

Ökologische Bewertung des Denkmalschutzes von Hochhäusern der Nachkriegszeit

Parameterstudie von invasiven und nicht invasiven Maßnahmen am Beispiel des Hahn-Hochhauses

Masterthesis im Studienfach Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen
Technische Universität München (TUM)
TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Jonathan Woytowicz

Betreuer: Sebastian Koth M. Sc.
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

München, den 31. März 2023

Eigenständigkeitserklärung zur Masterthesis

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Quellen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

Die Arbeit wurde noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt.

München, den 31. März 2023

.....

Jonathan Woytowicz

Zusammenfassung

Der Bausektor ist in Deutschland einer der Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen und trägt damit maßgeblich zur Erderwärmung bei. Damit die Emissionen reduziert werden können, ist es zwingend notwendig, Bestandsgebäude zu sanieren. Bestandsgebäude aus der Nachkriegszeit zählen dabei zu den größten Emittenten von Treibhausgasen. Eine Herausforderung bei der Sanierung dieser Gebäude kann dabei der Denkmalschutz darstellen.

Bisher werden Sanierungsmaßnahmen oftmals auf Grund von Aspekten des Denkmalschutzes nicht durchgeführt oder es wird die Gebäudehülle saniert und denkmalpflegerische Aspekte werden, durch die Veränderung des Erscheinungsbildes der Gebäude, vernachlässigt. Die Diskussion erfolgt dabei auf einer qualitativen Ebene. Ein Aspekt, der in dieser Diskussion bisher kaum berücksichtigt wird, ist die quantitative ökologische Bewertung von Denkmalschutz. Hieraus ergibt sich die folgende Forschungsfrage:

Welchen ökologischen Einfluss haben denkmalschutzbezogene invasive und nicht invasive Maßnahmen auf Bürohochhäuser der Nachkriegszeit?

Auf Basis dieser Forschungsfrage wird folgende Hypothese aufgestellt:

Denkmalschutzbezogene nicht invasive Maßnahmen haben bei der Betrachtung eines Bürohochhauses der Nachkriegszeit ein geringeres Treibhauspotential als invasive Maßnahmen.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage und Überprüfung der Hypothese wurde eine energetisch-thermische Gebäudesimulation eines denkmalgeschützten Bürohochhauses aus der Nachkriegszeit durchgeführt. Dort wurden zunächst einzelne Sanierungsmaßnahmen und Veränderungen der gebäudetechnischen Einstellungen in das Modell implementiert und simuliert. Darauf aufbauend wurden die einzelnen Maßnahmen, getrennt in invasive und nicht invasive Varianten, miteinander kombiniert. Für diese Varianten wurde anschließend eine Ökobilanzierung durchgeführt. Hier wurden Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb, die durch Strom und Fernwärme verursacht werden, und aus der Herstellungsphase, der für die einzelnen Maßnahmen notwendigen Materialien berücksichtigt. Als Wirkungskategorie wurde dabei das Treibhauspotential verwendet.

Die Hypothese konnte nur teilweise bestätigt werden. So kann bei der nicht invasiven Variante das Treibhauspotential, über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren, im Vergleich zum Ist-Zustand um ca. 35 % reduziert werden. Für die invasive Variante liegt dieser Wert bei ca. 59 %. In beiden Varianten werden dabei Einstellungen an der Gebäudetechnik vorgenommen; bei der invasiven Variante wird zusätzlich die Außenhülle des Gebäudes saniert. Wird ausschließlich die Außenhülle des Gebäudes saniert, liegt die Reduktion des Treibhauspotentials bei 28 %.

Abstract

The building sector is one of the main sources of greenhouse gas emissions in Germany and thus contributes significantly to global warming. To reduce emissions, it is essential to renovate existing buildings. Buildings from the post-war period are among the largest emitters of greenhouse gases. A challenge in the renovation of these buildings can be heritage protection.

In the past, refurbishment measures have often not been carried out due to the protection of historical monuments. In the case that the building envelope is refurbished, important aspects of monument preservation are neglected by changing the appearance of the buildings. So far, this discussion has mostly been conducted on a qualitative level. One aspect that has hardly been considered in this discussion is the ecological assessment of heritage protection. This leads to the following research question:

What is the ecological impact of heritage protection-related invasive and non-invasive measures on post-war office high-rise buildings?

Based on this research question, the following hypothesis is formulated:

Non-invasive measures related to heritage protection have a lower global warming potential than invasive measures when considering a post-war office high-rise.

To answer the research question and test the hypothesis, an energetic-thermal building simulation of a heritage-protected office tower from the post-war period was carried out. There, individual renovation measures and changes to the building's technical settings were first implemented and simulated in the model. Based on this, the individual measures were combined with each other, separated into invasive and non-invasive variants. A life cycle assessment was then carried out for these variants. Here, greenhouse gas emissions caused by electricity and district heating, as well as those from the production phase of each individual measure's materials, were considered. The global warming potential was used as the impact category.

The results indicate that the hypothesis can only be partially confirmed. In the case of the non-invasive variant, the global warming potential can be reduced by approx. 35% over a period of 40 years compared to the status quo. For the invasive variant, this value is approx. 59 %. In both variants, adjustments are made to the building technology. In the invasive variant, additional measures are carried out to renovate the envelope of the building. However, if only the envelope of the building is renovated, the reduction of the global warming potential is 28 %.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Glossar	V
1 Einleitung	1
1.1 Relevanz des Themas	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage	2
1.3 Methodik	3
1.4 Aufbau der Arbeit	4
1.5 Limitation	5
2 Stand der Forschung	7
2.1 Klimarelevanz	7
2.1.1 Ökobilanzierung	7
2.1.2 Treibhauspotential	10
2.2 Innenraumkomfort	11
2.2.1 Grundlagen	11
2.2.2 Auslegung und Anforderungen nach aktueller Norm	13
3 Thermisch-energetische Gebäudesimulation des Hahn-Hochhauses	18
3.1 Vorstellung des Hahn-Hochhauses	18
3.2 Modellierung und Simulation des Ist-Zustandes	19
3.2.1 Getroffene Annahmen	20
3.2.2 Ergebnisse des Ist-Zustandes	21
3.2.3 Ermittlung der kritischen Zone	23
3.3 Vorstellung der einzelnen Maßnahmen	25
3.4 Auswertung der Maßnahmen	32
3.4.1 Ergebnisse der einzelnen Maßnahmen	33
3.4.2 Kombination der Maßnahmen	38

4 Ökobilanzierung der Maßnahmenkombinationen	42
4.1 Ziel- und Untersuchungsrahmen	42
4.2 Sachbilanz	44
4.3 Wirkungsabschätzung	45
4.4 Auswertung	47
4.5 Sensitivitätsanalyse	54
5 Diskussion	57
6 Fazit und Ausblick	63
7 Literaturverzeichnis	65
Anhangsverzeichnis	72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lebenszyklusphasen für die Ökobilanzierung nach der DIN EN 15643:2021-12 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021d, S. 31)	9
Abbildung 2: Komforttemperatur mit zugelassenem Toleranzbereich; Gestrichelte Linie: Komfortraumtemperatur abhängig von der Außentemperatur; Durchgezogene Linie: Zugelassener Toleranzbereich +/- 2K nach der DIN EN 16798-1:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a).....	14
Abbildung 3: Einzuhaltende operative Innentemperatur mit Grenzwerten für Gebäude ohne maschinelle Kühlung nach der DIN EN 16798-1:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)	15
Abbildung 4: Sommerklimaregionen in Deutschland nach der DIN 4108-2:2013-02 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)	16
Abbildung 5: Ansicht Ostfassade vom Hahn-Hochhaus (eigene Aufnahme).....	19
Abbildung 6: Simulationsergebnis für den monatlichen Energiebedarf des Hahn-Hochhauses.....	22
Abbildung 7: Vergleich der operativen Temperaturen in den Zonen 12.02 und 2.16 mit der Außentemperatur über den Jahresverlauf	24
Abbildung 8: Zone 12.02 im 12. OG des Hahn-Hochhauses (rot markiert)	24
Abbildung 9: Verteilung der PMV-Werte während der Belegungszeit in der Zone 12.02	25
Abbildung 10: Beispielhafter Vergleich der strahlungsgesteuerten und temperaturgesteuerten Aktivierung des Sonnenschutzes in Abhängigkeit der operativen Temperatur am Beispiel eines südwestorientierten Fensters in der Zone 12.02; 0 = inaktiver Sonnenschutz und 1 = vollständig aktiver Sonnenschutz.....	31
Abbildung 11: Vergleich der Klimadaten im Ist-Zustand und anhand einer ausgewählten Maßnahme	33
Abbildung 12: Vergleich der verschiedenen Varianten zur Dämmung des Gebäudes mit dem Ist- Zustand.....	34
Abbildung 13: Vergleich der verschiedenen Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit mit dem Ist-Zustand.....	35
Abbildung 14: Vergleich der verschiedenen Raumsolltemperaturen außerhalb der Belegungszeit (Heizperiode) mit dem Ist-Zustand	36
Abbildung 15: Vergleich der verschiedenen Nachtlüftungen mit dem Ist-Zustand	37
Abbildung 16: Vergleich der Varianten ohne Nutzerkorrektur mit dem Ist-Zustand.....	39
Abbildung 17: Vergleich der Varianten mit Nutzerkorrektur und dem Ist-Zustand.....	41
Abbildung 18: Betrachtete Lebenszyklusphasen in der Ökobilanzierung nach der DIN EN 15643 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021d, S. 31)	42
Abbildung 19: Absoluter Anteil des GWP von den Maßnahmen, Strom und Fernwärme innerhalb der einzelnen Kombinationen über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren	45

Abbildung 20: Prozentualer Anteil des in der Herstellungsphase verursachten GWP für die einzelnen Materialien bei der Variante „Invasiv“	46
Abbildung 21: Vergleich der nutzerunabhängigen Varianten mit dem Ist-Zustand bezogen auf das GWP	48
Abbildung 22: Vergleich der Varianten (mit Nutzerkorrektur) mit dem Ist-Zustand bezogen auf das GWP	49
Abbildung 23: Entwicklung des GWP über den Betrachtungszeitraum für die Varianten „Nicht invasiv“ und „Invasiv“	50
Abbildung 24: Entwicklung des GWP über den Betrachtungszeitraum für die Varianten „Nicht invasiv“, „Nicht invasiv und Dämmung Dach“, „Kombination Dämmungen“ und den Ist-Zustand.....	51
Abbildung 25: Erzielte Reduktion an t CO ₂ -Äq. im Vergleich zum Ist-Zustand im Verhältnis zu investierten t CO ₂ -Äq. in der Herstellungsphase über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren; oben: alle Varianten, unten: Varianten „Kombination Dämmungen“ und „Invasiv“ mit veränderter Skalierung der y-Achse	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Indikatoren zur Beschreibung von Umweltwirkungen und Ressourceneinsatz nach der DIN EN 15804:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022b, S. 43–46).....	8
Tabelle 2: Treibhauspotential verschiedener Stoffe in 20 und 100 Jahren nach dem 5. Bericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, S. 731–737).....	11
Tabelle 3: PMV-Werte und das dazugehörige thermische Empfinden nach ASHRAE (ASHRAE, 2017, S. 39).....	12
Tabelle 4: Kategorien in Abhängigkeit vom thermischen Zustand des Körpers nach der DIN EN 16798-1:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)	14
Tabelle 5: Vergleich der gemessenen und simulierten Werte des Hahn-Hochhauses.....	22
Tabelle 6: Vergleich der U-Werte der einzelnen Bauteile im Ist-Zustand (Thiel & Riedel, 2011) und nach der Sanierung nach GEG-Standard (GEG, 2020).....	26
Tabelle 7: Einstellungen der Testvarianten für die automatische Nachtlüftung	27
Tabelle 8: Zusammenfassung und Aufteilung der einzelnen Maßnahmen in Kategorien	32
Tabelle 9: Übersicht über die an die Außenluft angrenzende Fläche der einzelnen Bauteile	33
Tabelle 10: Übersicht über den Einfluss der Maßnahmen auf den Energiebedarf und die PMV- Werte der kritischen Zone 12.02	37
Tabelle 11: Zusammensetzung der jeweiligen Maßnahmenkombination	38
Tabelle 12: Übersicht über den Einfluss der Maßnahmenkombinationen auf den Energiebedarf und die PMV-Werte der kritischen Zone 12.02	41
Tabelle 13: Bestandteile des Untersuchungsrahmens.....	43
Tabelle 14: Notwendige Materialien für die verschiedenen Maßnahmen	44
Tabelle 15: Vergleich von Energiebedarf und GWP für Strom und Fernwärme bei der Variante „Kombination Dämmungen“ über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren	47
Tabelle 16: Übersicht für das gesamte GWP und die Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand für die Maßnahmenkombinationen bei einem Betrachtungszeitraum von 40 Jahren	54
Tabelle 17: Auswertung der Sensitivitätsanalyse für die Varianten „Invasiv“ und „Kombination Dämmungen“	55

Abkürzungsverzeichnis

ASHRAE	Amerikanische Gesellschaft der Ingenieure für Heizung, Kühlung und Klimatisierung (engl. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CF ₄	Tetrafluormethan
clo	Einheit für Wärmeübergangswiderstand von Kleidung in m ² *K/W (engl. clothing level)
EPD	Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declarations)
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GWP	Globales Erwärmungspotential (engl. Global Warming Potential)
IDA ICE	IDA Indoor Climate and Energy
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kh	Gradstunden
met	Metabolisches Äquivalent in W/m ² (engl. metabolic equivalent of task)
PMV	Vorausgesagtes mittleres Votum (engl. Predicted Mean Vote)
PPD	Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener (engl. Predicted Percentage of Dissatisfied)
THG	Treibhausgas
ÜTGS	Übertemperaturgradstunden
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
WDVS	Wärmedämmverbundsystem

Glossar

Boxplot	Visuelle Hilfestellung, um Datenproben auszuwerten. In Boxplots können Median (s. u.), die mittleren 50 % der Datenwerte, max. und min. Werte mit Hilfe von Whiskern (s. u.) und ggf. Ausreißer dargestellt werden. Boxplots werden häufig verwendet, um Datenproben miteinander zu vergleichen. (Reese, 2005)
Graue Energie	Energieaufwand, der in der Herstellungs-, Errichtungs-, Instandhaltungs- und Entsorgungsphase für die Gebäudekonstruktion aufgebracht werden muss. (Umweltbundesamt, 2019a)
Heizkennwert	Flächenbezogener Kennwert, der den Jahresheizenergiebedarf bzw. -verbrauch eines Gebäudes angibt. (Hamann, 2015, S. 279)
Heizwärmebedarf	Rechnerisch ermittelter Wärmebedarf, der zur Aufrechterhaltung der festgelegten thermischen Raumkonditionen innerhalb einer Gebäudezone während der Heizperiode benötigt wird. (Recknagel, 2011)
Hochhaus	Gebäude, dessen oberster Fußboden im Mittel mehr als 22 m Höhe über dem Gelände liegt. (LBO, 2010)
Klimasplitgerät	Klimagerät welches über einen Wärmetauscher im Innenraum und einen Kompressor im Außenbereich verfügt. Die beiden Komponenten sind mit einer Kältemittelleitung und elektronisch miteinander verbunden. Die Funktion des Gerätes besteht darin, die Wärme innerhalb des Raumes über das Kältemittel nach außen zu transportieren. (Daikin Airconditioning Central Europe HandelsgmbH, 2023)
Kühlkältebedarf	Rechnerisch ermittelter Kühlkältebedarf, der zur Aufrechterhaltung der festgelegten thermischen Raumkonditionen innerhalb einer Gebäudezone benötigt wird in Zeiten, in denen die Wärmequellen eine höhere Energiemenge anbieten als benötigt wird. (Recknagel, 2011)

Median	Wert, der in der Mitte der Datenverteilung liegt. Die eine Hälfte der Daten ist größer als dieser Wert, die andere Hälfte kleiner. (Statista, 2023)
Treibhauseffekt	Die in der Erdatmosphäre befindlichen Gase lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung größtenteils passieren. Die langwellige Wärmestrahlung, die von der Erde ausgeht, wird von den Gasen absorbiert, und das gesamte System innerhalb der Atmosphäre erwärmt sich. (Umweltbundesamt, 2021)
Whisker	Bestandteil des Boxplots, um (abgesehen von Ausreißern) die max. und min. Werte von einer Datenprobe anzugeben. Die Länge eines Whiskers kann je nach Definition variieren. (Reese, 2005)

1 Einleitung

In diesem Abschnitt wird zunächst die Relevanz der Arbeit aufgezeigt. Anschließend werden Forschungsfrage, Hypothese und Zielsetzung für diese Thesis formuliert. Zudem werden Aufbau und verwendete Methodik der Arbeit präsentiert. In der Limitation wird abschließend aufgeführt, welche Aspekte bei der Bearbeitung nicht berücksichtigt werden konnten.

1.1 Relevanz des Themas

Laut dem 2022 erschienenen Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) waren Gebäude im Jahr 2019 für ca. 6 % der weltweiten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verantwortlich. Werden indirekte THG-Emissionen durch Stromverbrauch und Wärmeerzeugung im Gebäudebetrieb mitberücksichtigt, liegen die THG-Emissionen des Gebäudesektors bei 16 %. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, S. 8)

In Deutschland ist allein der Betrieb von Gebäuden für 35 % des Endenergieverbrauchs und 30 % der nationalen THG-Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt, 2022b). Um den Anstieg der globalen Erderwärmung – im Vergleich zur vorindustriellen Zeit – auf 1,5 °C zu begrenzen (United Nations, 2016, Art. 2) müssen diese Emissionen reduziert werden. Dafür soll der gesamte nationale Gebäudesektor bis 2045 bei Netto-Null-Emissionen stehen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2023). Die Steigerung der Energieeffizienz von Bestandsgebäuden durch Sanierungsmaßnahmen ist dabei in wirtschaftlich entwickelten Ländern wie Deutschland eine der wichtigsten Maßnahmen. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, S. 31)

Die derzeitige jährliche Sanierungsrate von 1 % muss dabei auf mindestens 2 bis 2,5 % erhöht werden, um das Ziel zur Reduktion der THG-Emissionen bis 2045 zu erreichen (Umweltbundesamt, 2018a). Die Sanierung von Nichtwohngebäuden in Deutschland aus der Nachkriegszeit stellt dabei in Bezug auf Quantität und Qualität eine besondere Herausforderung dar: Bezogen auf das Baujahr sind rund 38 % der Nichtwohngebäude zwischen 1949 und 1978 errichtet worden (Hörner, 2021). Diese Gebäude haben gleichzeitig einen hohen – auf die Bruttogrundfläche bezogenen – Heizkennwert von ca. 162 kWh/(m²*a) (Hamann, 2015, S. 55). Die niedrige Energieeffizienz dieser Gebäude ist auf den hohen Bedarf an Wohn- und Nichtwohngebäuden nach dem 2. Weltkrieg und die gleichzeitige Materialknappheit zurückzuführen. Baustoffe wurden oft mit Kriegsschutt vermischt und schnelles und effizientes Bauen wurde gegenüber bauphysikalischen und energetischen Anforderungen priorisiert. (Mähl, 2018, S. 19–20)

Zu den Nichtwohngebäuden zählen dabei unter anderem Bürohochhäuser. Diese Gebäude sind heute zum Teil Baudenkmäler, was eine Sanierung bei zu hohem Aufwand verhindert oder zumindest die Sanierung der Gebäudehülle erschwert (GEG, 2020, § 105; DSchG, 1983, § 8). Insgesamt gibt es in Deutschland 412 Bürohochhäuser, die zwischen 1950 und 1985 errichtet wurden, von denen 107 unter Denkmalschutz stehen (Putz et al., 2022, S. 9).

Die Hochhäuser sind durch ihre zentrale Lage häufig stadtbildprägend und vermitteln Vertrautes. Da sie identitätsstiftend sind und den Charakter vieler Standorte beeinflussen, hat ihr Erhalt und das ihres

Erscheinungsbildes eine hohe Bedeutsamkeit. (Gänßmantel et al., 2006, S. 11–12; Hensen et al., 2009, S. 1–3; Putz et al., 2022, S. 5)

Dennoch müssen neben denkmalschutzbezogenen Aspekten auch zwingend ökologische Faktoren berücksichtigt werden, um den Effekt der THG-Emissionen dieser Gebäude auf den Klimawandel deutlich zu reduzieren. Hierfür ist eine umfassende Analyse der Gebäude nötig, die weit über die reine Betrachtung des äußeren Erscheinungsbildes hinausgeht und gebäudetechnische und bauphysikalische Faktoren ganzheitlich untersucht (Putz et al., 2022, S. 7).

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Die Herausforderung bei Baudenkmalen besteht darin, einerseits die baukulturelle Relevanz der Gebäude zu beachten und andererseits die im Betrieb entstehenden THG-Emissionen bestmöglich zu reduzieren. Hierfür müssen Maßnahmen identifiziert werden, die im Rahmen des Denkmalschutzes durchgeführt werden können. Um zu überprüfen, ob diese Maßnahmen im Vergleich zu Maßnahmen, die den Denkmalschutz nicht berücksichtigen, einen langfristig gesehen ökologischen Mehraufwand haben, wurde folgende Forschungsfrage aufgestellt:

Welchen ökologischen Einfluss haben denkmalschutzbezogene invasive und nicht invasive Maßnahmen auf Bürohochhäuser der Nachkriegszeit?

Mit Hilfe der Forschungsfrage soll in dieser Arbeit folgende Hypothese überprüft werden:

Denkmalschutzbezogene nicht invasive Maßnahmen haben bei der Betrachtung eines Bürohochhauses der Nachkriegszeit ein geringeres Treibhauspotential als invasive Maßnahmen.

Unter nicht invasiv werden hier Maßnahmen verstanden, die das äußere Erscheinungsbild eines Gebäudes nicht verändern. Invasive Maßnahmen hingegen erfordern einen aktiven Eingriff in die Gestaltung der Außenhülle eines Gebäudes und können somit nicht im Rahmen des Denkmalschutzes durchgeführt werden. Die Hypothese wurde mit der Annahme aufgestellt, dass die THG-Emissionen aus der Herstellungsphase für die invasiven Maßnahmen – verglichen zu den nicht invasiven Maßnahmen – deutlich höher sind und sich innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht durch betriebsbedingte Emissionsreduktionen amortisieren. Die Wahl dieses Betrachtungszeitraumes wird in Kapitel 4.1 ausführlich erläutert.

In dieser Thesis wird ermittelt, ob die Berücksichtigung des Faktors Denkmalschutz bei der Sanierung eines Bürohochhauses zu einem ökologischen Mehr- oder Minderaufwand führt. Die Differenz zwischen nicht invasiven und invasiven Maßnahmen soll quantifiziert werden, um damit den Denkmalschutz ökologisch bewerten zu können. Der ermittelte Wert kann Entscheidungsträger:innen aus der Baubranche und der Politik dabei helfen, die optimalen Maßnahmen zur Gebäudesanierung in Bezug auf

Denkmalschutz und Ökologie zu bestimmen. Bisher fand diese Diskussion lediglich auf einer qualitativen Ebene statt.

Außerdem soll aufgezeigt werden, dass Denkmalschutz kein Ausschlusskriterium für die ökologische Sanierung von Gebäuden sein darf. Es muss individuell überprüft werden, ob die THG-Emissionen des jeweiligen Gebäudes durch Sanierungsmaßnahmen oder die Anpassung gebäudetechnischer Einstellungen – auch unter vollständiger Beachtung der Denkmalschutzanforderungen – reduziert werden können.

1.3 Methodik

Zunächst werden die Grundlagen und Anforderungen an den Denkmalschutz, den Innenraumkomfort, die Durchführung einer Ökobilanzierung sowie typische Sanierungsmaßnahmen mit Hilfe einer Literaturrecherche ermittelt. Zur Literaturrecherche werden die Datenbanken der Technischen Universität München *OPAC* und *OPACplus*, die Normdatenbank *Nautos* sowie die Datenverzeichnisse *Web of Science*, *Scopus* und *Google Scholar* verwendet. Hierbei erfolgt die Suche für die verschiedenen Themen mit Hilfe von Schlagwörtern. Ergänzend werden die Literaturverzeichnisse der ermittelten Referenzen nach weiterführenden Studien durchsucht.

Um die Forschungsfrage anschließend beantworten zu können, wird zunächst mit Hilfe des Simulationsprogramms *IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE)* eine thermisch-energetische Gebäudesimulation durchgeführt. In dieser Software können der Energiebedarf und das Innenraumklima eines Gebäudes ermittelt werden. Das Programm orientiert sich dabei an Normen sowie Produkt- und Materialdatenbanken und verwendet den neuesten wissenschaftlichen Stand für die Berechnungen (EQUA Simulation AB, 2022). Die Ergebnisse der Energiesimulation des Gebäudes, werden anschließend genutzt, um eine Ökobilanzierung aufzustellen und die ökologische Bewertung der invasiven und nicht invasiven Maßnahmen durchzuführen. Für die Auswertung der Bilanzierung wird eine Wirkungskategorie verwendet, mit Hilfe derer der Einfluss der Maßnahmen auf den anthropogenen Treibhauseffekt quantifiziert werden kann.

Für die Durchführung der Simulation und Ökobilanzierung wird ein Beispielgebäude, das Hahn-Hochhaus in Stuttgart, verwendet. Das Hahn-Hochhaus ist denkmalgeschützt (Langsdorff, 1997) und gehört zu den Bürohochhäusern, die im Rahmen des Forschungsprojektes *HochhausBestand* von der Forschungsförderung *Zukunft Bau* untersucht werden. Das Forschungsprojekt widmet sich Bürogebäuden aus den 1950er bis 1970er Jahren, für die es bislang sowohl an einer umfassenden Datengrundlage als auch an allgemeingültigen Empfehlungen für Sanierungsmaßnahmen fehlt. Dies liegt u. a. an unvollständigen Angaben über die damals eingesetzten Baustoffe. Auch in der Bauphysik wurde im Bereich der Wohngebäude schon intensiv Forschung betrieben, die sich auf Grund differierender Anforderungen allerdings nicht einfach auf Bürogebäude bzw. Hochhäuser übertragen lässt. (Putz et al., 2022, S. 10)

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung, in der Relevanz der Arbeit, Forschungsfrage und Zielsetzung sowie Methodik vorgestellt werden, folgt der Hauptteil. Hier wird im Stand der Forschung zunächst erläutert, was eine Ökobilanzierung ist und welche Wirkungskategorien in einer Bilanzierung untersucht werden können. Außerdem wird ein Einblick in die Entwicklung und aktuelle Forschung bezüglich der Bewertung von Innenraumkomfort gegeben. Hier werden, neben gängigen Kennwerten zur Bewertung des Komforts, die gültigen und in dieser Arbeit angewandten Normen vorgestellt.

In Kapitel 3 wird der Prozess der Modellierung und der thermisch-energetischen Gebäudesimulation des Hahn-Hochhauses vorgestellt. Hierzu zählt eine kurze Vorstellung des Hochhauses sowie der getroffenen Annahmen in Bezug auf Bauteile, Heiz- und Kühlleistungen und Vereinfachungen in der Simulation. Außerdem werden die Ergebnisse des Ist-Zustandes vorgestellt und daraus folgend die – in Bezug auf den Innenraumkomfort – kritische Zone ermittelt. Diese kritische Zone wird anschließend verwendet, um die Einflüsse der unterschiedlichen Maßnahmen auf den Innenraumkomfort bewerten zu können. Im nächsten Abschnitt werden die Sanierungsmaßnahmen und gebäudetechnischen Einstellungen präsentiert und zunächst einzeln in das Modell implementiert. Auf Basis dieser Simulationsergebnisse und der Einordnung der Maßnahmen in denkmalschutzbezogene invasive und nicht invasive Maßnahmen werden anschließend Maßnahmenkombinationen entwickelt. Außerdem werden Maßnahmen, die keinen oder einen negativen Einfluss auf den Energiebedarf haben, aussortiert.

Die Kombinationen der Maßnahmen bilden die Grundlage für die Ökobilanzierung in Kapitel 4. Hier werden die verschiedenen Varianten auf ihre THG-Emissionen untersucht. Dabei werden sowohl die THG-Emissionen aus der Herstellung der Baustoffe als auch aus dem Betrieb des Gebäudes berücksichtigt. Es werden lediglich Baustoffe berücksichtigt, die für die Sanierungsmaßnahmen zusätzlich verbaut werden müssen. Die betriebsbedingten THG-Emissionen setzen sich aus den Emissionen von Strom und Fernwärme zusammen. Die Sachbilanz und Wirkungsabschätzung bilden die Grundlage für die anschließende Auswertung der Ökobilanzierung. Die Ergebnisse der Bilanzierung werden zudem mittels einer Sensitivitätsanalyse überprüft. Hier wird getestet, inwiefern die Ergebnisse durch die Veränderung von Daten oder Annahmen beeinflusst werden.

In der Diskussion werden Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Arbeit gezogen. Es folgt eine kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen, um Schwachstellen sowie Stärken der Arbeit herauszuarbeiten. In Kapitel 6 erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein abschließendes Fazit. Zudem wird ein Ausblick darüber gegeben, welche weitere Forschung an diese Arbeit anschließen könnte.

1.5 Limitation

In der Limitation wird erläutert, weshalb gewisse Aspekte in dieser Arbeit keine Beachtung finden. Hierdurch soll eine Fokussierung auf die besonders relevanten Aspekte gewährleistet werden. Die Limitation betrifft Aspekte bezüglich des Innenraumkomforts, der methodischen Durchführung und der untersuchten Maßnahmen.

Bei der Betrachtung des Innenraumkomforts wird der Fokus auf die thermischen Anforderungen gelegt, die in den ausgewählten Kennwerten der Normen berücksichtigt werden. Dazu gehören die Luft- und Strahlungstemperatur, die Luftfeuchte sowie die Luftgeschwindigkeit und die nutzerabhängigen Faktoren Kleidung und Betätigungslevel. Nicht betrachtet werden Anforderungen an Akustik, Beleuchtung oder Luftqualität. Hierbei ist außerdem zu erwähnen, dass die Betrachtung des Innenraumkomforts keinen Hauptaspekt dieser Arbeit darstellen soll, sondern lediglich eine Hilfestellung darstellt, um auf die Behaglichkeit bezogen besonders ungeeignete Maßnahmen zu identifizieren und zu eliminieren.

Es wird keine wirtschaftliche Betrachtung der getroffenen Maßnahmen in Form einer Analyse der Lebenszykluskosten durchgeführt. Der Fokus soll auf ökologischen und nicht auf ökonomischen Aspekten liegen.

Auch an die Energieeffizienz des gesamten Gebäudes werden keine Anforderungen gestellt. Auch hier soll der Fokus auf der ökologischen und nicht rein energetischen Bewertung liegen. Außerdem sind die Anforderungen vom Europäischen Rat an Gesamtenergieeffizienz und Primärenergieverbrauch von Nichtwohngebäuden bisher nicht im Detail beschlossen oder orientieren sich an Durchschnittswerten des nationalen Bestandes an Nichtwohngebäuden (Rat der Europäischen Union, 2022). Hierfür fehlt es, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, an einer aussagekräftigen Datengrundlage zu den bestehenden Nichtwohngebäuden in Deutschland.

Es wurde kein Abriss und anschließender Neubau des gesamten Gebäudes in Erwägung gezogen. Bei Gebäuden, die eine Lebensdauer von 50 Jahren erreicht haben – also bspw. dem Hahn-Hochhaus – wird häufig die Frage gestellt, ob das Gebäude saniert oder abgerissen und neugebaut werden soll. Ein Abriss wurde hauptsächlich aus denkmalschutzbezogenen Aspekten nicht in Betracht gezogen. Zudem ist laut Steger et al. (2022) und Seiferlein (2019) eine Sanierung von Bestandsgebäuden in Bezug auf den Ressourcenverbrauch und die Kosten erstrebenswerter als ein Neubau. Durch den Erhalt des Gebäudes kann graue Energie weiterhin gebunden bleiben, und die Menge an Abfallstoffen ist geringer im Vergleich zum Neubau. (Seiferlein, 2019, S. 38; Steger et al., 2022, S. 14–34)

Werden die THG-Emissionen des sanierten Bestandsgebäudes mit denen eines Neubaus über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren oder länger verglichen, kann es allerdings dazu kommen, dass Abriss und Neubau besser abschneiden als die Sanierung des Bestandsgebäudes (Steger et al., 2022, S. 35–54).

Es wurden bewusst keine Maßnahmen berücksichtigt, die den Einbau von komplexen technischen Anlagen wie bspw. einer Lüftungsanlage beinhalten. Dies hatte folgende Gründe: Zum einen ist die nachträgliche Installation einer Lüftungsanlage oftmals nicht möglich, da kein Platz zum Einbau vorhanden ist oder der nötige Eingriff in die Baustruktur zu aufwendig wäre (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2014). Zum anderen sind technische Anlagen häufig fehleranfällig, funktionieren auf Grund von Nutzerverhalten nicht und zeichnen sich somit nicht als robuste Komponenten des Gebäudesystems aus (Nagler et al., 2022, S. 39–40).

Einschränkungen, die innerhalb der Ökobilanzierung auftreten, werden im Ziel- und Untersuchungsrahmen in Kapitel 4.1 gesondert vorgestellt.

2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden der Stand der Forschung sowie die aktuell gültigen Normen zu den Themen Klimarelevanz und Innenraumkomfort vorgestellt. Dabei wird außerdem präsentiert, welche Normen im weiteren Verlauf dieser Arbeit angewendet werden.

2.1 Klimarelevanz

Klimarelevanz beschreibt den Einfluss, den ein gewisses Vorhaben durch Ressourcen- und Energieverbrauch und die damit ausgelösten chemischen Prozesse auf die Änderung des Klimas hat (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018, S. 545). Die Klimarelevanz eines Produktes kann mit Hilfe der Methodik der Ökobilanzierung quantifiziert werden (Umweltbundesamt, 2018b).

2.1.1 Ökobilanzierung

Eine Ökobilanzierung bezieht sich nach der DIN EN ISO 14040:2021-02 auf alle Umweltwirkungen, die innerhalb des Lebenszyklus eines Produktes auftreten. Zu den potenziellen Umweltwirkungen können dabei bspw. die Nutzung von Ressourcen oder klimarelevante THG-Emissionen gehören. Der Lebenszyklus des Produktes beinhaltet die Rohstoffgewinnung, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling und die endgültige Entsorgung. Die Bilanzierung soll u. a. dabei helfen, Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften eines Produktes aufzuzeigen und Informationen für Entscheidungsträger:innen in der Politik und Industrie zu liefern. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021b)

Die vier Phasen einer Ökobilanzierung sind die Festlegung eines Ziel- und Untersuchungsrahmen, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung. Diese Phasen werden in der DIN EN ISO 14044:2021-02 definiert. Im Ziel- und Untersuchungsrahmen wird dargestellt, was die beabsichtigte Anwendung und der Grund für die Durchführung der Ökobilanzierung sind. Außerdem wird festgelegt, welches Produktsystem untersucht wird und wo die Systemgrenzen (z. B. Betrachtungszeitraum) liegen. Darauf aufbauend wird eine Sachbilanz erstellt, in der qualitativ und quantitativ durch Messung, Berechnung oder Schätzung Mengen zu bspw. Energie- oder Rohstoffinputs ermittelt werden. In der nachfolgenden Wirkungsabschätzung werden zunächst Wirkungskategorien und -indikatoren definiert. Anschließend werden die potenziellen Umweltwirkungen des Produktes mit Hilfe der Wirkungskategorien und auf Basis der Sachbilanz quantifiziert und ausgewertet. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, 2021b)

Die am häufigsten verwendeten Wirkungskategorien sind in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengefasst und können in die Kategorien Umweltwirkungen und Ressourceneinsatz unterteilt werden. Eine dieser Wirkungskategorien – das Treibhauspotential (engl. Global Warming Potential, kurz GWP) – wird in Kapitel 2.1.2 detailliert beschrieben.

