvermögen für die Bewertung der akustischen Umgebung entscheidend. Da sich die raumphysiologische Bilanz in der vorliegenden Anwendung auf Standardpersonen beziehen soll, wird für die Altenheimbewohner ohne das Tragen eines Hörgeräts ein Hörverlust von 40 dB und für das Pflegepersonal, entsprechend einem Erwerbstätigen mit einem durchschnittlichen Alter von 30 Jahren, kein Hörverlust angenommen.

8.2.3 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung muss für die in den Tabellen 22 und 23 dargestellten Eingangswerte des Wirkungsmechanismus durchgeführt werden. Für die Referenzräume 1 und 3 müssen somit die Wirkungsindikatoren bei einer Lautheit von 18 sone, 12 sone und 6 sone jeweils für eine normalhörende und eine hörgeschädigte Person durchgeführt werden. Das Ergebnis der Bestimmung des Wirkungsindikators ist in den Abbildungen 166 bis 168 dargestellt. Für die Referenzräume 2 und 4 müssen die Wirkungsindikatoren bei einer Lautheit von 2 sone, 1 sone und 0.5 sone wiederum für die zwei Standardpersonen durchgeführt werden. Dieses Ergebnis ist in den Abbildungen 169 bis 171 dargestellt. Die Bestimmung der kategorialen Einheit erfolgt für die normalhörende Person anhand von Gleichung 90. Die abgeminderte kategoriale Lautheit der hörgeschädigten Person ergibt sich aus der grafischen Bestimmung entsprechend Abbildung 108.

Aus den folgenden Abbildungen wird deutlich erkennbar, dass der Aufenthalt in den Referenzräumen, deren akustische Umgebung durch den Straßenverkehr geprägt ist, im Gegensatz zu den Räumen, bei denen das nicht der Fall ist, zu komfortrelevanten Auswirkungen führt.

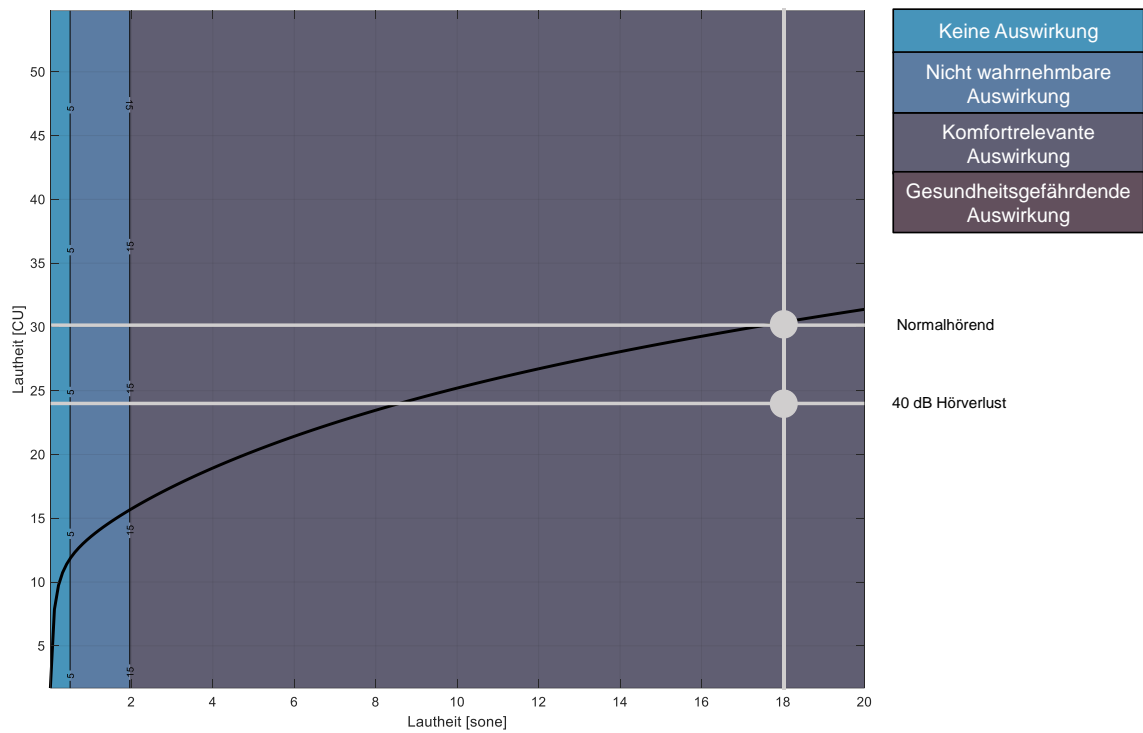


Abbildung 166: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 22 Uhr und 6 Uhr in den Referenzräumen 1 und 3 (18 sone)

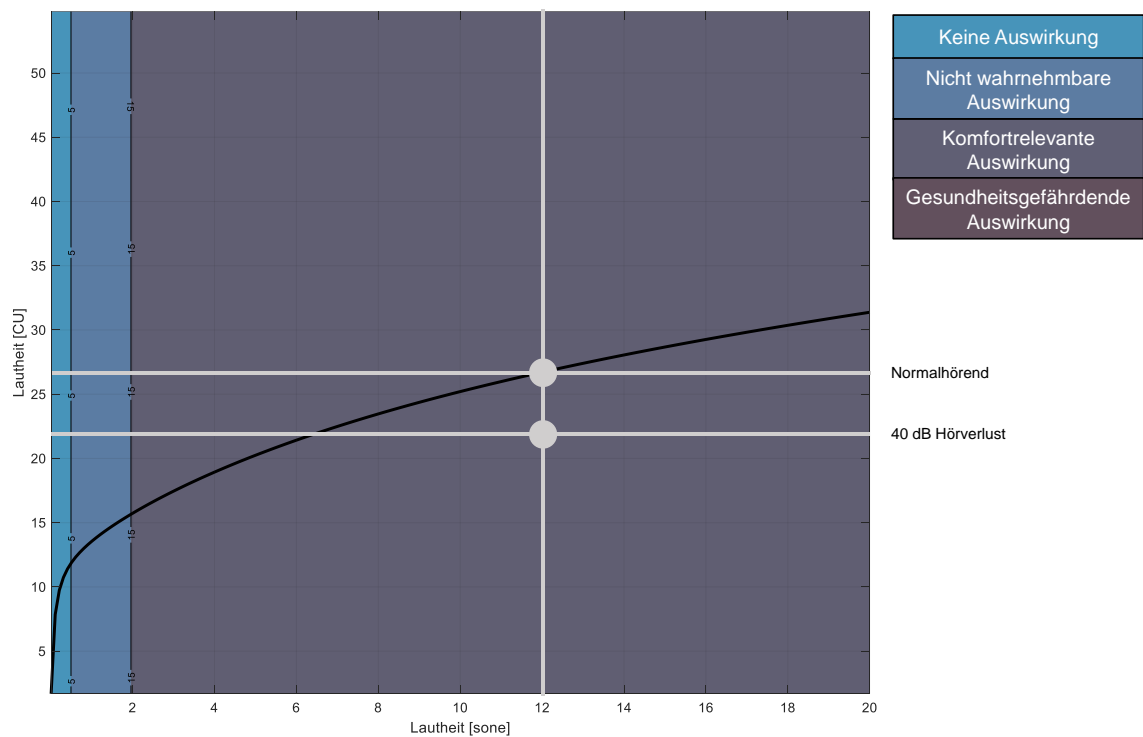


Abbildung 167: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 23 Uhr, 24 Uhr und 5 Uhr in den Referenzräumen 1 und 3 (12 sone)

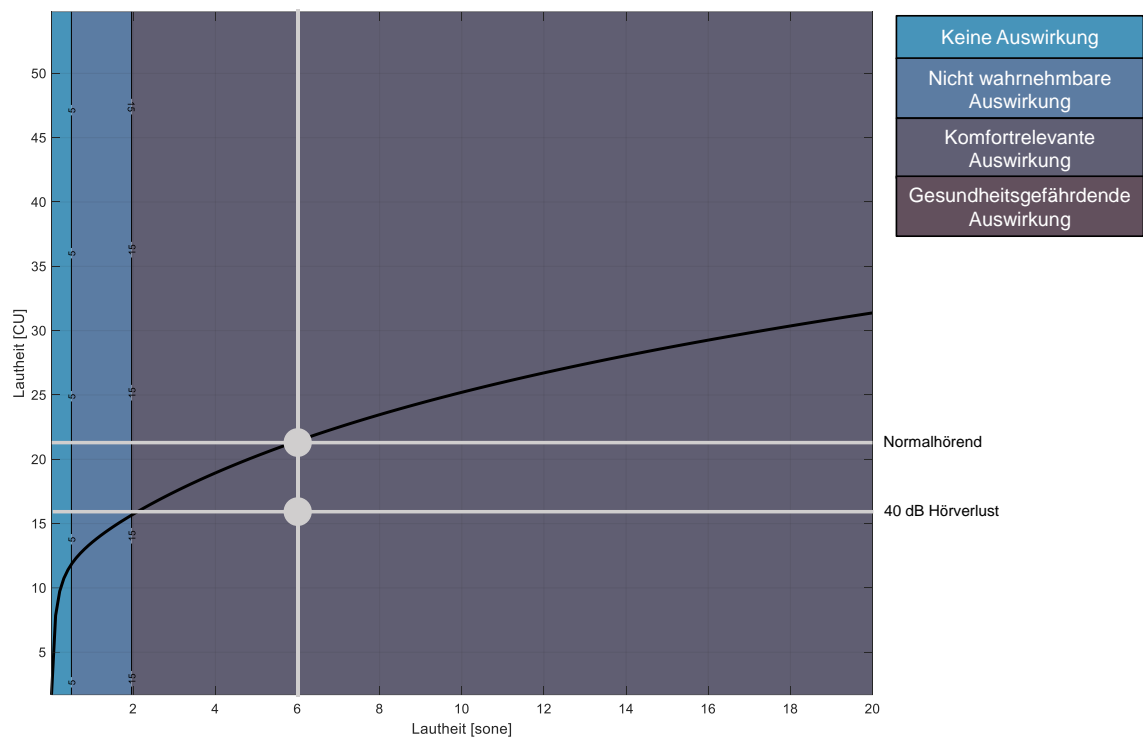


Abbildung 168: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 1 Uhr, 2 Uhr, 3 Uhr und 4 Uhr in den Referenzräumen 1 und 3 (6 sone)

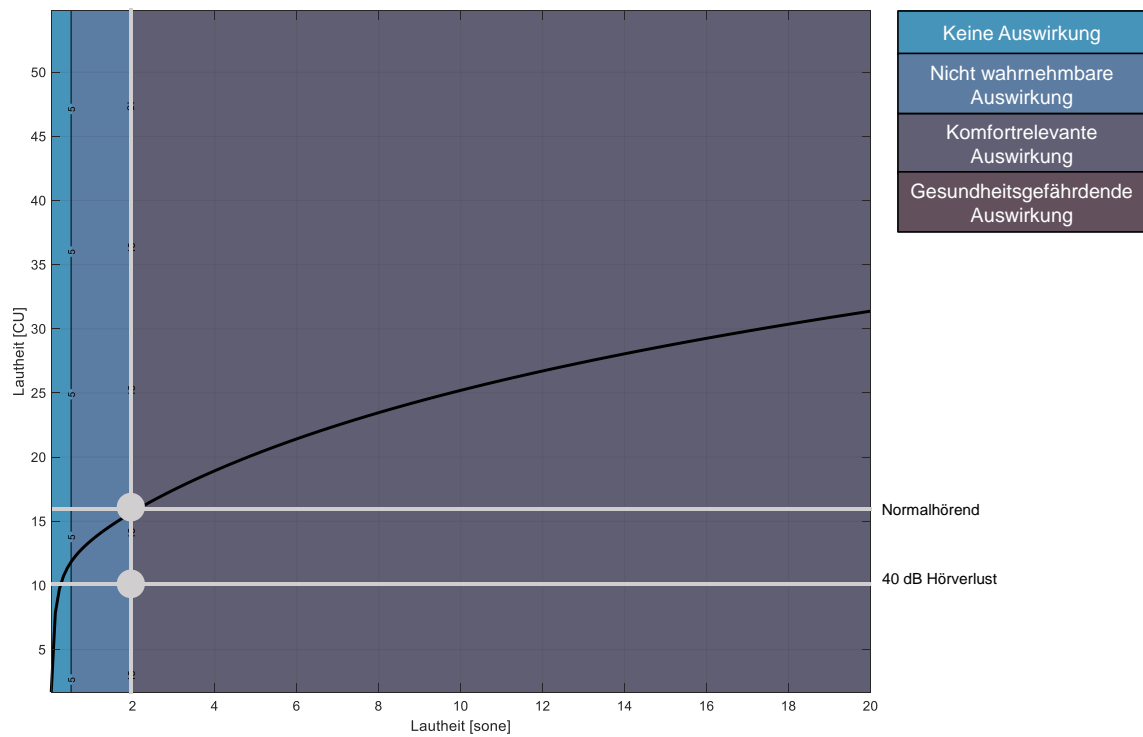


Abbildung 169: Grafische Darstellung des Wirkungsindikators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 22 Uhr und 6 Uhr in den Referenzräumen 2 und 4 (2 sone)

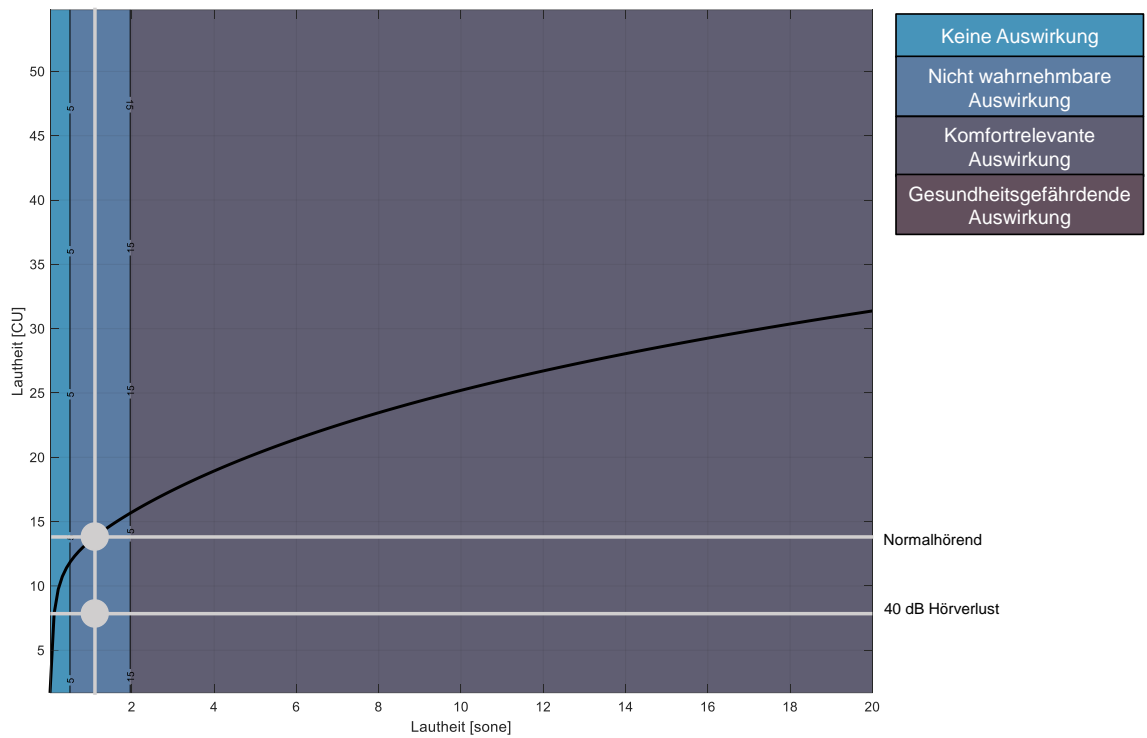


Abbildung 170: Grafische Darstellung des Wirkungsindicators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 23 Uhr, 24 Uhr und 5 Uhr in den Referenzräumen 2 und 4 (1 sone)

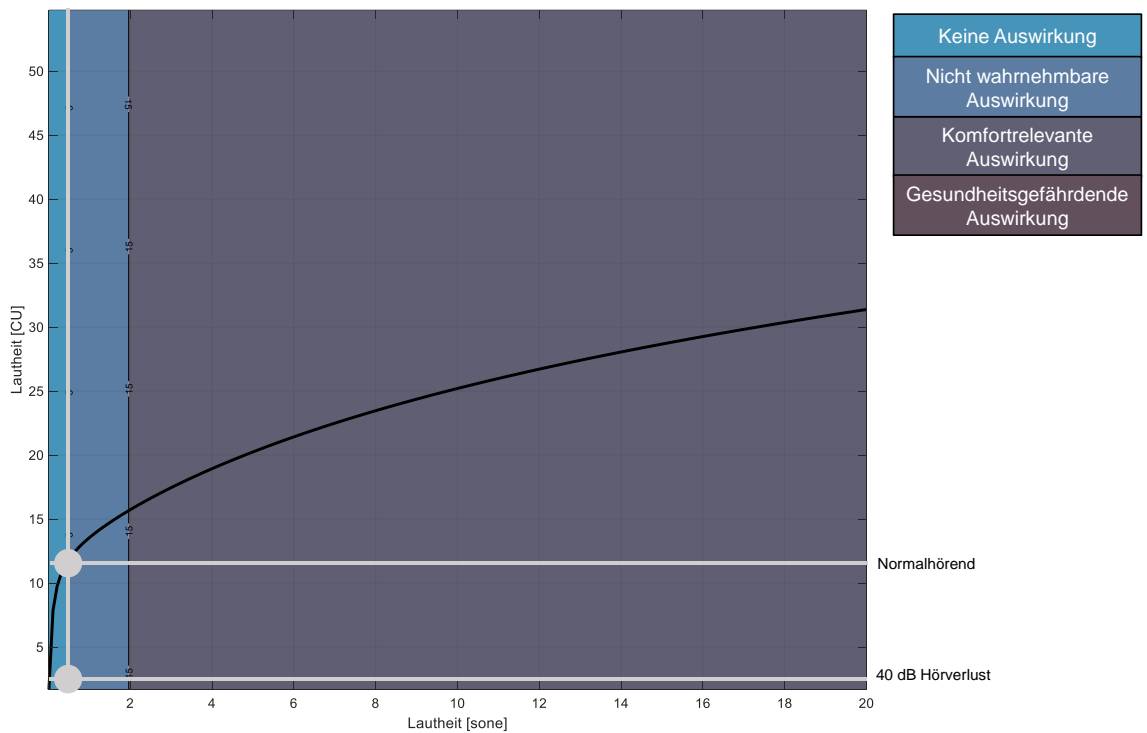


Abbildung 171: Grafische Darstellung des Wirkungsindicators der akustischen Umgebung für die Betrachtungszeitpunkte 1 Uhr, 2 Uhr, 3 Uhr und 4 Uhr in den Referenzräumen 2 und 4 (0.5 sone)

8.2.4 Auswertung

Aus der stündlichen Durchführung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung kann für die vier Referenzräume eine zusammenfassende Ergebnisdarstellung entsprechend Abbildung 172 erstellt werden.

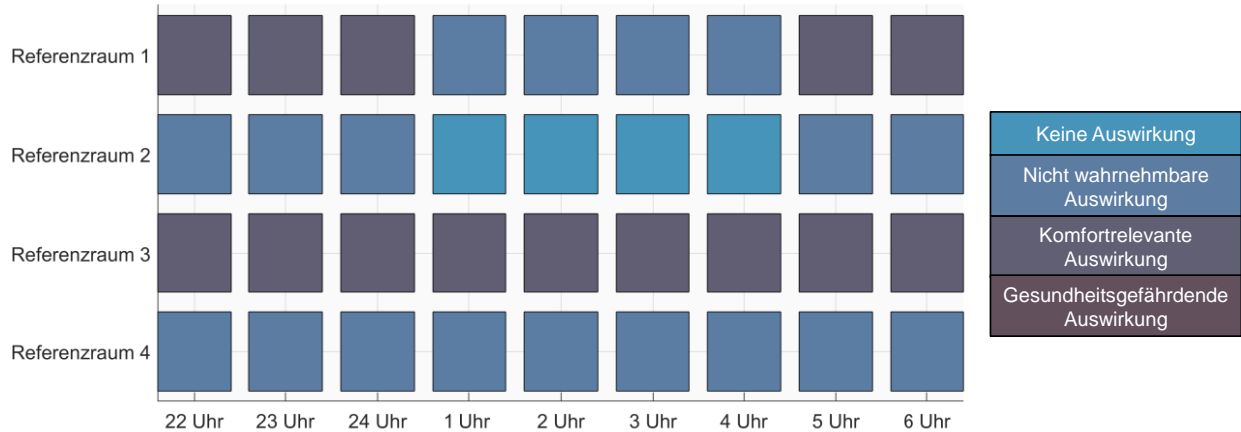


Abbildung 172: Auswertung der Wirkungsabschätzung – Anwendungsbeispiel: Vergleich von Referenzräumen

Aus der zusammenfassenden Darstellung wird erkennbar, dass insbesondere der Aufenthalt in den Räumen, die zur Straße ausgerichtet sind, zu komfortrelevanten Auswirkungen führen kann. Aufgrund eines potentiell vorliegenden Hörschadens verringern sich die Auswirkungen in den Stunden mit kaum Straßenverkehr bei Personen mit diesen Randbedingungen. In den Räumen, die nach Westen zur Grünanlage ausgerichtet sind, kann der Mensch die Geräuschkulisse nach wie vor unbewusst wahrnehmen; es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass die Schlafqualität hierdurch beeinträchtigt wird. Lediglich in Referenzraum 2 befindet sich der Altenheimbewohner im Zeitraum von 1 Uhr bis 4 Uhr in einem neutralen Zustand. Um bei einer normalhörenden Person den neutralen Zustand zu erreichen, dürfen 0.3 sone nicht überschritten werden. Bei einer Person mit einem Hörschaden von 40 dB sollte dagegen ein Lautheitslevel von ungefähr 2 sone, zur Aufrechterhaltung des Zustands der Homöostase nicht überschritten werden. Der Zustand der unbewussten Wahrnehmung der Geräuschkulisse wird bei einer normalhörenden Person bis zu einem Lautheitslevel von 2 sone aufrechterhalten, bei einer hörgeschädigten Person dagegen bis 10 sone. Zur Verbesserung der Schlafqualität sowohl der normalhörenden als auch der hörgeschädigten Personen sollte insbesondere in den Räumen, die nach Osten orientiert sind, der Schallschutz verbessert werden. Aus den beschriebenen Grenzwerten der einzelnen Wirkungszonen kann geschlussfolgert werden, dass Personen mit einem größeren Hörschaden höchstwahrscheinlich weniger in ihrem Schlaf gestört werden als normalhörende Personen. Um den Schallschutz zu verbessern, könnte neben einem Fensteraustausch das Anbringen von Rollläden in Erwägungen gezogen werden, welche beim vollständigen Verschließen ebenfalls den Schallschutz verbessern können.

9 Kritische Bewertung der Methodik

Die Dissertation dient dem Zweck, einen neuen Ansatz für die Bewertung der Auswirkungen von Gebäuden auf den Menschen herzuleiten. Hierzu wurde die Hypothese formuliert, dass raumphysiologische Auswirkungen von bestehenden Gebäuden, welche aus der bauphysikalischen Umgebung resultieren und zu einer Abweichung vom neutralen Zustand des menschlichen Körpers führen können, sich anhand einer Bilanzierungsmethode erfassen lassen, die entsprechend den Grundsätzen der Methode der Ökobilanzierung aufgebaut ist. Somit sollte es nicht Sinn und Zweck sein, eine vollständig neue Methode zu formulieren, sondern anhand von bestehenden Definitionen und Vorgängen einen neuen Ansatz für die Beurteilung der Auswirkungen von Innenräumen zu definieren.

