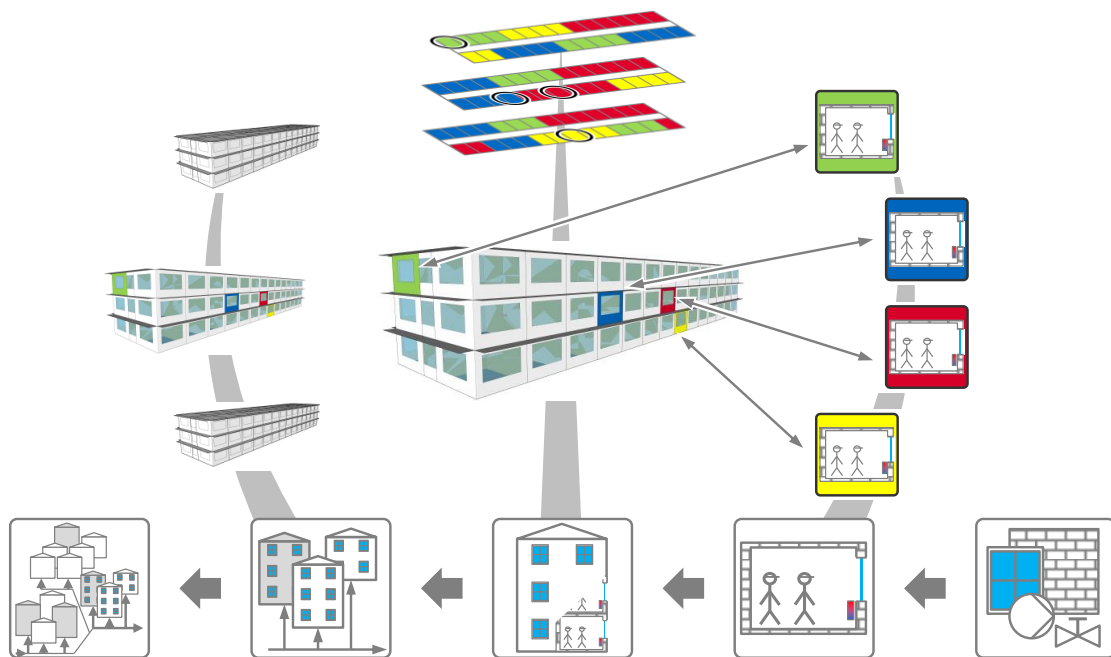


Technische Universität München
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
Prof. Dr.-Ing. Werner Lang



Dissertation

Die Referenzraummethode als eine vereinfachte Bewertung komplexer Liegenschaften im Quartier am Beispiel von Hochschulen

René Marcel Regel

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN



Fakultät für Architektur

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Die Referenzraummethode als eine vereinfachte Bewertung komplexer
Liegenschaften im Quartier am Beispiel von Hochschulen

René Marcel Regel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Thomas Auer

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
2. Prof. Dr.-Ing. Werner Jensch
Hochschule München

Die Dissertation wurde am 16.03.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Architektur am 02.05.2016 angenommen.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Hochschule München am Competence Center für Energieeffiziente Gebäude und am Kooperativen Graduiertenkolleg Gebäudetechnik und Energieeffizienz. Basis dieser Arbeit sind die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsvorhaben „Die Hochschule auf dem Weg zu einem energieeffizienten Gebäudebetrieb“ (FKZ: 0327470A) und „Energieeffiziente Hochschule - Campus Information Modeling“ (FKZ: 03ET1176A).

An dieser Stelle möchte ich all denen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zuerst gilt besonderer Dank meinen beiden Doktorvätern. **Prof. Dr. Werner Jensch**, vielen Dank, dass Sie diese Reise mit mir unternommen haben. Besonders schätze ich die mir gebotenen Möglichkeiten und geschenkten Freiräume, die es mir erlaubten meine Ideen unter Ihrem kritischen Auge weiter zu entwickeln. **Prof. Dr. Werner Lang**, vielen Dank, dass Sie in mir das Potenzial sahen, diese Arbeit erfolgreich abzuschließen. Die gemeinsamen Diskussionen waren sowohl sehr hilfreich als auch prägend. Sie weiteten meinen Blick über das eigentliche Thema dieser Arbeit hinaus.

Nicht vergessen werden dürfen die beiden stets unermüdlichen Damen **Jutta Bergmann** und **Veronika Hollaus**. Ihnen gebührt mein Dank. Sie fanden immer wieder freie Stellen in einem doch immer fortwährend voll erscheinenden Terminkalender beider Professoren.

Weiter möchte ich dem gesamten **Team von FORWIN** der Hochschule München und meinen **Kollegen des Graduiertenkollegs** danken. Ebenso vielen Dank an die **Projektteams beider Forschungsvorhaben** für den konstruktiven und stets kritischen Austausch. Zum einen erlaubten sie es mir den Kern meiner Arbeit in vielen unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten. Zum anderen trugen sie in vieler und individueller Art und Weise dazu bei, dass die Arbeit stets mit Freude, Spaß und Unterstützung weiterging.

Herzlichen Dank gilt **Judith Bub** für die sprachliche Korrektur. Noch vielmehr für die regenerativen Auszeiten in der sprachlichen Heimat, weit entfernt von fachlichen Themen. Sie schaffte es immer wieder die verworrenen Gedanken auf Spur zu bringen.

Meinem Kollegen und Freund **Manuel Winkler** möchte ich von ganzem Herzen danken, dass er mit mir die lange Reise bestritt und an mir, einem sachlich kühlen Menschen, auch eine emotionale Seite zeigte.

Herzlichen Dank möchte ich **Sabrina Vetter** schenken. Sie trieb mich in den letzten beiden Jahren maßgeblich dazu an die Arbeit fertigzustellen und zu vielem mehr.

Zu guter Letzt möchte ich meinen Eltern **Elfriede** und **Gerhard** sowie meinem Bruder **Marc** dafür danken, dass sie mich auf meinem Weg immer unterstützen und mich nicht aufgaben.

Kurzzusammenfassung - Short Abstract

Deutsch

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Vereinfachung der energetischen Bewertung von komplexen Liegenschaften mit dem Fokus auf Bestandsgebäude. Als Anwendungsbeispiel dienen Hochschulbauten, die hinsichtlich Baualter, Konstruktion, technischen Lösungen und Nutzungen mit speziellen Anforderungen sehr verschiedenartig sind. In einer energetischen Bewertung sind diese Unterschiede eines Gebäudes zur leichteren Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit zu berücksichtigen. Die bis dato verwendeten Bewertungsverfahren sind entweder nicht in der Lage einen geeigneten Vergleichswert zu bestimmen oder der erforderliche Aufwand zur Bestimmung eines Vergleichswertes ist zu hoch. Hierbei richtet sich die Komplexität der Bewertungswerkzeuge nach den aus der Fragestellung abgeleiteten Anforderungen. Meistens gilt: Je schwieriger eine Frage zu beantworten oder eine Anforderung nachzuweisen ist, desto komplexer ist meist das Werkzeug zur Bewertung.

Die hier eingeführte Referenzraummethode wurde dahingehend entwickelt, dass sie den energetischen Gebäudecharakter nachbildet und zugleich statistische Verfahren, wie z.B. die Monte Carlo Simulation, einbindet, die eine fundierte Analyse und Bewertung der Ergebnisse erlauben. Der Prozess ist auf hohe Ausführungsgeschwindigkeit ausgelegt und erlaubt eine hohe Skalierbarkeit bei adäquater Genauigkeit. Die energetische Gebäudebewertung in der Referenzraummethode setzt auf die Verwendung von 1-Zonenmodellen, die unabhängig voneinander berechnet und anschließend in einem Korrekturverfahren, unter Beachtung der Flächenanteile und Orientierungen, summiert werden.

In drei Studien wird die Einsatzqualität der Referenzraummethode gegenüber einem detaillierten Gebäudemodell vorgestellt und verbessert. Als Erstes wird gezeigt, dass sich das Konzept der Referenzraummethode mit dem Fokus auf Einzelräumen für eine Gebäudebewertung eignet. Als Zweites werden anhand ausgewählter Beispiele für Raumnutzungen wichtige Einflussgrößen auf den Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen beschrieben. Daraus folgt, dass in einer Bewertung die aus einer Nutzung resultierenden Effekte unbedingt zu beachten sind. Final wird an drei Case-Studies ein praxisnaher Einsatz bewertet. Im Vergleich zur Gebäudesimulation mit detaillierten Gebäudemodell erreicht die Referenzraummethode eine ähnliche Genauigkeit in den Ergebnissen und in der Beschreibung des energetischen Gebäudeverhaltens. Gegenüber der detaillierteren Gebäudesimulation benötigt die Referenzraummethode einen deutlich geringeren Zeitbedarf in den Berechnungen. Rückmeldungen über die Auswirkungen der Eingaben auf das Ergebnis oder die Diskussion der Ergebnisse sind schneller möglich.

Mit Hilfe des modularen Aufbaus kann die Referenzraummethode einerseits flexibel auf die bauliche und technische Vielfalt sowie auf die Vielzahl an Nutzungsarten reagieren. Andererseits kann

sie einen individuellen Gebäudenutzenergiebedarf bestimmen und eröffnet die Möglichkeit auch unterschiedliche Dimensionen (Raum-Gebäude-Quartier) in der Bewertung zu adressieren. Das Verständnis über den Zusammenhang zwischen Gebäuden, Gebäudetechnik, Nutzungsarten und resultierendem Energiebedarf erlaubt es, ökonomisch tragfähige Sanierungskonzepte hinsichtlich Energieeffizienz, Energiebedarfsreduktion, Einsatz erneuerbarer Energien und Reduktion des CO₂-Ausstoßes präziser aufeinander abzustimmen. Die Referenzraummethode bietet somit die Chance ökonomische und ökologische Belange einfach miteinander zu verbinden und den ersten Schritt zu einer energetischen Gebäudebewertung zu erleichtern. Je mehr Gebäude bewertet werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch Maßnahmen umgesetzt werden, und desto größer sind folglich die positiven ökologischen und ökonomischen Auswirkungen.

English

The thesis deals with the simplification of an energy assessment of complex buildings. The primary focus is on the building stock, especially on the building stock of universities. University buildings are highly diverse according to age, construction systems, HVAC-systems and certain requirements of different types of occupancy. An energy assessment of a building has to include its unique characteristics in order to achieve higher comparability and traceability. So far, commonly used methods are barely able to provide an appropriate benchmark to compare with, or the necessary effort to generate a specific benchmark is too high. Thereby, the complexity of an energy assessment depends on the requirements derived from the topic under investigation. For the most part, the more difficult it is to answer a certain question or prove a requirement, the more complex the method of the assessment.

The introduced "Referenzraummethode" has been developed to model the specific energy characteristics of a building. Furthermore, it includes statistical methods, e.g. Monte Carlo Simulation, to analyze and evaluate the results more reliably. The focus is on a high speed of execution and great scalability, while ensuring adequate accuracy of the results. The approach of the building assessment of the Referenzraummethode is based on the use of one-zone models. They are calculated independently from one another and, afterwards, the results are summarized according to floor space demand and orientation. An adjustment method is implemented to achieve higher accuracy of the results.

Three studies are conducted to compare the performance of the Referenzraummethode to a more detailed building simulation model, which has a geometric model of the building under investigation. The achieved results are used to improve the accuracy and performance of the Referenzraummethode. As a first step, the proof of concept of the Referenzraummethode is shown. Considering single rooms is appropriate to assess the energy performance of a building. As a second step, selected types of occupancy are used to describe the effects of important parameters on the net energy demand of heating and cooling. As a result, energy assessments should include or at least consider the effects

of user behavior. Finally, three conducted case studies demonstrate the applicability. Compared to the common approach, which is based on a detailed geometric model, the Referenzraummethode achieves similar accuracy of the results and behavior of the energy demand of the building. Furthermore, the execution time of the Referenzraummethode is clearly lower. Feedback regarding the effects of input parameters on the results or the discussion of the results itself is available much sooner.

Due to the modular structure of the Referenzraummethode, it is possible to consider the great variety in constructional and technical systems of buildings as well as the wide diversity in types of occupancy. Furthermore, it allows for the generation of a specific net energy demand of the building and it offers the opportunity for an energy assessment that covers different dimensions of scale (room-building-quarter). The knowledge of the interrelationship between the buildings, HVAC-systems, types of occupancy and the resulting energy demand enables us to adjust economically feasible retrofit measures more precisely, taking into account energy efficiency, a decrease in energy demand, the usage of renewable energy and the reduction of CO₂-emission. The Referenzraummethode allows us to connect economic and ecological issues more easily, and to reduce obstacles to the first energy assessment of a building. The more buildings assessed, the higher the opportunity to implement retrofit measures, and the higher the positive economic and ecological impact can be.



Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Kurzzusammenfassung - Short Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Gesellschaftliche und politische Rahmenbedingungen	1
1.2 Quartiere als möglicher Lösungsweg für ökonomische und ökologische Systeme	2
1.3 Charakteristika von Hochschulliegenschaften und ihre Eignung für eine Quartiersbetrachtung	3
1.4 Das Dilemma der Bewertungswerkzeuge und deren Einsatzgebiete: Nutzen-Aufwand-Qualität	5
1.5 Forschungsfragen	8
1.6 Ablauf der Arbeit	9
2 Stand der Wissenschaft	11
2.1 Optimierungsprozess von Gebäuden und Liegenschaften	11
2.1.1 Zu bewertende Anforderungen an heutige Gebäude	11
2.1.2 Die Gebäudebewertung im Kontext des Lebenszyklus	12
2.1.3 Intervalle zur Optimierung von Gebäuden innerhalb ihres Lebenszyklus	13
2.2 Gebäude als komplexe Energiesysteme	18
2.2.1 Übergeordnete Einflussfaktoren auf den Energiebedarf	18
2.2.2 Das Gebäude im klimatischen und städtebaulichen Kontext	19
2.2.3 Einfluss von Gebäudehülle und Design	19
2.2.4 Einfluss der Gebäudetechnik	20
2.2.5 Einfluss der Gebäudenutzung	21
2.3 Bewertung von Gebäuden und Liegenschaften	22
2.3.1 Benchmarking zur Bewertung der Gebäudeperformance	22
2.3.2 Datenbasis quantitativer Verfahren zur Bestimmung der energetischen Qualität	24
2.3.3 Auswahl hinterlegter Modellansätze in den Bewertungsmethoden	27
2.4 Zusammenfassung	29
3 Verwendete Untersuchungsmethoden	31
3.1 Einführung	31

3.2	Statistische Grundlagen	31
3.2.1	Grundlegende Kennzahlen für die Bewertung	31
3.2.2	Multiple Regressionsanalyse zur Vereinfachung komplexer Modelle	35
3.3	Statistische Testverfahren	38
3.3.1	Einführung	38
3.3.2	Interpretation der statistischen Ergebnisse	39
3.4	Eigenschaften von Variablen	40
3.4.1	Wahrscheinlichkeitsverteilung	40
3.4.2	Abhängigkeit von Variablen	41
3.4.3	Unsicherheiten der Informationsquellen	42
3.5	Sensitivitäts-, Unsicherheits- und Risikoanalyseverfahren	44
3.5.1	Angewendete Verfahren auf Basis statistischer Methoden	44
3.5.2	Sensitivitätsanalyse mittels Monte Carlo Simulation	44
3.5.3	Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Sensitivitätsindizes	46
3.6	Zusammenfassung	50
4	Methodik der Referenzraummethode	51
4.1	Struktur und Ablauf	51
4.2	Studienaufbau und wichtige Inhalte	54
4.3	Softwarekonzept	57
4.4	Zusammenfassung	60
5	Referenzräume zur Berechnung des thermischen Gebäudenutzenergiebedarfs	63
5.1	Einführung in die Simulation und Rahmenbedingungen	63
5.2	Analyse und Bewertung des Basiskonzepts der Referenzraummethode	67
5.2.1	Bewertung der vorhandenen Abweichung	70
5.2.2	Auswirkungen unterschiedlicher Bandbreiten der Eingangsparameter	76
5.3	Entwicklung und Bewertung der verbesserten Methodik	82
5.3.1	Korrektur über das A/V-Verhältnis	82
5.3.2	Analyse und Bewertung des Korrekturverfahrens	86
5.4	Vergleich der einflussreichen Parameter	90
5.5	Zusammenfassung	91
6	Einfluss von Nutzungsarten auf den Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen	93
6.1	Vorgehen und angesetzte allgemeine Randbedingungen	93
6.2	Nutzungsarten und ihre energetischen Einflussfaktoren	97
6.2.1	Verkehrsfläche	97
6.2.2	Büroähnliche Nutzungen	101
6.2.3	Hörsaal	105
6.2.4	Labor Forschung	113
6.3	Übergeordnete Abhängigkeiten der Einflussfaktoren	119
6.3.1	Einfluss des energetischen Baustandards	119
6.3.2	Einfluss des Fensterflächenanteils	121
6.4	Zusammenfassung	123

7 Einsatzfähigkeit der Referenzraummethode	127
7.1 Rahmenbedingungen	127
7.2 Vergleich und Bewertung der Berechnungsergebnisse	130
7.2.1 Heizenergiebedarf	130
7.2.2 Kühlenergiebedarf	136
7.2.3 Elektrischer Bedarf für Geräte und Beleuchtung	140
7.2.4 Gesamtenergiebedarf	141
7.3 Vergleich und Bewertung der Sensitivitätsindizes	142
7.3.1 Qualitative Sensitivitätsindizes - standardisierte Regressionskoeffizienten	142
7.3.2 Quantitative Sensitivitätsindizes - die Sensitivitätsindizes erster Ordnung	143
7.4 Vergleich und Bewertung der Berechnungszeit	145
7.5 Zusammenfassung	146
8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung	149
8.1 Bewertung der erzielten Ergebnisse und Schlussfolgerung	149
8.2 Limitierungen der Referenzraummethode	152
8.3 Beantwortung der Forschungsfragen	153
8.4 Ausblick	154
Abkürzungsverzeichnis	157
Literaturverzeichnis	159
Abbildungsverzeichnis	171
Tabellenverzeichnis	175
Anhang	179
A Analysedaten der baukonstruktionsabhängigen Parameter	179
A.1 QQ-Plots zur Prüfung auf Normalverteilung	179
A.2 Boxplots der berechneten Heiz- und Kühlenergie	186
A.3 Basisdaten der Regressionskoeffizienten aller Versuchsmodelle	187
A.4 Statistische Testverfahren für die RRM und das Gebäudemodell ohne Korrektur	188
A.5 Statistische Testverfahren für die RRM und das Gebäudemodell mit Korrektur	191
B Analysedaten der Nutzungsparameter	195
B.1 Eingabeparameter der Nutzungen	195
B.2 SI-Werte: Verkehrsfläche	197
B.3 SI-Werte: Büroähnliche Nutzung	199
B.4 SI-Werte: Hörsaal	202
B.5 SI-Werte: Labor Forschung	207
C Analysedaten der Case-Studies	211
C.1 Case-Study 1 - Verwaltungsgebäude mit Server	211
C.2 Case-Study 2 - Verwaltungsgebäude freistehend	213
C.3 Case-Study 3 - Referenzgebäude Zweibund	215
C.4 Testergebnisse der verwendeten statistischen Methoden	217
C.5 Energiebedarfsberechnung für Beleuchtung	222
C.6 Vergleich der quantitativen Sensitivitätsindizes Sample 2	223

C.7	Rangliste der Einflussparameter	223
D	Statistische Methoden - weiterführende Informationen	227
D.1	Verfahren zur Überprüfung einer vorhandenen Normalverteilung	227
D.2	Verfahren zur Überprüfung eines vorhandenen Unterschiedes der Varianz	228
D.3	Verfahren zur Überprüfung eines vorhandenen Unterschiedes des Mittelwertes	229
Glossar		231

KAPITEL 1

Einleitung

1.1 Gesellschaftliche und politische Rahmenbedingungen

Das Verständnis über die Umweltauswirkungen des Menschen ist für ein nachhaltiges Handeln unabdingbar. Hierbei helfen Bewertungsmethoden die Zusammenhänge zu verstehen. Der ökologische Einfluss wird bei der Betrachtung des menschlichen Lebensraums besonders deutlich. Die heute vorhandenen Stadtgebiete verursachen mehr als 70% der weltweiten Treibhausgasemissionen und stehen für ca. 67% des gesamten Primär-Energieverbrauchs [1]. Dabei nehmen Stadtgebiete gerade einmal ca. 1% der Erdoberfläche ein [2]. Klimaschutz findet somit vorwiegend in unseren Städten statt und der Gebäudesektor besitzt hierfür ein beachtliches Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen, Energie und Kosten [3].

Städte bieten bei geeigneten ökonomisch und politisch attraktiven Rahmenbedingungen bemerkenswerte Möglichkeiten, die Energieeffizienz und den Einsatz CO₂-neutraler Technologien deutlich zu steigern. Dabei ist es wesentlich, die Themen des ökologischen Mehrwerts, der eigenen gesellschaftlichen Verantwortung und der eigenen Bedürfnisse gewinnbringend miteinander zu verbinden.[3]

Der eigene Nutzen ist sehr oft mit monetären Verbesserungen verbunden. Daher müssen Konzepte ökonomisch stets tragfähig sein. Eine Abhängigkeit der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit von Energie [4] und ihren Kosten [5] ist bis dato noch gegeben. Für mehr Unabhängigkeit ist es folglich ratsam die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit von den Energiekosten zu entkoppeln. Mögliche Maßnahmen sind die Reduktion des Energiebedarfs, die Steigerung der Effizienz und der Ersatz fossiler durch erneuerbare Energieträger. [6]

Die europäische Politik liefert mit ihren Energiezielen günstige Rahmenbedingungen, wie z.B. der verpflichtende Niedrigstenergiestandard für zukünftige Gebäude [7]. Nationale Verpflichtungen, wie die deutschen Forschungsprogramme, konkretisieren die energiepolitischen Ziele. Es wird bspw. angestrebt, die Treibhausgasemissionen um 20% bis 2020 gegenüber 1990 [8] [9] und um 80% bis zum Jahr 2050 [10] zu reduzieren. Zusätzlich beträgt der geforderte Endenergieanteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch mindestens 20% ab dem Jahr 2020 und 60% ab dem Jahr 2050. Für die Gesamtstromerzeugung ist ein Anteil erneuerbarer Energien von mindestens 80% gefordert [10].

Die energetischen Maßnahmen sind nicht nur auf Neubaumaßnahmen anzuwenden, sondern auch auf den Gebäudebestand. Als besondere Herausforderung gilt es eine Balance zwischen lokaler

Baukultur, energetischen Aspekten, funktionalen und gesetzlichen Anforderungen zu finden. Grundsätzlich sind bestehende Gebäude durch die hierin gebundene Energie ökonomisch wertvoll. Eine wirtschaftlich sinnvolle Ausweitung der Gebäudenutzungsdauer durch eine gezielte Weiterverwendung, Modernisierung oder Umnutzung kann zu einer Ressourcenschonung und Umweltentlastung führen [11].

Hierfür sind zum einem Verfahren erforderlich, die Prozesse und Qualitäten angemessen abbilden und bewerten können. Zum anderen sind Beispiele notwendig, die eine große bauliche Vielfalt besitzen und deren Ergebnisse auf andere Dimensionen skalierbar sind. Das städtische Quartier scheint hierfür eine vielversprechende Lösung zu sein.

1.2 Quartiere als möglicher Lösungsweg für ökonomische und ökologische Systeme

Ein städtisches Quartier eignet sich unter anderem durch seine Größe, Struktur und bauliche Vielfalt die ökologischen und ökonomischen Sachverhalte angemessen zu beschreiben und zu bewerten. Eine Zerlegung der Struktur Stadt in kleinere Teile hilft den Zusammenhang leichter zu erfassen (s. Abbildung 1.1). Der Ausgangspunkt ist die größte aus mehreren Teilen bestehende Einheit, die Stadt. Stadtteile besitzen sichtbare Grenzen, wie z.B. bauliche oder versorgungstechnische Strukturen, und können mit statischen Kennwerten beschrieben werden [12]. Die nächst kleinere Einheit ist das Quartier, das aus einer begrenzten Anzahl von Gebäuden hervorgeht. Ein Gebäude setzt sich aus den Bereichen Gebäudehülle, Tragwerk, Technischer Ausbau und Raumgefüge zusammen [13]. Räume und deren Nutzungen beschreiben die Gebäudefunktion. Dabei variieren Nutzungen in den gestellten Anforderungen und der zur Erfüllung notwendigen Anlagentechnik. Als kleinste Einheit kann das Bauteil gesehen werden, aus dem sich Gebäudekonstruktionen, Fassaden, Räume, Anlagen und schließlich das gesamte Gebäude aufbauen.

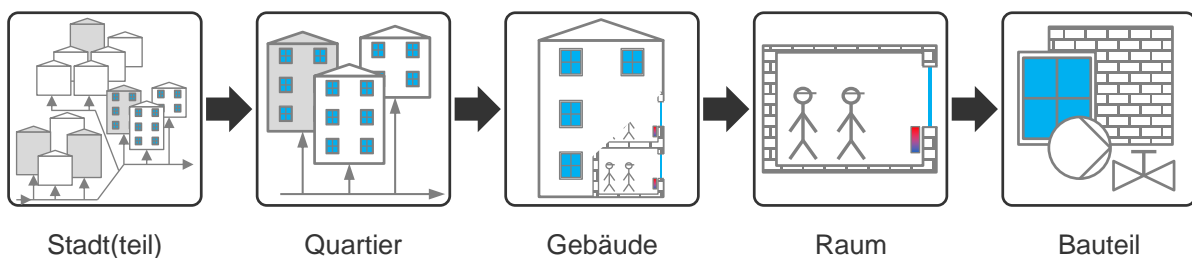


Abbildung 1.1: Betrachtungsraum: Stadt - Quartier - Gebäude - Raum - Bauteil

Eine gleichzeitige Betrachtung der Teile Quartier, Gebäude und Raum ist im Rahmen einer energetischen Bewertung vorteilhaft. Sie ermöglicht Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Bedarfsreduktion in einem größeren Kontext aufeinander abzustimmen. Einerseits können in einem Quartier gesellschaftliche Synergien (z.B. gemeinsames Interesse, gegenseitiger Ansporn) und technische Synergien (z.B. Abwärmenutzung, Energienetze etc.) genutzt werden. Andererseits kann

davon ausgegangen werden, dass größere Einheiten effizienter arbeiten als kleinere oder dass mit weniger Aufwand eine größere Wirkung erzielt werden kann. [12] Zudem können langfristig wirkende Maßnahmen des Städtebaus hinsichtlich eines positiven oder negativen Beitrags zur Klimaneutralität bewertet werden [14]. Da sich ein Quartier aus Gebäuden aufbaut, ist es möglich, die Effekte von technischen Einzelmaßnahmen am und in einem Gebäude mit Sicht auf das Quartier zu bewerten. Hierbei wird der individuelle energetische Charakter eines Gebäudes infolge des Wärmedämmstandards, des Technikeinsatzes und der vorkommenden Nutzungen angemessen abgebildet. Damit ist es auf allen Ebenen möglich, die Auswirkungen auf den Energiebedarf zu erkennen. Deshalb erscheint eine auf Nutzungen basierte Bewertung des Gebäudes vielversprechend für eine Bewertung von Quartieren oder Gebäudeportfolios.

1.3 Charakteristika von Hochschulliegenschaften und ihre Eignung für eine Quartiersbetrachtung

Hochschulen können viele der genannten Aspekte erfüllen. Erstens weisen ihre Liegenschaften quartiersähnliche Strukturen und eine Vielzahl an Gebäudetypen auf. Zweitens spielen statische Eigenschaften, wie Gebäudewärmedämmstandards, vorhandene Anlagentechnologien oder gesetzliche Vorgaben, eine ebenso einflussreiche Rolle wie durch Nutzereinfluss oder Betrieb verursachte dynamische Prozesse. Drittens kann aus einer Vielzahl von Schwachstellen und Verbesserungsmöglichkeiten der Gebäude die Lösung mit dem größten ökonomischen und ökologischen Gesamtpotenzial erkannt werden. Deshalb eignet sich der Gebäudebestand von Hochschulen bestens, die anspruchsvollen Fragen nach Bedarfsreduktion und Effizienzsteigerung aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten und in verschiedenen Dimensionen zu untersuchen.

Bauliche und technische Vielfalt innerhalb einer Hochschule

Gebäude und Liegenschaften der Hochschulen bilden ein komplexes Konstrukt. Zum einen ist der Gebäudebestand wegen den verschiedenen Baukonstruktionen, Fassaden und technischen Anlagen heterogen. Zum anderen sind der Denkmalschutz und die spezifischen Nutzungsanforderungen der einzelnen Lehr- und Forschungsrichtungen angemessen zu beachten. Abbildung 1.2 zeigt beispielhaft die Heterogenität anhand der Flächenverteilung der Ludwig-Maximilians Universität München (LMU) in Abhängigkeit von Baujahr und erwartetem Energiebedarf der Nutzungen. Diese Umstände erschweren eine energetische Typisierung der Gebäude. Daher sind Hochschulen für bau- und energiebezogene Forschungsthemen interessant (s. [15]).

Struktur und Größe

Hochschulen weisen zwei räumliche Strukturen auf. Es gibt entweder einen quartiersähnlichen Hochschul-Campus mit einem Großteil aller hochschulspezifischen Einrichtungen an einem Ort oder eine über die Stadt verteilte Liegenschaftsstruktur. Dabei kann die räumliche Ausbreitung von einzelnen Flächenanmietungen über Einzelgebäude bis hin zu quartiersähnlichen Anordnungen reichen.

Ein weiterer Unterschied besteht in der Gebäudegröße und in einem möglichen Verbund mehrerer Gebäude hinzu größeren Komplexen. Mit der Größe kann die Anzahl der Nutzungen und der technischen Anlagen ansteigen. Daneben kann die Art der Nutzungsverteilung von homogen (wenige und gleiche Nutzungstypen) bis heterogen (viele und verschiedene Nutzungstypen) reichen.

Nutzung und Betrieb

Raumnutzungen besitzen spezifische Anforderungen an das Raumklima, die technische Ausstattung und die Gebäudetechnik. Folglich ist der Energiebedarf verschieden. Anforderungen einfacher Nutzungen (z.B. einfaches Lager, Büro etc.) sind energetisch leichter zu erreichen als die technisch komplexer Nutzungen (z.B. Labor, Tieftemperatur-Lager etc.). Außerdem wirken sich Belegungszeit und aktive Nutzung auf den Energiebedarf aus.

Energiebewusstsein der Hochschulnutzer

Ein starker Einfluss des Nutzers auf den Energieverbrauch ist schon seit mehr als 20 Jahren bekannt [16]. Um den Nutzer viel stärker mit den energetischen Auswirkungen seines Handelns zu konfrontieren, sind neben dem bloßen Informieren viel mehr Maßnahmen zur direkten Verhaltensänderung notwendig. Hierzu zählen bspw. eine Selbstverpflichtung zum Energiesparen zu entwickeln, einen direkten Hinweis zu erhalten, wo man Energie einsparen kann (z.B. Hinweis am Aus-Schalter des Monitors), eine Möglichkeit zum Handeln zu schaffen (z.B. Steckerleisten zum Abschalten der Geräte) oder eine Prämie für das Einsparen von Energie auszuloben. [17] [18] Trotz hoher Aufwände für die Informationsverbreitung und ggf. interner Widerstände scheint auch eine Kostenbeteiligung eine Option zu sein, um das Bewusstsein für einen effizienten Gebäudebetrieb zu schärfen [19].

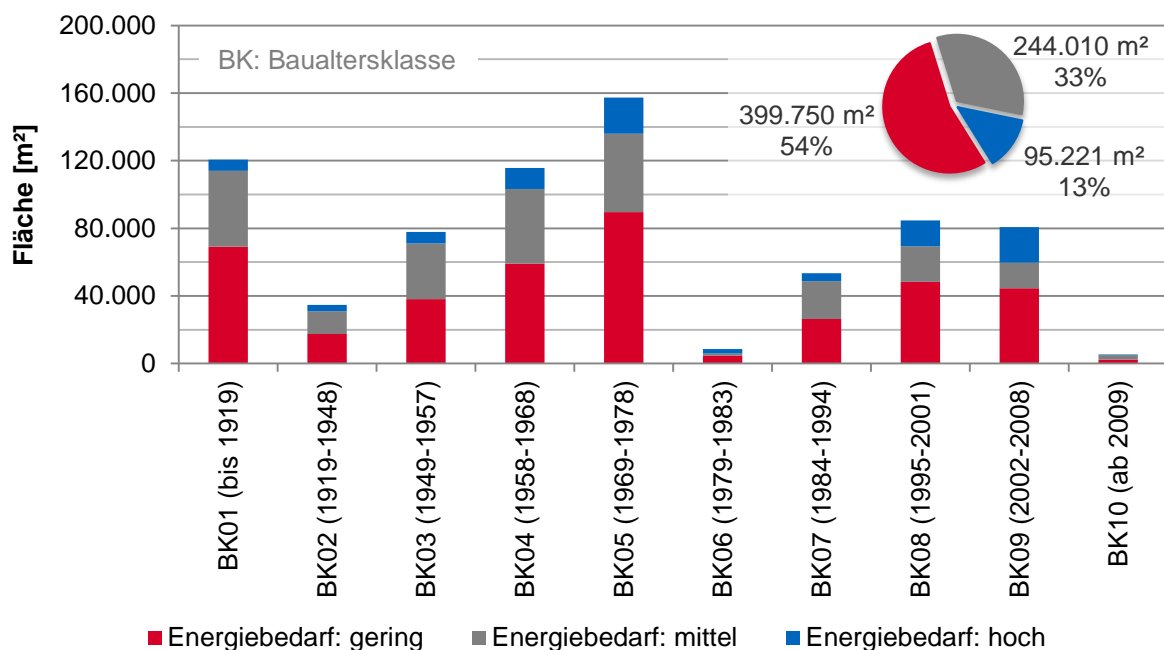


Abbildung 1.2: Energiebedarf der Flächen über die Baualtersklassen am Beispiel der LMU München

Handlungsbedarf durch steigende Energiekosten

Ansteigende Energiekosten belasten die Hochschuletats und erhöhen den Handlungsbedarf. Zusätzlich besteht die Sorge, dass bei Versorgungslücken andere Hochschuletats zweckentfremdet werden könnten [20] [21] [22]. Neben den Baumaßnahmen wird ein energieeffizienter Betrieb immer bedeutsamer. Der weitere Ausbau des Energiemanagements an Hochschulen unterstreicht den erkannten Handlungsbedarf [19], zumal mit Gebäudebetrieboptimierung ein Einsparpotenzial von bis zu 50% im Gebäudebetrieb erreichbar ist [23].

Hochschule - öffentliche Einrichtung mit idealen Voraussetzungen

Hochschulen setzen sich immer häufiger mit der eigenen Position zu Klimaschutz oder nachhaltiger Entwicklung auseinander. Als eine öffentliche Einrichtung mit starkem Publikumsverkehr werden sie als Vorbild im Umgang mit dem Thema Energieeffizienz und deren Verbesserung wahrgenommen [7]. Weiter ist die Verwendung des Leitfadens Nachhaltiges Bauen Pflicht [24], um übergreifend ökologische, ökonomische, soziale, technische und funktionale Aspekte im Gebäudelebenszyklus zu adressieren, zu bewerten und zu kontrollieren [11].

Als gleichzeitiger Eigentümer, Betreiber und Nutzer profitiert eine Hochschule direkt von ihren Investitionen in die energetische Verbesserung ihres Gebäudeportfolios und umgeht das Maßnahmen hemmende Investor-Nutzer Problem [14]. Auch können Hochschulen angemessen die Problematik „Dämmung versus Baukultur“ und „Steigerung der Gebäudeeffizienz versus Wärmebedarfsdichte für Fernwärme“ innerhalb ihrer Liegenschaften behandeln [12]. Deshalb sollte das langfristige Interesse an einem nachhaltigen Gebäude die öffentliche Hand dazu ermutigen auch weniger ökonomisch attraktive Maßnahmen umzusetzen, wenn der ökologische Mehrwert deutlich gegeben ist.

1.4 Das Dilemma der Bewertungswerkzeuge und deren Einsatzgebiete: Nutzen-Aufwand-Qualität

Die Verschiedenartigkeit der Baukonstruktion, der eingesetzten Gebäudetechnologien und der vorhandenen Nutzungen behindern schnelle und einfache Bewertungs- und Optimierungsprozesse für Gebäude und Liegenschaften. Daher sind für die Erkennung von geeigneten Effizienzmaßnahmen Lösungen erforderlich, die einerseits die energetische Gebäudequalität der Gebäudesubstanz und -technik bewerten und andererseits auch die Veränderungsdynamik der Nutzungen eines Hochschulgebäudes angemessen in die Portfoliobewertung mit einfließen lassen können.

Bewertung in der Planung und Betriebsüberwachung

Hierfür existieren Werkzeuge unterschiedlicher Einsatzgebiete, Detaillierungsgrade und Anwendungsschwierigkeiten. Eine schnelle und einfache Verbrauchsbewertung ähnlicher Gebäude bietet das Benchmarking. Der Nachweis gesetzlicher Anforderungen erfolgt mit normativen Verfahren. Komplexe Sachverhalte werden mit leistungsfähigen Lösungen aus der thermischen Gebäude- und Anlagensimulation untersucht. Für Methoden oder Werkzeuge gelten: Je einfacher sie sind, desto schneller

und anwendungsfreundlicher sind sie; gleichzeitig sind sie weniger flexibel und die entnehmbare Informationsmenge ist kleiner. [25]

Hochschulgebäude sind wegen der Beziehung Gebäudehülle-Anlagentechnik-Nutzer für eine Bewertung schwer abbildbar. Sie gehören je nach Gebäudefunktion (z.B. Laborgebäude) zu den am schwersten bewertbaren Gebäuden [26]. Die Unschärfen bei Parametern und Modellen führen meist zu Schwierigkeiten in der Energieanalyse während des Betriebs [27] [28]. Selbst in technisch einfachen Anlagen können kleine Mängel den Energieverbrauch deutlich erhöhen, wie z.B. in der elektrischen Raumbelichtung, wenn Lichter außerhalb der normalen Hauptnutzungszeit des Gebäudes ohne Grund brennen oder wenn sie Flächen unnötig ausleuchten [29]. Deshalb ist die Betriebsüberwachung für einen energieeffizienten Gebäudebetrieb essentiell. Sie beugt dem Verschleiß von Gebäuden und Anlagen vor, kontrolliert die Installation sowie den Betrieb auf Fehler und passt Betriebsparameter an den aktuellen Bedarf an [30].