Tabelle 1: Indikatoren zur Beschreibung von Umweltwirkungen und Ressourceneinsatz nach der DIN EN 15804:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022b, S. 43–46)

Wirkungskategorie	Parameter	Einheit
<i>Umweltwirkungen</i>		
Klimawandel	Treibhauspotential (GWP)	kg Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (CO ₂ -Äq.)
Ozonabbau	Potential des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	kg CFD-11-Äq.
Versauerung	Versauerungspotential (AP)	mol H ⁺ -Äq.
Eutrophierung Süßwasser	Eutrophierungspotential, in das Süßwasser gelangende Nährstoffe (EP-Süßwasser)	kg P-Äq.
<i>Ressourceneinsatz</i>		
Erneuerbare Primärenergie (energetisch)	Einsatz erneuerbarer Primärenergie – ohne die erneuerbaren Primärenergieträger, die als Rohstoffe verwendet werden (PERE)	MJ
Nicht erneuerbare Primärenergie (energetisch)	Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie – ohne die als Rohstoffe verwendeten nicht erneuerbaren Primärenergieträger (PENRE)	MJ
Nicht erneuerbare Primärenergie (energetisch und stofflich)	Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (Primärenergie und die als Rohstoff verwendeten nicht erneuerbaren Primärenergieträger) (PENRT)	MJ

In der abschließenden Auswertung werden auf Basis der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung die signifikanten Parameter der Ökobilanzierung identifiziert. Es folgt eine Überprüfung der Ergebnisse durch eine Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen und es werden Schlussfolgerungen, inklusive Einschränkungen und Empfehlungen, getroffen. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, 2021b)

Im Bausektor ist das im Rahmen der Ökobilanzierung betrachtete Produktsystem meist ein Gebäude. In den Systemgrenzen wird u. a. festgelegt, welche Lebenszyklusphasen eines Gebäudes (siehe Abbildung 1) betrachtet werden. Hierbei wird zwischen der Herstellungs- (A1 bis A3) und Errichtungsphase (A4 und A5), der Nutzungsphase (B1 bis B8) und der Entsorgungsphase (C1 bis C4) unterschieden. Das Modul D wird gesondert betrachtet und umfasst die Vorteile und Belastungen die sich durch Wiederverwendung, Recycling oder Energierückgewinnung von Stoffen außerhalb der Systemgrenzen ergeben. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2015) Zudem wird im Untersuchungsrahmen der von der Nutzungsdauer des Gebäudes abhängige Betrachtungszeitraum gewählt. Dieser kann nach der DIN EN 1990:2021-10 zwischen 10 und 100 Jahren liegen und beträgt für Gebäude mit gewöhnlichen Tragwerken 50 Jahre (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021c). Der Betrachtungszeitraum definiert u.a., wie oft Bauteile innerhalb eines Gebäudes ausgetauscht werden: So muss bspw. Regelungstechnik mit einer Lebensdauer von 20 Jahren bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zweimal ausgetauscht werden, während es bei einem Betrachtungszeitraum von 10 Jahren kein Mal ausgetauscht werden muss. Die Lebensdauer von Bauteilen ist in einer Übersicht des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung zusammengefasst (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2017).

Herstellung und Errichtung					Nutzung								Entsorgung			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	C1	C2	C3	C4
Rohstoffgewinnung	Transport zur Herstellungsstätte	Herstellung	Transport zum Bauwerk	Errichtung	Nutzung	Wartung	Instandsetzung	Austausch	Modernisierung	Energieeinsatz für den Betrieb	Wassereinsatz für den Betrieb	Nutzeraktivitäten	Rückbau	Transport	Abfallaufbereitung	Entsorgung

D – Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen
Potential für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling

Abbildung 1: Lebenszyklusphasen für die Ökobilanzierung nach der DIN EN 15643:2021-12 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021d, S. 31)

Die Sachbilanz eines Gebäudes erfolgt häufig auf Grundlage von Plänen. Hier müssen die Mengen (Volumen oder Fläche) der verschiedenen Baustoffe ermittelt werden, um in der anschließenden Wirkungsabschätzung die jeweilige Umweltwirkung quantifizieren zu können.

Eine Hilfestellung für die Wirkungsabschätzung innerhalb einer Ökobilanzierung liefern Datenbanken in denen Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declarations, kurz EPD) für verschiedene Baustoffe gelistet sind. EPDs enthalten quantitative umweltbezogene Daten eines spezifischen Produktes. So kann aus EPDs bspw. entnommen werden, welches GWP ein Bauprodukt in den Lebenszyklusphasen A1 bis A3 bezogen auf eine Einheit hat. Bekannte Datenbanken für EPDs sind bspw. die ÖKOBAUDAT oder IBU.data (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023; Institut Bauen und Umwelt e.V., 2023).

In der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse wird dann bestimmt, welche Parameter signifikant für die Ergebnisse der Ökobilanzierung sind. Bei Gebäuden bedeutet dies häufig, dass ermittelt wird, welche Baustoffe in welchen Lebenszyklusphasen die meisten Emissionen verursachen oder den höchsten Energiebedarf haben. Die Identifikation dieser Stoffe hilft anschließend dabei, spezifische Handlungsempfehlungen für Entscheidungsträger:innen zu liefern. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021a, S. 36–40)

Die Quantifizierung des Faktors Denkmalschutz wurde bisher kaum in Ökobilanzierungen berücksichtigt. Daher werden in dieser Arbeit Maßnahmen, die im Rahmen des Denkmalschutzes durchgeführt werden können, und solche, die im Widerspruch mit dem Denkmalschutz stehen bilanziert. Dabei soll mit Hilfe einer Ökobilanzstudie die Diskrepanz zwischen invasiven und nicht invasiven Maßnahmen in Bezug auf das GWP ermittelt werden.

2.1.2 Treibhauspotential

Das GWP ist eine der international am meisten akzeptierten Wirkungskategorien und gilt als Parameter, um den Beitrag eines Gases auf die globale Erwärmung zu erfassen. Es berücksichtigt dabei verschiedene Treibhausgase. Die in Deutschland am meisten freigesetzten Treibhausgase sind Kohlenstoffdioxid (87,1 %), Methan (6,5 %) und Lachgas (4,6 %). Zu den Treibhausgasen, zählen außerdem fluoridierte Treibhausgase, wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe und perfluorierte Kohlenwasserstoffe. (Umweltbundesamt, 2022a)

Um die Wirkung der verschiedenen Treibhausgase auf die Erderwärmung miteinander vergleichen zu können, müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden: Ein Faktor ist die Verweildauer des jeweiligen Stoffes in der Atmosphäre. So zerfällt Methan bereits nach ca. 12,4 Jahren auf natürliche Weise, während Tetrafluormethan (CF₄) 50.000 Jahre in der Atmosphäre verbleibt. Ein weiterer Faktor ist der Wirkungsgrad: Vom Wirkungsgrad ist abhängig, wie viel Wärmestrahlung die jeweilige Substanz in der Atmosphäre absorbiert bzw. reflektiert. Das GWP berücksichtigt diese Faktoren und macht es möglich die Wirkung der verschiedenen Gase miteinander zu addieren, indem die Emissionen aller Treibhausgase auf die Einheit kg CO₂-Äquivalent bezogen werden. Dadurch werden THG-Emissionen verschiedener Sektoren verständlich dargestellt und Entscheidungsprozesse über die Reduktion von THG-Emissionen erleichtert. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, S. 731–737; Umweltbundesamt, 2022a; United States Environmental Protection Agency, 2022)

Das GWP eines Stoffes ist außerdem davon abhängig, welcher Zeithorizont betrachtet wird. Die am häufigsten verwendeten Zeithorizonte sind 20, 50 und 100 Jahre. In der internationalen Berichterstattung wurde der Betrachtungszeitraum aus Gründen der Vergleichbarkeit auf 100 Jahre, also dem GWP₁₀₀-Wert, verbindlich festgelegt. Würde bspw. ein Betrachtungszeitraum von 20 Jahren (GWP₂₀) gewählt werden, wäre 1 t Methan, welches eine kurze Lebenszeit mit 12,4 Jahren hat, 84-mal klimaschädlicher als 1 t CO₂. Bei der Betrachtung von 100 Jahren, ist 1 t Methan so klimaschädlich wie 28 t CO₂. (Umweltbundesamt, 2022a)

Beispielhaft sind in Tabelle 2 vier verschiedene Stoffe inklusive ihrer jeweiligen Verweildauer, dem GWP₂₀- und GWP₁₀₀-Werten sowie typische Prozesse, in denen dieser Stoff freigesetzt bzw. verwendet wird, dargestellt.

Das GWP wird in der in Kapitel 4 durchgeführten Ökobilanzierung für die Wirkungsabschätzung der einzelnen Maßnahmenkombinationen verwendet. Hierdurch soll der Einfluss der THG-Emissionen von den verschiedenen Varianten auf die Erderwärmung vergleich- und bewertbar werden.

Tabelle 2: Treibhauspotential verschiedener Stoffe in 20 und 100 Jahren nach dem 5. Bericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, S. 731–737)

Name des Stoffes	Chemische Formel	Verweildauer in Jahren	GWP ₂₀	GWP ₁₀₀	Freisetzung/Verwendung
Kohlendioxid	CO ₂	Variabel*	1	1	Verbrennung von fossilen Brennstoffen
Methan	CH ₄	12,4	84	28	Mülldeponien, Erdgasgewinnung und Nutztierhaltung
Lachgas	N ₂ O	121	264	265	Düngemittel in der Landwirtschaft, Prozesse in der chemischen Industrie, Verbrennungsprozesse
Tetrafluormethan	CF ₄	50.000	4.880	6.630	Kältemittel als Ersatz von Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW)

*Der natürliche Zerfall von CO₂ wird durch verschiedene physikalische und biogeochemische Prozesse beeinflusst, so dass die genaue Verweildauer nicht bestimmt werden kann (Deutsches Klima Konsortium, 2023).

2.2 Innenraumkomfort

Das Kapitel über den Innenraumkomfort ist in zwei Abschnitte gegliedert: Der erste Teil enthält die Grundlagen, in der etablierte Werte zur Messung der Behaglichkeit im Innenraum und die momentane Forschung zu gesunden Innenraumbedingungen vorgestellt werden. Im zweiten Teil werden die geltenden Normen, die Anforderungen an die Innenraumbedingungen enthalten, präsentiert und es wird erläutert, welche Normen für die Auswertung der Ergebnisse in dieser Arbeit berücksichtigt werden. Die vorgestellten Normen bilden außerdem eine Hilfestellung, um geeignete Maßnahmen an der Gebäudetechnik zu identifizieren, die im Rahmen von behaglichen Innenraumbedingungen durchgeführt werden können (siehe Kapitel 3.3).

2.2.1 Grundlagen

Die American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) definiert Innenraumkomfort als den Geisteszustand, bei dem Nutzer:innen subjektiv zufrieden sind mit der thermischen Umgebung (ASHRAE, 2017, S. 3). Damit diese subjektive Wahrnehmung gemessen werden kann, wurden in den letzten Jahrzehnten Werte entwickelt, die auf Grundlage verschiedener Parameter versuchen, das Behaglichkeitsempfinden der Mehrheit der Nutzer:innen in einem geschlossenen Raum vorherzusagen. Die bekanntesten Werte zur Beurteilung dieses Empfindens sind das vorausgesagte mittlere Votum (engl. Predicted Mean Vote, kurz PMV) und der vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener (engl. Predicted Percentage of Dissatisfied, kurz PPD). Beide Werte wurden 1970 von Ole Fanger entwickelt. Das PMV berücksichtigt dabei die im Innenraum gemessenen Werte für die Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit sowie die nutzerabhängigen

Faktoren für Kleidung (clo-Faktor) und körperliche Aktivität auch metabolisches Äquivalent (met) genannt. (Fanger, 1970)

Die PMV-Werte können dabei, wie in Tabelle 3 dargestellt, zwischen -3 (Kalt) und +3 (Heiß) auf einer siebenstufigen Skala variieren.

Tabelle 3: PMV-Werte und das dazugehörige thermische Empfinden nach ASHRAE (ASHRAE, 2017, S. 39)

PMV-Wert	Thermisches Empfinden
-3	Kalt
-2	Kühl
-1	Leicht kühl
0	Behaglich
+1	Leicht warm
+2	Warm
+3	Heiß

Der PPD gibt an, welcher Anteil an Personen, abhängig vom PMV, wahrscheinlich unzufrieden mit dem Umgebungsklima ist. Beim PPD wird eine gewisse Streuung in der Empfindung des Innenraumklimas innerhalb einer großen Gruppe berücksichtigt. Unzufrieden sind dabei Personen, die das Umgebungsklima nach der Tabelle 3 als kalt, kühl, warm oder heiß beurteilen. (ASHRAE, 2017, S. 39; Deutsches Institut für Normung e. V., 2006, S. 4–8)

Das PMV und der PPD haben sich als Modelle etabliert, die unter statischen Bedingungen den Innenraumkomfort vorhersagen können. Um den realistischen Bedingungen im Gebäudebetrieb näher zu kommen, eignen sich allerdings adaptive Modelle besser zur Vorhersage des thermischen Empfindens als statische Modell. (Warthmann et al., 2019, S. 4–5) (Kim et al., 2015)

Die Grundlagen für adaptive Komfortmodelle bilden Feldstudien, die das adaptive Nutzerverhalten unter realen Bedingungen untersuchen, während statische Modelle meist auf den Ergebnissen aus einer Klimakammer beruhen (Humphreys & Nicol, 2018, S. 103–104). Zu den ersten Forschern, die ein adaptives Komfortmodell entwickelten, gehörten 1973 Nicol und Humphreys. Sie untersuchten die Einwirkungen der Veränderung von Kleidung, Aktivität und Umgebung auf den Innenraumkomfort (Nicol & Humphreys, 1973). Adaptive Komfortmodelle sind heutzutage in fast allen Normen für Gebäude ohne mechanische Lüftung zu finden und berücksichtigen dabei die laufende durchschnittliche Außenraumtemperatur (Koth et al., 2022, S. 3). Diese Normen werden im nächsten Kapitel 2.2.2 vorgestellt.

Neben der Varianz an Modellen wurden im Laufe der Zeit auch andere, bisher vollständig vernachlässigte Faktoren untersucht, die einen Einfluss auf das PMV haben können. So wurde bspw. durch Feldstudien ermittelt, dass Alter und Geschlecht die Wahrnehmung von Komfort beeinträchtigen können (Schellen et al., 2010; Schellen et al., 2012).

Sowohl die statischen als auch die adaptiven Komfortmodelle fokussieren sich darauf, möglichst komfortable Bedingungen für den Innenraum zu ermitteln. Allerdings gab es in den letzten 15 Jahren Untersuchungen, die die vorgegebenen Grenzwerte der Normen hinterfragen. In den Studien wurde

untersucht, ob komfortable Innenraumbedingungen gleichbedeutend mit gesunden Bedingungen sind. Durch Temperaturschwankungen, die außerhalb der von den Normen vorgegebenen Grenzwerten liegen, können der Stoffwechsel und das Herz-Kreislauf-System angeregt und trainiert werden. Hierdurch können das Risiko für Übergewicht reduziert und die Insulinsensitivität von Diabetes Typ II Patient:innen erhöht werden. (McAllister et al., 2009, S. 33 f; van Marken Lichtenbelt et al., 2017)

Hierbei ist es elementar, dass Innenraumbedingungen herrschen, die eventuell nicht mehr als komfortabel empfunden werden, aber dennoch keinen Stress im Körper auslösen und somit die Gesundheit der Nutzer:innen gefährden (Koth et al., 2022, S. 5).

Aus den Untersuchungen zu gesunden Innenraumbedingungen sind bisher keine konkreten Anforderungen oder verifizierte Kennwerte hervorgegangen. Daher werden in dieser Arbeit weiterhin die Anforderungen nach aktueller Norm für die Bewertung des Innenraumkomforts verwendet.

2.2.2 Auslegung und Anforderungen nach aktueller Norm

In Deutschland gibt es verschiedenen Normen, die sich mit dem Innenraumkomfort beschäftigen. In diesen Normen werden verschiedene Grenzwerte vorgegeben, mit Hilfe derer Komfortbedingungen bewertet oder kategorisiert werden können. In diesem Abschnitt wird ein Auszug der – auf die Behaglichkeit bezogen – relevantesten Normen vorgestellt.

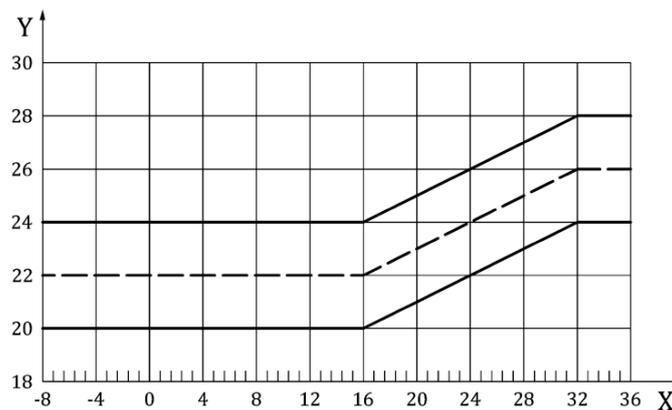
Die DIN EN ISO 7730:2006-05 ist eine internationale Norm, die für die Bewertung des Innenraumklimas verwendet werden kann. Hier werden Formeln zur Ermittlung des PMV und des vom PMV abhängigen PPD innerhalb gewisser Grenzwerte für Lufttemperatur, clo-Faktor usw. gegeben (Abschnitte 4 und 5). In den Abschnitten 6 und 7 werden in statischen Modellen der Einfluss von besonderen Innenraumbedingungen, wie bspw. eine asymmetrische Strahlungstemperatur, auf das Komfortempfinden untersucht. Die Abschnitte 8 und 9 der Norm beschäftigen sich hingegen mit dem Umgang mit un stetigen Bedingungen wie etwa Temperaturgefällen. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2006)

Die DIN EN ISO 7730:2006-05 liefert mit ihren Formeln die Grundlage für weitere Normen wie bspw. die DIN EN 16798-1:2022-03. In der DIN EN 16798-1:2022-03 erfolgt auf Basis der ermittelten Werte für PMV und PPD eine Kategorisierung von maschinell geheizten und gekühlten Gebäuden in Bezug auf den Innenraumkomfort. Hierbei wird zwischen vier verschiedene Kategorien unterschieden (siehe Tabelle 4). Die Kategorie II soll dabei für sanierte Bestandsgebäude als Auslegungsgrundlage dienen. In Abhängigkeit von den Komfortkategorien werden außerdem für Wohngebäude und Büros Raumtemperaturen empfohlen, mit denen unter bestimmten Bedingungen (Betätigung, Kleidung, Luftfeuchte usw.) die vorgegebenen Werte für PMV und PPD eingehalten werden können. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Tabelle 4: Kategorien in Abhängigkeit vom thermischen Zustand des Körpers nach der DIN EN 16798-1:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Kategorie	PPD in %	PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	< 25	-1,0 < PMV < +1,0

Neben den Vorgaben zum PMV und PPD sind in der DIN EN 16798-1:2022-03 ebenfalls die empfohlenen Werte für die operative Innentemperatur in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur definiert (siehe Abbildung 2). Diese adaptiven Anforderungen gelten für maschinell geheizte und gekühlte Gebäude, zu denen das Hahn-Hochhaus zählt. Das Komfortband stellt sowohl Anforderungen an den sommerlichen als auch an den winterlichen Wärmeschutz des Gebäudes. In der Kategorie II darf die operative Innentemperatur max. 1 % der Nutzungszeit des jeweiligen Raumes außerhalb des Toleranzbandes liegen. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)



Legende
 X Stundenmittelwert der Außenlufttemperatur in °C
 Y Raumtemperatur in °C

Abbildung 2: Komforttemperatur mit zugelassenem Toleranzbereich; Gestrichelte Linie: Komfortraumtemperatur abhängig von der Außentemperatur; Durchgezogene Linie: Zugelassener Toleranzbereich +/- 2K nach der DIN EN 16798-1:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Für Gebäude ohne maschinelle Kühlung, in der die Nutzer:innen hauptsächlich sitzende Tätigkeiten ausführen (z. B. Bürogebäude), Fenster selbstständig öffnen und schließen können und ihre Kleidung den Außentemperaturen anpassen können, sind andere operative Innentemperaturen zulässig. Diese sind in Abbildung 3 dargestellt und im Anhang B der DIN EN 16798-1:2022-03 definiert. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

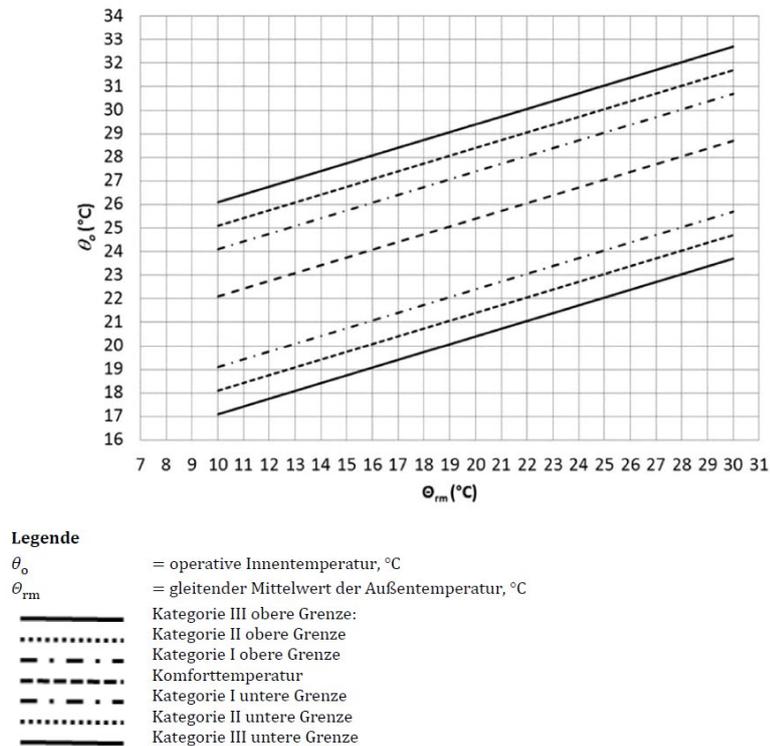


Abbildung 3: Einzuhaltende operative Innentemperatur mit Grenzwerten für Gebäude ohne maschinelle Kühlung nach der DIN EN 16798-1:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Neben PMV, PPD und der operativen Temperatur gibt es noch andere Kennwerte, um die thermische Behaglichkeit in Innenräumen zu bewerten. Dazu zählen bspw. Übertemperaturgradstunden (ÜTGS), die zur Nachweisführung für den sommerlichen Wärmeschutz herangezogen werden können. In der DIN 4108-2:2013-02 ist der Anforderungswert für ÜTGS in Abhängigkeit von Klimaregion (s. Abbildung 4) und Gebäudeart (Wohn- und Nichtwohngebäude) definiert (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013).

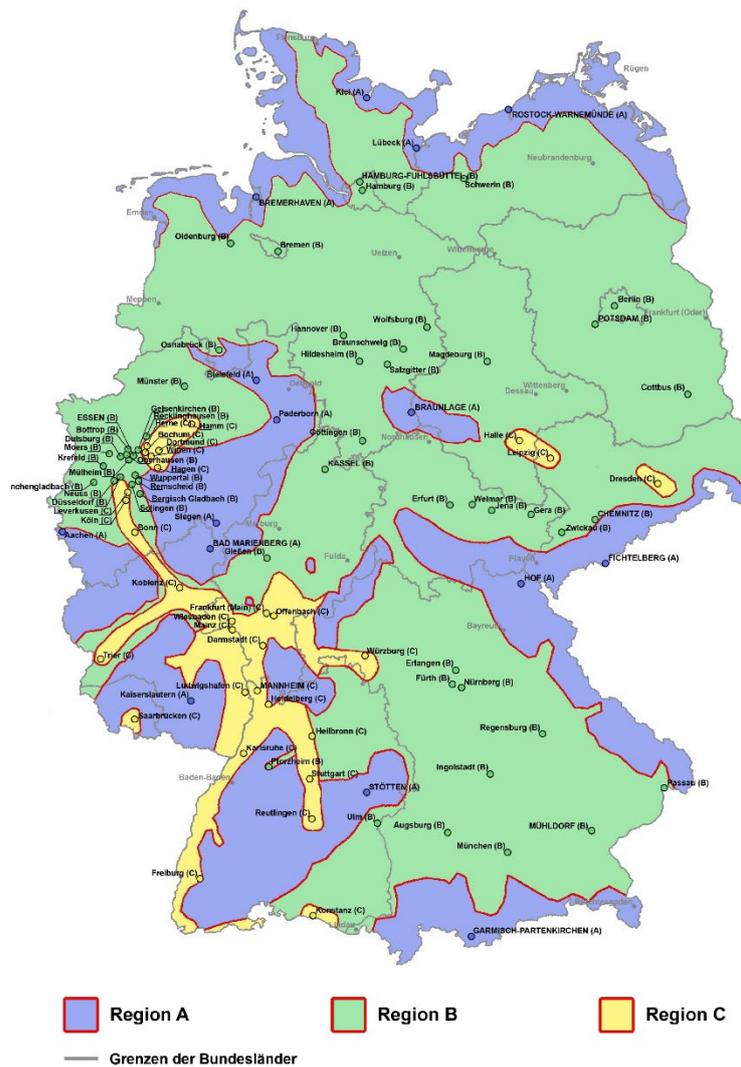


Abbildung 4: Sommerklimaregionen in Deutschland nach der DIN 4108-2:2013-02 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)

Nach der DIN 4108-2:2013-02 liegt der Bezugswert der operativen Innentemperatur für den Standort des Hahn-Hochhauses Stuttgart (Klimaregion C) bei 27 °C. Dieser Wert darf max. 500 Gradstunden (Kh) im Jahr (für Nichtwohngebäude wie das Hahn-Hochhaus) überschritten werden, sonst sind die Anforderungen nicht erfüllt. Es werden lediglich die Stunden betrachtet, in denen das Gebäude genutzt wird. Für ein Nichtwohngebäude ist das standardmäßig werktags von 7 bis 18 Uhr. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)

ÜTGS werden dabei auf folgende Weise berechnet: Je nachdem in welchem Ausmaß die operative Innentemperatur von 27 °C überschritten wird, werden die Stunden, in denen das passiert, unterschiedlich gewichtet. Ein Beispiel: An einem Sommertag wird der Wert von 27 °C in einem Zeitraum von vier Stunden überschritten. Zunächst steigt die operative Innentemperatur um 13 Uhr auf 28 °C, um 14 Uhr auf 29 °C und um 15 und 16 Uhr liegt sie bei 27,5 °C. Für die Berechnung der ÜTGS bedeutet dies, dass der Wert um 13 Uhr einfach ($1 \text{ h} \cdot 1 \text{ K} = 1 \text{ Kh}$), der Wert um 14 Uhr doppelt ($1 \text{ h} \cdot 2 \text{ K} = 2 \text{ Kh}$), und die Werte um 15 und 16 Uhr jeweils mit 0,5 gewertet werden, da die Überschreitung in diesen Stunden 0,5 K betrug ($2 \text{ h} \cdot 0,5 \text{ K} = 1 \text{ Kh}$). Insgesamt liegt der Wert für die ÜTGS an diesem Tag somit bei 4 Kh.

Da der Fokus dieser Arbeit auf der ökologischen Bewertung der Sanierungsmaßnahmen liegen soll, können nicht alle Normen bei der Betrachtung des Innenraumkomforts berücksichtigt werden, sondern lediglich die Komfortkategorien der DIN EN 16798-1:2022:03. Hier wird dementsprechend nicht nur ein einziger Grenzwert bewertet, wie es bspw. bei den Übertemperaturgradstunden der DIN 4108-2:2013-02 der Fall gewesen wäre. Stattdessen bieten die Kategorien der DIN EN 16798-1:2022:03 die Möglichkeit, dass die Ergebnisse umfassender eingeordnet werden können. Dabei werden insbesondere die Kategorien II und IV betrachtet. Die Kategorie II soll laut Norm die Auslegungsgrundlage für sanierte Bestandsgebäude sein, zu denen das Hahn-Hochhaus nach einer Sanierung zählen würde. Die Kategorie IV bildet hingegen die Kategorie ab, die für größtenteils – in Bezug auf die Behaglichkeit – zufriedene Nutzer:innen mindestens eingehalten werden sollte (PMV zwischen -1 und +1). (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Es bleibt festzuhalten, dass der Innenraumkomfort in dieser Arbeit zur Orientierung dienen soll und dass Maßnahmen, bei denen die Komfortkategorien nicht vollständig eingehalten werden können, nicht unmittelbar ausgeschlossen werden. Dieses Vorgehen wird auch durch die – in Kapitel 2.2.1 – vorgestellten Studien zu gesunden Innenraumbedingungen begründet, bei denen eine gewisse Abweichung von komfortablen Bedingungen keinen negativen Einfluss auf die Gesundheit der Nutzer:innen haben muss.

3 Thermisch-energetische Gebäudesimulation des Hahn-Hochhauses

Zu Beginn dieses Kapitels wird das Hahn-Hochhaus vorgestellt. Danach wird zunächst der Modellierungsprozess und die Simulation des Ist-Zustandes präsentiert. Anschließend werden die Sanierungsmaßnahmen und deren Einflüsse auf den Energiebedarf und Innenraumkomfort dargestellt. Auf diesen Ergebnissen aufbauend werden abschließend Kombinationen aus den einzelnen Maßnahmen erstellt.

3.1 Vorstellung des Hahn-Hochhauses

Das sogenannte Hahn-Hochhaus wurde 1963 als erstes signifikantes Hochhaus im Stuttgarter Stadtzentrum fertiggestellt (Langsdorff, 1997). Der 14-geschossige Verwaltungsbau in unmittelbarer Nähe zum Hauptbahnhof wurde von den Architekten Rolf Gutbrod, Werner Jung und Herrmann Kiess entwickelt und sollte Verkaufs- und Ausstellungsräume, Werkstätten und Parkhaus für Volkswagen und Porsche bereitstellen. Aus dem Parkhaus wurde während der Planung eine Tiefgarage, in der nach Fertigstellung des Gebäudes auch die Reparatur von PKWs möglich war. (Breuning, 1998)

Seit den 1970er Jahren werden die Räume des Hochhauses ausschließlich als Büros genutzt. Von 1996 bis 1997 wurde die Fassade inklusive der Fenster unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes saniert, die Gebäudetechnik modernisiert und die Innenräume, entsprechend den Anforderungen der verschiedenen Mieter:innen, umgebaut. (Langsdorff, 1997)

Die schlanke Konstruktion besteht aus einem Stahlbetonskelett auf einem Plattenfundament. Über Plattenbalken-Decken, die eine Stützweite von ca. 8 m haben, werden die horizontalen Lasten über Pendelstützen (Westseite) und ein Rahmenwerk (Ostseite) in die Fundamente abgeleitet. Die Aussteifung erfolgt über das Rahmenwerk und den – mit dem Rahmenwerk verbundenen – scheibenförmigen und außermittigen Erschließungskern des Gebäudes. (Weeber, 1966)

Das Gebäude verfügt über zwei Treppenhäuser: eins im Norden, welches im alltäglichen Gebrauch genutzt wird und ein Notfalltreppenhaus im südlichen Teil des Gebäudes. Außerdem können die Stockwerke über zwei Aufzüge erreicht werden, die ebenfalls im nördlichen Treppenhaus liegen (siehe Abbildung 8 in Kapitel 3.2.3).



Abbildung 5: Ansicht Ostfassade vom Hahn-Hochhaus (eigene Aufnahme)

Die Fassade ist geprägt durch den großen Fensterflächenanteil und die geneigten Brüstungen aus Sichtbeton (siehe Abbildung 5). Die Fenster ab dem 2. OG verfügen über einen außenliegenden Sonnenschutz in Form von horizontal angeordneten Lamellen.

Das Gebäude wird über einen Fernwärmeanschluss mit Energie zum Heizen und Kühlen versorgt. Vom 2. OG bis zum 11. OG werden die Räume über Konvektoren geheizt und gekühlt, die unterhalb der Fenster angebracht sind. In den Büros und Besprechungsräumen im 1., 12. und 13. OG sind Radiatoren und im nördlichen Treppenhaus Konvektoren verbaut, die jeweils nur heizen können. Zur Kühlung werden in den Aufenthaltsräumen der Stockwerke 12 und 13 Klimasplittergeräte verwendet. Das 1. OG wird über die einzige im Haus vorhandene Lüftungsanlage (AHU) gekühlt. (S. Magalu, Persönliche Mitteilung, 1. August 2022)

3.2 Modellierung und Simulation des Ist-Zustandes

Die Modellierung des Gebäudes erfolgte auf Grundlage der bereitgestellten Pläne, aus denen sowohl die Grundrisse als auch die Geschosshöhen entnommen werden konnten. In Bezug auf die bauphysikalischen und gebäudetechnischen Randbedingungen mussten einige Annahmen getroffen werden, die im Folgenden vorgestellt werden. Die Grundfläche der einzelnen Zonen, die Geschosshöhen sowie die weiteren Annahmen können detailliert im Anhang A eingesehen werden. Anschließend werden die Ergebnisse des Ist-Zustandes vorgestellt und die Wahl der auf den Innenraumkomfort bezogenen kritischen Zone wird erläutert.

3.2.1 Getroffene Annahmen

Da nicht für alle Bereiche der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik reale Daten als Grundlage vorhanden waren, mussten an einigen Stellen Annahmen getroffen werden.

Bei der Gebäudehülle waren nur der Aufbau der Außenwand, der Fenster und der Geschossdecken bekannt. Allerdings konnte (auf Grund nicht eindeutiger Angaben bei den Materialien) aus den jeweiligen Bauteilaufbauten nicht auf die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der einzelnen Bauteile geschlossen werden. Daher wurden hauptsächlich pauschale U-Werte aus der Zeit der Errichtung des Gebäudes verwendet (Thiel & Riedel, 2011). Eine Besonderheit stellen dabei die Fenster da, bei denen bekannt war, dass sie 1996 ausgetauscht wurden (S. Magalu, Persönliche Mitteilung, 1. August 2022). Daher wurde hier ein standardisierter U-Wert für Fenster, die in den Jahren 1995 bis 2001 eingebaut wurden, verwendet. Bei den Wärmebrückenzuschlägen konnten teilweise Berechnungen und Abschätzungen vom Lehrstuhl für Bauphysik (TUM) genutzt werden (R. Göttig, Persönliche Mitteilung, 26. September 2022). An einigen Bauteilen mussten dennoch Annahmen getroffen werden. Die Verluste an den, vom Lehrstuhl für Bauphysik berechneten Bauteilen wurden von *IDA ICE* als „poor“ („ungünstig“) klassifiziert. Daher wurde auch für die restlichen, nicht berechneten Bauteile angenommen, dass die Wärmebrücken „ungünstig“ sind, und es wurden die für diese Klassifizierung in *IDA ICE* vorgemerkten Werte verwendet.

Für die Anzahl, die Nutzungsdauer und die emittierte Wärme (in Watt) von Nutzer:innen, Equipment und Licht wurden die Vorgaben der Norm DIN V 18599-10:2018-09 ebenso genutzt wie für die Raumsolltemperaturen (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018). Die Raumsolltemperaturen der Aufenthaltsräume liegen nach Norm bei 21 °C (Heizperiode) und 24 °C (Kühlperiode). Die exakten Nutzungsprofile sind in Anhang A aufgeführt.

Annahmen bezüglich der Leistung der Heizsysteme im EG, ZG und 1. OG, der Kühlsysteme in den Stockwerken 12 und 13 sowie der Dauer von Heiz- und Kühlperiode wurden mit Hilfe der SIA 2024:2021, VDI 3807 und weiterer Fachliteratur getroffen (Recknagel, 2011; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2021; Verein Deutscher Ingenieure, 2013). Gemäß den Angaben aus der Norm erfolgt die Kühlperiode in Abhängigkeit von den Außentemperaturen vom 19. Mai bis zum 9. September. In der verbleibenden Zeit des Jahres ist die Kühlung deaktiviert und die Heizsysteme werden aktiv betrieben. Die Leistung der Konvektoren in den Geschossen 2 bis 11 konnte dem Produktkatalog des Herstellers entnommen werden (Kampmann GmbH & Co. KG, 2023).

Die beiden Untergeschosse, die als Tiefgarage dienen, und die Technischächte im gesamten Gebäude wurden in der Simulation nicht betrachtet. Dies liegt daran, dass sowohl der Energieverbrauch als auch der Komfort in diesen Bereichen eine untergeordnete bzw. keine Rolle spielen und auch keine Sanierungsmaßnahmen oder Anpassungen der Gebäudetechnik in diesen Bereichen durchgeführt werden. Es handelt sich hierbei nicht um Aufenthaltsräume oder Räume, die an Aufenthaltsräume

angrenzen. Außerdem wurde der Verkaufsraum, der im Erdgeschoss nördlich vom Eingangsbereich des Hochhauses liegt, nicht betrachtet, da die Zugehörigkeit zum Hahn-Hochhaus nicht eindeutig ist.