Aufgrund der im Stand des Wissens dargestellten Uneinigkeit über die Definition des erweiterten Raumklimas (engl. *Indoor Environment*), wurde diese Formulierung bewusst nicht in die Hypothese mit aufgenommen. Entgegen dem üblichen Vorgehen, das sich im Stand des Wissens abzeichnet, bezieht sich die Bilanzierung nicht direkt auf den Komfort, die Zufriedenheit oder die Akzeptanz mit den Umgebungsbedingungen, sondern auf die raumphysiologischen Auswirkungen, die die Grundlage des kausalen Zusammenhangs zwischen der Wahrnehmung und der Bewertung, aus welcher diese individuellen Aspekte letztendlich resultieren, bildet.

9.1 Aufbau der raumphysiologischen Bilanz

Die Analogie zwischen der Ökobilanzierung und der raumphysiologischen Bilanz ergibt sich aus dem Grundsatz, dass in der Ökobilanzierung konkrete Auswirkungen auf die Umwelt von einzelnen Produkten mit einer Vielzahl von Inputs und Outputs erfasst werden. In der raumphysiologischen Bilanz werden die Auswirkungen nicht für die Umwelt, sondern für den Menschen beschrieben; diese ergeben sich jedoch auch aus einer Vielzahl von Inputs (Umgebungs-, Gebäude- und Raumparameter), die zu unterschiedlichen Outputs (Elementarströme) beitragen. Eine erste Unterscheidung zwischen den Methoden ergibt sich an dieser Stelle. Während in der Ökobilanzierung lediglich die Ökosphäre und die Technosphäre betrachtet werden, muss in der raumphysiologischen Bilanzierung die menschliche Sphäre eingeführt werden. Diese ist in der Ökobilanzierung implizit in der Technosphäre verankert, da die meisten Elementarströme auf einen anthropogenen Ursprung zurückzuführen sind. In der raumphysiologischen Bilanzierung muss diese Sphäre, auf die sich letztendlich die Elementarströme auswirken, explizit dargestellt werden.

Eine weitere wesentliche Unterscheidung zwischen den beiden Bilanzierungsmethoden lässt sich bei der Definition des Begriffs der raumphysiologischen Bilanz, ausgehend vom Begriff der Ökobilanzierung feststellen. Letztere bezieht sich auf den vollständigen Lebenszyklus des zu bilanzierenden Produktes. Die raumphysiologische Bilanz bezieht sich hingegen auf einen konkreten Betrachtungszeitpunkt und beschreibt damit eine Momentaufnahme. Für die Herleitung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung wurde bewusst auf die konkrete Angabe einer zeitlichen Komponente verzichtet. Sowohl die Sachbilanz als auch die Wirkungsabschätzung können beliebig oft innerhalb eines definierten Zeitraums durchgeführt werden. Der Zeitraum sowie die Taktung der Anwendung werden im Untersuchungsrahmen der jeweiligen

raumphysiologischen Bilanz festgelegt. Die Auswahl des geeigneten Bilanzierungszeitpunkts wird dem Studierender überlassen. Wichtig ist dabei lediglich, dass insbesondere beim Vergleich von Referenzräumen ein Zeitrahmen mit vergleichbaren meteorologischen Randbedingungen angesetzt wird. Die Grundstruktur besteht aus den drei Phasen: Ziel- und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz und Wirkungsabschätzung. Das iterative Vorgehen, das der Ökobilanzierung zugrunde liegt, bleibt in der raumphysiologischen Bilanz erhalten. In der ersten Phase der Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens werden die drei gleichen Fragen, die in der Ökobilanzierung beschrieben werden, ebenfalls festgehalten. Die Definition des Untersuchungsrahmens beschreibt die in der Ökobilanzierung enthaltenen Bestandteile lediglich im Kontext der raumphysiologischen Bilanzierung. Diese werden jedoch um drei Bestandteile ergänzt: der zu betrachtende Referenzraum (einer oder mehrere mit einzelner Bilanzierung), die zu betrachtende Person (individuell oder Standard) und der Anwendungszeitraum.

In der zweiten Phase, der Erstellung der Sachbilanz, werden die wesentlichen Parameter des Hintergrundsystems sowie des Vordergrundsystems (Level 0 bis Level 3) erfasst. Es wurden keine Level-4-Parameter definiert, da diese sich nicht auf den gegebenen Kontext übertragen lassen und für die meisten Ökobilanzierungen ebenfalls aufgrund ihrer geringen Relevanz nicht berücksichtigt werden. Voraussetzung für die Erstellung der Sachbilanz ist die Verfügbarkeit der relevanten Daten. Je weniger Daten verfügbar sind, desto geringer wird die Genauigkeit und Relevanz der Ergebnisse. Da die zu bestimmenden Elementarströme auf Messungen basieren, können diese auch unabhängig von den restlichen Parametern der Sachbilanz bestimmt werden; jedoch lassen sich die zugrundeliegenden Zusammenhänge zwischen der Umgebung, dem Gebäude, dem Raum und den entstehenden Elementarströmen möglicherweise nicht mehr vollständig abbilden. Im Gegensatz zur Sachbilanz in der Ökobilanzierung, bei der sich die Sachbilanz hauptsächlich auf die Technosphäre bezieht, werden in der raumphysiologischen Bilanz zum einen die Öko- und die Technosphäre und zum anderen, die menschliche Sphäre berücksichtigt. Während das Hintergrundsystem sowie die Level-0-, Level-1- und teilweise die Level-3-Parameter die ersten beiden Sphären abdecken, beschreiben die Level-2- und einzelne Level-3-Parameter den Menschen, auf den sich der Referenzraum auswirkt. An dieser Stelle unterscheidet sich die raumphysiologische Bilanz ebenfalls von der Ökobilanzierung, da die Ökobilanzierung in der Sachbilanz nicht die Umwelt beschreibt, auf die sich die Elementarströme auswirken. Zur Anwendung der Wirkungsmechanismen müssen jedoch eine Reihe von Personendaten bekannt sein, weswegen diese ebenfalls in der Sachbilanz erfasst werden. Ob sich diese Personendaten auf eine Standard- oder individuelle Person beziehen, ergibt sich aus dem Ziel und Untersuchungsrahmen der jeweiligen Studie. Die anschließende Wirkungsabschätzung erfolgt analog zur Wirkungsabschätzung in der Ökobilanzierung. Für jede Wirkungskategorie wurde ein Wirkungsindikator (Ausnahme: Visuelle Umgebung mit zwei Wirkungsindikatoren) mit entsprechendem Wirkungsmechanismus definiert.

Nach Rosenbaum et al. (2018) werden eine Reihe von Anforderungen an die Modelle zur Modellierung der Umweltauswirkungen in der Ökobilanzierung gestellt. Diese Anforderungen wurden ebenfalls zur Herleitung der Wirkungsmechanismen in der raumphysiologischen Bilanzierung berücksichtigt. So betrachtet die Ökobilanzierung lediglich stationäre und lineare Zustände. Bei der Bilanzierung von stationären Auswirkungen wird ein linearer Zusammenhang zwischen den Elementarströmen und den Auswirkungen impliziert. An dieser Stelle unterscheidet sich die raumphysiologische Bilanz von der

Ökobilanzierung. Obwohl lediglich stationäre Zustände bilanziert werden, verdoppeln sich die Auswirkungen nicht bei einer Verdopplung der Elementarströme. Ein weiterer Grundsatz der Ökobilanz beschreibt die durchschnittliche Modellierung der Auswirkungen. (Rosenbaum et al., 2018) Dieser Grundsatz wird ebenfalls eingehalten, auch wenn sich die Bestimmung der Wirkungsindikatoren auf individuelle Personen bezieht, handelt es sich dennoch um eine durchschnittliche Bestimmung der Auswirkungen, die für Personen mit den gegebenen Input-Größen auftreten können. Dies beschreibt zugleich einen weiteren Grundsatz aus der Ökobilanzierung, welche auf die raumphysiologische Bilanzierung übertragen wurde, nämlich die Modellierung von potentiellen und nicht von vorhergesagten Auswirkungen, die in exakt dieser Weise eintreten müssen. Weitere Anforderungen der Ökobilanzierung beziehen sich auf die Erhaltung der Masse und Energie, die Parsimonie der Modellierung, die Relativität der Ergebnisse und den Ansatz der besten Schätzung. (Rosenbaum et al., 2018) Die Erhaltung der Masse und Energie wird in der raumphysiologischen Bilanzierung durch die entsprechenden Wirkungsmechanismen berücksichtigt. Der Ansatz der Parsimonie (so einfach wie möglich, so komplex wie nötig) wurde zur Modellierung ebenfalls eingehalten. Die Relativität der Ergebnisse bezieht sich auf die Hinterfragung der modellierten Ergebnisse, die sich in der raumphysiologischen Bilanz stets auf einen bestimmten Raum und eine bestimmte Person beziehen und somit nicht allgemeingültig sind. Der Ansatz der besten Schätzung beschreibt die Vermeidung von jeglicher Verzerrung der Ergebnisse. Dieser Grundsatz wird eingehalten, solange der Studierersteller die tatsächlich in einem Raum messbaren Elementarströme in der Wirkungsabschätzung als Eingangsgrößen verwendet.

Somit werden die unabdingbaren Schritte der Wirkungsabschätzung durchgeführt, jedoch durch die Definition von Wirkungszonen, welche dem Prozess der Normierung entsprechen, um einen weiteren Schritt ergänzt. Es ist anzunehmen, dass die alleinige Einheit der Wirkungsindikatoren den meisten Menschen kein Begriff ist; deswegen wurden die vier Wirkungszonen eingeführt, die für jede Wirkungskategorie identisch sind. Dabei handelt es sich um den neutralen Zustand, die unbewussten Auswirkungen, die komfortrelevanten und die gesundheitsgefährdenden Auswirkungen. Dies sind jedoch lediglich potentielle Auswirkungen, von denen anzunehmen ist, dass die jeweils betroffene Person in ihrem Komfort beeinträchtigt oder in ihrer Gesundheit gefährdet wird.

Die Auswertung der einzelnen Phasen der raumphysiologischen Bilanzierung erfolgt in einem iterativen Prozess. Einige Bestandteile der Auswertung der Ökobilanzierung können jedoch in der raumphysiologischen Bilanzierung nicht durchgeführt werden, da die Datengrundlage für ein definiertes Vorgehen fehlt (z. B. Sensitivitätsanalyse und -prüfung). Dennoch können durch die Auswertung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung, für die zwei beschriebenen Anwendungsszenarien der Optimierung und des Vergleichs von Räumen, valide Aussagen getroffen werden, womit das Ziel der jeweiligen Studie erfüllt wird.

9.2 Limitation der raumphysiologischen Bilanz

Das Ziel der raumphysiologischen Bilanz ist die Bilanzierung ausgewählter raumphysiologischer Auswirkungen. Diese Bilanzierung bezieht sich für jeden Wirkungsindikator auf die beschriebenen Wirkungszonen. Da es sich jedoch ausschließlich um die Darstellung von potentiellen Auswirkungen

handelt, kann nicht gewährleistet werden, dass wenn der neutrale körperliche Zustand des Menschen eingehalten wird, dieser seine Umgebung zwangsläufig als komfortabel bewertet. In den Wirkungsmechanismen werden insbesondere die physiologischen und weitestgehend die physischen Einflüsse berücksichtigt, jedoch nicht die psychologischen Einflüsse, die zur Komfortbeurteilung eines Raums beitragen. Die psychologischen Einflüsse einer individuellen Person werden ausschließlich im Prozess der Gewichtung der Wirkungskategorien berücksichtigt. Eine solche Gewichtung kann derzeit nur für individuelle Personen durchgeführt werden. Für die definierten Standardpersonen liegen keine Daten bezüglich der Gewichtung vor.

Die wichtigste Limitation der derzeitigen raumphysiologischen Bilanz bezieht sich auf die Eingeschränktheit der verfügbaren Daten. Diese Einschränkung zeigt sich beispielsweise bei der Anwendung des lufthygienischen Wirkungsmechanismus, sodass sich der derzeit abgebildete Wirkungsindikator auf den Verhältnisfaktor der alveolären Ventilation und der CO₂-Produktion bezieht. Trotz der methodischen Validität der Wirkungsabschätzung ist ihre Anwendbarkeit und Robustheit aufgrund der erheblich mangelnden Datengrundlage derzeit eingeschränkt. Die physiologischen Daten, die den einzelnen Wirkungsmechanismen zugrunde liegen, wurden der vorhandenen Literatur entnommen. Mit diesen Daten lässt sich beweisen, dass der Ansatz der raumphysiologischen Bilanzierung für die Bewertung der Auswirkungen von Innenräumen genutzt werden kann; für die zuverlässige Anwendung müssten diese Daten jedoch in gezielten Forschungen erarbeitet werden (z. B. stationäres Modell für die Schweißrate, individuelle spektrale Hellempfindlichkeit, Veränderung der Ventilationsrate und der CO₂-Produktion in Abhängigkeit vom Alter und der Aktivität, Veränderung der wahrgenommenen Lautheit mit zunehmendem Hörverlust).

Als weitere Limitation der raumphysiologischen Bilanz lässt sich das Fehlen einer Messstrategie in der Sachbilanz nennen. Es gilt eine Reihe von physikalischen Größen (Elementarströmen) zu messen; jedoch werden hierfür weder konkrete Messzeitpunkte noch die Anzahl und Platzierung der Messgeräte oder Sensoren genannt. Vielmehr soll sich der Studierender auf die anerkannten Regeln der Messtechnik beziehen und zudem ein Messprotokoll erstellen. Somit können möglicherweise falsche Messungen, insbesondere im Zusammenhang mit den berechneten und daraus resultierenden potentiellen Auswirkungen, bei der Auswertung der raumphysiologischen Bilanz vernachlässigt werden.

9.3 Einordnung in den Stand des Wissens

Die raumphysiologische Bilanz kann in den bestehenden Stand des Wissens sowohl bezüglich der berücksichtigten Auswirkungen, der Eingangsparameter als auch der individuellen Personenparameter eingeordnet werden.

Im Stand des Wissens werden die Auswirkungen der thermischen, der lufthygienischen, der visuellen und der akustischen Umgebung sowie die Auswirkungen des erweiterten Raumklimas stets auf schwer quantifizierbare, subjektive Begriffe bezogen. Die Bewertung dient in den meisten Fällen dem Komfort, der Zufriedenheit, der Akzeptanz oder gegebenenfalls der Produktivität. Der tatsächliche Zustand, in dem sich der Körper befindet, wird lediglich bei den thermophysiological Modellen berücksichtigt; hier wird jedoch kein umfassender Bezug zum Wohlbefinden des Menschen gemacht. Die Anwendung der

raumphysiologischen Bilanz kann dafür genutzt werden, ein vertieftes Verständnis für die Zusammenhänge zwischen der physiologischen Wahrnehmung und der psychologischen Bewertung des erweiterten Raumklimas zu schaffen. Zudem bietet der Ansatz der raumphysiologischen Bilanzierung die Möglichkeit, noch weitere Auswirkungen zu berücksichtigen, die sich aus den physiologischen Reaktionen des Körpers ergeben. Eine solche Betrachtung würde weit über die bisherigen Bewertungen der Auswirkungen von Innenräumen gehen.

Eine weitere Unterscheidung zum Stand des Wissens ergibt sich aus den berücksichtigten Eingangsparametern. Während im Stand des Wissens teilweise physikalische Größen (z. B. operative Temperatur) oder bauliche Parameter wie das Schalldämm-Maß (Bewertung der akustischen Umgebung) berücksichtigt werden, integriert die raumphysiologische Bilanz beide Arten an Eingangsgrößen. Neben den physikalisch messbaren Größen, welche durch die Elementarströme repräsentiert werden, werden zusätzlich sämtlich Umgebungs-, Gebäude- und Raumparameter erfasst und in einem Sachbilanzmodell den einzelnen Elementarströmen zugeordnet, sodass letztendlich der Einfluss jeder einzelnen Komponente der Öko- und der Technosphäre, die den Menschen umgibt, aber auch die daraus resultierenden Größen in der Bilanzierung erfasst werden.

Im Stand des Wissens wurden ebenfalls die personenbezogenen Einflüsse in Bezug auf die physiologischen, die physischen und die psychologischen Aspekte beschrieben. Diese werden im Stand des Wissens meistens nur unzureichend oder über die Anwendung von Standardwerten berücksichtigt. Die raumphysiologische Bilanzierung geht, insbesondere bei der Berücksichtigung der physiologischen Einflüsse, deutlich über den Stand des Wissens hinaus. Die Berücksichtigung der physischen Einflüsse beschränkt sich derzeit auf die Bekleidung, könnte jedoch bei entsprechend vorhandenen Daten beispielsweise auf das Tragen einer Brille oder eines Hörapparates ausgeweitet werden. Lediglich die psychologische Komponente wird nicht anhand eines umfassenden Fragebogens berücksichtigt. Für die beschriebenen Anwendungsszenarien reicht jedoch die subjektive Gewichtung der einzelnen Wirkungszonen aus, ohne dass sämtliche Komfort-, Zufriedenheits- und Akzeptanzaspekte des erweiterten Raumklimas einzeln abgefragt werden müssen.

Ein letzter Punkt des Stands des Wissens bezieht sich auf die Wechselwirkungen zwischen den bauphysikalischen Größen im Innenraum. Entsprechend dem Stand des Wissens können solche Wechselwirkungen nur durch die subjektive Bewertung, jedoch nicht durch physiologische Zusammenhänge belegt werden. Mit den gegebenen Datensätzen kann die raumphysiologische Bilanz ebenfalls keine Wechselwirkungen zwischen den Auswirkungen feststellen. Dass es diese Wechselwirkungen beispielsweise zwischen der thermischen und der lufthygienischen Wirkungskategorie aufgrund des Einflusses der metabolischen Rate in beiden Wirkungskategorien geben muss, lässt sich mit den Grundsätzen der raumphysiologischen Bilanzierung erahnen. Eine Quantifizierung, inwieweit sich diese Wirkungskategorien gegenseitig beeinflussen, lässt sich jedoch nicht abbilden.

Abschließend kann gesagt werden, dass der Stand des Wissens sowohl in Bezug auf die betrachteten Auswirkungen als auch auf die berücksichtigten Einflussparameter der Umgebung, des Gebäudes und des Raums sowie personenbezogene Aspekte erweitert wurde. Lediglich das Wissen über die Wechselwirkungen zwischen den Auswirkungen des erweiterten Raumklimas konnte nicht weiter ergänzt werden.

10 Fazit und Ausblick

Die zum jetzigen Zeitpunkt bestehende Lücke zwischen den normativen Anforderungen an das erweiterte Raumklima und den tatsächlichen Auswirkungen auf den Menschen führt zu Innenraumumgebungen, die lediglich von theoretischen Standardpersonen als komfortabel bewertet werden. Um diese Lücke zu schließen, kann zum einen auf das vorhandene bauphysikalische und zum anderen auf das vorhandene physiologische Wissen zurückgegriffen werden. Auf diesen Grundlagen basiert die raumphysiologische Bilanzierung. Hierbei geht es jedoch nicht ausschließlich um die Feststellung der Behaglichkeit einer Umgebung; vielmehr soll der Mensch in seinem physiologischen Zustand betrachtet werden, der durch eine bestimmte Umgebung ausgelöst wird. Das angestrebte Ziel soll es sein, dass sich die Menschen in Innenräumen in einem neutralen physiologischen Zustand befinden, in welchem der Körper nicht anhand eines sensorischen Regelkreises auf seine Umgebung reagieren muss. Wird dieser Zustand nicht erfüllt, kann es zu komfortrelevanten oder gesundheitsgefährdenden Auswirkungen für den Menschen kommen. Um den physiologischen Zustand des menschlichen Körpers, welcher sich aufgrund von unterschiedlichen Einflüssen ergibt, beurteilen zu können, wird eine Methode benötigt, die zum einen eine ganze Fülle an Einflüssen und zum anderen unterschiedlichste Auswirkungen anhand eines einheitlichen Vorgehens berücksichtigen kann. Ein derartiges methodisches Vorgehen wird ebenfalls in der Ökobilanzierung zur Bewertung der Auswirkungen von Produkten auf die Umwelt angewandt.

Aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Analogie werden die Grundsätze der Ökobilanzierung zur Erstellung der Methode der raumphysiologischen Bilanzierung verwendet. Dies hat den Vorteil, dass die drei Phasen der Beschreibung des Ziels und Untersuchungsrahmens, der Sachbilanz sowie der Wirkungsabschätzung anhand einer Reihe von normierten Definitionen ausführlich beschrieben werden und nachvollziehbar sind. Ausgehend von diesen Begriffen ist es möglich, sämtliche Definitionen für die Anwendung in der raumphysiologischen Bilanzierung neu zu beschreiben. Trotz dieser neuen Beschreibungen bleiben die in der Fachwelt bekannten methodischen Grundsätze der Ökobilanzierung erhalten.

In einem ersten Schritt werden somit das Ziel und der Untersuchungsrahmen der raumphysiologischen Bilanz beschrieben. Das Ziel definiert, welche Fragen die Studie beantworten soll und für wen diese durchgeführt wird. Im Untersuchungsrahmen werden unter anderem die funktionelle Einheit, welche das Gebäude beschreibt, der Referenzraum, welcher sich aus dem Referenzfluss der Ökobilanzierung ableitet, die Systemgrenzen, die zu berücksichtigenden Wirkungskategorien, die Person, auf die sich die Bilanz bezieht sowie mögliche vereinfachte Annahmen und Einschränkungen beschrieben. Ausgehend von der Beschreibung des Untersuchungsrahmens kann für jeden Referenzraum und für jede Person eine Sachbilanz erstellt werden. Durch die Differenzierung zwischen dem äußeren und dem inneren Hintergrundsystem sowie den Level-0- und den Level-1-Parametern des Vordergrundsystems können sämtliche innerhalb der Systemgrenzen liegenden Einflüsse für die bauphysikalischen Größen, die letztendlich das erweiterte Raumklima schaffen, erfasst werden. Diese ermöglichen eine Zuordnung zu den definierten Elementarströmen, die als Eingangsgrößen für die Wirkungsabschätzung dienen. Neben diesen Parametern werden zusätzlich individuelle Personenparameter (Vordergrundsystem Level 2)

erfasst. Selbst wenn sich diese je nach Anwendungsszenario auf eine im Untersuchungsrahmen definierte Standardperson beziehen, sind diese dennoch der jeweiligen Betrachtungssituation angepasst und weisen somit eine größere Individualität auf als die Standardpersonen, die in den im Stand des Wissens beschriebenen Normen erfasst werden. Zusätzlich werden die übergeordneten Level-3-Parameter erfasst, die ergänzende Informationen liefern können.

Durch die Erstellung einer derart umfassenden Sachbilanz können konkrete Zusammenhänge zwischen einzelnen Umgebungs-, Gebäude- oder Raumparametern und den im Raum entstehenden bauphysikalischen Größen (Elementarströme) hergestellt und in einem Sachbilanzmodell abgebildet werden. Ausgehend vom Sachbilanzergebnis, welches in tabellarischer Form im Bericht der raumphysiologischen Bilanz festzuhalten ist, kann die Wirkungsabschätzung durchgeführt werden. Diese erfolgt für die im Untersuchungsrahmen definierten Wirkungskategorien. Dabei kann zwischen den vier Wirkungskategorien thermische Umgebung, lufthygienische Umgebung, visuelle Umgebung und akustische Umgebung unterschieden werden. Bislang wurden somit vier Wirkungskategorien beschrieben, die die wichtigsten Einflüsse des erweiterten Raumklimas berücksichtigen. Durch die Anwendung der Wirkungsmechanismen lassen sich die Elementarströme potentiellen physiologischen Auswirkungen auf den Nutzer zuordnen. Diese Ergebnisse ermöglichen nicht nur den Vergleich von unterschiedlichen Referenzräumen für eine definierte Standardperson, sondern zusätzlich die Optimierung einzelner Referenzräume für die konkreten Nutzer. Eine derartige Optimierung kann zur Schaffung einer Umgebung führen, die mit allen Sinnen wahrgenommen werden kann und zu keiner physiologischen Reaktion des Körpers führt.