Definierte Qualitäten zur Bewertung essentiell

Je nach Anwendungsfall variieren Bewertungen in ihrer Breite und Tiefe [31] und somit in ihrer Aussagekraft. In der Bewertung stützt sich die Beschreibung der Qualität eines Neubaus oder eines Bestandsgebäudes, der Vergleich verschiedener Technologien oder die Beantwortung einer Frage stets auf vorher festgelegte Indikatoren. Hierbei sind spezifische Unterschiede angemessen zu berücksichtigen, um eine Nachvollziehbarkeit und damit eine Vergleichbarkeit von Indikatoren und Ergebnissen zu gewährleisten [7]. Darüber hinaus sind die Erwartungen bei der Verbesserung eines Bestandsgebäudes höher als bei einem Neubau, z.B. soll sich die Gebäudeperformance bei identischem Serviceniveau und einwandfreiem Komfort steigern [31]. Generell können die gewonnenen Informationen für Wirtschaftlichkeits-, Unsicherheits-, Sensitivitäts- oder Risikoanalysen eingesetzt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass eine Umsetzung gleichgerichteter Maßnahmen infolge ihrer Interaktionen zu kleineren Gesamteinsparungen als die Summe der Einzelmaßnahmen führt [32].

Strukturierte Bewertung zur Lösung der Komplexität

Eine Gebäudebewertung folgt der grundlegenden Struktur mit Datenerhebung, Modellierung, Berechnung und Interpretation der Ergebnisse. Drei Zusammenhänge sind hierzu hilfreich:

1. Wahl eines geeigneten Werkzeugs hinsichtlich der Fragestellung. Erforderliche Datenmenge und erzielbare Ergebnisqualität sind abhängig vom Werkzeug und dessen Detaillierungsgrad.
2. Bestimmung des Umfangs und der Detailtiefe der geplanten Analyse. Beide definieren den erforderlichen Aufwand an Daten und Zeit.
3. Beachtung von Unsicherheiten in den Modellen und Daten. Unsicherheiten in den Daten können teilweise mit einer größeren Datenmenge oder einer gezielten Untersuchung reduziert werden.

Der Zeitaufwand für eine Bewertung eines Nichtwohngebäudes kann erheblich sein und ist abhängig (vgl. [33]) von Gebäudegröße, Komplexität der Nutzungsstruktur und Anlagentechnik, Qualität der

Unterlagen, verwendetes Bewertungsverfahren sowie Erfahrung des Anwenders. Für die Erstellung eines Nachweises gemäß Energieeinsparverordnung zeigt Abbildung 1.3 einen mittleren zeitlichen Aufwand von ca. 97h und dessen Aufteilung. Hohe Anteile nehmen die Datenerhebung (47%) und die Modellierung (46%) für den Berechnungsprozess ein. Die aus [34] [33] entnommenen Daten zeigen deutlich den Anstieg des Zeitbedarfs in Abhängigkeit von der Gebäudefläche. In einem Gebäudeportfolio erweist sich folglich der Aufwand an Zeit und Kosten für die Erkennung von Gebäuden mit ausreichendem Einsparpotenzial als sehr hoch.

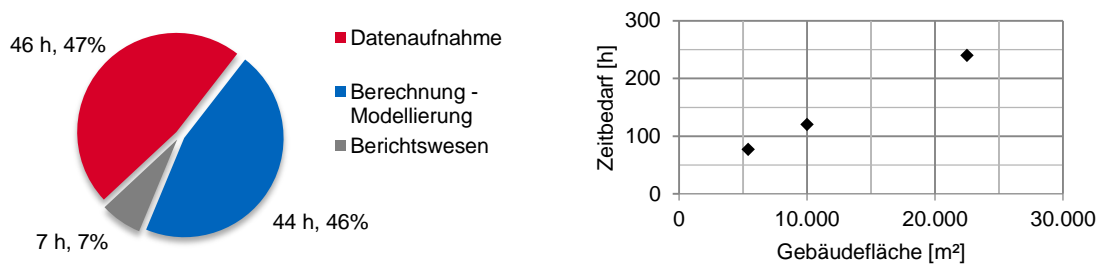


Abbildung 1.3: Mittlerer Zeitbedarf zur Erstellung eines Energiebedarfsausweises (l.) und dessen Abhängigkeit von der Gebäudegröße (r.) (Eigene Grafiken; Datenquelle - links: [34] [35]; rechts: [34] [33])

Schwierigkeiten mit den Bewertungsverfahren

Fundiertes Wissen über die verwendete Methodik und die vorhandenen Einsatzgrenzen ist für eine sichere Anwendung eines Bewertungswerkzeuges und eine entsprechende Interpretation der Ergebnisse erforderlich. Zwar wächst durch stetige Verbesserung und Validierung der Werkzeuge das Vertrauen, dennoch erschweren die große Anzahl spezialisierter Werkzeuge und deren teils komplexe Anwendung den alltäglichen Einsatz. Darüber hinaus sollten Auswirkungen von Annahmen und Vereinfachungen mittels statistischer Verfahren der Sensitivitäts-, Unsicherheits- und Risikoanalyse angemessen berücksichtigt werden. Zugleich führt eine Standardisierung des Berichtswesens zu einem ähnlichen Verständnis aller am Bewertungsprozess beteiligten Personen und steigert die Objektivität der Bewertung von Konzepten sowie die Übertragbarkeit der Ergebnisse.[36]

Die eingesetzten Verfahren sind jedoch meist zeitaufwendig und komplex. Der Anwender kann die hinterlegte Methodik nicht immer leicht nachvollziehen. [37] Teilweise bestehen hohe Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Energiewerten. Daraus entwickeln sich Zweifel an der Gültigkeit der Ergebnisse. [31] Die Abweichungen können durch unvollständige Erfassung der Verbraucherstrukturen, Unterschiede zwischen modelliertem und realem Nutzungsverhalten oder durch energie-ineffiziente Betriebsführung entstehen [38] [39]. Im Vergleich zu Bestandsgebäuden gilt für Neubauten die Simulation in der Vorhersage des Energiebedarfs als besser geeignet. Ein Grund dafür ist die Verfügbarkeit und Anwendung von Daten. Während eines Entwurfsprozesses werden bspw. Gebäude- und Anlagenparameter nach Norm angesetzt, bewusst gewählt oder abgeschätzt, um die Entwurfsanforderungen zu erfüllen. Bestandsgebäude weisen dagegen viele Abstufungen auf, wie Gebäude und deren Anlagen aktuell betrieben werden können; diese Tatsache ist in den

vorhandenen Verfahren nur sehr schwierig abbildbar. [30] Als Folge ist für ein Bestandsgebäude der berechnete Energiebedarf und auch die erwartete Energieeinsparung einer Gebäudesanierung mit hohen Unsicherheiten verbunden. Verfahren zur Unsicherheits- und Risikobewertung sind somit erforderlich. [31]

Die vorangegangene Herleitung zeigt, dass bis dato keine geeigneten Verfahren zur schnellen und fundierten Abschätzung des Energiebedarfs von Nichtwohngebäuden verfügbar sind, die mit wenigen Daten und hohen Unsicherheiten dennoch nachvollziehbare und robuste Ergebnisse liefern.

1.5 Forschungsfragen

Wie die vorangegangene Herleitung gezeigt hat, fehlt es an einer einfach anwendbaren und flexiblen Methode zur schnellen und fundierten Abschätzung des Energiebedarfs komplexer Liegenschaften, um diesen als Vergleichswert in der Portfoliobewertung verwenden zu können. Hieraus ergibt sich für die vorliegende Arbeit als Ziel, die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

- 1. Ist ein statistisches Verfahren für eine Gebäudebewertung auf Basis von Referenzräumen mit wenigen essentiellen Informationen für komplexe Gebäude ausreichend genau, um damit auf eine aufwendige und umfangreiche Gebäudesimulation zur Portfoliobewertung verzichten zu können?**
- 2. Kann eine aussagekräftige Bewertung erfolgen trotz wenigen bzw. nicht vorhandenen Daten und den darin enthaltenen Unsicherheiten?**
- 3. Ist es möglich, eine einfach anwendbare und flexible Methode zur schnellen und fundierten Abschätzung des Energiebedarfs komplexer Liegenschaften zu entwickeln?**

1.6 Ablauf der Arbeit

Zu Beginn erfolgt die Darstellung der Anforderungen bzgl. der Gebäudequalität. Im Anschluss werden die Eigenschaften von Bewertungsverfahren aufgezeigt und schließlich die eingesetzten statistischen Methoden vorgestellt. Darauf aufbauend wird das Grundprinzip der Referenzraummethode (RRM) beschrieben. In einer Machbarkeitsstudie wird das Prinzip der RRM untersucht und verbessert. Die anschließende Analyse von ausgewählten Nutzungsarten liefert wichtige Hinweise zu wesentlichen Einflussfaktoren. Die Diskussion über die Einsatzfähigkeit der RRM anhand von Case-Studies rundet die Arbeit ab. Der Ablauf ist mit seinen Einzelzielen in Abbildung 1.4 dargestellt.

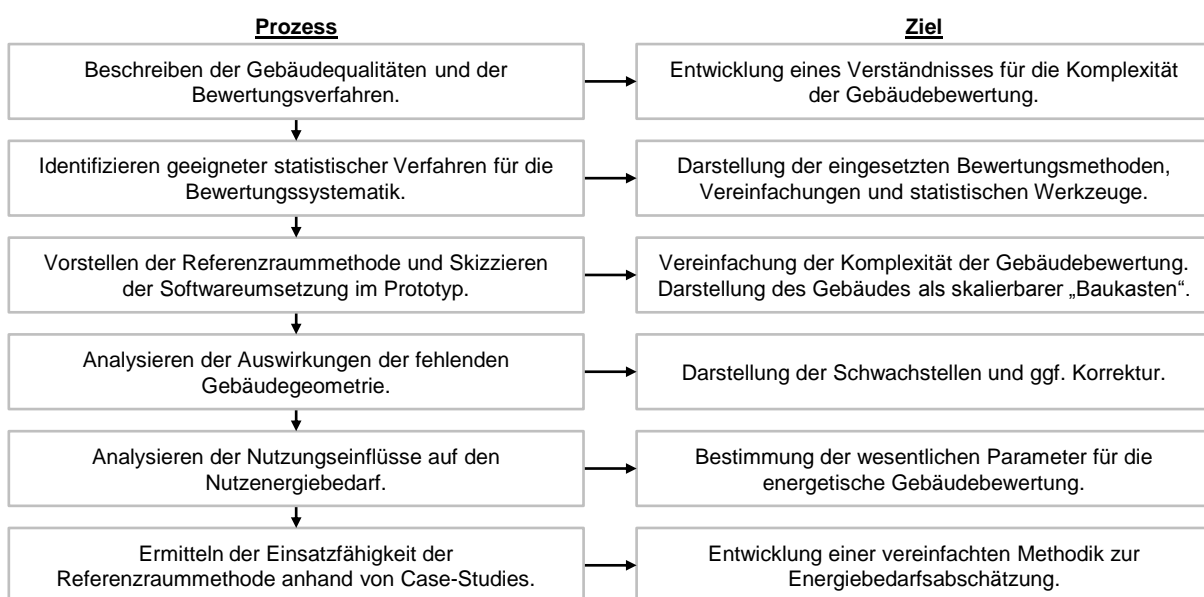


Abbildung 1.4: Ablauf der Arbeit

KAPITEL 2

Stand der Wissenschaft

2.1 Optimierungsprozess von Gebäuden und Liegenschaften

2.1.1 Zu bewertende Anforderungen an heutige Gebäude

Gebäude liegen in einem Spannungsfeld bestehend aus einzuhaltenden Regeln und bewertbaren Qualitätsmerkmalen. Veränderbare Merkmale beschreiben Themen der Ökonomie, Ökologie und Funktion. Nicht bzw. schwer veränderbare Merkmale bilden Gesetze oder lokale klimatische Bedingungen. Aus ihnen entwickelt sich für die Bewertung stets ein individueller Satz an Anforderungen an das Gebäude. [40] Fragen zu dem Gesamtsystem Gebäude und dessen Subsystemen (z.B. System Gebäude - Subsystem Gebäudetechnik - Subsystem Wärmeversorgung usw.) helfen übergeordnete Anforderungen zu ermitteln (in enger Anlehnung an [13]):

Funktion: Für wen mit welchem Nutzen wird das Gebäude/die Anlage gebaut?

System-Aufbau: Wie setzen sich jeweilige Subsysteme aus Komponenten zusammen?

System-Wahl: Wie sind die Subsysteme in das innere und äußere Erscheinungsbild des Gebäudes bzw. in das übergeordnete System integriert?

Ökologie: Welchen Umwelteinfluss besitzen die eingesetzten Systeme bei der Herstellung, Verwendung und Entsorgung?

Ökonomie: Wie beeinflusst die Wahl eines Systems/eines Subsystems die Gesamtwirtschaftlichkeit des Gebäudes/der Anlage/des übergeordneten Systems?

Weiterführende Kriteriensysteme bauen darauf auf und definieren die zu erfüllenden Merkmale. Zum einen sind es Planungs- und Bewertungsansätze wie z.B. das Nachhaltige Bauen, das Gebäude ganzheitlich betrachtet und ökologische, ökonomische, soziokulturelle, technische sowie prozessuale Aspekte berücksichtigt [11]. Zum anderen sind es z.B. Gesetze, die Grenzwerte (Energiebedarf, Transmissionskoeffizienten etc.) oder Mindestanteile (den Anteil erneuerbarer Energien an der Wärme- oder Stromerzeugung etc.) vorschreiben.

Die zwei Subsysteme Gebäudehülle und Gebäudetechnik sind bspw. geeignet, die gestellten energetischen Anforderungen an das Gebäude zu erfüllen. Sie stehen in enger Wechselbeziehung, um auf wechselnde Nutzungsanforderungen oder äußere klimatische Schwankungen reagieren

zu können.[41] Dabei gelten funktionale, konstruktive, gestalterische und ökologische Kriterien als gleichwertig. Erst wenn der Fokus auf dem Wohlbefinden des Nutzers liegt, werden funktionale Kriterien als wichtiger angesehen.[13]

Die Abbildung 2.1 zeigt, wie die gestellten Anforderungen an das Gebäude oder die Anlage in Beziehung stehen. Eine Bewertung kann in mehreren Bereichen erfolgen, um bspw. die energetische Gebäudequalität gegenüber dem Gesetzgeber zu belegen oder um das Technikkonzept mit dem geringsten Umwelteinfluss auszuwählen. Wenn verschiedene technische Konzepte zur Auswahl stehen, stützen sich Vergleichsanalysen (Wirtschaftlichkeit, Umweltauswirkungen, Risiko etc.) unter anderem auf die Ergebnisse der energetischen Bewertung. Diese findet während des Lebenszyklus eines Gebäudes oder einer Anlage mehrmals statt, um einerseits die Objektqualität zu bewerten und andererseits Verbesserungen anzustoßen. Dabei variieren Umfang, Detailtiefe und erzielbare Ergebnisse einer Bewertung sehr stark mit dem Zeitpunkt der Analyse.

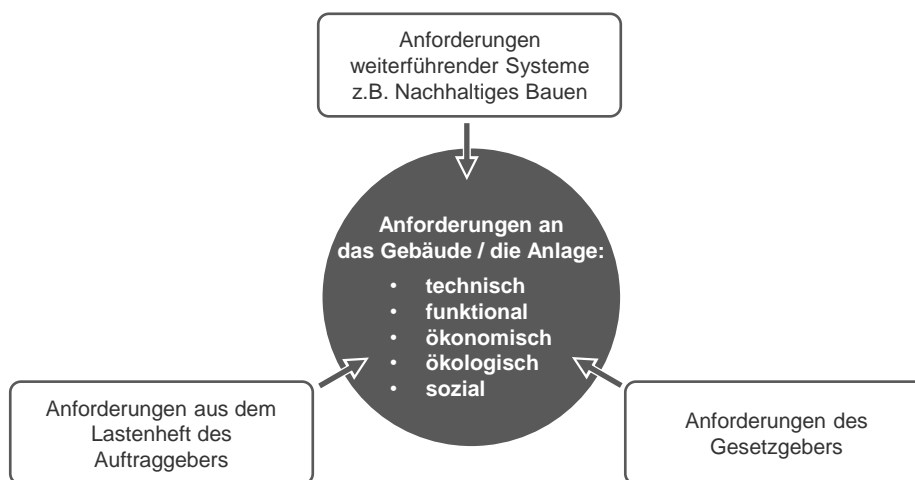


Abbildung 2.1: Anforderungen an ein Gebäude/eine Anlage
(Eigene Grafik; Datenquelle: [11] [42])

2.1.2 Die Gebäudebewertung im Kontext des Lebenszyklus

Die Gebäudebewertung muss sich zum einen den wechselnden Anforderungen der vier Phasen des Gebäudelebenszyklus anpassen und zum anderen mit der unterschiedlichen Qualität und Quantität des Projektwissens und der Informationen zurecht kommen.

In der Planungsphase wird mehrstufig und aufeinander aufbauend das Gebäude gemäß der gestellten Anforderungen entwickelt und bewertet [43]. Die gewählten technischen Lösungen wirken direkt auf die erzielbare Gebäudequalität. Für deren Bewertung helfen objektive Entscheidungsmethoden, die z.B. alle monetär bewertbaren Nach- und Vorteile beachten [44]. Je früher eine Optimierung der Gebäudequalität stattfindet, desto stärker ist das Ergebnis positiv zu beeinflussen; z.B. sind die Gesamtkosten lebenszyklusoptimierter Gebäude geringer, trotz einer moderat teureren Planung (s. [45] zit. n. [11]).

Auch in der Bauphase sollen Planungsänderungen auf ihre ökonomischen und ökologischen Auswirkungen hin bewertet werden. Bereits zur Inbetriebnahme ermöglichen Bewertungswerkzeuge die Definition von Kriterien, die eindeutig nachvollzogen und über die Laufzeit hinweg kontrolliert werden können. Der Prozess bestehend aus Inbetriebnahme, Inbetriebsetzung und Abnahme wird als Commissioning bezeichnet und reicht in den normalen Gebäudebetrieb hinein. Werden die Überwachung und Anpassung der Anlagenparameter in der Nutzungsphase fortgesetzt, spricht man vom Continuous Commissioning bzw. der Betriebsoptimierung. [46] Während der Nutzungsphase sorgen regelmäßige Kontrollen und stete Optimierung der Betriebsparameter für minimale ökonomische und ökologische Auswirkungen bei gleichzeitig hohem Nutzerkomfort [11]. Aus der Betriebsüberwachung können Modernisierungsmaßnahmen mit Unterschieden in Tragweite und Planungsaufwand hervorgehen, z.B. von einer kosten-neutralen Anpassung der Anlagenparameter bis hin zu einer kosten-intensiven Komplettisanierung. Fehlen ökonomisch oder ökologisch sinnvolle Sanierungskonzepte, erfolgt als letzte Phase der Rückbau mit vollständiger Verwertung der Komponenten. Wiederverwertbare Komponenten werden hierbei dem Stoffkreislauf zurückgeführt. Abbildung 2.2 stellt die Zusammenhänge dar und führt zu der Frage: Wie detailliert müssen die eingesetzten Werkzeuge sein, um in den einzelnen Phasen die für die Entscheidung notwendigen Ergebnisse liefern zu können?

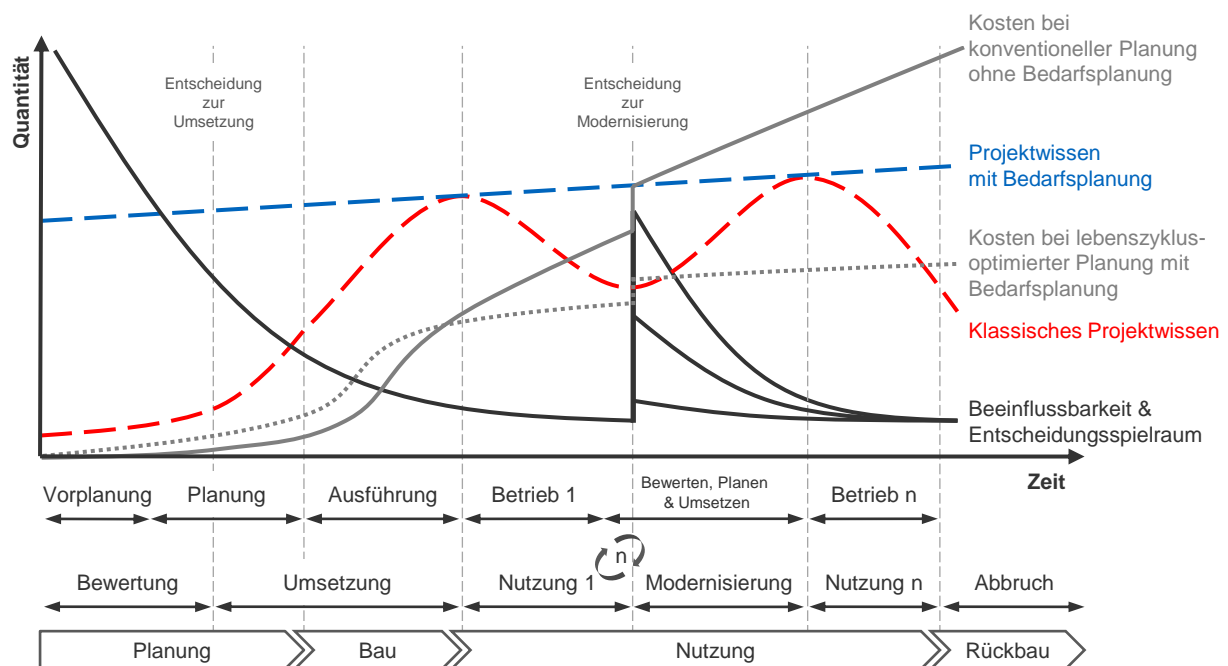


Abbildung 2.2: Gebäudelebenszyklus mit Beeinflussbarkeit und Projektwissen
(Eigene Grafik; Datenquelle: [44], [47], [45] zit. n. [11], [11])

2.1.3 Intervalle zur Optimierung von Gebäuden innerhalb ihres Lebenszyklus

Konzepte werden auf die Anforderungen hinsichtlich Energiebedarf, Umweltauswirkungen, Komfort oder Kosten hin optimiert. Darunter versteht man den Wert einer Zielgröße zu minimieren, maximieren

oder deren Verhalten innerhalb eines definierten Bereichs zu verbessern. Eine Gebäudeoptimierung kann über den gesamten Lebenszyklus hinweg erfolgen. Aussagekraft und Aufwand einer Optimierung unterscheiden sich je nach Zeitpunkt, Fragestellung und eingesetztem Werkzeug. Vereinfachte Modelle werden oft für wesentliche Entscheidungen und sehr komplexe für Detailuntersuchungen eingesetzt.

Optimierung in der Planung und Ausführung mittels Simulation

Innerhalb der Planung eines Neubaus oder einer Sanierung ergeben sich drei Zeitpunkte für eine Optimierung, um einen hinsichtlich der Anforderungen geeigneten und robusten¹ Entwurf zu entwickeln. Diese sind in der Vor-, Entwurfs- und Ausführungsplanung. Der Planungsstand, der dazugehörige Informationsgrad oder die geforderte Planungsflexibilität führen zu unterschiedlichen Detaillierungsgraden des Modells.

Die schrittweise Weiterentwicklung des Modells im Planungsprozess erlaubt dem Planungsteam sowohl flexibel auf die Anforderungen zu reagieren als auch vorhandene Risiken, Unsicherheiten und Sensitivitäten² des Konzeptes zu identifizieren, einzuschätzen und ggf. zu minimieren. Die Abbildung 2.3 zeigt entlang der HOAI-Planungsphasen [43] den Fortschritt der Modelle und deren Einsatzpunkte. Gleichzeitig ist zu sehen, wie der Informationsgrad und die Kenntnis über die Sensitivitäten bei gleichzeitiger Abnahme der Informationsunsicherheiten zunehmen.

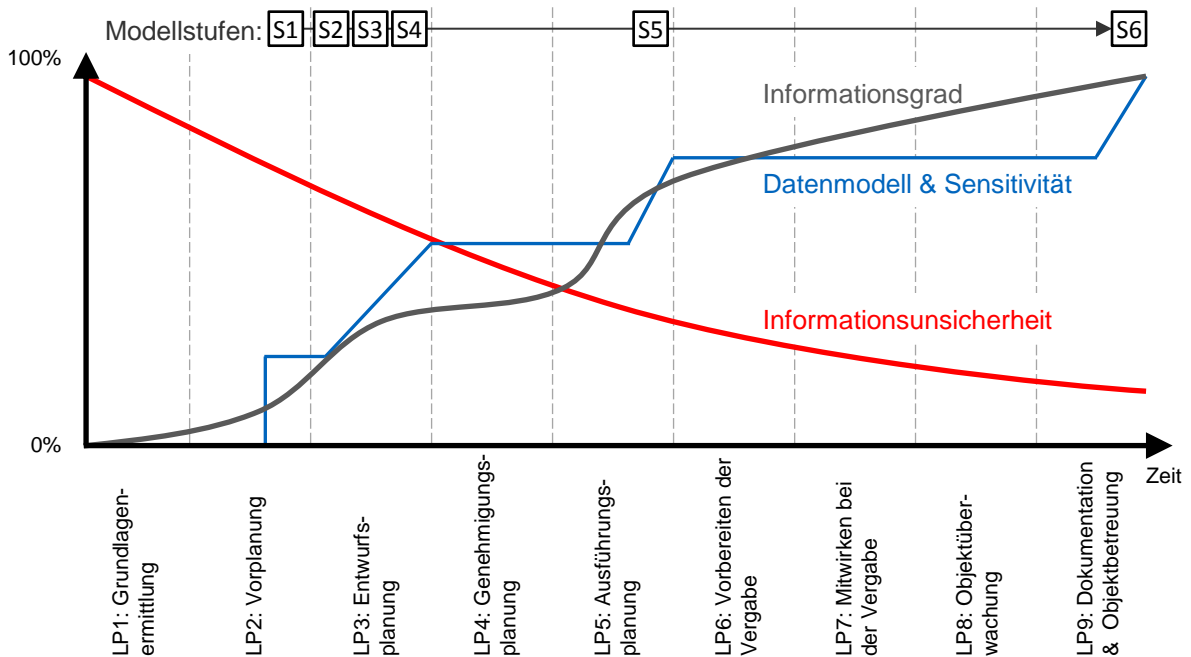


Abbildung 2.3: Optimierungsprozess innerhalb der Planung nach HOAI

¹Der Begriff *robust* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine Zielgröße in einem Versuch gegenüber starken Änderungen einer oder mehrerer Entwurfsparameter nur sehr wenig reagiert [48].

²Sensitivität beschreibt das Maß der Veränderung eines Ergebnisses auf die Veränderung einer Eingangsvariable. Siehe Abschnitt 3.5 ab S. 44

Detaillierungsgrade der Simulationsmodelle

Zur Optimierung wird das Verhalten des Untersuchungsobjektes in ein mathematisches Modell übersetzt und auf Basis ausgewählter Eingangsparameter werden die Veränderungen der Bewertungsgrößen untersucht. Ein typischer Bewertungs- und Optimierungsprozess gliedert sich in die Schritte Datenerhebung, Modellierung mit Berechnung und Auswertung mit Bericht. Der Simulationsprozess ist systematisch und strukturiert. Er kann bei der Entscheidungsfindung helfen, denn er erfordert vom Planungsteam Präzision und rationelles Handeln. [36] Den Entwicklungsprozess der Modelle beschreiben die nach [49] eingeteilten Detaillierungsstufen:

- Stufe 1 (S1): Vereinfachte Gebäudemodelle mit einfachen Berechnungsalgorithmen zur Bestimmung von "Near-Optimal Solutions"
- Stufe 2 (S2): Analyse der besten Lösungen aus S1 mit detaillierten Simulationswerkzeugen, um eine grundlegende Gebäudeform zu bestimmen
- Stufe 3 (S3): Ausbau des Geometriemodells aus S2 zum Detailmodell
- Stufe 4 (S4): Integration der Anlagentechnik in S3 und folgend Entwurfsoptimierung mit geeigneten Simulationswerkzeugen und Methoden
- Stufe 5 (S5): Übertragung relevanter Daten aus der Ausführungsplanung in das Modell S4
- Stufe 6 (S6): Kalibrierung des Modells basierend auf S5 mit Hilfe von Optimierungsmethoden, um es für die Betriebsüberwachung und Diagnose einsetzen zu können

Die erzielten Ergebnisse bedürfen einer Überprüfung. Dabei sind der Einsatzbereich und die Gültigkeitsgrenzen des Modells zu beachten. Darüber hinaus sollte eine Bewertung der Auswirkungen der im Modell und in den Eingabeparametern enthaltenen Unsicherheiten auf das Ergebnis erfolgen. Der dafür notwendige Untersuchungsaufwand steigt mit höherer Detaillierung des Modells mit an. Hierfür kann das Verfahren nach [50] verwendet werden. Es ist komprimiert in Abbildung 2.4 dargestellt. Für die *Modellierung & Berechnung* erfolgt eine Unterscheidung in die Identifikation von Unsicherheiten, die Quantifizierung von Sensitivitäten oder in eine Kombination aus beidem. Sind die vorher definierten Anforderungen erfüllt, kann der Übergang in den Optimierungsprozess erfolgen.

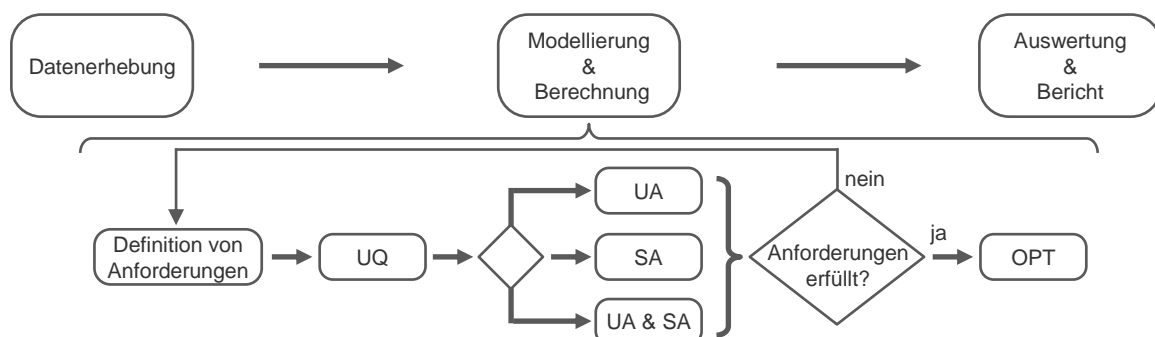


Abbildung 2.4: Empfohlener Arbeitsprozess beim Einsatz von Bewertungswerkzeugen
 UQ = Unsicherheitsquantifizierung, UA = Unsicherheitsanalyse, SA = Sensitivitätsanalyse, OPT = Optimierung; (Eigene Grafik; Datenquelle: [50])

Die Optimierung von Bestandsgebäuden als mehrstufiger Prozess

Die Optimierung von Bestandsgebäuden weckt eine höhere Erwartung hinsichtlich einer gleichzeitigen Kosteneinsparung, Komfortsteigerung sowie Minimierung des Energieverbrauchs und der Umweltauswirkungen [31]. Die Identifikation von Maßnahmen soll zudem effektiv und kostengünstig sein. Dafür ist ein sinnvoller Umgang mit der Vielzahl an verfügbaren Gebäudedaten für die Gebäudebewertung erforderlich. Aus diesem Grund folgt der Optimierungsprozess einem anderen inhaltlichen Aufbau als in der Planung.

Der Optimierungsprozess ist mehrstufig und basiert auf einer Sanierungsstrategie. Die Gebäude- und Quartiersbewertung entwickelt sich schrittweise und bezieht kosten-neutrale bis kosten-intensive Sanierungsmaßnahmen mit ein. Danach folgt die Umsetzung der als geeignet eingestuften Maßnahmen und abschließend die Überprüfung der prognostizierten Einsparungen oder Effekte. [31] Der Umfang der Bewertung ist von den gesetzten Zielen abhängig und kann in vier Stufen nach [51] beschrieben werden:

- Audit-Level 0 (AL0): *Gebäudeportfolio-Screening*
Mittels Energie-Verbrauchsanalyse. Idealerweise 2-3 Jahresbetrachtung der Energieverbrauchswerte, Maximalleistungen, Kosten und Vergleich mit einer geeigneten Vergleichsgruppe.
- Audit-Level 1 (AL1): *Potenzialabschätzung*
Auf Basis von Kurzbegehungen. Auswertung von gebäudebezogenen Energie- und Kostendaten. Kurze und zielgerichtete Begehung zur Identifikation von Maßnahmen mit geringer Investition und Entwicklung einer Prioritätenliste bzgl. des Optimierungspotenzials.
- Audit-Level 2 (AL2): *Grobanalyse*
Für die meisten Gebäude und Maßnahmen geeignete Analyse mit erweiterter Energiedatenerhebung. Analyse der Gebäudeenergiestruktur mit davon abgeleiteter Auflistung von Potenzialen und Kosten typischer Effizienzmaßnahmen. Vorschlag zu Untersuchungen von kostenintensiven Maßnahmen mit hohem Einsparpotenzial.
- Audit-Level 3 (AL3): *Detaillierte Feinanalyse*
Zur Umsetzung größerer Investitionsmaßnahmen. Analyse fokussiert auf in Level 2 identifizierte kostenintensive Maßnahmen mit hohem Einsparpotenzial, die weitere und tiefer gehende Untersuchungen erfordern. Mehr Detailinformationen über Konzeptfindung und Wirtschaftlichkeitsanalyse. Häufiger Einsatz der Gebäude- und Anlagensimulation. Detaillierte Projektkosten und Einsparrechnungen. Bessere Informationslage erweitert das Vertrauen und unterstützt die Entscheidungsfindung.

Ein möglicher Einsatz theoretischer Optimierungsmethoden erfolgt wegen des hohen zeitlichen Aufwands erst später in Audit-Level 3. Als ein weiteres Instrument dienen gezielte Begehungen,

wenn konkrete Anlagen oder Komponenten eindeutig als „ineffizient“ eingestuft werden oder sie „das Ende ihrer Lebensdauer“ erreicht haben. Je nach Tragweite, Komplexität und Anspruch folgt die Untersuchung den Audit-Leveln 1,2 oder 3. [51]

Die Audit-Level geben Umfang, Eignung einer Maßnahme und finanzielles Risiko an. Unter Einbezug der drei genannten Kriterien können z.B. für Bürogebäude drei grundlegende Tragweiten von Sanierungsmaßnahmen beschrieben werden. Die Basismaßnahme Betriebsoptimierung (Commissioning, Continuous Commissioning) erlaubt es, bei minimalem Risiko und Invest Energieeinsparungen von bis zu 25% zu erzielen. Hierbei werden Anlagen und deren Betriebseinstellungen überwacht, regelmäßig an den realen Bedarf angepasst sowie unter energetischen Gesichtspunkten optimiert. Mit gebündelten Standardaustauschmaßnahmen auf Komponentenebene sind Energieeinsparungen von 25-45% erreichbar. Defekte und alte Geräte werden gegen neuere mit höherer Effizienz ausgetauscht. Es handelt sich hierbei um die kosten-effektivsten Maßnahmen mit niedrigstem Risiko-level. Erst tiefgreifende Sanierungskonzepte können höhere Einsparungen von über 45% erzielen. Mit dem Gebäudesystem-Ansatz berücksichtigen sie Maßnahmen aus der Kombination Fassade-Raumbelichtung-Gebäudetechnik und gehen über das Maß des bloßen Austausches hinaus. Folglich sind tiefgreifende Sanierungskonzepte teurer und weisen ein größeres Risiko auf. [52]

Für eine fundierte energetische Optimierung eines Gebäudeportfolios sind Kenntnisse über die einzelnen Gebäude und deren Zusammensetzung hilfreich. Abbildung 2.5 zeigt einen Ansatz auf Basis von individuellen Gebäudevergleichskennwerten, die sich aus den spezifischen Gebäudebedingungen wie Nutzungsanforderungen und technischen Anlageninformationen ableiten. Sie liefern Informationen zu Energiebedarf und -zusammensetzung sowie zu Sensitivitäten. Ein Kennwertvergleich erlaubt es, Gebäude mit Optimierungspotenzial schnell zu erkennen. Die Unterscheidungsmöglichkeiten in den Energiemengen und die Kenntnis über Versorgungsstrukturen helfen bei der Implementierung von übergeordneten zentralen Energieerzeugungs- und Verteilsystemen.