Es wurde angenommen, dass die Geschosse 3 bis 10 Regelgeschosse sind. Die Fläche der Gebäudehülle, die mit dem Außenraum in Kontakt steht, sind bei diesen Geschossen gleich und auch die Nutzungsart in Form von Büros stimmt in allen Geschossen überein. Lediglich die Grundrisse der Stockwerke weichen minimal voneinander ab, was vernachlässigbar ist. Daher wurde lediglich das – auf die Höhe bezogen – mittig gelegene 6. OG simuliert. Der Energiebedarf der Zonen aus dem 6. OG wurde mit 8 multipliziert (Anzahl der Stockwerke zwischen dem 3. und 10. OG), um trotz der Vereinfachung in der Simulation die korrekten Bedarfswerte für das gesamte Gebäude zu erhalten. Durch die Annahme von Regelgeschossen konnte die Dauer der Simulation maßgeblich reduziert werden.

Der außenliegende Sonnenschutz ist in der Simulation strahlungsgesteuert und fährt – gemäß DIN 4108-2:2013-02 – für nord-, nordwest- und nordostorientierte Fenster bei einer Strahlung von 150 W/m^2 auf das Fenster herunter. Für alle anderen Orientierungen wird der Sonnenschutz bei einem Wert von 200 W/m^2 heruntergefahren (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013). In der Realität sind am Hahn-Hochhaus Lamellen als Sonnenschutz installiert, welche sehr wahrscheinlich von den Nutzer:innen individuell bedient werden können (siehe Abbildung 5: Lamellen sind nicht einheitlich heruntergefahren). Dieses Nutzerverhalten ist nicht genau vorherzusagen, weshalb die oben beschriebenen Annahmen zum Herunterfahren des Sonnenschutzes getroffen werden mussten. Da die Lamellen im Simulationsprogramm nicht modelliert werden konnten, wurden stattdessen Markisen gewählt, die parallel zum Fenster heruntergefahren werden.

Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Gebäudesimulationen im Rahmen des Forschungsprojektes *HochhausBestand* wurden Klimaprognosen von *Meteonorm* aus dem Jahr 2030 verwendet.

Sämtliche Annahmen sind detailliert in Anhang A aufgelistet.

3.2.2 Ergebnisse des Ist-Zustandes

Für die Validierung der Ergebnisse des Ist-Zustandes standen Zählerstände des Hahn-Hochhauses für das Jahr 2021 zur Verfügung. Die Zählerstände beinhalteten den Energieverbrauch von Fernwärme und Strom und sind im Anhang B detailliert aufgelistet.

Durch ein iteratives Vorgehen während des Modellierungsprozesses konnte sich den Werten der Zählerstände angenähert werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Zählerstände interpretationsdürftig sind, da sie aus einem Jahr stammen, in dem die Corona-Pandemie einen Einfluss auf die Belegung der Büros in ganz Deutschland hatte (Corona Datenplattform, 2021). Mit der Belegungszeit der Büros in Verbindung stehen dabei u. a. die Betriebszeit und der Energieverbrauch von Heiz- und Kühlsystemen sowie von elektronischen Geräten. So fällt auf, dass der Stromverbrauch des gesamten Gebäudes im Jahr 2021 mit ca. 1.100 kWh/a niedriger war, als der durchschnittliche Stromverbrauch eines 1-Personen Haushalts in einem Mehrfamilienhaus mit ca. 1.300 kWh/a (Statista, 2022). Dies spricht dafür, dass die Büroräume im Jahr 2021 kaum bis gar nicht genutzt wurden. In der Simulation des Ist-Zustandes wurde

dennoch davon ausgegangen, dass sämtliche Büros und Besprechungsräume das ganze Jahr genutzt werden. Hierdurch kam es insbesondere beim Stromverbrauch zu Diskrepanzen zwischen Simulation und realen Werten (siehe Tabelle 5).

Weitere Abweichungen von den realen Werten können durch die nicht korrekte Annahme von gebäudetechnischen oder bauphysikalischen Parametern, wie bspw. den Raumsollwerttemperaturen oder Bauteilaufbauten, entstehen. Diese Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Ergebnissen nennt man „Performance-Gap“, welche im Extremfall bei über 100 % liegen kann. Dies tritt vor allem bei Neubauten auf, in denen die Belegung falsch eingeschätzt wurde oder die Regelung der Gebäudetechnik noch nicht optimiert oder an die tatsächlichen Verhältnisse angepasst wurde. (Shi et al., 2019; Struck et al., 2014)

Beim Hahn-Hochhaus wichen die Ergebnisse der Simulation in Bezug auf den Energieverbrauch durch Fernwärme um ca. 1,8 % von den real gemessenen Werten ab. Der Stromverbrauch war aus oben genannten Gründen in der Simulation mit ca. 149.000 kWh/a deutlich höher als in der Realität. Die Abweichung des Gesamtenergiebedarfs in der Simulation vom realen Verbrauch betrug ca. 18,1 %. Folgende Werte wurden gemessen bzw. den Simulationsergebnissen entnommen:

Tabelle 5: Vergleich der gemessenen und simulierten Werte des Hahn-Hochhauses

Energie	Gemessen in kWh/a	Simuliert in kWh/a	Abweichung in %
Fernwärme	622.600	611.744	1,8
Stromverbrauch	1.143	150.094	99,2
Gesamt	623.743	761.838	18,1

Beim Blick auf die Simulationsergebnisse für den monatlichen Energiebedarf in Abbildung 6 fällt auf, dass der Heizenergiebedarf deutlich höher ist als der Kühlenergiebedarf. Die Energieeinsparpotentiale in der Heizperiode sind somit vermutlich größer als in der Kühlperiode.

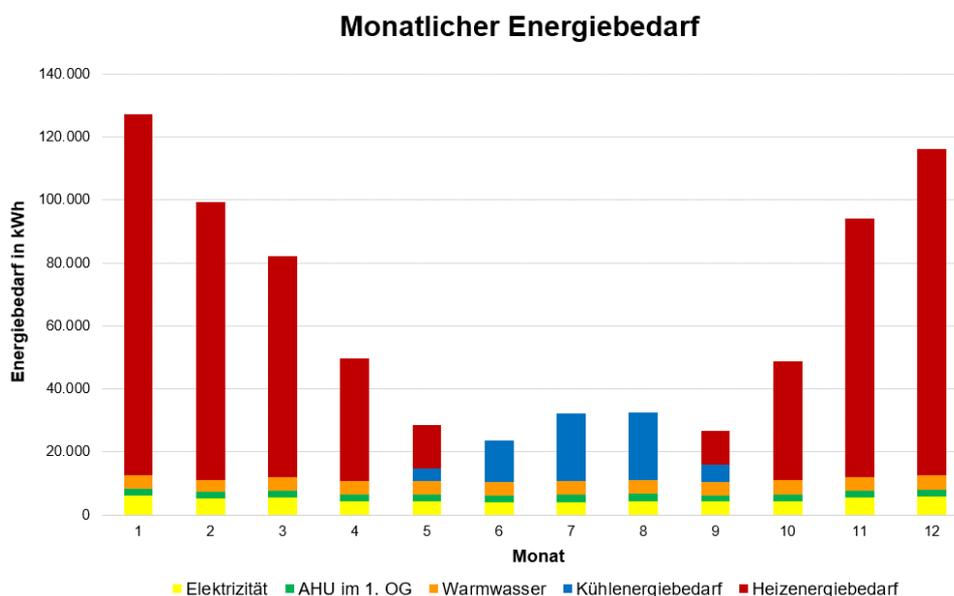


Abbildung 6: Simulationsergebnis für den monatlichen Energiebedarf des Hahn-Hochhauses

In Bezug auf den Innenraumkomfort wird in nahezu allen Zonen die Kategorie II nach DIN EN 16798-1:2022-03 (PMV zwischen - 0,5 und + 0,5) über das ganze Jahr eingehalten. Dabei bleibt festzuhalten, dass die Komfortanforderungen fast ausschließlich durch den Einsatz zusätzlicher energieintensiver Technik wie Konvektoren und Klimasplittergeräte erreicht werden. Bauphysikalische Sanierungsmaßnahmen wurden bisher – bis auf den Austausch der Fenster – nicht vorgenommen, um den Komfort bei gleichzeitiger Energiereduktion zu verbessern. Die Auswertung des Ist-Zustandes in Bezug auf den Innenraumkomfort erfolgt detailliert im nächsten Kapitel 3.2.3.

3.2.3 Ermittlung der kritischen Zone

Da bei der Auswertung der Ergebnisse nicht die Innenraumbedingungen aller Zonen betrachtet werden können, muss eine kritische Zone ermittelt werden, die als repräsentative Aufenthaltszone angenommen werden kann. Hierbei sollte eine Zone gewählt werden, in der im Ist-Zustand Raumsolltemperaturen nicht erreicht werden und im Vergleich zu den restlichen Zonen schlechtere Innenraumbedingungen herrschen. Sollten durch Sanierungsmaßnahmen komfortable Innenraumbedingungen in dieser Zone erreicht werden, kann die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, dass auch in den restlichen Zonen komfortable Bedingungen erzielt werden.

Die Ermittlung der kritischen Zonen erfolgt u. a. über die Betrachtung der PPD- und PMV-Werte sowie der minimalen und maximalen operativen Temperaturen während der Belegungszeit. Zudem werden die Lage der Zone in Bezug auf die jeweilige Geschosshöhe, die Orientierung der Fenster der jeweiligen Zone und die Nutzungsart mitberücksichtigt. Im Ermittlungsprozess werden bewusst Zonen gewählt, die als Büros genutzt werden, da sich Nutzer:innen hier an einem standardmäßigen Arbeitstag am längsten aufhalten. Besprechungsräume werden daher bei der Ermittlung der kritischen Zonen vernachlässigt.

Nach der Auswertung der Ergebnisse wurden zwei Zonen als kritische Zonen in Betracht gezogen. Die erste dieser Zonen (in den bereitgestellten Plänen und nachfolgend als 2.16 bezeichnet) liegt im 2. OG und bildet einen Teil des Überhangs vor dem Eingangsbereich im Osten des Gebäudes. Der Boden der Zone steht somit im direkten Kontakt mit der Außenluft. Es ist die Aufenthaltszone, in der die niedrigste operative Temperatur während der Belegungszeit mit 12,6 °C gemessen wird (s. Abbildung 7). Außerdem ist es die Büro-Zone mit den meisten Stunden, in denen die Heizleistung nicht ausreichend ist, um die Raumsolltemperatur von 21 °C zu erreichen.

Die zweite Zone, die als kritische Zone in Frage kommt, liegt im 12. OG und hat direkten Kontakt zur Dachfläche (12.02). Die Fensterflächen sind von Südwesten bis Nordwesten orientiert (s. Abbildung 8). Hier wird die höchste operative Temperatur aller Zonen mit 32,6 °C während der Belegungszeit gemessen (siehe Abbildung 7). Außerdem wird die operative Temperatur von 27 °C in dieser Zone am häufigsten überschritten. Insgesamt liegt die operative Temperatur 63,9 Stunden über 27 °C.

Auffällig ist, dass in beiden Zonen das Abschalten der Heizung während der Kühlperiode zu niedrigen operativen Innentemperaturen von bis zu 12 °C im Sommer (nach ca. 4.000 h im Jahr, d. h. Mitte Juni) führt. Dies kann auf die niedrigen Außenlufttemperaturen in dieser Zeit (in der Nacht und am Tag) und die hohen U-Werte der Außenhülle im Ist-Zustand zurückgeführt werden, wodurch es zu hohen Transmissionswärmeverlusten kommt.

Verlauf der operativen Temperatur

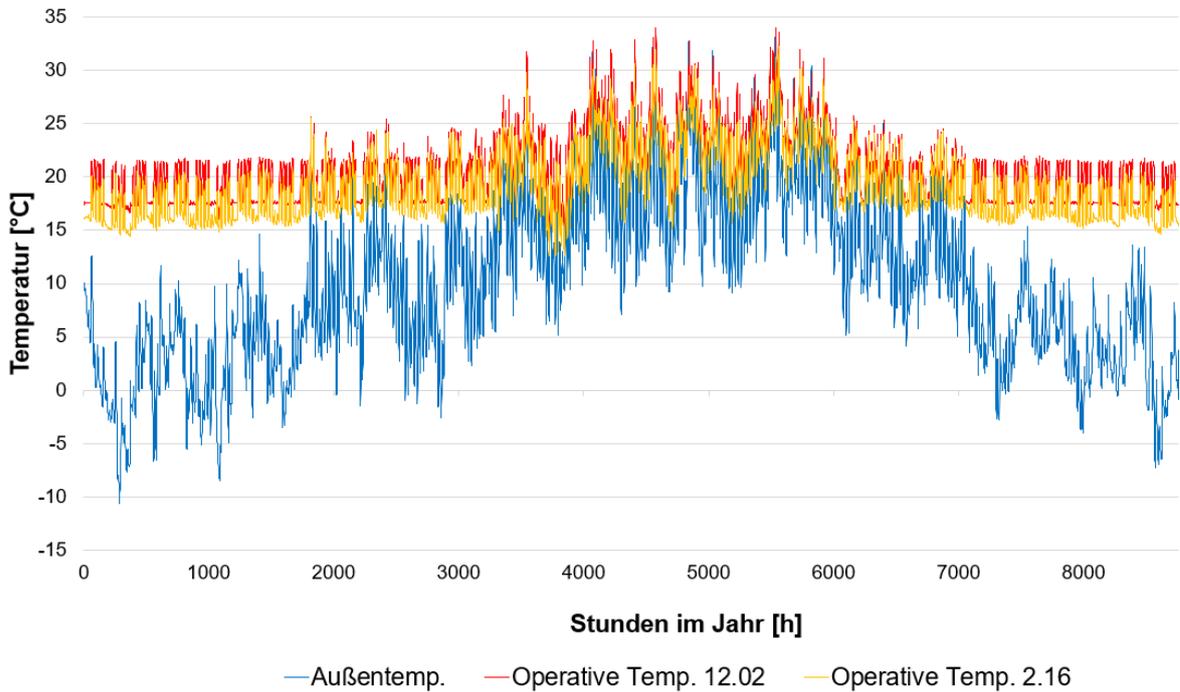


Abbildung 7: Vergleich der operativen Temperaturen in den Zonen 12.02 und 2.16 mit der Außentemperatur über den Jahresverlauf

Da die Auswertung der verschiedenen Szenarien für zwei Zonen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, wurde lediglich die Zone 12.02 im 12. Obergeschoss als kritischste Zone beachtet. Dies liegt u. a. an der Lage der Zone. Da es im Hahn-Hochhaus einige Zonen mit Dachflächen gibt (11., 12. und 13. OG) wurde diese Zone als repräsentativer für das Gebäude betrachtet als die Zone 2.16. Die Zone 2.16 stellt mit dem direkt an die Außenluft angrenzenden Boden eher einen Sonderfall dar.

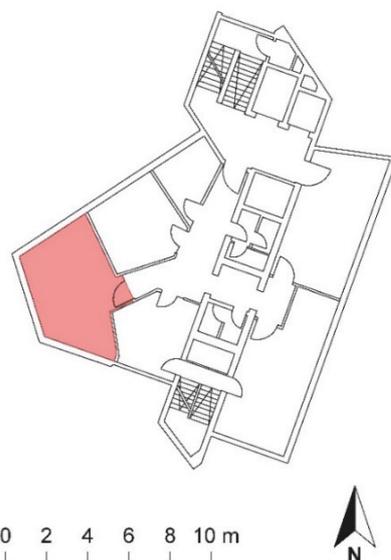


Abbildung 8: Zone 12.02 im 12. OG des Hahn-Hochhauses (rot markiert)

Die detailliertere Betrachtung der PMV-Werte für die Zone 12.02 zeigt, dass der optimale PMV-Wert von 0 eher unter- als überschritten wird (siehe Abbildung 9). Die mittleren 50 % der PMV-Werte liegen in einem Bereich von 0 bis -0,25 (blaue Box). Auch der Median liegt bei einem PMV-Wert von -0,2 (langer roter Strich). Diese Ergebnisse zeigen, dass die Auskühlung der kritischen Zone eine größere Herausforderung darstellt als die Überhitzung. Zwar gibt es mehr Ausreißer (kurze rote Striche) oberhalb von einem PMV-Wert von 1 als unterhalb von einem Wert von -1; diese Ausreißer sind zu vernachlässigen. Insgesamt wurden 2860 PMV-Werte in der Simulation aufgezeichnet, für jede Stunde, in der die Zone innerhalb eines Jahres belegt war. 95 % dieser PMV-Werte liegen dabei zwischen 0,3 und -0,6 (oberer und unterer blauer Whisker). Obwohl es sich um die kritische Zone 12.02 handelt, wird somit die Kategorie II nach der DIN EN 16798-1:2022-03 im Ist-Zustand des Hahn-Hochhauses nahezu vollständig eingehalten. Dieser Innenraumkomfort wird im Ist-Zustand allerdings nur durch den Einsatz energieintensiver Gebäudetechnik erreicht.

Sämtliche nachfolgende Darstellungen zu den PMV-Werten beziehen sich auf die Zone 12.02.

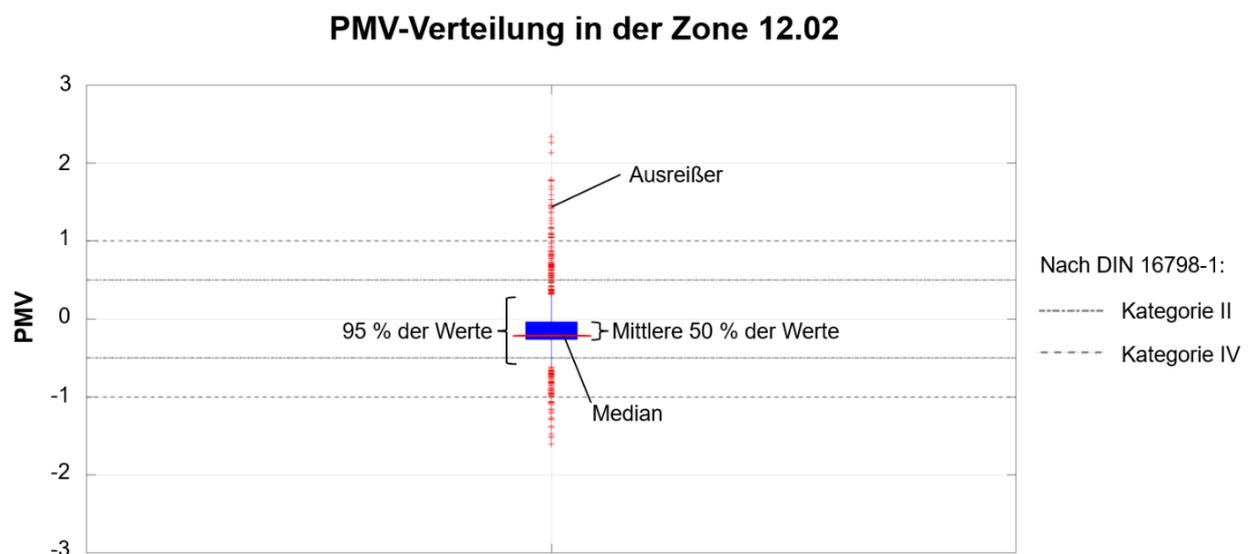


Abbildung 9: Verteilung der PMV-Werte während der Belegungszeit in der Zone 12.02

3.3 Vorstellung der einzelnen Maßnahmen

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Sanierungsmaßnahmen und gebäudetechnischen Einstellungen, die im Rahmen der Simulation getestet wurden, vorgestellt. Die Auswertung der Maßnahmen folgt in Kapitel 3.4. Bei der Auswahl der Maßnahmen wurde darauf geachtet, dass die Durchführung realistisch ist und dass möglichst keine zusätzlichen technischen Geräte eingebaut werden. Dadurch sollen die im Betrieb häufig auftretenden Systemfehler, Fehlbedienung und Ausfälle technischer Komponenten (Nagler et al., 2022) als Fehlerquellen in der Simulation reduziert und robuste Maßnahmen bevorzugt werden (siehe auch Kapitel 1.5).

Dämmung der Gebäudehülle

Die Dämmung der Außenhülle stellt eine gängige Sanierungsmaßnahme zur Reduktion des Energieverbrauchs eines Gebäudes dar, da Transmissionswärmeverluste an der Gebäudehülle durch zusätzliches Dämmmaterial minimiert werden können. (Cholewa, 2022, S. 43)

An der Gebäudehülle wurden die U-Werte der flächenmäßig größten Bauteile – Dach und Fassade (Außenwand und Fenster) – gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) Anlage 7 „Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen bei Änderung an bestehenden Gebäuden“ angepasst (GEG, 2020). Da das Hahn-Hochhaus ein Baudenkmal ist, kann bei einer Sanierung von den bauphysikalischen und energetischen Anforderungen des GEG abgewichen werden, wenn die „Substanz oder das Erscheinungsbild [des Gebäudes] beeinträchtigt [werden] oder andere Maßnahmen zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand führen“ (GEG, 2020, § 105).

Die Simulation der nachträglichen Dämmung der Außenhülle des Gebäudes soll nun aufzeigen, welche Energieeinsparungen mit einer Maßnahme erreicht werden, die den Denkmalschutz nicht berücksichtigt. Zunächst wurden die angepassten U-Werte vom Dach und der Außenwand inklusive Fenster getrennt voneinander simuliert und anschließend miteinander kombiniert. Bei der Kombination der Maßnahmen wurde neben Dach, Außenwand und Fenster zudem der U-Wert für den Geschossboden gegen Außenluft im 2. OG angepasst. Somit ist die gesamte an die Außenluft angrenzende Gebäudehülle in dieser Variante angepasst. Die Änderungen der U-Werte können der nachfolgenden Tabelle 6 entnommen werden:

Tabelle 6: Vergleich der U-Werte der einzelnen Bauteile im Ist-Zustand (Thiel & Riedel, 2011) und nach der Sanierung nach GEG-Standard (GEG, 2020)

Bauteil	U-Wert im Ist-Zustand in $W/(m^2K)$	U-Wert nach Sanierung in $W/(m^2K)$
Dach	1,5	0,24
Außenwand	2,1	0,24
Fenster (Rahmen und Glas, U_w)	1,9	1,3
Geschossboden gegen Außenluft	1,0	0,5

Freie Nachtlüftung

Eine freie Nachtlüftung kann in der Kühlperiode dazu beitragen, den Kühlenergieverbrauch zu reduzieren. Die am Tag aufgeheizten Räume können durch die Zirkulation von Außenluft, die kälter als die Luft im Innenraum ist, in der Nacht wirksam abgekühlt werden. Dies ist ohne den Einsatz von energieintensiven Kühlsystemen möglich. (Mayrhofer et al., 2022)

Bei Maßnahmen, die die freie Nachtlüftung betreffen, wurde zwischen automatischer und manueller Lüftung unterschieden. Freie Nachtlüftung bedeutet, dass Lüftungsöffnungen geöffnet oder geschlossen werden. Auf den Einsatz einer aktiven mechanischen Nachtlüftung mit Hilfe einer Lüftungsanlage wurde verzichtet, da der Einbau von zusätzlicher Gebäudetechnik bei der Wahl der Maßnahmen vernachlässigt wurde.

Da die Randbedingungen für die automatische Nachtlüftung in keiner Norm definiert werden, wurden sechs verschiedene Einstellungen getestet. Die einzelnen Varianten unterschieden sich in den Werten für die Außenlufttemperatur und Innenlufttemperatur ab der gelüftet wurde (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Einstellungen der Testvarianten für die automatische Nachtlüftung

Variante	Gewählte Einstellungen, ab denen automatische Nachtlüftung aktiv wird
1	Außenraumlufthtemperatur < 15 °C, Innenraumlufthtemperatur > 15 °C
2	Außenraumlufthtemperatur > 10 °C, Innenraumlufthtemperatur > 15 °C
3	Außenraumlufthtemperatur > 10 °C, Außenraumlufthtemperatur < Innenraumlufthtemperatur
4	Außenraumlufthtemperatur > 12 °C, Außenraumlufthtemperatur < Innenraumlufthtemperatur
5	Außenraumlufthtemperatur < 15 °C, Außenraumlufthtemperatur < Innenraumlufthtemperatur
6	Außenraumlufthtemperatur > 15 °C, Außenraumlufthtemperatur < Innenraumlufthtemperatur

Die Auswertung der verschiedenen Varianten ergab, dass die größten Energieeinsparungen und die zugleich komfortabelsten Innenraumbedingungen erreicht werden können, wenn folgende Einstellungen für die automatische Nachtlüftung gewählt werden: Außenlufttemperatur < Innenlufttemperatur und Außenlufttemperatur > 10 °C ist. Daher wird diese Variante für die Auswertung weiterer Ergebnisse und die Kombination verschiedener Maßnahmen als automatische Nachtlüftung verwendet. Die Ergebnisse der verschiedenen Varianten der automatischen Nachtlüftung in Bezug auf den Energiebedarf und Innenraumkomfort können in Anhang C eingesehen werden.

Die Größe der Nachtlüftungsöffnungen ermöglicht einen Luftaustausch von max. 2 h⁻¹. Bei der automatischen Nachtlüftung ist zu berücksichtigen, dass an jedem Fenster ein Mechanismus inklusive Sensoren und einer Steuerungseinheit eingebaut werden muss, die das Öffnen und Schließen der Fenster automatisch regelt.

Die manuelle Nachtlüftung sieht vor, dass während der Kühlperiode die Nachtlüftungsöffnungen jeden Tag um 18 Uhr geöffnet werden und um 7 Uhr am darauffolgenden Tag wieder geschlossen werden. Die Lüftung beträgt in dieser Zeit ebenfalls max. 2 h⁻¹. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013, S. 30)

Bei der manuellen Nachtlüftung erfolgt die Öffnung von Hand. Diese Tätigkeit kann bspw. von Mitarbeiter:innen des Objektschutzes oder den Büronutzer:innen durchgeführt werden.

An den manuellen und automatischen Nachtlüftungsöffnungen ist gegebenenfalls der Einbau eines Gitters für den Insektenschutz notwendig. Da erst ab dem 2. OG und in den darüberliegenden Geschossen in der Nacht gelüftet wird und die Nachtlüftungsöffnungen eine geringe Größe haben, können Maßnahmen zum Schutz vor Einbruch vernachlässigt werden.

Anpassung der Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit

Die Einstellung der Raumsolltemperatur ist entscheidend dafür, auf wieviel Grad die Räume geheizt werden. Dadurch steht die Raumsolltemperatur im direkten Zusammenhang mit dem Energieverbrauch des Gebäudes.

Im Ist-Zustand liegen die Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit nach der DIN V 18599-10:2018-09 Anhang A bei mindestens 21 °C für die Heizperiode und maximal 24 °C für die Kühlperiode (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018). In der DIN EN 16798-1:2022-03 werden die operativen Temperaturen je nach Kategorie für das Raumklima anders definiert. In der Kategorie II, die zur Auslegung für den Komfort in sanierten Bestandsgebäuden angewendet werden soll, liegen die Grenzwerte für die operativen Temperaturen in Büroräumen bei 20 (Heizperiode) und 26 °C (Kühlperiode). Für die

Kategorie IV, der unkomfortabelsten der vier Kategorien für das Raumklima, sind die Werte auf 18 und 28 °C festgelegt. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Diese Arbeit beschränkt sich darauf, den Einfluss dieser beiden Kategorien auf den Energiebedarf und Innenraumkomfort zu testen. Zudem wurde geprüft, ob durch ein komplettes Ausschalten aller Kühlsysteme (inkl. der Lüftungsanlage im 1. OG) bei gleichzeitiger Installation von Deckenventilatoren (siehe unten) ein akzeptables Raumklima und Energieeinsparungen erreicht werden können. Die Raumsolltemperatur für die Kühlperiode entfällt auf Grund der fehlenden Kühlsysteme. Für die Heizperiode wurde bei dieser Variante ein Raumsollwert von 18 °C gewählt.

Anpassung der Raumsolltemperatur außerhalb der Belegungszeit

Die Anpassung der Raumsolltemperatur außerhalb der Belegungszeit hat ebenfalls einen direkten Einfluss auf den Energieverbrauch eines Gebäudes. Bis zu einem gewissen Grad gilt: Je niedriger die eingestellte Raumsolltemperatur in der Nacht, desto niedriger auch der Energieverbrauch. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass das Gebäude in der Nacht nicht zu stark auskühlt. Sonst kann es dazu kommen, dass deutlich mehr Energie in den Morgenstunden benötigt wird, um das abgekühlte Gebäude wieder aufzuheizen.

Im Ist-Zustand wurde nach der DIN V 18599-10:2018-09 Anhang A festgelegt, dass während der Heizperiode die Raumsolltemperatur im reduzierten Betrieb (18 bis 5 Uhr) um 4 K abgesenkt wird (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018). Bei einer Raumsolltemperatur von 21 °C während des Betriebs, bedeutet dies eine Raumsolltemperatur von mind. 17 °C außerhalb der Belegungszeiten und während der Heizperiode. Da die realen Raumsolltemperaturen während des Tages und während der Nacht nicht bekannt sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit getestet, welchen Einfluss eine Nachtabsenkung der Raumsolltemperatur auf 16 bzw. 15 °C hat. Eine Absenkung um 4 K auf diese Temperaturen würde nach der DIN V 18599-10:2018-09 dann stattfinden, wenn die Raumsolltemperatur am Tag bei 20 bzw. 19 °C liegen würde (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018). 20 °C entspricht dem Mindestwert der operativen Temperatur für die Kategorie II nach der DIN EN 16798-1:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a). Eine maximale Raumsolltemperatur von 19 °C in Arbeitsstätten ist momentan als Energieeinsparungsmaßnahme gesetzlich vorgeschrieben (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2023a).

Hier ist zu erwähnen, dass die reale Raumsolltemperatur außerhalb der Belegungszeit nicht bekannt ist und bereits bei 15 oder 16 °C liegen könnte. Es handelt sich bei den 17 °C lediglich um eine gebäudetechnische Annahme.

Klimadaten

Im Rahmen der Simulation wurde neben den Maßnahmen zur Energieeinsparung außerdem getestet, ob der Klimawandel einen Effekt auf die Ergebnisse der Maßnahmen hat. Hierfür wurden Klimaprognosen von *Meteonorm* aus 2050 (Szenario: IPCC AR4 B1) anstelle der Daten von 2030 (Ist-Zustand) verwendet. Auf Grund der Änderung in den Daten musste die Kühlperiode vom 19. Mai auf den 17. Mai und vom 09. September auf den 14. September um insgesamt 7 Tage erweitert werden.

Deckenventilator

Deckenventilatoren gelten auf Grund ihres geringen Energieverbrauchs, bei gleichzeitiger Verbesserung des thermischen Komforts als geeignete Maßnahmen zur Raumkonditionierung während der Kühlperiode (Chen et al., 2018; Omrani et al., 2021; Risetto et al., 2021; Tadeballi et al., 2021).

Die zulässige max. Luftgeschwindigkeit wird dabei von der DIN EN 16798-1:2022-03 vorgegeben und liegt im Sommer bei 0,34 m/s. Laut dieser Norm sind höhere Luftgeschwindigkeiten nur dann zulässig, wenn die Luftgeschwindigkeit unmittelbar durch Nutzer:innen geregelt werden kann. Die Installation von Deckenventilatoren wurde in der Simulation kombiniert mit der Anpassung der Raumsolltemperaturen auf 18 °C (Heizperiode) und 28 °C (Kühlperiode). Diese Raumsolltemperaturen entsprechen der oben bereits erwähnten Komfortkategorie IV der DIN EN 16798-1:2022-03 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a). Durch den erhöhten Wert in der Kühlperiode soll getestet werden, ob Deckenventilatoren die Kühlsysteme bis zu einem gewissen Grad ersetzen können.

Der Fokus soll bei der Durchführung dieser Einzelmaßnahme allerdings darauf liegen, zu testen, bei welcher Luftgeschwindigkeit die komfortabelsten Bedingungen erreicht werden. Hierfür wurden folgende Geschwindigkeiten getestet: 0,15 m/s, 0,34 m/s (Kategorie I und Kategorie III nach DIN EN 16798-1:2022-03 Tab. NA.4) und 0,6 m/s (DIN NA 16798-1:2022-03 Tab. NA.5) (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a). Von höheren Luftgeschwindigkeiten wurde abgesehen, da die Unterschiede in Bezug auf den Innenraumkomfort zwischen 0,34 m/s und 0,6 m/s bereits gering waren (siehe Anhang C).

Da Deckenventilatoren nicht direkt in *IDA ICE* implementiert werden können, wurden jeweils zwei verschiedene Simulationen durchgeführt. Bei der ersten Simulation wurde die Voreinstellung von einer Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s in den Zonen, wie bei allen anderen Simulationen ohne Ventilator, übernommen (Ventilator aus). In der zweiten Simulation wurde die Luftgeschwindigkeit innerhalb der Zonen erhöht (Ventilator an). In der Nachbearbeitung wurde der PMV-Wert für jede einzelne Stunde in Abhängigkeit von der operativen Innentemperatur ausgewählt: Lag die operative Innentemperatur unter 26 °C, wurde der PMV-Wert von der ersten Simulation (Ventilator aus) verwendet; lag die operative Innentemperatur über 26 °C, wurde der PMV-Wert der zweiten Simulation verwendet. Außerdem wurden darauf aufbauend die Stunden, in denen der Ventilator angeschaltet war, und damit verbunden der Energiebedarf für den Ventilator ermittelt. 26 °C wurde als obere Grenze gewählt, da dies der empfohlene Höchstwert für die operative Innentemperatur in der Kategorie II ist. Die Kategorie II gilt, wie bereits zuvor erwähnt, als Grundlage für die Komfortauslegung von sanierten Bestandsgebäuden. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Kleidung

Neben anderen Faktoren hat auch die Kleidung einen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit von Gebäudenutzer:innen. Dieser Aspekt wird durch den sogenannten clo-Faktor in den Behaglichkeitsberechnungen berücksichtigt und quantifiziert. Die Anpassung des clo-Faktor kann einen Einfluss auf das Behaglichkeitsempfinden haben (Rupp et al., 2021).

Im Ist-Zustand liegt der Wert für den clo-Faktor zwischen 0,5 und 1,0 nach der DIN EN 16798-1:2022-03 Tab. NA3 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a). Hierbei wurde angenommen, dass ab einem PMV-Wert von -0,5 die meiste Kleidung (clo-Faktor: 1,0) und ab einem PMV-Wert von 0,5 am wenigsten

Kleidung (clo-Faktor: 0,5) getragen wird. Mit Hilfe der Simulationen wurde in dieser Arbeit getestet, wie sich das Behaglichkeitsempfinden der Büronutzer:innen verändert, wenn der Bereich des clo-Faktors auf 0,4 bis 1,1 bzw. von 0,3 bis 1,2 erhöht wird. Da dies keine gebäudetechnische Einstellung und stark nutzerabhängig ist, wird diese Maßnahme gesondert betrachtet.

Sonnenschutz

Der Sonnenschutz wird bei dieser Maßnahme nicht mehr strahlungsgesteuert bedient, sondern temperaturgesteuert. Als Grenzwert gilt hierbei eine Innenlufttemperatur von 26 °C nach Kategorie II der DIN EN 16798-1:2022-03. Wird dieser Wert überschritten, wird der Sonnenschutz heruntergefahren. In Abbildung 10 wird der Unterschied zwischen strahlungs- und temperaturgesteuertem Sonnenschutz aufgezeigt: Der Wert 1 auf der linken y-Achse bedeutet hierbei, dass der Sonnenschutz gerade heruntergefahren ist. Der Wert 0 bedeutet, dass der Sonnenschutz nicht aktiv, also hochgefahren ist. Im Winter können höhere solare Strahlungsgewinne erzielt werden, da eine Innenraumlufttemperatur von 26 °C in der Heizperiode deutlich seltener überschritten wird als die Grenzwerte für Strahlung (siehe Kapitel 3.2.1) und somit der Sonnenschutz seltener aktiv ist. Dies reduziert den nötigen Heizenergiebedarf des Gebäudes.

Es ist darauf hinzuweisen, dass bei einem temperaturgesteuerten Sonnenschutz häufiger Blendung am Arbeitsplatz auftritt, da der Sonnenschutz auch bei vorhandener Strahlung nicht zwingend heruntergefahren wird. Nutzer:innen werden somit ähnlich wie beim clo-Faktor unmittelbar beeinträchtigt. Daher wird diese Maßnahme bei der späteren Kombination und Auswertung der Maßnahmen ebenfalls gesondert betrachtet.