Es konnte bewiesen werden, dass anhand des vorhandenen bauphysikalischen und physiologischen Wissens unter der Anwendung der Grundsätze der Methode der Ökobilanzierung die raumphysiologischen Auswirkungen für jegliche Räume in Gebäuden und jegliche Personen bestimmt werden können. Die Ökobilanzierung und die raumphysiologische Bilanz unterscheiden sich jedoch bezüglich des Lebenszyklusansatzes, der in der Ökobilanzierung verfolgt wird. Bei der raumphysiologischen Bilanz handelt es sich um eine quasi-stationäre Momentaufnahme. Zudem bestehen derzeit die im Kapitel 9 beschriebenen Limitationen, auf welchen der Ausblick aufbaut.

Hierbei handelt es sich zum einen um die fehlenden Daten zur Beschreibung der physiologischen Vorgänge im Körper und zum anderen um die fehlende Messstrategie zur Bestimmung der Elementarströme im Referenzraum. In Bezug auf die fehlenden Daten müssen in Zukunft gezielte Studien durchgeführt werden, die die exakte Vorhersage der für die Wirkungsmechanismen benötigten Daten ermöglichen. Eine konkrete Messstrategie lässt sich erst dann entwickeln, wenn die Methode in realen Referenzräumen angewandt wird. Durch die vermehrte Anwendung kann festgestellt werden, welche Positionen für das Anbringen der Messsensoren im Raum am sinnvollsten sind. Zudem kann ebenfalls nur durch die Anwendung ein Zeitraffer definiert werden, in welchem die Elementarströme zu erfassen sind. Eine solche Messstrategie lässt sich bei einer theoretischen Herleitung der Methode nicht mit ausreichend Sicherheit definieren, weswegen in der vorliegenden Arbeit auf die Beschreibung einer solchen Strategie verzichtet wurde. Die fehlende Messstrategie führt ebenfalls zu einem weiteren Ausblick in Bezug auf die Anwendung der Methode. Derzeit wurde die raumphysiologische Bilanzierung lediglich für bestehende Gebäude hergeleitet. Neben dieser Anwendung wäre jedoch eine Anwendung in der Planungsphase von

Gebäuden sowohl für die Bauherren als auch für die letztendlichen Nutzer von großer Bedeutung. Durch die Anwendung in der Planungsphase können die Referenzräume von Gebäuden gezielt auf die späteren Nutzer ausgelegt werden. Diese Anwendung ist jedoch erst möglich, wenn sowohl die Sachbilanz als auch die Wirkungsabschätzung in einem Simulationstool verwendet werden können. In einem solchen Tool könnten dann ebenfalls Sensitivitätsanalysen und detaillierte Analysen der Neutralität durch Veränderung jedes einzelnen Parameters der Sachbilanz durchgeführt werden. Hierfür wird jedoch nicht nur eine Simulation der bauphysikalischen Aspekte, sondern zusätzlich der physiologischen Aspekte benötigt. Eine solche Simulationssoftware steht zum jetzigen Zeitpunkt nicht zur Verfügung.

Überdies kann durch die konkrete Anwendung sowohl in Bestandsgebäuden als auch bei Gebäuden in der Planung eine Datenbank geschaffen werden, die als Grundlage für zukünftige normative Vorgaben Anwendung finden könnte. Bei dieser Datenbank handelt es sich um die Ergebnisse von raumphysiologischen Bilanzierungen, die für bestimmte Personengruppen ein Muster erkennen lassen. Entsprechende Daten können die Standardpersonen, auf welche sich die bisherigen normativen Vorgaben beziehen, ersetzen. Zusätzlich können diese Daten genutzt werden, um beispielsweise zur Bewertung der Auswirkungen der visuellen Umgebung nicht mehr nur auf definierte Beleuchtungsstärken oder Blendungsbegrenzungen zurückzugreifen, sondern einen konkreten Zusammenhang zum Menschen, um den es letztendlich geht, herzustellen.

Weitere Ergänzungen der raumphysiologischen Bilanzierung können zusätzliche Wirkungsindikatoren in den vorhandenen Wirkungskategorien oder weitere, bislang nicht berücksichtigte Wirkungskategorien umfassen. Zusätzlich wurde die raumphysiologische Bilanzierung in der vorliegenden Arbeit lediglich für Innenräume in Gebäuden hergeleitet; eine Anwendung für jegliche anderen Innenräume (z. B. Auto oder Flugzeug) ist jedoch vorstellbar. Durch eine ähnliche Analogiebetrachtung, wie sie in der vorliegenden Arbeit angewandt wurde, können sowohl die Sachbilanz als auch die Wirkungsabschätzung an die Anwendung in anderen Innenräumen angepasst werden.

Zu guter Letzt können die Ergebnisse der raumphysiologischen Bilanzierung als dritte Säule der Nachhaltigkeit in der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden implementiert werden. Hierbei würde es sich um ein einheitliches Verfahren handeln, welches die soziale Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden einen wesentlichen Schritt vorantreibt. Insbesondere unter dem Gesichtspunkt, dass die Ökobilanzierung zur Bewertung der ökologischen Qualität von Gebäuden genutzt wird, erscheint es sinnvoll, eine ähnlich aufgebaute Methode, somit die raumphysiologische Bilanzierung, zur einheitlichen Bewertung der sozialen Nachhaltigkeit zu nutzen.

Literaturverzeichnis

- Abdel-Rahman, F., Okeremgbo, B., Alhamadah, F., Jamadar, S., Anthony, K., Saleh, M. A. (2017). *Caenorhabditis elegans* as a model to study the impact of exposure to light emitting diode (LED) domestic lighting. *Journal of environmental science and health, Part A, Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 52(5), 433 – 439.
- Adeva-Andany, M. M., Carneiro-Freire, N., Donapetry-Garcia, C., Ranal-Muino, E., Lopez-Pereiro, Y. (2014). The Importance of the Ionic Product for Water to Understand the Physiology of the Acid-Base Balance in Humans. *BioMed Research International*, 2014, 695281.
- Akanmu, W. P., Nunayon, S. S., Eboson, U. C. (2021). Indoor environmental quality (IEQ) assessment of Nigerian university libraries: A pilot study. *Energy and Build Environment*, 2(3), 302 – 314.
- Ala-Juusela, M., Shukuya, M. (2014). Human body exergy consumption and thermal comfort of an office worker in typical and extreme weather conditions in Finland. *Energy and Buildings*, 76, 249 – 257.
- Albers, J. (2015). *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte*. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH.
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., Spengler, J. D. (2016). Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environmental Health Perspectives*, 124(6), 805 – 812.
- Altomonte, S., Allen, J., Bluysen, P. M., Brager, G., Heschong, L., Loder A., ... & Wargocki, P. (2020). Ten questions concerning well-being in the built environment. *Building and Environment*, 180, 106949.
- Alvarsson, J. J., Wiens, S., Nilsson, M. E. (2010). Stress Recovery during Exposure to Nature Sound and Environmental Noise. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(3), 1036 – 1046.
- Amrhein, L. (2013). Die soziale Konstruktion von „Hochaltrigkeit“ in einer jungen Altersgesellschaft. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 46, 10 – 15.
- Andargie, M. S., Azar, E. (2019). An applied framework to evaluate the impact of indoor office environmental factors on occupants' comfort and working conditions. *Sustainable Cities and Society*, 46(2019), 101447.
- Andersen, M., Kleindienst, S., Yi, L., Lee, J., Bodart, M., Cutler, B. (2008). An intuitive daylighting performance analysis and optimization approach. *Building Research and Information*, 36(6), 593 – 607.
- Anderson, G. S. (1999). Human morphology and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 43(1999), 99 – 109.
- Arens, E. A., Zhang, H. (2006). The skin's role in human thermoregulation and comfort. In N. Pan, P. Gibson (Hrsg.): *Thermal and moisture transport in fibrous materials*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Aries, M. B. C., Veitch, J. A., Newsham, G. R. (2010). Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology*, 30(4), 533 – 541.
- Artigas, J. M., Felipe, A., Navea, A., Fandino, A., Artigas, C. (2012). Spectral transmission of the human crystalline lens in adult and elderly persons: color and total transmission of visible light. *Investigative ophthalmology & visual science*, 53(7), 4076 – 4084.
- Asano, Y. (2015). *Individual Colorimetric Observers for Personalized Color Imaging*. Dissertation: Rochester Institute of Technology.

- Aschoff, J. (1957). Wärmeaustausch in einer Modellextremität. *Pflügers Archiv*, Bd. 264, 260 – 271.
- ASHRAE (2017). *ASHRAE Handbook – Fundamentals: Chapter 9, Thermal Comfort*. American Society for Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- Asmussen, E., Nielsen, M. (1957). Physiological Dead Space and Alveolar Gas Pressure at Rest and during Muscular Exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 38(1), 1 – 21.
- Association Suisse des Electriciens (1989). *Eclairage intérieur par la lumière du jour*. Zürich: Association Suisse des Electriciens.
- Ayr, U., Cirillo, E., Martellotta, F. (2002). Further investigations of a new parameter to assess noise annoyance in air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 34(8), 765 – 774.
- Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., Osawa, H. (2018). Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment International*, 121(Part 1), 51 – 56.
- Babisch, W., Wölke, G., Heinrich, J., Straff, W. (2014). Road traffic noise and hypertension – Accounting for the location of rooms. *Environmental Research*, 133(2014), 380 – 387.
- Bae, S., Asojo, A. O., Martin, C. S. (2020). Impact of occupants' demographics on indoor environmental quality satisfaction in the workplace. *Building Research and Information*, 48(3), 301- 315.
- Bai, J. C. (2009). *Ernährung, Ernährungs- und Gesundheitszustand von Altenheimbewohnern – eine deutschlandweite Multicenterstudie*. Inaugural-Dissertation: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität.
- Bakke, J. V., Moen, B. E., Wieslander, G., Norbäck, D. (2007). Gender and the physical and psychosocial work environments are related to indoor air symptoms. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 49(6), 641 – 650.
- Balazova, I., Clausen, G., Wyon, D. P. (2007). The influence of exposure to multiple indoor environmental parameters on human perception, performance and motivation. *Proceedings CLIMA 2007 – Wellbeing Indoors*, 10.- 14. Juni, Helsinki, Finnland.
- Barbur, J. L., Stockman, A. (2010). Photopic, Mesopic and Scotopic Vision and Changes in Visual Performance. In R. Dana, D. A. Dartt, J. C. Besharse, J. C. (Hrsg.): *Encyclopedia of the Eye*. Oxford, San Diego: Academic Press, Elsevier Ltd.
- Barten, P. G. J. (1999). *Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality*. Dissertation: Technische Universität Eindhoven. Washington: The International Society for Optical Engineering.
- Baumgarte, F. (2000). Ein physiologisches Gehörmodell zur Nachbildung von Wahrnehmungsschwellen für die Audiocodierung. Dissertation: Universität Hannover.
- Bear, M. F., Connors, B.W., Paradiso, M. A. (2018). *Neurowissenschaften: Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Physiologie*. Berlin: Springer Verlag, Springer Nature.
- Becker, R., Paciuk, M. (2009). Thermal comfort in residential buildings – Failure to predict by Standard model. *Building and Environment*, 44(5), 948 – 960.
- Bejan, A.-S., Catalina, T., Munteanu, A. T. (2017). Indoor environmental quality experimental studies in an energy-efficient building. Case study: EFdeN Project. *Energy Procedia*, 112(2017), 269 – 276.
- Bell, P. A., Fisher, J. D., Baum, A., Greene, T. E. (1990). *Environmental psychology*. Fort Worth: Holt, Rinehart and Winston.
- Bellia, L., d'Ambrosio Alfano, F. R., Fragliasso, F., Palella, B. I., Riccio, G. (2021). On the interaction between lighting and thermal comfort: An integrated approach to IEQ. *Energy and Buildings*, 231(2021), 110570.

- Belmonte, C., Viana, F. (2008). Molecular and cellular limits to somatosensory specificity. *Molecular Pain*, 4(14).
- Bentler, R. A., Cooley, L. J. (2001). An Examination of Several Characteristics that Affect the Prediction of OSPL90 in Hearing Aids. *Ear and Hearing*, 22(1), 58 – 64.
- Beranek, L. L. (1956). Criteria for office quieting based on questionnaire rating studies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 28(5), 833 – 852.
- Beranek, L., L. (1989). Balanced noise criterion (NCB) curves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86(2), 650 – 664.
- Berendschot, T. T. J. M., Broekmans, W. M. R., Klöpping-Ketelaars, I. A. A., Kardinaal, A. F. M., van Poppel, G., van Norren, D. (2002). Lens Aging in Relation to Nutritional Determinants and Possible Risk Factors for Age-Related Cataract. *Archives of Ophthalmology*, 120(12), 1732 – 1737.
- Berglund, B., Lindvall, T., Schwela, D. H. (1999). *Guidelines for community noise*. Genf: Weltgesundheitsorganisation.
- Berglund, L. G., Cain, W. S. (1989). Perceived air quality and the thermal environment. In: *The Human Equation: Health and Comfort proceedings IAQ 89*, 93 – 99.
- Berson, D. M. (2003). Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors. *Trends in Neurosciences*, 26(6), 314 – 320.
- Berson, D. M. (2007). Phototransduction in ganglion-cell photoreceptors. *Pflügers Archiv – European Journal of Physiology*, 454(5), 849 – 855.
- Berson, D. M., Dunn, F. A., Takao, M. (2002). Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. *Science*, 295(5557), 1070 – 1073.
- Beshir, M. Y., Ramsey, J. D. (1981). Comparison between male and female subjective estimates of thermal effects and sensations. *Applied Ergonomics*, 12(1), 29 – 33.
- BfGA Beratungsgesellschaft für Arbeits- und Gesundheitsschutz (2022). Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) – Definition. [https://www.bfga.de/arbeitschutz-lexikon-von-a-bis-z/fachbegriffe-a-b/agw-fachbegriff/\[30.04.2022\]](https://www.bfga.de/arbeitschutz-lexikon-von-a-bis-z/fachbegriffe-a-b/agw-fachbegriff/[30.04.2022])
- Bierwirth, P. N. (2021). *Carbon dioxide toxicity and climate change: a major unapprehended risk for human health*. Web Paper, Australian National University.
- Binsfeld, C. (2018). *Thermische Behaglichkeit im automatisierten Wohnraum – Bestimmung einer behaglichen Raumlufttemperatur in Abhängigkeit der individuellen Bekleidung und Aktivität*. Unveröffentlichte Masterarbeit: Technische Universität München.
- Bischoff, T. L. W., Voit, C. (1860). *Die Gesetze der Ernährung des Fleischfressers durch neue Untersuchungen festgestellt*. Leipzig und Heidelberg: C. F. Winter'sche Verlagshandlung.
- Bjorn, A., Moltesen, A., Laurent, A., Owsianiak, M., Corona, A., Birkved, M., Hauschild, M. Z. (2018b). Life Cycle Inventory Analysis. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum & S. I. Olsen (Hrsg): *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing.
- Bjorn, A., Owsianiak, M., Laurent, A., Olsen, S. I., Corona, A., Hauschild, M. Z. (2018a). Scope Definition. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum & S. I. Olsen (Hrsg): *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing.
- Blackie, C. A., Howland, H. C. (1999). An extension of an accommodation and convergence model of emmetropization to include the effects of illumination intensity. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 19(2), 112 – 125.

- Bludau, C., Künzel, H. M. (2010). Wärmeschutz. In K. Sedlbauer, E. Schnuck, R. Barthel, H. M. Künzel (Hrsg.): *Flachdach Atlas: Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Bluyssen, P. M. (2014b). What do we need to be able to (re)design healthy and comfortable indoor environments? *Intelligent Buildings International*, 6(2), 69 – 92.
- Bluyssen, P. M. (2020). Towards an integrated analysis of the indoor environmental factors and its effects on occupants. *Intelligent Buildings International*. 12(3), 199 – 207.
- Bluyssen, P. M., Kim, D., H., Eijkelenboom, A., Ortiz-Sanchez, M. (2020). Workshop with 335 primary school children in The Netherlands: What is needed to improve the IEQ in their classrooms. *Building and Environment*, 168 (2020), 106486.
- Bluyssen, P. M. (2009). *The Indoor Environment Handbook: How to make buildings healthy and comfortable*. London, Sterling: Earthscan.
- Bluyssen, P. M. (2010). Towards new methods and ways to create healthy and comfortable buildings. *Building and Environment*, 45(4), 808 – 818.
- Bluyssen, P. M. (2014a). *The healthy indoor environment: How to assess occupants' wellbeing in buildings*. New York, Oxon: Routledge.
- Bodlund, K. (1985). Alternative reference curves for evaluation of the impact sound insulation between dwellings. *Journal of Sound and Vibration*, 102(3), 381 – 402.
- Bonfig, P. (2015). Lösungsprinzipien für regelbare Öffnungen. In J. Cremers (Hrsg.): *Atlas Gebäudeöffnungen: Fenster, Lüftungselemente und Außentüren*. München: Institut für Internationale Architekturdokumentation.
- Boyce, P. R. (2014). *Human Factors in Lighting*. Boca Raton: CRC Press.
- Bradley, J. S. (1986). Acoustical measurements in some Canadian homes. *Canadian Acoustics*, 14(4), 19 – 25.
- Bradley, J. S. (2001). Deriving acceptable values for party wall insulation from survey results. *The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, 27. – 30. August, The Hague, The Netherlands.
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E., Rollag, M. D. (2001). Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *The Journal of Neuroscience*, 21(16), 6405 – 6412.
- Branco, P. T. B. S., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., Sousa, S. I. V. (2014). Indoor air quality in urban nurseries at Porto City: Particulate matter assessment. *Atmospheric Environment*, 84(2014), 133 – 143.
- Brand, T., Hohmann, V. (2002). An adaptive procedure for categorical loudness scaling. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(4), 1597 – 1604.
- Bredberg, G. (1968). Cellular pattern and nerve supply of the human organ of Corti. *Acta Oto-Laryngologica*, 65 (sup236), 1 – 135.
- Brody, B. (2021). Hypercapnia (Hypercarbia). <https://www.webmd.com/lung/copd/hypercapnia-copd-related> [09.07.2021]
- Brotrück, T. (2007). *Basics Konstruktion: Dach Konstruktion*. Basel: Birkhäuser.
- Bünning, E. (1936). Die endonome Tagesrhythmik als Grundlage der photoperiodischen Reaktion. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 54(10), 590 – 607.
- Burton, A. C., Edholm, O. G. (1955). *Man in a cold environment: Physiological and Pathological Effects of Exposure to Low Temperatures*. London: Edward Arnold Publishers.

- Burton, R.F. (1978). Intracellular Buffering. *Respiration Physiology*, 33(1), 51 – 58.
- Buscher, H.- P. (2021). Hyperkapnie. <https://www.medicoconsult.de/hyperkapnie/> [09.07.2021]
- Buse, M., Werner, J. (1985). Heat balance of the human body: Influence of variations of locally distributed parameters. *Journal of Theoretical Biology*, 114(1), 34 – 51.
- Caddick, Z. A., Gregory, K., Arsintescu, L., Flynn-Evans, E. E. (2018). A review of the environmental parameters necessary for an optimal sleep environment. *Building and Environment*, 132(2018), 11 – 20.
- Cagnacci, A., Kräuchi, K., Wirz-Justice, A., Volpe, A. (1997). Homeostatic versus Circadian Effects of Melatonin on Core Body Temperature in Humans. *Journal of Biological Rhythms*, 12(6), 509 – 517.
- Cagnacci, A., Soldani, R., Yen, S. S. C. (1997). Contemporaneous melatonin administration modifies the circadian response to nocturnal bright light stimuli. *American Journal of Physiology*, 272(2), R482 – R486.
- Caliskan, H. (2013). Energetic and exergetic comparison of the human body for the summer season. *Energy Conversion and Management*, 76(2013), 169 – 176.
- Cambridge Academic Content Dictionary (2009). New York: Cambridge University Press.
- Campbell, I. (2008). Body temperature and its regulation. *Anesthesia and Intensive Care Medicine*, 9(6), 259 – 263.
- Cao, B., Ouyang, Q., Zhu, Y., Huang, L., Hu, H., Deng, G. (2012). Development of a multivariate regression model for overall satisfaction in public buildings based on field studies in Beijing and Shanghai. *Building and Environment*, 47(2012), 394 – 399.
- Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., Paglino, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47(2015), 1016 – 1033.
- Castanet, S. (1998). *Contribution à l'étude de la ventilation et de la qualité de l'air intérieur des locaux*. Dissertation: Institut National des Sciences Appliquées (INSA).
- Cena, K., Dear, R. J. de (1999). Field Study of occupant thermal comfort and office thermal environments in a hot, arid climate. *ASHRAE Transactions*, 105(2), 204 – 217.
- CGPM (1979). *Comptes Rendus des Séances de la 16^e Conférence Générale des Poids et Mesures*. Paris. Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France.
- Chalupper, J. (2008). Calculation of Loudness for Normal and Hearing-Impaired Listeners. In D. Havelock, S. Kuwano, M. Vorländer (Hrsg.): *Handbook of Signal Processing in Acoustics: Volume 1*. New York: Springer Science + Business Media, LLC.
- Chang, T.-Y., Liu, C.-S., Young, L.-H., Wang, V.-S., Jian, S.-E., Bao, B.-Y. (2012). Noise frequency components and the prevalence of hypertension in workers. *Science of the Total Environment*, 416(2012), 89 – 96.
- Chauvel, P., Collins, J. B., Dogniaux, R., Longmore, J. (1982). Glare from windows: current views of the problem. *Lighting Research and Technology*, 14(1), 31 – 46.
- Chellappa, S. L., Steiner, R., Oelhafen, P., Cajochen, C. (2017). Sex differences in light sensitivity impact on brightness perception, vigilant attention and sleep in humans. *Scientific Reports*, 7(2017), 14215.
- Chen, Z., Hu, G., Glasberg, B. R., Moore, B. C. J. (2011). A new model for calculating auditory excitation patterns and loudness for cases of cochlear hearing loss. *Hearing Research*, 282 (1 - 2), 69 – 80.