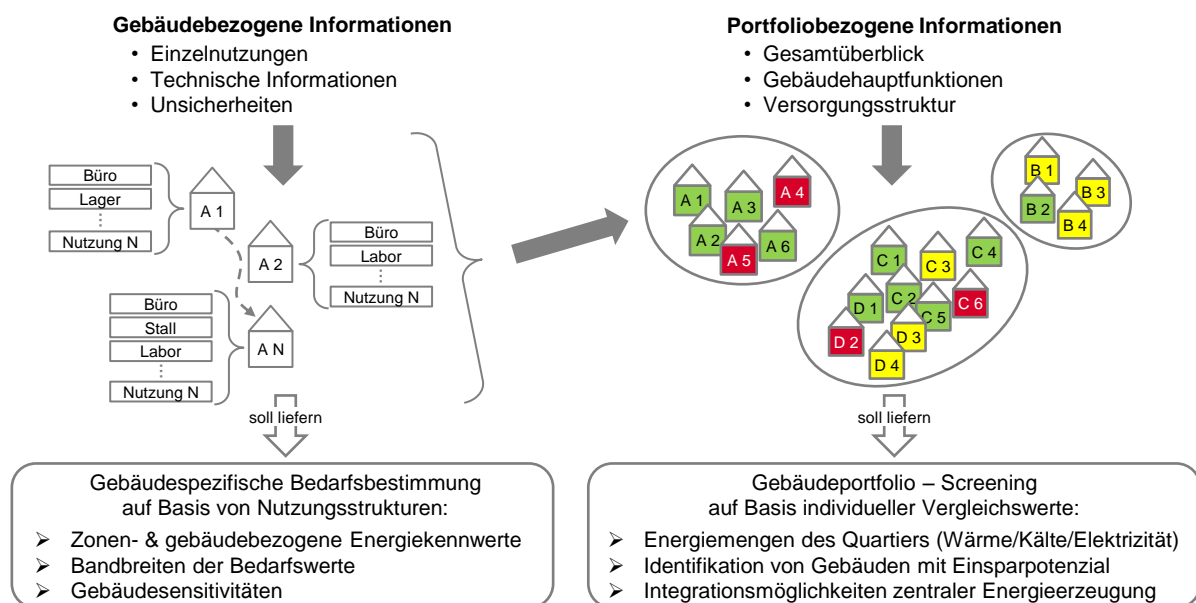


Abbildung 2.5: Qualitäten in der Portfoliobetrachtung auf Basis von Gebäudevergleichskennwerten

2.2 Gebäude als komplexe Energiesysteme

2.2.1 Übergeordnete Einflussfaktoren auf den Energiebedarf

Gebäude haben einen geschichtlichen Hintergrund und sie sind Teil eines interaktiven Systems aus Klima, Standort, Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Gebäudenutzer. Sie prägen nachhaltig ihr Umfeld sowohl durch die Entwicklung einer eigenen Identität als auch durch deren Einbezug der vorhandenen Baukultur und Bausubstanz sowie des lokalen Erscheinungsbildes [11]. Gebäude wirken unterschiedlich auf ihre Umwelt und Umgebung. Mit der Planung werden die Grundlagen für den Ressourceneinsatz für Bau, Betrieb und Entsorgung definiert. Über den Standort werden die Möglichkeiten für Wohnen, Arbeiten, Konsum und Mobilität bereitgestellt. Je mehr Interaktionen in einer Bewertung zu berücksichtigen sind, desto schwieriger wird es ein Gebäude als Ganzes zu verstehen. Hierzu bedarf es leistungsstarker Werkzeuge, die in der Lage sind, Qualitäten aus verschiedenen Themenbereichen adäquat ins Verhältnis zu setzen.

Die Verbesserung der energetischen Gebäudeperformance auf Basis erneuerbarer Energien ist ein Beispiel dafür. In der solaren Architektur bilden die Interaktionen zwischen Gebäude und solarem Angebot ein komplexes Energiesystem, weshalb die Qualität energiesparender Konzepte häufig nur mittels geeigneter Simulationswerkzeuge fundiert entwickelt und bewertet werden kann [53]. Die energetische Gebäudeperformance wird nach [39] hauptsächlich durch die in Abbildung 2.6 dargestellten sechs übergeordneten Faktoren beeinflusst.

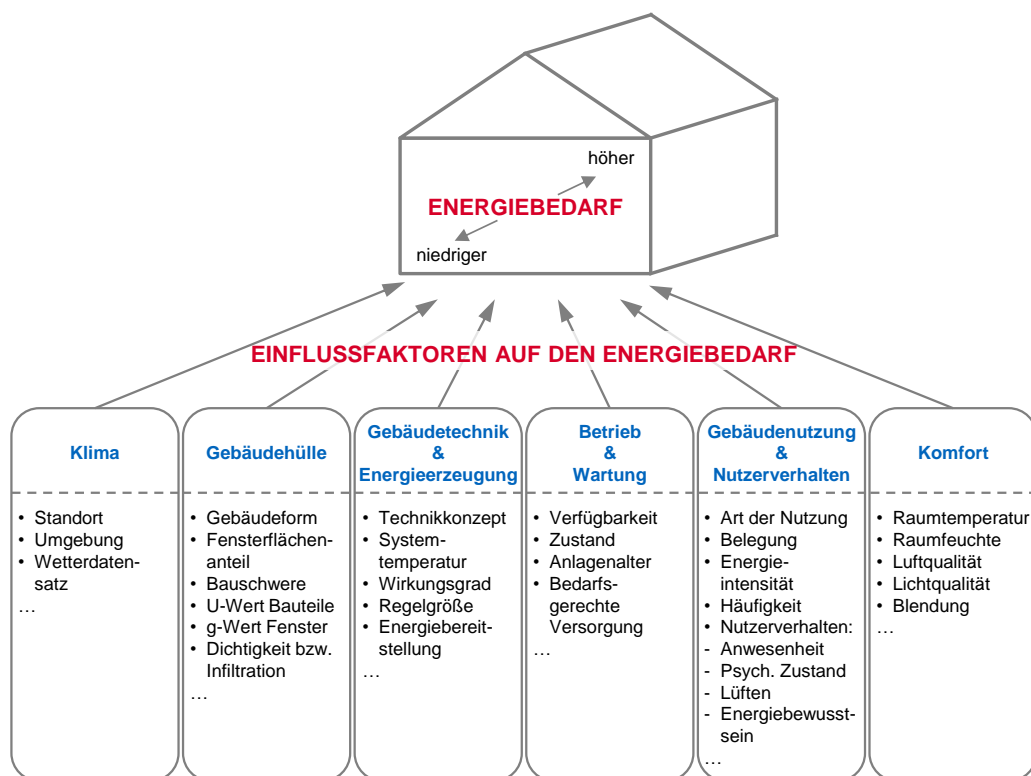


Abbildung 2.6: Haupteinflussfaktoren auf den Energiebedarf

Ein klares Verständnis des Gebäudeenergieverbrauchs erfordert die gleichzeitige Betrachtung aller sechs Bereiche. Die Auswirkungen des Klimas, der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik auf den Gebäudeenergieverbrauch sind wissenschaftlich besser untersucht als die Auswirkungen von Betrieb und Wartung, Nutzerverhalten und gewähltem Komfort. Mangelndes Verständnis kann hier zu Fehleinschätzungen führen. Daher ist es notwendig energierelevante Schlüsselparameter eindeutig zu definieren. [39]

2.2.2 Das Gebäude im klimatischen und städtebaulichen Kontext

Die klimatischen Bedingungen wirken auf den Energieverbrauch und werden über einen Wetterdatensatz theoretisch abgebildet. Der Wetterdatensatz kann sich auf standardisierte Klimazonen, ortsspezifische Wetterdatensätze oder eigene Messreihen beziehen. Bereits auf Basis des Wetterdatensatzes lassen sich grundlegende Aussagen³ zu den erwarteten Energiemengen für Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten treffen.

Folgende Kriterien stehen mit den klimatischen Bedingungen in enger Verbindung und können innerhalb der energetischen Gebäudebewertung den Energiebedarf (Heizen, Kühlen, Beleuchten) und die Auslegeleistungen der Gebäudetechnik in einem mittleren zweistelligen Prozentbereich beeinflussen:

- Wahl des Standorts/der Klimazone [54] [55]
- Beachtung von Verschattungseffekten/solarem Eintrag [56] [57]
- Veränderung der Außentemperatur [58] [59] [55]
- Bewertung des Windeinflusses [60] [61]
- Einsatz realer oder künstlicher Wetterdatensätze [62]

2.2.3 Einfluss von Gebäudehülle und Design

Die Gebäudehülle ist die Schnittstelle zwischen Gebäudeinnerem und Umgebung. Zwei ihrer Grundaufgaben sind die Schutzfunktion und die Bereitstellung eines gleichmäßigen und zufriedenstellenden Innenraumklimas bei schwankenden Außenbedingungen. Die Ausgestaltung der Gebäudehülle ist für den Energiebedarf relevant und umfasst die Hauptkategorien Fassaden-, Dach- und Kellerkonstruktion. Fassaden mit hohem Fensterflächenanteil ermöglichen Interaktionen zwischen dem Geschehen im Gebäudeinneren und der Umgebung. Dagegen begünstigt ein kleiner Fensterflächenanteil eine Konzentration auf das Gebäudeinnere. Deshalb steht die Gebäudehülle in einem Spannungsfeld zwischen Funktion, Konstruktion, Gestalt und Ökologie. [13]

Im Sinne der Energieeffizienz ist der gewünschte Raumkomfort durch minimalen Energieeinsatz zu erzielen. Dazu eignet sich der Systemansatz Licht-Fassade-Raum-Technik, denn Gebäudehülle und Gebäudetechnik sind über die Aufgaben Tageslichtversorgung und Raumkonditionierung

³z.B. basierend auf Lufttemperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und -richtung, Bedeckungsgrad Himmel etc.

eng verbunden. [41] Je leistungsfähiger die Gebäudehülle auf die Nutzungsanforderungen und die Standortgegebenheiten reagieren kann, desto weniger zusätzliche Gebäudetechnik ist für die Raumkonditionierung erforderlich [13]. Es ist deshalb entscheidend, die Auswirkungen von Entwurfsparametern auf den Energiebedarf zu verstehen. Energierelevant sind bspw. Gebäudeform, Fensterflächenanteil, Orientierung, bauphysikalische Materialeigenschaften sowie der Abstand zu Nachbargebäuden [63].

Der Energiebedarf kann bis zu einem mittleren zweistelligen Prozentbereich mit Hilfe folgender Entwurfsparameter beeinflusst werden:

- A/V-Verhältnis
- Gebäudeform: quadratisch zu rechteckig [64], rechteckig zu L-förmig [65]
- Längen-Breiten-Verhältnis des Gebäudekörpers [66]
- Bauphysikalische Eigenschaften⁴: kalte Klimata [66] [69], warme Klimata [65]
- Kombination der Entwurfsparameter [70]

2.2.4 Einfluss der Gebäudetechnik

Der Einsatz von Gebäudetechnik ist notwendig, wenn die Nutzungsanforderungen an die Innenraumqualität hinsichtlich Temperatur, Feuchte, Luftqualität oder Lichtqualität nicht durch die Fassade alleine sichergestellt werden können. Die Gebäudetechnik liefert und gewährleistet die Einhaltung der Qualitäten durch Zufuhr der erforderlichen Energie oder Luftmenge und Überwachung der Regelgrößen. Sie ist Lieferant und wirkt durch Systemauswahl, Anlageneffizienz und Betriebsweise auf den Gebäudeenergiebedarf und die Gebäudeemissionen. Eine Unterteilung erfolgt in die vier Ebenen Übergabe, Verteilung, Speicherung und Erzeugung [71]. Die Abbildung 2.7 zeigt den energetischen Zusammenhang für den Nutzenergiebedarf E_D , den Aufwand der technischen Anlage E_I und den Aufwand der Erzeugungsanlage E_d [72].

Die eingesetzte Gebäudetechnik hat zwar keinerlei Einfluss auf den Nutzenergiebedarf, aber sehr wohl auf die Endenergie durch ihre Effizienz bzw. Verluste in der Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Übergabe. Die Wahl der Erzeuger- und Versorgungssysteme entscheidet in Abhängigkeit von den Systemtemperaturen über den Einsatz von alternativen, kostengünstigen und umweltschonenden Energiequellen. Eine bedarfsgerechte Energiebereitstellung ermöglicht den Energiebedarf weiter zu senken. Folgende Punkte besitzen starke Auswirkung auf den Endenergiebedarf:

- System-/Anlagenwirkungsgrad
- Systemwahl/-temperatur [73]
- Bedarfsgerechte Energiebereitstellung [74]
- Regelgrößen & Komfort [75] [69]

⁴Die Verbesserung der Transmissionskoeffizienten führt nicht stets zu einer Reduktion des Gesamtenergiebedarfs [67] [68].

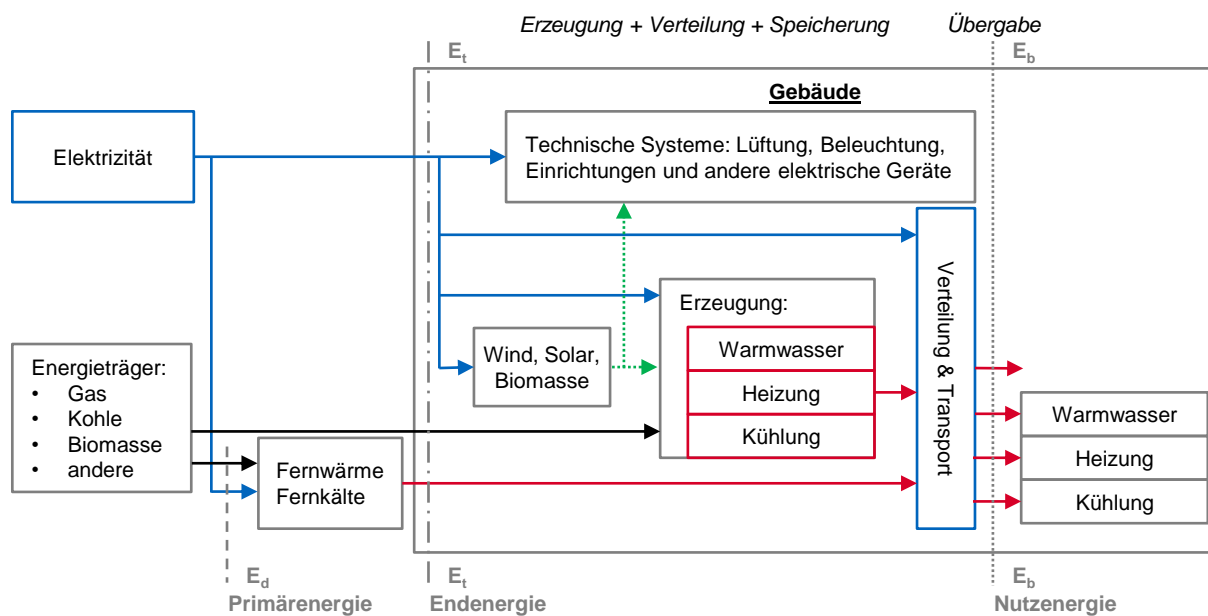


Abbildung 2.7: Energiebezugsgrenzen (Eigene Grafik; Datenquelle: [71] [72])

2.2.5 Einfluss der Gebäudenutzung

Die Nutzung eines Gebäudes setzt sich aus den einzelnen Flächennutzungen wie z.B. Büro, Besprechung oder Labor zusammen. Jede Nutzungsart besitzt ein eigenes Anforderungsprofil an Raumqualitäten⁵. Zusätzlich besitzt ein Nutzer eine individuelle Erwartungshaltung an die vorhandene Raumqualität und legt folglich ein individuelles Nutzerverhalten an den Tag. Das Nutzerverhalten wird von internen und externen Stimuli gesteuert, um auf die vorhandenen Umwelteinflüsse wie Temperatur, Luftqualität oder Tageslicht zu reagieren. [39]

Parameter wie Personenanzahl oder deren Aktivität, gewünschte Raumtemperatur, Gerätenutzung, natürliche Lüftung, Warmwasserverbrauch etc. sind stark nutzerabhängig und können bei gleichen Klimabedingungen oder Gebäudetypen zu einer hohen Streubreite im Energieverbrauch führen [76]. Für Haushalte kann der Faktor zwischen niedrigstem und höchstem Verbrauch für Heizenergie drei und für Strom fünf betragen [39]. Je größer für den Nutzer die Eingriffsmöglichkeiten auf den eigenen Komfort sind, desto stärker ist die Toleranz gegenüber Diskomfort [77]. Mehr Eingriffsmöglichkeiten steigern jedoch die Gefahr eines energie-ineffizienten Nutzerverhaltens. Wichtige energierelevante Faktoren zur Beschreibung des Nutzerverhaltens sind:

- Belegung (Rate und Zeit) [78]
- Verwendung Sonnenschutz (Wirkung solarer Eintrag) [78] [79]
- Raumtemperatursollwert [39] [80] [81]
- Frischluftmenge [39] [81] abhängig von Raum- [82] [79] oder Außentemperatur [39] [79]
- Einfluss durch Flächenwirkung (Zimmer vs. Großraum: Beleuchtung [39])

⁵wie gewünschtes Temperaturniveau, Luftqualität, Lichtqualität, Raumausstattung, Regelungsmöglichkeiten etc.

- Betriebszeiten und -zustand der Einrichtung (Beleuchtung [78], el. Geräte [83])
- Windgeschwindigkeit [79]
- Regen [79]

In naturwissenschaftlichen Betrachtungen werden quantitative Auswirkungen mit physikalisch messbaren Parametern verknüpft. Hierzu wird zwischen energiebezogenem Verhalten und physikalischen Parametern ein eindeutig abbildbarer Zusammenhang unterstellt, der aber wegen der Systemkomplexität kaum nachweisbar ist. Auf das Verhalten wirken z.B. auch angelernte Routinen oder Gewohnheiten. [39]

Das Nutzerverhalten wird in einer mathematischen Logik abgebildet und in fünf Modelle unterschieden: in psychologische, probabilistische und agentenbasierte Modelle sowie in Mittelwert-Modelle und deterministische Modelle. Die beiden letzten Modelle wurden in dieser Arbeit verwendet. Mittelwert-Modelle definieren die wichtigsten Parameter und geben diese für ausgewählte Zeiträume an. Sie eignen sich besonders für größere Gruppen. Deterministische Modelle setzen vorgefertigte Typologien oder Profile ein. Dazu werden eindeutige Parameter zur fixen Beschreibung des Verhaltens⁶ verwendet. [39]

2.3 Bewertung von Gebäuden und Liegenschaften

2.3.1 Benchmarking zur Bewertung der Gebäudeperformance

Die Gebäudebewertung liefert wertvolle Aussagen zu der Energieeffizienz des Gebäudes und bildet die Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung effizienzsteigernder Maßnahmen. Dabei benötigt die Interpretation der Gebäudequalität klare Strukturen des Nachweisverfahrens und eindeutige Vorgaben [7]. Beides können die Verfahren der Regulierung und der Zertifizierung bereitstellen. Regulierung besitzt mit Vorgabe von Mindestanforderungen durch den Staat Vorschriftencharakter und soll in gleicher Art und Weise von allen Anwendern verstanden und angewendet werden. Verstöße können bspw. als Ordnungswidrigkeit geahndet und mit Bußgeldern belegt werden (§27 in [84], §8 in [85], Art. 79 in [86]), in der Bauphase zur Einstellung der Arbeiten führen (Art. 75 in [86]) oder eine Baugenehmigung kann verwehrt werden, wenn öffentlich-rechtliche Vorschriften verletzt werden (Art. 68 in [86]). Die vorhandenen Zertifizierungsverfahren definieren über die Mindestanforderungen hinaus höherwertigere Ziele und Qualitätsniveaus. Ihr Einsatz erfolgt auf freiwilliger Basis.[53] Allen liegt das Rating zu Grunde. Es besteht generell aus Klassifizieren, Zuordnen und Bewerten von Qualitäten. Für die Berechnung der Qualität oder des möglichen Verbesserungspotenzials legt das Rating meist Standardrandbedingungen fest.[87]

Die Bewertung kann auf Leistungskriterien (Performance-Based) mit Indikatoren oder auf Qualitätskriterien (Feature-Specific) auf Punktbasis beruhen [88]. Aus ihnen gehen Vergleichswerte, die

⁶z.B. wird die Infiltrationsluftmenge über eine vorgegebene Luftwechselzahl während eines definierten Zeitraums oder die Fensteröffnungszeitpunkte innerhalb des Tages vorgegeben.

Performance-Indikatoren (PI), hervor. Mit der Erfüllung festgelegter Kriterien können dem Gebäude z.B. Energieperformancelevel oder Qualitätslabel zugewiesen werden [76]. Damit kann der Anwender die Gebäude mittels Benchmarking objektiv und einfach vergleichen. Benchmarking stellt einen Teil des Total-Quality Managements zur Identifikation und zum Nachweis von Verbesserungspotenzialen innerhalb von Betriebsprozessen dar [89]. Der Top-Down Ansatz mit den drei Ebenen Gebäude→Anlage→Bauteil wird empfohlen. Auf Gebäudeebene kann nur eine generelle Bewertung der Performance erfolgen, die qualitativ die Gebäude in gut und schlecht einteilt. Eine Fehlererkennung lässt sich erst mit anlagen- bzw. komponentenbezogenem Benchmarking erreichen. [90] Die Abbildung 2.8 zeigt vier allgemein anwendbare Stufen für ein verbrauchsbezogenes Benchmarking:

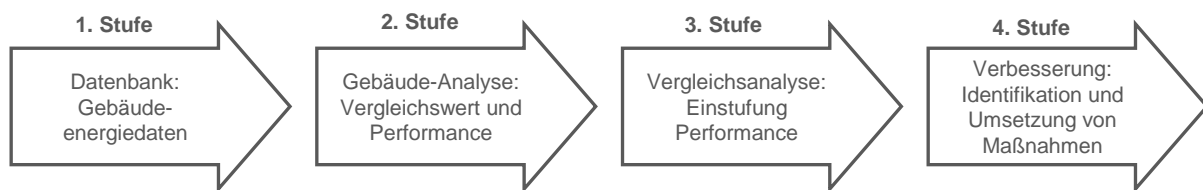


Abbildung 2.8: Benchmarking Prozess (Eigene Grafik; Datenquelle: [76] [89])

Stufe 1: Datenbank

In der ersten Stufe sollte in einer Datenbank eine signifikante Anzahl an Daten aus einer geeigneten Vergleichsgruppe vorliegen. Die Anforderung nach der späteren Vergleichbarkeit der Datensätze erfordert bereits zur Ablage der Daten eine Kategorisierung nach spezifischen Eigenschaften, wie z.B. Gebäudotyp oder Innenraumbedingungen. Hierbei bilden real gemessene und theoretisch erzeugte Werte ein grundlegendes Unterscheidungsmerkmal. Ein theoretischer Wert beruht auf Standardbedingungen. Ein gemessener Wert beinhaltet zusätzlich weitere Effekte wie z.B. Nutzer- und Wettereinfluss. Aus diesem Grund ist für eine Bewertung die eindeutige Definition des Inhalts des Kennwertes für die Nachvollziehbarkeit und die Vergleichbarkeit essentiell. Die Bildung eines Kennwertes sollte die erforderliche Genauigkeit, den Betrachtungsbereich, die Wiederholbarkeit, die Komplexität und die Anwenderanforderungen beachten. Der notwendige Aufbau einer Datenbank mit realen Messwerten erweist sich als aufwendig, teuer und technisch komplex. Theoretische Kennwerte bieten dagegen bei gezielter Auswahl und Anzahl von Gebäudetypologien und -kategorien eine günstige Alternative.[76] Der theoretische Ansatz wird für Neubauten empfohlen. Im Gegensatz dazu erscheint für Bestandsgebäude die Erhebung von Messwerten als einfacher. Darüber hinaus gelten Messwerte des realen Betriebs als glaubwürdiger. [90]

Stufe 2: Gebäude-Analyse

Als zweite Stufe werden PIs anhand ausgewählter Gütekriterien für Gebäude gebildet und analysiert. Dabei müssen Gebäude mit besseren Werten für die PIs auch eine höhere Gebäudequalität aufweisen [53]. Als Vergleichsgrößen werden bspw. End- oder Primärenergieeinsatz, Anteile erneuerbarer Energien am Gesamtenergiebedarf, Mindest-Anlagenwirkungsgrade oder bauphysikalische Mindestanforderungen verwendet. Für mehr Klarheit wird von einer Bündelung einzelner Energiegrößen

zu einem Gesamtgebäudeenergiebedarf abgeraten [91] [92]. Die Nachvollziehbarkeit und Aussagekraft von PIs hängen von der gewählten Bezugsgröße ab. Es eignen sich hierfür quantifizierbare Eigenschaften wie z.B. Produktionseinheiten, Wohneinheiten, Nutzeranzahl oder Flächenmaße. Bei Verwendung des Gebäudenutzers kann trotz Gleichheit in der Gesamtflächennutzung die Nutzerdichte sehr stark variieren und zu einer sehr breiten Streuung des Indikators führen. [93]. Insbesondere bei Flächenmaßen fehlt oft eine Aussage zur verwendeten Flächenart. Ein Vorschlag lautet die konditionierten Fläche als Bezugsgröße zu verwenden, da damit die für die Nutzung einer Flächeneinheit erforderliche Energie berücksichtigt wird [91].

Stufe 3: Vergleichsanalyse

In der dritten Stufe werden die erzeugten PIs entweder mit einer Stichprobe gemessener Werte oder einem theoretischen Wert verglichen [76] [84]. Für gemessene Werte wird die Stichprobe anhand definierter Kriterien ermittelt und der PI über statistische Lagemaße bewertet. Der klimatische Einfluss auf den Energieverbrauch ist zu berücksichtigen [93] und in geeigneter Form zu korrigieren [94]. Zusätzlich ist eine ausreichend große Stichprobe für die Gebäudebewertung notwendig [91] [92]. Bei einer Stichprobe mit weniger als 50 Vergleichswerten (Beobachtungen) kann die Wahrscheinlichkeit zur Fehlinterpretation ansteigen [95]. Für den Vergleich mit einem theoretischen Wert ist zu beachten, dass angesetzte Standardrandbedingungen nur eingeschränkt den realen Nutzungszustand wiedergeben können [91]. Darüber hinaus ist die Energieeffizienz verschiedener Gebäudetypen anhand der PIs erst miteinander vergleichbar, wenn die PIs die gleichen Eingangsfaktoren beinhalten [76] [39].

Stufe 4: Verbesserung

In Stufe vier findet die Identifikation, die Planung und die Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen statt. Das verbrauchsbezogene Benchmarking erlaubt die erzielten Einspareffekte nachzuweisen.

2.3.2 Datenbasis quantitativer Verfahren zur Bestimmung der energetischen Qualität

Quantitative Methoden werden für die Bewertung und Verbesserung der Gebäudequalität, wie z.B. Energiebedarf bzw. -verbrauch, eingesetzt. Erforderliche Kriterien werden entweder für eine Zertifizierung oder Analyse berechnet oder für ein Gebäude- oder Anlagenbenchmarking gemessen. Nach [90] leiten sich vier Bereiche ab:

1. Gebäudezertifizierung (Lebenszyklusanalyse)
2. Gebäudeenergieanalyse auf Basis normierter Standardbedingungen
3. Gesamtgebäudebenchmarking
4. Hierarchisches Nutzungs-, Anlagen- oder Komponentenbenchmarking

Mit den Bereichen gehen Unterschiede in den eingesetzten Werkzeugen zur Lösung von Fragestellungen, deren grundlegenden Einsatzziele oder deren Detaillierung und Umfang einher. Als

Datenquellen stehen Energieverbrauchsabrechnungen, Verbrauchsmessungen, Informationen aus Datenerhebungen, Planungsunterlagen oder Ergebnisse aus Simulationswerkzeugen zur Verfügung [96]. In Abhängigkeit von der Datenquelle erfolgt nach [90] die Energiemengenbestimmung durch Berechnung, Messung oder durch Kombination beider Verfahren in einem hybriden Ansatz. Für diese drei Hauptbereiche stellt Abbildung 2.9 die gebräuchlichen Methoden gegenüber.

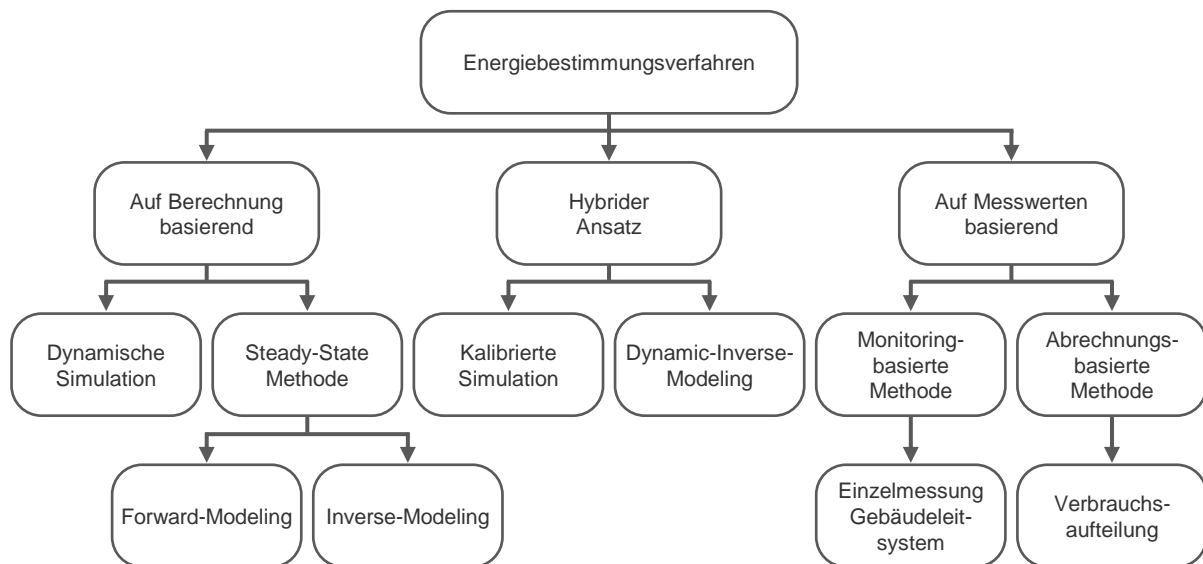


Abbildung 2.9: Energiebestimmungsverfahren für bestehende Gebäude
(Eigene Grafik; Datenquelle: [90])

Auf Berechnung basierende Verfahren

Berechnungsverfahren basieren auf drei grundlegenden Prozessschritten: Eingabe von Modellparametern, Berechnung des Modells und die Ergebnisaufbereitung. Dabei wird das im Verfahren eingesetzte Berechnungsmodell der dynamischen Simulation oder der Steady-State Methode zugeordnet. Die dynamische Simulation berücksichtigt die thermisch-energetischen Interaktionen des Gebäudes aus Gebäudehülle-Technik-Nutzer-Umwelt, indem sie physikalische Prozesse über detaillierte Algorithmen abbildet. In Steady-State Methoden werden ein stationärer Zustand und vereinfachte dynamische Prozesse angenommen. Beides reduziert die Modellkomplexität und erhöht die Ausführungsgeschwindigkeit [90].

Für die Erzeugung eines Modells können Forward- oder Inverse-Modeling Prinzipien eingesetzt werden. Forward-Modeling ist ein klassischer deterministischer Ansatz und beschreibt das Modellverhalten über Differentialgleichungen. Das Inverse-Modeling wendet Data-Fitting Techniken auf empirische Daten zur Modellbildung an. Zwischen Eingangs- und Ausgangsdaten wird eine Beziehung unterstellt und darauf aufbauend ein mathematisches Modell⁷ entwickelt [97]. Zur Vereinfachung

⁷z.B. können Modelle durch lineare, change point oder multiple Regressionsverfahren gebildet werden. Die spätere Auswahl des Modells erfolgt anhand des größten Bestimmtheitsmaß R^2 [90].

und Beschleunigung von Forward-Modeling Modellen können deren Simulationsergebnisse auch als Datenquelle für Inverse-Modeling Methoden eingesetzt werden [90].

Auf Messwerte basierende Verfahren

Mittels messtechnischer Methoden werden Verbrauchsdaten erfasst und ausgewertet. Sie unterscheiden sich in Detaillierung und Aufwand. Eine einfache Form der Messwerterfassung ist die Analyse der Energieverbrauchsabrechnung. Eine aufwendigere und genauere Erfassung kann über ein detailliertes Gebäudeleitsystem oder Vor-Ort-Messungen erfolgen. Im Vergleich zu theoretischen Verfahren stehen Abweichungen meist nicht zur Diskussion, obwohl sie durch Messfehler, Messungenauigkeiten oder falsche Anwendung der Messgeräte latent vorhanden sein können. Darüber hinaus ist es bei der Verbrauchsmessung nicht leicht, die Einflussfaktoren zu erkennen und die Energiemengen ihren Verursachern zuzuteilen. Deshalb werden Einzelmessungen vorgenommen und theoretische Ansätze für die Aufteilung des gebündelten Gesamtenergieverbrauchs untersucht.

Für die Aufteilung eignen sich Top-Down [96] oder Bottom-Up [98] [88] [99] Ansätze, um den Energieverbrauch auf Basis berechneter oder leicht messbarer Energiekennwerten zu verteilen oder hochzurechnen. Sie sind meist arbeitsintensiv und erfordern Erfahrung, da eine Vielzahl an Parametern überprüft werden muss. Zusätzlich können unbekannte Effekte oder Unsicherheiten zu schwer erklärbaren Abweichungen führen [98] [88]. Darüber hinaus kann nicht die gleiche Genauigkeit für die Verbrauchsverteilung auf niedrigerer Ebene wie für den Gesamtenergieverbrauch auf der höchsten Gebäudeebene garantiert werden. [90]

Das Energiemanagement erlaubt durch Unterzählsysteme und Monitoring den Energieverbrauch aufzuschlüsseln und erhöht die Nachvollziehbarkeit der Energieströme. Hierfür werden alle energie- und kosten-relevante Anlagen und Komponenten berücksichtigt. Eine Sensorik mit hohem Detaillierungsgrad und hoher zeitlicher Auflösung wird hauptsächlich in der Forschung oder zur Validierung von theoretischen Modellen eingesetzt, da sie noch als sehr teuer gilt [96] [100]. Ist eine für Verbrauchsmessungen angepasste Gebäudeleittechnik vorhanden, so gibt es bereits ein leistungsstarkes Werkzeug zur Überwachung und Verbesserung der Gebäudeperformance [101].

Hybride Berechnungsverfahren

Die Kombination einer Berechnungsmethode mit einer Messmethode bezeichnet man als hybriden Ansatz. Ein Beispiel ist die Kalibrierung eines Modells an das reale Gebäudeverhalten anhand experimentell ermittelter Daten. Die gesteigerte Datenqualität führt zu einer zu verringerten Abweichungen und zum anderen zu realistischeren Energiemengen in der Energiebilanz [102]. Beides erhöht die Glaubwürdigkeit und Sicherheit der Einsparpotenziale vorgeschlagener Maßnahmen. Die manuelle Kalibrierung benötigt wegen des iterativen Prozesses einen hohen Zeitaufwand, sie kann aber mittels Software als Optimierungsproblem abgebildet und damit automatisiert und beschleunigt werden [103].

Das Dynamic-Inverse-Modeling erweitert das Inverse-Modeling. Das Modellverhalten wird aus Trainingsdaten in Differentialgleichungen übersetzt und ermöglicht somit dynamische Effekte zu be-

rücksichtigen [90]. Als bekannte Beispiele gelten Autoregressive-Moving-Average Modelle (ARMA), Fourierreihen Modelle oder Artificial-Neural-Network Modelle (ANN) [97].

2.3.3 Auswahl hinterlegter Modellansätze in den Bewertungsmethoden

Modelle für Bewertungsmethoden können auf einem modell-basierten (Model-Based) oder modell-freien (Model-Free) Ansatz beruhen. Die Lösung eines modell-freien Ansatzes gründet entweder auf dem Expertenwissen des Anwenders oder auf den gewonnenen Erfahrungen eines systematischen Ausprobierens (trial and error). Die Qualität der erarbeiteten Lösung schwankt in Abhängigkeit von der Erfahrung des Anwenders und kann außerhalb des Wissensbereiches eines Experten zu deutlichen Fehlern führen. [104]

Innerhalb des modell-basierten Ansatzes wird das Zielsystem durch mathematische Gleichungen abgebildet und für die Lösungsfindung verwendet. Dies ermöglicht einen theoretischen Vergleich verschiedener Maßnahmen bereits vor ihrer Umsetzung. Dabei gilt, dass Modelle stets Annäherungen an das reale Verhalten darstellen und somit Ungenauigkeiten bzw. Fehler in den Ergebnissen beinhalten. [104] Die Verwendung eines modell-basierten Ansatzes eröffnet geeignete Maßnahmen mit Hilfe eines mehr-dimensionalen Optimierungsmodells aufzufinden. Der Optimierungsprozess des Modells erfordert Randbedingungen, Entscheidungskriterien und -variablen vorab festzulegen. Das hinterlegte mathematische Modell erlaubt sowohl unterstützende als auch konkurrierende und sogar gegensätzliche Kriterien in die Betrachtung mit einfließen zu lassen. Diese Vorgehensweise zielt unter Berücksichtigung aller relevanter Kriterien auf das Auffinden einer möglichst optimalen Gesamtlösung [105]. Viele Bewertungsmodelle wurden bereits bis heute für das Benchmarking entwickelt.

Nach der Meta-Analyse in [106] gibt es drei grundlegende Modellarten: White-Box, Gray-Box und Black-Box Modelle. Für Black-Box Modelle werden vornehmlich Data-Fitting Techniken eingesetzt. Sie beruhen auf einem vorher ausgewählten statistischen Modell und benötigen für die Modelldefinition Trainingsdaten. White-Box Modelle werden auch als physikalische Modelle bezeichnet. Für die Modellierung bilden sie die Zusammenhänge mittels physikalischer Gleichungen theoretisch nach. Hierzu sind generell eine große Menge an Informationen zur Parametrierung erforderlich. Gray-Box Modelle liegen zwischen den White-Box und Black-Box Modellen und setzen für die Erzeugung eines geeigneten Modells sowohl auf physikalische Zusammenhänge als auch auf Data-Fitting Techniken. In Tabelle 2.1 werden die Modelle anhand wesentlicher Eigenschaften gegenübergestellt.