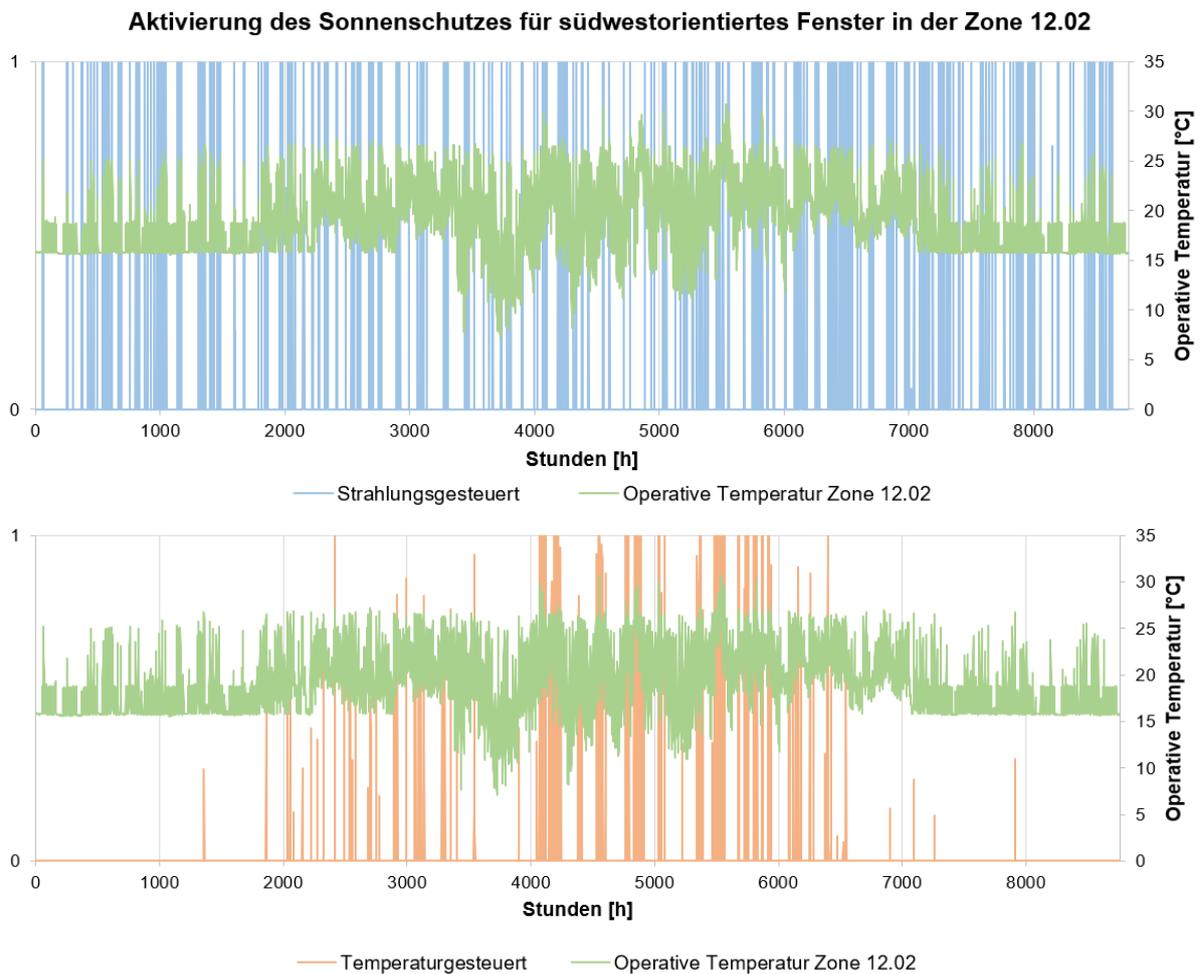


Abbildung 10: Beispielhafter Vergleich der strahlungsgesteuerten und temperaturgesteuerten Aktivierung des Sonnenschutzes in Abhängigkeit der operativen Temperatur am Beispiel eines südwestorientierten Fensters in der Zone 12.02; 0 = inaktiver Sonnenschutz und 1 = vollständig aktiver Sonnenschutz

Die verschiedenen Maßnahmen können in die Kategorien „aktive“ und „passive“ Maßnahmen, „Nutzerverhalten“ und „Sonstiges“ einsortiert werden. Unter aktiven Maßnahmen werden dabei solche verstanden, für die zusätzliche Technik im Haus verbaut werden muss und die während der Nutzung aktiv Energie benötigen (z. B. Regelungstechnik der automatischen Nachtlüftung). Bei den passiven Maßnahmen ist kein Einsatz von Technik erforderlich (z. B. Dämmung oder manuelles Öffnen der Fenster). (Oehler, 2017, S. 149)

Die Einordnung der einzelnen Maßnahmen in diese Kategorien sowie eine zusammenfassende Beschreibung der jeweiligen Maßnahme kann der nachfolgenden Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 8: Zusammenfassung und Aufteilung der einzelnen Maßnahmen in Kategorien

Art der Maßnahme	Maßnahme	Beschreibung der Maßnahme
Aktive Maßnahmen	Deckenventilator	Implementierung von Deckenventilatoren, die Luftgeschwindigkeiten von 0,15, 0,34 und 0,6 m/s erzeugen können, bei gleichzeitiger Erhöhung der Raumsolltemperatur (Kühlperiode)
	Freie automatische Nachtlüftung	Max. Luftaustausch von 2 h^{-1} von 18 bis 5 Uhr je nach Einstellung (s. o. und siehe Anhang C)
	Raumsollwerttemperaturen (während der Betriebszeit)	Raumsollwerte von 20 (Heizperiode) und 26 °C (Kühlperiode); 18 und 28 °C; 18 °C und keine Kühlung mit Deckenventilator
	Raumsollwerttemperaturen (außerhalb der Betriebszeit)	Raumsollwerte während der Nachtabsenkung auf 16 °C und 15 °C während der Heizperiode
Passive Maßnahmen	Dämmung Dach	U-Wert des Dachs von 1,5 auf 0,24 W/(m ² *K) angepasst
	Dämmung Außenwand und Fenster	U-Wert der Außenwand von 2,1 auf 0,24 W/(m ² *K) und U _w -Wert des Fensters von 1,9 auf 1,3 W/(m ² *K) angepasst
	Kombination der Dämmmaßnahmen	Kombination der beiden oben genannten Maßnahmen und zusätzlich den Boden des 2. OG gegen Außenluft von 1,0 W/(m ² *K) auf 0,5 W/(m ² *K) angepasst
	Freie manuelle Nachtlüftung	Max. Luftaustausch von 2 h^{-1} von 18 bis 7 Uhr an jedem Tag in der Kühlperiode
Nutzerverhalten	Kleidung	Clo-Faktor von 0,5 bis 1,0 auf 0,4 bis 1,1 und 0,3 bis 1,2 erhöht
	Sonnenschutz	Sonnenschutz von strahlungsgesteuert auf temperaturgesteuert
Sonstiges	Klimadaten	Klimadaten von 2030 mit Klimadaten aus 2050 ausgetauscht

3.4 Auswertung der Maßnahmen

Durch die Auswertung der einzelnen Maßnahmen entschied sich, welche Maßnahmen weiter betrachtet wurden und welche nicht. Die Änderung der Klimadaten wurde nicht weiterverfolgt:

Wie die Ergebnisse des Ist-Zustandes bereits gezeigt haben, stellt die Heizperiode energetisch gesehen eine größere Herausforderung dar als die Kühlperiode. Dies zeigt auch die Anpassung der Klimadaten, welche eine Reduktion des Gesamtenergiebedarfs zur Folge hat. Der Kühlenergiebedarf steigt um ca. 5.000 kWh/a, wohingegen der Heizenergiebedarf um ca. 35.000 kWh/a reduziert wird.

Die Anpassung der Klimadaten hat dabei einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die prozentuale Reduktion des Energiebedarfs, die durch die Sanierungsmaßnahmen im Vergleich zum Basismodell erreicht werden können. Dies wird in Abbildung 11 deutlich: Mit den Klimadaten von 2030 wird durch die Sanierung von Fenstern und der Außenwand auf GEG-Standards eine Gesamtenergiereduktion von 27,4 % im Vergleich zum Ist-Zustand erreicht. Verwendet man die Klimadaten von 2050 für die Simulation

des Ist-Zustandes und der Sanierungsmaßnahme, liegt der Wert für die Reduktion bei 26,8 %. Dieser Unterschied wurde als vernachlässigbar angenommen. Im weiteren Vorgehen wurden daher lediglich die Klimadaten von 2030 verwendet.

Der jährliche Energiebedarf bezieht sich in Abbildung 11 und in den folgenden Darstellungen auf die Nutzfläche des Hahn-Hochhauses in m².

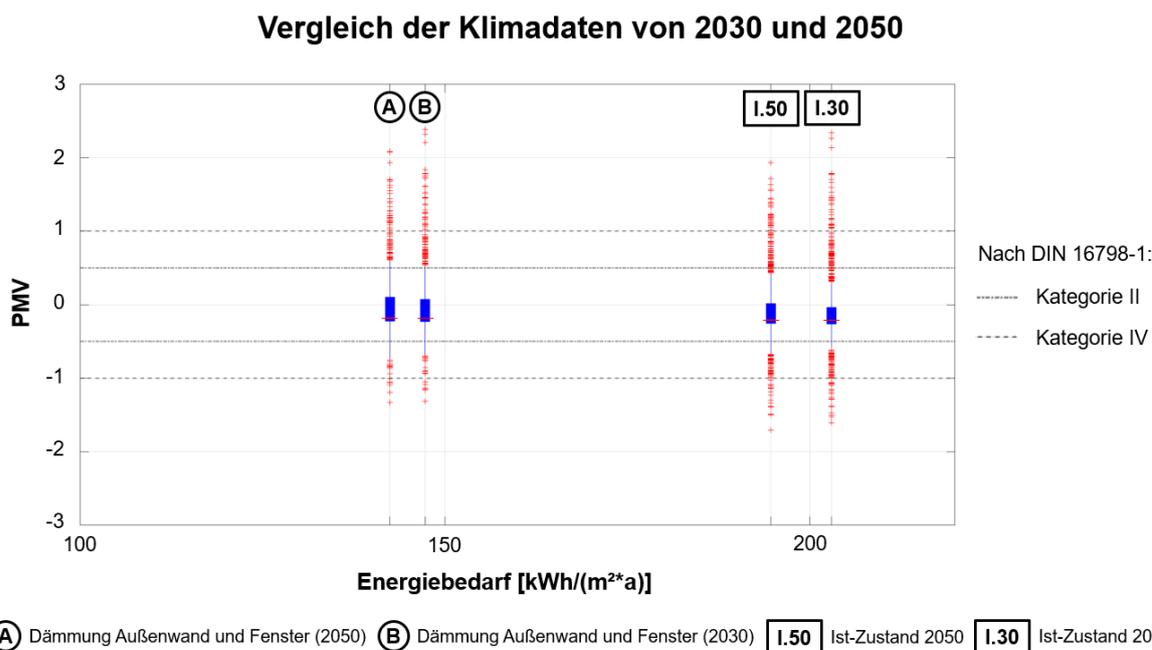


Abbildung 11: Vergleich der Klimadaten im Ist-Zustand und anhand einer ausgewählten Maßnahme

3.4.1 Ergebnisse der einzelnen Maßnahmen

Zunächst werden die Ergebnisse der Dämmmaßnahmen an der Außenhülle des Gebäudes vorgestellt. Die Reduktion der Gesamtenergiebedarfs war bei diesen Maßnahmen abhängig von der Größe der Fläche der Außenhülle, deren Dämmwert verbessert wurde. Die jeweiligen Flächen sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Übersicht über die an die Außenluft angrenzende Fläche der einzelnen Bauteile

Bauteil	Fläche in m ²
Dach	365,02
Außenwand	1914,12
Fenster	1317,87
Boden gegen Außenluft im 2. OG	112,39

Die Reduktion des Energiebedarfs ist bei der kleinsten Fläche, die einzeln untersucht wurde, dem Dach, mit 6,7 % im Vergleich zum Ist-Zustand am geringsten. Die Sanierung der Außenwand und Fenster ist auf Grund der größeren Fläche, die saniert wurde, mit einer Reduktion von 27,4 % wirksamer. Die Kombination beider Maßnahmen sowie der zusätzlichen Dämmung des Bodens im 2. OG, welcher an die Außenluft

angrenzt, führte zu einer Gesamtenergiereduktion von 35,1 % (siehe Abbildung 12). Der Effekt der Dachdämmung auf den Innenraumkomfort ist dabei minimal: Der Bereich, in dem der Großteil der PMV-Werte liegt, verlagert sich geringfügig in Richtung der positiven PMV-Werte. Diese Verlagerung wird noch ausgeprägter bei der Sanierung von Außenwand und Fenstern bzw. der Kombination der Maßnahmen. Auffällig ist dabei außerdem, dass auch die Ausreißer im negativen PMV-Bereich bei der Kombination der Maßnahmen wegfallen und somit die teilweise unkomfortable Auskühlung der Zone kein Problem mehr darstellt.

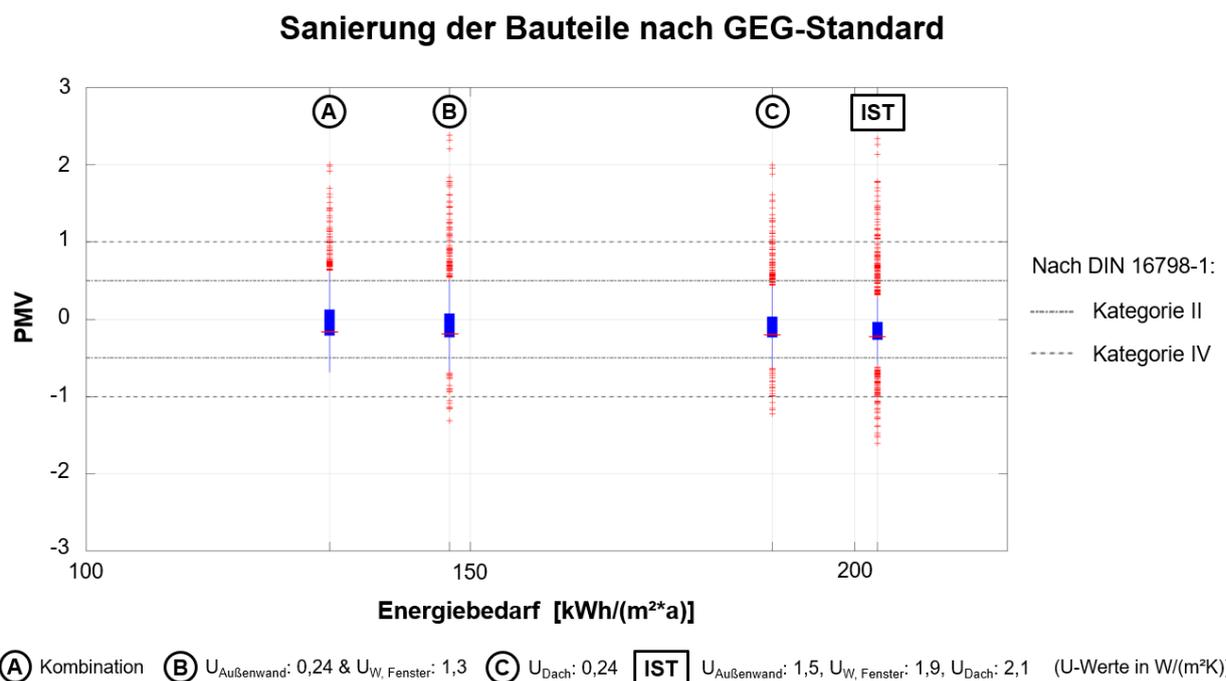


Abbildung 12: Vergleich der verschiedenen Varianten zur Dämmung des Gebäudes mit dem Ist-Zustand

Die verschiedenen Varianten der Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit weisen in Bezug auf den Innenraumkomfort teilweise deutlich größere Abweichungen zum Ist-Zustand auf als die zuvor beschriebenen Anpassungen der Dämmwerte (siehe Abbildung 13). Bei einer Anpassung der Raumsolltemperaturen auf 20 und 26 °C (Variante C) ist der Einfluss auf die Behaglichkeitsbedingungen eher gering: 95 % der PMV-Werte befinden sich weiterhin innerhalb der Komfortkategorie IV nach der DIN EN 16798-1:2022-03 zwischen 0,46 und -0,87 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a). Der Gesamtenergiebedarf kann bei dieser Variante um ca. 5 % reduziert werden.

Die Einstellung der Raumsolltemperaturen auf 18 und 28 °C (Variante B in Abbildung 13) führt zu einer Reduktion des Gesamtenergiebedarfs von ca. 12 %. Dabei vergrößert sich der Bereich, in dem 95 % der PMV-Werte liegen, auf 0,89 bis -1,6. Hierbei wird der PMV-Grenzwert von -1 im negativen Bereich unterschritten, und die Kategorie IV nach der DIN EN 16798-1:2022-03 kann somit nicht mehr eingehalten werden (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a).

Auffällig ist, dass das Ausschalten aller Kühlsysteme und die Installationen von Deckenventilatoren (Variante A) die Ergebnisse für den Innenraumkomfort im Vergleich zur Variante B kaum beeinflussen. Bei einer Überhitzung der Zone sind die Deckenventilatoren wirksamer für das Behaglichkeitsempfinden der

Nutzer:innen als die zuvor eingebauten Kühlsysteme (bei einer Raumsolltemperatur von 28 °C). Dies zeigt sich durch die Verschiebung des 95 %-Bereichs von 0,89 (Variante B) auf 0,87 (Variante A) und durch die Reduktion der Ausreißer oberhalb des PMV-Wertes von 1. Zudem führt der Einsatz von Deckenventilatoren anstelle von energieintensiveren Kühlsystemen dazu, dass der Energiebedarf des Gebäudes um 26 % gesenkt werden kann. Für den Deckenventilator wurde hierbei eine Geschwindigkeit von 0,34 m/s als max. zulässige Geschwindigkeit nach der DIN EN 16798-1:2022-03 gewählt (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a).

Raumsolltemperaturen für Heiz- und Kühlperiode während der Belegungszeit

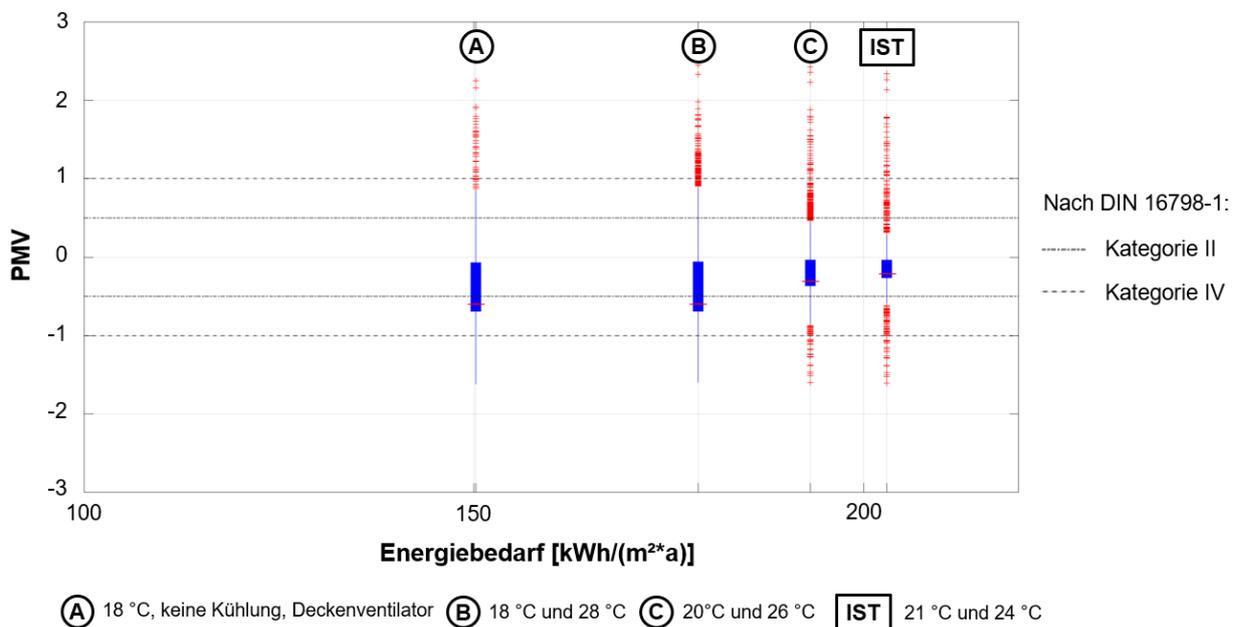


Abbildung 13: Vergleich der verschiedenen Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit mit dem Ist-Zustand

Die Anpassung der Raumsolltemperaturen während der Nacht in der Heizperiode hat, wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, nahezu keinen Einfluss auf den Innenraumkomfort. Der untere Grenzwert für den Bereich, in dem 95 % der gemessenen PMV-Werte liegen, verschiebt sich bei einer Nachtabsenkung auf 16 °C von -0,61 (Ist-Zustand) auf -0,62. Bei einer Nachtabsenkung von 15 °C liegt der Wert bei -0,63. Diese minimalen Abweichungen nach unten können damit erklärt werden, dass die Absenkung der Innentemperatur in der Nacht von 18 bis 5 Uhr dazu führen kann, dass die Heizsysteme bis zur Belegungszeit ab 7 Uhr noch keine vollständig komfortablen Bedingungen herstellen können. Dies tritt häufiger bei niedrigeren Innentemperaturen in der Nacht auf, daher ist der beschriebene untere Grenzwert für 95 % der PMV-Werte bei 15 °C am niedrigsten. Eine zu starke Auskühlung in der Nacht (siehe Kapitel 3.3), die einen erheblichen Einfluss auf den Innenraumkomfort hat, tritt bei den gewählten Raumsolltemperaturen nicht auf.

Die Reduktion des Gesamtenergiebedarfs verhält sich nahezu linear zur Reduktion der – hier untersuchten – Raumsolltemperaturen während der Nacht. Eine Nachtabsenkung um 1 K auf 16 °C

reduziert den Gesamtenergiebedarf um 3,7 %. Eine Nachtabenkung um 2 K auf 15 °C hat eine Reduktion von 7,1 % zur Folge (siehe Abbildung 14).

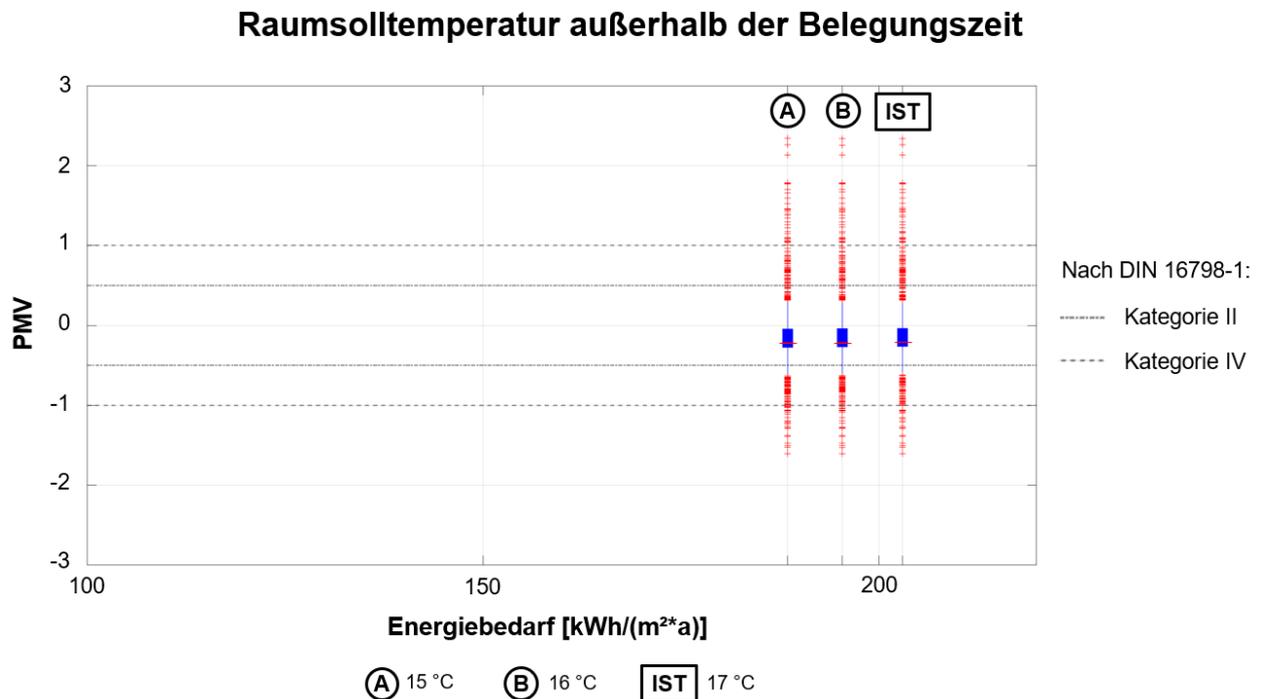


Abbildung 14: Vergleich der verschiedenen Raumsolltemperaturen außerhalb der Belegungszeit (Heizperiode) mit dem Ist-Zustand

Weder die automatische noch die manuelle Nachtlüftung haben einen großen Effekt auf den Energiebedarf des Gebäudes oder den Innenraumkomfort der kritischen Zone. Dabei weist die manuelle Nachtlüftung, bei der keine zusätzliche Technik eingebaut werden muss, eine höhere Energiereduktion und behaglichere Innenraumkomfortbedingungen auf (siehe Abbildung 15).

Nachtlüftung (NL) während der Kühlperiode

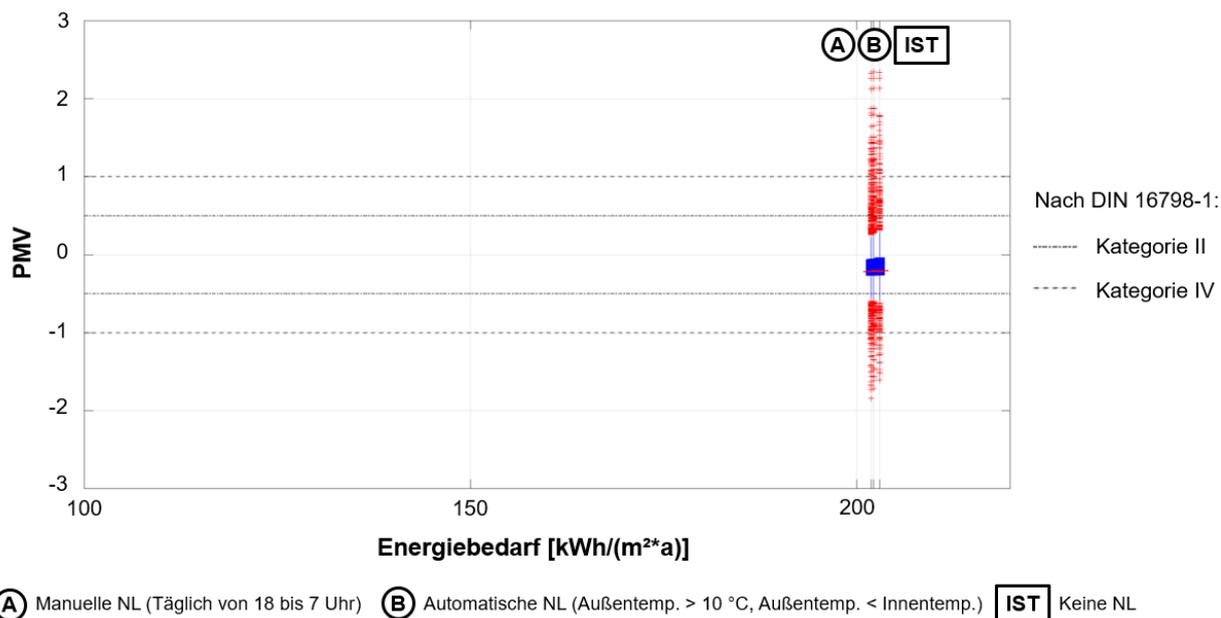


Abbildung 15: Vergleich der verschiedenen Nachtlüftungen mit dem Ist-Zustand

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Maßnahmen in Bezug auf den Energiebedarf des gesamten Gebäudes sowie der PMV-Werte der kritischen Zone 12.02 (siehe Kapitel 3.2.3) sind in der nachfolgenden Tabelle 10 zusammengefasst dargestellt:

Tabelle 10: Übersicht über den Einfluss der Maßnahmen auf den Energiebedarf und die PMV-Werte der kritischen Zone 12.02

Maßnahme	Gesamtenergiebedarf in kWh/(m ² ·a)	Reduktion des Energiebedarfs zum Ist-Zustand in %	Bereich in dem 95 % der gemessenen PMV-Werte liegen
Ist-Zustand	203	-	0,31 bis -0,61
<i>Sanierung der Außenhülle</i>			
Dämmung Dach	189,3	6,7	0,44 bis -0,63
Dämmung Außenwand und Fenster	147,3	27,4	0,51 bis -0,69
Dämmung Kombination	131,7	35,1	0,63 bis -0,69
<i>Raumsolltemperaturen währen der Belegungszeit (Heiz- und Kühlperiode)</i>			
20 und 26 °C	193,2	4,8	0,46 bis -0,87
18 und 28 °C	178,8	11,9	0,89 bis -1,60
18 °C, keine Kühlung und Deckenventilator	150,3	26,0	0,87 bis -1,62
<i>Raumsolltemperaturen außerhalb der Belegungszeit</i>			
16 °C	195,4	3,7	0,31 bis -0,62
15 °C	188,5	7,1	0,31 bis -0,63
<i>Nachtlüftung</i>			
Automatische Nachtlüftung	202,2	0,4	0,28 bis -0,60
Manuelle Nachtlüftung	201,9	0,5	0,26 bis -0,59

3.4.2 Kombination der Maßnahmen

Die Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Maßnahmen half dabei, zu entscheiden, welche Maßnahmen weiterhin untersucht werden sollten. Die Kombination dieser Maßnahmen wurde allerdings hauptsächlich auf Grundlage eines weiteren Faktors durchgeführt: Handelt es sich bei der Maßnahme um eine auf den Denkmalschutz bezogene invasive oder nicht invasive Maßnahme (siehe Definition in Kapitel 1.2). Darauf aufbauend wurden die in Tabelle 11 zusammengefassten Maßnahmenkombinationen erstellt. Neben der „Nicht invasiven“ und „Invasiven“ Kombination wurden zusätzliche Varianten entwickelt, die einen ganzheitlichen Blick auf realistische Sanierungsszenarien ermöglichen. So wurde u. a. die Variante „Kombination Dämmungen“, in der die komplette Außenhülle saniert wurde, allerdings keine Einstellungen an der Gebäudetechnik vorgenommen wurden, mit den anderen Varianten verglichen. Diese Maßnahmenkombination wurde bereits in den einzelnen Maßnahmen behandelt und ist ebenfalls invasiv. Außerdem wurde die „Nicht invasive“ Maßnahmenkombination mit der Dämmung des Daches kombiniert. Die Sanierung des Daches stellt in Bezug auf den Denkmalschutz oftmals keine Probleme dar und kann somit gegebenenfalls auch als nicht invasiv angesehen werden (Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren, 2009). Neben der Varianz in baulichen Maßnahmen wurde außerdem getestet, welchen Einfluss das Nutzerverhalten auf die Behaglichkeit im Innenraum sowie den Energiebedarf hat. Hierfür wurden ausgewählte Maßnahmenkombinationen jeweils mit der Anpassung des clo-Faktors und einem temperaturgesteuerten Sonnenschutz kombiniert.

Tabelle 11: Zusammensetzung der jeweiligen Maßnahmenkombination

Maßnahmenkombination	Enthaltene Maßnahmen
Nicht invasiv	Deckenventilator Keine Kühlung Manuelle Nachtlüftung Raumsolltemperatur außerhalb der Belegungszeit auf 15 °C (Heizperiode) Raumsolltemperatur während der Belegungszeit auf 18 °C (Heizperiode)
Nicht invasiv und Nutzerkorrektur	Alle Maßnahmen aus „Nicht invasiv“ clo-Faktor auf 0,3 bis 1,2 Sonnenschutz temperaturgesteuert
Kombination Dämmungen	Austausch der Fenster Dämmung der Außenwand Dämmung des Bodens gegen Außenluft im 2. OG Dämmung des Daches
Nicht invasiv und Dämmung Dach	Alle Maßnahmen aus „Nicht invasiv“ Dämmung des Daches
Nicht invasiv und Dämmung Dach und Nutzerkorrektur	Alle Maßnahmen aus „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ clo-Faktor auf 0,3 bis 1,2 Sonnenschutz temperaturgesteuert
Invasiv	Alle Maßnahmen aus „Nicht invasiv“ Alle Maßnahmen aus „Kombination Dämmungen“
Invasiv und Nutzerkorrektur	Alle Maßnahmen aus „Invasiv“ clo-Faktor auf 0,3 bis 1,2 Sonnenschutz temperaturgesteuert

Unter den Varianten, die die Nutzerkorrektur nicht betrachten, kann bei der „Invasiven“ Variante mit einer Reduktion auf 74,3 kWh/(m²*a) um ca. 128 kWh/(m²*a) im Vergleich zum Ist-Zustand am meisten Energie gespart werden (siehe Abbildung 16). Die anderen drei Varianten unterscheiden sich in Bezug auf die Energieeinsparungen geringfügiger. Hier liegt die Reduktion des Energiebedarfs zwischen 67,8 kWh/(m²*a) („Nicht invasiv“) und 78,9 kWh/(m²*a) („Nicht invasiv und Dämmung Dach“). Der Unterschied zwischen der Energiereduktion der „Nicht invasiven“ Variante und der Variante „Kombination Dämmungen“ beträgt prozentual gesehen 1,7 %.

Die Auswertung der Energiesimulationen des Hahn-Hochhauses zeigt außerdem, dass auf den Komfort bezogene Herausforderungen bisher durch den zusätzlichen Einsatz von Gebäudetechnik gelöst wurden. Die Gebäudetechnik half dabei, die normbedingten Anforderungen an den Innenraumkomfort zu erfüllen, ohne energetische Aspekte zu berücksichtigen. Dies wird vor allem durch die Variante „Nicht invasiv“ deutlich, in der – bis auf den Einbau von Deckenventilatoren – keine baulichen Maßnahmen vorgenommen werden, sondern lediglich gebäudetechnische Einstellungen angepasst werden. Diese Variante zeigt das Einsparpotential, was bereits bei vorhergehenden Ertüchtigungsmaßnahmen ohne wirklichen Mehraufwand – allerdings zum Teil auf Kosten des Innenraumkomforts – hätte erzielt werden können.

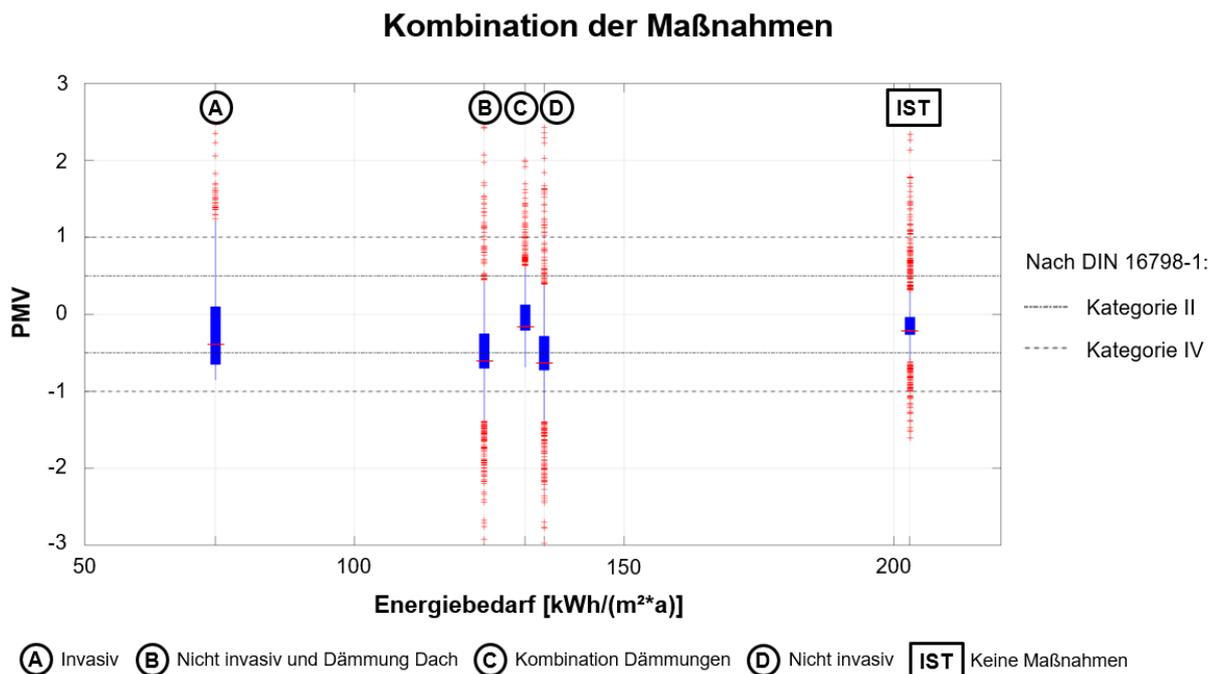


Abbildung 16: Vergleich der Varianten ohne Nutzerkorrektur mit dem Ist-Zustand

In Bezug auf den Innenraumkomfort gibt es, wie in Abbildung 16 zu erkennen ist, zwischen der Variante „Nicht invasiv“ und „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ kaum Unterschiede. Bei beiden Varianten erweitert sich der Bereich, in dem 95 % der PMV-Werte liegen, im Vergleich zum Ist-Zustand sowohl in positive als auch in negative Richtung auf 0,4 bis -1,4. Der Median und auch der Bereich, in dem 50 % der PMV-Werte liegen, befinden sich innerhalb der von der DIN EN 16798-1:2022-03 definierten Komfortkategorie IV (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a). Diese – im Vergleich zum Ist-Zustand – unbehaglicheren

Innenraumbedingungen werden vor allem durch das Absenken der Raumsolltemperatur in der Heizperiode während der Belegungszeit hervorgerufen.