- Cheng, Z., Lei, N., Bu, Z., Sun, H., Li, B., Lin, B. (2022). Investigations of indoor air quality for office buildings in different climate zones of China by subjective survey and field measurement. *Building and Environment*, 214(2022), 108899.
- Cherniack, N. S., Altose, M. D. (2006). Chemoreceptors: Central. In J. L. Geoffrey & S. D. Shapiro (Hrsg.): *Encyclopedia of Respiratory Medicine*. Elsevier Ltd.
- Cheung, T., Graham, L. T., Schiavon, S. (2022). Impacts of life satisfaction, job satisfaction and the Big Five personality traits on satisfaction with the indoor environment. *Building and Environment*, 212(2022), 108783.
- Cheung, T., Schiavon, S., Graham, L. T., Tham, K. W. (2021). Occupant satisfaction with the indoor environment in seven commercial buildings in Singapore. *Building and Environment*, 188 (2021), 107443.
- Chiang, C. M., Chou, P. C., Lai, C. M., Li, Y. Y. (2001). A methodology to assess the indoor environment in care centers for senior citizens. *Building and Environment*, 36(2001), 561 – 568.
- Chiang, C.-M., Lai, C.-M. (2002). A study on the comprehensive indicator of indoor environment assessment for occupants' health in Taiwan. *Building and Environment*, 37(2002), 387 – 392.
- Chinazzo, G., Pastore, L., Wienold, J., Andersen, M. (2018). A field study investigation on the influence of light level on subjective thermal perception in different seasons. *Proceedings of the 10th Windsor Conference: Rethinking Comfort*. Windsor, 12. – 15. April 2018.
- Chittka, L., Brockmann, A. (2005). Perception Space – The Final Frontier. *PLoS Biology*, 3(4): e137.
- Choi, J.-H., Aziz, A., Loftness, V. (2009). Decision support for improving occupant environmental satisfaction in office buildings: The relationship between sub-set of IEQ satisfaction and overall environmental satisfaction. *Proceedings of the 9th International Conference Healthy Buildings*, Syracuse, New York.
- Choi, J.-H., Aziz, A., Loftness, V. (2010). Investigation on the impacts of different genders and ages on satisfaction with thermal environments in office buildings. *Building and Environment*, 45(2010), 1529-1535.
- Churchill, W. (1943). House of commons rebuilding. HC Deb 28. Oktober, 393, cc 403 – 473.
- CIE, Commission internationale de l'éclairage (1951). Proceedings. Vol. 1. Sec. 4; Vol 3. Paris: Bureau Central de la CIE.
- CIE, Commission internationale de l'éclairage (2005). *Technical Report: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1*. Wien: CIE Central Bureau.
- Cirincione, L., Macaluso, R., Mosca, M., Scaccianoce, G., Costanzo, S. (2018). Study of Influence of the LED Technologies on Visual and Subjective/Individual Aspects. *International Conference on Environment and Electrical Engineering and Industrial and Commercial Power Systems Europe*, 1-5.
- Claudi, L., Arnesano, M., Chiaritto, P., Battista, G., Revel, G. M. (2019). A soft-sensing approach for the evaluation of acoustic comfort due to building envelope protection against external noise. *Measurement*, 146(2019), 675 – 688.
- Clausen, G., Carrick, L., Fanger, P. O., Kim, S. W., Poulsen, T., Rindel, J. H. (1993). A Comparative Study of Discomfort caused by Indoor Air Pollution, Thermal Load and Noise. *Indoor Air*, 3(4), 255 – 262.
- Clauss, W, Clauss, C. (2018). *Humanbiologie kompakt*. Berlin: Springer Verlag, Springer Spektrum.
- Cohen, R., Standeven, M., Bordass, B., Leaman, A. (2001). Assessing building performance in use 1: the Probe process. *Building Research & Information*, 29(2), 85 – 102.
- Collins, B. L., Fisher, W., Gillette, G., Marans, R. W. (1990). Second-Level Post-Occupancy Evaluation Analysis. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 19(2), 21 – 44.

- Crawford, B. H. (1936). The Dependence of Pupil Size upon External Light Stimulus under Static and Variable Conditions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 121 (823), 376 – 395.
- Crawford, B. H. (1949). The Scotopic Visibility Function. *Proceedings of the Physical Society, Section B*, 62(5), 321 – 334.
- Dai, X., Liu, J., Zhang, X. Chen, W. (2019). An artificial neural network model using outdoor environmental parameters and residential building characteristics for predicting nighttime natural ventilation effect. *Building and Environment*, 159(Complete), 106139.
- Danza, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Belussi, L., Devitofrancesco, A., Ghellere, M., ...& Scrosati, C. (2020). A weighting procedure to analyse the Indoor Environmental Quality of a Zero-Energy Building. *Building and Environment*, 183(2020), 107155.
- Davis, W., Ohno, Y. (2010). Color quality scale. *Optical Engineering*, 49(3), 033602.
- Davoodi, F., Hassanzadeh, H., Zolfaghari, S. A., Havenith, G., Maerefat, M. (2018). A new individualized thermoregulatory bio-heat model for evaluating the effects of personal characteristics on human body thermal response. *Building and Environment*, 136(2018), 62 – 76.
- Dear, R. J. de, Arens, E., Zhang, H., Oguro, M. (1997). Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. *International Journal of Biometeorology*, 40(3), 141 – 156.
- Dear, R. J. de, Fountain, M. E. (1994). Field experiments on occupant comfort and office thermal environments in a hot-humid climate. *ASHRAE Transactions: Research*, 100(2), 457 – 474.
- Dear, R. J. de, Brager, G. Cooper, D. (1997). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. In University of Sydney, Faculty of Architecture, Design & Planning (Ed.), *Final Report on ASHRAE Research Project 884*.
- Dear, R. J. de, Xiong, J., Kim, J., Cao, B. (2020). A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy and Buildings*, 214(2020), 109893.
- Della Crociata, S., Simone, A., Martellotta, F. (2013). Acoustic comfort evaluation for hypermarket workers. *Building and Environment*, 59(2013), 369 – 378.
- Deutsches Universalwörterbuch (2011). Mannheim, Zürich: Dudenverlag.
- Dhaka, A., Viswanath, V., Patapoutian, A. (2006). TRP Ion Channels and Temperature Sensation. *The Annual Review of Neuroscience*. 29. 135 – 161.
- DIN 18005 (2022). *Schallschutz im Städtebau – Grundlagen und Hinweise für die Planung*.
- DIN 18041 (2016). *Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*.
- DIN 1946-6 (2019). *Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung*.
- DIN 2330 (2013). *Begriffe und Benennungen – Allgemeine Grundsätze*. Berlin: Deutsches Institut für Normung.
- DIN 33403-3 (2011). *Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung – Teil 3: Beurteilung des Klimas im Warm- und Hitzebereich auf der Grundlage ausgewählter Klimasummenmaße*.
- DIN 4108 Beiblatt 2 (2019). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Beiblatt 2: Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele, mit CD-ROM*.
- DIN 4108-2 (2013). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*.

- DIN 4108-4 (2020). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.*
- DIN 4108-7 (2011). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele.*
- DIN 4109-1 (2018). *Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen.*
- DIN 4109-2 (2018). *Schallschutz im Hochbau – Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen.*
- DIN 5031 – Teil 3 (1982). *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik.* Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 5034-1 (2021). *Tageslicht in Innenräumen – Teil 1: Begriffe und Mindestanforderungen.*
- DIN 5035-3 (2006). *Beleuchtung mit künstlichem Licht – Teil 3: Beleuchtung im Gesundheitswesen.*
- DIN CEN ISO/TR 52022-2 (2018). *Energieeffizienz von Gebäuden – Wärmetechnische, solare und tageslichtbezogene Eigenschaften von Bauteilen und Bauelementen – Teil 2: Erklärungen und Begründungen (ISO/TR 52022-2:2017); Deutsche Fassung CEN ISO/TR 52022-2:2017.*
- DIN EN 12193 (2019). *Licht und Beleuchtung – Sportstättenbeleuchtung; Deutsche Fassung EN 12193:2018.*
- DIN EN 12354-6 (2004). *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 6: Schallabsorption in Räumen; Deutsche Fassung EN 12352-6:2003.*
- DIN EN 12464-1 (2021). *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2021.*
- DIN EN 12665 (2018). *Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung; Deutsche Fassung EN 12665:2018.*
- DIN EN 14351-2 (2019). *Fenster und Türen – Produktnorm, Leistungseigenschaften – Teil 2: Innentüren; Deutsche Fassung EN 14351-2:2018.*
- DIN EN 14500 (2021). *Abschlüsse – Thermischer und visueller Komfort – Prüf- und Berechnungsverfahren; Deutsche Fassung EN 14500:2021.*
- DIN EN 14501 (2021). *Abschlüsse – Thermischer und visueller Komfort – Leistungsanforderungen und Klassifizierung; Deutsche Fassung EN 14501:2021.*
- DIN EN 15665 (2009). *Lüftung von Gebäuden – Bestimmung von Leistungskriterien für Lüftungssysteme in Wohngebäuden; Deutsche Fassung En 15665:2009.*
- DIN EN 16798-1 (2022). *Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäude – Teil 1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019.*
- DIN EN 16798-3 (2017). *Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4); Deutsche Fassung EN 16798-3:2017.*
- DIN EN 17037 (2019). *Tageslicht in Gebäuden; Deutsche Fassung EN 17037:2018.*
- DIN EN 410 (2011). *Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Deutsche Fassung EN 410:2011.*

- DIN EN ISO 10077-1 (2020). *Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 1: Allgemeines (ISO10077-1:2017, korrigierte Fassung 2020-02); Deutsche Fassung EN ISO 10077-1:2017.*
- DIN EN ISO 10077-2 (2020). *Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO10077-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 10077-2:2017.*
- DIN EN ISO 10456 (2010). *Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007 + Cor. 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10456:2007 + AC:2009.*
- DIN EN ISO 10551 (2020). *Ergonomie des Umgebungsklimas – Subjektive Bewertungsskalen für die Beurteilung der physikalischen Umgebung (ISO 10551:2019); Deutsche Fassung EN ISO 10551:2019.*
- DIN EN ISO 14040 (2021). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020). Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020.*
- DIN EN ISO 14044 (2021). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020.*
- DIN EN ISO 16283-1 (2018). *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 1: Luftschalldämmung (ISO 16283-1:2014 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 16283-1:2014 + A1:2017.*
- DIN EN ISO 16283-2 (2020). *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 2: Trittschalldämmung (ISO 16283-2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 16283-2:2020.*
- DIN EN ISO 16283-3 (2016). *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 3: Fassadenschalldämmung (ISO 16283-3:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16283-3:2016.*
- DIN EN ISO 3382-2 (2008). *Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (ISO 3382-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 3382-2:2008.*
- DIN EN ISO 6946 (2018). *Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017.*
- DIN EN ISO 7730 (2006). *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV – und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.*
- DIN EN ISO 7933 (2018). *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung. (ISO/DIS 7933:2018); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 7933:2018. Berlin: Deutsches Institut für Normung.*
- DIN EN ISO 8996 (2005). *Ergonomie der thermischen Umgebung – Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes (ISO/DIS 8996:2004); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 8996:2004. Berlin: Deutsches Institut für Normung.*
- DIN EN ISO 9920 (2009). *Ergonomie der thermischen Umgebung – Abschätzung der Wärmeisolation und des Verdunstungswiderstandes einer Bekleidungskombination (ISO 9920:2007, Korrigierte Fassung 2008-11-01); Deutsche Fassung EN ISO 9920:2009. Berlin: Deutsches Institut für Normung.*
- DIN EN ISO 9972 (2018). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972:2015); Deutsche Fassung EN ISO 9972:2015.*

- DIN ISO 12913-1 (2018). *Akustik – Soundscape – Teil 1: Definition und Rahmenkonzept (ISO 12913-1:2014)*.
- DIN ISO 16832 (2007). *Akustik – Lautheitsskalierung mit Hilfe von Kategorien (ISO 16832:2006)*. Berlin: Deutsches Institut für Normung.
- DIN ISO 226 (2006). *Akustik – Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003)*. Berlin: Deutsches Institut für Normung.
- DIN/TS 5031-100 (2021). *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Symbole und Wirkungsspektren*.
- Donn, M., Selkowitz, S., Bordass, B. (2012). The building performance sketch. *Building Research and Information*, 40(2), 186 – 208.
- Donnini, G., Nguyen, V. H., Lai, D. H. C., LaFlamme, M., Haghghat, F., Molina, J., ...& Chang, C. Y. (1997). Field study of occupant comfort and office thermal environments in a cold climate. *ASHRAE Transactions*, 103(2), 205 – 220.
- Dosumu, O. S., Aigbavboa, C. O. (2019). An Investigation of the Factors Influencing Indoor Environmental Quality (IEQ) of Residential Buildings in Gauteng, South Africa. *Periodica Polytechnica Architecture*, 50(1), 81 – 88.
- Du, X., Zhang, Y., Zhao, S. (2022). Research on interaction effect of thermal, light and acoustic environment on human comfort in waiting hall of high-speed railway station. *Building and Environment*, 207(2022), 108494.
- Duarte, C. M., Jaremko, L., Jaremko, M. (2020). Hypothesis: Potentially Systemic Impacts of Elevated CO₂ on the Human Proteome and Health. *Frontiers in Public Health*, 8, 543322.
- Dubois, D., Dubois, E. F. (1915). Clinical Calorimetry Fifth Paper: The measurement of the surface area of man. *Archives of Internal Medicine*, 15, 868-881.
- Dubois, M.-C. (2001). *Impact of Solar Shading Devices on Daylight Quality: Measurements in Experimental Office Rooms*. Lund: Lund University, Department of Construction and Architecture, Division of Energy and Building.
- Dubowy, K.-O., Baden, W., Bernitzki, S., Peters, B. (2008). A practical and transferable new protocol for treadmill testing of children and adults. *Cardiology in the Young*, 18(6), 615 – 623.
- Duhm, J. (1984). *Physiologie der Lungenfunktion*. In: Beatmungstherapie mit der Evita IV.
- Eckenhoff, R.G., Longnecker, D. E. (1995). The therapeutic gases. Effects of carbon dioxide. In J. G. Hardman & L. Limbird (Hrsg.): *Goodman and Gilman's – The Pharmacological Basis of Therapeutics*, 9. Edition. New York: Mc-Graw Hill Education.
- Edholm, O. G., Weiner, J. S. (1981). Thermal Physiology. In O. G. Edholm & J. S. Weiner (Hrsg.): *The Principles and Practice of Human Physiology*. London: Academic Press Inc.
- El Aarbaoui, T., Méline, J., Brondeel, R., Chaix, B. (2017). Short-term association between personal exposure to noise and heart rate variability: The RECORD Multisensory Study. *Environmental Pollution*, 231(Pt 1), 703 – 711.
- El Asmar, M., Chokor, A., Srour, I. (2014). Are Building Occupants Satisfied with Indoor Environmental Quality of Higher Education Facilities? *Energy Procedia*, 50(2014), 751 – 760.
- Elbayoumi, M., Ramli, N. A., Yusof, N. F. F. M. (2015). Development and comparison of regression models and feedforward backpropagation neural network models to predict seasonal indoor PM_{2.5-10} and PM_{2.5} concentrations in naturally ventilated schools. *Atmospheric Pollution Research*, 6(6), 1013-1023.

- Ellermeier, W., Eigenstetter, M., Zimmer, K. (2001). Psychoacoustic correlates of individual noise sensitivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(4), 1464 – 1476.
- Ellermeier, W., Zimmer, K. (1997). Individual differences in susceptibility to the 'irrelevant speech effect'. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4), 2191 – 2199.
- Erfanian, M., Mitchell, A. J., Kang, J., Aletta, F. (2019). The Psychophysiological Implications of Soundscape: A Systematic Review of Empirical Literature and a Research Agenda. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(19), 3533.
- Erlandson, T., Cena, K., Dear, R. de, Havenith, G. (2003). Environmental and human factors influencing thermal comfort of office occupants in hot – humid and hot – arid climates. *Ergonomics*, 46(6), 616 – 628.
- Evans, G., Johnson, D. (2000). Stress and Open-Office Noise. *Journal of Applied Psychology*, 85(5), 779 – 783.
- Eysel, U. (2010). Sehen und Augenbewegungen. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Fabbri, K. (2015). *Indoor Thermal Comfort Perception: A Questionnaire Approach Focusing on Children*. Cham: Springer International Publishing.
- Fadeyi, M. O., Alkhaja, K., Sulayem, M. B., Abdu-Hijleh, B. (2014). Evaluation of indoor environmental quality conditions in elementary schools' classrooms in the United Arab Emirates. *Frontiers of Architectural Research*, 3(2014), 166 – 177.
- Fakhari, M., Vahabi, V., Fayaz, R. (2021). A study on the factors simultaneously affecting visual comfort in classrooms: A structural equation modeling approach. *Energy and Buildings*, 249(2021), 111232.
- Fang, L., Clausen, G., Fanger, P. O. (1998). Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. *Indoor Air*, 8(2), 80 – 90.
- Fanger, P. O., Breum, N. O., Jerking, E. (1977). Can Color and Noise Influence Man's Thermal Comfort? *Ergonomics*, 20(1), 11 – 18.
- Fanger, P. O. (1967). Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic comfort equation. *ASHRAE Transactions*, 73 (2), III 4.1 – III 4.20.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Fanger, P. O., Toftum, J. (2002). Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 34(6), 533 – 536.
- FAO (2001). *Human Energy Requirements*. Reports of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation. Food and Nutrition Technical Report Series 1.
- Fard, Z. Q., Zomorodian, Z. S., Korsavi, S. S. (2022). Application of machine learning in thermal comfort studies: A review of methods, performance and challenges. *Energy and Buildings*, 256(2022), 111771.
- Fassio, F., Fanchiotti, A., de Lieto Vollaro, R. (2014). Linear, Non-Linear and Alternative Algorithms in the Correlation of IEQ Factors with Global Comfort: A Case Study. *Sustainability*, 6(2014), 8113 – 8127.
- Fastl, H. (2004). Audio-visual interactions in loudness evaluation. *Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics*, ICA 2004, 4.-9. April, Kyoto, Japan.
- Fastl, H., Maschke, C. (2017). Schallwirkungen beim Menschen. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.): *Schallwirkungen beim Menschen*. Berlin: Springer Verlag.

- Faustman, E. M., Silbernagel, S. M., Fenske, R. A., Burbacher, T. M., Ponce, R. A. (2000). Mechanisms Underlying Children's Susceptibility to Environmental Toxicants. *Environmental Health Perspectives*, 108 (Supplement 1), 13 – 21.
- Feigenspan, A. (2017). *Prinzipien der Physiologie: Grundlegende Mechanismen und evolutionäre Strategien*. Berlin: Springer Verlag, Springer Spektrum.
- Fiala, D., Lomas, K., Stohrer, M. (1999). A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology*, 87(5), 1957 – 1972.
- Figueiro, M. G., Hunter, C. M., Higgins, P., Hornick, T., Jones, G. E., Plitnick, B., Brons, J., Rea, M. S. (2015). Tailored lighting intervention for persons with dementia and caregivers living at home. *Sleep Health*, 1(4), 322 – 330.
- Figueiro, M. G., Plitnick, B. A., Lok, A., Jones, G. E., Higgins, P., Hornick, T. R., Rea, M. S. (2014). Tailored lighting intervention improves measures of sleep, depression, and agitation in persons with Alzheimer's disease and related dementia living in long-term care facilities. *Clinical Interventions in Aging*, 9, 1527 – 1537.
- Figueiro, M. G., Plitnick, B., Rea, M. S. (2016). Research Note: A self-luminous light table for persons with Alzheimer's disease. *Lighting Research and Technology*, 48(2), 253 – 259.
- Figueiro, M. G., Bierman, A., Rea, M. S. (2013). A Train of blue light pulses delivered through closed eyelids suppresses melatonin and phase shifts the human circadian system. *Nature and Science of Sleep*, 5, 133 – 141.
- Figueiro, M. G., Kalsher, M., Steverson, B. C., Heerwagen, J., Kampschroer, K., Rea, M. S. (2019). Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers. *Lighting Research and Technology*, 51(2), 171 – 183.
- Foda, E., Sirén, K. (2010). A new approach using the Pierce two-node model for different body parts. *International Journal of Biometeorology*, 55(4), 519 – 532.
- Frank, W. (1975). Raumklima und thermische Behaglichkeit. *Berichte aus der Bauforschung*, Heft 104.
- Freedman, M. S., Lucas, R. J., Soni, B., van Schantz, M., Munoz, M., David-Gray, Z., Foster, R. (1999). Regulation of Mammalian Circadian Behavior by Non-rod, Non-cone, Ocular Photoreceptors. *Science*, 284 (5413), 502 – 504.
- Frontczak, M., Wargocki, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46(4), 922 – 937.
- Gagge, A. P. (1973). A Two-Node Model of Human Temperature Regulation in FORTAN. In: J. F. Parker & V. R. West (Hrsg.): *Bioastronautics Data Book*. Washington D. C.: National Aeronautics and space administration – Scientific and Technical Information Office.
- Gagge, A. P., Burton, A. C., Bazett, H. C. (1941). A practical system of units for the description of the heat exchange of the man with his environment. *Science*, 94(2445), 428 – 430.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Hardy, J. D. (1967). Comfort and Thermal Sensations and Associated Physiological Responses at Various Ambient Temperatures. *Environmental Research*, 1(1), 1 – 20.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J., Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77(1), 247 – 262.
- Gambin, W. (2019). A simplified analytical model of sound propagation in the human ear. *bioRxiv: The Preprint Server for Biology*, <https://doi.org/10.1101/571034>.
- Ganslandt, R., Hofmann, H. (2012). *Handbuch der Lichtplanung*. Lüdenscheid: ERCO Leuchten GmbH; Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.

- Garcia, M., Une, R. Y., Oliveira, S. de, Mady, C. E. K. (2018). Exery Analysis and Human Body Thermal Comfort Conditions: Evaluation of Different Body Compositions. *Entropy*, 20, 265.
- Gasser, N., Knöpfel, C., Seifert, K. (2015). *Erst agil, dann fragil: Übergang vom dritten zum vierten Lebensalter bei vulnerablen Menschen*. Zürich: Pro Senectute Schweiz.
- Gekle, M., Singer, D. (2019). Wärmehaushalt und Temperaturregulation. In H.-C. Pape, A. Kurtz & S. Siblernagl (Hrsg.): *Physiologie*. Stuttgart: Thieme.
- Geng, Y., Hong, B., Du, M., Yuan, T., Wang, Y. (2022). Combined effects of visual-acoustic-thermal comfort in campus open spaces: A pilot study in China's cold region. *Building and Environment*, 209(2022), 108658.
- Geng, Y., Lin, B., Zhu, Y. (2020). Comparative study on indoor environmental quality of green office buildings with different levels of energy use intensity. *Building and Environment*, 168 (2020), 106482.
- Gennusa, M. L., Macaluso, R., Mosca, M., Scaccianoce, G., Massaro, F., Cirrincione, L. (2017). An experimental study on relationship between LED lamp characteristics and non image-forming. *International Conference on Environment and Electrical Engineering and Industrial and Commercial Power Systems Europe*, 1 – 6.
- Gessmann, R. (2008). *Ein internetbasiertes Gebäudedatenrepositorium als lebenszyklusorientierte Integrationsplattform*. Dissertation: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Godehardt, K. (2017). *Referenzwerte gesunder Probanden für ventilatorische Parameter und das Atemäquivalent in Ruhe und unter Belastung auf dem Laufbandergometer im Alter von 4 bis 74 Jahren*. Dissertation: Ruhr Universität Bochum.
- Goldberg, L. R. (1990). An Alternative "Description of Personality": The Big-Five Factor Structure. *Journal of Personality and Social Psychology*, 59(6), 1216 – 1229.
- Gollisch, T. (2004). *The Auditory Transduction Chain: Identification of the Functional Modules Involved in Sound Encoding*. Dissertation: Humboldt-Universität zu Berlin.
- Gomez, P., Danuser, B. (2004). Affective and physiological responses to environmental noises and music. *International Journal of Psychophysiology*, 53(2), 91 – 103.
- Gossauer, E. (2008). *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden – Eine Feldstudie*. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- Gouveri, E., Katotomichelakis, M., Gouveris, H., Danielides, V., Maltezos, E., Papanas, N. (2014). Olfactory Dysfunction in Type 2 Diabetes Mellitus: An Additional Manifestation of Microvascular Disease? *Angiology*, 65(10), 869 – 876.
- Grabe, J. v. (2012). *Ein heuristisches Verfahren, das es ermöglicht, die prognostische Simulation menschlichen Interagierens mit Gebäuden realitätsgerechter zu gestalten – Prototypische Entwicklung am Beispiel des Energiehaushalts von Gebäuden*. Dissertation: Technische Universität München.
- Graham, L. T., Parkinson, T., Schiavon, S. (2021). Lessons learned from 20 years of CBE's occupant surveys. *Building and Cities*, 2(1), 166 – 184.
- Gramez, A., Boubenider, F. (2017). Acoustic comfort evaluation for a conference room: A case study. *Applied Acoustics*, 118(2017), 39 – 49.
- Grehn, F. (2019). *Augenheilkunde*. Berlin: Springer Verlag.
- Griefahn, B., Bröde, P., Marks, A., Basner, M. (2008). Autonomic Arousals Related to Traffic Noise during Sleep. *Sleep*, 31(4), 569 – 577.
- Grimme, M., Gramm, R., Mitterer, C., Künzel, H. (2018). Untersuchung der luftreinigenden Wirkung einer temperierten Wasserwand in Innenräumen hinsichtlich Feinstaub PM₁₀. *Bauphysik*, 40(5), 329 – 335.