Tabelle 2.1: Vergleich von Bewertungsmethoden (Eigene Tabelle; Datenquelle: [106] Tab. 1 & 2)

Methode	Anwendung	Zeitliche Auflösung	Wissen & Erfahrung des Anwenders	Menge Eingangsdaten	Art der Eingangsdaten	Menge Trainingsdaten	Aufwand Kalibrieren
Lineare Regression	Fehlerdetektion, Lastprognose	verschieden	gering	klein	Tagestyp, Wetterdaten, historische Daten	groß	niedrig
Support-Vector Regression	Lastprognose, Verbrauchsaufteilung	verschieden	mittel (vertraut mit Statistik)	klein	Wetterdaten	groß	niedrig
Gauß-Prozess Regression	Maßnahmenanalyse, Ersatz für detaillierte Simulation	verschieden	mittel (vertraut mit Statistik)	klein	Wetterdaten, systembeschreibende Eingangsvariablen	groß	niedrig
Artificial-Neural-Network	Fehlerdetektion, Last- und Bedarfsprognose	verschieden	mittel (vertraut mit Datenverarbeitung)	klein	Wetterdaten, systembeschreibende Eingangsvariablen, Verbrauchsmuster	groß	niedrig
Bin Methode	Fehlerdetektion	verschieden	gering	klein	Wochentag, Stunde, Wetterdaten	groß	niedrig
Decision tree	Bedarfsprognose	jährlich	gering	klein	Wetterdaten, Gebäudetyp, Gebäudeflächen	groß	niedrig
Bayesian Network	Bedarfsprognose	täglich	mittel (vertraut mit Wahrscheinlichkeitstheorie)	mittel	Wetterdaten, bekannte Eingangsvariablen, Verteilungsfunktionen von unbekanntem Eingangsvariablen, historische Verbrauchsdaten	mittel	mittel (wenige Parameter)
RC-Methode	Last- und Bedarfsprognose	stündlich	mittel (vertraut mit thermodynamischen Prozessen)	klein	Wetterdaten, historische Verbrauchsdaten	mittel	mittel (wenige Parameter)
Normativ	Regulierung, Zertifizierung, Maßnahmenanalyse	stündlich, monatlich	mittel (vertraut mit Bauphysik)	mittel	Wetterdaten, vereinfachte Gebäudeparameter	mittel bis klein	mittel (viele Parameter)
Idealized Model Based	Energiebenchmarking,	stündlich	mittel (vertraut mit Bauphysik)	mittel	Wetterdaten, vereinfachte Gebäudeparameter	mittel	mittel (viele Parameter)
Modified Bin Method	Fehlerdetektion	stündlich	mittel (vertraut mit Bauphysik)	mittel	Wetterdaten, vereinfachte Gebäudeparameter	mittel	mittel (viele Parameter)
Detaillierte Simulation	Fehlerdetektion, Verbrauchsaufteilung, Maßnahmenanalyse, Last- und Bedarfsanalyse	< stündlich	hoch (vertraut mit Bauphysik und eingesetzter Software)	groß	Wetterdaten, genaue Gebäudeparameter	klein	hoch (sehr viele Parameter)

2.4 Zusammenfassung

Die Gebäudeoptimierung in der Planung und im Bestand ist vielschichtig und komplex, um die hohen Anforderungen an die energetische Gebäudequalität zu erreichen. Die energetische Qualität setzt sich aus einem engen Geflecht aus gesetzlichen und gesellschaftlichen Anforderungen, Vorstellungen des Bauherren, technischen Lösungen sowie ökologischen als auch ökonomischen Zielsetzungen zusammen. Je nach Zeitpunkt im Gebäudelebenszyklus werden unterschiedliche Anforderungen und Kriterien an das Gebäude gestellt und verschieden leistungsstarke Werkzeuge für die Bewertung verwendet.

Die verschiedenen Blickwinkel auf und in das Gebäude wie z.B. „im Quartier“, „als Einzelobjekt“, „bestehend aus Anlagen“ oder „aufgebaut aus Bauteilen“ sowie die angedachte Analysetiefe sind weitere einflussreiche Kriterien bei der Wahl der Bewertungswerkzeuge. Für die Bewertung heterogener Gebäudeportfolios von Hochschulen ist es hilfreich zu analysieren, wie sich das Portfolio hinsichtlich der Gebäudequalität und der vorhandenen Nutzung zusammensetzt. Die energetische Qualität eines Campus bildet sich aus der energetischen Gebäudequalität und dem Energiebedarf infolge der vorhandenen Nutzungsanforderungen. Eine Nichtbeachtung kann im Vergleich mit gemessenen Energieverbrauchswerten zu schwer erklärbaren Unterschieden führen.

Das Benchmarking derartiger Gebäude erweist sich wegen des individuellen Gebäudecharakters als sehr schwierig. Um die Komplexität eines Hochschulgebäudes angemessen zu berücksichtigen, sind aufwendigere Methoden erforderlich. Ausführungsgeschwindigkeit und einfache Anwendung stehen hier im Konflikt mit Detaillierungsgrad und Flexibilität. Vorhandene Modelle in den Bewertungswerkzeugen können mittels verschiedener Techniken und auf Basis ausgewählter Eingangsparameter vereinfacht werden.

Zu empfehlen ist wegen der leichten Umsetzung das lineare Regressionsmodell. Zu beachten ist der Gültigkeitsbereich des Modells. Er wird in der Modellbildung durch die Bandbreiten der Eingangsparameter definiert. Ist das Regressionsmodell erzeugt, dann ist dessen spätere Anwendung kaum noch fehleranfällig. Dies gilt, wenn sowohl Eingangsparameter bei der Eingabe auf Gültigkeit überprüft werden als auch das Modell in seinem Gültigkeitsbereich angewendet wird.

Neben den theoretischen Grundlagen zur Bewertung eines Gebäudes ist insbesondere das Verständnis über Einflussgrößen in der Gebäudebewertung entscheidend. Zum einen ist das Gebäude Teil eines komplexen Konstrukts aus Standort, Klima, Gebäudedesign, Bauweise, Gebäudetechnik und Nutzung. Faktoren der aufgeführten Bereiche können selbst bei moderater Veränderung eine deutliche Veränderung des Energiebedarfs herbeiführen. Zum anderen unterliegen die Faktoren, insbesondere die in der Nutzung, externen Einflüssen und können daher nur schwierig bestimmt werden. Darüber hinaus erschweren die kontinuierliche Veränderung und die unsichere Vorhersage einzelner Parameter nachvollziehbare Ergebnisse zu erzeugen, v.a. im Benchmarking oder in der Verbrauchsanalyse. Deshalb sind statistische Methoden und aufwendigere Simulationstechniken in der Bewertung notwendig, um nachvollziehbare und robuste Ergebnisse zu erhalten.

KAPITEL 3

Verwendete Untersuchungsmethoden

3.1 Einführung

In der Gebäudebewertung sind viele Einflüsse, wie der individuelle Satz an Gebäudeanforderungen, die Unsicherheiten in den Bewertungsmethoden oder Eingabeparametern, und insbesondere das Gebäude als energetisch-interaktives System zu beachten. Um dieses System besser zu verstehen, kann, wie in dieser Arbeit angewandt, die Simulation als mathematisches Verfahren eingesetzt werden. Viele der Einflüsse und Eigenschaften sind in der Realität nicht präzise zu beschreiben, sondern nur über Wertebereiche vernünftig abzubilden. Eine scheinbar unendlich große Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten und Wertabstufungen existiert. Dieser Umstand führt unweigerlich zu Streuungen in den Ergebnissen. Zusätzlich können viele Effekte nicht eindeutig identifiziert und quantifiziert werden. Ergebnisse gelten als unsicher und das daraus resultierende ökologische oder ökonomische Risiko lässt sich nur sehr schwer abschätzen. Darüber hinaus erscheint die Bewertung der Resultate schwierig, vor allem wenn eindeutige Vergleichsgrößen fehlen. Aus diesem Grund sind statistische Verfahren auch in der Simulation notwendig. Einerseits können Vergleichsgrößen aus Vergleichsgruppen bestimmt werden. Andererseits können Effekte und Resultate besser erkannt, analysiert und bewertet werden. Als Folge kann das eigene Vertrauen und das Vertrauen der anderen in die Ergebnisse gesteigert werden.

3.2 Statistische Grundlagen

3.2.1 Grundlegende Kennzahlen für die Bewertung

Die Wissenschaftsdisziplin Statistik analysiert Daten, liefert Aussagen zu Datencharakteristika und ermöglicht Datenzusammenhänge aufzuzeigen. Mittels statistischer Kennzahlen beschreibt und beurteilt sie die Daten, um daraus Hypothesen abzuleiten und diese durch Prüfverfahren zu widerlegen oder zu bestätigen. Zur Bewertung werden Lagemaße sowie Maße zur Beschreibung der Wertestreuung und der vorhandenen Zusammenhänge verwendet. Zu Beginn werden die für die Arbeit relevanten Kennzahlen zur Beschreibung der Daten vorgestellt.

Medianwert und Quartil

Der Medianwert \tilde{x} gibt den beobachteten Wert an, der die Anzahl der Beobachtungen in zwei gleich große Hälften teilt. Der Medianwert wird auch als zentraler Wert Q_2 bezeichnet. Zusammen mit zwei weiteren Werten teilt er die Datenmenge in vier gleich große Teile und befindet sich am Ende des zweiten Viertels. Das untere Quartil Q_1 beschreibt das Ende des ersten Viertels und das obere Quartil Q_3 das Ende des dritten Viertels einer Datenreihe. [107]

$$\begin{array}{llll}
 \text{Unteres Quartil} & Q_1 = x_{(k)} & \text{mit } k & = (n + 1) \cdot 0,25 \\
 \text{Zentraler Wert} & Q_2 = \tilde{x} = x_{(l)} & \text{mit } l & = (n + 1) \cdot 0,50 \\
 \text{Oberes Quartil} & Q_3 = x_{(m)} & \text{mit } m & = (n + 1) \cdot 0,75
 \end{array} \quad (3.1)$$

Arithmetischer Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert \bar{x} ist gleich der Summe aller Beobachtungen geteilt durch die Anzahl dieser Beobachtungen.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.2)$$

Extremwerte und Ausreißer können durch dessen Berechnungsmethodik starken Einfluss nehmen; daher gilt sein Lagemaß als empfindlich.

Varianz und Standardabweichung

Die Varianz s^2 ist die Maßzahl für die Variabilität innerhalb der Beobachtungen um ihren Mittelwert. Sie besitzt als Dimension das Quadrat der Einheiten der einzelnen Beobachtungen.

$$s^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.3)$$

Eine nachvollziehbare Streuung einer metrischen Datenreihe um ihren Mittelwert wird mit Hilfe der Standardabweichung s beschrieben. Diese ist gleich der positiven Quadratwurzel aus dem Mittelwert der quadratischen Abweichungen vom Mittelwert. Sie besitzt die gleiche Einheit wie die Beobachtungen und ist somit einfacher zu interpretieren. Für die Berechnung der Standardabweichung einer Stichprobe ist die Anzahl n um den Wert 1 zu reduzieren. [107]

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.4)$$

Die Streuungsmaße s^2 und s bleiben unverändert, wenn die Beobachtungen x_i um einen konstanten Wert c verkleinert oder vergrößert werden. Somit ist die Varianz lageunabhängig. [107]

Nutzen von Mittelwert und Standardabweichung

Das Modell der Normalverteilung ist für empirische Häufigkeitsverteilungen idealisiert und in der Statistik als theoretische Verteilung sehr bedeutend. Die Normalverteilung lässt sich mathematisch einfach verwenden und an sie können viele reale Verteilungen angenähert werden. Erkenntnisse, die für normalverteilte Zufallsvariablen gültig sind, können auf nicht normalverteilte Zufallsvariablen übertragen werden, wenn die Stichprobe ausreichend groß und das Verfahren in Bezug auf die Abweichungen robust ist. [107] Für die Berechnung der Normalverteilung sind nur der Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ notwendig. An deren Stelle können bei einer Stichprobe der Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung s eingesetzt werden, wenn die Verteilung der Zufallsvariablen in der Stichprobe einer Normalverteilung ähnlich ist. Die Prüfung kann mit statistischen Tests oder visuell anhand von Histogrammen erfolgen. Die Normalverteilung berechnet sich nach:

$$y = f(x) = f(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-1/2[(x-\mu)/\sigma]^2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.5)$$

Diese Funktion $f(x)$ wird als Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung bezeichnet und besitzt als Einheit ihre Dimension⁻¹. Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Wertes werden mit Hilfe der Verteilfunktion bestimmt. Diese erhält man durch Integration über die Wahrscheinlichkeitsdichte und ist definiert nach:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] \quad (3.6)$$

Dabei ist der Term $\operatorname{erf}(x)$ die Gauß'sche Fehlerfunktion. Die gesuchte Wahrscheinlichkeit repräsentiert die eingeschlossene Fläche unter dem Graphen. Wahrscheinlichkeiten von Wertebereichen lassen sich auf Basis der Schwankungsintervalle sehr leicht abschätzen. Innerhalb von $\mu \pm 1\sigma$ befinden sich ca. 68% aller Werte (Beobachtungen), von $\mu \pm 2\sigma$ sind es ca. 95% und von $\mu \pm 3\sigma$ sind es ca. 99%. [107]

Möchte man bspw., wie in Abbildung 3.1 gezeigt, einen Energiewert beurteilen, so wird die Lage des Mittelwertes ($\bar{x} = \mu = 100$) und die vorhandene Streubreite mittels der Standardabweichung ($s = \sigma = 5$) dargestellt. Sind die Ergebnisse normalverteilt, so befinden sich ca. 68% der Beobachtungen innerhalb einer Standardabweichung, ca. 27% innerhalb der ersten und zweiten Standardabweichung sowie ca. 4% innerhalb der zweiten und dritten Standardabweichung. Dies kann z.B. bei der Festlegung von Grenzwerten zur Überwachung von Gebäude- oder Anlagenverbrauchskennwerten helfen, ab wann Aktionen oder Maßnahmen einzuleiten sind, um einen niedrigen Energiebedarf oder die Betriebsbereitschaft einer Anlage sicherzustellen.

Abhängigkeit zweier Variablen mittels der Kovarianz

Ein linearer Zusammenhang zwischen zwei Variablen kann mit Hilfe der Kovarianz $Cov(X, Y)$ bestimmt werden. Diese ist ein Maß für die gemeinsame Variation zweier Zufallsvariablen. Sie ist positiv,

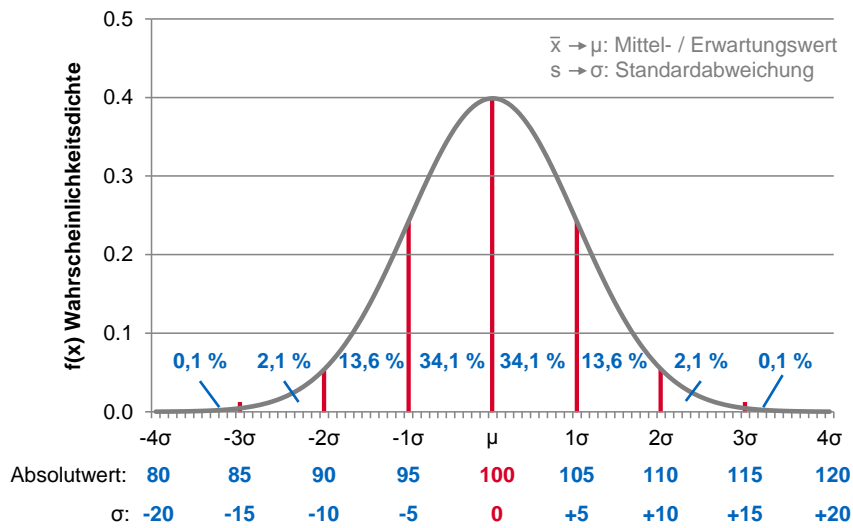


Abbildung 3.1: Nutzen von Mittelwert und Standardabweichung in der Bewertung anhand der Normalverteilung

wenn die Zufallsvariablen X und Y gemeinsam überwiegend größere Werte annehmen als der jeweilige Erwartungswert oder überwiegend kleinere Werte als der jeweilige Erwartungswert. Die Größe der Kovarianz sagt nichts über die Stärke eines Zusammenhangs zwischen zwei Zufallsvariablen aus. Erst die Bildung des Korrelationskoeffizienten ρ_{XY} ermöglicht dies (Pearson Korrelationskoeffizient):

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}} \quad (3.7)$$

Der Faktor ρ_{XY} besitzt den Wertebereich $-1 \leq \rho_{XY} \leq 1$. Ist der Wert größer Null, liegt ein positiver Zusammenhang vor. Für Werte kleiner Null ein negativer. Ist der Wert null, so ist kein Zusammenhang in den Daten vorhanden [107]. Sind die Variablen nicht normalverteilt, so kann der Zusammenhang mit Hilfe des Spearmannschen Rang-Korrelationskoeffizienten r_s nachgewiesen werden. Hierzu werden den Werten der jeweiligen Reihe einzelne Ränge zugeordnet und in eine Rangreihe transformiert. Danach werden die Differenzen D der n Rangpaare bestimmt und in folgende Gleichung eingesetzt:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.8)$$

Der Variationskoeffizient als Sensitivitätsmaß der Ergebnisse

Der Variationskoeffizient ist ein Streuungsmaß und wird zum Vergleich der Streuungen zweier Stichproben verwendet. Er wird wie folgt gebildet:

$$v = VarK = \frac{s}{\bar{x}} \quad (3.9)$$

Der Variationskoeffizient v gibt Auskunft über die Konzentration der Beobachtungen um ihren Mittelwert. Ist s im Verhältnis zu \bar{x} groß, liegt eine schwache Konzentration vor - die Beobachtungen

streuen sehr stark [107]. Die Streuung kann folglich auch als Maß für die Sensitivität in einem Modell betrachtet werden. Ist bspw. v groß, ist das Ergebnis (abhängige Variable) gegenüber seinen Eingangsparametern (unabhängige Variablen) sensitiv.

3.2.2 Multiple Regressionsanalyse zur Vereinfachung komplexer Modelle

Die Regressionsanalyse wird zur Bestimmung des Ursache-Wirkungs-Modells eingesetzt und basiert auf meist empirisch erhobenen Daten. Für diese Arbeit dient sie dazu einfache Ersatzmodelle zu erzeugen, wesentliche Faktoren aus einer Vielzahl von Faktoren zu identifizieren und somit die Anzahl der Variablen zu reduzieren. Nachfolgend sind die erforderlichen Informationen im wesentlichen aus [108] entnommen und kompakt zusammengefasst. In der einfachen Regression mit der Funktion

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X \quad (3.10)$$

kann der Schätzwert \hat{Y} aus der Summe der Regressionskonstanten b_0 mit dem Produkt aus Regressionskoeffizienten b_1 und unabhängiger Variable X bestimmt werden. Der Regressionskoeffizient gibt geometrisch die Steigung nach

$$b_1 = \frac{\Delta \hat{Y}}{\Delta X} \quad (3.11)$$

an und beschreibt somit den vermutlichen Effekt einer unabhängigen Variablen X auf die abhängige Variable Y . Abbildung 3.2 zeigt an zwei Beispielen, wie sich ein Effekt einer unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable darstellt. Das linke Beispiel kennzeichnet einen Effekt der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable. Der Regressionskoeffizient b_1 besitzt den Wert 1,45. Im rechten Beispiel liegt kein Effekt vor, b_1 beträgt 0,004.

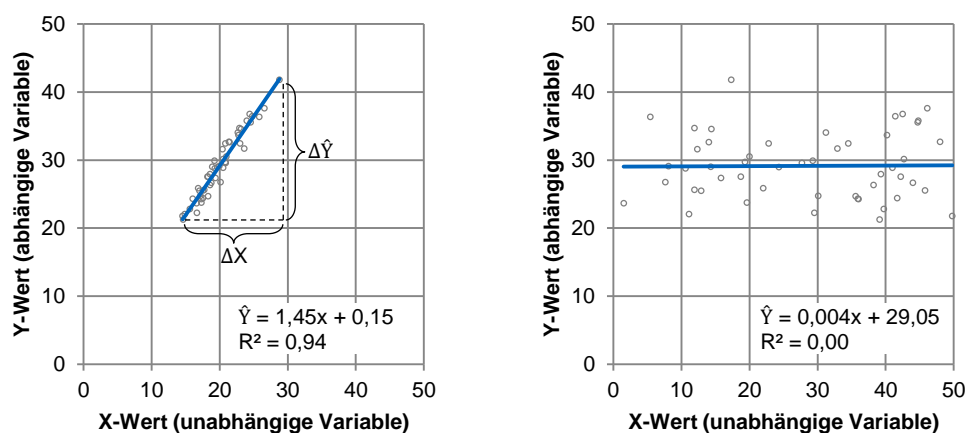


Abbildung 3.2: Regression zur Darstellung eines Effekts von einer unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable; mit Effekt (l.) und ohne Effekt (r.)

In einer Näherungsfunktion wird nach einer idealen Gleichung gesucht, die die Daten optimal abbildet. Dies geschieht auf Basis der Residuen e_k als Abweichung des Schätzwertes vom Beobachtungswert mit der Anforderung:

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_k)]^2 \rightarrow \min! \quad (3.12)$$

Die Schätzung wird als Methode der kleinsten Quadrate bezeichnet. Die Quadrierung bewirkt eine stärkere Gewichtung größerer Abweichungen und vermeidet die Kompensation negativer und positiver Werte. Ursachen von Abweichungen können nicht berücksichtigte Faktoren sein. Mehrere Faktoren können mit Hilfe der multiplen Regression im Modell berücksichtigt werden. Die Bestimmung des Schätzwertes enthält somit mehrere Regressionskoeffizienten mit dazugehöriger Eingangsvariable. Der Schätzwert ist bestimmt nach:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_j x_j + \dots + b_J x_J \quad (3.13)$$

Die Anforderung der minimalen Summe für die Residuen bleibt gleich und berechnet sich nach:

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_j x_j + \dots + b_J x_J)]^2 \rightarrow \min \quad (3.14)$$

Bei der multiplen Regression ist darauf zu achten, dass die Größe der Regressionskoeffizienten aufgrund der Skalenabhängigkeit nicht als Maß für deren Wichtigkeit gesehen werden darf. Ein Wertevergleich ist erst möglich, wenn Variablen gleiche Einheiten besitzen. Als Vergleichsmöglichkeit eignen sich die standardisierten Regressionskoeffizienten nach:

$$\hat{b}_j = b_j \cdot \frac{\text{Standardabweichung } s \text{ von } X_j}{\text{Standardabweichung } s \text{ von } Y} \quad (3.15)$$

Die Standardisierung beseitigt die verschiedenen Messdimensionen der Variablen, die sich in den Regressionskoeffizienten wiederfinden. Damit sind die Koeffizienten unabhängig von linearen Transformationen und als Grad der Wichtigkeit interpretierbar. Sie sind damit qualitative Sensitivitätsindizes, die die Effekte der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable beschreiben und gewichten.

Nach der Bestimmung des Modells und seinen Regressionskoeffizienten muss die Güte überprüft werden. Für die globale Prüfung stehen

- das Bestimmtheitsmaß (R^2)
- die F-Statistik
- der Standardfehler

zur Verfügung. Die Qualität der Anpassung der Regressionsfunktion an die vorliegenden Daten drückt das Bestimmtheitsmaß R^2 aus. Dessen Wertebereich liegt als normierte Größe zwischen 0 und 1.

Je höher der Anteil der erklärten Streuung an der Gesamtstreuung ist, desto größer ist sein Wert. Der Extremfall $R^2 = 1$ gibt die vollständige Erklärung der Streuung durch die Funktion an; $R^2 = 0$ bedeutet keine Erklärung. Das Bestimmtheitsmaß R^2 bildet sich nach:

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^K (\hat{y}_k - \bar{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^K (y_k - \bar{y}_k)^2} = \frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}} \quad (3.16)$$

Als zusätzliches Gütemaß gibt der Standardfehler der Schätzung Auskunft über den mittleren Fehler des Regressionsmodells. Der Standardfehler bestimmt sich aus:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_k e_k^2}{K - J - 1}} \quad (3.17)$$

Das Verhältnis des Standardfehlers zum erwarteten Mittelwert gibt Auskunft über die Qualität der Regressionsfunktion. Je größer dieses prozentuale Verhältnis ist, desto schlechter ist die Funktion zur Schätzung geeignet.

Mittels der F-Statistik wird die Regressionsfunktion auf Gültigkeit in der Grundgesamtheit getestet. Dabei werden die Regressionskoeffizienten und die abhängige Variable Y als Schätzwerte eingestuft, die von der zufälligen Störgröße u abhängig sind. Dies stellt eine Annäherung an das reale System dar, ohne den Anspruch dieses ideal abzubilden. Mit Hilfe der F-Statistik wird die Funktion auf einen signifikanten Zusammenhang von allen unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable getestet.

Nach der globalen Prüfung erfolgt der Test der einzelnen Regressionskoeffizienten mittels der t-Statistik. Der t-Test überprüft, ob der Regressionskoeffizient b_j für eine bestimmte Vertrauenswahrscheinlichkeit (Signifikanzniveau) signifikant ungleich Null ist und daher ein Wirkungszusammenhang zwischen X_j und Y in der Grundgesamtheit besteht. Bei erfolgreichem Test, kann auf Basis der Eingangsparemeter des t-Tests für jeden geschätzten Regressionskoeffizienten ein Konfidenzintervall als dessen wahrscheinlicher Wertebereich bestimmt werden. Die Spannweite eines Konfidenzintervalls gibt Auskunft über die Sicherheit der Schätzung des jeweiligen Regressionskoeffizienten. Je größer das Intervall ist, desto unsicherer ist die Schätzung. Die Unsicherheit nimmt insbesondere zu, wenn innerhalb des Konfidenzintervalls ein Vorzeichenwechsel stattfindet; sich der Einfluss der unabhängigen Variablen umkehren kann.

Um eine Regressionsanalyse durchführen zu können, werden bestimmte Annahmen für das hinterlegte Modell zugrunde gelegt:

1. Das Modell ist richtig bestimmt, wenn
 - ein linearer Zusammenhang in seinen Parametern b_0 und b_j besteht.
 - es alle relevanten unabhängigen Variablen besitzt.
 - die Anzahl der zu schätzenden Parameter kleiner als die Anzahl der Beobachtungen ist.

2. Störgrößen u_k besitzen den Erwartungswert $Erw(u_k) = 0$; sie gleichen sich im Mittel aus. Fehler dieser Art wirken sich auf das konstante Glied b_0 aus.
3. Kein Zusammenhang zwischen erklärenden Variablen X_j und Störgröße u_k $Cov(u_k, x_{jk}) = 0$.
4. Varianz der Störgrößen u_k ist konstant $Var(u_k) = \sigma^2$; Störgröße darf nicht von unabhängigen Variablen und von Reihenfolge der Beobachtungen abhängig sein (Homoskedastizität).
5. Keine Autokorrelation der Störgrößen u_k ; sie sind unkorreliert $Cov(u_k, u_{k+r}) = 0$ mit $r \neq 0$.
6. Zwischen den erklärenden Variablen X_j liegt keine lineare Abhängigkeit vor (keine perfekte Multikollinearität).
7. Die Störgrößen u_k weisen eine Normalverteilung auf.

3.3 Statistische Testverfahren

3.3.1 Einführung

Statistische Testverfahren sind erforderlich, um bestimmte Zusammenhänge herzustellen oder auszuschließen und Fragestellungen auf ihre Gültigkeit hin zu prüfen. Dies geschieht mit Hilfe von Hypothesen, zum einen der Nullhypothese H_0 als Beweis eines Zusammenhangs oder Gleichheit und zum anderen der Alternativhypothese H_1 , wenn beides ausgeschlossen werden kann.

Verschiedene statistische Tests wurden gemäß Tabelle 3.1 eingesetzt. Sie sind u.a. notwendig, um Voraussetzungen für einzelne Tests nachzuweisen oder gewünschte Eigenschaften der Stichprobe zu überprüfen. Der Test auf Normalverteilung zeigt zum Beispiel, ob die Werteverteilung einer Stichprobe von der Normalverteilung abweicht. Ist keine signifikante Abweichung vorhanden, kann die Verteilung als normalverteilt angenommen werden und bspw. können die besonderen Eigenschaften der Normalverteilung zur einfachen Visualisierung der Daten genutzt werden. Das Testverfahren zur Überprüfung auf Ungleichheiten der Varianzen zeigt, ob sich die Abweichungen innerhalb zweier Stichproben signifikant voneinander unterscheiden. Möchte man einen Unterschied oder eine Veränderung zwischen zwei Stichproben statistisch nachweisen, kommt der t-Test für die Überprüfung auf Ungleichheit der Mittelwerte zum Einsatz. Weiterführende Beschreibungen und die entsprechenden Teststatistiken befinden sich im Anhang Abschnitt D ab Seite 227.

Tabelle 3.1: *Eingesetzte statistische Testverfahren*

Normalverteilung	Testverfahren für	
	Ungleichheit der Varianz	Ungleichheit der Mittelwerte
Anderson-Darling-Test	F-Test	t-Test für unabhängige Stichproben
Shapiro-Wilk-Test	Bartlett-Test	t-Test für abhängige Stichproben
Chi-Quadrat-Homogenitätstest	Levene-Test	

3.3.2 Interpretation der statistischen Ergebnisse

Freiheitsgrade, Signifikanzniveau und p-wert

Für die Bestimmung des kritischen Vergleichswertes der Teststatistik werden entsprechende Tabellen verwendet. Es sind dabei die Freiheitsgrade und das Signifikanzniveau zu bestimmen. Die Anzahl der Freiheitsgrade ist von Test zu Test verschieden und ist maximal so groß wie die Anzahl der Beobachtungen innerhalb der Stichprobe. Jede für den Test notwendige Bedingung reduziert dabei die Anzahl der Freiheitsgrade.

Der Forscher legt für den Test vorab das Signifikanzniveau α als Wahrscheinlichkeit fest, auf Basis derer in einem Signifikanztest die Ablehnung der Nullhypothese einen Fehler 1. Art erzeugt. Der Fehler 1. Art bedeutet, dass trotz korrekter Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese entschieden wird. Dem gegenüber steht der Fehler 2. Art, wenn eine falsche Nullhypothese beibehalten wird, obwohl die Alternativhypothese richtig ist. Die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers 2. Art wird als β bezeichnet.

Der p-Wert wird zur Annahme oder Ablehnung der Hypothesen herangezogen und wird auch als beobachtetes Signifikanzniveau beschrieben, das sich auf andere Signifikanzniveaus übertragen lässt. Es ist zu beachten, dass ein nicht-signifikantes Ergebnis kein Beleg für die Richtigkeit der Nullhypothese ist und der p-Wert nicht die Wahrscheinlichkeit der Nullhypothese darstellt. [109]

Effektgröße und Teststärke

Die Effektgröße δ ist der Effekt, der sich aus der Differenz zweier Stichprobenmittelwerte μ und μ_0 ergibt; sprich die wahrnehmbare bzw. quantifizierbare Veränderung. Zur Vergleichbarkeit wird die Effektgröße auf Basis der Standardabweichung standardisiert.

$$\text{Effektgröße} = \delta = \frac{\mu - \mu_0}{\sigma} \quad (3.18)$$

Zum Beispiel entspricht der Wert $\delta = 1,0$ einer Differenz der Mittelwerte, die genau so groß ist wie die Standardabweichung der Rohwerte. Gemäß [110] zit. n. [109] kann der Effekt entsprechend nach seiner Wirkung gruppiert werden:

$$\begin{aligned} \text{kleiner Effekt:} & \quad \delta = 0,2 \\ \text{mittelgroßer Effekt:} & \quad \delta = 0,5 \\ \text{großer Effekt:} & \quad \delta = 0,8 \end{aligned}$$

Die Teststärke ist das Maß der Empfindlichkeit eines Experiments, einen tatsächlich vorhandenen Effekt auch erkennen zu können. Die Teststärke weist die Wahrscheinlichkeit eines Signifikanztests aus, inwieweit der Test positiv zugunsten einer spezifischen Alternativhypothese entscheidet [109]. Die Teststärke wird nachfolgend abgebildet:

$$\text{Teststärke} = \text{Power} = 1 - \beta \quad (3.19)$$

Die Teststärke ist nicht einfach bestimmbar. Bereits vor dem Experiment ist es ratsam die Aussagekraft der Ergebnisse zu ermitteln. Dazu setzt man die Entwurfparameter Signifikanzniveau α , Fehler 2. Art β , Stichprobengröße n und Effektgröße δ in Beziehung. Die entsprechende Formel lautet:

$$z_{\beta} = \frac{z_{1-\alpha} - \tilde{\mu}}{1} = z_{1-\alpha} - \sqrt{n} \cdot \delta \quad (3.20)$$

Anhand des berechneten Wertes z_{β} kann mit Hilfe der dazugehörigen Verteilungsfunktion der prozentuale Fehler 2. Art und nach Gleichung 3.19 die Teststärke ermittelt werden. Mit der Erhöhung der Effektgröße δ kann der Fehler 2. Art verkleinert werden, denn stärkere Effekte lassen sich leichter erkennen. Gleiches gilt für die Erhöhung der Stichprobengröße n und die Erhöhung des Signifikanzniveaus α .

Im Weiteren sollen statistische Signifikanz und praktische Bedeutsamkeit kurz erläutert werden. Mit steigender Stichprobenanzahl n vermag man jede Nullhypothese durch den gleichzeitigen Anstieg der Teststärke mit der Stichprobenanzahl n zu verwerfen. Durch die größere Anzahl an Beobachtungen sind auch kleinere Effekte statistisch nachweisbar. Ein signifikantes Ergebnis ist somit auch allein durch eine größere Stichprobenanzahl erreichbar. Dem gegenüber steht die Bedeutsamkeit der Ergebnisse, wenn z.B. deutliche Differenzen in den Stichprobenmittelwerten auftreten. Daher muss sichergestellt werden, dass die Ergebnisse mittels der Statistik auch abgesichert werden können, da sonst die Ergebnisse ohne praktische Bedeutung sind. Erst die Betrachtung beider Größen erlaubt es, sinnvolle Schlüsse aus den Stichproben abzuleiten.[109]

3.4 Eigenschaften von Variablen

3.4.1 Wahrscheinlichkeitsverteilung

Ist bereits die exakte Bestimmung von Parametern, von denen ein Ergebnis wie z.B. der Energieverbrauch abhängig ist, schwierig, wird sie durch die Wahl der wahrscheinlichen Verteilung eines Parameters noch einmal schwieriger. Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden dazu eingesetzt, um die im Parameter enthaltene Unsicherheit, z.B. abgebildet über Mittelwert und Streuung, in der Simulation von Gebäuden, Anlagen oder Nutzern zu berücksichtigen. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen kontinuierlichen (stetigen) und diskontinuierlichen (diskreten) Verteilungen. Gemäß [111] gibt es mehr als 40 verschiedene Verteilungsformen. Für gewöhnlich werden nur drei Hauptverteilungen (uniform, normale, log-normal) eingesetzt. Die häufige Anwendung gründet auf deren leichter Verständlichkeit und die für den Einsatz notwendigen wenigen Parameter, um die Input-Parameter an reale Daten anzugleichen. Liegen Messdaten in ausreichender Menge und Güte vor, so können sie als Basis für eine empirisch erhobene Verteilung eingesetzt werden [50]. In [112] ist die Anwendung der typischen Verteilungen mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben. Tabelle 3.2 zeigt die wesentlichen Ergebnisse aus [112] mit Ergänzungen aus [50].

Die Auswahl der geeigneten Verteilungsform und die Prüfung der Ergebnisse auf eine bestimmte Verteilung sind grundlegende Aufgaben im Bewertungsprozess. Zur Charakterisierung einer vorliegen-

den Verteilung der vorhandenen Daten (empirisch, theoretisch) stehen eine Vielzahl verschiedener Methoden und Tests zur Auswahl. Grafische Verfahren, wie z.B. Histogramm oder Quantil-Quantil-Plot, sollten mit statistischen Testverfahren (vgl. Tabelle 3.1) zur Unterstützung der Aussagen ergänzt werden (vgl. [50]).

Tabelle 3.2: Wahrscheinlichkeitsverteilung von Parametern (Eigene Tabelle; Datenquelle: [112] [50])

Verteilung	Typ	Beispiel	Vorteil	Nachteil
diskret-uniform	diskret	Zustand Anlage, Anzahl Personen		
uniform	stetig	kaum definierte Parameter, Zufallszahlen	einfachste Verteilungsform	begünstigt Überbewertung von Extrema
normal	stetig	Messdaten	gut bekannt	kann zu negativen Werten führen
log-normal	stetig	Werte, die nicht negativ werden (z.B. Luftwechsel)	nur positive Zahlen	kann zu extrem positiven Werten führen
triangular	stetig	Datenverteilungen zwischen uniform und normal	leicht zu definieren	Überbewertung von Extrema

3.4.2 Abhängigkeit von Variablen

Für die Simulation werden Eingangsparameter zur Berechnung eines Modells benötigt. Grundsätzlich können Parameter auch als Eingangsvariablen (Ursache) und Ergebnisse als Ausgangsvariablen (Wirkung) bezeichnet werden. In der Simulation ist von Interesse, wie sich Eingangsvariablen auf die Ausgangsvariablen auswirken und wie die Variablen untereinander abhängig sind.

Für viele Anwendungsfälle gelten sie als voneinander abhängig, da sich die Variablen gegenseitig beeinflussen [113]. Insbesondere wenn schwer modellierbare Eingangsvariablen, wie z.B. der Nutzer, im Modell vorhanden sind, wird dies wie in Abbildung 3.3 deutlich. Eine Abhängigkeit wird mit Hilfe eines Pfeils dargestellt. Legt man die Werte T_{set} Temperatursollwert, Q_{int} interne Lasten und Q_{sol} solarer Eintrag ohne weiteren Einfluss nach Zeitprofil fest, so sind sie voneinander unabhängig und wirken einzeln auf den Kühlenergiebedarf $Q_{kühl}$. Möchte man den Nutzer mit berücksichtigen, so wird dieser den Temperatursollwert, den Beitrag zu den internen Lasten und die Steuerung eines Sonnenschutzes zur Minimierung der solaren Einträge über das Fenster beeinflussen.