Bei vollständiger Sanierung der Außenhülle ohne weitere Maßnahmen („Kombination Dämmungen“) werden ähnliche Komfortwerte wie im Ist-Zustand erreicht. Die Ausreißer im negativen Bereich entfallen, wobei sich der Grenzwert für den Bereich für 95 % der PMV-Werte in positiver Richtung von 0,31 auf 0,63 verschiebt. Dieser Trend wird bei der Variante „Invasiv“, in der ebenfalls die U-Werte der kompletten Außenhülle verbessert wurden, noch deutlicher. Hier verschiebt sich der Grenzwert des Bereiches auf 1,2 und liegt damit außerhalb der Komfortkategorie IV. Trotz einer Raumsolltemperatur von 18 °C während der Heizperiode kann die Komfortkategorie IV bei der „Invasiven“ Variante im negativen PMV-Bereich eingehalten werden. (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Das Ausschalten der Kühlung und der Einbau von Deckenventilatoren stellen somit in der Kühlperiode geringere Herausforderungen dar, wenn nicht zusätzlich gedämmt wird. Die Dämmung ist notwendig, um bei einer Raumsolltemperatur von 18 °C auch während der Heizperiode konstant behagliche Bedingungen im Innenraum im Rahmen der Komfortkategorien nach DIN EN 16798-1:2022-03 zu schaffen (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a).

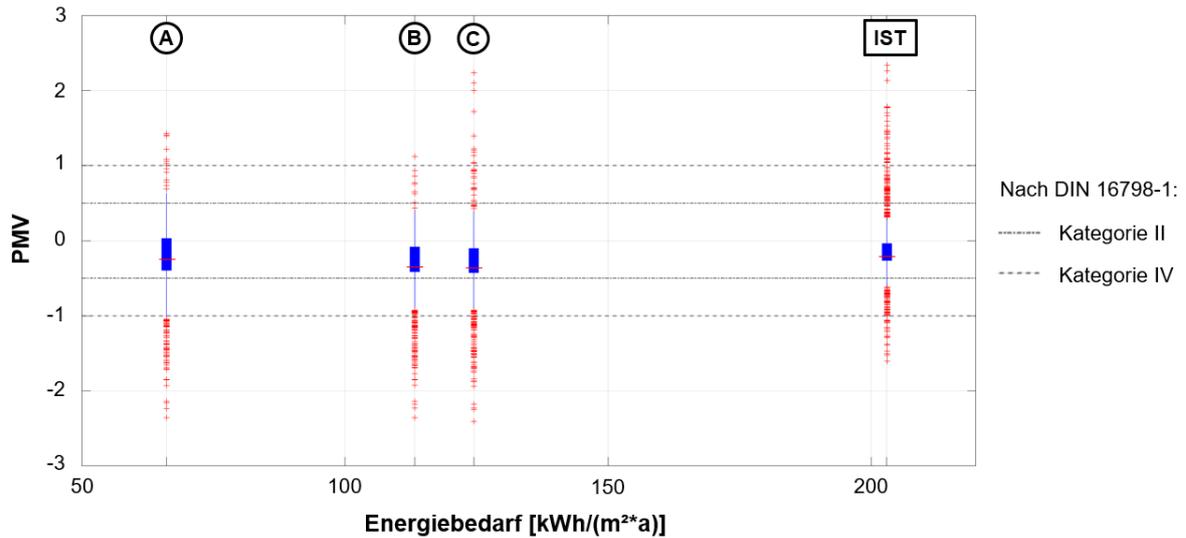
Wurden nutzerabhängige Maßnahmen in die Betrachtung miteinbezogen, konnte einerseits der Energiebedarf des Gebäudes weiter gesenkt werden, und andererseits konnten behaglichere Innenraumbedingungen geschaffen werden (siehe Abbildung 17).

Der Energiebedarf konnte bspw. bei der Variante „Invasiv und Nutzerkorrektur“ im Vergleich zur Variante „Invasiv“ um 11 % reduziert werden. Bei den Maßnahmenkombinationen „Nicht invasiv und Nutzerkorrektur“ und „Nicht invasiv“ betrug der Unterschied 8 %. Bei den Varianten, bei denen zusätzlich das Dach gedämmt wurde („Nicht invasiv und Dämmung Dach (und Nutzerkorrektur)“), lag die Reduktion bei 9 %.

Diese Reduktionen des Energiebedarfs bei den Varianten mit Nutzerkorrektur sind auf die zusätzlichen solaren Gewinne während der Heizperiode zurückzuführen. Durch den temperaturgesteuerten Sonnenschutz gelangte in der Heizperiode mehr solare Strahlung in die Innenräume des Gebäudes (siehe Kapitel 3.3 Abschnitt über Sonnenschutz), wodurch weniger Heizenergie benötigt wurde. Die solare Strahlung konnte durch die verbesserten Dämmwerte der Bauteile der Außenhülle in der Variante „Invasiv“ am effektivsten zum Heizen der Räume genutzt werden. Die geringeren Transmissionswärmeverluste im Vergleich zur nicht sanierten Außenhülle führen daher hier zur prozentual gesehen größten Reduktion des Energiebedarfs.

Die Verbesserung der Innenraumkomfortbedingungen hängt mit der Anpassung des clo-Faktors zusammen, welcher einen direkten Einfluss auf die PMV-Werte hat. Bei den drei Varianten, die die Nutzerkorrektur betrachten, lagen die Grenzwerte der Bereiche, in dem sich 95 % der PMV-Werte befinden, dichter zusammen. Die Bereiche, in denen 50 % der PMV-Werte liegen, und der jeweilige Median verschieben sich in Richtung des PMV-Wert 0. Dies ist auf die größere Adaptivität der Nutzer:innen in Bezug auf die Bekleidung zurückzuführen. Die Komfortkategorie IV der DIN EN 16798-1:2022-03 kann bei den drei Varianten, die die Nutzerkorrektur berücksichtigen, fast vollständig eingehalten werden (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a).

Kombination der Maßnahmen (mit Nutzerkorrektur)



(A) Invasiv und Nutzerkorrektur (B) Nicht invasiv, Dämmung Dach und Nutzerkorrektur (C) Nicht invasiv und Nutzerkorrektur (IST) Keine Maßnahmen

Abbildung 17: Vergleich der Varianten mit Nutzerkorrektur und dem Ist-Zustand

Die erstellten Maßnahmenkombinationen bilden die Grundlage für die im nächsten Kapitel durchgeführte Ökobilanzierung und sind in Tabelle 12 zusammengefasst dargestellt. Es wurde bei der Kombination der Maßnahmen darauf geachtet, dass denkmalschutzbezogene invasive und nicht invasive Maßnahmen getrennt betrachtet werden können. Somit ist die ökologische Bewertung des Denkmalschutzes möglich.

Tabelle 12: Übersicht über den Einfluss der Maßnahmenkombinationen auf den Energiebedarf und die PMV-Werte der kritischen Zone 12.02

Maßnahmenkombination	Gesamtenergiebedarf in kWh/(m²*a)	Reduktion des Energiebedarfs zum Ist-Zustand in %	Bereich in dem 95 % der gemessenen PMV-Werte liegen
Ist-Zustand	203	-	0,31 bis -0,61
Nicht invasiv	135,2	33,4	0,38 bis -1,38
Nicht invasiv und Nutzerkorrektur	124,5	38,7	0,39 bis -0,91
Kombination Dämmungen	131,7	35,1	0,63 bis -0,69
Nicht invasiv und Dämmung Dach	124,1	38,9	0,43 bis -1,38
Nicht invasiv und Dämmung Dach und Nutzerkorrektur	113,3	44,2	0,42 bis -0,92
Invasiv	74,3	63,4	1,22 bis -0,85
Invasiv und Nutzerkorrektur	66,1	67,4	0,63 bis -1,04

4 Ökobilanzierung der Maßnahmenkombinationen

Für die Einschätzung der Umweltwirkungen der einzelnen Maßnahmenkombinationen wird im folgenden Abschnitt eine Ökobilanz durchgeführt. Zunächst wird der Ziel- und Untersuchungsrahmen vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Sachbilanz sowie der Wirkungsabschätzung präsentiert und ausgewertet. Hierfür werden in Bezug auf die THG-Emissionen im Betrieb die Ergebnisse der Gebäudesimulation genutzt. Außerdem wird der Zeitpunkt bestimmt, ab dem sich der zusätzliche ökologische Aufwand der invasiven Maßnahmen im Vergleich zu den nicht invasiven Maßnahmen bezogen auf das GWP amortisiert hat. In der abschließenden Sensitivitätsanalyse wird überprüft, welchen Effekt die Veränderung der Annahmen oder gewählten Datensätze auf die Resultate hat.

4.1 Ziel- und Untersuchungsrahmen

Im Rahmen der Thesis wird eine Ökobilanzstudie zu den in Kapitel 3.4.2 untersuchten Maßnahmenkombinationen durchgeführt. Hierbei werden die Ergebnisse der jeweiligen Kombination mit dem Ist-Zustand und miteinander verglichen. Ziel ist es dabei, die Diskrepanz der THG-Emissionen zwischen denkmalschutzbezogenen invasiven und nicht invasiven Maßnahmen über einen bestimmten Betrachtungszeitraum zu ermitteln.

Herstellung und Errichtung					Nutzung								Entsorgung			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	C1	C2	C3	C4
Rohstoffgewinnung	Transport zur Herstellungstätte	Herstellung	Transport zum Bauwerk	Errichtung	Nutzung	Wartung	Instandsetzung	Austausch	Modernisierung	Energieeinsatz für den Betrieb	Wassereinsatz für den Betrieb	Nutzeraktivitäten	Rückbau	Transport	Abfallaufbereitung	Entsorgung

GWP der Sanierungsmaßnahmen aus den Phasen A1-A3

GWP des Strom- und Energiebedarfs des Gebäudes

Abbildung 18: Betrachtete Lebenszyklusphasen in der Ökobilanzierung nach der DIN EN 15643 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021d, S. 31)

Das zu untersuchende Produktsystem der Ökobilanzstudie ist in Abbildung 18 dargestellt. Es werden lediglich das GWP der THG-Emissionen aus der Herstellungsphase der Materialien, die für die jeweilige Maßnahmenkombination notwendig sind, und das GWP aus den THG-Emissionen von Fernwärme und Strom betrachtet. Der Wert für Fernwärme und Strom ist dabei abhängig von der Energiereduktion, die durch die jeweilige Maßnahmenkombination im Vergleich zum Ist-Zustand erreicht wird. Bei den Materialien werden nur solche berücksichtigt, die verglichen zum Ist-Zustand zusätzlich verbaut bzw. ausgetauscht werden müssen. Weitere Rahmenbedingungen und Annahmen werden in Tabelle 13 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 13: Bestandteile des Untersuchungsrahmens

<p>Systemgrenzen</p>	<p style="text-align: center;">Geographische Systemgrenzen Daten aus Deutschland (ÖKOBAUDAT, etc.)</p> <p style="text-align: center;">Zeitliche Systemgrenzen Der Betrachtungszeitraum beträgt 40 Jahre (2023 bis 2063). Im Jahr 2063 ist das Hahn-Hochhaus insgesamt 100 Jahre alt (siehe unten), was der Nutzungsdauer für monumentale Gebäude und Ingenieurbauwerke nach der DIN EN 1990:2021-10 entspricht (Deutsches Institut für Normung e. V., 2021c, S. 30).</p>
<p>Funktionale Einheit</p>	<p>Die Hauptfunktion des Gebäudes ist es, den Bürobetrieb auf allen Betrachtungsebenen zu gewährleisten. Dazu müssen Räumlichkeiten bereitgestellt werden, deren Größe in der Einheit Netto-Raumfläche (NRF) in m² gemessen werden. Die Ergebnisse werden in der Auswertung auf diese Einheit bezogen.</p>
<p>Datengrundlage Sachbilanz</p>	<p>Die Datengrundlage zur Ermittlung der zu sanierenden Bauteilflächen bzw. der Anzahl an benötigten Bauprodukten zur Durchführung der Maßnahmen bildet das in <i>IDA ICE</i> modellierte Gebäude.</p>
<p>Ausgewählte Wirkungskategorien</p>	<p>Die betrachtete Wirkungskategorie ist das GWP (Einheit: kg CO₂-Äq.) der Baustoffe (A1 bis A3) und der Energie (B6).</p>
<p>Anforderungen an die Datenqualität</p>	<p>In den Daten der ÖKOBAUDAT ist für generische Datensätze ein Sicherheitszuschlag von mind. 10 % vorgesehen, der in den Indikatorwerten bereits enthalten ist (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023).</p>
<p>Annahmen</p>	<p>Für die Dämmung der Außenwand und des Bodens des 2. OG wurde der Datensatz „WDVS mit EPS geklebt und gedübelt“ verwendet, da Dämmstoffe aus fossilen Rohstoffen, wie bspw. EPS, die am meist verbauten Dämmstoffe in Deutschland sind (Spätling, 2021).</p> <p>Für den Aufbau des Dämmsystems des Flachdachs wurden die Angaben aus dem Flachdach Atlas (2010) verwendet (Sedlbauer, 2010, S. 120–143). Der Aufbau des Flachdachdämmsystems oberhalb der Stahlbetontragkonstruktion sowie die verwendeten Materialien sind detailliert in Anhang D aufgelistet.</p> <p>Für den Austausch der Fenster wurde angenommen, dass Fenster mit Aluminiumrahmen eingebaut werden, da kein vollständiger Datensatz für Fenster mit Kunststoffrahmen zur Verfügung stand. Außerdem sind im Ist-Zustand ebenfalls Fenster mit Aluminiumrahmen verbaut. Durch den Einsatz des gleichen Rahmenmaterials wird das Erscheinungsbild des Gebäudes nach Austausch nur geringfügig verändert.</p> <p>Nach den Angaben der EnBW wurde angenommen, dass Fernwärme bis 2038 aus Steinkohle (50,3 %), Restmüll (29 %), Erdgas (18,7 %) und Heizöl (2 %) gewonnen wird (EnBW Energie Baden-Württemberg AG, 2023). Es wurde die zusätzliche Annahme getroffen, dass nach dem Gesetz zum Kohleausstieg ab 2038 Kohle nicht länger für die Energieerzeugung genutzt wird (Kohleausstiegsgesetz, 2022). Die anderen Anteile an der Fernwärme nehmen dementsprechend zu.</p> <p>Für die Berechnung der Umweltwirkungen des Stroms wurden die Datensätze der verschiedenen Jahrzehnte genutzt, die detailliert in Anhang D aufgeführt sind. Es wurde allerdings nach den Zielen der Bundesregierung davon ausgegangen, dass ab 2045 der Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien erzeugt wird (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2023b).</p>

Der Betrachtungszeitraum einer Ökobilanzierung ist abhängig von vielen Faktoren und beträgt für gewöhnliche Neubauten in der Regel 50 Jahre. In dieser Arbeit handelt es sich allerdings um ein seit 1963 bestehendes Hochhaus. Daher wurde hier für die Festlegung des Betrachtungszeitraums der Faktor Restnutzungsdauer verwendet. Diese leitet sich aus der DIN EN 1990:2021-10 ab und entspricht für monumentale Gebäude und Ingenieurbauwerke insgesamt 100 Jahre. Für das Hahn-Hochhaus, welches hier als monumentales Gebäude angesehen wurde, bedeutet dies eine Nutzung bis 2063 und einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren (2023 bis 2063). Da dieser Zeitraum nur eine Annahme ist, die allerdings erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse haben kann, wurden in der Auswertung auch andere Betrachtungszeiträume berücksichtigt.

4.2 Sachbilanz

In der Sachbilanz wurden die jeweiligen Mengen der Materialien (z. B. Kiesschüttung) oder fertigen Bauelemente (z. B. Wärmedämmverbundsystem, kurz WDVS) durch Berechnungen und Annahmen ermittelt. Die notwendigen Materialien für die einzelnen Maßnahmen sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14: Notwendige Materialien für die verschiedenen Maßnahmen

Maßnahme	Notwendiges Material
Dämmung Außenwand	WDVS
Austausch Fenster	Fenster
Dämmung Dach	Schüttung, Abdichtung oberhalb der Dämmung, Dämmung, Dampfsperre, Abdichtung unterhalb der Dämmung
Dämmung Boden 2. OG	WDVS
Einbau Deckenventilator	Deckenventilator
Automatische Nachtlüftung	Regelungstechnik
Manuelle Nachtlüftung	-
Einstellung der Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit	-
Einstellung der Raumsolltemperaturen außerhalb der Belegungszeit	-

Für die Maßnahmen, die die Sanierung der Außenhülle betrafen, mussten die jeweiligen Flächen, die es zu sanieren galt, ermittelt werden. Beim Einbau der Deckenventilator war die Anzahl an Büros und Besprechungsräumen relevant, bei der automatischen Nachtlüftung die Anzahl der Fenster, an denen eine Steuereinheit und ein Öffnungsmechanismus verbaut werden mussten.

Die Mengenermittlung ergab, dass die Außenwand mit 1914 m² der Teil der Gebäudehülle mit der größten Fläche ist und 52 % der sanierungsrelevanten Außenhülle ausmacht. Die Fenster haben einen Anteil von 36 %, wohingegen die Anteile von Dach (10 %) und dem Boden gegen Außenluft im 2.OG (3 %) deutlich geringer ausfallen. Für die Mengen an Strom und Fernwärme, die der Phase B6 zugeordnet werden, wurden die jährlichen Ergebnisse der energetischen Gebäudesimulation verwendet und mit einem Faktor

von 40 multipliziert, für jedes Jahr des Betrachtungszeitraumes. Die Daten zur Mengenermittlung sind detailliert in Anhang D aufgeführt.

Neben den ermittelten Mengen ist auch die Nutzungsdauer des jeweiligen Materials in Anhang D dargestellt. Aus der Nutzungsdauer kann geschlossen werden, wie oft die einzelnen Baustoffe innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 40 Jahren ausgetauscht werden müssen; auch dieser Wert ist in Anhang D festgehalten.

4.3 Wirkungsabschätzung

Bei der Wirkungsabschätzung wurde, wie bereits im Untersuchungsrahmen beschrieben, das GWP als einzige Wirkungskategorie betrachtet. Die notwendigen Daten zum GWP lieferten dabei EPDs aus der ÖKOBAUDAT und von privaten Unternehmen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den GWP-Werten der ÖKOBAUDAT und der anderen verwendeten Datensätze um GWP₁₀₀-Werte handelt (siehe Kapitel 2.1.2). Die Zuordnung von Materialien, Strom und Fernwärme zu den jeweiligen Datensätzen ist in Anhang D aufgelistet. In der Wirkungsabschätzung liegt der Fokus auf der Zusammensetzung des GWP in den einzelnen Varianten. Der ausführliche Vergleich der einzelnen Maßnahmen über den Betrachtungszeitraum von 40 Jahren wird in der Auswertung in Kapitel 4.4 durchgeführt.

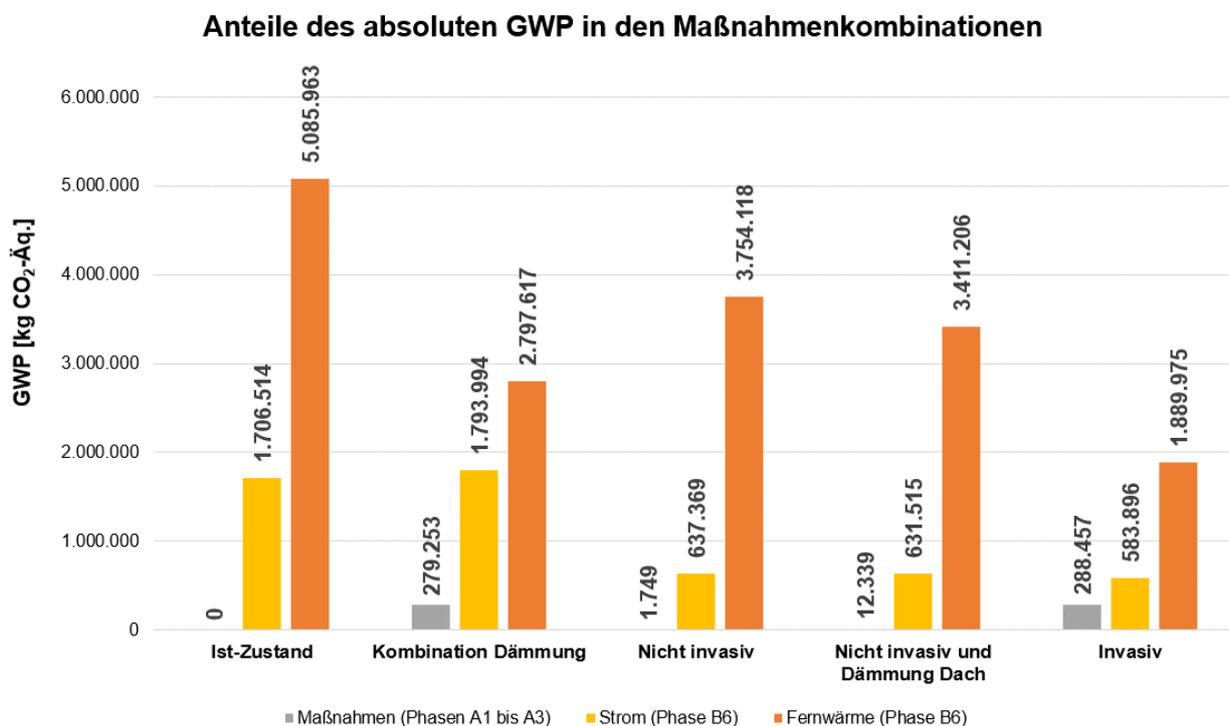


Abbildung 19: Absoluter Anteil des GWP von den Maßnahmen, Strom und Fernwärme innerhalb der einzelnen Kombinationen über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung in Abbildung 19 zeigen, dass über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren das GWP in der Herstellung der Maßnahmen (Phasen A1 bis A3) bei allen Maßnahmenkombinationen den geringsten Anteil am gesamten GWP hat.

Bei den Varianten, bei denen aktiv gekühlt wird (Ist-Zustand und „Kombination Dämmungen“), ist der Stromverbrauch mit ca. 1.700 t CO₂-Äq. ungefähr dreimal so hoch wie bei den anderen Varianten ohne aktive Kühlung. Bei diesen Varianten (keine Kühlung und keine Lüftungsanlage) ist in der Variante „Invasiv“ das GWP für den Strom am geringsten, da hier der Strombedarf für die Ventilatoren der Heizkonvektoren am niedrigsten ist. Dies liegt daran, dass in dieser Variante – im Vergleich zu den Kombinationen „Nicht invasiv“ und „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ – weniger geheizt werden muss. Das wird beim Blick auf das durch Fernwärme verursachte GWP deutlich.

Die Fernwärme ist bei allen Varianten sowie beim Ist-Zustand der größte GWP-Verursacher. Das GWP der Fernwärme steht dabei in direkter Abhängigkeit zu den Transmissionswärmeverlusten des Gebäudes. Die Varianten, die den niedrigsten mittleren U-Wert der Gebäudehülle aufweisen („Kombination Dämmungen“ und „Invasiv“), haben gleichzeitig auch das geringste GWP bezogen auf die Fernwärme. Die Variante „Kombination Dämmungen“ weist höhere THG-Emissionen in Bezug auf die Fernwärme auf, da hier eine höhere Raumsolltemperatur von 21 °C anstelle von 18 °C (Variante „Invasiv“) in der Heizperiode eingestellt ist und somit mehr geheizt werden muss. Die beiden erwähnten Varianten sind ebenfalls die Maßnahmenkombinationen, deren GWP in den Phasen A1-A3 im Vergleich zu allen anderen Kombinationen deutlich höher sind (siehe Abbildung 19). Dies ist vor allem auf das GWP aus der Herstellungsphase der Fenster und dem WDVS der Außenwand zurückzuführen, wie Abbildung 20 zeigt. Die „Nicht invasive“ Maßnahmenkombination weist – abgesehen vom Ist-Zustand – in diesen Phasen (A1 bis A3) das geringste GWP auf, da hier lediglich die Deckenventilatoren THG-Emissionen verursachen.

Anteil des GWP der Materialien in den Phasen A1 bis A3 bei der invasiven Maßnahmenkombination

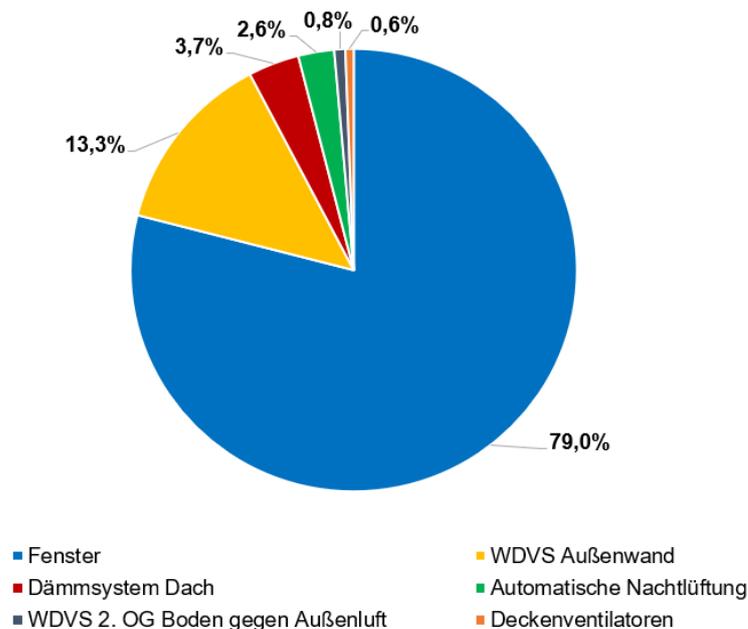


Abbildung 20: Prozentualer Anteil des in der Herstellungsphase verursachten GWP für die einzelnen Materialien bei der Variante „Invasiv“

In den Daten der Wirkungsabschätzung wird außerdem deutlich, welchen Einfluss die Umrechnungsfaktoren von kWh auf kg CO₂-Äq. für Strom und Fernwärme haben. Die detaillierte Zusammensetzung der Umrechnungsfaktoren beruht auf Daten aus ÖKOBAUDAT und ist in Anhang D dargestellt. Für Strom liegt der Wert für einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren bei 0,2842 kg CO₂-Äq./kWh und für Fernwärme bei 0,2078 kg CO₂-Äq./kWh. Der Energiebedarf für den Strom wiegt also bezogen auf das GWP ca. 1,4-mal mehr als der Energiebedarf für Fernwärme ($0,2842/0,2078 = 1,4$). Dies lässt sich am Beispiel der Variante „Kombination Dämmungen“ erklären. Hier beträgt der Energiebedarf für Strom 47 % des Energiebedarfs für Fernwärme. Bezogen auf das GWP wiegt der Wert für Strom auf Grund des höheren Umrechnungsfaktors allerdings deutlich schwerer. Hier entspricht das GWP für Strom 64 % (siehe Abbildung 19) des GWP, welches durch Fernwärme verursacht wird (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: Vergleich von Energiebedarf und GWP für Strom und Fernwärme bei der Variante „Kombination Dämmungen“ über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren

Energie	Energiebedarf in MWh	GWP in t CO ₂ -Äq.
Strom	6.311	1.794
Fernwärme	13.460	2.798

4.4 Auswertung

Die Darstellung der hier gezeigten Grafiken ist den Abbildungen in Kapitel 3.4.2 ähnlich. Diesmal wird allerdings nicht der Energiebedarf mit den ermittelten PMV-Werten verglichen, sondern das in der Wirkungsabschätzung ermittelte GWP der jeweiligen Variante. Die PMV-Werte sind hier noch einmal zur besseren Verständlichkeit der Einwirkungen der Maßnahmenkombination auf die Behaglichkeit abgebildet. Da diese Werte schon in Kapitel 3.4.2 erläutert wurden, wird in dieser Auswertung nicht mehr detailliert auf den Innenraumkomfort eingegangen.

Wie auch in den Darstellungen zum Energiebedarf, bezieht sich das GWP in den folgenden Abbildungen auf die Nutzfläche des Hahn-Hochhauses in m².

Die Auswertung der Ökobilanzierung zeigt, dass die Variante „Invasiv“ über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren das geringste GWP aufweist (siehe Abbildung 21). Die Reduktion des GWP im Vergleich zum Ist-Zustand beträgt ca. 59 %. Bei der Variante „Nicht invasiv“ kann das GWP um ca. 35 % reduziert werden. Wenn zusätzlich zur „Nicht invasiven“ Maßnahmenkombination das Dach gedämmt wird, liegt die Reduktion bei ca. 40 %. Bei diesen drei Varianten können durch höhere ökologische Belastungen in den Phasen A1 bis A3 langfristig geringere Emissionen des Hahn-Hochhauses in Bezug auf das GWP erreicht werden.

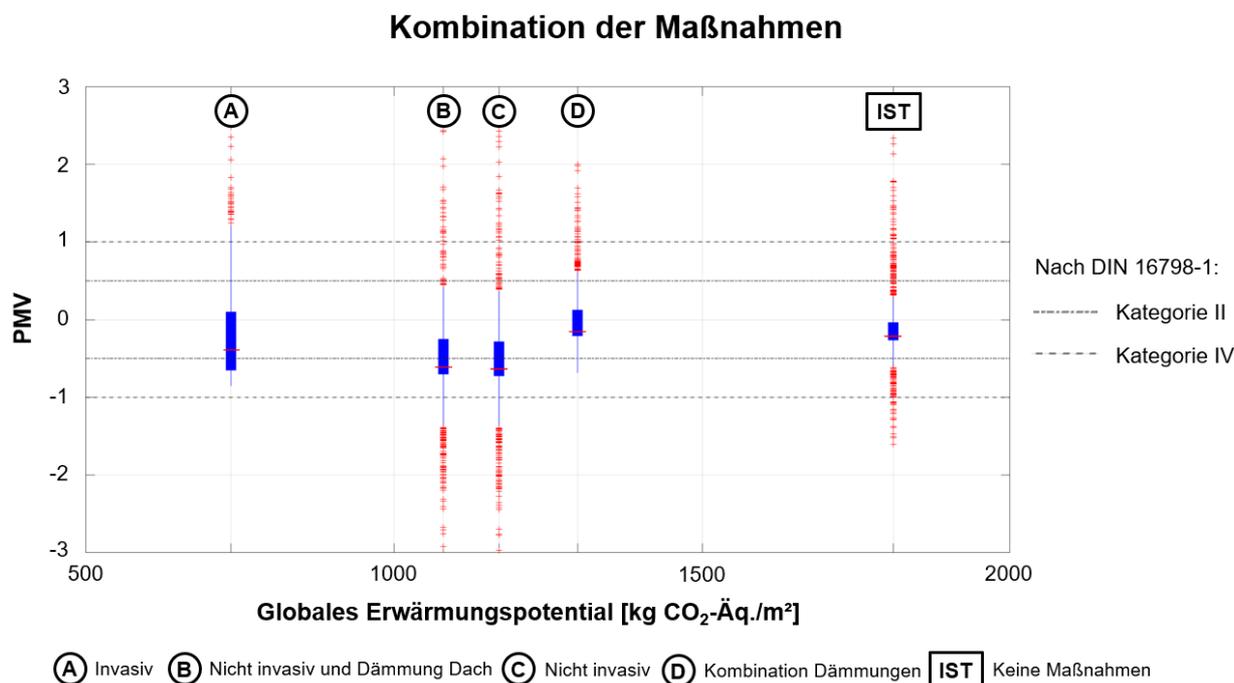


Abbildung 21: Vergleich der nutzerunabhängigen Varianten mit dem Ist-Zustand bezogen auf das GWP

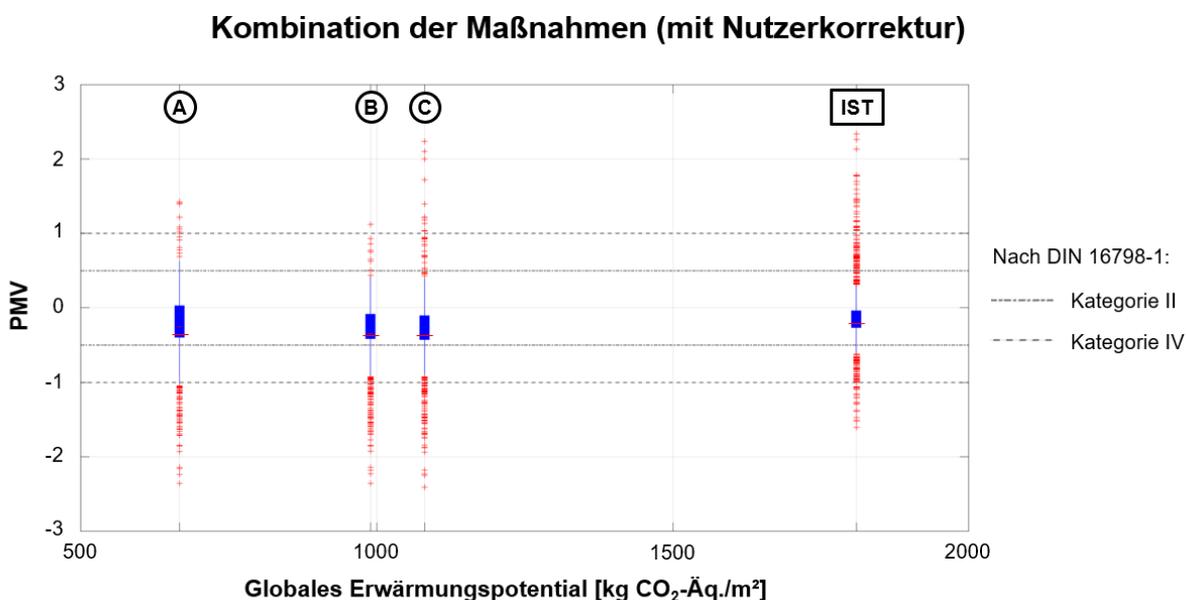
Im Vergleich zur reinen Betrachtung des Energiebedarfs des Hahn-Hochhauses fällt bei der ökologischen Betrachtung auf, dass die Variante „Nicht invasiv“ ein geringeres GWP aufweist als die Variante „Kombination Dämmungen“ (siehe Abbildung 21). Bei der energetischen Betrachtung war es die Variante „Kombination Dämmungen“, die einen niedrigeren Energiebedarf hatte. Diese Veränderung ist auf den höheren Strombedarf der Maßnahmenkombination „Kombination Dämmungen“ zurückzuführen, was in der Auswertung des GWP schwerer wiegt als der Mehraufwand an Energie für Fernwärme in der „Nicht invasiven“ Variante (siehe Kapitel 4.3). Der höhere Strombedarf ist, wie bereits in der Wirkungsabschätzung erwähnt, auf die aktiven Kühlsysteme zurückzuführen. In Abbildung 21 wird allerdings deutlich, dass dieser Mehraufwand in Kühlsysteme nicht dazu führt, dass in der Kühlperiode (vorwiegend positiver PMV-Bereich) behaglichere Komfortwerte in der Variante „Kombination Dämmungen“ im Vergleich zur Variante „Nicht invasiv“ erreicht werden.