- Groot, S. G. de, Gebhard, J. W. (1952). Pupil Size as Determined by Adapting Luminance. *Journal of the Optical Society of America*, 42(7), 492 – 495.
- Grün, G. (2009). Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas am Beispiel des Passagierflugzeugkabine. In K. Sedlbauer & G. Hauser (Hrsg.): *Forschungsergebnisse aus der Bauphysik: Band 1*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Guo, T., Hu, S., Liu, G. (2017). Evaluation Model of Specific Indoor Environment Overall Comfort Based on Effective-Function Method. *Energies*, 10(10), 1634.
- Guth, K. (1963). A Method for the Evaluation of Discomfort Glare. *Illuminating Engineering*, 58(5), 351 – 364.
- Guyot, G. (2019). Introduction: Why performance-based assessment methods? Overview of the needs and the possibilities. *The Proceedings of the 40th AIVC – 8th Tight Vent – 6th venticool Conference: "From energy crisis to sustainable indoor climate – 40 years of AIVC"*. Belgium: Gent.
- Haas-Arndt, D., Ranft, F. (2007). *Tageslichttechnik in Gebäuden*. Hrsg.: Energieagentur NRW. Heidelberg: C. F. Müller Verlag.
- Haber, P. (2013). *Lungenfunktion und Spiroergometrie: Interpretation und Befunderstellung unter Einschluss der arteriellen Blutgasanalyse*. Wien: Springer Verlag.
- Hagberg, K. (2010). Evaluating field measurements of impact sound. *Building Acoustics*, 17(2), 105 – 128.
- Haldi, F., Robinson, D. (2010). On the unification of thermal perception and adaptive actions. *Building and Environment*, 45(2010), 2440 – 2457.
- Hammer, R., Wambsganß, M. (2020). *Planen mit Tageslicht: Grundlagen für die Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Hammond, B. R., Wooten, B. R., Nanez, J. E., Wenzel, A. J. (1999). Smoking and lens optical density. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 19(4), 300 – 305.
- Handwerker, H. O., Schmelz, M. (2019). Allgemeine Sinnesphysiologie. In R. Brandes, F. Lang & R. F. Schmidt (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Berlin: Springer Verlag, Springer Nature.
- Hans Böckler Stiftung (2021). *Studien zu Homeoffice und mobiler Arbeit*. <https://www.boeckler.de/de/auf-einen-blick-17945-Auf-einen-Blick-Studien-zu-Homeoffice-und-mobiler-Arbeit-28040.htm> [10.03.2022]
- Hardy, J. D. (1970). Thermal comfort: skin temperature and physiological thermoregulation. In J. D. Hardy, A. P. Gagge & J. A. Stolwijk (Hrsg.): *Physiological and Behavioural Temperature Regulation*. Springfield: Thomas.
- Haselsteiner, E. (2021). Gender Matters! Thermal Comfort and Individual Perception of Indoor Environmental Quality: A Literature Review. In M. B. Andreucci, A. Marvuglia, M. Baltov & P. Hansen (Hrsg.): *Rethinking Sustainability Towards a Regenerative Economy*. Cham: Springer Verlag.
- Häupl, P. (2017). Klima. In W. M. Willems (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Hauschild, M. Z. (2018). Introduction to LCA Methodology. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum & S. I. Olsen (Hrsg.): *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing.
- Hausladen, G., Liedl, P., Saldanha, M. de (2012). *Klimagerecht Bauen: Ein Handbuch*. Basel: Birkhäuser.
- Havenith, G. (2001). Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response. *Journal of Applied Physiology*, 90(5), 1943 – 1954.
- Hawkins, D. B., Walden, B. E., Montgomery, A., Prosek, R. A. (1987). Description and Validation of an LDL Procedure Designed to Select SSPL90. *Ear and Hearing*, 8(3), 162 – 169.

- Hay, B., Kemp, K. F. (1972). Measurement of noise in air-conditioned landscaped offices. *Journal of Sound and Vibration*, 23(3), 363 – 373.
- He, X., An, L., Hong, B., Huang, B., Cui, X. (2020). Cross-cultural differences in thermal comfort in campus open spaces: A longitudinal field survey in China's cold region. *Building and Environment*, 172(2020), 106739.
- Heeren, W., Hohmann, V., Appell, J. E., Verhey, J. L. (2013). Relation between loudness in categorical units and loudness in phons and sones. *The Journal of the Acoustical Society America*, 133(4), EL314 – EL319.
- Hegger, M., Auch-Schwelk, V., Fuchs, M., Rosenkranz, T. (2013). *Baustoff Atlas*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., Zeumer, M. (2007). *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Heichele, J. (2021). *Die Entwicklung einer Methode zur Erstellung eines Gebäudemodells (UML) als Grundlage zur Raumklimabewertung: Eine nutzerzentrierte Methode zur Identifikation sämtlicher Umgebungs-, Gebäude-, Raum und ergänzenden Parameter – und deren Beziehung zueinander, die Auswirkung auf das Raumklima und somit den Nutzer haben*. Unveröffentlichte Masterarbeit: Technische Universität München.
- Heinzerling, D., Schiavon, S., Webster, T., Arens, E. (2013). Indoor environmental quality assessment models: A literature review and a proposed weighting and classification scheme. *Building and Environment*, 70(2013), 210 – 222.
- Hellwig, R. T. (2005). *Thermische Behaglichkeit – Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Gebäuden aus Nutzersicht*. Dissertation, Technische Universität München.
- Hensel, H. (1982). *Thermal Sensations and Thermoreceptors in Man*. Illinois: Charles C Thomas Publisher.
- Herman, I. P. (2016). *Physics of the Human Body*. 2nd Edition. Springer International Publishing. Schweiz.
- Herzog, T., Krippner, R., Lang, W. (2016). *Fassaden Atlas*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Hiramatsu, K., Takagi, K., Yamamoto, T. (1988). A rating scale experiment on loudness, noisiness and annoyance of environmental sounds. *Journal of Sound and Vibration*, 127(3), 467 – 473.
- Hirsch, F. G. (1966). *Effects of overpressure on the ear – a review*. Technical Progress Report: Lovelace Foundation for Medical Education and Research, Albuquerque.
- Höfker, G., Meis, M., Schröder, E. (2015). Auditiver Komfort. In Wagner A., Höfker, G., Lützkendorf, T., Moosmann, C., Schakib-Ekbatan, K., Schweiker, M.: *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: Empfehlungen für Planung und Betrieb*. Hrsg.: FIZ Karlsruhe Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur; Fraunhofer IRB Verlag; EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen.
- Hohenegger, D. (2020). *Auswirkungen von Bürogebäuden auf den Menschen*. Unveröffentlichte Masterarbeit: Technische Universität München.
- Holladay, L. L. (1926). The fundamentals of glare and visibility. *Journal of the Optical Society of America*, 12(4), 271 – 319.
- Hondula, D. M., Kuras, E. R., Betzel, S., Drake, L., Eneboe, J., Kaml, M., ... & Harlan, S. L. (2021). Novel metrics for relating personal heat exposure to social risk factors and outdoor ambient temperature. *Environment International*, 146(2021), 106271.
- Hood, D. C., Finkelstein, M. A. (1986). Sensitivity to Light. In K. R. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (Hrsg.): *Handbook of perception and human performance*. New York: Wiley.
- Hopkinson, R. G., (1972). Glare from daylighting in buildings. *Applied Ergonomics*, 3(4), 206 – 215.

- Höppe, P. (1984). *Die Energiebilanz des Menschen*. Dissertation: Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Hu, J., He, Y., Hao, X., Li, N., Su, Y., Qu, H. (2022). Optimal temperature ranges considering gender differences in thermal comfort, work performance, and sick building syndrome: A winter field study in university classrooms. *Energy and Buildings*, 254(2022), 111554.
- Huang, L., Zhu, Y., Ouyang, Q., Cao, B. (2012). A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices. *Building and Environment*, 49(2012), 304 – 309.
- Huang, M., Liao, Y. (2022). Development of an indoor environment evaluation model for heating, ventilation and air-conditioning control system of office buildings in subtropical region considering indoor health and thermal comfort. *Indoor and Building Environment*, 31(3), 807 – 819.
- Huizenga, C., Hui, Z., Arens, E. (2001). A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment*, 36(6), 691 – 699.
- Hume, K. I., Barrett, H., Ip, A., McDonagh, T., Davies, W. J., Adams, M. D., ...& Plack, C. (2008). Physiological responses and subjective estimates of sounds: initial results of pilot study. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 30(Pt 2).
- Hume, K., Ahtamad, M. (2013). Physiological responses to and subjective estimates of soundscape elements. *Applied Acoustics*, 74(2), 275 – 281.
- Humphreys, M. A., Nicol, J. F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34(6), 667 – 684.
- Humphreys, M. A., Rijal, H. B., Nicol, J. F. (2010). Examining and developing the adaptive relation between climate and thermal comfort indoors. In *Proceedings of the 'Adapting to Change: New Thinking on Comfort' Conference*. Windsor, UK, 9. – 11. April, Network for Comfort and Energy Use in Buildings.
- ILCD Handbook (2010). *International Reference Life Cycle Data System. General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Illuminating Engineering Society IES (1972). Outline of a standard procedure for computing visual comfort ratings for interior lighting. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 2(3), 328 – 344.
- Indraganti, M., Humphreys, M. A. (2021). A comparative study of gender differences in thermal comfort and environmental satisfaction in air-conditioned offices in Qatar, India and Japan. *Building and Environment*, 206(2021), 108297.
- Indraganti, M., Rao, K. D. (2010). Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: A field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations. *Energy and Buildings*, 42(2010), 273 – 281.
- Industrieverband Büro und Arbeitswelt (2020). *IBA Studie 2019/2020: Die Entwicklung der Büroarbeit*. Wiesbaden: Industrieverband Büro und Arbeitswelt e.V. (IBA)
- Irwin, A., Hall, D. A., Peters, A., Plack, C. J. (2011). Listening to urban soundscapes: Physiological validity of perceptual dimensions. *Psychophysiology*, 48(2), 258 – 268.
- ISO 532-2 (2017). *Acoustics – Methods for calculating loudness. Part 2: Moore-Glasberg method*.
- ISO/TS 19488 (2021). *Acoustics – Acoustics classification of dwellings*.
- IUPS, Thermal Commission (2001). Glossary of terms for thermal physiology: revised by the Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences. *The Japanese Journal of Physiology*, 51 (2), 245 – 280.

- Iwata, T., Tokura, M. (1998). Examination of the limitations of predicted glare sensation Vote (PGSV) as a glare index for a large source: towards a comprehensive development of discomfort glare evaluation. *Lighting Research and Technology*, 30(2), 81 – 88.
- John, J., Thampuran, A. L., Premlet, B. (2016). Objective and subjective evaluation of acoustic comfort in classrooms: A comparative investigation of vernacular and modern school classroom in Kerala. *Applied Acoustics*, 104(2016), 33 – 41.
- Judd, D. B. (1967). A flattery index for artificial illuminants. *Illuminating Engineering*, 62(10), 593 – 598.
- Jung, F., Rössel, T., Steinwallner, U. (2009). Raumkonditionierung. In G. Hausladen & K. Tichelmann (Hrsg.): *Ausbau Atlas: Integrale Planung, Innenausbau, Haustechnik*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Kaiser, P. K. (2017). *The Joy of Visual Perception: A Web Book*. York University: <http://www.yorku.ca/eye/>.
- Kajtár, L., Herczeg, L. (2012). Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work. *IDOJARAS, Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 116(2), 145 – 169.
- Kallio, J., Vildjiounaite, E., Koivusaari, J., Räsänen, P., Similä, H., Kyllönen, V., ...& Vehmas, K. (2020). Assessment of perceived indoor environmental quality, stress and productivity based on environmental sensor data and personality categorization. *Building and Environment*, 175(2020), 106787.
- Kaltenbach, F. (2003). *Transluzente Materialien: Glas – Kunststoff – Metall*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Kamaruzzaman, S. N., Egbu, C. O., Zawawi, E. M. A., Ali, A. S., Che-Ani, D. I. (2011). The effect of indoor environmental quality on occupants' perception of performance: A case study of refurbished historic buildings in Malaysia. *Energy and Buildings*, 43(2011), 407 – 413.
- Kang, S., Ou, D., Mak, C. M. (2017). The impact of indoor environmental quality on work productivity in university open-plan research offices. *Building and Environment*, 124 (2017), 78 – 89.
- Kapit, W., Macey, R. I., Meisami, E. (2007). *Physiologie Malatlas*. München: Pearson Studium.
- Karjalainen, S. (2007). Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments. *Building and Environment*, 42(2007), 1594 – 1603.
- Karnauskas, K. B., Miller, S. L., Schapiro, A. C. (2020). Fossil Fuel Combustion is Driving Indoor CO₂ Toward Levels Harmful to Human Cognition. *Geo Health*, 4, e2019GH000237.
- Katić, K., Li, R., Zeiler, W. (2016). Thermophysiological models and their applications: A review. *Building and Environment*, 106(2016), 286 – 300.
- Katschinski, D. M. (2019). Chemorezeption. In R. Brandes, F. Lang & R. F. Schmidt (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Berlin: Springer Verlag, Springer Nature.
- Kaynakli, O., Kilic, M. (2005). Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions. *Building and Environment*, 40(2), 165 – 174.
- Kaynakli, O., Unver, U., Kilic, M. (2003). Evaluating thermal environments for sitting and standing posture. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 30(8), 1179 – 1188.
- Keithley, E. (2020). Pathology and mechanisms of cochlear aging. *Journal of Neuroscience Research*, 98 (9), 1674 – 1684.
- Kenney, W. L., Havenith, G. (1993). Heat Stress and Age: Skin Blood Flow and Body Temperature. *Journal of thermal Biology*, 18(5/6), 341- 344.

- Keune, A. (2020). Luft als Umgebung und Lebensmittel. In A. Keune (Hrsg.): *Innenraumlufthqualität und Hygieneanforderungen an die Raumlufthtechnik in Gebäuden: Kommentar zu VDI 6022*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Kim, J. T., Lim, J. H., Cho, S. H., Yun, G. Y. (2015). Development of the adaptive PMV model for improving prediction performances. *Energy and Buildings*, 98, 100 – 105.
- Kim, J., Dear, R. de, Candido, C., Zhang, H., Arens, E. (2013). Gender differences in office occupant perception of indoor environmental quality (IEQ). *Building and Environment*, 70(2013), 245 – 256.
- Kim, S. H., Jeong, W. S. (2002). Influence of illumination on autonomic thermoregulation and choice of clothing. *International Journal of Biometeorology*, 46(2002), 141 – 144.
- Kingma, B. R. M. (2012). *Human Thermoregulation: A synergy between physiology and mathematical modelling*. Dissertation: Eindhoven University of Technology.
- Kingma, B. R. M., Frijns, A. J. H., Schellen, L., van Marken Lichtenbelt, W. D. (2014). Beyond the classic thermoneutral zone: Including thermal comfort. *Temperature*, 1(2), 142 – 149.
- Kingma, B., Schellen, L., Frijns, J., Lichtenbelt, W. (2012). Thermal sensation: A mathematical model based on neurophysiology. *Indoor Air*, 22(3), 253 – 262.
- Kleiber, M. (1967). *Der Energiehaushalt von Mensch und Haustier*. Hamburg: Verlag Paul Parley.
- Klein, D. C., Moore, R. Y., Reppert, S. M. (1991). *Suprachiasmatic Nucleus: The Mind's Clock*. New York: Oxford University Press.
- Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., Auer, T. (2014). *Fassaden: Prinzipien der Konstruktion*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Knez, I. (2001). Effects of colour of light on nonvisual psychological processes. *Journal of Environmental Psychology*, 21(2), 201 – 208.
- Knez, I., Kers, C. (2000). Effects of indoor lighting, gender, and age on mood and cognitive performance. *Environment and Behavior*, 32(6), 817 – 831.
- Knoll, A. H., Bambach, R. K., Canfield, D. E., Grotzinger, J. P. (1996). Comparative Earth History and Late Permian Mass Extinction. *Science*, 273(5274), 452 – 457.
- Kostyak, J. C., Kris-Etherton, P., Bagshaw, D., DeLany, J. P., Farrell, P. A. (2007). Relative fat oxidation is higher in children than adults. *Nutrition Journal*, 6:19.
- Kraus, M., Novakova, P. (2019). Gender Differences in Perception of Indoor Environmental Quality (IEQ). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603(5), 052084.
- Krimmling, J., Deutschmann, J. U., Preuß, A., Renner, E. (2014). *Atlas Gebäudetechnik: Grundlagen – Konstruktionen – Details*. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller.
- Kumbalasisiri, T., Provencio, I. (2005). Melanopsin and other novel mammalian opsins. *Experimental Eye Research*, 81(4), 368 – 375.
- Künzel, H. M. (2010). Feuchteschutz. In K. Sedlbauer, E. Schnuck, R. Barthel & H. M. Künzel (Hrsg.): *Flachdachatlas: Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Kurra, S. (2020). *Environmental Noise and Management: Overview from Past to Present*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Kurtz, A. (2019). Atmung. In H.-C. Pape, A. Kurtz & S. Silbernagl (Hrsg.): *Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.

- Lai, A. C. K., Mui, K. W., Wong, L. T., Law, L. Y. (2009). An evaluation model for indoor environmental quality (IEQ) acceptance in residential buildings. *Energy and Buildings*, 41(9), 930 – 936.
- Lang, F., Lang P. (2007). *Basiswissen Physiologie*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Laurentin, C., Berrutto, V., Fontoynt, M. (2000). Effect of thermal conditions and light source type on visual comfort appraisal. *Lighting Research Technology*, 32(4), 223 – 233.
- Laverge, J., Pattyn, X., Janssens, A. (2013). Performance assessment of residential mechanical exhaust ventilation systems dimensioned in accordance with Belgian, British, Dutch, French and ASHRAE standards. *Building and Environment*, 59(2013), 177 – 185.
- Le Floch, J.-P., Le Lièvre, G., Labroue, M., Paul, M., Peynegre, R., Perlemuter, L. (1993). Smell Dysfunction and Related Factors in Diabetic Patients. *Diabetes Care*, 16(6), 934 – 937.
- Leccese, F., Rocca, M., Salvadori, G., Belloni, E., Buratti, C. (2021). Towards a holistic approach to indoor environmental quality assessment: Weighting schemes to combine effects of multiple environmental factors. *Energy and Buildings*, 245(2021), 111056.
- Lee, M.C., Mui, K. W., Wong, L. T., Chan, W. Y., Lee, E. W. M., Cheung, C. T. (2012). Student learning performance and indoor environmental quality (IEQ) in air-conditioned university teaching rooms. *Building and Environment*, 49(2012), 238 – 244.
- Lee, P. J., Park, S. H., Jeong, J. H., Choung, T., Kim, K. Y. (2019). Association between transportation noise and blood pressure in adults living in multi-story residential buildings. *Environment International*, 132, 105101.
- Lee, S., Park, M. H., Jeong, B. Y. (2018). Gender differences in public office workers' satisfaction, subjective symptoms and musculoskeletal complaints in workspace and office environment. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 24(2), 165 – 170.
- Leistner, P., Weber, L. (2010). Schallschutz. In K. Sedlbauer, E. Schnuck, R. Barthel & H. M. Künzel (Hrsg.): *Flachdachatlas: Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Lenarz, T., Boenninghaus, H.-G. (2012). *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag.
- Lentz, J. J. (2020). *Psychoacoustics: Perception of Normal and Impaired Hearing with Audiology Applications*. San Diego: Plural Publishing.
- Lercher, P. (1998). Medizinisch-hygienische Grundlagen der Lärmbeurteilung. In M. T. Kalivoda & J. W. Steiner (Hrsg.): *Taschenbuch der angewandten Psychoakustik*. Wien: Springer Verlag.
- Li, B., Yang, Y., Yao, R., Liu, H., Li, Y. (2017). A simplified thermoregulation model of the human body in warm conditions. *Applied Ergonomics* 59(Pt A), 387 – 400.
- Liebl, A., Haller, J., Jödicke, B., Baumgartner, H., Schlittmeier, S., Hellbrück, J. (2012). Combined effects of acoustic and visual distraction on cognitive performance and well-being. *Applied Ergonomics*, 43(2012), 424 – 434.
- Lindborg, P. (2013). Physiological Measures Regress onto Acoustic and Perceptual Features of Soundscapes. *Proceedings of the 3rd International Conference on Music and Emotion (ICME3)*, University of Jyväskylä.
- Liu, H., Wu, Y., Lei, D., Li, B. (2018). Gender differences in physiological and psychological responses to the thermal environment with varying clothing ensembles. *Building and Environment*, 141(2018), 45 – 54.
- Liu, Y.-C. C., Ibekwe, T., Kelso, J. M., Klein, N. P., Shehu, A., Steuerwald, W., ...& Munoz, F. M. (2020). Sensorineural hearing loss (SNHL) as an adverse event following immunization (AEFI): Case definition

- & guidelines for data collection, analysis, and presentation of immunization safety data. *Vaccine*, 38(30), 4717 – 4731.
- Lolli, F., Coruzzolo, A. M., Balugani, E. (2022). The Indoor Environmental Quality: A TOPSIS-based approach with indirect elicitation of criteria weights. *Safety Science*, 148 (2022), 105652.
- Lüdecke, A., Moriske, H.-J. (2013). Schadstoffe und Bewertungsschemata. In P. Bachmann & M. Lange (Hrsg.): *Mit Sicherheit gesund bauen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Luers, J. C., Rokohl, A. C., Loreck, N., Wawe Matos, P. A., Augustin, M., Dewald, F., ...& Heindl, L. M. (2020). Olfactory and Gustatory Dysfunction in Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *Clinical Infectious Diseases*, 71(16), 2262 – 2264.
- Lui, Z., Li, H., Cao, G. (2017). Quick estimation model for concentration of indoor airborne culturable bacteria: an application of machine learning. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8), 857.
- Lutze, M., Bresnick, G. H. (1991). Lense of diabetic patients „yellow” at an accelerated rate similar to older normals. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 32(1), 194 – 199.
- Mady, C. E. K., Ferreira, M. S., Yanagihara, J. I., de Oliveira, S. (2014). Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 577 – 584.
- Majdak, P., Hollomey, C., Baumgartner, R. (2022). AMT 1.x: A toolbox for reproducible research in auditory modeling. *Acta Acustica*, 6:19.
- Malchaire, J., Piette, A., Kampmann, B., Mehnert, P., Gebhardt, H., Havenith, G., ...& Griefahn, B. (2001). Development and Validation of the Predicted Heat Strain Model. *Annals of Occupational Hygiene*, 45(2), 123 – 135.
- Mandalaki, M., Tsoutsos, T. (2020). *Solar Shading Systems: Design, Performance, and Integrated Photovoltaics*. Cham: Springer Nature.
- Marchetti, A., Pilehvar, S., Hart, L., Pernia, D. L., Voet, O., Anaf, W., ...& Wael, K. de (2017). Indoor environmental quality index for conservation environments: The importance of including particulate matter. *Building and Environment*, 126(2017), 132 – 146.
- Marino, C., Nucara, A., Pietrafesa, M. (2012). Proposal of comfort classification indexes suitable for both single environments and whole buildings. *Building and Environment*, 57 (2012), 58 – 67.
- Marquäß, B. (2003). *Vergleich von drei Methoden zur Messung der CO₂-Atmungsantwort*. Dissertation: Ruhr-Universität Bochum, Abteilung für angewandte Physiologie.
- Martilla, J. A., James, J. C. (1977). Importance-Performance Analysis. *Journal of Marketing*, 41(1), 77 – 79.
- Martinez, C. B., de la Pena Garcia, E. (2013). Thermosensation. In Galizia, C. G. & Lledo, P.-M. (Hrsg.): *Neurosciences – From Molecule to Behavior: A University Textbook*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, Springer Spektrum.
- Maruo, T., Saitoh, Y., Hosomi, K., Kishima, H., Shimokawa, T., Hirata, M., ...& Yoshimine, T. (2011). Deep brain stimulation of the subthalamic nucleus improves temperature sensation in patients with Parkinson’s disease. *Pain*, 152(2011), 860 – 865.
- Matjaž, N. A., Prek, N. A., Butala, V. (2012). An enhanced thermal comfort model based on the exergy analysis approach. *International Journal of Exergy*, 10(2), 190 – 208.
- Maykot, J. K., Rupp, R. F., Ghisi, E. (2018). A field study about gender and thermal comfort temperatures in office buildings. *Energy and Buildings*, 178(2018), 254 – 264.