Abhängige Variablen verkomplizieren die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse. Daher ist es gewünscht ein Modell zu finden, das die Beziehung zwischen den Variablen einfach (z.B. $Q_{int} = (100 W + \epsilon) \cdot Belegung$) beschreibt. Für diesen Fall können die Variablen als unabhängig für die Stichprobenziehung betrachtet werden und ϵ ist als Rauschen zu bewerten. ϵ bildet die Unsicherheit bei den $100 W$ ab, indem ϵ den Wert der $100 W$ vergrößert oder verkleinert. [50]

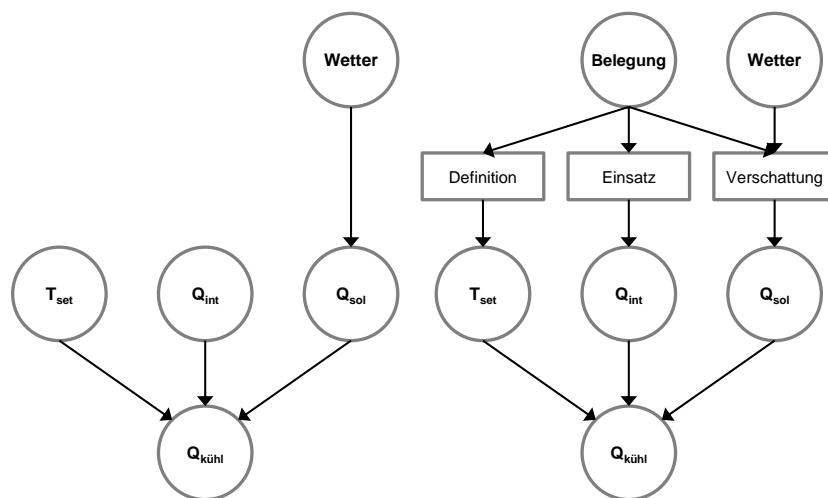


Abbildung 3.3: Abhängige (l.) und unabhängige (r.) Variablen

3.4.3 Unsicherheiten der Informationsquellen

Die Parametrierung einer Simulation benötigt immer Eingangsdaten und dafür stehen unterschiedliche Informationsquellen bereit. Deren Auswahl erfolgt anhand der Kriterien: verfügbare Informationen, Projektumfang, Projektanforderungen und Kostenrahmen. Die Parameter und der Grund für deren Auswahl sind stets zur Einschätzung der im Parameter enthaltenen Unsicherheit zu dokumentieren [50].

Physikalische Grenzen sind die offensichtlichste Einschränkung eines Parameters und der damit verbundenen Unsicherheit. Ein Beispiel ist der Gesamtenergiedurchlasswert g einer Verglasung. Dieser kann von minimal 0 (keine Energie wird durchgelassen) bis maximal 1 (gesamte Energie wird durchgelassen) variieren. Werte über Eins oder unter Null sind daher unzulässig. Physikalische Grenzen geben keine Aussage über die Verteilung eines Parameter in seinem Wertebereich. Daher ist es notwendig eine geeignete Verteilungsform für die Bewertung zu finden.

Mit Hilfe einer Literaturstudie können relevante Parameter, wie z.B. physikalische Größen eines Baustoffes (Wärmeleitfähigkeit, Dichte etc.), für die Simulation ermittelt werden. Insbesondere bei der Gebäudeplanung wird auf Werte aus der Literatur zurückgegriffen. Es ist zu beachten, dass sich Literaturwerte und Werte aus einer eigenen Erhebung durch technologischen Fortschritt deutlich unterscheiden und somit das Ergebnis massiv verändern können. Die Literatur bietet für die Gebäude- und Anlagensimulation keine grundlegende Informationsquelle für die Thematik Unsicherheit [36]. Sie stellt meistens nur geschätzte bzw. gemittelte Einzelwerte und nicht die für die Unsicherheitsbewertung grundlegende Verteilungsart und deren Kennwerte zur Verfügung [50]. Für ausgewählte Parameter können deren Verteilungsart und Kennwerte in [112], [36], [114] nachgelesen werden.

Als weitere Datenquelle können Personen mit fachspezifischem und auf Erfahrung basierendem Wissen als Experten in den Prozess mit eingebunden werden. Dies ist hilfreich, wenn nur wenige Daten vorliegen oder Sachverhalte den Kompetenzbereich des normalen Anwenders übersteigen. Experten

können die Simulation vollständig alleine ausführen oder als Berater Auskunft zur Datenbeschaffung, Informationsqualität oder Modellierung geben.

Die beste Qualität liefert die eigene Datengenerierung in Form von Datenerhebungen und Messreihen. Sie ist aber zeit- und kostenintensiv. Für die Gebäudeplanung ist sie von untergeordneter Wichtigkeit, da kaum real erhebbare Daten für das Gebäude vorliegen. Als Ersatz können Eigenschaften ähnlicher Gebäude für einen Vergleich genutzt werden. Nach [115] werden den Erhebungsmethoden unterschiedliche Qualitäten zugeordnet (s. Abbildung 3.4). Es ist darauf zu achten, dass eine Veränderung der Daten nur in Richtung einer höheren Qualität erfolgen darf, und dass dafür die verwendete Quelle geprüft wird.

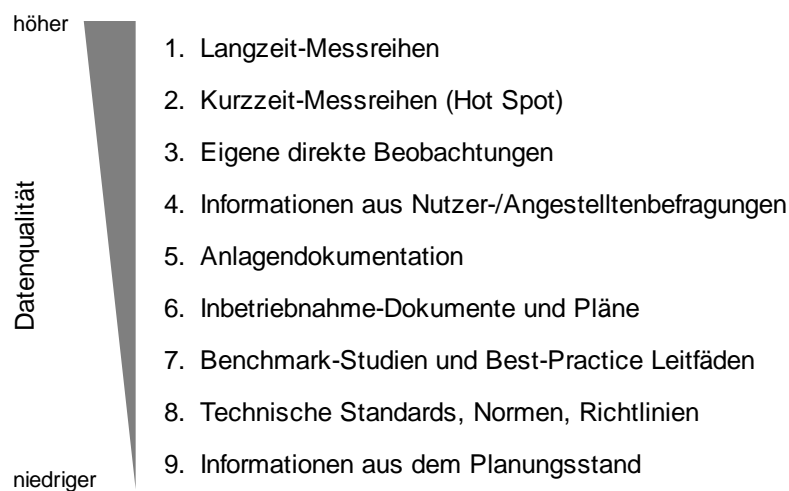


Abbildung 3.4: *Unterschiedliche Qualitäten der Erhebungsmethoden von Daten*

Je nach Umfang und Fokus der Studie kann die Wahl der Parameterverteilung starken Einfluss auf das Ergebnis ausüben. Sucht man z.B. während der Planung nach der energiesparendsten Lösung für den Fensterflächenanteil von 25 bis 100%, so wird dieser Parameter uniform (gleichmäßig) über seinen Parameterraum verteilt. Damit lässt sich ermitteln, welchen Einfluss der Fensterflächenanteil über seinen gesamten Parameterraum auf den Energiebedarf hat. Möchte man z.B. für eine Bestandsgebäudebewertung die Unsicherheit des Fensterflächenanteils durch dessen Schätzung berücksichtigen, so kann eine Normal-Verteilung angesetzt werden. Dies gründet auf der Annahme, dass der reale Wertebereich für den Fensterflächenanteil auf Basis von Fassadenkonstruktionen relativ sicher geschätzt werden kann. Mit Hilfe der Normal-Verteilungsfunktion werden der Wertebereich und die Streuung des Schätzwertes berücksichtigt.

3.5 Sensitivitäts-, Unsicherheits- und Risikoanalyseverfahren

3.5.1 Angewendete Verfahren auf Basis statistischer Methoden

In physikalischen Experimenten ist es üblich den erwarteten Fehler in den Ergebnissen zu quantifizieren, um das Vertrauen in die Wiederholbarkeit des Experiments und in die Ergebnisse selbst zu steigern. Dies erfolgt mit Veränderungen der Eingangsparameter und ist als Sensitivitätsanalyse bekannt. Dabei wird der Effekt eines bewusst kontrollierten Eingangsparameters auf das erzielte Endergebnis beobachtet, dessen Stärke bestimmt und auf deren Basis eine Gewichtung nach Effektstärke vorgenommen [116]. Die bewährten Techniken erhielten Einzug in die Computersimulation mit ganz verschiedenen Zieldefinitionen, wie z.B. Effektgrößen von Stoffen in einem Experiment für Chemiker, Robustheit und Glaubwürdigkeit von Ergebnissen in einer Auslegungsberechnung durch Ingenieure oder Stabilität von Schätzwerten in Modellen zur Bewertung von finanziellen Risiken für Betriebswirtschaftler [117]. Physikalische und theoretische Experimente unterscheiden sich hauptsächlich in der Kontrollierbarkeit ihrer Aspekte. Nur wenige Aspekte eines physikalischen Experiments sind kontrollierbar. Dennoch sind die entwickelten Methoden grundsätzlich effizient, da die Anzahl unsicherer Aspekte ebenfalls klein ist. Im Gegensatz dazu stehen theoretische Experimente mittels Computer, in denen alle Parameter kontrollierbar sind. Aus der Anzahl der unsicheren Parameter und dem gewählten Analyseverfahren ergibt sich der Berechnungsaufwand, der als Maßstab der Effizienz dient [112].

Dabei unterscheidet man zwischen externen und internen Methoden. Für externe Methoden bleiben die mathematischen Grundlagen der Simulation gleich und nur das beschreibende Modell, die Start- und Randbedingungen oder das Lösungsverfahren werden variiert. Gleichzeitig wird wie bei physikalischen Experimenten die Simulationssoftware als Black-Box behandelt, an der verschiedene Eingangsmodelle und Unterschiede in den Ergebnissen untersucht werden. Wird nur der Effekt der Änderung eines einzigen Eingangsparameters auf das Ergebnis untersucht, wird von lokaler Sensitivitätsanalyse gesprochen. Ihr gegenüber steht die globale Sensitivitätsanalyse, in der die gesamte Variation der Parameter (z.B. Unsicherheit) im Modell durch die gleichzeitige Streuung aller betrachteten Eingangsparameter bewertet wird [112]. Beide Verfahren können je nach Anzahl der zu untersuchenden Parameter sehr zeit- und kostenaufwendig werden. Um diese Problematik insbesondere bei großen und rechenintensiven Modellen zu verringern, können Screening-Methoden einen Überblick über die im Modell entscheidenden Faktoren liefern. Sie erlauben zwar eine qualitative, jedoch keine quantitative Einschätzung der Wichtigkeit eines Faktors [117]. Einen tieferen Einblick in die verfügbaren Methoden mit ihren Vor- und Nachteilen erlauben die Arbeiten [50] [112] [117] [118] [119].

3.5.2 Sensitivitätsanalyse mittels Monte Carlo Simulation

Die Monte Carlo Simulation ist eine statistische Methode und kann zu verallgemeinerbaren Ergebnisse führen, die sich auf Signifikanztests stützen. Die Monte Carlo Simulation erzeugt für variable

Stichprobenumfänge die Verteilung eines Kennwertes [109]. Ein mathematisches Modell wird mehrfach auf Basis von künstlich erzeugten Stichproben berechnet und die Auswirkungen werden auf das Ergebnis und dessen Varianz untersucht. Die Monte Carlo Simulation erlaubt es, Sensitivitäten bzw. Unsicherheiten für ein Modell oder ein Ergebnis zu erkennen und zu bewerten.

Der allgemeine Aufbau einer Monte Carlo Simulation ist in Abbildung 3.5 aufgezeigt. Als Beispiel dient ein mathematisches Modell mit k Eingangsparametern. Typische Eingangsparameter in der Gebäudesimulation sind z.B. die unterschiedlichen bauphysikalischen Parameter der Wandaufbauten, die thermischen Lasten der elektrischen Raumausstattung oder die Temperatursollwerte. Für die Untersuchung werden als Stichproben N unterschiedliche Kombinationen der Eingangsparameter in einer Eingangsmatrix gesammelt, die auch als Sample bezeichnet wird. Das Modell wird entsprechend der Anzahl an Stichproben in der Eingangsmatrix N -fach berechnet und die Ergebnisse werden in einen Ergebnisvektor geschrieben. Der Einfluss eines jeden Parameters kann durch eine statistische Analyse über den Ergebnisvektor mit den N Versuchen ermittelt werden [120].

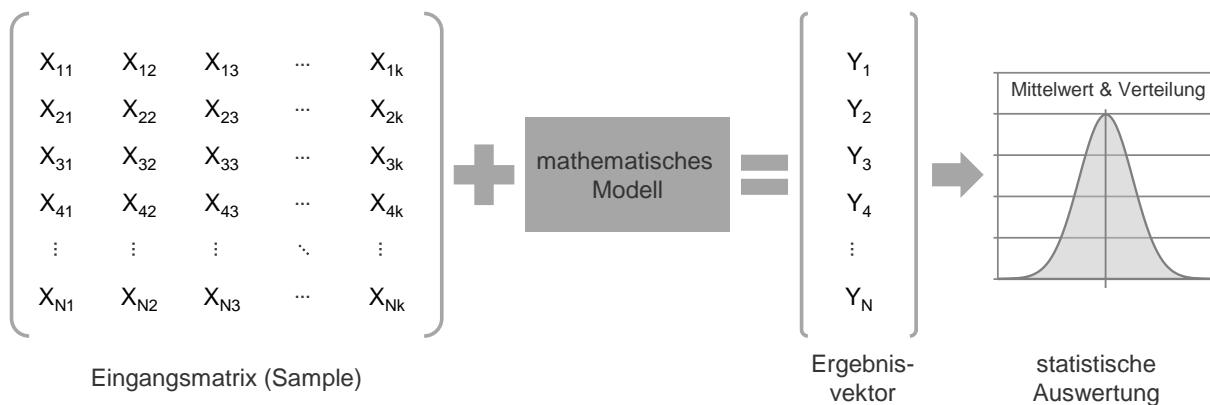


Abbildung 3.5: Schema der Monte Carlo Simulation mit Eingangsmatrix und Ergebnisvektor

Die Eingangsmatrix besteht aus einer Vielzahl künstlich erzeugter Stichproben aus dem mehrdimensionalen Parameterraum. Zur Ziehung einer Stichprobe wurden für die Gebäudesimulation bereits in anderen Studien random sampling, stratified sampling, Latin-Hypercube sampling und Sobol-Sequenzen untersucht. In [121] werden Sobol-Sequenzen als besonders geeignet dargestellt, da das Modellergebnis am schnellsten zu seinem theoretisch geschätzten Mittelwert hin konvergiert. Weiter eignen sich bei steigender Anzahl der Eingangsparameter Sobol-Sequenzen besser als die anderen genannten Verfahren zur Stichprobenerzeugung.

Sobol-Sequenzen gehören zu den quasi-random Sampling Verfahren, die für die uniforme Erzeugung multi-variabler Stichproben in einem mehrdimensionalen Parameterraum entworfen wurden [122]. Die bereits gezogenen Stichprobenwerte werden bei jeder weiteren Ziehung berücksichtigt. Die Berücksichtigung erlaubt es, Wertkonzentrationen oder -lücken zu vermeiden. Dies führt zu einer niedrigen Diskrepanz innerhalb der Stichprobenwerte und lässt das betrachtete mathematische Modell schneller zu seinem realen Mittelwert konvergieren [118].

3.5.3 Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Sensitivitätsindizes

Die nachfolgende Herleitung ist im Wesentlichen aus [123] und [117] entnommen. Sensitivitätsindizes zeigen an, wie stark die abhängige Variable (Ergebnis) von den unabhängigen Variablen (Eingangsparmeter) beeinflusst wird. Die quantitativen und varianzbasierten Sensitivitätsindizes nach Sobol können auf Basis einer Monte Carlo Simulation gebildet werden. Dafür legt Sobol zu Grunde, dass sich eine Funktion $f(x)$ in ihre Summanden zerlegen und nach ansteigender Dimension ordnen lässt:

$$f(x_1, \dots, x_k) = f_0 + \sum_{i=1}^k f_j(x_i) + \sum_{1 \leq i < j \leq k} f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,k}(x_1, \dots, x_k) \quad (3.21)$$

Sobol bewies die Einzigartigkeit der Zerlegung und die Herleitung aller Faktoren aus (3.21) mittels multidimensionaler Integrale. Die Sensitivitätsindizes lassen sich entsprechend natürlich herleiten. Für die Herleitung wird der Einheitswürfel mit der Seitenlänge 1 verwendet. Die gesamte Varianz D der Funktion $f(x)$ ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$D = \int_{\Omega^k} f^2(x) dx - f_0^2 \quad (3.22)$$

Die partiellen Varianzen lassen sich aus jedem einzelnen Faktor aus (3.21) berechnen nach

$$D_{i_1, \dots, i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f_{i_1, \dots, i_s}^2(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_1} \dots dx_{i_s} \quad (3.23)$$

wobei $1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq k$ und $s = 1, \dots, k$ gilt. Durch Quadrieren und Integrieren von (3.21) über Ω^k und der Bedingung, dass alle Summanden in (3.21) orthogonal sind ergibt sich:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} D_{ij} + \dots + D_{1,2,\dots,k} \quad (3.24)$$

Mit den hergeleiteten Varianzen lässt sich nun der Sensitivitätsindex erster Ordnung S_i (first-order sensitivity index) für den Faktor x_i bestimmen nach:

$$S_{i_1, \dots, i_s} = \frac{D_{i_1, \dots, i_s}}{D} \quad \text{für } 1 \leq i_1 < \dots < i_s \leq k \quad (3.25)$$

S_i zeigt den Haupteffekt des Faktors x_i auf das Ergebnis an (der Anteil von x_i an der Varianz von $f(x)$). Mit Hilfe des Sensitivitätsindizes zweiter Ordnung S_{ij} (second-order sensitivity index), für $i \neq j$, kann der Effekt der Interaktion beider Faktoren x_i und x_j beschrieben werden. Es ist der Anteil an der Varianz von $f(x)$ durch x_i und x_j , der nicht durch die Summe beider Einzeleffekte von x_i und x_j beschrieben werden kann. Die Dimension der Indizes kann entsprechend der Parameteranzahl ansteigen. Jedoch verlieren Indizes höherer Ordnung an Einfluss auf das Ergebnis (s. [117]). Die Summe ist entsprechend [123] über alle Sensitivitätsindizes $\sum_{s=1}^n \sum_{i_1 < \dots < i_s} S_{i_1 \dots i_s} = 1$.

Zur Bewertung des Gesamteinflusses eines Eingangsparameters kann dessen Gesamteffekt, der total-sensitivity index (TSI), herangezogen werden. Er bildet sich aus der Summe des entsprechenden First-Order Index mit allen weiteren Indizes höherer Ordnung, die als zusätzliche Effekte aus den Kombinationen mit anderen Parametern hervorgehen. Durch die Summation aller vorhandener Effekte kann der TSI für den betrachteten Parameter Werte größer 1 annehmen; nur für ein Modell, das perfekt additiv ist, nimmt der Wert genau 1 ein. Er wird beispielsweise für ein Modell mit drei Parametern wie folgt beschrieben:

$$TSI = S_{T_i} = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123} \tag{3.26}$$

Dies bedeutet, dass über die beiden Indizes S_i und S_{T_i} mittels der globalen varianzbasierten Sensitivitätsanalyse in $f(x_1, \dots, x_n)$

1. ein Ranking der Eingangsvariablen x_n erfolgen kann,
2. unwesentliche Eingangsvariablen x_n fixiert,
3. Glieder höherer Ordnung in Gleichung 3.21 gelöscht und
4. über die Varianzanteile die absoluten Anteile der Ergebnisstreuung beziffert werden können.

Der Zusammenhang wird beispielhaft in Abbildung 3.6 dargestellt.

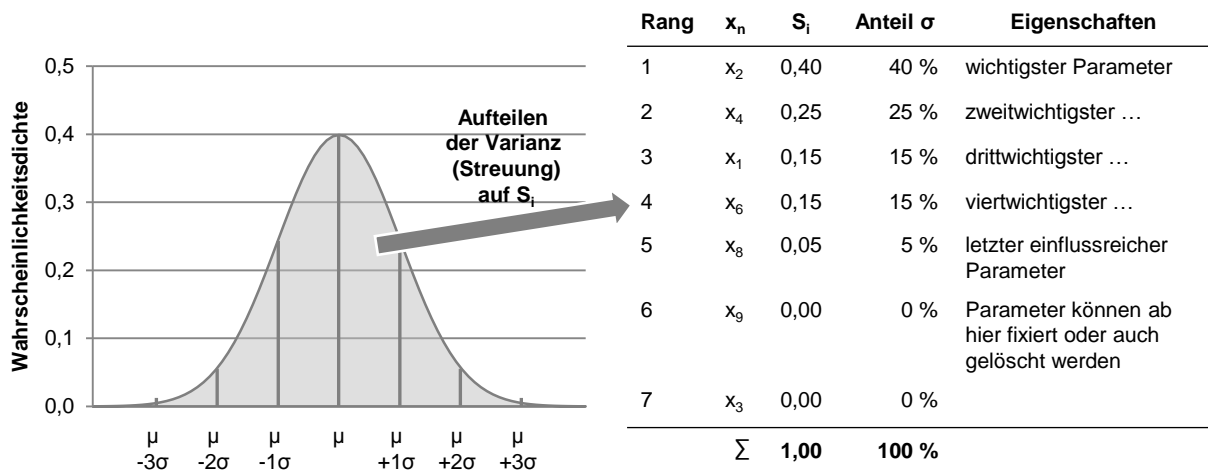


Abbildung 3.6: Identifikation von einflussreichen Parametern und deren Überführung in eine Rangliste

Vorgehen zur Berechnung der Sensitivitätsindizes auf Basis der Monte Carlo Simulation

Folgend wird der Prozess auf Basis von [118] beschrieben, auf welchem Weg die First-Order und Total-Sensitivity Indizes der Eingangsparameter mit Hilfe der Monte Carlo Simulation ermittelt werden können.

1. Erzeugung einer Sample-Matrix $(N, 2i)$ von Zufallszahlen (i ist die Anzahl der Eingangsparameter, N ist die Anzahl der Parameterkombinationen = Anzahl der Simulationsdurchläufe). Unter Beachtung der jeweiligen Verteilung der Eingangsparameter.
2. Erstellung zweier Matrizen A und B , wobei jede genau die Hälfte der Sample-Matrix enthält.
3. Erzeugung von Schnitt-Matrizen $A_B^{(i)}$ aus A und B entsprechend der Anzahl an Parametern. Hierzu wird A als Basis Matrix verwendet und die k -te Spalte in A mit der k -ten Spalte aus B ersetzt.
4. Berechnung aller Varianten der Matrizen A , B und $A_B^{(i)}$ mit dem niedrigen Gesamtaufwand von $N(i + 2)$.
5. Berechnung der Sensitivitätsindizes S_i und S_{T_i} .

Der Prozess zur Erzeugung der Eingangsmatrizen aufbauend auf der Sample-Matrix $Sob(4, 3)$ mit $k = 3$ Parametern und $N = 4$ Simulationsdurchläufen ist exemplarisch in Abbildung 3.7 dargestellt.

$$\text{Sob}(4,3) = \begin{pmatrix} \mathbf{0.500} & \mathbf{0.500} & \mathbf{0.500} & \mathbf{0.500} & \mathbf{0.500} & \mathbf{0.500} \\ \mathbf{0.250} & \mathbf{0.750} & \mathbf{0.250} & \mathbf{0.750} & \mathbf{0.250} & \mathbf{0.750} \\ \mathbf{0.750} & \mathbf{0.250} & \mathbf{0.750} & \mathbf{0.250} & \mathbf{0.750} & \mathbf{0.250} \\ \mathbf{0.125} & \mathbf{0.625} & \mathbf{0.875} & \mathbf{0.875} & \mathbf{0.625} & \mathbf{0.125} \end{pmatrix}$$

A

$A_B^{(1)} =$

$\mathbf{0.500}$	$\mathbf{0.500}$	$\mathbf{0.500}$
$\mathbf{0.750}$	$\mathbf{0.750}$	$\mathbf{0.250}$
$\mathbf{0.250}$	$\mathbf{0.250}$	$\mathbf{0.750}$
$\mathbf{0.875}$	$\mathbf{0.625}$	$\mathbf{0.875}$

B

$A_B^{(2)} =$

$\mathbf{0.500}$	$\mathbf{0.500}$	$\mathbf{0.500}$
$\mathbf{0.250}$	$\mathbf{0.250}$	$\mathbf{0.250}$
$\mathbf{0.750}$	$\mathbf{0.750}$	$\mathbf{0.750}$
$\mathbf{0.125}$	$\mathbf{0.625}$	$\mathbf{0.875}$

$A_B^{(3)} =$

$\mathbf{0.500}$	$\mathbf{0.500}$	$\mathbf{0.500}$
$\mathbf{0.250}$	$\mathbf{0.750}$	$\mathbf{0.750}$
$\mathbf{0.750}$	$\mathbf{0.250}$	$\mathbf{0.250}$
$\mathbf{0.125}$	$\mathbf{0.625}$	$\mathbf{0.125}$

Abbildung 3.7: Exemplarische Erzeugung der Matrizen zur Bestimmung der Sensitivitätsindizes

Einsatz von Schätzern zur Berechnung von S_i und S_{T_i}

Um den Berechnungsaufwand der Sensitivitätsindizes zu reduzieren, werden Schätzer eingesetzt. Für die Berechnung des First-Order Index S_i wird folgende Grundgleichung gemäß Saltelli et al. [122] angesetzt:

$$S_i = \frac{V_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y | X_i))}{V(Y)} \quad (3.27)$$

Die Varianz $V(Y)$ ist die Varianz des Ergebnisses und entsprechend nach Gleichung 3.3 zu bestimmen. Für die Bestimmung von $V_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y | X_i))$ werden folgende Gleichungen zum einen nach Saltelli et al. [122]

$$V_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y | X_i)) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(B)_j (f(A_B^{(i)})_j - f(A)_j) \quad (3.28)$$

und zum anderen nach Jansen [124]

$$V_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y | X_i)) = V(Y) - \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (f(B)_j - f(A_B^{(i)})_j)^2 \quad (3.29)$$

eingesetzt. Für die Bestimmung des Gesamteffekts S_{T_i} wird nachfolgende Grundgleichung nach [125] verwendet:

$$S_{T_i} = \frac{E_{X_{\sim i}}(V_{X_i}(Y | X_{\sim i}))}{V(Y)} = 1 - \frac{V_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y | X_i))}{V(Y)} \quad (3.30)$$

Für $E_{X_{\sim i}}(V_{X_i}(Y | X_{\sim i}))$ wird auf folgende Schätzer nach Sobol ([126] zitiert nach [122])

$$E_{X_{\sim i}}(V_{X_i}(Y | X_{\sim i})) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(A)_j (f(A)_j - f(A_B^{(i)})_j) \quad (3.31)$$

und entsprechend nach Jansen [124] bzw. Saltelli [122]

$$E_{X_{\sim i}}(V_{X_i}(Y | X_{\sim i})) = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (f(A)_j - f(A_B^{(i)})_j)^2 \quad (3.32)$$

zurückgegriffen.

3.6 Zusammenfassung

In theoretischen Modellen sind Unsicherheiten und Ungenauigkeiten vorhanden. Sie führen zu einer bestimmbaren Streuung in den berechneten Ergebnissen. Die Streuung kann mittels einer größeren Anzahl von Beobachtungen, der Stichprobe, quantifiziert werden. Die beschreibenden Werte sind der Mittelwert und die Standardabweichung der Stichprobe. Auf Basis beider Werte können Stichproben durch statistische Testverfahren miteinander verglichen und Aussagen über ihre Beziehung zueinander getroffen werden. Sie dienen in der weiteren Arbeit als Bewertungskriterien.

Müssen Ergebnisse der Stichproben auf Basis theoretischer Modelle erst erzeugt werden, dann sind leicht anwendbare und in der Ausführung schnelle Modelle vorteilhaft. Lineare Regressionsmodelle vereinen diese Eigenschaften in sich und bilden mittels ihrer Regressionskoeffizienten die Beziehung eines Eingangsfaktors auf das Ergebnis ab. Sie werden häufig eingesetzt, um komplexe Modelle anhand wesentlicher Eingangsfaktoren zu vereinfachen und um sie im Rahmen aufwendiger Methoden einzusetzen.

Die einmalige Berechnung eines Modells kann nicht dessen Mittelwert und Standardabweichung liefern. Dies kann mit Hilfe der Monte Carlo Simulations Technik erfolgen, die auf Basis ihrer künstlich erzeugten Stichprobe die Effekte auf das Ergebnis mit Hilfe einer Vielzahl unterschiedlicher Parameterkombinationen der Eingangsvariablen untersucht. Der Einsatz von Sobol-Sequenzen erlaubt es eine optimal verteilte Stichprobe zu erzeugen, um mit ihr eine minimale Anzahl an Simulationsdurchläufen für die Bestimmung des Mittelwertes und der Standardabweichung zu erreichen.

Der Einsatz linearer Regressionsmodelle erlaubt auf Basis der standardisierten Regressionskoeffizienten, erste Effekte und Zusammenhänge von Eingangsfaktoren auf das Ergebnis qualitativ zu bewerten. Die Kombination aus Monte Carlo Simulation und schnell ausführbaren Regressionsmodellen ermöglicht es, in der Berechnung deutlich aufwendigere aber für die Bewertung leistungsstärkere Indikatoren, wie z.B. die varianzbasierten Sensitivitätsindizes, zu bilden. Die varianzbasierten Sensitivitätsindizes beschreiben quantitativ den Anteil eines Eingangsparameters an der Gesamtstreuung des Ergebnisses und können ihrer Größe nach priorisiert werden. Mit Hilfe der Monte Carlo Simulation und den Sensitivitätsindizes sind Unsicherheiten, Ungenauigkeiten im Modell und wesentliche Einflussfaktoren auf das Ergebnis nachvollziehbar zu identifizieren und zu bewerten.

KAPITEL 4

Methodik der Referenzraummethode

4.1 Struktur und Ablauf

Eigenschaften der Referenzraummethode

Die energetische Bewertung von Bestandsgebäuden sollte schnell und einfach erfolgen. Dabei sollte das Einsparpotenzial an Energie und Kosten leicht zu identifizieren sein. Dies erweist sich jedoch als eine schwierige Aufgabe. Zum einen sind Gebäude Teil eines schwer abbildbaren Systems aus Klima, Standort, Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Gebäudenutzer. Zum anderen unterliegen Gebäude wegen ihrer Nutzung einem steten Wandel. Darüber hinaus sollten mehrere Faktoren in einer energetischen Bewertung beachtet werden, wie z.B. Energiebedarf, Energielasten oder Komfortkriterien. Deshalb ist die Referenzraummethode (RRM) ein Ansatz, die energetisch-thermische Bewertung von Gebäuden zu vereinfachen. Die Abbildung 4.1 zeigt die nachfolgenden Zusammenhänge.

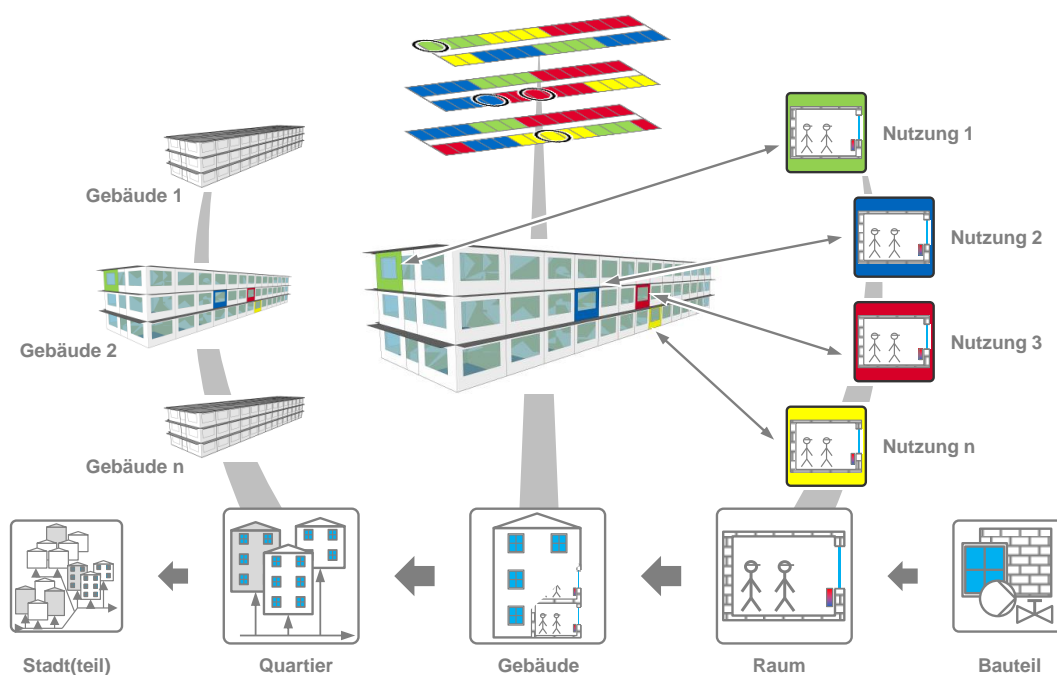


Abbildung 4.1: Prinzip der Referenzraummethode

Die Energiebedarfsschätzung der RRM beruht nur auf den energetisch relevanten Nutzungsarten. Hierzu werden die Flächenanteile einer Nutzungsart berücksichtigt und das energetisch-thermische Verhalten anhand eines nutzungstypischen Referenzraums abgebildet. Der Referenzraum bündelt die Informationen einer oder ähnlicher Nutzungsarten (hinsichtlich Belegungsdichte, Nutzungszeit, Geräteausstattung etc.) und ist der Vertreter für alle gleichen Nutzungen im Gebäude. Ein Gebäude entwickelt sich in der RRM aus charakteristischen Räumen und deren Flächenanteilen (Bottom-Up Ansatz). Als Folge kann auf ein komplexes Gebäudemodell verzichtet werden, denn der Referenzraum wird für sich isoliert in einem 1-Zonenmodell betrachtet. Dies führt zu einer Reduktion des Rechenaufwandes und damit zu kürzeren Ausführungszeiten. Der Gewinn an Rechenzeit kann für den Einsatz leistungsstärkerer und zeitaufwendigerer Simulationsrechenkerne verwendet werden, um mit deren Hilfe weiterführende Informationen zum energetischen und thermischen Verhalten in höherer Auflösung zu erlangen.

Die RRM besitzt somit gegenüber anderen Bewertungsverfahren folgende Vorteile:

- Im Vergleich zum Verbrauchs-Benchmarking ist keine Strichprobe ähnlicher Gebäude nötig.
- Die Frage der Vergleichbarkeit der Gebäude entfällt.
- Die RRM eröffnet die Entwicklung eines individuellen Kennwertes, der den Gebäudecharakter (abgeleitet aus Baustandard, Nutzungsstruktur, Klima etc.) flexibel abbildet.
- Die hohe Ausführungsgeschwindigkeit der RRM erlaubt es weiter, Ungenauigkeiten in den Eingaben mit Hilfe von statistischen Methoden zu berücksichtigen und deren Auswirkungen durch Streubreiten der Ergebnisse anzuzeigen.
- Gegenüber den Bilanzverfahren werden weniger physikalische Prozesse über Transfergleichungen abgebildet.
- Die Berechnung erfolgt in einer höheren zeitlichen Auflösung, was konkretere Aussagen über Last-, Feuchte- oder Temperaturverhalten und Komfort erlaubt.

Der erhöhte Berechnungsaufwand ist durch die Verwendung der schnell berechenbaren 1-Zonenmodelle vertretbar. Die RRM ist gegenüber der klassischen Gebäudesimulation durch die geringere Menge an Eingabedaten im Vorteil. Viele Parameter können vorbelegt und nur die energetisch relevanten Faktoren zur Auswahl angeboten werden. Der Verzicht auf ein detailliertes Gebäudemodell und der Einsatz von 1-Zonenmodellen erhöhen die Ausführungsgeschwindigkeit deutlich. Zum einen müssen für die Berechnung weniger Gleichungen gelöst werden. Zum anderen ist der Modellierungsaufwand von 1-Zonenmodellen viel geringer und kann standardisiert werden. Zusätzlich ist es möglich, bei Ähnlichkeit von Nutzung und Raumgeometrie bereits berechnete Ergebnisse wiederzuverwenden und daraus eine hohe Skalierbarkeit zu entwickeln. Die hohe Ausführungsgeschwindigkeit und insbesondere die Wiederverwendung bereits berechneter Ergebnisse ermöglichen eine schnelle und einfache Erzeugung von Ersatzmodellen der Gebäude. Diese können für die Berechnung höherwertiger quantitativer Sensitivitätsindizes verwendet werden, um damit die Informationsqualität der Bewertung zu steigern.

In der RRM erlaubt der Bottom-Up Ansatz auf Basis der Referenzräume den Energiebedarf z.B. nach Temperaturniveaus der eingesetzten Technologien oder nach Versorgungsstrukturen aufzuteilen.

Diese Aufteilung kann bspw. in eine Quartiersbetrachtung eingebracht und in der Auswahl von zentralen Energieversorgungssystemen und Sanierungsmaßnahmen helfen. Ein schneller Transfer von energierelevanten Informationen ist in der RRM von Raum- über Gebäude- bis hin zur Quartiersebene möglich.