Aus dem Vergleich der Varianten „Nicht invasiv“ und „Kombination Dämmungen“ lässt sich schließen, dass – im Beispiel des Hahn-Hochhauses – die Anpassung der gebäudetechnischen Einstellungen einen größeren Einfluss auf die Reduzierung des GWP hat als die ausschließliche Sanierung der Außenhülle. Die Anforderungen des Denkmalschutzes können bei der „Nicht invasiven“ Maßnahmenkombination dabei vollständig eingehalten werden, während sie bei der Variante „Kombination Dämmungen“ durch die Sanierung der Außenwand vernachlässigt werden.

Die Auswertung zeigt allerdings auch, dass eine Sanierung der Außenhülle in Kombination mit der Überprüfung der Gebäudetechnik zu höheren Einsparungen führen kann als die „Nicht invasive“ Maßnahmenkombination. Durch die zusätzliche Dämmung des Daches (Variante „Nicht invasiv und Dämmung Dach“) können innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 40 Jahren absolut gesehen ca. 340 t CO₂-Äq. mehr gespart werden als bei der Variante „Nicht invasiv“. Hier muss bei dem jeweilig

betrachteten Gebäude abgewogen werden, ob der Eingriff in die Struktur des Daches im Rahmen des Denkmalschutzes möglich ist und diese Variante somit ebenfalls als nicht invasiv beurteilt werden kann. Bei der Variante „Invasiv“ sind die Emissionen um ca. 1.630 t CO₂-Äq. geringer verglichen mit der Variante „Nicht invasiv“. Dieser Unterschied zwischen den Varianten entspricht den Emissionen (in CO₂-Äq.) von 151 Personen in Deutschland pro Jahr (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz [BMUV], 2022). Der Wert markiert außerdem den ökologischen Mehraufwand, der für die Einhaltung des Denkmalschutzes beim Hahn-Hochhaus innerhalb eines Betrachtungszeitraums von 40 Jahren aufgebracht werden muss.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Ökobilanzierung zu den zusätzlichen Varianten, die die Nutzerkorrektur berücksichtigen, dargestellt. Die zusätzlichen Einsparungen im GWP, auf Grund der Anpassung des clo-Faktors und durch den Einsatz von temperatur- statt strahlungsgesteuertem Sonnenschutz, liegen bei der Variante „Nicht invasiv und Nutzerkorrektur“ im Vergleich zur Variante „Nicht invasiv“ bei 7,7 %. Die prozentualen Einsparungen zu den jeweiligen Varianten ohne Nutzerkorrektur liegen bei der Variante „Nicht Invasiv und Dämmung Dach und Nutzerkorrektur“ bei 8,3 % und bei der Maßnahmenkombination „Invasiv und Nutzerkorrektur“ bei 9,4 %. Die Nutzerkorrektur hat somit wie auch bei der Betrachtung des Energiebedarfs auf alle Varianten einen ähnlichen Einfluss. Der Einfluss auf die Variante „Invasiv“ ist allerdings aus den Gründen, die in Kapitel 3.4.2 beschrieben wurden, am größten.



Ⓐ Invasiv und Nutzerkorrektur Ⓑ Nicht invasiv, Dämmung Dach und Nutzerkorrektur Ⓒ Nicht invasiv und Nutzerkorrektur **IST** Keine Maßnahmen

Abbildung 22: Vergleich der Varianten (mit Nutzerkorrektur) mit dem Ist-Zustand bezogen auf das GWP

Um einen genaueren Einblick in die Entwicklung des GWP in Bezug auf variierende Betrachtungszeiträume zu erhalten, wurden die Abbildung 23 und Abbildung 24 erstellt. Für die Darstellung wurde das GWP der verschiedenen Varianten für jedes Jahr innerhalb einer Zeitperiode von 100 Jahren berechnet. Die Veränderungen in der Steigung der GWP-Entwicklungen sind auf politische

Entscheidungen zurückzuführen, die die Umrechnungsfaktoren von kWh in kg CO₂-Äq. für Strom und Fernwärme beeinflussen. Der Kohleausstieg 2038 beeinflusst dabei den Faktor für Fernwärme, da diese zu einem Teil aus Steinkohle gewonnen wird. Das Ziel, ab 2045 den gesamten Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien zu gewinnen, beeinflusst hingegen den Faktor für Strom. Da beide Entscheidungen die jeweiligen Umrechnungsfaktoren senken, wird die Steigung der Verläufe nach 15 und nach 22 Jahren geringer. Durch den Austausch von Materialien, die für die Maßnahmen benötigt werden, kommt es zudem zu Sprüngen in den Verläufen. Der Sprung, der am deutlichsten im Verlauf der Variante „Invasiv“ zu erkennen ist, markiert den Einbau neuer Fenster, die nach 50 Jahren ausgetauscht werden müssen.

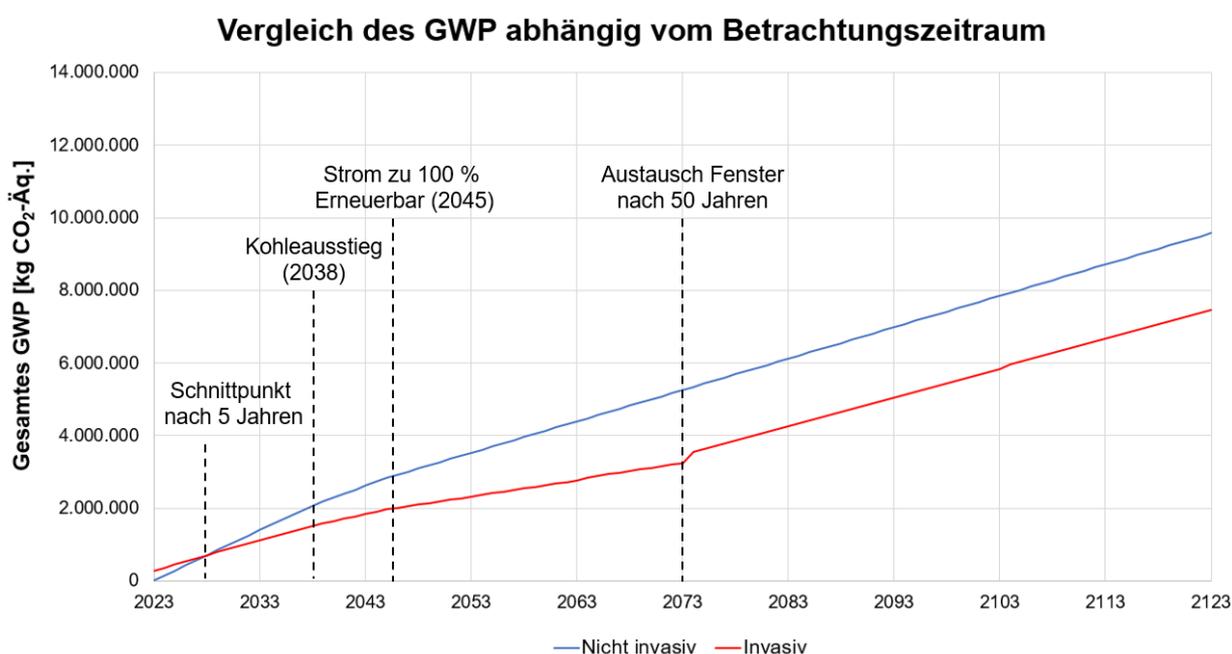


Abbildung 23: Entwicklung des GWP über den Betrachtungszeitraum für die Varianten „Nicht invasiv“ und „Invasiv“

In Abbildung 23 wird ersichtlich, dass ab einem Betrachtungszeitraum von ca. 5 Jahren die Variante „Invasiv“ ein niedrigeres GWP als die Variante „Nicht invasiv“ aufweist. Dies ist der Zeitpunkt, ab dem sich das höhere GWP in den Phasen A1 bis A3 bei der Variante „Invasiv“ ökologisch rentiert und durch einen folglich – im Vergleich zur Variante „Nicht invasiv“ – niedrigeres GWP im Betrieb zu einem insgesamt geringeren GWP führt. Der Abstand zwischen den beiden Verläufen und damit der ökologische Mehraufwand für die Variante „Nicht invasiv“ wird nach den 5 Jahren zunehmend größer. Die Analyse des Betrachtungszeitraums lässt unbeachtet, ob auch die Fernwärme in Zukunft zu 100 % aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. Hierfür wurden bisher noch keine konkreten Pläne vorgestellt, wodurch diese Möglichkeit nicht berücksichtigt werden konnte.

In Abbildung 24 sind die Varianten „Kombination Dämmungen“ und „Nicht Invasiv und Dämmung Dach“ sowie der Ist-Zustand im Vergleich zur „Nicht invasiven“ Maßnahmenkombination dargestellt. Der Ist-Zustand hat nach ca. 5 Jahren das höchste GWP, davor ist es – auf Grund des hohen GWP in den Phasen

A1 bis A3 – die Variante „Kombination Dämmungen“. Die Entwicklungen der Varianten „Nicht invasiv“ und „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ ist ähnlich, wobei der Abstand zwischen den Verläufen mit wachsender Betrachtungsdauer stetig zunimmt. Dies ist auf die Unterschiede der beiden Varianten im GWP, welches durch die Fernwärme im Betrieb des Gebäudes verursacht wird, zurückzuführen. Der Vergleich der Varianten „Nicht invasiv“ und „Kombination Dämmungen“ zeigt, dass der Abstand zwischen beiden Verläufen in den ersten 20 Jahren wächst und danach wieder geringer wird. Nach ca. 75 Jahren weist die Variante „Kombination Dämmungen“ ein niedrigeres GWP auf als die Variante „Nicht invasiv“. Dies ist auf die oben angesprochenen politischen Entscheidungen zurückzuführen, die den Umrechnungsfaktor von kWh auf kg CO₂-Äq. in Bezug auf Strom beeinflussen. Da der Umrechnungsfaktor bis 2045 stetig geringer wird, wiegt das GWP des Strombedarfs, welches in der Variante „Kombination Dämmungen“ höher ist, ab einem Betrachtungszeitraum von 22 Jahren (2045) geringer als das GWP der Fernwärme. Hierdurch kann die Annäherung und der Schnittpunkt der beiden Verläufe nach diesem Zeitpunkt erklärt werden. Es bleibt festzuhalten, dass die ausschließliche Dämmung der Außenhülle erst ab einem Betrachtungszeitraum von 75 Jahren ein geringeres GWP aufweist als die Variante „Nicht invasiv“.

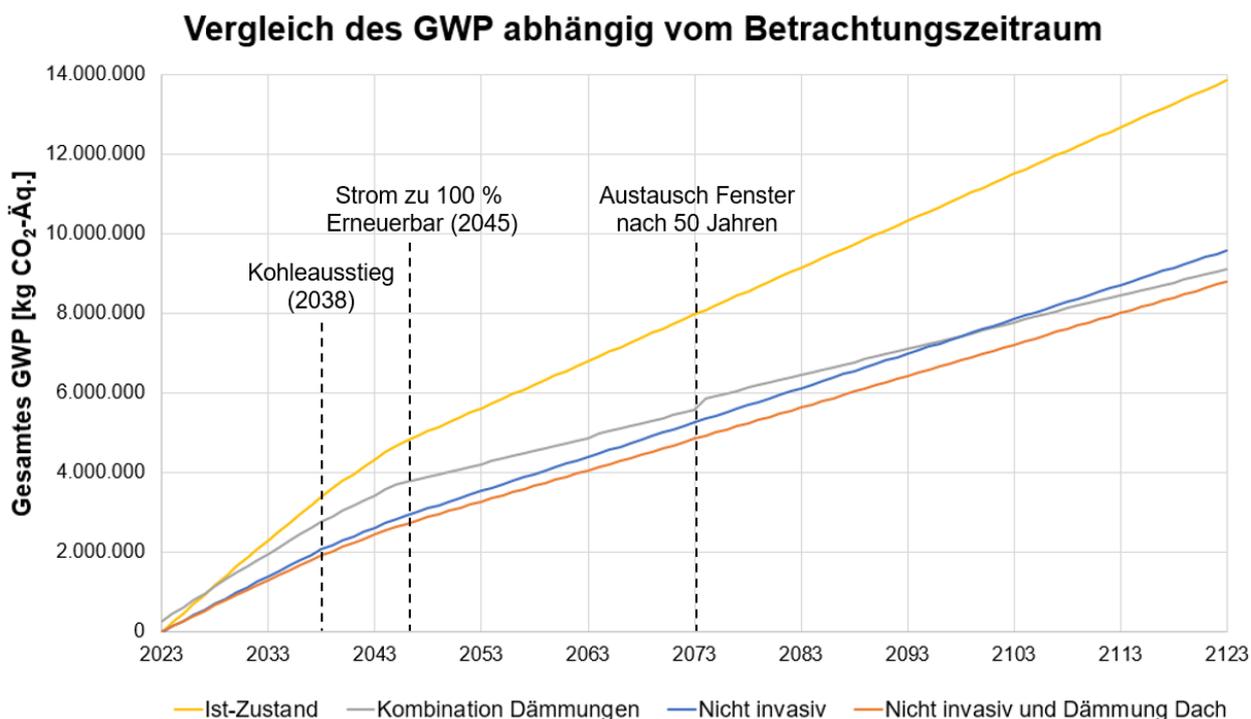


Abbildung 24: Entwicklung des GWP über den Betrachtungszeitraum für die Varianten „Nicht invasiv“, „Nicht invasiv und Dämmung Dach“, „Kombination Dämmungen“ und den Ist-Zustand

Der Denkmalschutz hat die Absicht, dass Gebäude, die einen kulturellen Mehrwert haben, noch möglichst lange erhalten bleiben. Bei der Bewertung des Denkmalschutzes muss berücksichtigt werden, dass mit zunehmendem Alter der Gebäude und dem Verzicht auf die ergänzende Dämmung der Außenhülle des Gebäudes, die THG-Emissionen im Vergleich zu invasiven Maßnahmen stetig zunehmen (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Die Betrachtung der Entwicklung des GWP kann Entscheidungsträger:innen dabei

helfen abzuwägen, ob eine vollständige Einhaltung der Anforderungen des Denkmalschutzes in Abhängigkeit des betrachteten Zeitraums ökologisch vertretbar ist.

Um den Aufwand in der Herstellungsphase (Phasen A1 bis A3) besser mit dem Nutzen in der Betriebsphase für die einzelnen Varianten vergleichen zu können, wurde Abbildung 25 erstellt. Hierfür wurden zunächst die Investitionen in der Herstellungsphase in der Einheit t CO₂-Äq. erfasst. Diese Investitionen variieren je nach Variante und Betrachtungszeitraum voneinander, da sie von den eingesetzten Materialien und dem Austausch dieser Materialien nach einem gewissen Zeitraum abhängig sind. Für die Maßnahmenkombination „Nicht invasiv“ müssen bspw. nur die Deckenventilatoren alle 12 Jahre ausgetauscht werden. Bei der Variante „Invasiv“ müssen deutlich mehr Materialien berücksichtigt werden, wie z. B. die Fenster, das WDVS der Außenwand oder die Regelungstechnik für die automatische Nachlüftung. Hierdurch entstehen für die Varianten „Invasiv“ und „Kombination Dämmungen“ deutlich höhere CO₂-Äq. Erstinvestitionen von 279,9 t und 275,8 t (siehe Abbildung 25).

Anschließend wurden die betriebsbedingten THG-Emissionsreduktionen für jede Variante und jedes Jahr (über 100 Jahre) im Vergleich zum Ist-Zustand ermittelt. Hierbei wurde lediglich die Phase B6 also die THG-Emissionen von Strom und Fernwärme berücksichtigt. Darauf aufbauend wurden die herstellungsbedingten CO₂-Äq. Investitionen mit den Emissionsreduktionen aus dem Betrieb verglichen, wodurch sich der folgende, in Abbildung 25 dargestellte, Faktor berechnen ließ:

$$\frac{\text{CO}_2 - \text{Äq. Emissionsreduktionen (Betrieb)} [\text{t}]}{\text{CO}_2 - \text{Äq. Emissionsinvestitionen (Herstellungsphase)} [\text{t}]}$$

Auf Grund der minimalen Investitionen in der Herstellungsphase bei der Variante „Nicht invasiv“ ist der Faktor hier über den gesamten Betrachtungszeitraum am größten. Die Variante „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ folgt auf Grund ebenfalls geringer CO₂-Äq. Investitionen für Deckenventilatoren und Dachsystem. Die anderen beiden Varianten sind im unteren Teil der Abbildung mit geänderter Skalierung auf der y-Achse gesondert dargestellt. Hierbei ist anzumerken, dass trotz höherer CO₂-Äq. Investitionen in der Herstellungsphase die Variante „Nicht invasiv“ einen höheren Nutzen/Investitionen-Faktor aufweist als die Variante „Kombination Dämmungen“. Dies lässt sich durch die deutlich höheren CO₂-Äq. Reduktionen im Betrieb bei der Variante „Nicht Invasiv“ erklären.

Da je nach Betrachtungsdauer unterschiedlich oft Materialien ausgetauscht werden, kommt es zu den Sprüngen in den Graphen. An diesen Stellen steigen die CO₂-Äq. Investitionen und der Faktor muss dementsprechend angepasst werden. Einen Einfluss auf die Steigung der Verläufe nehmen außerdem die politischen Entscheidungen zum Kohleausstieg und der Stromversorgung aus erneuerbaren Energien. Da in Folge dieser Entscheidungen die betriebsbedingten Emissionen in allen Varianten und dem Ist-Zustand abnehmen, sinken auch die absoluten Emissionsreduktionen der Varianten im Vergleich zum Ist-Zustand. Hierdurch wird die Steigung der Verläufe geringer.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass der Wert für die CO₂-Äq. Investitionen in der Herstellungsphase der Materialien ausschlaggebend für den ermittelten Faktor ist. Allerdings sind die absoluten Reduktionen der entscheidende Wert bei der ökologischen Betrachtung und, wie in Abbildung 23 zu sehen, bei der Variante „Invasiv“ größer als bei der Variante „Nicht invasiv“. Dennoch verdeutlicht Abbildung 25, dass enorme Emissionsreduktionen bei gleichzeitig geringen CO₂-Äq. Investitionen in der Herstellungsphase bei der Variante „Nicht invasiv“ erreicht werden können. Die Investitionen in der Herstellungsphase könnten in Zukunft an Relevanz zunehmen, wenn Fernwärme und Strom vermehrt aus erneuerbaren Energien gewonnen werden und damit die betriebsbedingten Emissionen abnehmen.

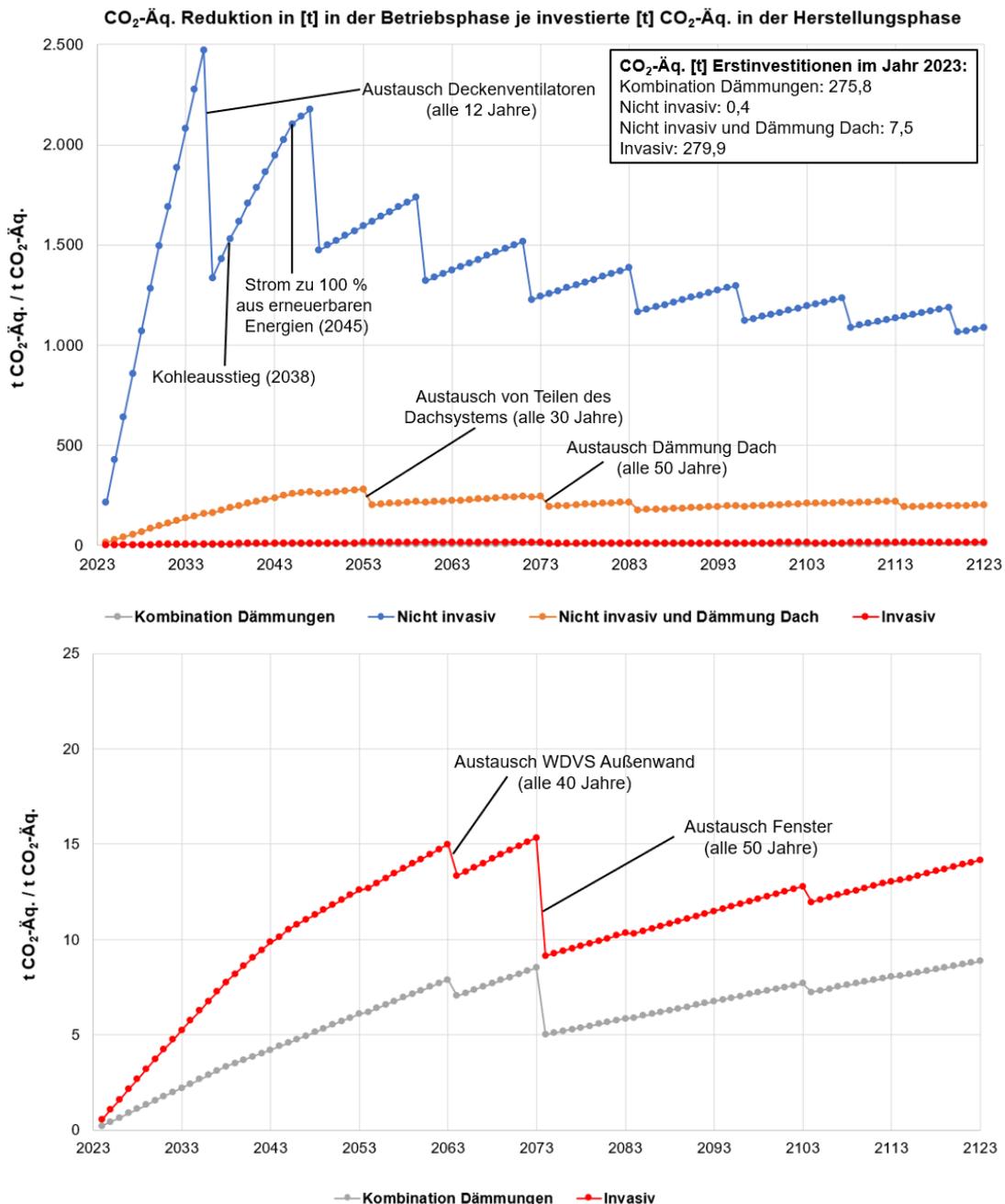


Abbildung 25: Erzielte Reduktion an t CO₂-Äq. im Vergleich zum Ist-Zustand im Verhältnis zu investierten t CO₂-Äq. in der Herstellungsphase über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren; oben: alle Varianten, unten: Varianten „Kombination Dämmungen“ und „Invasiv“ mit veränderter Skalierung der y-Achse

Die Auswertung der Ökobilanzierung zeigt, dass die ausschließliche Sanierung der Außenhülle für die Reduktion der THG-Emissionen des Hahn-Hochhauses bis zu einem Betrachtungszeitraum von < 75 Jahren nicht zielführend ist. Anpassungen an den Einstellungen der Gebäudetechnik sowie bspw. das Ausschalten der Kühlung und die Anpassung der Raumsolltemperaturen während und außerhalb der Belegungszeit reduzieren das GWP bei diesem Gebäude effektiver. Dennoch zeigt die Diskrepanz zwischen der Variante „Nicht Invasiv“ und „Invasiv“ von 435 kg CO₂-Äq./m² welcher ökologische Mehraufwand notwendig ist, um die Anforderungen des Denkmalschutzes vollständig einzuhalten (siehe Tabelle 16). Damit hat der Denkmalschutz des Hahn-Hochhauses neben dem kulturellen Wert ebenfalls einen ökologischen Wert, der von Entscheidungsträger:innen bei Entschlüssen über die Art der Sanierung oder dem Erhalt des Gebäudes berücksichtigt werden muss.

Tabelle 16: Übersicht für das gesamte GWP und die Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand für die Maßnahmenkombinationen bei einem Betrachtungszeitraum von 40 Jahren

Maßnahmenkombination	Gesamtes GWP in kg CO ₂ -Äq./m ²	Reduktion im Vergleich zum Ist-Zustand in %
Ist-Zustand	1810	-
Nicht invasiv	1171	35,3
Nicht invasiv und Nutzerkorrektur	1081	40,3
Kombination Dämmungen	1298	28,3
Nicht invasiv und Dämmung Dach	1080	40,3
Nicht invasiv und Dämmung Dach und Nutzerkorrektur	990	45,3
Invasiv	736	59,3
Invasiv und Nutzerkorrektur	667	63,1

4.5 Sensitivitätsanalyse

Bei der folgenden Analyse wird untersucht, wie sich die Ergebnisse der GWP-Berechnungen verändern, wenn Parameter angepasst werden. Dafür wurde sowohl ein Parameter, der die Phasen A1-A3 betrifft, verändert als auch ein Faktor, der einen Einfluss auf die Phase B6 hat.

In der Phase A1-A3 wurde anstelle des Datensatzes für Aluminiumfenster ein Datensatz für Holzfenster verwendet. Die Werte aus diesem Datensatz sind in Anhang D abgebildet. Es wurde bewusst ein Parameter gewählt, der die Fenster betrifft, da diese in den Phasen A1 bis A3 den größten Anteil am GWP haben (siehe Kapitel 4.3 Abbildung 20).

Der Faktor, der die Phase B6 beeinflusst, ist die Wahl eines anderen Szenarios für den Kohleausstieg. So wurde davon ausgegangen, dass der aktuell bis 2038 gesetzlich festgelegte Kohleausstieg (Kohleausstiegsgesetz, 2022) bereits bis 2030 komplett vollzogen ist, so wie es im Koalitionsvertrag der Bundesregierung vorgesehen ist (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2023c). Somit würde die Energie aus Fernwärme bereits ab 2030 vollständig ohne Steinkohle gewonnen werden. Dies

bedeutet, dass der Umrechnungsfaktor vom Energiebedarf der Fernwärme bereits ab 2030 0,19 kg CO₂-Äq./kWh anstelle von 0,24 kg CO₂-Äq./kWh beträgt und nicht erst ab 2038.

Zudem wurden die Veränderung dieser beiden Parameter an zwei verschiedenen Maßnahmenkombinationen getestet. Die einzigen beiden Maßnahmenkombinationen, in denen ein Austausch der Fenster vorgesehen war, waren die Varianten „Invasiv“ und „Kombination Dämmungen“. Dies und die differierenden Anteile am durch Fernwärme verursachten GWP bei beiden Maßnahmen waren der Grund für die Wahl dieser beiden Varianten für die Sensitivitätsanalyse.

Beim Ausgangsmodell der invasiven Maßnahmenkombination hat die Herstellungsphase einen Anteil von 10,4 % am gesamten GWP. Dieser Anteil wird durch den Einsatz von Holzfenstern anstelle von Aluminiumfenstern auf 4,3 % oder in absoluten Werten um ca. 178.000 kg CO₂-Äq. reduziert. Durch den Einsatz von Holzfenstern kann das gesamte GWP um 6,4 % reduziert werden. Die Reduktion, die durch den veränderten Faktor für Fernwärme entsteht, beträgt – bezogen auf das gesamte GWP – 3,1 % (siehe Tabelle 17). Der Einfluss dieses Faktors ist bei dieser Maßnahmenkombination also geringer als der Einfluss, den der Austausch der Fenster hat.

Bei der Variante „Kombination Dämmungen“ wird auf die absoluten Werte bezogen eine größere Reduktion – in Bezug auf den Faktor „Kohleausstieg 2030“ – von ca. 127.000 kg CO₂-Äq. anstelle von 86.000 kg CO₂-Äq. („Invasive“ Variante) erreicht. Allerdings hat auch bei dieser Variante der Parameter „Austausch der Holzfenster“ mit 3,7 % anstelle von 2,6 % („Kohleausstieg 2030“) einen prozentual größeren Einfluss auf das gesamte GWP als der angepasste Faktor für die Fernwärme (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Auswertung der Sensitivitätsanalyse für die Varianten „Invasiv“ und „Kombination Dämmungen“

Variante	Parameter	GWP Phase A1-A3 in kg CO ₂ -Äq.	GWP Phase B6 in kg CO ₂ -Äq.	GWP Gesamt in kg CO ₂ -Äq.	Gesamtreduktion In %
Invasiv	Basis	288.457	2.473.871	2.504.748	-
	Austausch zu Holzfenster	110.545	2.473.871	2.326.836	6,4
	Kohleausstieg 2030	288.457	2.387.901	2.430.084	3,1
Kombination Dämmungen	Basis	279.253	4.591.611	4.870.864	-
	Austausch zu Holzfenster	101.314	4.591.611	4.692.952	3,7
	Kohleausstieg 2030	279.253	4.464.355	4.743.608	2,6

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass politische Entscheidungen, wie ein früherer Kohleausstieg, einen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung haben können. So könnte z. B. auch ein Umstieg auf Strom, der vollständig aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, vor 2045 zu einer größeren Reduktion des GWP in der Phase B6 führen. Hierbei ist zu beachten, dass diese Entscheidungen auch in die andere Richtung ausschlagen können, sollte die nächste Regierung bspw. beschließen, die Kohlekraftwerke nach 2038 weiter zu betreiben. Dieser Faktor stellt somit eine Unsicherheit in der Ökobilanzierung dar, die nicht umgangen werden kann und somit auf Grundlage der derzeit gültigen Rechtslage beurteilt werden sollte.

Dennoch bleibt festzuhalten, dass die Auswirkungen auf die Ökobilanzierung, bei der Veränderung des hier gewählten Parameters, eher gering sind.

Der Austausch von Datensätzen bei den verwendeten Materialien kann ebenfalls einen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung haben. Hierbei muss beachtet werden, dass in dieser Lebenszyklusanalyse potentielle Maßnahmen behandelt werden, die mit verschiedenen Materialien durchgeführt werden können. Eine fehlerfreie Vorhersage für die verwendeten Materialien während der Sanierung und somit die korrekte Auswahl von Datensätzen sind daher kaum möglich. Die Variation in den Datensätzen für die Baustoffe und die Analyse verschiedener Materialien kann allerdings dazu beitragen, die ökologisch sinnvollsten Materialien für die jeweilige Maßnahme bereits in der Planungsphase zu ermitteln. Dennoch müssen auch hier Aspekte des Denkmalschutzes berücksichtigt und überprüft werden.

5 Diskussion

Die Ergebnisse aus Kapitel 4 helfen dabei, den Denkmalschutz des Hahn-Hochhauses ökologisch zu bewerten. Die auf den Denkmalschutz bezogenen nicht invasiven Maßnahmen schneiden dabei – rein ökologisch gesehen – zum Teil schlechter ab als die invasiven Maßnahmen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die ermittelten Werte einigen Annahmen unterliegen, die im Folgenden, mit den Ergebnissen der Arbeit, diskutiert werden.

So kann bspw. debattiert werden, welche Sanierungsmaßnahmen als invasiv und welche als nicht invasiv angesehen werden. Insbesondere die Sanierung des Daches stellt hierbei einen Sonderfall dar: Das Dach und damit die Außenhülle des Gebäudes werden zwar verändert, aber nur so weit, dass es für Passant:innen, die das Gebäude von der Straße aus betrachten, oder Nutzer:innen innerhalb des Gebäudes nicht sichtbar ist. Die Abgrenzung zwischen invasiven und nicht invasiven Maßnahmen auf Grundlage der Beeinträchtigung des äußeren Erscheinungsbilds des Gebäudes ist somit nicht eindeutig. Eine finale Einschätzung müssen Denkmalschutzexpert:innen für jedes Gebäude individuell tätigen.

Die Auswertung der Ökobilanzierung hat gezeigt, dass die Ergebnisse stark abhängig vom gewählten Betrachtungszeitraum sind. Bei dem hier gewählten Betrachtungszeitraum von 40 Jahren hat die Variante „Invasiv“ im Vergleich zu den Varianten „Nicht invasiv“ und „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ ein niedrigeres GWP, wenn die herstellungsbedingten THG-Emissionen der Maßnahmen und betriebsbedingten THG-Emissionen von Strom und Fernwärme berücksichtigt werden. Die Wahl eines deutlich kürzeren Betrachtungszeitraums von unter 5 Jahren führt allerdings dazu, dass sowohl die Variante „Nicht invasiv“ als auch die Variante „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ ein niedrigeres GWP als die Variante „Invasiv“ aufweisen. Die Wahl des Betrachtungszeitraums ist somit für die Ergebnisse der Ökobilanzierung elementar und sollte möglichst evidenzbasiert sein. Eine mögliche Grundlage dafür kann bei Baudenkmalern eine Bestandsanalyse der Konstruktion des Gebäudes liefern, mit Hilfe derer vorausgesagt wird, wie lange das Gebäude noch ohne Sicherheitsbedenken erhalten werden kann. Dieser Zeitraum kann dann für denkmalgeschützte Gebäude, deren längst möglicher Erhalt erstrebenswert ist, als Betrachtungszeitraum in der Ökobilanzierung gewählt werden.

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung haben zudem gezeigt, dass eine große Menge an THG-Emissionen durch den Fernwärme- und Strombedarf verursacht werden. Falls es gelingt, den Ausbau der erneuerbaren Energien zu beschleunigen, kann dies innerhalb des gewählten Betrachtungszeitraumes einen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung haben. Dieser politisch beeinflusste Sachverhalt bildet damit eine weitere Unsicherheit, die in der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.5 bereits angesprochen wurde.

In Bezug auf die Energiequelle für Fernwärme und Strom blieb in dieser Arbeit unberücksichtigt, welche Optionen es für den Gewinn von erneuerbaren Energien direkt am Hahn-Hochhaus gibt. So könnte bspw. die Installation einer Photovoltaik-Anlage auf dem Dach einen Teil des Strombedarfs vor Ort decken. Hier

muss wiederum geprüft werden, ob diese Maßnahmen im Rahmen des Denkmalschutzes durchgeführt werden können.

Außerdem blieb unbeachtet, ob auch die Fernwärme in Zukunft vollständig aus erneuerbaren Energien gewonnen werden kann. Für die Umstellung auf erneuerbare Energien wurden keine Angaben vom Versorgungsunternehmen in Stuttgart gemacht. In München besteht bspw. das Ziel, bis 2040 den städtischen Bedarf an Fernwärme vollständig aus Geothermie-Anlagen zu gewinnen (Stadtwerke München GmbH, 2023).

Auch die Lebenszykluskosten der invasiven und nicht invasiven Maßnahmen konnten in dieser Arbeit nicht betrachtet werden, sind allerdings oft ein entscheidender Faktor, wenn die Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen diskutiert wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Kostenfaktor insbesondere bei denkmalgeschützten Gebäuden dazu führen kann, dass keine Maßnahmen zur Reduktion der THG-Emissionen ergriffen werden. Dies liegt z. B. an Formulierungen in Gesetzestexten wie dem GEG, dass bei einem unverhältnismäßigen Mehraufwand, die Anforderungen des Gesetzes nicht erfüllt werden müssen (GEG, 2020, § 105).

Da nicht invasive Maßnahmen allerdings in keinem Konflikt zum Denkmalschutz stehen, sollten diese Maßnahmen in jedem Fall durchgeführt werden. Auch die Gesetzestexte und Anforderungen der Denkmalschutzbehörden sollten dahingehend geändert werden: An allen Baudenkmalern muss die Umsetzung von nicht invasiven Maßnahmen überprüft werden und darf nicht von vornherein als unverhältnismäßiger Mehraufwand eingeordnet werden. Somit kann auch für Baudenkmalern der Hauptzweck des GEG – „ein möglichst sparsamer Einsatz von Energie in Gebäuden“ (GEG, 2020, § 1 Absatz 1) – bestmöglich eingehalten werden.

Zudem kann die Analyse der Lebenszykluskosten dazu beitragen, neben dem ökologischen auch den ökonomischen Wert von Denkmalschutz zu bestimmen. Dabei müssen die Investitionskosten für die einzelnen Maßnahmen berücksichtigt werden sowie die dynamischen Kosten, die für Energie und Strom anfallen. Anschließend können die Amortisationszeiten und Kosteneffizienz der unterschiedlichen Varianten ermittelt werden. Somit kann in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum der monetäre Wert von Denkmalschutz bestimmt werden und in zukünftige Diskussionen mit einfließen. Methoden, die diese Kosten in Bezug auf Maßnahmen an einem Gebäude berücksichtigen, wurden bereits entwickelt (Conrad, S. 9).