- McCartney K. J., Nicol, J. F. (2002). Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe: Results of the SCATs Project. *Energy and Buildings*, 34(6), 623-635.
- Medved, S. (2022). *Building Physics: Heat, Ventilation, Moisture, Light, Sound, Fire, and Urban Microclimate*. Cham: Springer Nature.
- Medvedev, O., Shepherd, D., Hautus, M. J. (2015). The restorative potential of soundscapes: A physiological investigation. *Applied Acoustics*, 96, 20 – 26.
- Mekjavic, I. B., Eiken, O. (2006). Contribution of thermal and nonthermal factors to the regulation of body temperature in humans. *Journal of Applied Physiology*, 100(6), 2065 – 2072.
- Melikov, A., Pitchurov, G., Naydenov, K., Langkilde, G. (2005). Field study on occupant comfort and the office thermal environment in rooms with displacement ventilation. *Indoor Air*, 15(3), 205 – 214.
- Menaker, M. (1997). Commentary: What Does Melatonin Do and How Does It Do It? *Journal of Biological Rhythms*, 12(6), 532 – 534.
- Menzel, D., Haufe, N., Fastl, H. (2010). Colour-influences on loudness judgements. *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*, 23.-27. August, Sydney, Australien.
- Meßlinger, K. (2019). Somatoviszzerale Sensibilität. In H.-C. Pape, A. Kurtz & S. Siblernagl (Hrsg.): *Physiologie*. Stuttgart: Thieme.
- Miao, Y., Ding, Y. (2020). Indoor environmental quality in existing public buildings in China: Measurement results and retrofitting priorities. *Building and Environment*, 185(2020), 107216.
- Miedema, H. M. E., Vos, H. (2003). Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3), 1492 – 1504.
- Mihai, T., Iordache, V. (2016). Determining the indoor environment quality for an educational building. *Energy Procedia*, 85(2016), 566 – 574.
- Molliet, D. S., Mady, C. E. K. (2021). Exergy analysis of the human body to assess thermal comfort conditions: Comparison of the thermal responses of males and females. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100972.
- Moon, P., Spencer, D. E. (1944). On the Stiles-Crawford-Effect. *Journal of the Optical Society of America*, 34(6), 319 – 329.
- Moore, B. C. J., Glasberg, B. R. (2007). Modeling binaural loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(3), 1604 – 1612.
- Moore, B. C. J., Glasberg, B. R., Baer, T. (1997). A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness. *Journal of the Audi Engineering Society*, 45, 224 – 240.
- Moore, B. C. J., Glasberg, B. R., Varathanathan, A., Schittenlacher, J. (2016). A Loudness Model for Time-Varying Sounds Incorporating Binaural Inhibition. *Trends in Hearing*, 20, 1 – 16.
- Moosmann, C. (2014). *Visueller Komfort und Tageslicht am Büroarbeitsplatz: Eine Felduntersuchung in neuen Gebäuden*. Dissertation: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Moosmann, C., Tralau, B., Schierz, C., Knoop, M., Woitysiak, A., de Boer, J. (2015). Visueller Komfort. In A. Wagner, G. Höfker, T. Lützkendorf, C. Moosmann, K. Schakib-Ekbatan & M. Schweiker: *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: Empfehlungen für Planung und Betrieb*. Hrsg.: FIZ Karlsruhe Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur; Fraunhofer IRB Verlag; EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen
- Moreland, J. D., Alexander, E. C. (1997). Effect of macular pigment on colour matching with field size in the 1° to 10° range. *Documenta Ophthalmologica Proceedings Series*, 59, 363 – 368.

- Moro, J. L. (2019a). *Baukonstruktion – vom Prinzip ins Detail: Band 3 Umsetzung*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Moro, J. L. (2019b). *Baukonstruktion – vom Prinzip ins Detail: Band 4 Prinzipien*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Moschandreas, D. J., Sofuoglu, S. C. (2004). The indoor environmental index and its relationship with symptoms of office building occupants. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 54(11), 1440 – 1451.
- Moser, T., Zenner, H.-P. (2019a). Peripheres Auditorisches System. In R. Brandes, F. Lang & R. F. Schmidt (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Berlin: Springer Verlag, Springer Nature.
- Moser, T., Zenner, H.-P. (2019b). Zentrale auditorische Verarbeitung. R. Brandes, F. Lang & R. F. Schmidt (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Berlin: Springer Verlag, Springer Nature.
- Mu, J., Kang, J., Wu, Y. (2021). Acoustic environment of comprehensive activity spaces in nursing homes: A case study in Harbin, China. *Applied Acoustics*, 177(2021), 107932.
- Mui, K. W., Chan, W. T. (2005). A New Indoor Environmental Quality Equation of Air-Conditioned Buildings. *Architectural Science Review*, 48(1), 41 – 46.
- Mujan, I., Licina, D., Klajic, M., Culic, A., Anđelković, A. S. (2021). Development of indoor environmental quality index using low-cost monitoring platform. *Journal of Cleaner Production*, 312(2021), 127846.
- Nadeem, B., Bacha, B., Gilani, S. A. (2018). Correlation of Subcutaneous Fat Measured on ultrasound with Body Mass Index. *Journal of Medical Ultrasound*, 26(4), 205-209.
- Nagano, K., Horikoshi, T. (2005). New comfort index during combined conditions of moderate low ambient temperature and traffic noise. *Energy and Buildings*, 37(3), 287 – 294.
- Nakano, J., Tanabe, S., Kimura, K. (2002). Differences in perception of indoor environment between Japanese and non-Japanese workers. *Energy and Buildings*, 34(6), 615 – 621.
- Nazzari, A. (2005). A new evaluation method for daylight discomfort glare. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(4), 295 – 306.
- Ncube, M., Riffat, S. (2012). Developing an indoor environment quality tool for assessment of mechanically ventilated office buildings in the UK – a preliminary study. *Building and Environment*, 53(2012), 26 – 33.
- Nema, H. V., Nema, N. (2008). *Textbook of Ophthalmology*. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers.
- Newman, C. W., Weinstein, B. E., Jacobson, G. P., Hug, G. A. (1990). The Hearing Handicap Inventory for Adults: Psychometric Adequacy and Audiometric Correlates. *Ear and Hearing*, 11(6), 430 – 433.
- Ni, K., Huang, Y. (2022). An investigation of the age effect on acoustical annoyance developed from data of previous studies. *Applied Acoustics*, 192(2022), 108720.
- Nicol, F., Cunill, E. (2010). Rethinking the comfort limits for free-running buildings, in EN15251. *Proceedings of Palenc Conference, Rhodes, Greece*.
- Nicol, J. F., Wilson, M. (2011). A critique of European Standard EN 15251: strengths, weaknesses and lessons for future standards. *Building Research and Information*, 39(2), 183 – 193.
- Nimlyat, P. S. (2018). Indoor environmental quality performance and occupants' satisfaction [IEQ_{POS}] as assessment criteria for green healthcare building rating. *Building and Environment*, 144(2018), 598 – 610.

- Nitidara, N. P. A., Sarawono, J., Suprijanto, S., Soelami, F. X. N. (2022). The multisensory interaction between auditory, visual and thermal to the overall comfort in public open space: A study in a tropical climate. *Sustainable Cities and Society*, 78(2022), 103622.
- Noble, W. (1978). *Assessment of Impaired Hearing. A Critique and a New Method*. New York: Academic Press.
- Novotny, P., Paulick, P., Schwarz, M. J., Plischke, H. (2013). The Solid Angle of Light Sources and Its Impact on the Suppression of Melatonin in Humans. In M. Kurosu (Hrsg.): *Human-Computer Interaction: Towards Intelligent and Implicit Interaction*. 454 – 463.
- O’Callaghan, C. (2019). *A Multisensory Philosophy of Perception*. Oxford: Oxford University Press.
- Oetting, D., Ewert, S. D., Hohmann, V., Appell, J.-E. (2013). Model-based loudness compensation for broad- and narrow-band signals. *Proceedings of the International Symposium in Auditory and Audiological Research*, 4, 365 – 372.
- Oguro, M., Arens, E., deDear, R., Zhang, H., Katayama, T. (2002). Convective heat transfer coefficients and clothing insulations for parts of the clothed human body under airflow conditions. *Journal of Architecture and Planning*, 67(561), 21 – 29.
- Oliveira, A. V. M., Gaspar, A., Quintela, D. A. (2006). Convective Heat Transfer from a Clothed Manikin. *Windsor Conference: Comfort and Energy use in Buildings – getting them right*.
- Pabst, A. (2017). Das Altenheim als Langzeithospiz – nur noch ein Ort zum Sterben? *Orte des Sterbens – zwischen Wunschvorstellung und Realität*, 4. Fachtagung des Ethikkomitees am 21.03.2017.
- Pan, D., Lin, Z., Deng, S. (2010). A mathematical model for predicting the total insulation value of a bedding system. *Building and Environment*, 45(8), 1866 – 1872.
- Park, S. H. (2018). *Psychological and Physiological Responses to Floor Impact Noise*. Dissertation: University of Liverpool.
- Park, S. H., Lee, P. J. (2017). Effect of floor impact noise on psychophysiological responses. *Building and Environment*, 116(2017), 173 – 181.
- Park, S. H., Lee, P. J., Jeong, J. H. (2018). Effects of noise sensitivity on psychophysiological responses to building noise, *Building and Environment*, 136(2018), 302 – 311.
- Parsons, K. (2014). *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Parsons, K. C. (2002). The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34(6), 593 – 599.
- Passero, C. R. M., Zannin, P. H. T. (2012). Acoustic evaluation and adjustment of an open-plan office through architectural design and noise control. *Applied Ergonomics*, 43(6), 1066 – 1071.
- Patapoutian, A., Peier, A. M., Story, G. M., Viswanath, V. (2003). Thermo TRP channels and beyond: Mechanisms of temperature sensation. *Nature Reviews Neuroscience*, 4 (7), 529 – 539.
- Paulke, S.; Wagner, S.(2007). Some considerations on global and local thermal comfort based on Fiala’s thermal Manikin in Theseus-FE. Proceedings of the 6th Eurosim Congress on Modelling and Simulation.
- Pellerin, N., Candas, V. (2003). Combined effects of temperature and noise on human discomfort. *Physiology and Behavior*, 78(1), 99 – 106.
- Pellerin, N., Candas, V. (2004). Effects of steady-state noise and temperature conditions on environmental perception and acceptability. *Indoor Air*, 14(2), 129 – 136.
- Peretti, C., Schiavon, S. (2011). Indoor environmental quality surveys. A brief literature review. *Proceedings of Indoor Air 2011*, Austin Texas.

- Persily, A., Jonge, L. de (2016). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, 27(5), 868 – 879.
- Persson, P. B., (2019). Energie- und Wärmehaushalt, Thermoregulation. In R. Brandes, F. Lang & R. F. Schmidt (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Berlin: Springer Verlag, Springer Nature.
- Pieper, I. (2020). *Individual loudness model for normal hearing and hearing impaired listeners*. Dissertation: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- Pigliautile, I., Casaccia, S., Morresi, N., Arnesano, M., Pisello, A. L., Revel, G. M. (2020). Assessing occupants' personal attributes in relation to human perception of environmental comfort: Measurement procedure and data analysis. *Building and Environment*, 177 (2020), 106901.
- Pistohl, W., Rechenauer, C., Scheuerer, B. (2013). *Handbuch der Gebäudetechnik: Planungsgrundlagen und Beispiele: Band 2 Heizung/Lüftung/Energiesparen*. Köln: Werner Verlag.
- Poirier, B., Guyot, G., Woloszyn, M., Geoffroy, H., Ondarts, M., Gonze, E. (2021). Development of an assessment methodology for IAQ ventilation performance in residential buildings: An investigation of relevant performance indicators. *Journal of Building Engineering*, 43(2021), 103140.
- Pokorny, J., Smith, V. C., Lutze, M. (1987). Aging of the human lens. *Applied Optics*, 26(8), 1437 – 1440.
- Powell, F. L. (2006). Ventilation/Control. In J. L. Geoffrey & S. D. Shapiro (Hrsg.): *Encyclopedia of Respiratory Medicine*. Elsevier.
- Prek, M., Butala, V. (2010). Principles of exergy analysis of human heat and mass exchange with the indoor environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(25-26), 5806 – 5814.
- Raggam, R. B., Cik, M., Höldrich, R. R., Fallast, K., Gallasch, E., Fend, M., ...& Marth, E. (2007). Personal noise ranking of road traffic: Subjective estimation versus physiological parameters under laboratory conditions. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 210(2), 97 – 105.
- Raman, E. R. (1992). Insulation versus counter current heat savings. *Proceedings of the Fifth International Conference on Environmental Ergonomics*, 130 – 131.
- Rasetshwane, D. M., Trevino, A. C., Gombert, J. N., Liebig-Trehearn, L., Kopun, J. G., Jesteadt, W., ...& Gorga, M. P. (2015). Categorical loudness scaling and equal-loudness contours in listeners with normal hearing and hearing loss. *Journal of the acoustical society of America*, 137(4), 1899 – 1913.
- Rea, M. S., Bullough, J. D., Freyssinier-Nova, J. P., Bierman, A. (2004). A proposed unified system of photometry. *Lighting Research and Technology*, 36(2), 85 – 109.
- Rea, M. S., Figueiro, M. G. (2018). Light as a circadian stimulus for architectural lighting. *Lighting Research and Technology*, 50(4), 497 – 510.
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A., Hamner, R. (2012). Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system. *Light Research and Technology*, 44(4), 386 – 396.
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bullough, J. D., Bierman, A. (2005). A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Research Reviews*, 50(2), 213 – 238.
- Rea, M. S., Nagare, R., Figueiro, M. G. (2020). Predictions of melatonin suppression during the early biological night and their implications for residential light exposures prior to sleeping. *Scientific Reports*, 10, 14114.
- Rea, M. S., Nagare, R., Figueiro, M. G. (2021). Modeling Circadian Phototransduction: Quantitative Predictions of Psychophysical Data. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 615322.
- Reinhart, C. F., Wienold, J. (2011). The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylit spaces. *Building and Environment*, 46(2011), 386 – 396.

- Reinhart, C., Walkenhorst, O. (2001). Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings*, 33(7), 683 – 697.
- Rewitz, K., Müller, D. (2022). Influence of gender, age and BMI on human physiological response and thermal sensation for transient indoor environments with displacement ventilation. *Building and Environment*, 219(2022), 109045.
- Richter, D. W. (2010). Atemregulation. In Schmidt, R. F., Lang, F. & Heckmann, M. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Heidelberg, Springer Medizin Verlag.
- Robert Koch Institut (2013). *Beiträge zur Gesundheitsberichterstattung des Bundes: Referenzperzentile für anthropometrische Maßzahlen und Blutdruck aus der Studie zur Gesundheit von Kindern und Jugendlichen in Deutschland (KiGGS). 2. Erweiterte Auflage*. Berlin: Robert Koch Institut.
- Robinson, D. W. (1971). Towards a unified system of noise assessment. *Journal of Sound and Vibration*, 14(3), 279 – 298.
- Rogers, Z., Goldman, D. (2006). *Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool – development report and case studies*. Boulder: Architectural Energy Corporation.
- Rohles, F. H. (1979). The Effect of Time of Day and Time of Year on Thermal Comfort. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 23(1), 129 – 132.
- Romanovsky, A. A. (2007). Thermoregulation: some concepts have changed. Functional architecture of the thermoregulatory system. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 292(1), R37 – R46.
- Romanovsky, A. A. (2014). Skin temperature: Its role in thermoregulation. *Acta Physiologica*, 210(3), 498 – 507.
- Romanovsky, A. A. (2018). The thermoregulation system and how it works. *Handbook of Clinical Neurology*. 156, 3 – 43.
- Rosenbaum, R. K., Hauschild, M. Z., Boulay, A.-M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., Vieira, M. (2018). Life Cycle Impact Assessment. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum & S. I. Olsen (Hrsg): *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham: Springer International Publishing.
- Roumi, S., Zhang, F., Stewart, R. A., Santamouris, M. (2022). Commercial building indoor environment quality models: A critical review. *Energy and Buildings*, 263 (2022), 112033.
- Ruggero, M. A., Rich, N. C. (1991). Application of a commercially-manufactured Doppler-shift laser velocimeter to the measurement of basilar-membrane vibration. *Hearing Research*, 51(2), 215 – 230.
- Rupp, R. F., Kim, J., Ghisis, E., Dear, R. de (2019). Thermal sensitivity of occupants in different building typologies: The Griffiths Constant is a Variable. *Energy and Buildings*, 200(2019), 11 – 20.
- Rupp, R. F., Vásquez, N. G., Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105(2015), 178 – 205.
- Saad, S. M., Shakaff, A. Y. M., Saad, A. R. M., Yusof, A. M. Andrew, A. M., Zakaria, A., Adom, A. H. (2017). Development of indoor environmental index: Air quality index and thermal comfort index. *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 1808, 020043.
- Sagunski, H., Heinzow, B., Müller, L. (2013). Referenzwerte, Leitwerte, Richtwerte und Grenzwerte für die Innenraumluft – eine Kurzanleitung. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*, 18(3), 125 – 133.
- Sant’Anna, D. O., Dos Santos, P. H., Vianna, N. S., Romero, M. A. (2018). Indoor environmental quality perception and users’ satisfaction of conventional and green buildings in Brazil. *Sustainable Cities and Society*, 43 (2018), 95 – 110.

- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671 – 1677.
- Savage, G. L., Haegerstrom-Portnoy, G., Adams, A. J., Hewlett, S. E. (1993). Age changes in the optical density of human ocular media. *Clinical Vision Science*, 8(1), 97 – 108.
- Schäfer, S. (2012). *Rezeptororientierte Charakterisierung breitbandiger Spektren als Basis einer mesopischen Hellempfindung*. Dissertation: Technische Universität Berlin.
- Schebek, L. (2015). „Klassische“ Ökobilanzen. In M. Kaltschmitt & L. Schebek (Hrsg.): *Umweltberatung für Ingenieure: Methoden und Verfahren*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Schellen, L., Loomans, M., de Wit, M., van Marken Lichtenbelt, W. (2013). The influence of different cooling techniques and gender on thermal perception. *Building Research and Information*, 41(3), 330 – 341.
- Schmidt, F. (2019). *Loudness models examined in the light of findings from loudness judgments and neural loudness correlates*. Dissertation: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- Schmidt, R. F., Lang, F. (2007). *Physiologie des Menschen*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Schneider, S. (2022). *Identifizierung personenbezogener Behaglichkeitsparameter: Einfluss persönlicher Faktoren der Menschen auf die thermische, visuelle, akustische und lufthygienische Wahrnehmung im Innenraum*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit: Technische Universität München.
- Schofield, W. N. (1985). Predicting Basal metabolic rate, new standards and review of previous work. *Human nutrition: Clinical nutrition*, 39 (Suppl 1), 5 – 41.
- Schweiker, M., Hawighorst, M., Wagner, A. (2016). The influence of personality traits on occupant behavioural patterns. *Energy and Buildings*, 131(2016), 63 – 75.
- Schweiker, M., Hellwig, R.T., Völker, C., Moosmann, C., Kalz, D., Pfafferott, J. (2015). Thermische Behaglichkeit. In A. Wagner, G. Höfker, T. Lützkendorf, C. Moosmann, K. Schakib-Ekbatan & M. Schweiker: *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: Empfehlungen für Planung und Betrieb*. Hrsg.: FIZ Karlsruhe Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur; Fraunhofer IRB Verlag; EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen.
- Schweiker, M., Shukuya, M. (2012). Adaptive comfort from the viewpoint of human body exergy consumption. *Building and Environment*, 51(2012), 351 – 360.
- Schweiker, M., Wagner, A. (2015). A framework for an adaptive thermal heat balance model (ATHB). *Building and Environment*, 94(2015), 252 – 262.
- Scientific Committee on Health and Environmental Risks (2007). *Opinion on risk assessment on indoor air quality*. Brüssel: Europäische Kommission.
- Sedlbauer, K., Holm, A., Künzler, H. M., Leistner, P., Breuer, K. (2006). Raumklima und Innovation: Eine Aufgabe der Bauphysik. Dr. Helmut Künzler zum 80. Geburtstag gewidmet. *Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz*, 51(57), 9 – 16.
- Seppänen, O. A., Fisk, W. J. (2014). Summary of human responses to ventilation. *Indoor Air*, 14(Suppl 7), 102 – 118.
- Serrano-Jiménez, A., Lizana, J., Molina-Huelva, M., Barrios-Padura, Á. (2020). Indoor environmental quality in social housing with elderly occupants in Spain: Measurement results and retrofit opportunities. *Journal of Building Engineering*, 30(2020), 101264.
- Shafavi, N. S., Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., Javadi, M. (2020): Occupants visual comfort assessments: A review of field studies and lab experiments. *Solar Energy*, 208(2020), 249 – 274.
- Sharpe, L. T., Stockman, A., Jagla, W., Jägle, H. (2005). A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. *Journal of Vision*, 5(11), 948 – 968.

- Showranek, R. (2017). Lichtplanung. In B. Bielefeld (Hrsg.): *Basics Haustechnik*. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Shpak, M., Kärhä, P., Ikonen, E. (2017). Mathematical limitations of the CIE mesopic photometry system. *Lighting Research and Technology*, 49(1), 111 – 121.
- Shukuya, M. (2009). Exergy concept and its application to the built environment. *Building and Environment*, 44(7), 1545 – 1550.
- Silbernagl, S. (2019). Wer liest schon Einleitungen? In H.-C. Pape, A. Kurtz & S. Silbernagl (Hrsg.): *Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Silbernagl, S., Despopoulos, A. (2012). *Taschenatlas Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Slater, K. (1985). *Human Comfort*. Springfield: Illinois: Charles C Thomas Publisher.
- Smedje, G., Norbäck, D., Edling, C. (1997). Subjective Indoor Air Quality in Schools in Relation to Exposure. *Indoor Air*, 7(2), 143 – 150.
- Smith, V., Pokorny, J. (1975). Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15(2), 161 – 171.
- Smith, R. M. (2005). Evaluation of arterial blood gases and acid-base homeostasis. In R. A. Bordow, A. L. Ries & T. A. Morris (Hrsg.): *Manual of clinical problems in pulmonary medicine*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Snodderly, D. M., Brown, P. K., Delori, F. C., Auran, J. D. (1984). The macular pigment: Absorbance spectra, localization, and discrimination from other yellow pigments in primate retinas. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 25(6), 660 – 673.
- Sperling, A. (2015). Die Candela als Maßeinheit des Lichtes. *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)-Mitteilungen*, 125(4). Berlin, Braunschweig.
- Spitschan, M., Cajochen, C. (2019). Binocular facilitation in light-mediated melatonin suppression? *Journal of Pineal Research*, 67(4), e12602.
- Stanley, P. A., Davis, A. K. (1995). The effect of field of view size of steady-state pupil diameter. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 15(6), 601-603.
- Statistisches Bundesamt (2017). Gesundheitszustand und -relevantes Verhalten: Körpermaße nach Altersgruppen und Geschlecht. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Gesundheitszustand-Relevantes-Verhalten/Tabellen/liste-koerpermasse.html> [14.03.2022]
- Statistisches Bundesamt (2019). Pflegebedürftige (stationär): Deutschland, Stichtag, Pflegegrad. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1646909334910&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&code=22412-0003&auswahltext=&werteabruf=Werteabruf#abreadcrumb> [10.03.2022]
- Statistisches Bundesamt (2021a). Bevölkerung – Zahl der Einwohner in Deutschland nach Altersgruppen am 31. Dezember 2020. Nach Statista (2022) <https://de-statista.com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/1112579/umfrage/bevoelkerung-in-deutschland-nach-altersgruppen/> [10.03.2022]
- Statistisches Bundesamt (2021b). Bildung und Kultur: Allgemeinbildende Schulen. Fachserie 11 Reihe 1. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Schulen/Publicationen/Downloads-Schulen/allgemeinbildende-schulen-2110100217005.xlsx?__blob=publicationFile [10.03.2022]
- Statistisches Bundesamt (2021c). Sozialversicherungspflichtige Beschäftigte am Arbeitsort nach Altersgruppen für Männer, Frauen und Insgesamt am 30. Juni 2021.