In Abbildung 4.2 wird vereinfacht der modulare Berechnungsansatz der RRM dargestellt. Ein Gebäude wird über seine n wesentlichen Nutzungsarten mit je einem Referenzraum als gebäudespezifische und eigenständige Zonen beschrieben. Die Parametrierung der Nutzungsarten erfolgt anhand weniger wesentlicher Eingangsparameter entsprechend Abschnitt 2.2, wie z.B. der Raumkonditionierung oder den Entwurfparametern wie Fensterflächenanteil oder Luftwechselrate. Ein Gebäude lässt sich somit anhand eines Baukastens von Nutzungsarten aufbauen. Je Nutzung wird der Nutzenergiebedarf für Heizen, Kühlen und Strom bestimmt. Danach wird unter Beachtung eines vom A/V-Verhältnis abhängigen Korrekturfaktors der Gebäudenutzenergiebedarf ermittelt. Er bildet sich aus dem Produkt des spezifischen Energiebedarfs der Referenzzone einer Nutzungsart mit der Gesamtfläche der Nutzungsart.

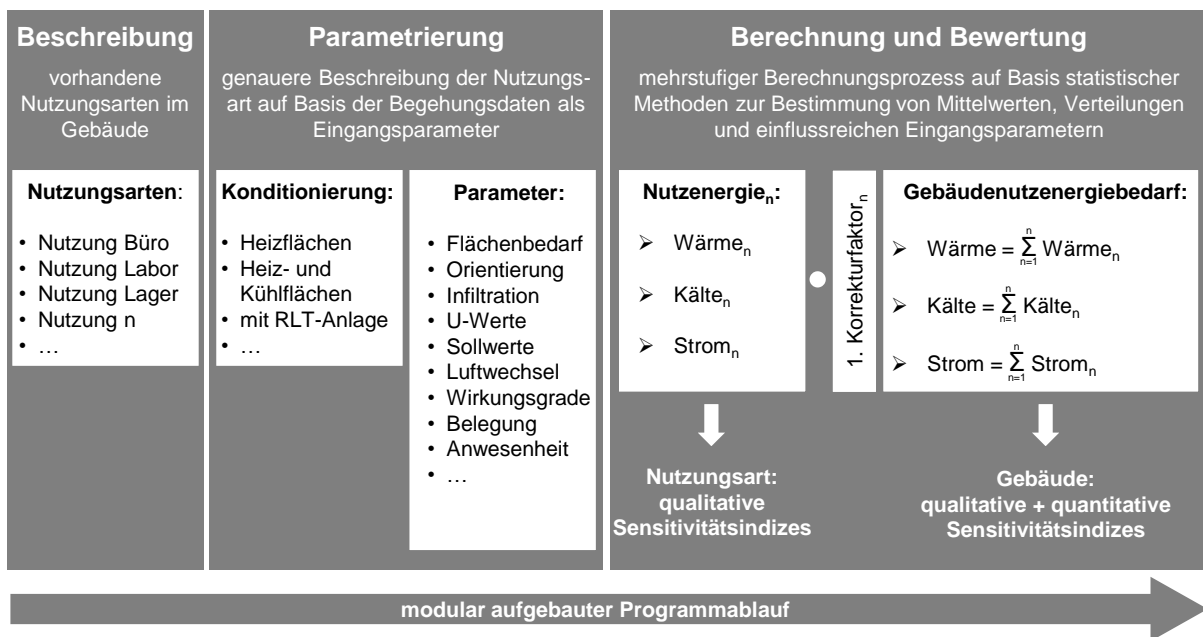


Abbildung 4.2: Modularer Aufbau der Referenzraummethode und deren Programmablauf

Der Anwendungsfokus der RRM liegt auf der Energiebedarfsschätzung eines Gebäudes und den Auswirkungen der Unsicherheiten in den Eingangsparametern auf die Ergebnisse. Hierzu werden Streubreiten der Ergebnisse und energiebezogene Sensitivitätsindizes zu den Eingabeparametern ausgegeben. Die zwei verwendeten Typen von Sensitivitätsindizes besitzen unterschiedliche Qualitäten hinsichtlich ihrer Aussagekraft. Auf der Ebene des Referenzraums werden nur qualitative Sensitivitätsindizes zur Identifikation von Effekten und deren Wichtigkeit bestimmt. Auf der Ebene

des Gebäudes stehen zusätzlich quantitative Sensitivitätsindizes zur Verfügung, die den absoluten Effekt eines Eingangsparameters auf das Gesamtergebnis beschreiben. Die Streubreiten der Ergebnisse und die Sensitivitäten bzgl. der Eingangsparameter erlauben es deshalb, reale Gebäudeverbrauchsweite zu bewerten, einflussreiche Faktoren zu erkennen und daraus die energetische Gebäudequalität nachvollziehbarer abzuschätzen.

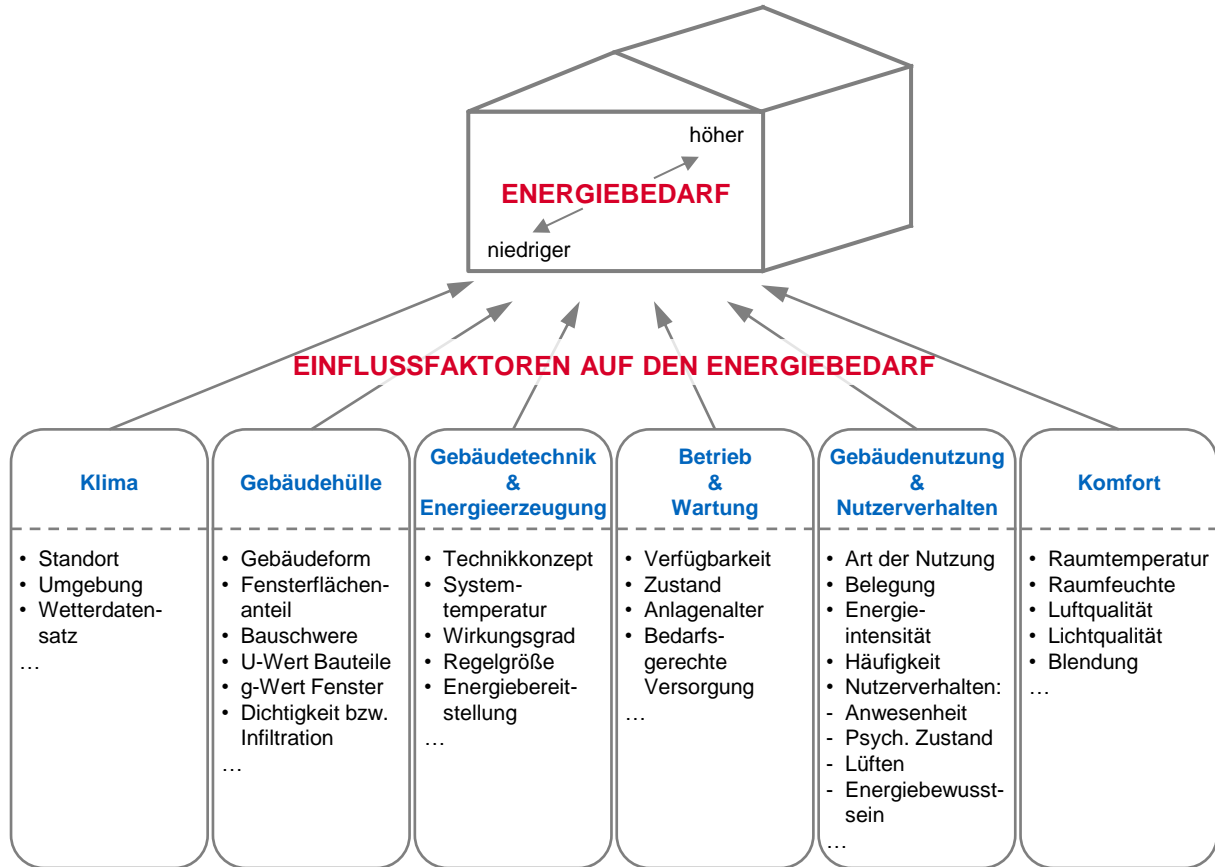
Eingesetzte Werkzeuge und Techniken

Für die energetisch-thermische Simulation der Referenzräume kommt der validierte Rechenkern EnergyPlus [127] zum Einsatz. Die Ungenauigkeiten, die durch Fehlen eines Gebäudemodells entstehen, werden mittels eines Korrekturverfahrens über das A/V-Verhältnis des Gebäudes beachtet. Die berechneten Ergebnisse beruhen auf der Methodik der Monte Carlo Simulation. Ihr Ansatz erlaubt es, Mittelwerte und Standardabweichungen zu bestimmen und mögliche Unsicherheiten in den Eingangsparametern zu adressieren. Hierzu werden die als unsicher geltenden Eingangsparameter, wie z.B. gewählte Raumtemperatur oder interne elektrische Lasten, über einen vorher festgelegten Bereich variiert. Die für die Monte Carlo Simulation notwendige Stichprobe wird mit Hilfe der schnell konvergierenden Sobol-Sequenzen (vgl. Kapitel 3.5.2) erzeugt. Die Eingangsparameter und die Ergebnisse der Monte Carlo Simulation sind die Basis eines linearen Regressionsmodells, das im weiteren Verlauf als schnell berechenbares Ersatzmodell eingesetzt wird. Die Ersatzmodelle ermöglichen es die Sensitivitätsindizes zu bestimmen. Eine erste qualitative Abschätzung der Parametereinflüsse erfolgt anhand standardisierter Regressionskoeffizienten (vgl. Kapitel 3.2.2). Eine quantitative Aussage wird mittels der aus der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse berechneten Indizes ermöglicht (vgl. Kapitel 3.5.3).

4.2 Studienaufbau und wichtige Inhalte

Die hauptsächlichen Einflussfaktoren auf den Energiebedarf wie Klima, Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Energieerzeugung, Betrieb und Wartung, Gebäudenutzung und Nutzerverhalten sowie Komfort wurden bereits in Abschnitt 2.2 vorgestellt und können durch unterschiedliche Merkmale in den jeweiligen Bereichen näher beschrieben werden. In dieser Arbeit ist von Interesse, wie stark sich der Verzicht auf ein detailliertes Gebäudegeometriemodell auf die Genauigkeit der Berechnungen der RRM auswirkt, wenn andere auf den Energiebedarf einflussreiche Faktoren weiter wirken. Insbesondere Nutzungseffekte spielen wegen ihren deutlichen Auswirkungen auf den Energiebedarf eine bedeutende Rolle. Der Nutzenergiebedarf wurde als Bewertungsgröße der RRM ausgewählt, da sowohl das fehlende Gebäudegeometriemodell als auch die Effekte der Nutzungen ihn entscheidend beeinflussen. bzw. ihn maßgebend bestimmen.

Die Abbildung 4.3 zeigt die Auswahl der als energetisch relevant eingestufteten Untersuchungsparameter für die Studien in Kapitel 5,6 und 7. Es erfolgt eine Unterscheidung in baukonstruktionsabhängige Parameter, die entweder den Energietransport über die Gebäudehülle oder die thermische Speicherfähigkeit (Wärmekapazität) der Baukonstruktionen beschreiben, und nutzungsabhängige Parameter, die



Übersicht: Eingesetzte Parameter in der Modellierung der Simulationsmodelle

Baukonstruktionsabhängige Parameter		Nutzungsabhängige Parameter	
Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch
<ul style="list-style-type: none"> • Fensterflächenanteil • Fenster U-Wert • Fenster g-Wert • Sonnenschutz fest • Dach U-Wert • Dach Wärmekapazität • Außenwand U-Wert • Außenwand Wärmekapazität • Bodenplatte U-Wert • Bodenplatte Wärmekapazität • Innenwand Wärmekapazität 	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltrationsrate 	<ul style="list-style-type: none"> • Raumtemperatursollwertanpassung $\pm \Delta \theta$ • Raumlufffeuchte Max. • Raumlufffeuchte Min. • Beleuchtung Anschlussleistung • TGA Δt Einschaltzeitpunkt • WRG Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Person Belegungsdichte • Person Wärmeabgabe • Person Anwesenheit • Person Frischluftbedarf • Luftwechselzahl • Raumtemperatur Heizen • Raumtemperatur Kühlen • Sonnenschutz beweglich • Elek. Geräte Anschlussleistung • Elek. Geräte Standby • Nutzungsbeginn • Nutzungsende

Abbildung 4.3: Studienaufbau

Qualitätsanforderungen an das Raumklima darstellen oder die Nutzungseigenschaften energetisch abbilden.

Die energetische Modellierung berücksichtigt eine Aufteilung in zwei Hauptbereiche „baukonstruktionsabhängige Parameter“ und „nutzungsabhängige Parameter“ mit einer weiteren Untergliederung in „statisch“ und „dynamisch“. Für den ersten Hauptbereich „baukonstruktionsabhängige Parameter“ gelten Parameter als statisch, die keine entscheidende Veränderung im Betrachtungszeitraum erfahren oder eine verlässliche Schätzung erlauben, wie z.B. der U-Wert in Abhängigkeit des konstruktiven Aufbaus einer Außenwand oder eines Fensters. Als dynamisch wird der Parameter Infiltration der Zone bzw. des Gebäudes betrachtet. Zum einen ist die Infiltration abhängig von dem Temperaturunterschied zwischen Innen und Außen sowie von Stärke und Anströmrichtung des Windes auf das Gebäude. Zum anderen kann auf Basis einer Begehung mit rein visueller Prüfung die Infiltration infolge von Undichtigkeiten in der Gebäudehülle oder infolge eines Luftaustausches beim Öffnen und Schließen der Außentüren nur sehr schwierig abgeschätzt werden. Für den zweiten Hauptbereich „nutzungsabhängige Parameter“ erfolgt die Aufteilung nach den Gesichtspunkten, wie leicht und wie oft sich der Parameter durch den Nutzer ändern lässt oder ob die Nutzungsart eine technische Lösung ausschließt, wie z.B. den Einsatz einer Wärmerückgewinnung (WRG) im Laborbereich in Abhängigkeit von den gesundheitsgefährdenden Eigenschaften der Abluft. In der Kategorie „statisch“ befinden sich damit Parameter, wie z.B. die maximale Raumlufffeuchte oder die Anschlussleistung der Beleuchtung, die innerhalb eines längeren Zeitraums über die technische Gebäudeausrüstung gewährleistet werden oder sich innerhalb einer Nutzungsart nur selten verändern. In der Kategorie „dynamisch“ sind Parameter aufgeführt, die einerseits sehr leicht vom Nutzer im Raum beeinflusst werden können (z.B. Raumtemperatur, Nutzungszeiten) und andererseits sich über den betrachteten Zeitraum häufig ändern können (z.B. Geräteausstattung für Versuche im Labor, mitgebrachte Geräte im Hörsaal). Zudem können interne Lasten (z.B. Geräteausstattung) mit ihrem thermischen Eintrag in den Raum die Energiebilanz entscheidend beeinflussen.

Um die Effekte besser beurteilen zu können, gliedert sich die Arbeit in die drei Bereiche Gebäudehülle und Bauschwere, Nutzung sowie deren Kombination in ausgewählten Case-Studies. In Kapitel 5 wird diskutiert, ob das Konzept der RRM grundlegend funktioniert. Dabei liegt der Fokus auf Unsicherheiten, die die Parameter der Gebäudehülle und der Bauschwere verursachen. Für ein Referenzgebäude werden typische Gebäudebetriebsweisen nachgestellt und Einflüsse durch Personennutzungen werden bewusst vermieden, um die Auswirkungen des fehlenden Gebäudegeometriemodells auf die Berechnungsgenauigkeit der RRM analysieren zu können.

Nutzungseinflüsse auf den Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen sind das zentrale Thema im Kapitel 6. Die Effekte und die Einflussstärken der Untersuchungsparameter auf den Nutzenergiebedarf werden in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rahmenbedingungen diskutiert. Dabei wird dargestellt, welche Summenanteile die vorgestellten Kategorien an den Abweichungen besitzen und welche Auswirkungen für eine Bewertung damit einhergehen können.

In Kapitel 7 werden die gewonnenen Erkenntnisse kombiniert. Es wird gezeigt, ob sich die RRM für die Energiebedarfsabschätzung eines Gebäudes mit mehreren Nutzungsarten eignet. Wichtig ist hierbei zu erfahren, wie stark sich die Vereinfachungen in der RRM auf die Genauigkeit hinsichtlich

Energiebedarfsberechnung und Bestimmung der Sensitivitätsindizes auswirken, wenn mehrere Nutzungsarten in der Bewertung vorliegen.

4.3 Softwarekonzept

Die deutliche Reduktion des Aufwands für Parametrierung und Berechnung ist das grundlegende Ziel. Hierzu wird der sonst übliche Simulationsprozess eines Gebäudes in kleinere, leichter und schneller zu lösende Teile gegliedert. Es ist ein zweistufiger Prozess mit den Stufen Zonenberechnung und Gebäudeberechnung. Die Unterteilung des Prozesses und der Aufbau des Gebäudes in Referenzzonen eröffnen ein gleichzeitiges Abarbeiten mehrerer Prozesse (Parallelisierung) und im Idealfall kann bei Existenz eines gleichen oder sehr ähnlichen Datensatzes einer Referenzzone die erneute Berechnung eingespart werden. Die Analyse der mathematischen Ähnlichkeiten von Räumen ist nicht Teil dieser Arbeit. Zur leichteren Interpretation der Ergebnisse sind für beide Stufen neben Ergebnistabellen auch Radar-Charts, Histogramme und Box-Plots hilfreich und vorgesehen. Zuerst erfolgt eine vollständige Beschreibung des geplanten Prozesses und danach eine verkürzte Version für die Umsetzung des Prototypen. Der Programmablauf wird in Abbildung 4.4 aufgezeigt.

Berechnung mittels Zonenmodell

Für jede der zu betrachtenden Nutzungen n ist ein eigener Parametersatz zu hinterlegen. Der Parametersatz beschreibt anhand charakteristischer Parameter, wie z.B. Personenbelegung, Anwesenheit oder interne Lasten, die Nutzungseigenschaften. Dabei werden jeweils der Mittelwert und der Variationsbereich des Parameters in $\pm x\%$ vom Mittelwert angegeben. Anhand der Angaben werden n Stichproben aus dem mehrdimensionalen Parameterraum gezogen und als eigenständiger Parametersatz in das Eingangssample (1.Sample) für die Monte Carlo Simulation abgelegt. Der Berechnungsprozess ist folglich in Abhängigkeit der Stichprobenanzahl n -mal durchzuführen. Bevor eine Berechnung angestoßen wird, ist eine Überprüfung entsprechend ausgewählten Kriterien nach bereits vorhandenen und ähnlichen Referenzräumen angedacht (die Prüfung auf mathematische Ähnlichkeit ist nicht Teil dieser Arbeit). Kann ein ähnlicher Raum als geeignet identifiziert werden, kann auf die Berechnung verzichtet und zum späteren Zeitpunkt auf die vorhandenen Simulationsdaten zurückgegriffen werden. Für jede andere Nutzung wird für die Berechnung des Mittelwertes \bar{x}_{Zone} und der Standardabweichung s_{Zone} eine eigene Monte Carlo Simulation auf Basis der schnell konvergierenden Sobol-Sequenzen durchgeführt. Die Parametersätze werden mittels EnergyPlus parallelisiert berechnet. Mit den Ergebnissen können standardisierte Regressionskoeffizienten gebildet und einer ersten qualitativen Sensitivitätsanalyse unterzogen werden. Alle Ergebnisse sind in einer Datenbank abzulegen.

Berechnung mittels Gebäudemodell

Für die Energieberechnung des Gebäudes werden alle notwendigen Eingangsdaten und Ergebnisse aus den entsprechenden Zonenmodellen entweder neu berechnet oder aus der Datenbank abgefragt.

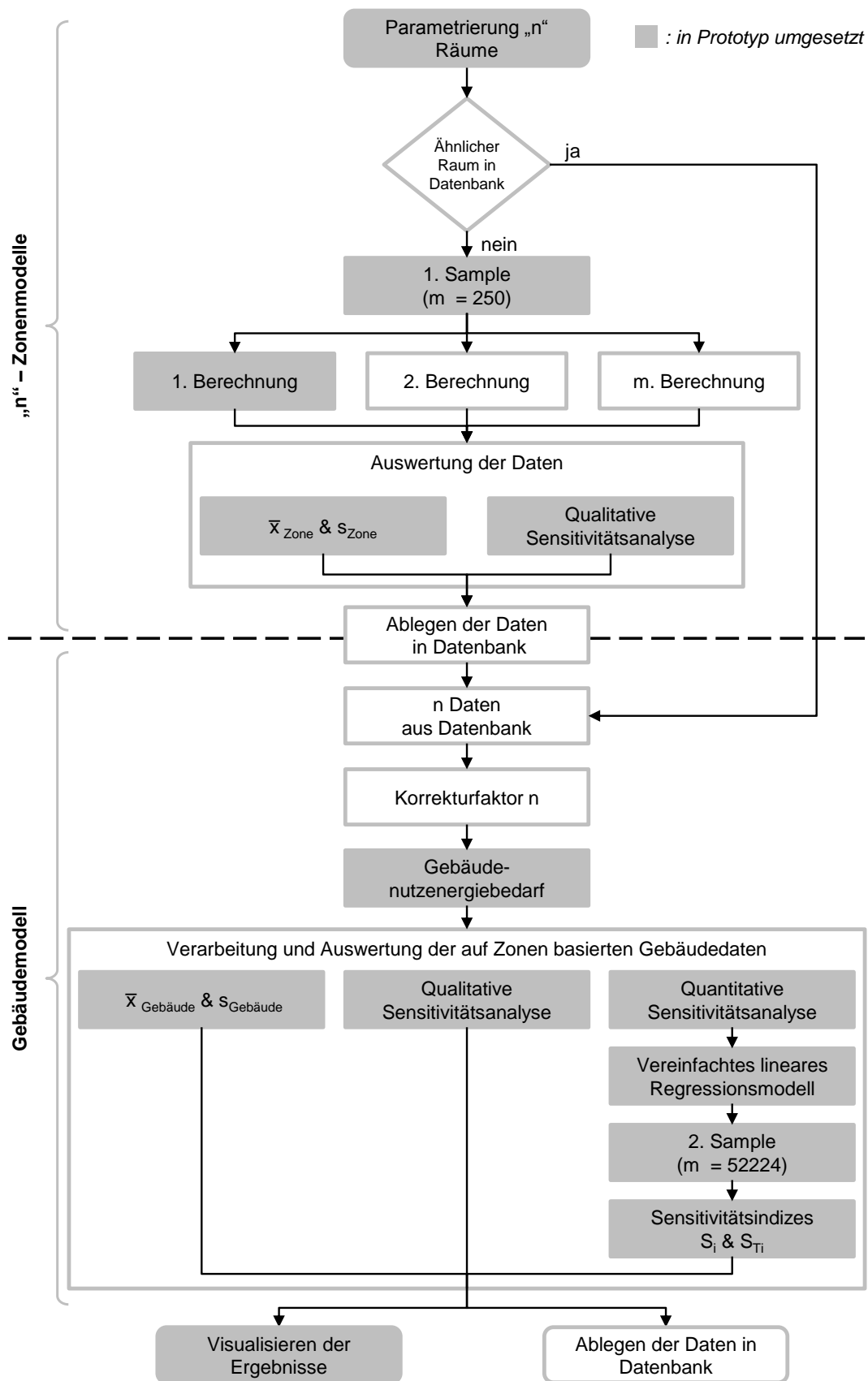


Abbildung 4.4: Ablaufschema zur Softwareumsetzung der Referenzraummethode

Infolge des Verzichts auf ein Gebäudemodell werden Nutzungen entsprechend ihrem erwarteten Energiebedarf und in Abhängigkeit des A/V-Verhältnisses für die Berechnung des Gebäudeenergiebedarfs korrigiert. Der Mittelwert $\bar{x}_{\text{Gebäude}}$ und die Standardabweichung $s_{\text{Gebäude}}$ des Gebäudes bilden sich aus der Summe aller flächengewichteten Energiedaten der betrachteten Nutzungen. Neben der qualitativen Sensitivitätsanalyse wird zusätzlich eine quantitative Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Sensitivitätsindizes S_i und S_{T_i} durchgeführt. Über alle vorkommenden Nutzungen im Gebäude wird ein zweites Eingangssample (2.Sample) auf Basis der Eingangsparameter der Zonenmodelle erzeugt. Die für das Sample notwendigen Mittelwerte und Variationsbereiche sind dabei flächengewichtet. Das Sample ist die Basis für das lineare Regressionsmodell, das für die varianzbasierte Sensitivitätsanalyse eingesetzt wird. Alle wichtigen Daten und Ergebnisse werden visualisiert und in der Datenbank abgelegt.

Notwendige Vereinfachungen für den Prototyp

Mit dem Prototyp soll gezeigt werden, dass die in der RRM hinterlegte Theorie und Berechnungslogik gleichwertige Ergebnisse wie eine detaillierte Simulation liefern. Für die Umsetzung in einem Tabellenkalkulationsprogramm wurden Vereinfachungen notwendig und an geeigneten Stellen umgesetzt.

Verkürzungen im Prozess

Der Eingabeprozess von den Parametern und die Ansteuerung von EnergyPlus tragen nicht zur Steigerung der Ergebnisqualität bei, da beide keinen Einfluss auf die Berechnung des energetisch-thermischen Verhaltens des Gebäudes haben. Die Implementierung von beiden ist eher eine Aufgabe der Informatik. Folglich wird der Arbeitsprozess von EnergyPlus isoliert betrachtet. Die angewandte Vorgehensweise zeigt vielmehr, welche hohen Ausführungsgeschwindigkeiten erreicht werden können, wenn Informationen und Ergebnisse bereits vorliegen. Grundlage für die linearen Regressionsmodelle sind die Berechnungsergebnisse aus EnergyPlus. Wesentliche Hauptnutzungen der Gebäude wurden berechnet und deren Modelle weisen ein hohes Bestimmtheitsmaß auf. Eine weitere damit verbundene Beschränkung ist der Standort München, der durch die Auswahl des Wetterdatensatzes in der Simulation vorgegeben ist.

Eingesetzte Fremdsoftware

Die im Tabellenkalkulationsprogramm integrierte Varianzanalyse verarbeitet nur 16 Variablen. Diese Limitierung konnte mit Hilfe des frei verfügbaren Add-In OLS Regression [128] umgangen werden. Eine weitere Limitierung erfolgt durch den adressierbaren Arbeitsspeicher der verwendeten Software. Für eine sehr hohe Ausführungsgeschwindigkeit wurden Lese- und Schreibprozesse minimiert und eine maximale Adressierung des Arbeitsspeicher angestrebt. Die hohe Anzahl an transformierten Matrizen in der Berechnung der quantitativen Sensitivitätsindizes definierte die Anzahl der Parameter und möglichen Kombinationen. Bei Beachtung ausreichender Genauigkeit in der Bestimmung der quantitativen Sensitivitätsindizes können bis zu 31 Parameter mit 100.000 Kombinationen im Prototyp untersucht werden. Sobol-Sequenzgeneratoren erzeugen die Verteilungen der erforderlichen Stichproben. Für den Umfang mit 250 Kombinationen werden SimLab 2.2 [129], mit 400 bzw. 100.000

die R Toolbox randtoolbox [130] eingesetzt. Diese Samples sind im Prototyp als Basis-Samples fest hinterlegt. Für die Monte Carlo Simulation werden alle Eingangssamples mittels der Basis-Samples erzeugt. Hierzu werden die Stichproben der untersuchten Eingangsparameter entsprechend der Verteilung des Basis-Samples gebildet.

Abgrenzung zu IT-Infrastruktur

Durch den Einsatz des Tabellenkalkulationsprogramms wird zugunsten einer leichten Verbreitung und Überprüfung der Annahmen auf eine leistungsstarke IT-Infrastrukturen wie Datenbanken, Werkzeuge zur Parallelisierung oder Ähnlichkeitsüberprüfung verzichtet. Die IT-Infrastruktur ist Teil des Forschungsvorhabens „Energieeffiziente Hochschule - Campus Information Modeling“ (BMW FKZ: 03ET1176A-D). Sie soll den Eingabe- und Bewertungsprozess mit einer Softwareanwendung weiter vereinfachen und beschleunigen. Der Einsatz einer IT-Infrastruktur wirkt sich nicht auf die spätere Berechnungsqualität der RRM aus.

4.4 Zusammenfassung

Der Aufbau der RRM eröffnet, Gebäude und vorhandene Nutzungen energetisch separat oder als ein Ganzes zu betrachten. Auf Nutzenebene stehen Informationen zu Energiemengen, Verhalten, Sensitivitäten etc. zur Verfügung. Sie können einfach von Zonen auf Gebäudeebene flächengewichtet skaliert werden. Damit kann bereits der Effekt einer einzelnen Parameteränderung in einer Nutzungsart auf das Gebäude schnell erkannt, diskutiert und bewertet werden. Die flächengewichtete Berechnung des Energiebedarfs erlaubt weiterhin, flexibel und schnell auf Nutzungsänderungen im Gebäude reagieren zu können. Hierfür ist nur eine neue Zuweisung von Flächen zu einem entsprechenden Referenzraum und einer Orientierung erforderlich.

Wegen der hohen Ausführungsgeschwindigkeit der RRM sind aufwendigere statistische Methoden einsetzbar, um robustere und leichter nachvollziehbare Ergebnisse zu erhalten. Einerseits können mit Hilfe des Monte Carlo Simulation Ansatzes Mittelwerte, Standardabweichungen, Bandbreiten der Ergebnisse und deren Wahrscheinlichkeit bestimmt werden. Andererseits können einflussreiche Parameter mit Hilfe der Sensitivitätsindizes erkannt, gefiltert und deren Effekt quantifiziert werden. Daher erleichtern sie die Einschätzung und Bewertung von realen Verbrauchswerten. Insbesondere schwer abbildbare Effekte auf den Energieverbrauch, wie z.B. die des Nutzereinflusses, sind schnell zu erkennen und energetisch einzuschätzen.

Abbildung 4.5 soll diesen Zusammenhang beispielhaft verdeutlichen. Durch Unsicherheiten in den Eingangsparametern streut das Ergebnis um den Mittelwert 100 mit einer Standardabweichung von 5. Auf Basis der qualitativen Sensitivitätsindizes werden aus einer Vielzahl an Parameter sechs Parameter als relevant identifiziert. Deren absoluter Einfluss wird über die quantitativen Sensitivitätsindizes (S_i) bestimmt. Aus den sechs Parametern erweist sich der Temperatursollwert mit 40% Anteil an der Streuung als stärkster, die Infiltration mit 25% als zweit-stärkster Parameter usw. Die Nutzungseffekte nehmen mit 75% in Summe den größten Anteil in der Streuung ein, sind somit

Hauptinflussfaktoren und der Energieverbrauch verhält sich ihnen gegenüber sensitiv. Zwei Maßnahmen lassen sich daraus entwickeln. Als Erstes sollten die Unsicherheiten in diesen Parametern reduziert werden. Gelten sie danach immer noch als Hauptinflussfaktoren, sind als Zweites mit diesen Parametern in Zusammenhang stehende Energieeinsparmaßnahmen zu untersuchen. Weiter ist auf diese Parameter in weiterführenden Untersuchungen zu achten.

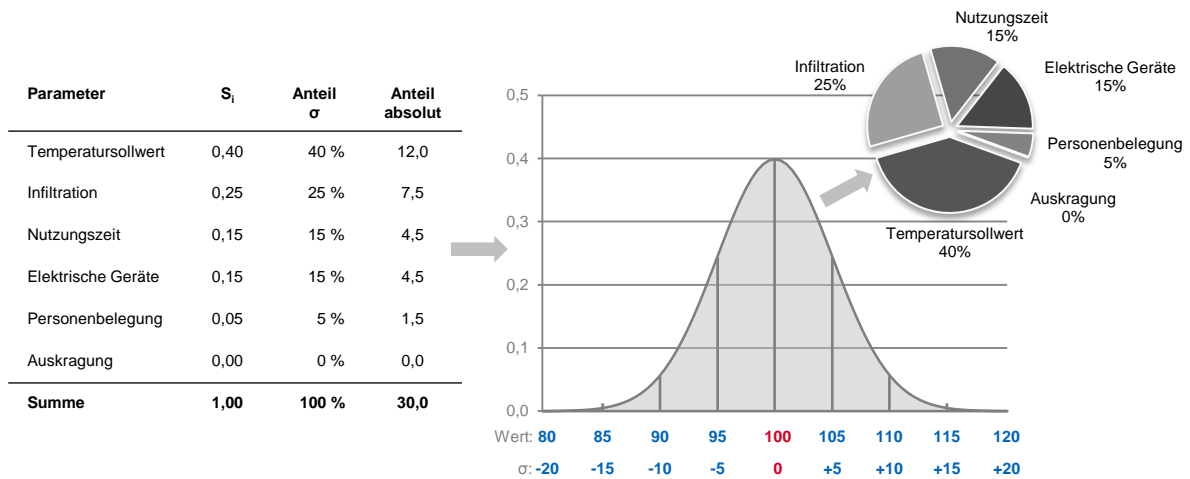


Abbildung 4.5: Interpretationsmöglichkeit der berechneten Ergebnisse

KAPITEL 5

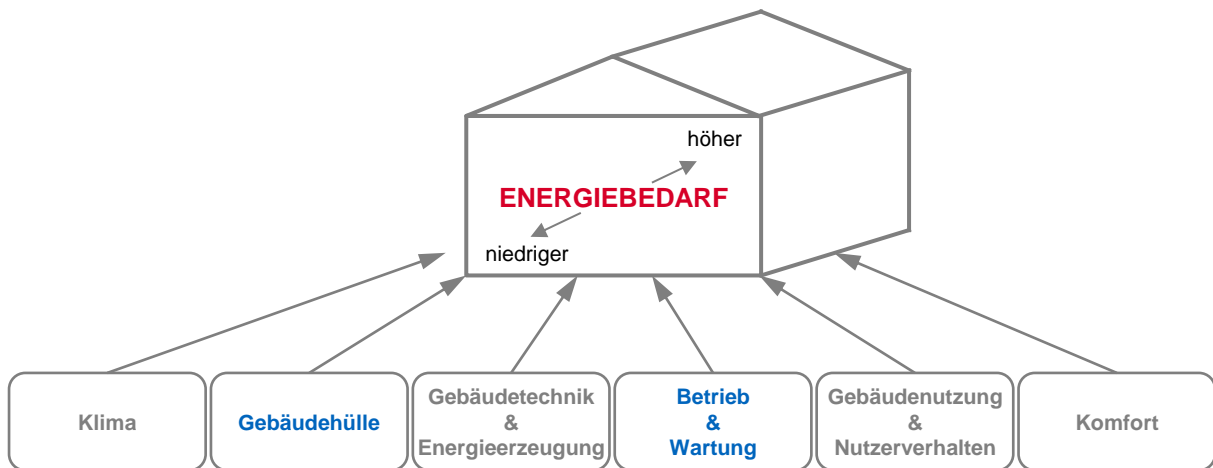
Referenzräume zur Berechnung des thermischen Gebäudenutzenergiebedarfs

5.1 Einführung in die Simulation und Rahmenbedingungen

Die energetische Bewertung von Hochschulgebäuden ist schwierig. Die Gebäude unterscheiden sich in ihrer Form, Alter, Baukonstruktion, Nutzung und Gebäudetechnik. Sehr oft gelten die Gebäude für eine energetische Bewertung als groß. Teilweise besitzen sie eine Nettogrundfläche von mehreren Tausend Quadratmetern. Die Gebäudebewertung ist daher zeitaufwendig und folglich sind Möglichkeiten willkommen, die den Aufwand reduzieren. Der Fokus auf typische Räume, wie er in der Referenzraummethode (RRM) Anwendung findet, ist eine Möglichkeit den Aufwand in der Datenerhebung und in der späteren Parametrierung und Berechnung des Modells zu verringern.

Anhand eines Referenzgebäudes sind typische Gebäudebetriebsweisen nachgestellt. Die Effekte einer Personennutzung sind bewusst ausgeschlossen, um die Auswirkungen des fehlenden Gebäudegeometriemodells in der RRM auf die Genauigkeit der Energiebedarfsberechnung analysieren zu können. Dabei liegt der Fokus auf Unsicherheiten, die durch die baukonstruktionsabhängigen Parameter (U-Werte der Gebäudehülle, Wärmekapazität etc.) verursacht werden. Der Energiebedarf des Gebäudemodells ist hierbei im wesentlichen vom Energieaustausch über die Gebäudehülle abhängig. Die energetisch relevanten Untersuchungsparameter repräsentieren die statischen und dynamischen baukonstruktionsabhängigen Parameter gemäß Abbildung 5.1.

Für die Bewertung der RRM wird ein Vergleich mit den Ergebnissen des detaillierteren Gebäudemodells durchgeführt. Dabei ist es von Interesse, welche Effekte auftreten und welche Abweichungen die Vereinfachungen nach sich ziehen. Dabei dient ein theoretisches Gebäude als Referenzgebäude. Die Gebäudegeometrie folgt der an Hochschulen häufig vorkommenden Form eines Zweibundes. Andere Gebäudeformen lassen sich aus dem Zweibund und dessen Berechnungsergebnissen theoretisch entwickeln. Jeweils ein Raum mit nord- oder südorientierter Fassade im 1. Stockwerk (Zone 5) wird als Referenzzone gewählt. Diese Räume erfüllen die gleiche Randbedingung an adiabate Innenflächen (Innenwand, Fußboden, Decke), wie das 1-Zonenmodell in der RRM. Sie sind in allen Richtungen von gleichen Nutzungen umgeben und somit thermisch isoliert. Der Auswahlprozess wird in Abbildung 5.2 gezeigt.