Ein weiterer Aspekt, der die Ökobilanzierung betrifft, ist die Wahl der Wirkungskategorien. Die ökologische Bewertung wurde in dieser Arbeit mit Hilfe des GWP durchgeführt und fokussierte sich damit auf die THG-Emissionen. Diese Kategorie wurde als die meist verwendete und international anerkannteste Wirkungskategorie ausgewählt. Das Ziel bestand zudem darin, die Auswirkungen der verschiedenen Varianten auf die Erderwärmung zu ermitteln. Hierfür ist das GWP optimal geeignet. Dennoch können nicht alle Umweltwirkungen durch diese Kategorie ökologisch bewertet werden. Dafür wäre die Beteiligung verschiedener Wirkungskategorien wie bspw. dem Ozonabbaupotential oder Versauerungspotential erforderlich.

Da der Fokus auf der ökologischen Bewertung von Denkmalschutz lag wurde der Faktor Innenraumkomfort in dieser Arbeit nur bedingt berücksichtigt. Eine intensivere Berücksichtigung und die Einhaltung von Komfortstandards kann die Produktivität von Nutzer:innen steigern, zu ihrem Wohlbefinden beitragen und somit einen wirtschaftlichen Nutzen erfüllen (Clements-Croome, 2006, S. 36; Kolarik et al., 2011). Inwiefern die Innenraumkomfortbedingungen eingehalten oder nicht eingehalten wurden und welche Gründe dies hatte, wird daher im Folgenden detaillierter erörtert.

Bei der Variante „Kombination Dämmungen“ werden die komfortabelsten Innenraumbedingungen aller untersuchten Varianten erreicht. Dies ist hauptsächlich durch die Einstellungen der Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit zu begründen. Einerseits liegen hier enorme Potentiale zur Energie- und damit Emissionsreduktion, andererseits bilden die Innenraumtemperaturen einen der entscheidenden Faktoren für den Innenraumkomfort. Das Ausschalten der Kühlsysteme bzw. die Erhöhung der zulässigen max. Raumsolltemperatur während der Kühlperiode haben insbesondere auf die THG-Emissionen, die durch den Strombedarf verursacht werden, einen direkten Einfluss (Vergleich der Varianten „Kombination Dämmungen“ und „Nicht invasiv“). Die Absenkung der min. zulässigen Raumsolltemperaturen während der Heizperiode reduziert den Fernwärmebedarf und die damit einhergehenden THG-Emissionen unmittelbar (Vergleich des Ist-Zustandes und der Variante „Nicht invasiv“).

Durch die Anpassung der Raumsolltemperaturen konnten in den Varianten „Nicht invasiv“, „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ und „Invasiv“ im Vergleich zum Ist-Zustand und zur Variante „Kombination Dämmungen“, auf Kosten des Innenraumkomforts, THG-Emissionen gespart werden. Bei einer intensiveren Berücksichtigung der Komfortaspekte in dieser Arbeit, wären solche Emissionsreduktionen bei den Varianten „Nicht invasiv“ und „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ nicht möglich gewesen. Bei diesen beiden Varianten wird die Komfortkategorie IV nach der DIN EN 16798-1:2022-03 in Bezug auf die Auskühlung der kritischen Zone nicht eingehalten (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a). Eine Absenkung der Raumsolltemperatur auf 18 °C während der Belegungszeit in der Heizperiode führt somit zu – nach Norm – unkomfortablen Bedingungen bei den Varianten „Nicht invasiv“ und „Nicht invasiv und Dämmung Dach“. Die Ergebnisse der Varianten mit Nutzerkorrektur zeigen allerdings, dass durch die Anpassung des clo-Faktors auf 0,3 bis 1,2 anstelle von 0,5 bis 1,0 komfortable Bedingungen (Komfortkategorie IV (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)) erreicht werden können.

Ein Ausschalten der Kühlung bei gleichzeitigem Einsatz von Deckenventilatoren führt hingegen auch ohne Nutzerkorrektur nicht zu unkomfortablen Bedingungen bei den Varianten „Nicht invasiv“ und „Nicht invasiv und Dämmung Dach“. Hier kann die Komfortkategorie II nach der DIN EN 16798-1:2022-03 in Bezug auf die Überhitzung der kritischen Zone bis auf einige Ausreißer vollständig eingehalten werden (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a).

Bei der Variante „Invasiv“ verhält es sich anders: Durch die zusätzliche Dämmung der Außenhülle bei gleichzeitigem Ausschalten der Kühlsysteme, kommt es während der Kühlperiode häufiger zur Überhitzung der kritischen Zone. Das Auskühlen der Zone stellt hingegen ein geringeres Problem dar, hier kann die Komfortkategorie IV im negativen PMV-Bereich auch ohne Nutzerkorrektur eingehalten werden (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a).

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass die vollständige Einhaltung der Komfortkategorien nach der DIN EN 16798-1:2022-03 zu abweichenden Ergebnissen in der Ökobilanzierung geführt hätte, wenn

davon ausgegangen wird, dass die Nutzerkorrektur nicht angewendet werden kann. Bewusste Nutzer:innen, die adaptiver auf die Innenraumbedingungen bspw. bei der Anpassung der Kleidung reagieren, können zu den hier ermittelten Emissionsreduktionen bei gleichzeitiger Einhaltung der Komfortstandards der Normen beitragen.

Es bleibt abzuwägen, inwiefern die Einhaltung der Komfortanforderungen nach Norm in Zukunft den Energieverbrauch und die damit verbundenen THG-Emissionen von Gebäuden bestimmen sollten. Der Fokus sollte stattdessen auf gesunden und nicht rein komfortablen Innenraumbedingungen liegen (siehe Kapitel 2.2.1). Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass durch eine gewisse Vernachlässigung der durch die Normen definierten Komfortaspekte erhebliche Emissionseinsparpotentiale entstehen können.

Sollte jedoch eine genauere Analyse der Einwirkungen der Maßnahmen auf den Innenraumkomfort durchgeführt werden, ist es ratsam, dass neben der hier gewählten kritischen Zone noch weitere Zonen im Gebäude betrachtet werden. Da die hier gewählte kritische Zone direkt an das Dach angrenzt, haben Maßnahmen, die am Dach getroffen werden, einen direkten Einfluss auf diese Zone. Dieser Einfluss gilt für einen Großteil der restlichen Zonen nur bedingt. Für eine ganzheitlichere Betrachtung des Komforts sollten somit mehrere Zonen in unterschiedlichen Bereichen des Gebäudes untersucht werden.

Neben den thermischen Komfortanforderungen sollten dabei ebenfalls noch andere Komfortaspekte berücksichtigt werden. Hierbei sind, bei innerstädtisch gelegenen Gebäuden wie dem Hahn-Hochhaus, die Aspekte Akustik und Luftqualität (auf Grund der Belastungen durch den Straßenverkehr) hervorzuheben. Diese Aspekte können ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Gesundheit der Nutzer:innen haben (Schreiber, 2004; Umweltbundesamt, 2019b).

Das Absenken der Raumsolltemperaturen außerhalb der Belegungszeit während der Heizperiode hat im Gegensatz zu der Anpassung der Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit einen zu vernachlässigenden Einfluss auf den Innenraumkomfort. Dies zeigen die Ergebnisse der einzelnen Maßnahmen aus dem Kapitel 3.4.1. Hier, ebenso wie bei den Raumsolltemperaturen während der Belegungszeit, ist zu beachten, dass nicht bekannt ist, was die tatsächlichen Raumsolltemperaturen im Hahn-Hochhaus sind und ob nicht bereits die reduzierten Werte im Ist-Zustand eingestellt sind. Die Reduktionen der THG-Emissionen durch diese gebäudetechnischen Einstellungen basieren somit auf Annahmen. Dennoch ist festzuhalten, dass die Raumsolltemperaturen während und außerhalb der Belegungszeit in jedem Fall überprüft werden sollten, da sie ein enormes Emissionseinsparpotential bergen.

Ähnlich wie bei den Raumsolltemperaturen mussten auch in anderen Bereichen Annahmen getroffen werden, die einen Einfluss auf die Ergebnisse der Arbeit haben können:

Dies betrifft bspw. die thermische Außenhülle des Hahn-Hochhauses. Hier beruhen die Annahmen zu den U-Werten auf durchschnittlichen Werten aus der Zeit des Einbaus. Um eine realitätsnähere Gebäudesimulation durchführen zu können, ist es daher elementar, dass zunächst eine detaillierte Bestandsaufnahme durchgeführt wird. Diese sollte neben der Analyse der Bauteile auch eine Untersuchung und Dokumentation der gebäudetechnischen Einstellungen, wie bspw. der oben genannten Raumsolltemperaturen, beinhalten.

Nicht nur bei der Modellierung des Ist-Zustandes mussten Annahmen getroffen werden, sondern auch bei der Umsetzung der verschiedenen Sanierungsmaßnahmen. Beispielhaft zu nennen ist dabei die Dämmung der Außenwand des Hahn-Hochhauses. Bei den Maßnahmen wurde eine Außendämmung gewählt, was dem momentanen Stand der Technik entspricht. Der Einsatz einer Innendämmung anstelle einer Außendämmung wäre evtl. im Rahmen des Denkmalschutzes möglich, wodurch die Dämmung der Außenwand nicht weiter als invasive Maßnahme gelten würde. Hierdurch würden weitere Einsparpotentiale bei gleichzeitiger Berücksichtigung des Denkmalschutzes entstehen. Allerdings muss angemerkt werden, dass der Einsatz einer Innendämmung andere Herausforderungen mit sich bringt: Wärmebrücken an den Bauteilanschlüssen Innenwand-Außenwand und Decke-Außenwand bleiben größtenteils bestehen, gebäudetechnische Anlagen wie Radiatoren müssen evtl. versetzt werden und es kommt zur Reduktion der Nutzfläche durch die innen angebrachte Dämmung (Cholewa, 2022, S. 40–41).

Neben den getroffenen Annahmen gibt es weitere Unsicherheiten, die in einer Simulation nicht vollständig abgebildet werden können:

Das Verhalten der Nutzer:innen stellt bspw. eine solche – wenn nicht sogar die größte – Unbekannte dar. Die Implementation einer größeren Varianz beim clo-Faktor sowie ein temperatur- statt strahlungsgesteuerter Sonnenschutz haben, wie bereits oben beschrieben, gezeigt, dass das Nutzerverhalten sich positiv auf die Emissionsreduktion und den Innenraumkomfort auswirken kann. Allerdings können Nutzer:innen die Ergebnisse auch in negative Richtung beeinflussen. Das Öffnen von Fenstern oder das nicht vollständige Ausschalten von elektronischen Geräten (Standby-Modus) können bspw. dazu beitragen, dass der Bedarf an Fernwärme und Strom zunimmt. Zum Öffnen und Schließen der Fenster ist anzumerken, dass Stoßlüften in der Simulation nicht abgebildet werden konnte, aber vermutlich – auf Grund der innerstädtischen Lage (Lärmbelästigung durch Straßenverkehr) – realistischer ist als die dauerhafte Öffnung (Kipplüftung).

Abschließend stellt sich die Frage, ob die Erkenntnisse aus dieser Arbeit auf andere denkmalgeschützte Bürohochhäuser übertragen werden können und die Forschungsfrage somit umfassend beantwortet werden kann.

Die Einteilung in invasive und nicht invasive Maßnahmen kann für einen Großteil der Baudenkmäler angewandt werden, da meist das äußere Erscheinungsbild aus Sicht des Denkmalschutzes entscheidend ist (Putz et al., 2022, S. 7). Abgesehen davon muss jedes Gebäude individuell betrachtet werden. Dafür sind bei zukünftigen ökologischen Untersuchungen folgende Aspekte elementar:

- **Bestandsanalyse:** Zu Beginn der Untersuchung ist eine umfassende Bestandsaufnahme notwendig, in der Bauteilaufbauten und Gebäudetechnik (Geräte und Einstellungen) detailliert erfasst werden. Je präziser diese Analyse des Bestandes erfolgt, desto genauer kann die Modellierung und anschließende Simulation durchgeführt werden.

- **Einteilung in invasive und nicht invasive Maßnahmen:** Es muss für jedes Gebäude individuell überprüft werden, welche Maßnahmen im Rahmen des Denkmalschutzes durchgeführt werden können und welche nicht.
- **Überprüfung der Maßnahmen:** Darauf aufbauend muss beurteilt werden, inwiefern die Nachbesserung der thermischen Hülle oder die Änderung von gebäudetechnischen Einstellungen zu Energie- und damit Emissionseinsparungen führen kann und welchen ökologischen Herstellungsaufwand eventuelle Maßnahmen beim Einbau und eventuellem Austausch haben. Hierbei kann eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse für verschiedene Materialdatensätze dazu führen, dass bereits in der Planungsphase die ökologisch sinnvollsten Maßnahmen identifiziert werden können (siehe Kapitel 4.5).
- **Wahl des Betrachtungszeitraums:** Im Rahmen der Ökobilanzierung ist außerdem die Wahl des Betrachtungszeitraums von besonderer Bedeutung für die Ergebnisse. Die Wahl sollte daher ebenfalls bei jedem betrachteten Gebäude individuell erfolgen und den Aspekt der voraussichtlichen Restnutzungsdauer beinhalten. Diese kann wiederum in einer ausführlichen Bestandsaufnahme des Gebäudes ermittelt werden.

6 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die ökologische Bewertung des Denkmalschutzes von Bürohochhäusern aus der Nachkriegszeit. Die Bewertung wurde anhand eines individuellen Gebäudes, des Hahn-Hochhauses in Stuttgart, und mit Hilfe einer Ökobilanzierung und eines Simulationsprogrammes durchgeführt. Es wird aufgezeigt, welcher ökologischer Mehraufwand entsteht, wenn Maßnahmen vollständig im Rahmen des Denkmalschutzes durchgeführt werden. Diese Maßnahmen werden dabei mit invasiven Maßnahmen, die den Denkmalschutz nicht berücksichtigen, verglichen.

Die Hypothese: *„Denkmalschutzbezogene nicht invasive Maßnahmen haben bei der Betrachtung eines Bürohochhauses der Nachkriegszeit ein geringeres Treibhauspotential als invasive Maßnahmen.“* konnte nur teilweise bestätigt werden. Im Vergleich zu der „Invasiven“ Variante hat die „Nicht invasive“ Variante auf einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren bezogen ein höheres GWP, wenn die THG-Emissionen der Herstellungsphase der Maßnahmen und im laufenden Betrieb durch Strom und Fernwärme berücksichtigt werden. Dennoch zeigt die Variante „Nicht invasiv“, dass Einstellungen an der Gebäudetechnik einen enormen Einfluss auf die Reduktion der THG-Emissionen haben können. Bei vorherigen Sanierungen wurden diese Einstellungen nicht beachtet, und Probleme in Bezug auf den Innenraumkomfort wurden durch den zusätzlichen Einbau von Gebäudetechnik gelöst.

Auch wenn die Variante „Nicht invasiv und Dämmung Dach“ als Variante gesehen wird, die vollständig im Rahmen des Denkmalschutzes durchgeführt werden kann, kann die Hypothese nicht bestätigt werden. Ob eine Dämmung des Daches im Rahmen des Denkmalschutzes durchgeführt werden kann, müssen Expert:innen beurteilen.

Der hohe Strombedarf auf Grund der aktiven Kühlung führt allerdings dazu, dass die invasive Variante, in der nur die Außenhülle des Gebäudes gedämmt wird („Kombination Dämmungen“), im Vergleich zu den anderen untersuchten Varianten, das insgesamt gesehen höchste GWP innerhalb des gewählten Betrachtungszeitraumes aufweist.

Damit zeigt die Ökobilanzierung der Maßnahmen am Hahn-Hochhaus, dass die ausschließliche Sanierung der Außenhülle einen – ökologisch gesehen – geringeren Effekt als die Anpassung der gebäudetechnischen Einstellungen haben kann. Bestehende normbedingte Komfortanforderungen spielen bei dieser Betrachtung bewusst eine untergeordnete Rolle.

Die Diskussion hat teilweise Fragen aufgeworfen, die im Anschluss an diese Arbeit Bestandteil weiterführender Forschung sein könnten.

So sollten die Anforderungen der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Normen in Bezug auf ökologische Aspekte und gesunde und nicht rein komfortable Innenraumbedingungen (siehe Kapitel 2.2.1) untersucht werden. Dafür müssen möglichst allgemeingültige Kennwerte für gesunde Innenraumbedingungen entwickelt werden, die mehr als nur Komfort bewerten. Hier sollten bestenfalls auch Aspekte wie Akustik und Luftqualität, welche einen direkten Einfluss auf die Gesundheit der Nutzer:innen haben, berücksichtigt werden.

Außerdem muss überprüft werden, ob und in welchem Ausmaß die Erzeugung von erneuerbaren Energien an Bürohochhäusern im Rahmen des Denkmalschutzes, möglich ist und welchen Einfluss das auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung hat. Hierbei sollten neben der Reduktion des Energiebedarfs ebenfalls der ökologische Herstellungsaufwand für die Maßnahmen wie bspw. Photovoltaikanlagen oder Wärmepumpen berücksichtigt werden. Außerdem muss untersucht werden, inwiefern die Maßnahmen in der meist innerstädtischen Lage der Bürohochhäuser umgesetzt werden können.

Ein weiterer Faktor, der in zukünftigen Arbeiten untersucht werden sollte, sind die Lebenszykluskosten der auf den Denkmalschutz bezogenen invasiven und nicht invasiven Maßnahmen. Hierbei stellt sich die Frage, wie lange es dauert, bis sich die potenziellen Mehrkosten für die invasiven Maßnahmen im Betriebsverlauf durch Einsparungen an Energiekosten amortisieren. Durch die wirtschaftliche Betrachtung fließt ein weiterer entscheidender Faktor in die Diskussion der Maßnahmen mit ein, und der Denkmalschutz kann nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch bewertet werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bringen eine weitere Komponente in zukünftige Diskussionen zum Thema Denkmalschutz: Die ökologische Bewertung berücksichtigt dabei kulturelle Aspekte des Denkmalschutzes, die nicht unmittelbar messbar sind, und die Reduktion der THG-Emissionen von Gebäuden. Dabei erfolgt die Beachtung des Denkmalschutzes in Form von einer Einteilung in denkmalschutzbezogene invasive und nicht invasive Maßnahmen. Die Erfassung der THG-Emissionen stellt im Vergleich zur rein energetischen Betrachtung einen ganzheitlicheren Ansatz im Rahmen der ökologischen Bewertung dar. Dieser Ansatz berücksichtigt zusätzlich die THG-Emissionen aus der Herstellungsphase der Maßnahmen und erfasst die betriebsbedingten THG-Emissionen nicht nur jährlich, sondern dynamisch über einen längeren Zeitraum. Somit werden politische Entscheidungen, die erst in der Zukunft aktiv zur Geltung kommen, bereits jetzt berücksichtigt. Es sind die THG-Emissionen, die einen unmittelbaren Einfluss auf die Erderwärmung und damit auf den Erhalt der Lebensgrundlagen auf der Erde haben. Die THG-Emissionen eines Gebäudes sind somit relevanter als der reine Energieverbrauch und sollten in zukünftigen Diskussionen eine entscheidende Rolle einnehmen.

Nun, da der ökologische Wert von Denkmalschutz beispielhaft und in Form von Treibhausgasemissionen messbar ermittelt wurde, bleibt letztendlich die Frage nach dem Wert von Kultur: Welcher ökologische Mehraufwand ist für die Einhaltung des Denkmalschutzes akzeptabel? Diese Frage kann nicht von Architekt:innen und Ingenieur:innen allein beantwortet werden, sondern muss in Zeiten des Klimawandels interdisziplinär diskutiert werden.

7 Literaturverzeichnis

- ASHRAE. (2017). *Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- Breuning, H.-J. (1998). In die Jahre gekommen: Hochhaus in der Friedrichstraße in Stuttgart. *Deutsche Bauzeitung*, 132(3), 104–108.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.). (2017). *BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)*. <https://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen/>
- Bundesgesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (2020).
- Bundesgesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (2022).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.). (2015). *Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen*.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.). (2022, 25. Februar). *Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck pro Kopf in Deutschland - BMUV-Infografik*. <https://www.bmuv.de/media/kohlenstoffdioxid-fussabdruck-pro-kopf-in-deutschland>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.). (2023, 7. März). *Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045*. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebäudestrategie-klimaneutralitaet-2045.html>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.). (2023, 16. Februar). *ÖKOBAUDAT*. <https://www.oekobaudat.de/>
- Chen, W., Liu, S., Gao, Y., Zhang, H., Arens, E., Zhao, L. & Liu, J. (2018). Experimental and numerical investigations of indoor air movement distribution with an office ceiling fan. *Building and Environment*(130), 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.016>
- Cholewa, T. (2022). *Energy efficient renovation of existing buildings for HVAC professionals. European Guidebook REHVA: no. 32*. REHVA.
- Clements-Croome, D. (2006). *Creating the productive workplace: Second Edition*. Taylor & Francis.
- Conrad, J. *Modellierung und Bewertung von Maßnahmen zur kosteneffizienten CO₂-Verminderung im Sektor private Haushalte* [, Technische Universität München]. mediatum.ub.tum.de. <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1525924>
- Corona Datenplattform. (2021). *Homeoffice im Verlauf der Corona-Pandemie*. Bonn. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads//infas-corona-datenplattform-homeoffice.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Daikin Airconditioning Central Europe Handels GmbH (Hrsg.). (2023). *Split-Klimaanlage*. https://www.daikin.at/de_at/ratgeber/klimaanlagen/split-klimaanlage.html
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Mai 2006). *Ergothermie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und*

- des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit* (DIN EN ISO 7730 2006-05).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Februar 2013). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz* (DIN 4108-2:2013-02).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (September 2018). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung: Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten* (DIN V 18599-10:2018-09).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Dezember 2019). *Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen: Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung* (DIN 1946-6:2019-12).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Februar 2021a). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen* (DIN EN ISO 14044:2021-02).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Februar 2021b). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen* (DIN EN ISO 14040:2021-02).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Oktober 2021c). *Grundlagen der Tragwerksplanung* (DIN EN 1990:2021-10).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (Dezember 2021d). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken* (DIN EN 15643:2021-12).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (März 2022a). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik* (DIN EN 16798-1:2022-03).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (März 2022b). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte* (DIN EN 15804:2022-03).
- Deutsches Klima Konsortium (Hrsg.). (2023, 21. Februar). 12.3 | *Emissionen*. <https://www.deutsches-klima-konsortium.de/de/klimafaq-12-3.html>
- EnBW Energie Baden-Württemberg AG (Hrsg.). (2023, 24. Februar). *Fernwärme*. <https://www.enbw.com/fernwaerme/geschaeftskunden>
- EQUA Simulation AB (Hrsg.). (2022, 27. Juli). *IDA ICE - Simulation Software | EQUA*. <https://www.equa.se/de/ida-ice>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (Hrsg.). (November 2014). *Stück für Stück saniert: Der Einsatz minimalinvasiver Sanierungsprozesse*. <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/forschung-im-fokus/minimalinvasiv-sanieren.html>
- Gänßmantel, J., Geburtig, G. & Eßmann, F. (2006). *EnEV und Bauen im Bestand: Energieeffiziente Gebäudeinstandsetzung*. Huss-Medien.

- Hamann, A. (2015). *Klimaschutzstrategien für Nichtwohngebäude in Stadtquartieren: Bestandsmodellierung und CO₂-Minderungsszenarien am Beispiel Wuppertal*. Wuppertaler Schriften zur Forschung für eine nachhaltige Entwicklung: Bd. 5. Oekom. http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783865818997
- Hensen, F., Kolbmüller, H., Stahr, M., Weber, J. & Wild, U. (2009). *Bausanierung: Erkennen und Beheben von Bauschäden* (4. Aufl.). Praxis. Vieweg + Teubner. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9600-1>
- Hörner, M. (2021). *Der Bestand der Nichtwohngebäude in Deutschland: Daten und Fakten*. Institut Wohnen und Umwelt. http://www.datanwg.de/fileadmin/user/iwu/210428_IWU_PT_dataNWG_DatenundFakten.pdf
- Humphreys, M. A. & Nicol, J. F. (2018). Principles of Adaptive Thermal Comfort. In *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia* (S. 103–113). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8465-2>
- Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.). (2023). *IBU.data*. <https://ibu-epd.com/ibu-data-start/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.). (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genf. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Annex I: Glossary. In IPCC (Hrsg.), *Physical Sciences. Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* (S. 541–562). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- Kampmann GmbH & Co. KG (Hrsg.). (2023, 25. Januar). *Venkon Gebläsekonvektor für Hotel-, Büro- und Industriebauten*. <https://www.kampmann.de/hvac/produkte/fan-coils/venkon>
- 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.
- Kolarik, J., Toftum, J., Olesen, B. W. & Jensen, K. L. (2011). Simulation of energy use, human thermal comfort and office work performance in buildings with moderately drifting operative temperatures. *Energy and Buildings*, 43(11), 2988–2997. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.008>
- Koth, S., Kobas, B., Bausch, K. & Auer, T. (2022). *Mitigatin climate change through healthy discomfort*. München.
- Landesbauordnung für Baden-Württemberg (2010).
- Landesgesetz zum Schutz der Kulturdenkmale (1983). <https://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=DSchG+BW&psml=bsbawueprod.psml&max=true&aiz=true>
- Langsdorff, M. (1997). Klimatisierte Großraumbüros sind out: Das einst so moderne Hochhaus der LBS war nach einigen Jahren schon wieder veraltet - Nun ist es saniert worden. *Stuttgarter Zeitung*.

- Mähl, F. (2018). Strategien zur denkmalgerechten Sanierung von Fassaden der Nachkriegsmoderne. In B. Weller & L. Scheuring (Hrsg.), *Denkmal und Energie 2019: Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort* (S. 19–32). Springer Vieweg.
- Mayrhofer, L., Müller, A. & Kranzl, L. (2022). *Maßnahmen zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs im Österreichischen Gebäudebestand*. Graz. 17. Symposium Energieinnovation.
https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazexternal/738639ca-39a0-4129-b0f0-38b384c12b57/files/lf/session_e6/564_lf_mayrhofer.pdf
- McAllister, E. J., Dhurandhar, N. V., Keith, S. W., Aronne, L. J., Barger, J., Baskin, M., Benca, R. M., Biggio, J., Boggiano, M. M., Eisenmann, J. C., Elobeid, M., Fontaine, K. R., Gluckman, P., Hanlon, E. C., Katzmarzyk, P., Pietrobelli, A., Redden, D. T., Ruden, D. M., Wang, C., . . . Allison, D. B. (2009). Ten putative contributors to the obesity epidemic. *Critical reviews in food science and nutrition*, 49(10), 868–913. <https://doi.org/10.1080/10408390903372599>
- Nagler, F., Jarmer, T., Niemann, A., Franke, L., Traub, L., Sack, J., Varga, Z., Ott, S., Diewald, F., Knirsch, A., Auer, T., Gehlen, C. & Winter, S. (2022). *Einfach Bauen: Ein Leitfaden*. Birkhäuser.
<https://doi.org/10.1515/9783035624687>
- Nicol, J. F. & Humphreys, M. A. (1973). Thermal comfort as part of a self-regulating system. *Thermal comfort as part of a self-regulating system*, 1(3), 174–179.
<https://doi.org/10.1080/09613217308550237>
- Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren (Hrsg.). (Oktober 2009). *Energetische Modernisierung und Denkmalpflege*. München.
https://www.stmb.bayern.de/assets/stmi/buw/hochbau/iaa2_energetischesanierung_modernisierung_denkmalpflege.pdf
- Oehler, S. (2017). *Emissionsfreie Gebäude: Das Konzept der „Ganzheitlichen Sanierung“ Für Die Gebäude der Zukunft*. Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16056-2>
- Omrani, S., Matour, S., Bamdad, K. & Izadyar, N. (2021). Ceiling fans as ventilation assisting devices in buildings: A critical review. *Building and Environment*, 201, 108010.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108010>
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.). (2023a). *Maßnahmen zum Energiesparen: Energieversorgung sichern*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/energiesparmassnahmen-2078224>
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.). (2023b). *Zeitalter der Erneuerbare Energien*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/erneuerbare-energien-317608>
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (Hrsg.). (2023c, 24. Februar). *Kohleausstieg und Strukturwandel*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/kohleausstieg-1664496>
- Putz, A., Auer, T., Göttig, R., Grom, R., Koth, S., Rung, H. & Runkel, A. (März 2022). *HochhausBestand: Best Practice im Umgang mit Bürohochhäusern aus den 1950er/1960er Jahren (Zwischenbericht)*. Bonn.
- Rat der Europäischen Union (Hrsg.). (2022, 25. Oktober). „Fit für 55“: *Rat einigt sich auf strengere Vorschriften für die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden*.

- <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2022/10/25/fit-for-55-council-agrees-on-stricter-rules-for-energy-performance-of-buildings/>
- Recknagel, H. (2011). *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2011/2012: Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik* (E.-R. Schramek & H. Recknagel, Hg.) (75. Aufl.). Oldenbourg Industrieverl.
- Reese, R. A. (2005). Boxplots. *Significance*, 2(3), 134–135. <https://doi.org/10.1111/j.1740-9713.2005.00118.x>
- Rissetto, R., Schweiker, M. & Wagner, A. (2021). Personalized ceiling fans: Effects of air motion, air direction and personal control on thermal comfort. *Energy and Buildings*(235), 110721. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110721>
- Rupp, R. F., Kazanci, O. B. & Toftum, J. (2021). Investigating current trends in clothing insulation using a global thermal comfort database. *Energy and Buildings*, 252, 111431. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111431>
- Schellen, L., Loomans, M. G. L. C., Wit, M. H. de, Olesen, B. W. & van Marken Lichtenbelt, W. D. (2012). The influence of local effects on thermal sensation under non-uniform environmental conditions--gender differences in thermophysiology, thermal comfort and productivity during convective and radiant cooling. *Physiology & behavior*, 107(2), 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2012.07.008>
- Schellen, L., van Marken Lichtenbelt, W. D., Loomans, M. G. L. C., Toftum, J. & Wit, M. H. de (2010). Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition. *Indoor air*, 20(4), 273–283. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00657.x>
- Schreiber, L. (2004). Straßenverkehrslärm. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Springer eBook Collection Computer Science and Engineering. Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer.
- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2021). *Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik* (SIA 2024:2021).
- Sedlbauer, K. (2010). *Flachdach Atlas: Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen* (1. Aufl.). Edition Detail. Birkhäuser; Edition Detail. <https://doi.org/10.11129/detail.9783034615648>
- Seiferlein, W. (2019). *Vor- und Nachteile Von Neubau Oder Sanierung Im Bestand: Schnelleinstieg Für Architekten und Bauingenieure. Essentials Ser.* Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Shi, X., Si, B., Zhao, J., Tian, Z., Wang, C., Jin, X. & Zhou, X. (2019). Magnitude, Causes, and Solutions of the Performance Gap of Buildings: A Review. *Sustainability*, 11(3), 937. <https://doi.org/10.3390/su11030937>
- Spätling, V. (2021). *Marktanteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen steigt*. <https://www.bba-online.de/news/marktanteil-von-daemmstoffen-aus-nachwachsenden-rohstoffen-waechst/>
- Stadtwerke München GmbH (Hrsg.). (2023, 8. März). *Geothermie: Den Schatz aus der Tiefe sinnvoll nutzen*. <https://www.swm.de/magazin/energie/geothermie>
- Statista (Hrsg.). (2022, 19. Dezember). *Jährlicher Stromverbrauch eines 1-Personen-Haushalts in Deutschland nach Gebäudetyp im Jahr 2021*.

- <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/558239/umfrage/stromverbrauch-einen-1-personen-haushalts-in-deutschland/>
- Statista (Hrsg.). (2023). *Definition Median*. <https://de.statista.com/statistik/lexikon/definition/85/median/>
- Steger, S., Wilts, H., Bergs, L. & Bergmann, L. (2022). *Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden oder Neubau : ökologische Bewertung hinsichtlich Materialbedarf, Primärenergieverbrauch und damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen ; Endbericht*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7989>
<https://doi.org/10.48506/opus-7989>
- Struck, C., Benz, M., Dorer, V., Frei, B., Hall, M., Moosberger, S., Orehounig, K., Sagerschnig, C. & Menard, M. (2014). „Performance-Gap“ in der Schweiz – Brisanz, Ursachen und Einflüsse auf die Differenz von geplantem Energiebedarf und gemessenen Energieverbrauch in Gebäuden.
- Tadepalli, S., Jayasree, T. K., Lakshmi Visakha, V. & Chelliah, S. (2021). Influence of ceiling fan induced non-uniform thermal environment on thermal comfort and spatial adaptation in living room seat layout. *Building and Environment*. Vorab-Onlinepublikation.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108232>
- Thiel, D. & Riedel, D. (2011). *Typisierte Bauteilaufbauten - Präzisierung der Pauschalwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Bekanntmachung der Regeln der Datenaufnahme im Nichtwohngebäudebestand: Endbericht. Forschungsinitiative Zukunft Bau F: Bd. 2793*. Fraunhofer IRB Verlag.
- Umweltbundesamt. (2018a). *Wie ist der Stand der energetischen Gebäudesanierung in Deutschland?*
<https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/bauen-wohnen/verursacher/energetischer-gebaeudezustand/wie-ist-der-stand-der-energetischen>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2018b, 17. Oktober). *Ökobilanz*.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2019a). *Energiebedarf und CO₂-Emissionen von Gebäuden senken*.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/energiebedarf-co2-emissionen-von-gebaeuden-senken>
- Umweltbundesamt. (2019b, 17. Juni). *Berechnungsgrundlagen Luftqualitätsindex*.
<https://www.umweltbundesamt.de/berechnungsgrundlagen-luftqualitaetsindex>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2021). *Wie funktioniert der Treibhauseffekt?*
<https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-funktioniert-der-treibhauseffekt>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2022a). *Die Treibhausgase*.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>
- Umweltbundesamt (Hrsg.). (2022b, 3. Juni). *Energiesparende Gebäude*.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebaeude#gebaeude-wichtig-fur-den-klimaschutz>
- United Nations. (2016, 4. November). *Paris Agreement*. Paris. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

United States Environmental Protection Agency (Hrsg.). (2022). *Understanding Global Warming Potentials* | US EPA. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

van Marken Lichtenbelt, W., Hanssen, M., Pallubinsky, H., Kingma, B. & Schellen, L. (2017). Healthy excursions outside the thermal comfort zone. *Building Research & Information*, 45(7), 819–827. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1307647>

Verein Deutscher Ingenieure (Juni 2013). *Verbrauchskennwerte für Gebäude: Grundlagen* (VDI 3807).

Warthmann, A., Wölki, D., Metzmacher, H. & van Treeck, C. (2019). Personal Climatization Systems—A Review on Existing and Upcoming Concepts. *Applied Sciences*, 9(1), 35.

<https://doi.org/10.3390/app9010035>

webtotrade GmbH (Hrsg.). (2023, 28. März). *Energieverbrauch von Deckenventilatoren berechnen*.

<https://www.creoven.de/energieverbrauch-von-deckenventilatoren>

Weeber, H. (1966). Hahn-Hochhaus, Stuttgart. *Deutsche Bauzeitung*, 100(4), 263-267, 282.