- <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/altersgruppen.html> [14.03.2022]
- Statistisches Bundesamt (2022a). Qualität der Arbeit: Wöchentliche Arbeitszeit. Statistisches Bundesamt: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Qualitaet-Arbeit/Dimension-3/woechentliche-arbeitszeitl.html> [10.03.2022]
- Statistisches Bundesamt (2022b). Arbeitsmarkt: Erwerbstätigkeit. https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/_inhalt.html [18.05.2022]
- Stegemann, J., Heinrich, K. W. (1967). Studien über den respiratorischen Totraum bei körperlicher Arbeit und bei künstlicher Beatmung. *Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen*, Nr. 1842. Köln, Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Steinbach, S., Hummel, T., Böhner, C., Berkold, S., Hundt, W., Kriner, M., ...& Harbeck, N. (2009). Qualitative and Quantitative Assessment of Taste and Smell Changes in Patients Undergoing Chemotherapy for Breast Cancer or Gynecologic Malignancies. *Journal of Clinical Oncology*, 27(11), 1899 – 1905.
- Stielow, J. (2015). *Validierung eines mobilen Sensorsystems zur Abschätzung des Energieumsatzes bei Erwachsenen*. Dissertation: Universität Rostock.
- Stiles, W. S., Crawford, B. H. (1933). The luminous Efficiency of Ray Entering the Eye Pupil at Different Points. *Proceedings of the Royal Society of London*, 121(778), 428 – 450.
- Stinson, M., Lawton, B. (1989). Specification of the geometry of the human ear canal for the prediction of sound pressure level distribution. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85(6), 2492 – 2503.
- Stockman, A., Sharpe, L. T. (2006). Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 26(3), 225-239.
- Stolwijk, J. (1971). *A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man*. Nasa Contractor Report CR 1855.
- Stolwijk, J. A. J., Hardy, J. D. (2011). Control of Body Temperature. *Comprehensive Physiology. Supplement 26: Handbook of Physiology, Reactions to Environmental Agents*, 45 – 68.
- Stolwijk, J. A., Hardy, J. D. (1966). Partitioned calorimetric studies of responses of man to thermal transients. *Journal of Applied Physiology*, 21(3), 967 – 977.
- Takada, S., Kobayashi, H., Matsushita, T. (2007). Thermal Model of Human Body Temperature regulation considering individual difference. *Proceedings: Building Simulation 2007*, 725 – 731.
- Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., Konishi, M. (2002). Evaluation of thermal comfort model using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34(6), 637 – 646.
- Tang, H., Ding, Y., Singer, B. (2020b). Interactions and comprehensive effect of indoor environmental quality factors on occupant satisfaction. *Building and Environment*, 167(2020), 106462.
- Tang, H., Ding, Y., Singer, B. C. (2020a). Post-occupancy evaluation of indoor environmental quality in ten nonresidential buildings in Chongqing, China. *Journal of Building Engineering*, 32(2020), 101649.
- Taylor, N. A. S., Gordon, C. J. (2019). The origin, significance and plasticity of the thermoeffector thresholds: Extrapolation between humans and laboratory rodents. *Journal of Thermal Biology*, 85, 102397.
- Taylor, N. A. S., Kondo, N., Kenney, W. L. (2008). The physiology of acute heat exposure, with implications for human performance in the heat. In N. A. S. Taylor & H. Groeller (Hrsg.): *Physiological bases of human performance during work and exercise*. Edinburgh: Elsevier.

- Taylor, N. A. S., Mekjavic, I. B., Tipton, M. J. (2008). The physiology of acute cold exposure, with particular reference to human performance in the cold. In N. A. S. Taylor & H. Groeller (Hrsg.): *Physiological bases of human performance during work and exercise*. 1 ed. Edinburgh: Elsevier.
- Taylor, N. A. S., Nykvist, A., Powers, N., Caldwell, J. N. (2019). Thermoeffector threshold plasticity: The impact of thermal pre-conditioning on sudomotor, cutaneous vasomotor and thermogenic thresholds. *Journal of Thermal Biology*, 83, 37 – 46.
- Thapa, S. (2019). Insights into the thermal comfort of different naturally ventilated buildings of Darjeeling, India – Effect of gender, age and BMI. *Energy and Buildings*, 193(2019), 267 – 288.
- Thapan, K., Arendt, J., Skene, D. J. (2001). An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *Journal of Physiology*, 535(Pt 1), 261 – 267.
- Thibos, L. N., Lopez-Gil, N., Bradley, A. (2018). What is a troland. *Journal of the Optical Society of America*, 35(5), 813 – 816.
- Thiel, D., Riedel, D. (2011). *Typisierte Bauteilaufbauten – Präzisierung der Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Tichelmann, K., Ziegler, B. (2013). Innenausbau. In G. Hausladen & K. Tichelmann (Hrsg.): *Ausbau Atlas: Integrale Planung, Innenausbau, Haustechnik*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Tiller, D., Wang, L. M., Musser, A., Radik, M. (2010). AB-10-017: Combined effects of noise and temperature on human comfort and performance (1128-RP). *Architectural Engineering – Faculty Publications*, 40.
- Tokura, M., Iwata, T., Shukuya, M. (1996). Experimental study on discomfort glare caused by windows: development of a method for evaluating discomfort glare from a large light source. *Journal of Architecture and Planning*, 61(489), 17 – 25.
- Tran, V. V., Park, D., Lee, Y.-C. (2020). Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(8), 2927.
- Trapanotto, M., Benini, F., Farina, M., Gobber, D., Magnavita, V., Zacchello, F., (2004). Behavioural and physiological reactivity to noise in the newborn. *Journal of Pediatrics and Child Health*, 40(5-6), 275 – 281.
- Treede, R. D., Baumgärtner, U. (2019). Das somatosensorische System. In R. Brandes, F. Lang & R. F. Schmidt (Hrsg.): *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. Berlin: Springer Verlag, Springer Nature.
- Troland, L. T. (1917). On the measurement of visual stimulation intensities. *Journal of Experimental Psychology*, 2(1), 1 – 33.
- Turunen, M., Toyinbo, O., Putus, T., Nevalainen, A., Shaughnessy, R., Haverinen-Shaughnessy, U. (2014). Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217(7), 733 – 739.
- Union Investment (2011). Große Räume wecken Unzufriedenheit. Immobilien Zeitung vom 21.04.2011, S.11. Nach Statista (2022), <https://de-statista.com/eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/184025/umfrage/meinung-zu-stoerfaktoren-am-arbeitsplatz-in-bueros/> [10.03.2022]
- Vakalis, D., Touchie, M., Tzekova, E., MacLean, H. L., Siegel, J. A. (2019). Indoor environmental quality perceptions of social housing residents. *Building and Environment*, 150(2019), 135 – 143.
- Vardaxis, N.-G., Bard, D. (2018). Review of acoustic comfort evaluation in dwellings: part II – impact sound data associated with subjective responses in laboratory tests. *Building Acoustics*, 25(2), 171 – 192.

- Vardaxis, N.-G., Bard, D., Waye, K. P. (2018). Review of acoustic comfort evaluation in dwellings – part I: Associations of acoustic field data to subjective responses from building surveys. *Building Acoustics*, 25(2), 151 – 170.
- VDI 2058 Blatt 3 (2014). *Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten*.
- VDI 2569 (2019). *Schallschutz und akustische Gestaltung in Büros*.
- VDI 3882 Blatt 1 (1992). *Olfaktometrie: Bestimmung der Geruchsintensität*.
- VDI 4300 Blatt 7 (2001). *Messen von Innenraumluftverunreinigungen. Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen*.
- VDI 6011 (2016). *Lichttechnik. Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung: Grundlagen und allgemeine Anforderungen*.
- VDI 6022 Blatt 3 (2011). *Raumluftechnik, Raumlufqualität: Beurteilung der Raumlufqualität*.
- Vehviläinen, T., Lindholm, H., Rintamäki, H., Pääkkönen, R., Hirvonen, A., Niemi, O., Vinha, J. (2016). High indoor CO₂ concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO₂ level and sleepiness during cognitive work. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 13(1), 19 – 29.
- Veicsteinas, A., Ferretti, G., Rennie, D. W. (1982). Superficial shell insulation in resting and exercising men in cold water. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 52(6), 1557 – 1567.
- Ventry, I. M., Weinstein, B. E. (1982). The Hearing Handicap Inventory for the Elderly: a New Tool. *Ear and Hearing*, 3 (3), 128 – 134.
- Vischer, J. C. (2005). *Space meets Status: Designing workplace performance*. Oxon: Routledge/Taylor and Francis.
- Vogelsang, B. M., Kunzmann, B. (2015). Beurteilung von Schallimmissionen: Gesetze – Vorschriften – Normen – Richtlinien. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.): *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Von Lotens, W. A. (1993). *Heat Transfer from Humans Wearing Clothing*. Dissertation: Technische Universität Delft.
- Voss, S. E., Horton, N. J., Fairbank, K. E., Xia, L., Tinglin, L. R. K., Girardin, K. D. (2020). Measurements of ear-canal cross-sectional areas from live human ears with implications for wideband acoustic immittance measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 148(5), 3042 – 3051.
- Wagner, A (2015). Komfort und Arbeitsplatzqualität als Ziel der Planung. In A. Wagner, G. Höfker, T. Lützkendorf, C. Moosmann, K. Schakib-Ekbatan & M. Schweiker: *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: Empfehlungen für Planung und Betrieb*. Hrsg.: FIZ Karlsruhe Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur; Fraunhofer IRB Verlag; EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen.
- Wagner, A., Hellwig, R. T., Scherer, C. (2015). Luftqualität in Innenräumen. In A. Wagner, G. Höfker, T. Lützkendorf, C. Moosmann, K. Schakib-Ekbatan & M. Schweiker: *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: Empfehlungen für Planung und Betrieb*. Hrsg.: FIZ Karlsruhe Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur; Fraunhofer IRB Verlag; EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen.
- Wagner, A., Lützenkopf, T. (2015a). Nutzerzufriedenheit planen, bewerten und beeinflussen. In A. Wagner, G. Höfker, T. Lützkendorf, C. Moosmann, K. Schakib-Ekbatan & M. Schweiker: *Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: Empfehlungen für Planung und Betrieb*. Hrsg.: FIZ Karlsruhe Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur; Fraunhofer IRB Verlag; EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen.
- Wagner, A., Lützenkopf, T. (2015b). Nutzerzufriedenheit – eine Heranführung an die Thematik. In A. Wagner, G. Höfker, T. Lützkendorf, C. Moosmann, K. Schakib-Ekbatan & M. Schweiker:

Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: Empfehlungen für Planung und Betrieb. Hrsg.: FIZ Karlsruhe Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur; Fraunhofer IRB Verlag; EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen.

Wald, G. (1945). Human Vision and the Spectrum. *Science*, 101(2635), 653 – 658.

Walh, H.-W., Rott, C. (2002). Konzepte und Definitionen der Hochaltrigkeit. In Deutsches Zentrum für Altersfragen (Hrsg.): *Das hohe Alter – Konzepte, Forschungsfelder, Lebensqualität. Expertisen zum vierten Altenbericht der Bundesregierung.* Hannover: Vincentz Verlag.

Wang, L., Zheng, D. (2020). Integrated analysis of energy, indoor environment, and occupant satisfaction in green buildings using real-time monitoring data and on-site investigation. *Building and Environment*, 182(2020), 107014.

Wang, Z., Li, P., Liu, H., Yang, J., Liu, S., Xue, L. (2021). Objective sound quality evaluation for the vehicle interior noise based on responses of the basilar membrane in the human ear. *Applied Acoustics*, 172(2021), 107619.

Warliah, L., Rohman, A. S., Rusmin, P. H. (2012). Model Development of Air Volume and Breathing Frequency in Human Respiratory System Simulation. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 67(2012), 260 – 268.

Warren, E., Blazier J. (1995). Sound quality consideration in rating noise from heating, ventilating and air-conditioning (HVAC) systems in buildings. *Noise Control Engineering Journal*, 43(3), 53 – 63.

Warren, E., Blazier, J. (1981). Revised noise criterion for application in the acoustical design and rating of HVAC systems. *Noise Control Engineering*, 16(2), 64 – 73.

Watson, A. B., Yellot, J. I. (2012). A unified formula for light adapted pupil size. *Journal of Vision*, 12(10), 1 – 16.

Waye, K. P., Clow, A., Edwards, S., Hucklebridge, F., Pylander, R. (2003). Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality. *Life Sciences*, 72(8), 863 – 875.

Weale, R. A. (1988). Age and the transmittance of the human crystalline lens. *The Journal of Physiology*, 395, 577 – 587.

Wei, W., Wargocki, P., Zirngibl, J., Bendzalova, J., Mandin, C. (2020). Review of parameters used to assess the quality of indoor environment in Green Building certification schemes for offices and hotels. *Energy and Buildings*, 209(2020), 109683.

Weinstein, B. E., Ventry, I. M. (1983). Audiometric Correlates of the Hearing Handicap Inventory for the Elderly. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 48(4), 379 – 384.

Weinstein, N. D. (1978). Individual differences in reactions to noise: A longitudinal study in a college dormitory. *The Journal of applied psychology*, 63(4), 458 – 466.

Weischet, W., Endlicher, W. (2018). *Einführung in die Allgemeine Klimatologie.* Berlin, Stuttgart: Gebr. Borntraeger.

Weiwei, L., Lian, Z., Deng, Q. (2015). Use of mean skin temperature in evaluation of individual thermal comfort for a person in a sleeping posture under steady thermal environment. *Indoor And Built Environment*, 24(4). 489 – 499.

Welsch, N., Liebmann, C. C. (2012). *Farben: Natur Technik Kunst.* Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Wenzel, H., Hauschild, M. Z., Alting, L. (2001). *Environmental assessment of products Volume 1: Methodology, Tools and Case Studies in Product Development.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

- Werner, J. (1984). *Regelung der menschlichen Körpertemperatur*. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Werner, J. (2010). System properties, feedback control and effector coordination of human temperature regulation. *European Journal of Applied Physiology*, 109(1), 13 – 25.
- Werner, J. Mekjavic, I. B., Taylor, N. A. S. (2008). Concepts in physiological regulation: a thermoregulatory perspective. In N. A. S. Taylor & H. Groeller (Hrsg.): *Physiological bases of human performance during work and exercise*. Edinburgh: Elsevier.
- Wienold, J. (2007). Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis. *Proceedings: Building Simulation 2007*, 1197 – 1204.
- Wienold, J. (2009). Dynamic daylight glare evaluation. *Proceedings: Building Simulation 2009*, 944 – 951.
- Wienold, J., Christoffersen, J. (2005). Towards a new daylight glare rating. 10. *Europäischer Lichtkongress*, 157 – 161.
- Wienold, J., Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylighting environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings*, 38 (7), 743 – 757.
- Willems, W. M. (2017). Vorwort zur 7. Auflage. In W. M. Willems (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Winn, B., Whitaker, D., Elliott, D. B., Phillips, N. J. (1994). Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 35(3), 1132 – 1137.
- Winslow, C. -E. A., Gagge, A. P., Herrington, L. P. (1939). The Influence of air movement upon heat losses from the clothed human body. *American Journal of Physiology*, 127(3), 505 – 518.
- Wissler, E. H. (2018). *Human Temperature Control: A quantitative Approach*. Berlin Heidelberg Springer Verlag.
- Witting, W. (2014). *Licht. Sehen. Gestalten.: Lichttechnische und wahrnehmungsphysiologische Grundlagen für Architekten und Lichtdesigner*. Basel: Birkhäuser.
- Wölki, D. (2017). *MORPHEUS: Modelica-Based Implementation of a Numerical Human Model Involving Individual Human Aspects*. Dissertation: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Wölki, D., Brüntjen, M. A., Schmidt, C., Treeck, C. van, Alban, C. (2014). A dynamic index for transient thermal comfort prediction. *BauSIM 2014: Human centred building(s); 5th German-Austrian Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 38 – 47.
- Wong, L. T., Mui, K. W., Hui, P. S. (2008). A multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices. *Building and Environment*, 43(2008), 1 – 6.
- Wong, S.-K., Lai, L., W.-C., Ho, D. C.-W., Chau, K.-W., Lam, C., L.-K., Ng, C. H.-F. (2009). Sick building syndrome and perceived indoor environmental quality: A survey of apartment buildings in Hong Kong. *Habitat International*, 33 (4), 463 – 471.
- Wong, S.-K., Lai, L. W.-C., Ho, D. C.-w., Chau, K.-W., Lam, C. L.-K., Ng, C. H.-F. (2009). Sick building syndrome and perceived indoor environmental quality: A survey of apartment buildings in Hong Kong. *Habitat International*, 33(4), 463 – 471.
- Wood, B., Rea, M. S., Plitnick, B., Figueiro, M. C. (2013). Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression. *Applied Ergonomics*, 44(2), 237 – 240.
- Wu, H., Wu, Y., Sun, X., Liu, J. (2020a). Combined effects of acoustic, thermal, and illumination on human perception and performance: A review. *Building and Environment*, 169(2020), 106593.
- Wu, Y., Kang, J., Zheng, W., Wu, Y. (2020b). Acoustic comfort in large railway stations. *Applied Acoustics*, 160(2020), 107137.

- Wyszecki, G., Stiles, W. S. (1982). *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. Canada: John Wiley and Sons.
- Xu, H. (1984). Color-rendering capacity of illumination. *Journal of Illuminating Engineering Society*, 13(2), 270 – 276.
- Xu, H., (1983). Color-rendering capacity of illumination. *Journal of the Optical Society of America*, 73(12), 1709 – 1713.
- Xu, H., Huang, Q., Zhang, Q. (2018). A study and application of the degree of satisfaction with indoor environmental quality involving a building space factor. *Building and Environment*, 143(2018), 227 – 239.
- Xu, J., Pokorny, J., Smith, V. C. (1997). Optical density of the human lens. *Journal of the Optical Society of America*, 14(5), 953 – 960.
- Yaghoubi, K., Alimohammadi, I., Abolghasemi, J., Shandiz, M. S., Aboutaleb, N., Ebrahimi, H. (2020). The relationship between noise annoyance and salivary cortisol. *Applied Acoustics*, 160(2020), 107131.
- Yaglou, C. P. (1927). The comfort zone for men at rest and stripped to the waist. *Journal of Industrial Hygiene*, 9, 251 – 236.
- Yaglou, C. P. (1947). A method for improving the effective temperature index. *Heating, Piping and Air Conditioning*, 19(9), 131 – 133.
- Yaglou, C. P., Minaed, D. (1957). Control of Heat Casualties at Military Training Centers. *Archives of Industrial Health*, 16(4), 302 – 316.
- Yamtraipat, N., Khedari, J., Hirunlabh, J. (2005). Thermal comfort standards for air-conditioned buildings in hot and humid Thailand considering additional factors of acclimatization and education level. *Solar Energy*, 78(4), 504 – 517.
- Yang, J., Shi, J., Cai, H., Shen, C., Yan, L. (2012). The gender differences in distraction of background music and noise on the cognitive task performance. *8th International Conference on natural Computation (ICNC 2012)*, 584 – 587.
- Yang, W., Moon, H. J. (2018a). Cross-modal effects of noise and thermal conditions on indoor environmental perception and speech recognition. *Applied Acoustics*, 141(2018), 1 – 8.
- Yang, W., Moon, H. J. (2018b). Cross-modal effects of illuminance and room temperature on indoor environmental perception. *Building and Environment*, 146(2018), 280- 288.
- Yang, W., Moon, H. J. (2018c). Combined effects of sound and illuminance on indoor environmental perception. *Applied Acoustics*, 141(2018), 136 – 144.
- Yang, W., Moon, H. J. (2019). Combined effects of acoustic, thermal, and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment. *Building and Environment*, 148 (2019), 623 – 633.
- Yang, W., Moon, H. J., Kim, M.-J. (2018). Combined effects of short-term noise exposure and hygrothermal conditions on indoor environmental perceptions. *Indoor and Build Environment*, 27(8), 1119 – 1133.
- Yao, R., Li, B., Lui, J. (2009). A theoretical adaptive model of thermal comfort – Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and Environment*, 44(10), 2089 – 2096.
- Ye, W., Zhang, X., Gao, J., Cao, G., Zhou, X., Su, X. (2017). Indoor air pollutants, ventilation rate determinants and potential control strategies in Chinese dwellings: A literature review. *Science of the Total Environment*, 586(2017), 696 – 729.
- Young, C. R., Jones, G. E., Figueiro, M. G., Soutière, S. E., Keller, M. W., Richardson, A. M., ...& Rea, M. S. (2015). At-Sea Trial of 24-h-Based Submarine Watchstanding Schedules with High and Low Correlated Color Temperature Light Sources. *Journal of Biological Rhythms*, 30(2), 144 – 154.

- Zalejska-Jonsson, A., Wilhelmsson, M. (2013). Impact of perceived indoor environment quality on overall satisfaction in Swedish dwellings. *Building and Environment*, 63(2013), 134 – 144.
- Zängler, T. (2021). *Darstellung aktueller Forschungsarbeiten zum Thema Auswirkung der akustischen Umgebung auf den Komfort eines Menschen: Physiologische Ansätze im Überblick*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit: Technische Universität München.
- Zhang, H., Huizenga, C., Arens, E., Yu, T. (2001). Considering individual physiological differences in a human thermal model. *Journal of Thermal Biology*, 26(4), 401 – 408.
- Zhang, H., Srinivasan, R. (2020). A Systematic Review of Air Quality Sensors, Guidelines, and Measurement Studies for Indoor Air Quality Management. *Sustainability*, 12(21), 9045.
- Zhang, H., Yang, R., You, S., Zheng, W., Zheng, X., Ye, T. (2018). The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation. *Building and Environment*, 134(2018), 1 – 9.
- Zhang, S., Zhu, N. (2022). Gender differences in thermal responses to temperature ramps in moderate environments. *Journal of Thermal Biology*, 103(2022), 103158.
- Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z. (2016a). Physiological responses during exposure to carbon dioxide and bioeffluents at levels typically occurring indoors. *Indoor Air*, 27(1), 65 – 77.
- Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z. (2016b). Human responses to carbon dioxide, a follow-up study at recommended exposure limits in non-industrial environments. *Building and Environment*, 100(2016), 162 – 171.
- Zhao, Q., Lian, Z., Lai, D. (2021). Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy and Build Environment*, 2(1), 21 – 33.
- Zhu, C., Li, N. (2017). Study on indoor air quality evaluation index based on comfort evaluation experiment. *Procedia Engineering*, 205(2017), 2246 – 2253.
- Ziegler, P. (2020). Messung des Säure-Basen-Status. In F. Horn (Hrsg.): *Biochemie des Menschen*. Stuttgart: Thieme.
- Zielke, N. (2020). *Wohnkultur im Alter: Eine qualitative Studie zum Übergang ins Altenheim*. Bielefeld: transcript Verlag.
- Zuhaib, S., Manton, R., Griffin, C., Hajdukiewicz, M., Keane, M. M., Goggins, J. (2018). An Indoor Environmental Quality (IEQ) assessment of a partially-retrofitted university building. *Building and Environment*, 139 (2018), 69 – 85.