Übersicht: Eingesetzte Parameter in der Modellierung der Simulationsmodelle

Baukonstruktionsabhängige Parameter	
Statisch	Dynamisch
<ul style="list-style-type: none"> • Fensterflächenanteil • Fenster U-Wert • Fenster g-Wert • Sonnenschutz fest • Dach U-Wert • Dach Wärmekapazität • Außenwand U-Wert • Außenwand Wärmekapazität • Bodenplatte U-Wert • Bodenplatte Wärmekapazität • Innenwand Wärmekapazität 	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltrationsrate

Abbildung 5.1: Studienkonzept zur Analyse des Effekts des fehlenden Gebäudegeometriemodells auf den Gebäudeenergiebedarf

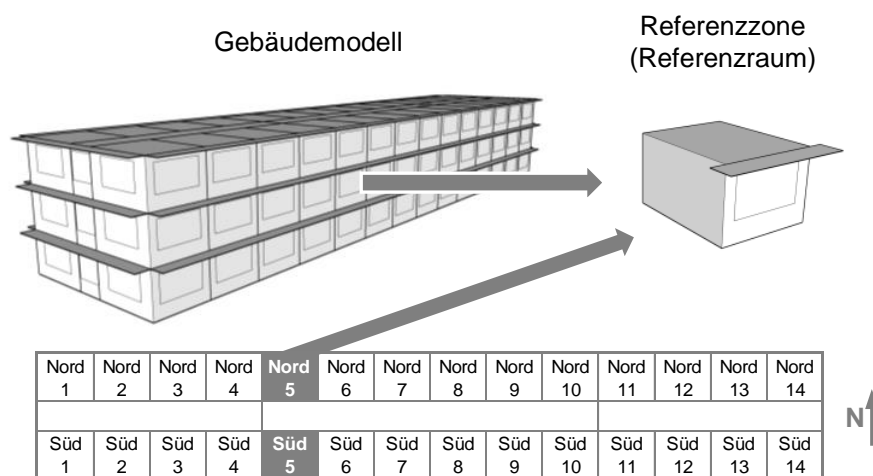


Abbildung 5.2: Typischer Zweibund als Referenzgebäude mit Auswahl der Referenzzonen

Gebäudegeometrie und Zonierung

Die Flächenverteilung des Zweibundes sieht die Hauptnutzungsarten an den Fassaden und die Erschließungsflächen im Gebäudeinneren vor. Die Zonierung des Modells erfolgt im Gebäudemodell raumweise durch Einzelzonen. Dies erlaubt eine spätere Skalierung für unterschiedliche Kompaktheitsgrade und eine Interpretation der energetischen Effekte bei Räumen mit unterschiedlicher Anzahl an Außenwänden. Die Geometrie des Referenzgebäudes baut auf den nachfolgenden Werten (s. Tabelle 5.1) auf.

Tabelle 5.1: Grundlegende Informationen zum Referenzgebäude

Gebäude		Raum	
Typ:	Zweibund	Achsraaster:	1,35 m
Stockwerke:	3		
Höhe:	9 m	Höhe:	3 m
Breite:	12 m	Breite:	4,05 m
Länge:	56,7 m	Tiefe:	5 m
A_{BGF} :	2.041 m ²	A_{Raum} :	20 m ²
$A_{\text{Hüllfläche}}$:	2.597 m ²	A_{Fassade} :	12,15 m ²
$V_{\text{Gebäude}}$:	6.124 m ³	V_{Raum} :	61 m ³
A/V:	0,42		

Entwurfsparameter und bauphysikalische Daten

Das Gebäude ist als Riegel ausgeführt und freistehend. Es ist nicht unterkellert und die Bodenplatte grenzt an das Erdreich. Die oberirdische Gebäudehülle ist vollständig dem Wetter ausgesetzt. In Tabelle 5.2 sind die Untersuchungsparameter mit ihrem angenommenen Wertebereich aufgeführt. Ihre Auswahl erfolgte anhand der energetischen Kriterien aus Abschnitt 2.2. Die Größe der Bandbreite der Parameter ist so gewählt, dass generelle Effekte auf den Energiebedarf des Gebäudes erkennbar werden⁸. Die Eingangsparameter stellen eine typische Auswahl an Parametern für die Optimierung des Gebäudeenergiebedarfs dar. Der Fokus liegt auf den baukonstruktionsabhängigen Parametern und nicht auf der Nutzung. Für die Ziehung der Stichproben sind die gezogenen Werte der Untersuchungsparameter uniform über ihren Wertebereich verteilt. Die Summe aller Stichproben bildet den Parametersatz, der als Eingangssample für die mehrmalige Berechnung des Gebäudemodells und der RRM dient.

Betriebsweisen des Referenzgebäudes

Ein typischer Gebäudebetrieb wird anhand dreier Betriebsarten nachgebildet. Im „Stützbetrieb“ werden zu keiner Zeit die eingestellten Sollwerte der Raumtemperatur für Heizen unterschritten oder für

⁸In der Bewertung realer oder zu planender Gebäude werden die Bandbreiten der Parameter viel kleiner gewählt - meist im Bereich ihrer Unsicherheit.

Kühlen überschritten. In der weiteren Betriebsweise des Gebäudes „mit Betriebszeit“ werden nur für vorgegebene Zeiten, z.B. von 7:00 bis 19:00 die eingestellten Sollwerte für Heizen oder Kühlen gewährleistet. Außerhalb dieser Zeiten findet für Heizen eine Sollwertabsenkung und für Kühlen eine Sollwerterhöhung statt. Im „Betrieb mechanisch belüftet“ ist zusätzlich eine Raumlufthechnische Anlage (RLT) berücksichtigt, die mit einer festen Luftwechselzahl betrieben wird. Außerhalb der Betriebszeit wird die Luftwechselzahl der RLT um 50% verringert. Eine Übersicht gibt Tabelle 5.3.

Tabelle 5.2: Wertebereich der Untersuchungsparameter aus den Kategorien statische und dynamische baukonstruktionsabhängige Parameter

Nr.	Beschreibung Parameter	min.	max.	Einheit
1	Fensterflächenanteil	20	65	%
2	Fenster U-Wert	0,5	6	W/m ² K
3	Fenster g-Wert	0,3	0,95	-
4	Infiltrationsrate	0,3	3	h ⁻¹
5	Sonnenschutz fest	0	3	m
6	Dach/Boden U-Wert	0,1	1,5	W/m ² K
7	Dach Trägerschicht Dichte*	500	3000	kg/m ³
8	Decke/Boden Trägerschicht Dichte*	500	3000	kg/m ³
9	Außenwand U-Wert	0,1	1,5	W/m ² K
10	Außenwand Trägerschicht Dichte*	500	3000	kg/m ³
11	Innenwand Trägerschicht Dichte*	500	3000	kg/m ³

* Verwendung der Materialdichte zur Modellierung einer größeren Wärmekapazität der Baukonstruktion

Tabelle 5.3: Kurzbeschreibung der Simulationsmodelle

Kennung in Grafiken & Tabellen	Bezeichnung	Beschreibung	Sollwert Heizen	Sollwert Kühlen	Sollwert-anpassung (Heizen - ; Kühlen+)	Luftwechsel	Betrieb
F01	reiner Stützbetrieb	Veränderung Heiz- und Kühlmertemperatur-sollwert	16 °C	34 °C	-	-	-
F02	reiner Stützbetrieb		20 °C	30 °C	-	-	-
F03	reiner Stützbetrieb		24 °C	26 °C	-	-	-
F04	reiner Stützbetrieb		20 °C	26 °C	-	-	-
F05	mit Betriebszeit	Veränderung Heiz- und Kühlmertemperatur-sollwert, Start- und Endzeiten	20 °C	26 °C	4 °C	-	07:00 - 19:00
F06	mit Betriebszeit		20 °C	26 °C	4 °C	-	09:00 - 17:00
F07	mit Betriebszeit		22 °C	24 °C	4 °C	-	07:00 - 19:00
F08	mit Betriebszeit		22 °C	24 °C	4 °C	-	09:00 - 17:00
F09	Betrieb mech. belüftet	Veränderung Luftwechsel pro Stunde	20 °C	26 °C	4 °C	2 h ⁻¹	07:00 - 19:00
F10	Betrieb mech. belüftet		20 °C	26 °C	4 °C	4 h ⁻¹	07:00 - 19:00
F11	Betrieb mech. belüftet		20 °C	26 °C	4 °C	6 h ⁻¹	07:00 - 19:00
F12	Betrieb mech. belüftet		20 °C	26 °C	4 °C	8 h ⁻¹	07:00 - 19:00

Der Einfluss der technischen Anlage wird innerhalb der Versuchsreihe schrittweise erhöht. Hierzu werden Temperatursollwerte für Heizen und Kühlen, Abstände der Temperatursollwerte zueinander, Gebäudebetriebszeit mit Temperatursollwertanpassung und Luftwechselzahlen der mechanischen Belüftung geändert. Die Versuche stellen somit unterschiedliche Niveaus der Betriebsbereitschaft des Gebäudes dar. Im Zusammenhang mit den Untersuchungsparametern sind Aussagen über den Einfluss technischer Raumkonditionierungssysteme und Regelungsparameter auf den grundlegenden Heiz- und Kühlenergiebedarf möglich. Sie bilden die Grundlage für das spätere Korrekturverfahren.

Verwendete Vereinfachungen

Das Modell beinhaltet Vereinfachungen. Als Erstes stellt das gewählte Raumkonditionierungssystem ein ideales Wärme- und Kälteversorgungssystem⁹ dar, das ohne Verluste die erforderliche Energie im Raum bereitstellt. Dies ermöglicht die Einflüsse ohne weitere Modellannahmen direkt zu bewerten. Als Zweites wird in der Untersuchung eine einzige und vollständig homogen verteilte Nutzung angesetzt. Als Drittes werden deterministische Modelle für Infiltration und Belüftung verwendet. Als Viertes verteilt ein einfaches Strahlungsmodell die einfallende Solarstrahlung vollständig auf die Bodenkonstruktion der Zone. Die aufgeführten Punkte stehen meist in Verbindung mit einfacheren, aber nicht unbedingt ungenaueren Modellansätzen. Durch ihren leichteren Modellansatz verringern sie die Modell-Komplexität, können aber gleichzeitig durch die direkteren Beziehungen das Verständnis über energetische Zusammenhänge erleichtern.

5.2 Analyse und Bewertung des Basiskonzepts der Referenzraummethode

Es ist ausschlaggebend zu verstehen, welche Faktoren sich in welcher Form auf das Ergebnis auswirken und wie die damit verbundenen Abweichungen im Gesamtbild der Energiebedarfsabschätzung zu bewerten sind. Der Verzicht auf ein Gebäudemodell in der RRM berücksichtigt insbesondere Strahlungs- und Verschattungseffekte in der Energiebilanz des Gebäudes nur unvollständig und umfasst nicht alle vorkommenden Wärmetransmissionseffekte, wie z.B. der Bodenplatte oder des Daches. Daher dient der unter rein klimatischen Bedingungen berechnete Wärme- und Kühlnutzenergiebedarf als Bewertungsgröße, um die Effekte der Vereinfachungen zu diskutieren. Auf deren Basis erfolgt eine stets tiefer greifende Analyse der Berechnungsqualität. Das Qualitätskriterium ist die Abweichung in den Berechnungsergebnissen und deren Verteilung zwischen Gebäudemodell und RRM. Die Grafiken basieren auf den Ergebnissen der Monte Carlo Simulation gemäß der vorangegangenen Versuchsbeschreibungen (s. Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3).

Zuerst erfolgt ein Vergleich der berechneten Heizenergiebedarfswerte mittels des Box-Plots in Abbildung 5.3. Die ähnlichen Ausmaße der Boxen und der Whisker, die nah aneinanderliegenden Mediane und die in etwa gleiche Anzahl der identifizierten Extremwerte lassen auf ein vergleichbares Verhalten in der RRM schließen. Ein höherer Heiztemperatursollwert führt zu einem höheren Heizenergiebedarf,

⁹In EnergyPlus: IdealLoadAirSystem

wie die Versuche F01 bis F03 in beiden Modellen bestätigen. Im Versuch F03 unterscheiden sich die Mediane deutlich, was auf den geringen Abstand von 2°C zwischen Heiz- und Kühltemperatursollwert zurückzuführen ist. Für Nutzungen ohne mechanische Lüftung (F01 bis F04) steigt die Differenz der Mediane mit kleineren Abständen der Temperatursollwerte für Heizen und Kühlen an. Das gleiche gilt für die relative Abweichung zwischen RRM und Gebäudemodell. Gegenüber den Versuchen F01 bis F04 sind die Versuche F05 bis F08 mit einer Betriebszeit und Temperaturabsenkung modelliert. Erwartungsgemäß besitzen sie einen niedrigeren Heizenergiebedarf. Für die Versuche F05 bis F08 sind die Dimensionen der Boxen ähnlich, aber die Mediane in der RRM sind sichtlich niedriger. Mit einem erzwungenem Luftwechsels in den Versuchen F09 bis F12 ändert sich das Verhalten. Die Mediane der RRM und des Gebäudemodells nähern sich einander an und sind fast gleich. Somit führen ein erzwungener Luftwechsel und höhere Luftwechselzahlen zu einem erhöhten Heizenergiebedarf, der in beiden Modellen annähernd gleich abgebildet wird.

Die Erläuterung des Kühlenergiebedarfs erfolgt mit Hilfe der Box-Plots in Abbildung 5.4. Die aus der Heizenergieanalyse gewonnenen Erkenntnisse behalten weiterhin ihre Gültigkeit. Es fallen aber zum einen das sehr ungleichmäßige Erscheinungsbild der Box-Plots und zum anderen die sehr geringen Energiedurchschnittsmengen auf. Obwohl die Lage der Mediane über alle Versuche deutlich unterschiedlich ist, verhält sich die RRM in der Erkennung von Extremwerten ähnlich, denn deren Differenz in der Lage folgt der Differenz der Mediane. Die Verzerrung der Boxen in der RRM basiert auf der höheren Anzahl an Null-Werten. Obwohl im Gebäudemodell Zonen mit Kühlbedarf vorhanden sind, kann es vorkommen, dass die Referenzzone keine Kühlenergie benötigt. Auffällig für die Versuche F01 bis F10 ist der sehr hohe Anteil an sehr kleinen Kühlenergiebedarfswerten, die ggf. in der Praxis die Installation einer Anlage zur Kühlung nicht rechtfertigen. Die durch den Solareintrag verursachte Kühllast würde sich damit als nebensächlich erweisen. Die Versuche F09 bis F12 mit erzwungenen Luftwechsel weisen dagegen eine stärkere Ähnlichkeit zwischen RRM und Gebäudemodell auf. Dabei beeinflusst der Luftwechsel die Genauigkeit der RRM. Darüber hinaus geht mit ansteigender Luftwechselzahl eine Überbewertung des Kühlenergiebedarfs in der RRM einher. Die Unterschiede in den Dimensionen der Boxen und der Einfluss des Solarertrags auf die Kühlenergie nimmt mit steigender Luftwechselzahl zu.

Die vorangegangenen Erläuterungen führen zu den Schlussfolgerungen:

- Relative Abweichungen nehmen mit steigendem Energiebedarf ab.
- Sehr kleine Energiekennwerte sind hinsichtlich der Modellqualität auf Basis ihrer realen absoluten Auswirkung zu diskutieren und ggf. zu vernachlässigen.
- Kleinere Abstände der Temperatursollwerte für Heizen und Kühlen vergrößern die Abweichung.
- Eine mechanisch Belüftung erhöht die Ähnlichkeit zwischen RRM und Gebäudemodell.
- Der Solareintrag wirkt in den mechanisch belüfteten Versuchen stärker auf die Berechnung des Kühl- als des Heizenergiebedarfs ein.

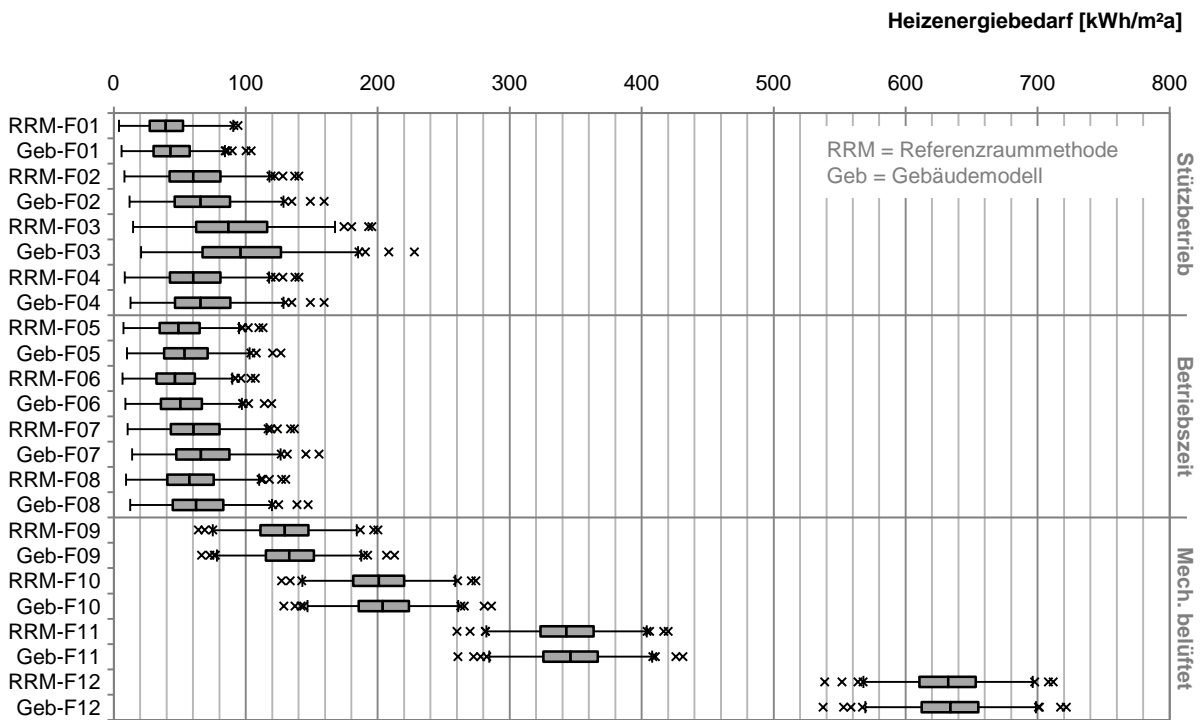


Abbildung 5.3: Box-Plot des Heizenergiebedarfs der RRM und des Gebäudemodells

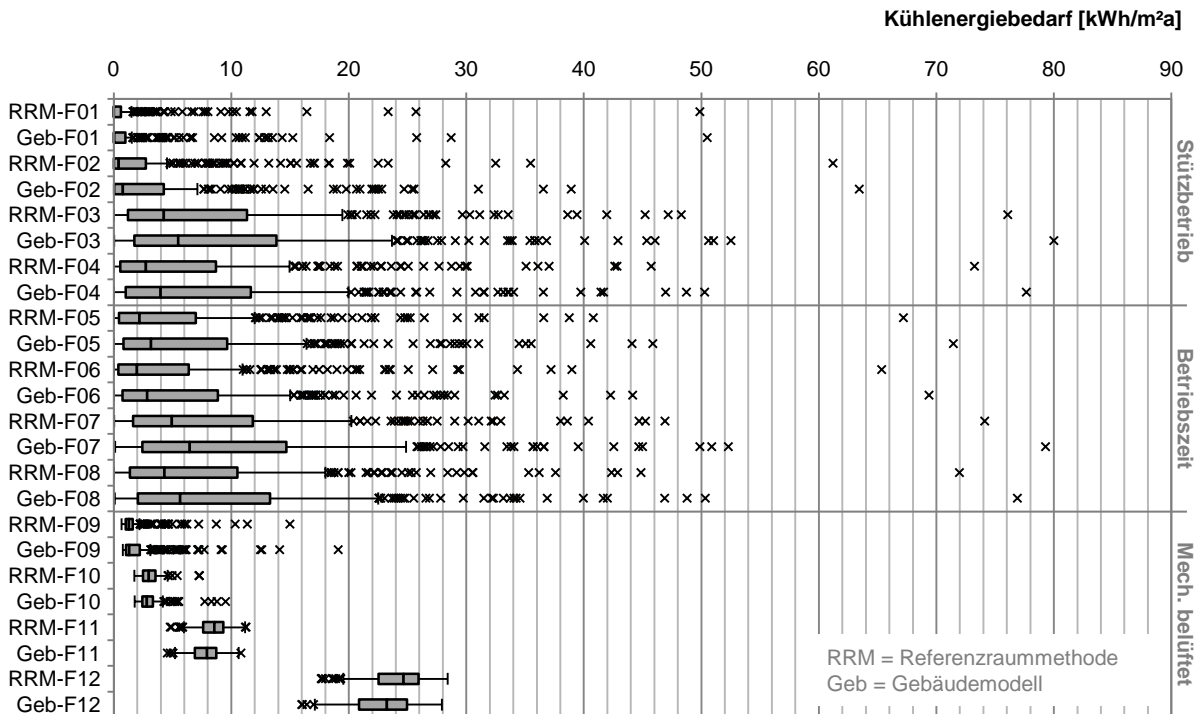


Abbildung 5.4: Box-Plot des Kühlenergiebedarfs der RRM und des Gebäudemodells

Stets sollte eine möglichst geringe relative Abweichung erzielt werden, wobei die damit verbundene absolute Auswirkung sehr unterschiedlich sein kann. In Abhängigkeit der Höhe des Energiebedarfs können z.B. große relative Abweichungen eine kleine absolute Auswirkung besitzen, oder umgekehrt. Die Auswirkungen der mittleren Abweichungen mit ihren Absolutwerten zeigt Abbildung 5.5. Für die Versuche F01 bis F08 wird eine relative Abweichung für Wärme von ca. -10% und für Kälte ca. -20% erzielt. Für die Versuche F09 bis F12 sind die relativen Abweichungen infolge der mechanischen Belüftung deutlich kleiner. Trotz hoher Ähnlichkeit der relativen Abweichungen sind die absoluten Abweichungen des Heizenergiebedarfs deutlich verschieden. Ein sehr gleichmäßiges Verhalten zeigt sich hingegen im Kühlenergiebedarf. Über alle Versuche hinweg erreicht die RRM bereits ohne Verwendung einer Korrektur eine mittlere relative Abweichung von -6,6% im Heiz- und -13,5% im Kühlenergiebedarf.

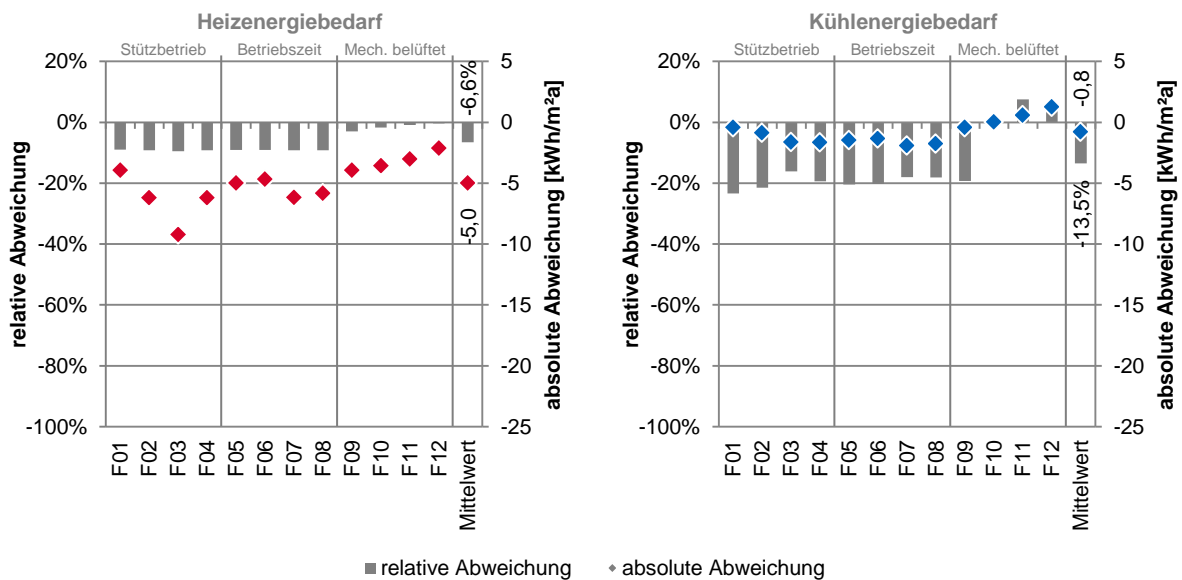


Abbildung 5.5: Vergleich der Abweichungen des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) der RRM gegenüber dem Gebäudemodell

5.2.1 Bewertung der vorhandenen Abweichung

Es folgt die Diskussion über die Auswirkungen eines fehlenden Gebäudegeometriemodells auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf. Dabei bilden die Versuche F01 bis F12 grundlegende Gebäudebetriebsweisen nach. Dieses Vorgehen ermöglicht Effekte auf den Nutzenergiebedarf durch den solaren Ertrag und durch die unterschiedlich gewichteten Transmissionsverluste zu bewerten; unter anderem werden für einen Klimadatensatz die Auswirkungen der Vereinfachungen beurteilt.

Heizenergiebedarf

Die Unterschiede in der Berechnung des Heizenergiebedarfs werden als relative Abweichung von der RRM zum Gebäudemodell im Histogramm in Abbildung 5.6 dargestellt. Die meisten Werte besitzen

die Gruppen mit der Klassenmitte -10, -5 und 0% in den Versuchen F01 bis F08. Für die Versuche F09 bis F12 sind es die Gruppen 0 und 5%. Die Anwendung einer Normalverteilung scheint für alle Gruppen als geeignet (s. Anhang A). Mit Hilfe des Mittelwertes und der Standardabweichung der relativen Abweichung lässt sich das Verhalten als Glockenkurve darstellen und leichter beurteilen. Die Vereinfachungen bewirken in den Versuchen F01 bis F08 ohne mechanische Belüftung eine höhere und stärker gestreute mittlere relative Abweichung als in den Versuchen F09 bis F12 mit mechanischer Belüftung. Für die Versuche F09 bis F12 bewirkt ein höherer Luftwechsel pro Stunde eine Reduktion der mittleren relativen Abweichung und deren Streuung.

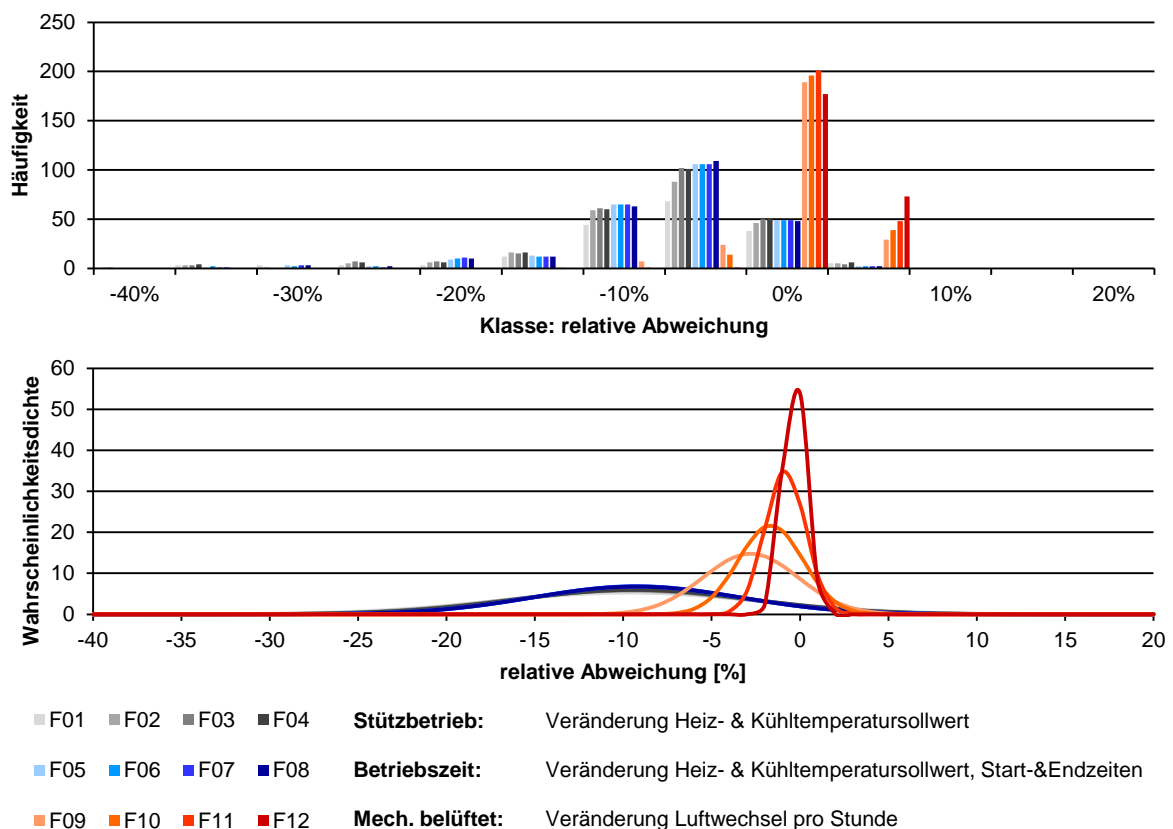


Abbildung 5.6: Histogramm (o.) und Normalverteilung (u.) der relativen Abweichung des Heizenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell

Anhand der Wahrscheinlichkeitsdichte ergeben sich für eine Nutzung mit erzwungenem Luftwechsel die Schlussfolgerungen:

1. Ein erzwungener Luftwechsel führt zu einer kleineren mittleren relativen Abweichung und Standardabweichung.
2. Je größer die Luftwechselzahl ist, desto kleiner ist der Einfluss der bauphysikalischen und geometrischen Eingangsparameter auf die mittlere relative Abweichung und die Standardabweichung. Der Heizenergiebedarf ist damit weniger sensitiv.
3. Unterschiedliche Raumkonditionierungssysteme sind in der Bewertung und im Korrekturverfahren zu unterscheiden.

Kühlenergiebedarf

Die Bewertung der relativen Abweichung des Kühlenergiebedarfs erfolgt mit Hilfe der Abbildung 5.7. Für die Versuche F01 bis F08 streuen die relativen Abweichungen von 0 bis 100%. Eine Häufung ergibt sich in dem Wertebereich von -30 bis -15%. Die hohen relativen Abweichungen sind dem sehr geringen Kühlenergiebedarf in den Randzonen geschuldet; die Referenzzone weist keinen oder im Vergleich nur einen sehr kleinen Kühlenergiebedarf aus. Die Versuche F09 bis F12 weisen infolge der mechanischen Belüftung geringere und teils positive Abweichungen auf. Infolge der großen Streuung der relativen Abweichung ist die Annahme einer Normalverteilung nicht grundlegend gültig. Erst mit Verwendung eines minimalen Kühlenergiebedarfs als Grenzwert kann eine Normalverteilung der Ergebnisse angenommen werden. Zur einfacheren Beschreibung wird an der Darstellung über Glockenkurven festgehalten. Die breite Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte der Versuche F01 bis F04 zeigt, dass die RRM gegenüber dem Gebäudemodell für sehr niedrige Kühlenergiebedarfswerte keine verlässlichen Werte liefert. Erst mit Anstieg des Kühlenergiebedarfs, verursacht durch niedrigere Kühltemperatursollwerte oder einem kleinerem Abstand zum Heiztemperatursollwert, reduzieren sich die Streubreiten und eine mittlere relative Abweichung wird in den Versuchen F05 bis F08 erkennbar. Die in den Versuchen F09 bis F12 vorhandene Belüftung sorgt für einen höheren und gleichmäßigeren Kühlenergiebedarf. Die Berechnungsgenauigkeit der RRM steigt, wie die Abnahmen

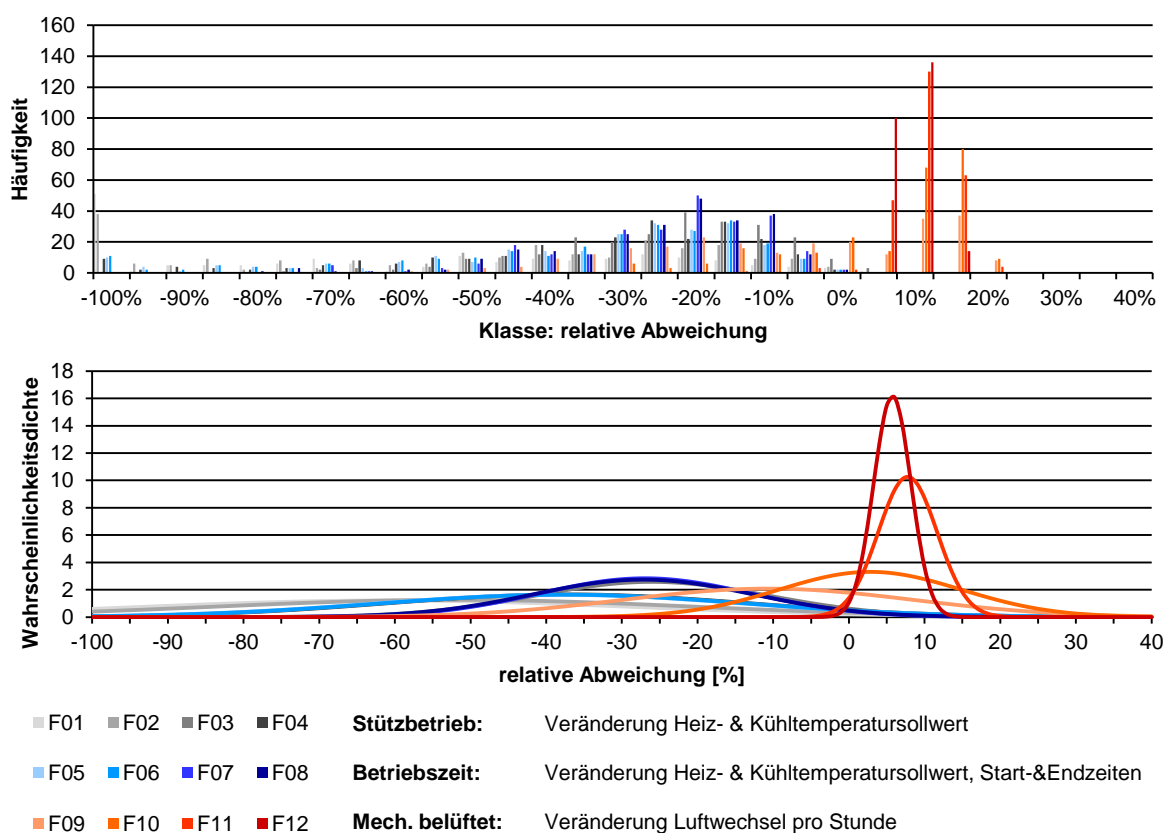


Abbildung 5.7: Histogramm (o.) und Normalverteilung (u.) der relativen Abweichung des Kühlenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell

der mittleren relativen Abweichungen und die geringeren Streubreiten zeigen. Eine weitere Reduktion wird durch einen höheren Luftwechsel pro Stunde verursacht. Dessen Wirkung scheint sich ab einem bestimmten Luftwechsel umzudrehen. In den Versuchen F09 bis F11 verändert sich die relative Abweichung in positive Richtung, um in F12 in negative Richtung zu wechseln.

Damit ergeben sich für die Berechnungsgenauigkeit des Kühlenergiebedarfs die Schlussfolgerungen:

1. Je niedriger der Temperaturkühsollwert und je kleiner dessen Abstand zum Heiztemperatursollwert ist, desto deutlicher wird eine mittlere relative Abweichung erkennbar.
2. Ein höherer Kühlenergiebedarf begünstigt eine gleichmäßige Ausbildung einer mittleren relativen Abweichung.
3. Je größer der Kühlenergiebedarf durch einen niedrigen Kühltemperatursollwert und einen erzwungenen Luftwechsel ist, desto gleichmäßiger ist die mittlere relative Abweichung und desto kleiner deren Streuung.

Anhand des Verhaltens des Heiz- und Kühlenergiebedarfs zeigt sich, dass eine mechanische Belüftung deutlich die mittlere relative Abweichung und deren Streuung reduziert. Folglich wird die RRM umso genauer, desto weniger Einfluss die Transmissionswärmeverluste und die solaren Erträge an der Gesamtenergiebilanz aufweisen. Diese Tatsache wird noch stärker zum tragen kommen, wenn zusätzlich energetische Effekte der Nutzungen in der Energiebilanz berücksichtigt werden.

Bewertung der mittleren relativen Abweichung

Die Ermittlung einer mittleren relativen Abweichung ist z.B. für das spätere Korrekturverfahren sinnvoll, v.a. wenn die Abweichungen über einen breiten Bereich annähernd gleich sind. Die Abbildung 5.8 veranschaulicht dieses Kriterium für den Heiz- und Kühlenergiebedarf der Versuche F02, F05 und F11. Die relativen Abweichungen sind ihrer Größe nach ansteigend in einer geordneten Dauerlinie aufgetragen. Die RRM bewertet in allen Versuchen den Heizenergiebedarf zu niedrig. In F02 und F05 verändert sich die Abweichung über die Versuchsreihe hinweg nur sehr wenig, in den Randbereichen sind deutliche Veränderungen zu erkennen. In F11 bildet sich eine annähernd konstante mittlere relative Abweichung heraus. Der Heizenergiebedarf scheint für ein übergeordnetes Korrekturverfahren geeignet zu sein.

Für die Berechnung des Kühlenergiebedarfs weist F11 ein ähnliches Verhalten wie im Heizenergiebedarf auf. Die relative Abweichung beträgt über den größten Bereich zwischen +5 und +10% und ist damit leichter korrigierbar. Dagegen zeigt sich in F02 und F05 kein gleichmäßiges Verhalten der relativen Abweichung. Die Abweichungen reichen von 0 bis -100%, was auf die verschiedene Ausprägung des Kühlenergiebedarfs in der Referenzzone und den Randzonen zurückgeht. Die Veränderung der relativen Abweichung ist über alle Simulationen hinweg sehr stark und wird eine übergeordnete Korrektur erschweren.