Anhangsverzeichnis

Anhang A	Annahmen für Gebäudesimulation
Anhang B	Zählerstände des Hahn-Hochhauses aus dem Jahr 2021
Anhang C	Simulationsergebnisse der einzelnen Sanierungsmaßnahmen
Anhang D	Angaben zur Ökobilanzierung

Anhang A – Annahmen für Gebäudesimulation

Die folgenden Annahmen beziehen sich auf den Ist-Zustand

Randbedingungen und Bauteile

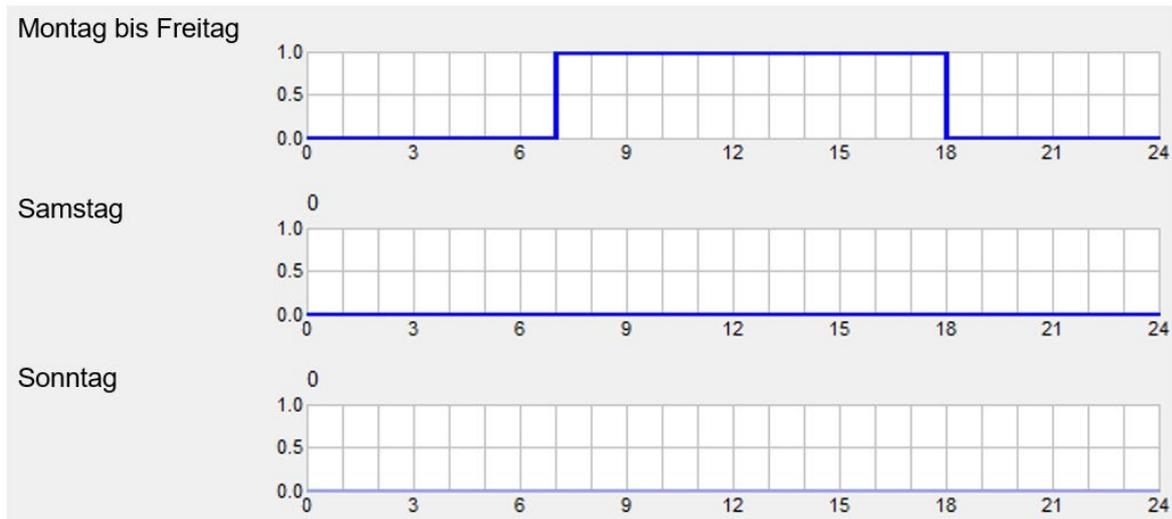
Randbedingungen	Annahme	Quelle
Wetter		
Wetterdaten	Stuttgart 2030, IPCC AR4 B1	<i>Meteonorm</i> Version 7.3.4
Gebäudehülle und Bauteile		
Geschosshöhe	EG: 4,80 m Zwischengeschoss: 3,05 m 1.OG: 3,90 m Restlichen Geschosse: 3,50 m	Bereitgestellte Pläne
Wärmebrückenzuschlag	Außenwand-Decke: 0,3 W/mK Restliche Bauteile: „poor“	Berechnungen und Abschätzungen vom Lehrstuhl für Bauphysik (TUM) (R. Göttig, Persönliche Mitteilung, 26. September 2022): Da die Bewertung der Wärmebrücke Außenwand-Decke (modernisierter Zustand) in <i>IDA ICE</i> als „poor“ (ungünstig in Bezug auf den Wärmeverlust) klassifiziert wurde, wurden die Wärmebrücken an den anderen Bauteilen ebenfalls als „poor“ angenommen.
U-Werte		
Außenwand	1,5 W/m ² K	Bereitgestellte Pläne und Einschätzung Dr. Roland Göttig (R. Göttig, Persönliche Mitteilung, 26. September 2022)
Innenwand	0,6 W/m ² K	Keine Angaben, Annahme aus <i>IDA ICE</i> : Trockenbauwand
Innendecke	1,13 W/m ² K	Bereitgestellte Pläne
Decke gegen Außenluft	1,0 W/m ² K	Keine Angabe, Annahme (Thiel & Riedel, 2011)
Dach	2,1 W/m ² K	Keine Angabe, Annahme (Thiel & Riedel, 2011)
Bodenplatte	1,0 W/m ² K	Keine Angabe, Annahme (Thiel & Riedel, 2011)
Fenster	1,9 W/m ² K	Keine Angabe, Annahme (Thiel & Riedel, 2011)
Sonnenschutz		
Anbringung	Außenliegend	Bereitgestellte Pläne
Steuerung	Strahlungsgesteuert: 150 W/m ² für Nord-, Nordost- und Nordwestorientierte Fenster, 200 W/m ² für alle anderen Orientierungen	DIN 4108-2:2013-02, 8.4.2 j) (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)
fc-Wert	0,5	DIN 4108-2:2013-02 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)
Interne Lasten		
Personen	Büroräume/Großraumbüro: 10 m ² /Pers. Besprechungsräume: 4 m ² /Pers. Verkehrsflächen und WC: - Teeküche: 4 m ² /Pers.	DIN V 18599-10:2018-09 – Anhang A (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Kleidung	Beim PMV +1 wird min. Anteil an Kleidung getragen (0,5 clo), bei PMV -1 wird max. Anteil an Kleidung getragen (1,0 clo)	DIN EN 16798-1:2022-03 Tabelle NA.3 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)

Tätigkeitslevel	Büro-/Besprechungsräume, Großraumbüro und Teeküche: 1,2 met (sitzende Tätigkeit)	DIN EN 16798-1:2022-03 Tabelle NA.3 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2022a)
Geräte	Büroräume: 15 W/m ² Großraumbüro: 10 W/m ² Besprechungsräume/Teeküche: 1 W/m ²	DIN 18599-10:2018-09 – Anhang A (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Licht	Büro-/Besprechungsräume: 5 W/m ² Verkehrsflächen: 1 W/m ² WC: 2 W/m ² Teeküche: 3 W/m ²	DIN V 18599-10:2018-09 – Anhang A (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Heizung und Warmwasser		
Raumsolltemperatur	Büro: 21 °C	DIN V 18599-10:2018-09 – Anhang A (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Heizung	Treppenhaus: 21 °C	
Nachtsabsenkung	Um 4 K auf 17 °C	DIN V 18599-10:2018-09 – Anhang A (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Heizleistung Radiatoren	EG, 1., 12. und 13. OG: 180 W/m ²	Annahme (Recknagel, 2011)
Heizleistung Konvektoren	2. bis 11. OG: 5.944 W je Heizkörper	www.kampmann.de/hvac/produkte/fan-coils/venkon (Modell: Baugröße: 63, Wandmontage, 2-Leiter, 28 dB)
Warmwasser	(30 Wh/m ² *d) (Flächenbezug ist die Bürofläche)	DIN V 18599-10:2018-09 Tab. 7 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Heizung aus	19. Mai bis 09. September	VDI 3807 (Verein Deutscher Ingenieure, 2013)
Kühlung		
Raumsolltemperatur	Büro: 24 °C	DIN V 18599-10:2018-09 – Anhang A (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Kühlung	Treppenhaus: -	
Kühlleistung Klimasplitgeräte	12. und 13. OG: Büro: 69,6 W/m ² Besprechungsraum: 97,6 W/m ² Verkehrsfläche: 0 W/m ² Teeküche: 0 W/m ² WC: 0 W/m ²	SIA 2024:2021 (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2021)
Kühlleistung Konvektoren	2. bis 11. OG: 2.403 W je Einheit unterhalb jeden Fensters	www.kampmann.de/hvac/produkte/fan-coils/venkon (Modell: Baugröße: 63, Wandmontage, 2-Leiter, 28 dB)
Kühlung aus	09. September bis 19. Mai	VDI 3807 (Verein Deutscher Ingenieure, 2013)
Infiltration und Lüftung		
Infiltration	4,5 h ⁻¹ bei 50 Pa Druckdifferenz	DIN 1946-6:2019-12 Tab. 10 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2019)
Lüftungsart	Nur im 1. OG Lüftungsanlage (volle Kühlfunktion über Zuluft) Zonen mit Außenluftbezug: Natürliche Lüftung (s. u.)	Angabe Facility Manager (S. Magalu, Persönliche Mitteilung, 1. August 2022)
Luftmengen	1.OG Veranstaltungsraum: 10,83 l/(m ² *s) 1.OG Seminarraum: 8,47 l/(m ² *s) Bewegungsfläche: 0 l/(m ² *s) WC: 4,17 l/(m ² *s) Teeküche: 1,94 l/(m ² *s)	DIN V 18599-10:2018-09 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)

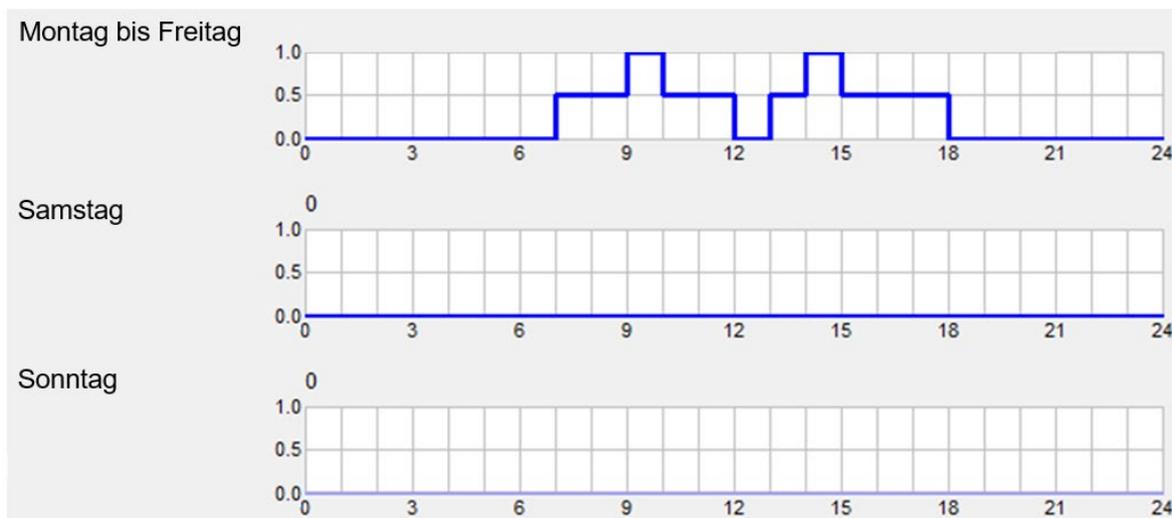
Ablüften	Fenster öffnen, wenn operative Raumtemperatur > 24 °C; Fenster im EG und 1. OG können nicht geöffnet werden	Annahme, abhängig von Raumsolltemperatur in der Kühlperiode (s. o.)
Sonstige Annahmen und Randbedingungen		
Bauliche Verschattung	Angrenzende Gebäude mit jeweiligen Höhen in Modell implementiert	Bereitgestellte Pläne
Feiertage	Nicht berücksichtigt	DIN 4108-2:2013-02 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2013)
Lastprofil in Volllaststunden		
Personen	Bürraum: 6,00 h Besprechungsraum: 4,00 h	DIN V 18599-10:2018-09 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Geräte	Bürraum: 6,00 h Besprechungsraum: 4,00 h	DIN V 18599-10:2018-09 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Licht	Bürraum: 11,00 h Besprechungsraum: 11,00 h Verkehrsfläche: 11,00 h WC: 11,00 h Teeküche: 11,00 h	DIN V 18599-10:2018-09 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Heizung	Gesamtes Gebäude: 13,00 h (Von 5:00 bis 18:00 Uhr mit 2 Stunden Vorlaufzeit)	DIN V 18599-10:2018-09 (Deutsches Institut für Normung e. V., 2018)
Sonnenschutz	Alle Zonen (2. - 13.OG): 11,00 h	Annahme: Während Belegungszeit
Natürliche Lüftung	Alle Zonen (2. - 13.OG): 11,00 h	Annahme: Während Belegungszeit

Lastprofile

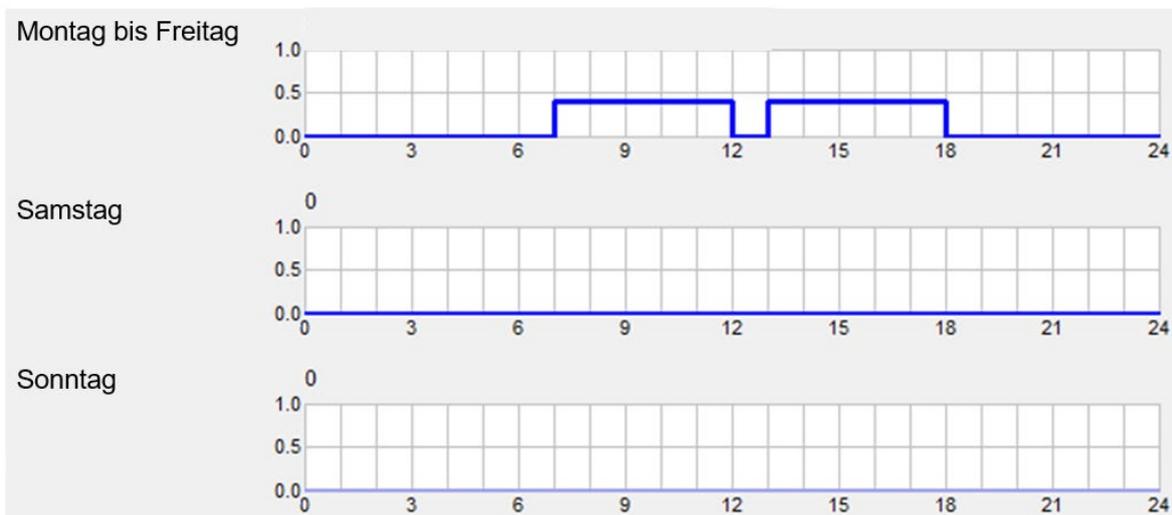
Beleuchtung alle Zonen (11 Volllaststunden)



Belegung und Gerätenutzung in Büroräumen (6 Volllaststunden = 8 h * 0,5 + 2 h * 1)



Belegung und Gerätenutzung in Besprechungsräumen (4 Volllaststunden = 10 h * 0,4)



Zonenflächen und Gebäudeaufteilung

Geschoss	Name	Nutzfläche in m ²	Multiplikator	Gesamtfläche in m ²	Zone
EG	EG Treppenhaus Nord	26,39	1	26,39	1
	EG Eingangsbereich	54,41	1	54,41	2
	EG Fahrstuhl	4,00	29	115,88	3
ZG	ZG Besprechungsraum	44,08	1	44,08	6
	ZG Damentoilette	2,84	1	2,84	7
	ZG Flur	16,01	1	16,01	8
	ZG Herrentoilette	8,90	1	8,90	9
1. OG	1. OG Bar	116,00	1	116,00	10
	1. OG Teeküche	4,83	1	4,83	11
	1. OG Toilette Rollstuhl	6,77	1	6,77	12
	1. OG Treppenhaus Nord	26,38	1	26,38	13
2. OG	2.01	16,73	1	16,73	21
	2.02	19,26	1	19,26	22
	2.03	20,80	1	20,80	23
	2.04	15,58	1	15,58	24
	2.05	25,76	1	25,76	25
	2.06	14,68	1	14,68	26
	2.15	27,81	1	27,81	27
	2.16	31,54	1	31,54	28
	2.17	12,52	1	12,52	29
	2.19	14,23	1	14,23	30
	2.20	24,15	1	24,15	31
6.OG	6. OG Damentoilette	8,55	11	94,03	32
	6. OG Herrentoilette	5,88	11	64,71	33
	6. OG Treppenhaus Nord	23,74	9	213,66	34
	6. OG Treppenhaus Süd	10,91	14	152,74	35
	6.01	15,92	8	127,36	36
	6.02	21,19	8	169,52	37
	6.03	13,49	8	107,92	38
	6.04	10,44	8	83,52	39
	6.05	15,79	8	126,32	40
	6.06	14,48	8	115,84	41
	6.07	20,63	8	165,04	42
	6.17	29,22	8	233,76	43
	6.18	42,98	8	343,84	44
	6.19	23,27	8	186,16	45
6.20	22,40	8	179,20	46	
6.21	23,96	8	191,68	47	
11. OG	11. OG Treppenhaus Nord	23,74	1	23,74	48
	11.01	22,47	1	22,47	49
	11.02	17,64	1	17,64	50
	11.03	19,68	1	19,68	51
	11.04	16,22	1	16,22	52
	11.05	18,03	1	18,03	53
	11.06	17,31	1	17,31	54
	11.16	145,4	1	145,4	55

12. OG	12. OG Treppenhaus Nord	23,74	1	23,74	56
	12.02	23,3	1	23,3	57
	12.03	14,72	1	14,72	58
	12.04	7,13	1	7,13	59
	12.05	12,63	1	12,63	60
	12.06	13,02	1	13,02	61
	12.16	2,88	1	2,88	62
	12.17	25,9	1	25,9	63
	12.18	25,15	1	25,15	64
13. OG	13. OG Treppenhaus Nord	23,72	1	23,72	65
	13.02	29,63	1	29,63	66
	13.03	4,39	1	4,39	67
	13.06	3,23	1	3,23	68
	13.10	15,26	1	15,26	69
	13.12	16,30	1	16,30	70
Insgesamt				3.752,30	70

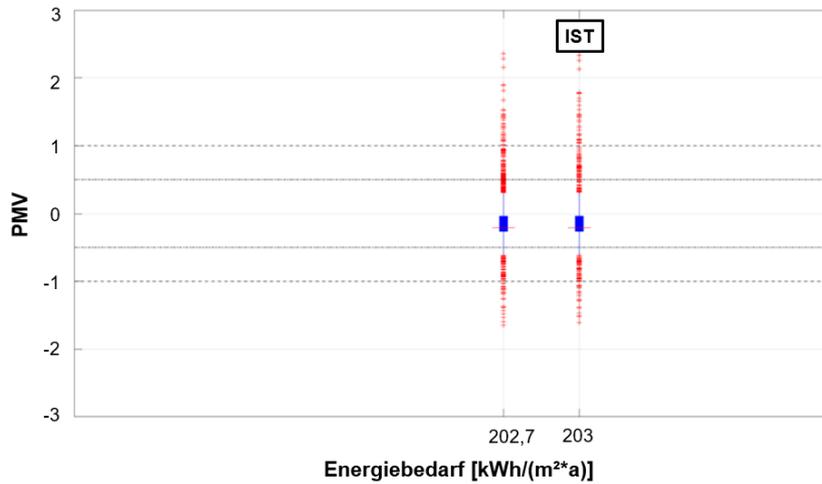
Anhang B – Zählerstände des Hahn-Hochhauses aus dem Jahr 2021

Monat	Energieverbrauch Fernwärme in kWh	Energieverbrauch Strom in kWh
Januar	126.200	130,9
Februar	79.300	93,5
März	74.700	100,8
April	63.900	109
Mai	39.200	88,4
Juni	600	88,8
Juli	1.400	85,6
August	6.000	78,4
September	7.600	87,3
Oktober	44.800	97,2
November	85.100	93,6
Dezember	93.800	89,6
Insgesamt	622.600	1.143,1

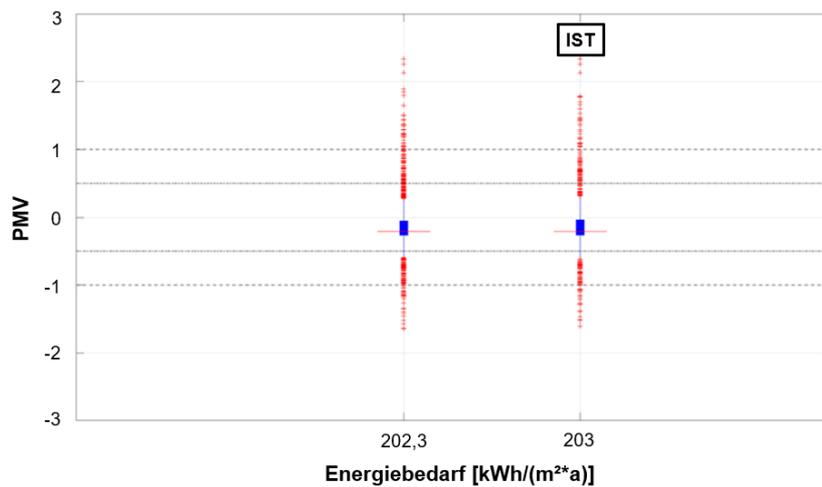
Anhang C – Simulationsergebnisse der einzelnen Sanierungsmaßnahmen

Varianten für die Automatische Nachtlüftung

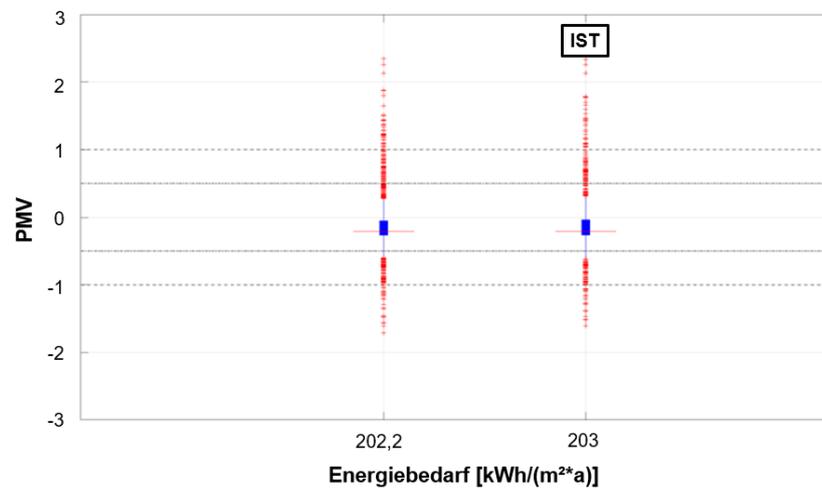
Außentemp. < 15 °C, Innentemp. > 15 °C



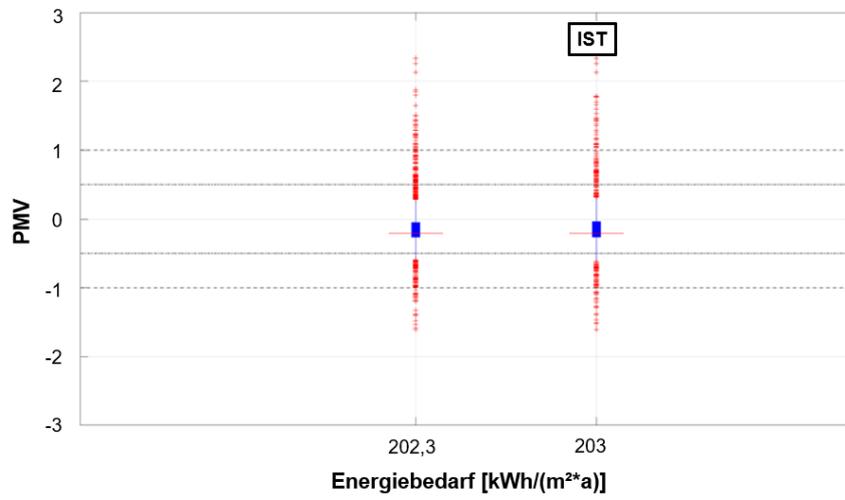
Außentemp. > 10 °C, Innentemp. > 15 °C



Außentemp. > 10 °C, Außentemp. < Innentemp.



Außentemp. > 12 °C, Außentemp. < Innentemp.

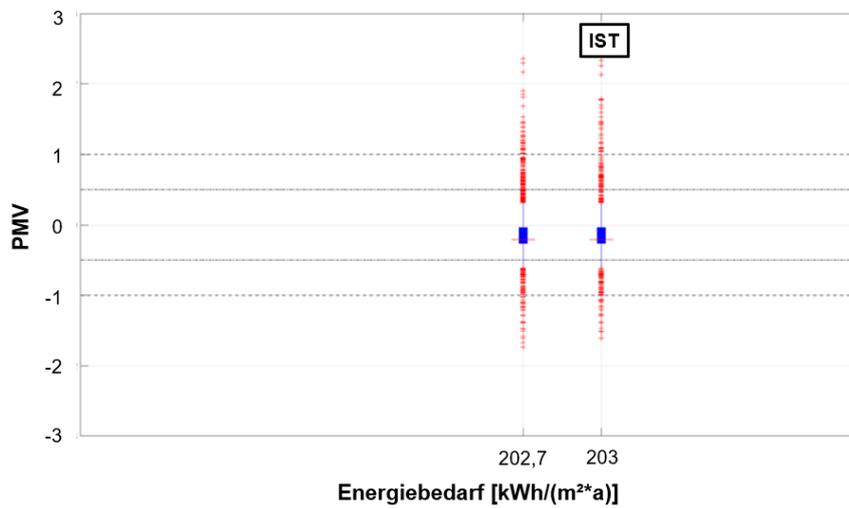


Nach DIN 16798-1:

----- Kategorie II

----- Kategorie IV

Außentemp. < 15 °C, Außentemp. < Innentemp.

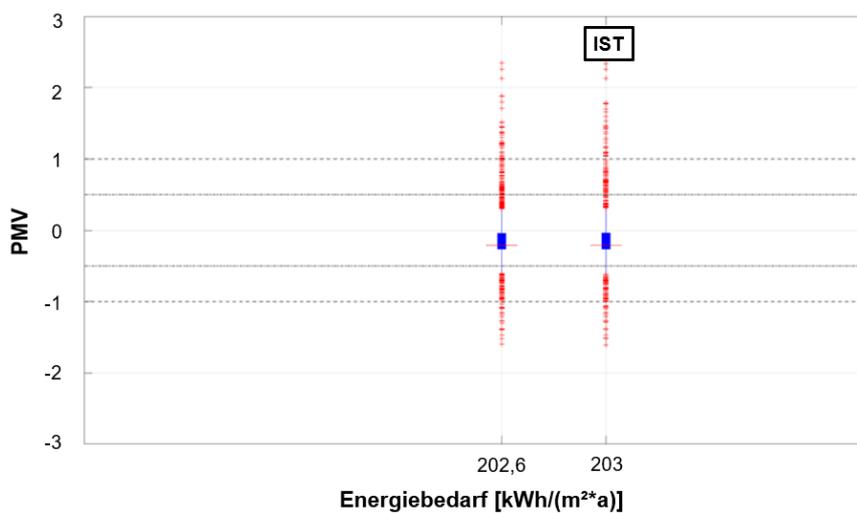


Nach DIN 16798-1:

----- Kategorie II

----- Kategorie IV

Außentemp. > 15 °C, Außentemp. < Innentemp.



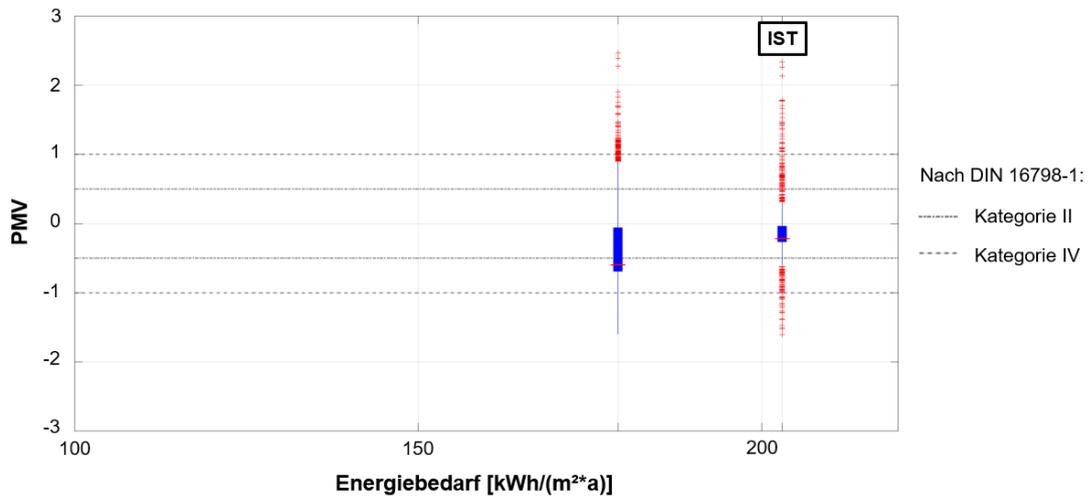
Nach DIN 16798-1:

----- Kategorie II

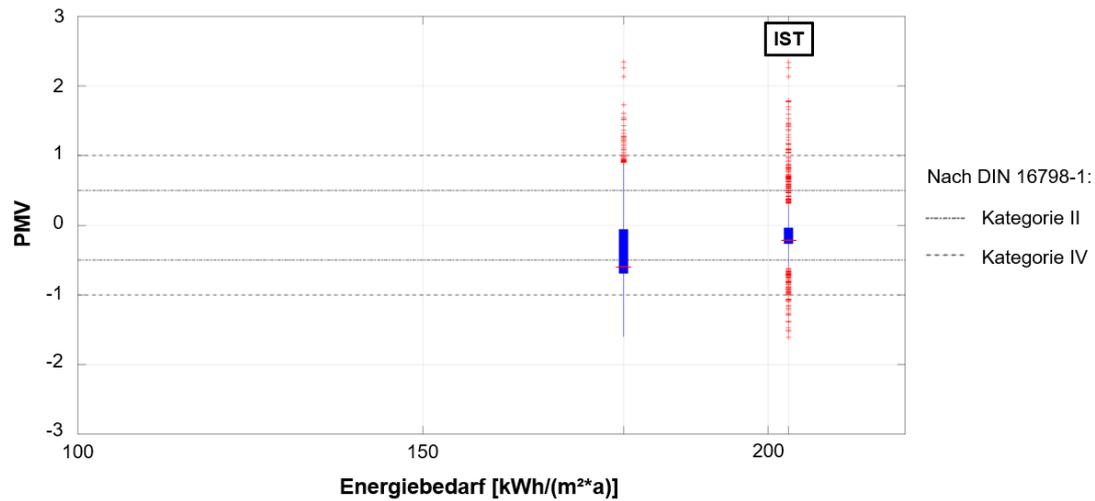
----- Kategorie IV

Varianten für die Geschwindigkeit des Deckenventilators

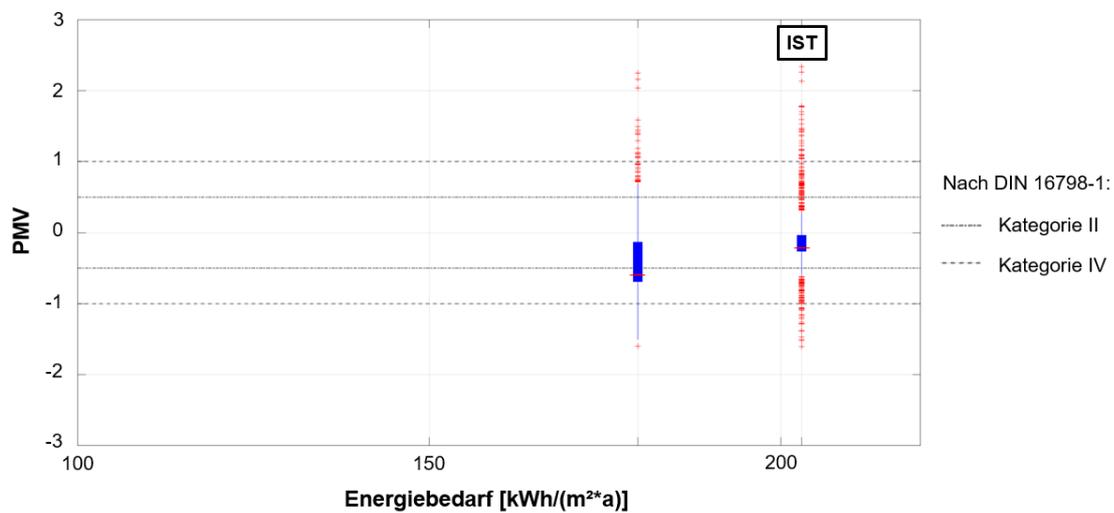
Raumsolltemperaturen: 18 und 28 °C, Deckenventilator: 0,15 m/s



Raumsolltemperaturen: 18 und 28 °C, Deckenventilator: 0,34 m/s



Raumsolltemperaturen: 18 und 28 °C, Deckenventilator: 0,6 m/s



Anhang D – Angaben zur Ökobilanzierung

Sachbilanz auf Produktebene

Produkt	Bauteilzuordnung	Menge	Einheit
WDVS Außenwand	Außenwand	1914,12	m ²
Fenster	Fenster	1317,87	m ²
Regelungstechnik Automatische Nachtlüftung (in jedem Fenster ab dem 2. OG)	Fenster	175	Stück
WDVS 2. OG Boden gegen Außenluft	Boden gegen Außenluft	112,39	m ²
Deckenventilator (in jedem Büro und Besprechungsraum) (Stromverbrauch von 35 W (webtotrade GmbH, 2023))	Innenausstattung	107	Stück
Kiesschüttung	Dach	365,02	m ²
Dachabdichtung	Dach	365,02	m ²
Trennschicht oberhalb der Dämmung	Dach	365,02	m ²
Dämmung	Dach	365,02	m ²
Dampfbremse	Dach	365,02	m ²
Bitumenschicht	Dach	365,02	m ²

Sachbilanz von Strom und Fernwärme (jährlich)

Variante	Strombedarf in kWh	Fernwärmebedarf in kWh
Ist-Zustand	150.093,58	611.743,9
Nicht invasiv	56.058,7	451.548,5
Nicht invasiv und Nutzerkorrektur	55.194,7	412.318,3
Kombination Dämmungen	157.787,7	336.499,7
Nicht invasiv und Dämmung Dach	55.543,87	410.302,7
Nicht invasiv und Dämmung Dach und Nutzerkorrektur	54.597,9	370.584,9
Invasiv	51.355,55	227.327,8
Invasiv und Nutzerkorrektur	50.560,7	197.432,9

Nutzungsdauer der in der Bilanzierung verwendeten Produkte

Produkt	Nutzungsdauer	Ersatz in 40 a	Quelle
WDVS Außenwand	40	0	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
Fenster	50	0	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
Regelungstechnik Automatische Nachtlüftung	20	1	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
WDVS 2. OG Boden gegen Außenluft	40	0	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
Deckenventilator	12	3	ÖKOBAUDAT
Kiesschüttung	30	1	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
Dachabdichtung	30	1	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
Trennschicht oberhalb der Dämmung	30	1	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
Dämmung	>50	0	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
Dampfbremse	40	0	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)
Bitumenschicht	30	1	BNB Nutzungsdauern von Bauteilen (2017)

GWP₁₀₀-Werte der bilanzierten Produkte

Produkt	Datensatz	Quelle	Funkt. Einheit (FE)	GWP A1-A3 in kg CO ₂ -Äq./FE	GWP B in kg CO ₂ -Äq./FE
WDVS Außenwand	WDVS mit EPS geklebt und gedübelt	ÖKOBAUDAT	m ²	20,07	-
Fenster	Fenster - heroyal-Johann Henkenjohann GmbH & Co. KG - W72 / W65 Aluminiumfenster	ÖKOBAUDAT	m ²	173	-
Holzfenster (Sensitivitätsanalyse)	Holzfenster	EPD HAMA	m ²	38	-
Regelungstechnik Automatische Nachtlüftung	Elektrische Steuerzentralen und pneumatische Ventile für Lüftungsanlagen	EPD Stürmann	Stück	21,3	-
WDVS 2. OG Boden gegen Außenluft	WDVS mit EPS geklebt und gedübelt	ÖKOBAUDAT	m ²	20,07	-
Deckenventilator	Lüfter dezentral (Wand Decke) 60 m ³ /h	ÖKOBAUDAT	Stück	4,087	-
<i>Dach (von außen nach innen)</i>					
Kiesschüttung	Kies 2/23 (kg umgerechnet in m ² mit Schüttdichte von 1,78 t/m ³ und 10 cm Schüthöhe)	ÖKOBAUDAT	m ²	0,508	-
Dachabdichtung	Bitumenbahnen G 200 S4 (Dicke 0,004 m)	ÖKOBAUDAT	m ²	2,475	-
Trennschicht oberhalb der Dämmung	PE-Noppenfolie zur Abdichtung (Dicke 0,00125 m)	ÖKOBAUDAT	m ²	4,089	-
Dämmung	Dämmplatte mit Neopor® Plus	ÖKOBAUDAT	m ²	9,518	-
Dampfbremse	Dampfbremse PE (Dicke 0,0002 m)	ÖKOBAUDAT	m ²	0,3994	-
Bitumenschicht	Bitumenbahnen G 200 S4 (Dicke 0,004 m)	ÖKOBAUDAT	m ²	2,475	-
<i>Strom</i>					
Strom 2023-2030	Strom-Mix 2020	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,5894
Strom 2030-2040	Strom-Mix 2030	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,5028
Strom 2040-2045	Strom-Mix 2040	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,4136
Strom Windkraft	Strom aus Windkraft	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,01048
Strom Wasserkraft	Strom aus Wasserkraft	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,00595
Strom Durchschnitt über 40 Jahre	Eigene Berechnung (Annahme: Ab 2045 Strom nur noch aus erneuerbaren Energien nach EEG (50% Windkraft und 50 % Wasserkraft, für Solarenergie keine Daten vorhanden)	-	kWh	-	0,2842
<i>Fernwärme</i>					
Steinkohle	Fernwärme aus Steinkohle	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,2841
Abfall	Fernwärme aus Abfällen	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,2175
Erdgas	Fernwärme aus Erdgas	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,1478
Heizöl	Fernwärme aus Heizöl (leicht)	ÖKOBAUDAT	kWh	-	0,1888
Fernwärme Durchschnitt über 40 Jahre	Eigene Berechnung mit Angaben der EnBW Stuttgart (Annahme: Keine Steinkohle mehr ab 2038 nach dem Kohleausstiegsgesetz, die anderen Anteile nehmen ab dann zu)/ Ausstieg bereits 2030 (Sensitivitätsanalyse)	-	kWh	-	0,2078 / 0,1984