Anhangsverzeichnis

Angang A	Überprüfung dynamischer <i>Set-Points</i> zur Bestimmung der Durchblutungsrate
Anhang B	Emissionsspektren von verschiedenen Lichtquellen
Anhang C	Bestimmung der Schallintensität am Trommelfell nach Gambin (2019)
Anhang D	<i>Hearing Handicap Inventory for the elderly / for adults</i> (Ventry & Weintsein, 1982; Newman et al., 1990)
Anhang E	Wärmeisolierung für ausgewählte Kleidungsstücke (DIN EN ISO 9920, 2009)
Anhang F	Fragebogen zur Bestimmung der individuellen Sachbilanzparameter

Anhang A – Überprüfung dynamischer *Set-Points* zur Bestimmung der Durchblutungsrate

In Tabelle 24 werden die Durchblutungsrate, der Gewichtungsfaktor und die mittlere Körpertemperatur für die nach Gagge, Stolwijk und Nishi (1971) vorgegeben Temperaturwerte sowie die veränderten Schwellenwerte nach Li et al. (2017), Takada, Kobayashi und Matsushita (2007) sowie Wölki (2017) verglichen. In einem ersten Versuch wird von einer vorhandenen Hauttemperatur von 34 °C und einer Körperkerntemperatur von 37 °C ausgegangen.

Tabelle 24: Berechnung der Durchblutungsrate für unterschiedliche *Set-Points*

Hauttemperatur <i>Set-Point</i> [°C]	Körperkerntemperatur <i>Set-Point</i> [°C]	Durchblutungsrate [L/m ² h]	Gewichtungsfaktor [-]	Mittlere Körpertemperatur [°C]
33.70	36.80	46.30	0.06	36.82
34.14 ^a	36.94 ^a	17.51	0.09	36.73
33.80 ^a	36.67 ^a	72.30	0.05	36.85
32.70 ^b	36.10 ^b	186.30 > 90	0.05	36.85
32.30 ^b	36.90 ^b	26.30	0.07	36.79
32.10 ^b	36.70 ^b	66.30	0.05	36.85
33.10 ^b	37.10 ^b	6.30	0.17	36.49
34.40 ^c	37.00 ^c	6.30	0.17	36.49
34.42 ^c	36.89 ^c	24.63	0.07	36.79
34.43 ^c	36.83 ^c	34.28	0.06	36.82

^aLi et al. (2017); ^bTakada, Kobayashi und Matsushita (2007); ^cWölki (2017) nach Fiala, Lomas & Stohrer (1999) und Paulke & Wagner (2007)

In jeder der betrachteten Studien wurden unterschiedliche Umgebungs- und Personenbedingungen berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Werte für die thermische Neutralität sich unter den hier angenommen Bedingungen ebenfalls verändern können. An dieser Stelle ging es lediglich darum darzustellen, wie groß der Einfluss der von den als durchschnittlich angenommen Schwellenwerten auf die anschließende Temperaturbewertung sein kann. Dabei zeigt sich sehr deutlich, dass sämtliche Daten auf einen Zustand der Vasodilatation hindeuten. Lediglich zwei Beispiele führen zu einem Zustand, der als thermisch neutral bewertet wird, da hier der Schwellenwert, der für die Körperkerntemperatur angesetzt wurde, nicht überschritten wird und somit kein erhöhter Blutfluss stattfindet. Bei näherer Betrachtung der Versuchsperson in Studie (b), fällt auf, dass diese im Vergleich zu den restlichen Versuchspersonen eine deutlich größere Körperoberfläche haben, und zusätzlich die Herzfrequenz während des Testversuchs geringer war gegenüber den anderen Testpersonen. Die Herzrate schwankte zwischen 40 und 60 Schlägen pro Minute, dagegen lag sie bei den übrigen Personen zwischen 60 und etwas über 100 Schlägen pro Minute. Bei der simulierten Person in Studie (c) lässt sich kein offensichtlicher Grund erkennen, warum der Schwellenwert für die Körperkerntemperatur höher liegt, als bei den

Vergleichspersonen. Anzumerken ist, dass die Werte für die Hauttemperatur in Studie (c) deutlich höher liegen als sämtliche andere Temperaturen, da hier unbedeckte Personen berücksichtigt wurden. Somit brauchen die betrachteten Personen für einen thermisch neutralen Zustand entsprechend höhere Hauttemperaturen.

Anhang B – Emissionsspektren von verschiedenen Lichtquellen

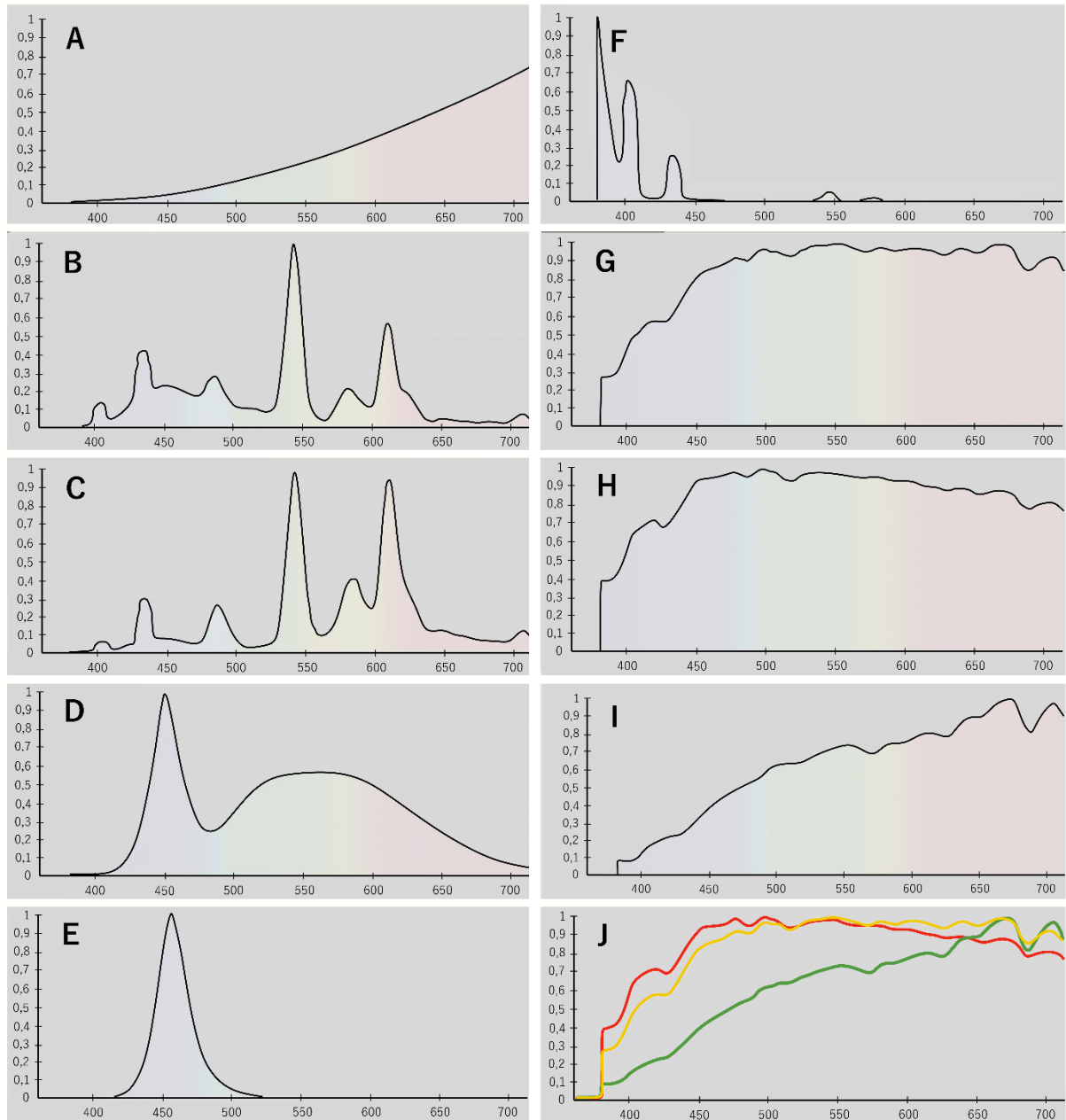


Abbildung 173: Emissionsspektren von verschiedenen Lichtquellen: (A) Glühbirne; (B) weiße Leuchtstofflampe; (C) Energiesparlampe; (D) weiße LED-Glühbirne; (E) blaue LED-Glühbirne; (F) schwarze LED-Glühbirne; (G) Sonnenlicht am Morgen; (H) Sonnenlicht am Mittag; (I) Sonnenlicht bei Sonnenuntergang; und (J) Vergleich von Sonnenlicht am Mittag (rot), am Morgen (gelb) und bei Sonnenuntergang (grün). (Abdel-Rahman et al., 2017)

Anhang C – Bestimmung der Schallintensität am Trommelfell nach Gambin (2019)

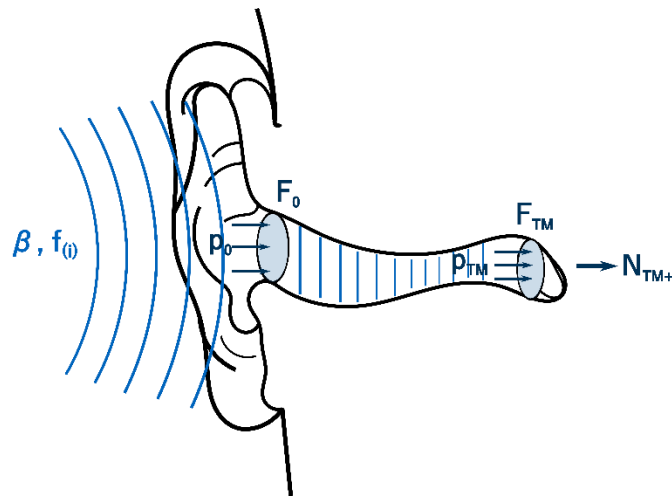


Abbildung 174: Bewegung einer Schallwelle durch das Außenohr (Gambin, 2019)

In diesem Modell wird davon ausgegangen, dass eine Schallwelle mit einer gegebenen Frequenz und einem gegebenen Schalldruckpegel auf die äußere Öffnung vom Gehörgang trifft. Die Intensität des Schalls I_0 an dieser Stelle errechnet sich aus dem gegebenen Schalldruck und dem Referenzschalldruck I^* von 10^{-15} N/(mm s).

$$I_0 = I^* \times 10^{\frac{\beta}{10}} \left[\frac{N}{mm \times s} \right] \quad (98)$$

Wenn die Querschnittsfläche des Eingangs des Gehörgangs F_0 sowie die Querschnittsfläche an der äußeren Seite des Trommelfells F_{TM} bekannt sind, kann auf der Grundlage der berechneten Intensität ebenfalls die Intensität des Schalls am Trommelfell bestimmt werden. Gambin (2019) nennt für die Querschnittsfläche am Eingang des Ohrs einen Standardwert von 35 mm^2 und für die, sich in der Tiefe des äußeren Gehörgangs, reduzierende Fläche einen Wert von 9.85 mm^2 . Die Schallintensität an dieser Stelle I_{TM-} ergibt sich damit aus der Eingangsintensität und dem Verhältnis der Ausgangsquerschnittfläche zur reduzierten Querschnittsfläche.

$$I_{TM-} = I_0 \frac{F_0}{F_{TM}} \left[\frac{N}{mm \times s} \right] \quad (99)$$

Um die am Trommelfell auftreffende Kraft bestimmen zu können, wird zusätzlich die Amplitude des Schalldrucks p_0 benötigt. Hierzu werden die beiden umgebungsabhängigen Parameter der Luftdichte und der Schallgeschwindigkeit in der Luft benötigt. Unter der Annahme von 20 °C hat die Luft eine Dichte ρ_0 von $1.2 \cdot 10^{-6} \text{ g/mm}^3$ und die Schallgeschwindigkeit c_s beträgt $0.3438 \cdot 10^6 \text{ mm/s}$.

$$p_0 = \sqrt{2 \rho_0 c_s I_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (100)$$

Aus der Schallintensität am Trommelfell lässt sich wiederum die Leistung der Schallwelle und die korrespondierende Amplitude an dieser Stelle des Gehörgangs bestimmen. Für die resultierende Kraft N_{TM} , welche auf das Trommelfell wirkt, reicht es jedoch aus, lediglich die Amplitude des Schalldrucks am Trommelfell p_{TM} zu bestimmen.

$$p_{TM} = \sqrt{2 \rho_0 c_s I_{TM-}} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (101)$$

$$N_{TM-} = p_{TM} \times F_{TM} [N] \quad (102)$$

Somit lässt sich die am Trommelfell ankommende Kraft zwar mathematisch bestimmen; diese berücksichtigt jedoch lediglich den Schalldruck als Auslöser und nicht die Frequenz des Schallereignisses. Diese Frequenz wird erst bei der Verarbeitung des Schalls im Mittelohr relevant.

Anhang D – Hearing Handicap Inventory for the elderly / for adults (Ventry & Weintsein, 1982; Newman et al., 1990)

S – 1	Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie das Telefon seltener benutzen, als Sie möchten?
E – 2	Fühlen Sie sich aufgrund eines Hörproblems unwohl, wenn Sie neue Leute treffen?
S – 3	Vermeiden Sie aufgrund eines Hörproblems Gruppen von Menschen?
E – 4	Macht ein Hörproblem Sie reizbar?
E – 5	Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie sich frustriert fühlen, wenn Sie mit Familienmitgliedern sprechen?
S – 6	Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten bei der Teilnahme an einer Feier?
E – 7	Verursacht ein Hörproblem bei Ihnen das Gefühl, "dumm" oder "blöd" zu sein? (HHIE) Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie sich bei Gesprächen mit Kollegen oder Kunden frustriert fühlen? (HHIA)
S – 8	Haben Sie Schwierigkeiten zu hören, wenn jemand im Flüsterton spricht? (HHIE) Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten im Kino oder Theater? (HHIA)
E – 9	Fühlen Sie sich durch ein Hörproblem behindert?
S – 10	Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten, wenn Sie Freunde, Verwandte oder Nachbarn besuchen?
S – 11	Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie seltener an religiösen Veranstaltungen teilnehmen, als Sie es gerne würden? (HHIE) Haben Sie aufgrund eines Hörproblems Schwierigkeiten, Mitarbeiter oder Kunden zu hören/zu verstehen? (HHIA)
E – 12	Verursacht ein Hörproblem bei Ihnen Nervosität?
S – 13	Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie Freunde, Verwandte oder Nachbarn seltener besuchen, als Sie es gerne würden?
E – 14	Führt ein Hörproblem zu Streit mit Familienmitgliedern?
S – 15	Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten beim Hören von Fernseher oder Radio?
S – 16	Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie weniger oft einkaufen gehen, als Sie es gerne würden?
E – 17	Stört Sie ein Problem oder eine Schwierigkeit mit Ihrem Gehör im Allgemeinen?
E - 18	Verursacht ein Hörproblem bei Ihnen den Wunsch, allein zu sein?
S – 19	Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie seltener mit Familienmitgliedern sprechen, als Sie es gerne würden?
E – 20	Haben Sie das Gefühl, dass Schwierigkeiten mit Ihrem Gehör Ihr persönliches oder soziales Leben einschränken oder behindern?
S – 21	Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten, wenn Sie mit Verwandten oder Freunden in ein Restaurant gehen?
E – 22	Verursacht ein Hörproblem bei Ihnen eine Niedergeschlagenheit?
S – 23	Verursacht ein Hörproblem, dass Sie weniger oft fernsehen oder Radio hören, als Sie es gerne würden?
E – 24	Fühlen Sie sich aufgrund eines Hörproblems unwohl, wenn Sie sich mit Freunden unterhalten?
E - 25	Fühlen Sie sich aufgrund eines Hörproblems ausgeschlossen, wenn Sie mit einer Gruppe von Menschen zusammen sind?

Anhang E – Wärmeisolierung für ausgewählte Kleidungsstücke (DIN EN ISO 9920, 2009)

Kleidungsstück	I _{clu} [clo]	Kleidungsstück	I _{clu} [clo]
Unterwäsche		Jacken	
Unterhose	0.03	Leichte Sommerjacke	0.25
Unterhose mit langem Bein	0.1	Jacke	0.35
Damenunterhemd	0.04	Kittel	0.3
Unterhemd T-Shirt Form	0.09	Hochisolierende Kleidung / Webpelz	
Unterhemd mit langem Arm	0.12	Arbeitskombination	0.9
Unterhose und BH	0.03	Hose	0.35
Hemden / Blusen		Jacke	0.4
kurzer Arm	0.15	Weste	0.2
leichter Stoff, langer Arm	0.2	Straßenbekleidung	
üblicher Stoff, langer Arm	0.25	Mantel	0.6
Flanellhemd, langer Arm	0-3	Jacke mit Daunenfüllung	0.55
Bluse, leichter Stoff, langer Arm	0.15	Anorak	0.7
Hosen		Latzhose, Webpelz	0.55
Shorts	0.06	Verschiedenes	
leichter Stoff	0.2	Socken	0.02
Normalstoff	0.25	Socken knöchellang, dick	0.05
Flanell	0.28	Socken lang, dick	0.1
Kleider / Röcke		Nylonstrümpfe	0.03
leichter (Sommer-)Rock	0.15	Schuhe, dünne Sohle	0.02
schwerer (Winter-)Rock	0.25	Schuhe, dicke Sohle	0.04
leichtes Kleid mit kurzen Armen	0.2	Stiefel	0.1
Winterkleid mit langem Arm	0.4	Handschuhe	0.05
Arbeitskombination	0.55	Langes Nachthemd, leichter Stoff	0.29
Pullover		Langes Nachthemd, schwerer Stoff	0.46
Weste, ärmellos	0.12	Kurzes Nachthemd	0.21
Pullover, dünn	0.2	Krankenhausnachthemd	0.31
Pullover	0.28	Morgenmantel lang	0.68
Pullover, dick	0.35	Morgenmantel kurz	0.41
		Strumpfhose	0.02

Anhang F – Fragebogen zur Bestimmung der individuellen Sachbilanzparameter

Kennzeichnen Sie Ihre **Position** im Raum.

Nennen Sie Ihr **Alter**.

Nennen Sie Ihr **Geschlecht**.

Nennen Sie Ihr **Gewicht**.

Nennen Sie Ihre **Größe**.

Bestimmung des Hörvermögens	JA	GELEGENTLICH	NEIN
Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie das Telefon seltener benutzen, als Sie möchten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fühlen Sie sich aufgrund eines Hörproblems unwohl, wenn Sie neue Leute treffen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vermeiden Sie aufgrund eines Hörproblems Gruppen von Menschen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Macht ein Hörproblem Sie reizbar?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie sich frustriert fühlen, wenn Sie mit Familienmitgliedern sprechen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten bei der Teilnahme an einer Feier?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie sich bei Gesprächen mit Kollegen oder Kunden frustriert fühlen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten im Kino oder Theater?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fühlen Sie sich durch ein Hörproblem behindert?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten, wenn Sie Freunde, Verwandte oder Nachbarn besuchen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Haben Sie aufgrund eines Hörproblems Schwierigkeiten, Mitarbeiter oder Kunden zu hören/zu verstehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verursacht ein Hörproblem bei Ihnen Nervosität?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie Freunde, Verwandte oder Nachbarn seltener besuchen, als Sie es gerne würden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Führt ein Hörproblem zu Streit mit Familienmitgliedern?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten beim Hören von Fernseher oder Radio?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie weniger oft einkaufen gehen, als Sie es gerne würden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stört Sie ein Problem oder eine Schwierigkeit mit Ihrem Gehör im Allgemeinen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verursacht ein Hörproblem bei Ihnen den Wunsch, allein zu sein?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Führt ein Hörproblem dazu, dass Sie seltener mit Familienmitgliedern sprechen, als Sie es gerne würden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Haben Sie das Gefühl, dass Schwierigkeiten mit Ihrem Gehör Ihr persönliches oder soziales Leben einschränken oder behindern?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bereitet Ihnen ein Hörproblem Schwierigkeiten, wenn Sie mit Verwandten oder Freunden in ein Restaurant gehen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verursacht ein Hörproblem bei Ihnen eine Niedergeschlagenheit?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verursacht ein Hörproblem, dass Sie weniger oft fernsehen oder Radio hören, als Sie es gerne würden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fühlen Sie sich aufgrund eines Hörproblems unwohl, wenn Sie sich mit Freunden unterhalten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fühlen Sie sich aufgrund eines Hörproblems ausgeschlossen, wenn Sie mit einer Gruppe von Menschen zusammen sind?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wählen Sie Ihre aktuelle Aktivität. (Einfachauswahl)	
Ruhezustand, Liegen	<input type="checkbox"/>
Liegen	<input type="checkbox"/>
Ruhezustand, Sitzen	<input type="checkbox"/>
Ruhezustand, Stehen	<input type="checkbox"/>
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	<input type="checkbox"/>
Leichte Tätigkeit im Stehen (Einkaufen, Labor, Leichtindustrie)	<input type="checkbox"/>
Mäßig schwere Tätigkeit (Verkäufer, Hausarbeit, Arbeit an Maschinen)	<input type="checkbox"/>

Wählen Sie Ihre aktuelle Bekleidung. (Mehrfachauswahl)

Unterwäsche

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| Unterhose | <input type="checkbox"/> |
| Unterhose mit langem Bein | <input type="checkbox"/> |
| Damenunterhemd | <input type="checkbox"/> |
| Unterhemd T-Shirt Form | <input type="checkbox"/> |
| Unterhemd mit langem Arm | <input type="checkbox"/> |
| Unterhose und BH | <input type="checkbox"/> |

Hemden / Blusen

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Kurzer Arm | <input type="checkbox"/> |
| Leichter Stoff, langer Arm | <input type="checkbox"/> |
| Üblicher Stoff, langer Arm | <input type="checkbox"/> |
| Flanellhemd, langer Arm | <input type="checkbox"/> |
| Bluse, leichter Stoff, langer Arm | <input type="checkbox"/> |

Hosen

- | | |
|----------------|--------------------------|
| Shorts | <input type="checkbox"/> |
| Leichter Stoff | <input type="checkbox"/> |
| Normalstoff | <input type="checkbox"/> |
| Flanellhemd | <input type="checkbox"/> |

Kleider / Röcke

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Leichter (Sommer-)Rock | <input type="checkbox"/> |
| Schwerer (Winter-)Rock | <input type="checkbox"/> |
| Leichtes Kleid mit kurzen Armen | <input type="checkbox"/> |
| Winterkleid mit langen Armen | <input type="checkbox"/> |
| Arbeitskombination | <input type="checkbox"/> |

Pullover

- | | |
|-----------------|--------------------------|
| Weste, ärmellos | <input type="checkbox"/> |
| Pullover, dünn | <input type="checkbox"/> |
| Pullover | <input type="checkbox"/> |
| Pullover, dick | <input type="checkbox"/> |

Jacken

Leichte Sommerjacke

Jacke

Kittel

Hochisolierende Kleidung / Webpelz

Arbeitskombi

Hose

Jacke

Weste

Straßenkleidung

Mantel

Jacke mit Daunenfüllung

Anorak

Latzhose, Webpelz

Verschiedenes

Socken

Socken knöchellang, dick

Socken lang, dick

Nylonstrümpfe

Schuhe, dünne Sohle

Schuhe, dicke Sohle

Stiefel

Handschuhe

Langes Nachthemd, leichter Stoff

Langes Nachthemd, schwerer Stoff

Kurzes Nachthemd

Krankenhausthemd

Morgenmantel lang

Morgenmantel kurz

Strumpfhose

Wählen Sie die passende Beschreibung für Ihr **visuelles Blickfeld**.

Nahes fokussiertes Feld

Entferntes weites Feld

Fläche des Blickfeldes
(Anzugeben durch den Studienersteller)

.....