Wichtigkeit der relativen und absoluten Abweichung für die Bewertungsqualität

Nun soll erläutert werden, welche absolute Abweichung aus der relativen Abweichung zwischen RRM und Gebäudemodell hervorgeht und welche Bedeutung die absolute Abweichung tatsächlich hat. Ein Grund dafür ist, ob eine hohe relative Abweichung vernachlässigt werden kann, wenn sie nur eine kleine absolute Abweichung in der Energiebedarfsberechnung repräsentiert. Folglich die absolute Abweichung in der Energiemenge im Vergleich zum Gesamtenergiebedarf oder im Bezug zu den in den Eingangsparametern enthaltenen Unsicherheiten als unbedeutend gilt. Den Zusammenhang zwischen relativer und absoluter Abweichung zeigt Abbildung 5.9.

Zuerst gilt, dass der Heizenergiebedarf deutlich größer ist als der Kühlenergiebedarf. Zudem bestimmt die RRM den Heizenergiebedarf genauer als den Kühlenergiebedarf, die relativen Abweichungen sind im Vergleich deutlich kleiner. Ein Grund dafür ist, dass mit ansteigendem Energiebedarf die Referenzzone wahrscheinlicher einen Energiebedarf des Gebäudes erkennt und ein Energiebedarf, z.B. in Randzonen, nicht als Folge einer lokal begrenzten Sondersituation auftritt. Immer wenn für das Gebäude ein Heizenergiebedarf bestimmt wird, weist auch die Referenzzone einen Heizenergiebedarf auf. Für die Bestimmung des Gebäudekühlenergiebedarfs ist dieser Zusammenhang nicht vorhanden. Teilweise ist der Kühlenergiebedarf der Referenzzone im Vergleich zum Kühlenergiebedarf des Gebäudes marginal oder nicht vorhanden, vor allem wenn der Gebäudekühlenergiebedarf hauptsächlich in den Randzonen des Gebäudes entsteht. Dies führt zu teils sehr hohen relativen Abweichungen. Der Kühlenergiebedarf ist in der Versuchsreihe F05 für 144 von 250 Parameterkombinationen $<5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Unter Beachtung der Gebäudegröße muss die Sinnhaftigkeit einer Anlage zur Kühlung der Räume bei niedrigen Bedarfswerten in Frage gestellt werden. So sollte der Kühlbedarf durch den solaren Ertrag zuerst durch passive Maßnahmen auf ein Minimum reduziert werden und danach sollten die verbleibenden Lasten über eine Kühlung abgeführt werden. Überschreitet der Kühlenergiebedarf einen vorher festgelegten Grenzwert nicht, sind die damit verbundenen relativen und absoluten Abweichungen von untergeordnetem Interesse.

Für den Heizenergiebedarf nimmt in den Versuchen F02, F05 und F11 mit steigendem Einfluss der Raumkonditionierung die relative Abweichung ab. Weiter zeigt sich eine Tendenz, dass mit einer höheren relativen auch eine höhere absolute Abweichung verbunden ist. Dies bedeutet jedoch nicht, dass sich beide Abweichungen linear zueinander verhalten - eine doppelt so große relative Abweichung führt nicht zwangsläufig zu einer doppelt so großen absoluten Abweichung.

Die Abweichungen des Kühlenergiebedarfs sind abhängig von der Belüftungsart. Eine mechanische Belüftung führt zu deutlich kleineren relativen und absoluten Abweichungen. Für alle Versuche besteht jedoch nicht die Tendenz, dass mit einer höheren relativen auch eine höhere absolute Abweichung auftritt. Auffällig ist in F02 und F05 die große Anzahl an Wertepaarungen mit hoher relativer ($>50\%$) aber kleiner absoluter Abweichung.

Dies lässt den Schluss zu, dass für Nutzungsarten mit sehr niedrigen Energiebedarfswerten eine hohe relative Abweichung hinsichtlich der absoluten Auswirkung für die spätere Gebäudebewertung vernachlässigbar ist. Die Wahrscheinlichkeit ist sehr hoch, dass deren Abweichungen durch Effekte von Nutzungen mit höherem Energiebedarf überlagert werden.

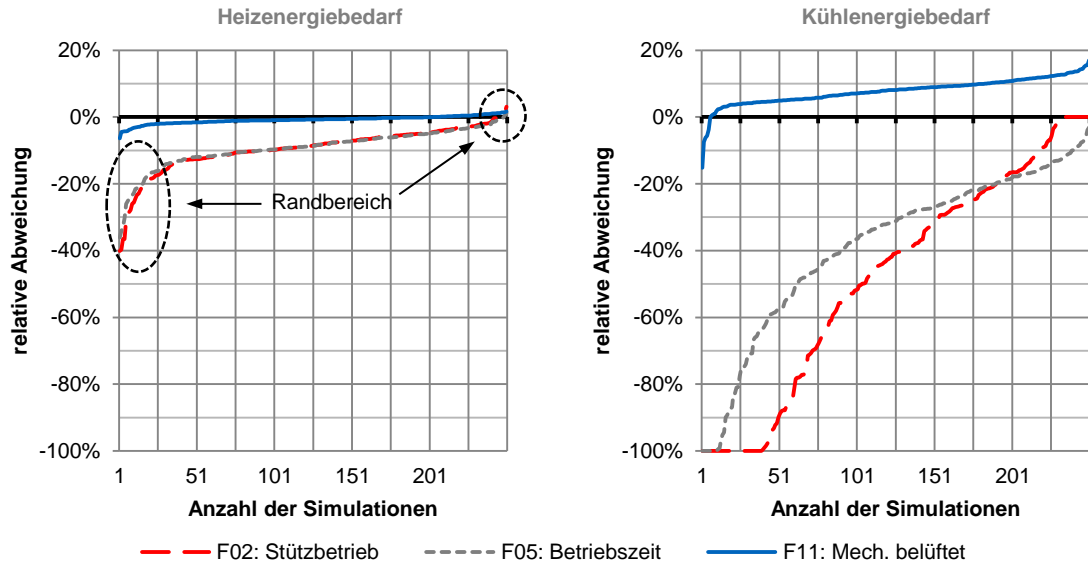


Abbildung 5.8: Geordnete Dauerlinie zur Darstellung der relativen Abweichung der RRM zum Gebäudemodell für den Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarf (r.)

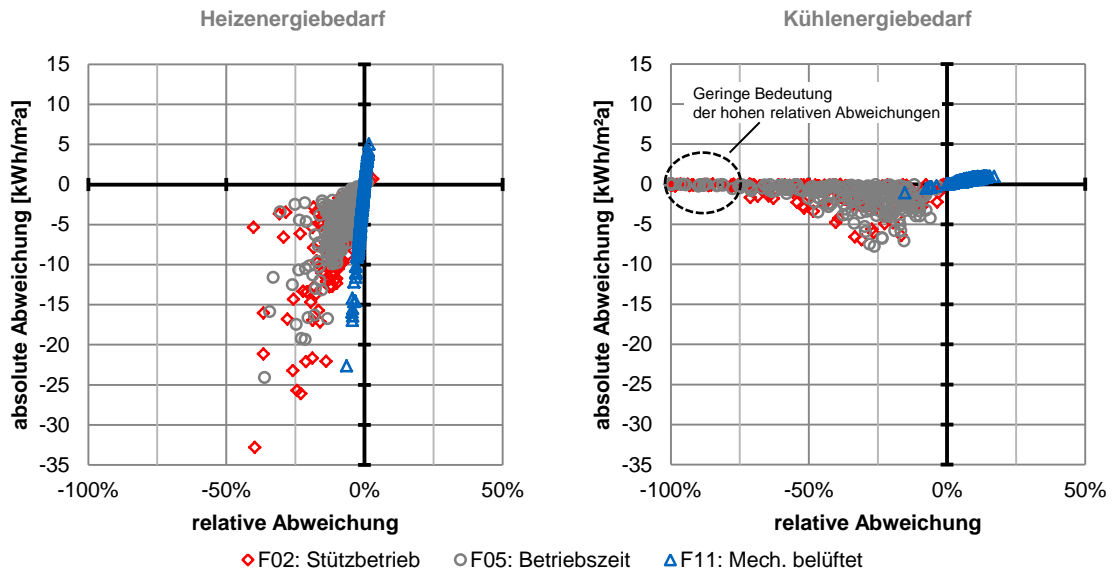


Abbildung 5.9: Beziehung zwischen absoluter und relativer Abweichung von RRM zum Gebäudemodell für den Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarf (r.)

Identifikation von Haupteinflussfaktoren für die Abweichung

Durch die Vielzahl an verschiedenen Parameterkombinationen stellt sich die Frage, ob einzelne Parameter oder eine Kombination von Parametern zu hohen relativen Abweichungen führen. In der Analyse der Ergebnisse mit einer relativen Abweichung von größer 15% können für den Heizenergiebedarf folgende Parameter identifiziert werden:

- U-Wert Fenster $< 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- g-Wert Fenster $> 0,7$
- Auskragungsweite $> 1,8 \text{ m}$
- hohe Speicherfähigkeit der Konstruktion (Außenwand, Dach/Boden, Innenwand)
- U-Wert Außenwand, Dach/Boden $< 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die Analyse des Kühlenergiebedarfs liefert unter Beachtung eines Mindest-Kühlenergiebedarfs von $5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ folgende Parameter als Ursache für größere Abweichungen:

- Fensterflächenanteil $> 45\%$
- U-Wert Fenster $< 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- g-Wert Fenster $> 0,7$
- U-Wert Außenwand, Dach/Boden $< 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die niedrigen U-Werte (Gebäudehülle und Fenster) sowie der hohe g-Wert des Fensters weisen auf einen Zusammenhang zwischen der relativen Abweichung und dem solaren Ertrag hin. Die Wirkung des solaren Ertrags wird beeinflusst von dem Fensterflächenanteil, dem g-Wert und dem U-Wert sowie der Verschattung des Fensters. Höhere solare Erträge steigern in der Kombination mit niedrigen Wärmetransmissionsverlusten und höherer Speicherfähigkeit die Anzahl der Ergebnisse mit größerer relativer Abweichung. Bei diesen Parameterkombinationen wirkt in der Bilanz des Gesamtenergiebedarfs der Anteil des solaren Ertrags stärker als die Infiltrations- und Wärmetransmissionsverluste der opaken Bauteile. Eine übergeordnete Korrektur zur Reduktion der relativen Abweichung erscheint auf Basis der Gebäudegeometrie als sinnvoll.

Je besser das Zustandekommen der Abweichung erklärt werden kann und je gleichmäßiger sich das Verhalten der Abweichung ausbildet, desto leichter wird eine Korrektur möglich sein. Deshalb ist der Effekt der Bandbreiten der Eingangsparameter auf die Berechnungsgenauigkeit und auf das Modellverhalten zu untersuchen, bevor eine übergeordnete Korrektur erfolgen kann.

5.2.2 Auswirkungen unterschiedlicher Bandbreiten der Eingangsparameter

Eine weitere Ursache für Abweichungen wird in den Parametern selbst, genauer in deren Bandbreite vermutet. Für die vorangegangene Studie wurden die Bandbreiten so groß gewählt, dass generelle Effekte auf den Energiebedarf erkennbar werden. Größere Bandbreiten können auch eingesetzt werden, wenn ein höheres Maß an Unsicherheit in den Eingangsparametern berücksichtigt werden

soll. Beides ist für die weitere Untersuchung weniger relevant, so dass eine Reduktion der Bandbreiten im Sinne eines praxisnahen Anwendungsfalls erfolgte. Die Modelle folgen dem Aufbau:

F05-Basis: Ist identisch mit Versuch F05 gemäß Tabelle 5.3 (mit Betriebszeit 7:00-19:00 Uhr, Sollwert 20°C Heizen/ 26°C Kühlen) und wird als Basis bezeichnet. Untersuchungsparameter entsprechen der Tabelle 5.2.

F05-V01: Betriebsart wird nach F05-Basis beibehalten und die Bandbreiten aller Untersuchungsparameter sind verkleinert.

F05-V02: Betriebsart wird nach F05-Basis beibehalten und die Bandbreiten ausgewählter Untersuchungsparameter sind gegenüber F05-V01 nochmals kleiner.

Eine Auflistung der für die Monte Carlo Simulation angesetzten Bandbreiten der Untersuchungsparameter sind pro Versuchsreihe in Tabelle 5.4 aufgeführt.

Tabelle 5.4: Wertebereich der Untersuchungsparameter aus den Kategorien statische und dynamische baukonstruktionsabhängige Parameter für die Versuche F05(-Basis), F05-V01 und F05-V02

Nr.	Beschreibung Parameter	F05-Basis		F05-V01		F05-V02		
		min.	max.	min.	max.	min.	max.	
1	Fensterflächenanteil	20	65	40	55	40	55	%
2	Fenster U-Wert	0,5	6,0	0,9	1,2	0,9	1,2	W/m ² K
3	Fenster g-Wert	0,3	0,95	0,6	0,8	0,6	0,8	-
4	Infiltrationsrate	0,3	3,0	0,3	1,0	0,5	1,0	h ⁻¹
5	Sonnenschutz fest	0,0	3,0	1,0	1,5	1,0	1,5	m
6	Dach/Boden U-Wert	0,10	1,50	0,13	0,30	0,19	0,23	W/m ² K
7	Dach Trägerschicht Dichte*	500	3000	1800	2200	1800	2200	kg/m ³
8	Decke/Boden Trägerschicht Dichte*	500	3000	1800	2200	1800	2200	kg/m ³
9	Außenwand U-Wert	0,10	1,50	0,13	0,30	0,19	0,23	W/m ² K
10	Außenwand Trägerschicht Dichte*	500	3000	1800	2200	1800	2200	kg/m ³
11	Innenwand Trägerschicht Dichte*	500	3000	1800	2200	1800	2200	kg/m ³

* Verwendung der Materialdichte zur Modellierung einer größeren Wärmekapazität der Baukonstruktion

Auf Basis der Streuung der Eingangsparameter und mit Hilfe der Monte Carlo Simulation können Mittelwerte und Standardabweichungen ermittelt werden. Je schneller beide Größen sicher bestimmt werden können, desto geringer ist der Rechenaufwand. Ein Qualitätskriterium dafür ist die Konvergenz z.B. des Stichprobenmittelwertes. Die Wertveränderung des Mittelwertes wird über den Simulationsverlauf hinweg beobachtet. Die Berechnung gilt als konvergiert, wenn der Mittelwert innerhalb einer vorher festgelegten Streubreite verbleibt. Auf die Konvergenz wirken der Umfang der Stichprobe und die in der Stichprobe enthaltene Streuung.

Deshalb klärt diese Versuchsreihe zwei Fragen: Wie beeinflusst die Parameterstreuung das Modellverhalten und die mittlere relative Abweichung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs? Wie wirkt sich die Parameterstreuung auf die Konvergenz der Berechnungsergebnisse aus?

Auswirkungen auf die Konvergenz des Modells

Das Konvergenzverhalten wird anhand des Mittelwertes in Abbildung 5.10 erläutert. Das Konvergenzverhalten der Standardabweichung ist annähernd gleich und nicht weiter aufgeführt. Für den Basisfall konvergiert in der Monte Carlo Simulation der Mittelwert des Heizenergiebedarfs nach ca. 50 berechneten Stichproben, der des Kühlergiebedarfs nach ca. 150. Beide Verläufe weisen deutliche Sprünge des Mittelwertes auf. Die Sprünge resultieren aus den großen Bandbreiten, wenn wesentliche Parameter eine deutliche Veränderung in der Stichprobe erfahren.

In den Parametersätzen F05-V01 und F05-V02 konvergiert die Reihe deutlich schneller zum theoretischen Mittelwert. Im Heizenergiebedarf wird dieser nach ca. 15 Simulationsdurchläufen erreicht, im Kühlergiebedarf nach ca. 50. Der Verlauf ist sichtlich gleichmäßiger und beinhaltet keine starken Sprünge mehr. Die niedrigeren Mittelwerte des Heizenergiebedarfs resultieren aus den besseren energetischen Baustandards, die jedoch zu einer Erhöhung des Kühlergiebedarfs führen.

Das sichere und schnelle Konvergieren für die neuen Parametersätze zeigt, dass Eingangsparameter auf Basis von Literaturwerten oder Vorort-Begehungen hinreichend genau abgeschätzt werden können. Die vorhandenen Unsicherheiten können mittels Bandbreiten von $\pm 20\%$ im Bezug zum angesetzten Parametermittelwert problemlos berücksichtigt werden. Die eingesetzten Sobol-Sequenzen bewirken, dass bereits bei stark gestreuten Stichproben die Ergebnisse schnell konvergieren. Bei geringeren Streuungen in der Stichprobe wird die Konvergenz noch schneller erreicht. Darauf aufbauend könnte die minimale Anzahl an Simulationsdurchläufen verringert und somit Rechenaufwand weiter eingespart werden.

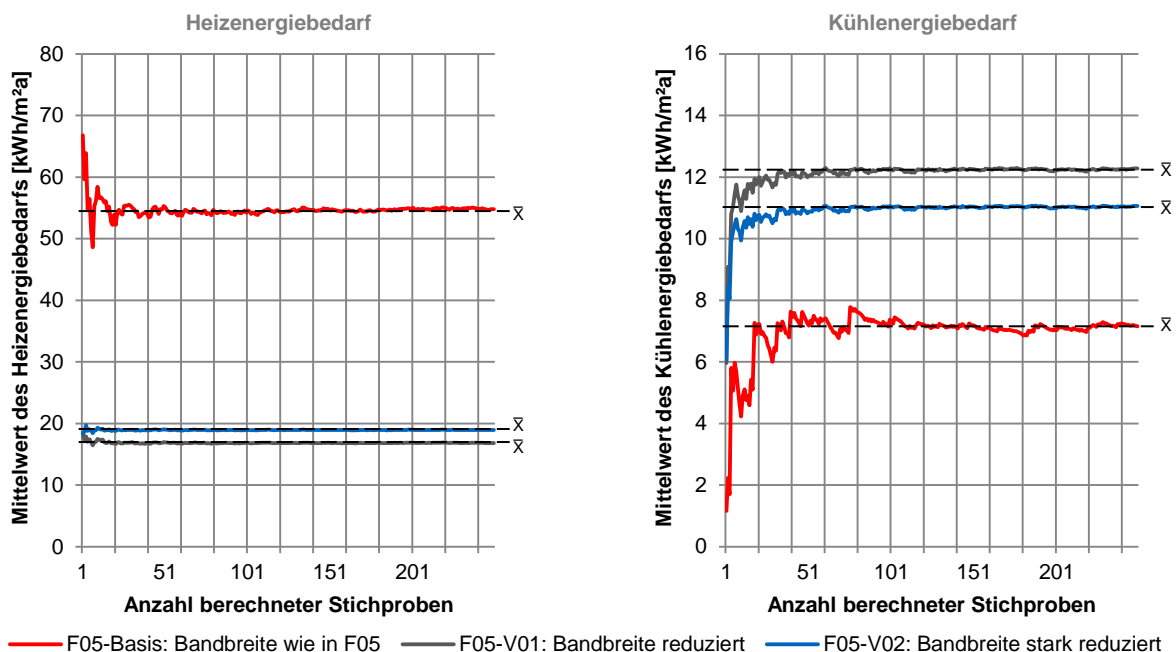


Abbildung 5.10: Konvergenz der Mittelwerte des Heiz- (l.) und Kühlergiebedarfs (r.) des Gebäudemodells unter Berücksichtigung verschiedener Bandbreiten einzelner Eingangsparameter

Gleichmäßigere Ausbildung der relativen Abweichung bei geringeren Bandbreiten

Die Parametersätze mit kleineren Bandbreiten führen zu einem gleichmäßigeren Erscheinungsbild der relativen Abweichung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs (s. Abbildung 5.11). Die hohen Abweichungen, die an den Randbereichen von F05 vorhanden sind, fehlen. Das Fehlerband des Heizenergiebedarfs reicht von ca. -25 bis -10%, das des Kühlenergiebedarfs von -30% bis -10%. Für den Kühlenergiebedarf verschwinden relative Abweichungen >30% vollständig. Dies bedeutet, dass nun ein Gebäudekühlenergiebedarf auch mit der Referenzzone angezeigt wird. Eine Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit der RRM ist nicht feststellbar. Für den Heizenergiebedarf nimmt die mittlere relative Abweichung zu, für den Kühlenergiebedarf ab.

Die Größe der Bandbreite in den baukonstruktionsabhängigen Eingangsparametern wirkt folglich nicht auf die Berechnungsgenauigkeit, aber sehr wohl auf eine gleichmäßigere Ausbildung der relativen Abweichung. Eine spätere übergeordnete Korrektur wird damit einfacher.

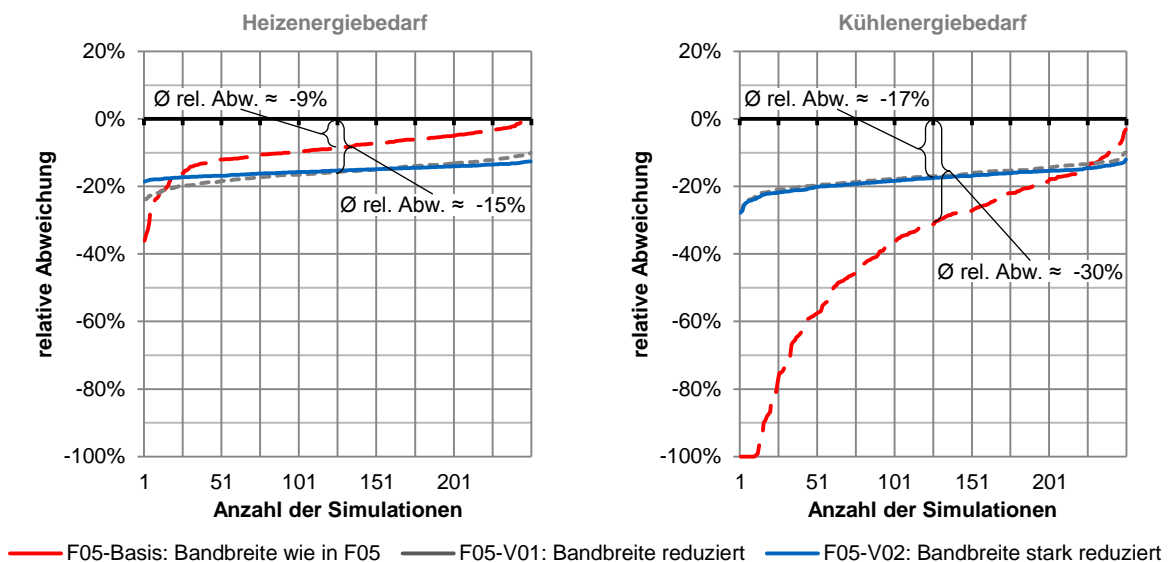


Abbildung 5.11: Geordnete Dauerlinie zur Darstellung der relativen Abweichung der RRM zum Gebäudemodell für den Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarf (r.) bei unterschiedlichen Bandbreiten der Untersuchungsparameter

Auswirkungen auf relative und absolute Abweichungen

In den Parametersätzen mit kleinerer Bandbreite gleicht das Verhalten der absoluten Abweichung dem Verhalten der relativen Abweichung. Der Streubereich der Abweichung im Heiz- und Kühlenergiebedarf nimmt mit der Bandbreite der Eingangsparameter ab ($F05-V02 < F05-V01 < F05$). Der Zusammenhang zwischen relativer und absoluter Abweichung kann leichter beziffert werden, z.B. ergibt sich für den Versuch F05-V02 ein Fehlerband von ca. -25 bis -10%, das einer absoluten Abweichung von -4 bis -2 kWh/m²a entspricht. Für die Kühlenergie ist das Fehlerband von -30 bis -10% mit einer absoluten Abweichung von -4 bis -0,5 kWh/m²a entsprechend. Die Zusammenhänge stellt Abbildung 5.12 dar.

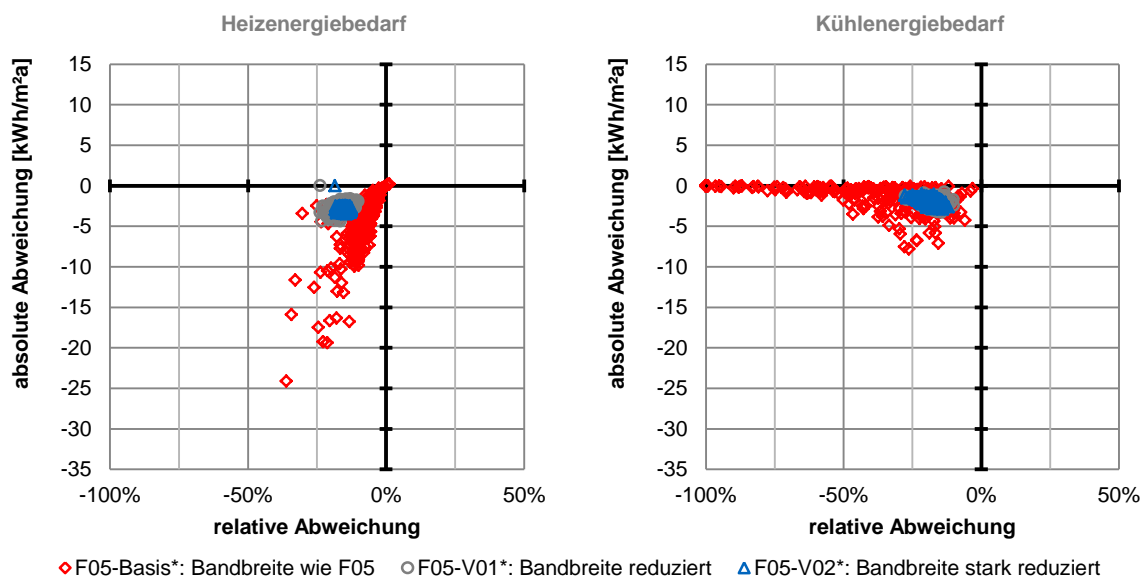


Abbildung 5.12: Beziehung zwischen absoluter und relativer Abweichung des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) im Modell F05 für verschiedene Bandbreiten der Eingangsparameter

Energiebedarf der Referenzzone und der Gebäudezonen im Vergleich

Wie präzise eine Referenzzone das Verhalten der anderen Zonen im Gebäude abbilden kann, zeigt für den Versuch F05-V02 die Abbildung 5.13. In den Box-Plots sind der Heiz- und Kühlenergiebedarf ausgewählter Zonen aufgetragen, deren Fassade süd-orientiert ist. Die Zone 5 im mittleren Geschoss (1.OG) dient als Referenzzone. Der Energiebedarf ist in den mittleren Zonen am niedrigsten. Randzonen mit mehr als einer Außenwand unterscheiden sich zur Referenzzone deutlich. Der Effekt ist in den Zonen des 2. OGs am stärksten, da diese die größten energetischen Austauschflächen mit der klimatischen Umgebung aufweisen.

In dem Liniendiagramm werden die Zonenmittelwerte in Abhängigkeit des Stockwerks und der Orientierung gezeigt. Für die Höhe des Heizenergiebedarfs ist das Stockwerk, auf dem sich die Referenzzone befindet, einflussreicher als die konkrete Lage der Referenzzone auf dem Stockwerk. Für den Kühlenergiebedarf gilt dies umgekehrt. Die Randzonen (Zonen 1 und 14) besitzen im Vergleich zu den anderen Zonen des Stockwerks deutlich höhere Energiebedarfswerte, wobei sich die Stockwerks-Mittelwerte des Kühlenergiebedarfs weniger ähnlich sind als die des Heizenergiebedarfs.

Abweichungen resultieren hauptsächlich aus der Differenz zwischen Referenz- und Randzone. Dies zeigt die Zusammensetzung des Kühlenergiebedarfs. Die Randzonen (Zonen 1 und 14) nehmen ca. 10% der Flächen ein, wobei sie ca. 30% des Kühlenergiebedarfs verursachen. Können diese Abweichungen mathematisch korrigiert werden, so ist es möglich, das energetische Verhalten des Gebäudes auf Basis einer Referenzzone abzubilden und zu bewerten. Hierfür ist ein Verfahren erforderlich, das die verschiedenen starken Ausprägungen der Wärmetransmissionsvorgänge in der Referenzzone und in den Randzonen berücksichtigen kann.

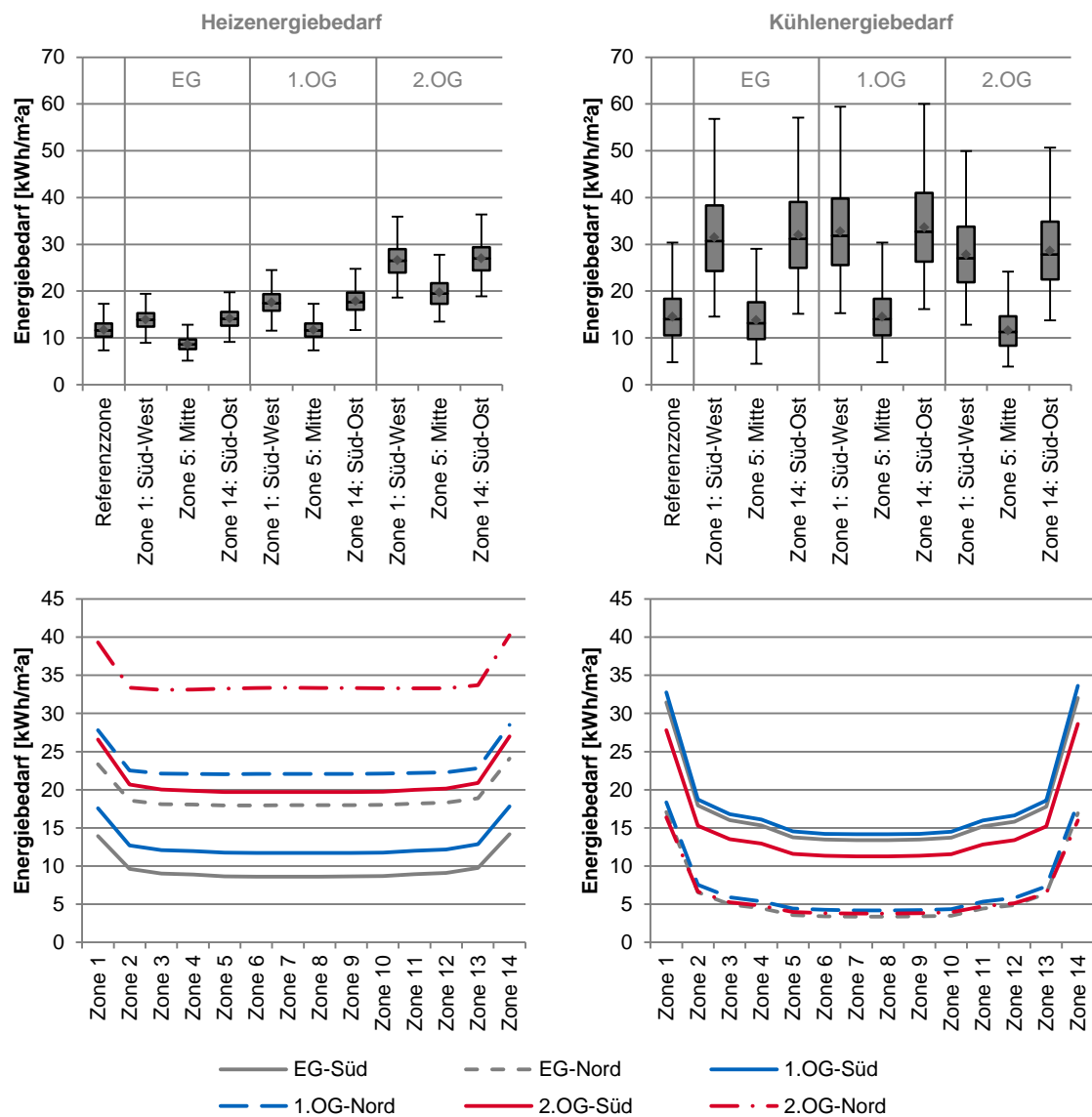


Abbildung 5.13: Boxplots (o.) für Heiz- und Kühlenergiebedarf der Referenzzone und Randzonen sowie die Mittelwerte aller relevanten Zonen (u.) in Abhängigkeit der Orientierung und des Stockwerks für den Testfall F05-V02

Bewertung der Ergebnisse und Abweichungen

Die Genauigkeit der RRM verbessert sich nicht mit kleineren Bandbreiten der Eingangsparameter. Die vorhandenen Abweichungen des Heiz- und Kühlenergiebedarfs resultieren aus den unterschiedlichen Lagen einer Gebäudezone und der Referenzzone. Die Abweichung entsteht hauptsächlich in den Randzonen und ist umso größer, je stärker sich Gebäudezone und Referenzzone in den Arten der Gebäudehülle (Fassade, Dach und Bodenplatte) und in den vorhandenen Gebäudehüllflächen unterscheiden. Somit verändern sich in der Energiebilanz die Anteile am Wärmetransmissionsverlust und am solaren Ertrag. Dabei reagiert der Heizenergiebedarf stärker auf die Höhenlage durch das Stockwerk, als auf die Lage in einem Stockwerk. Das Verhalten des Kühlenergiebedarfs ist

umgekehrt. Eine genaue Berechnung der Energieströme über die Gebäudehülle ist nur mit Hilfe eines detailliertem Gebäudegeometriemodells möglich, auf das in der RRM bewusst verzichtet wurde.

Die reduzierten Bandbreiten der Eingangsparameter führen einerseits zu einer gleichmäßigeren Ausbildung der mittleren relativen Abweichung. Dies erlaubt es, die vorhandene Abweichung leichter zu korrigieren. Andererseits werden der Heiz- und Kühlenergiebedarf des Gebäudes durch die Referenzzone sicherer erkannt und es treten keine extremen relativen Abweichungen (>50%) mehr auf. Die RRM bildet somit das energetische Verhalten des Gebäudes genauer ab.

Wie können nun die Einflüsse der Randzonen mit berücksichtigt werden? Wie kann eine einfache Implementierung für eine Potenzialabschätzung erfolgen? Transmissionswärmeverluste und solare Erträge stehen in Zusammenhang mit der Gebäudegeometrie und der Gebäudekompaktheit, dem Verhältnis von Gebäudehüllfläche zu Gebäudevolumen (A/V-Verhältnis). In der Praxis ist das A/V-Verhältnis ein relativ leicht abschätzbares Maß, wenn die Gebäudehauptdimensionen oder die grundlegende Gebäudeform bekannt sind. Somit eignet es sich als Eingangsgröße für ein einfach anwendbares Korrekturverfahren.

5.3 Entwicklung und Bewertung der verbesserten Methodik

5.3.1 Korrektur über das A/V-Verhältnis

Das A/V-Verhältnis erweist sich als ein leicht anwendbares Korrekturmaß, um die relativen Abweichungen zwischen RRM und Gebäudemodell zu minimieren. Für die weitere Diskussion erfolgte ein Anpassung des Referenzmodells, um A/V-Verhältnisse von ca. 0,3 bis 0,75 durch Skalierung zu erreichen. Zonen bzw. Stockwerke des Zweibundes wurden entsprechend entnommen oder ergänzt. Der Gebäudeenergiebedarf für Heizen und Kühlen beruht soweit möglich auf den Einzelzonenergebnissen.

Relative Abweichung in Abhängigkeit des A/V-Verhältnisses

Die Abbildung 5.14 zeigt, wie sich die mittlere relative Abweichung, die sich aus den relativen Abweichungen innerhalb einer Versuchsreihe ergibt, mit dem A/V-Verhältnis verändert. Die Versuche ohne mechanische Belüftung (F01 bis F08, F05-V01 & F05-V02) und mit mechanischer Belüftung (F09 bis F12) bilden zwei Gruppen in der Berechnung des Heizenergiebedarfs. Ohne eine mechanische Belüftung nimmt die mittlere relative Abweichung mit größerem A/V-Verhältnis stärker zu als mit mechanischer Belüftung. In beiden Gruppen ist ein linearer Zusammenhang zwischen relativer Abweichung und dem A/V-Verhältnis klar erkennbar vorhanden.

Die Darstellung für den Kühlenergiebedarf deutet auf einen linearen Zusammenhang zwischen relativer Abweichung und A/V-Verhältnis hin, jedoch ist dieser im Vergleich zum Heizenergiebedarf deutlich schwächer ausgeprägt. Für die Versuchsreihen ohne mechanischer Belüftung steigt die relative Abweichung mit größerem A/V-Verhältnis. Liegt ein höherer Kühlenergiebedarf (F05 bis F08) vor, zeigt sich ein deutlicherer Zusammenhang. Die Versuche mit mechanischer Belüftung

zeigen innerhalb ihrer eigenen Versuchsreihe ein annähernd lineares Verhalten hinsichtlich relativer Abweichung und A/V-Verhältnis. Weiter ist zu erkennen, dass neben dem A/V-Verhältnis auch die Luftwechselzahl auf die relative Abweichung wirkt. Ein größeres A/V-Verhältnis erhöht dabei die negative relative Abweichung und eine größere Luftwechselzahl erhöht die positive relative Abweichung. Im Versuch F10 mit einer Luftwechselzahl von 4h^{-1} gleichen sich beide Ursachen für eine relative Abweichung aus. Der Haupteinfluss auf die relative Abweichung wechselt hierbei. Steigt die Luftwechselzahl über einen Mindestwert weiter an, wie von F11 auf F12, dann scheint sich ein ähnliches Verhalten auszubilden.

Es zeigt sich, dass ein größerer Energiebedarf die lineare Abhängigkeit der relativen Abweichung vom A/V-Verhältnis verstärkt. Dies wird im Vergleich zwischen Heiz- und Kühlenergiebedarf deutlich. Die kleiner werdende Streuung bei steigendem Kühlenergiebedarf unterstützt diese Annahme. Deshalb wird die lineare Regression mit dem A/V-Verhältnis als Eingangsgröße im Korrekturverfahren zur Reduktion der relativen Abweichung verwendet.

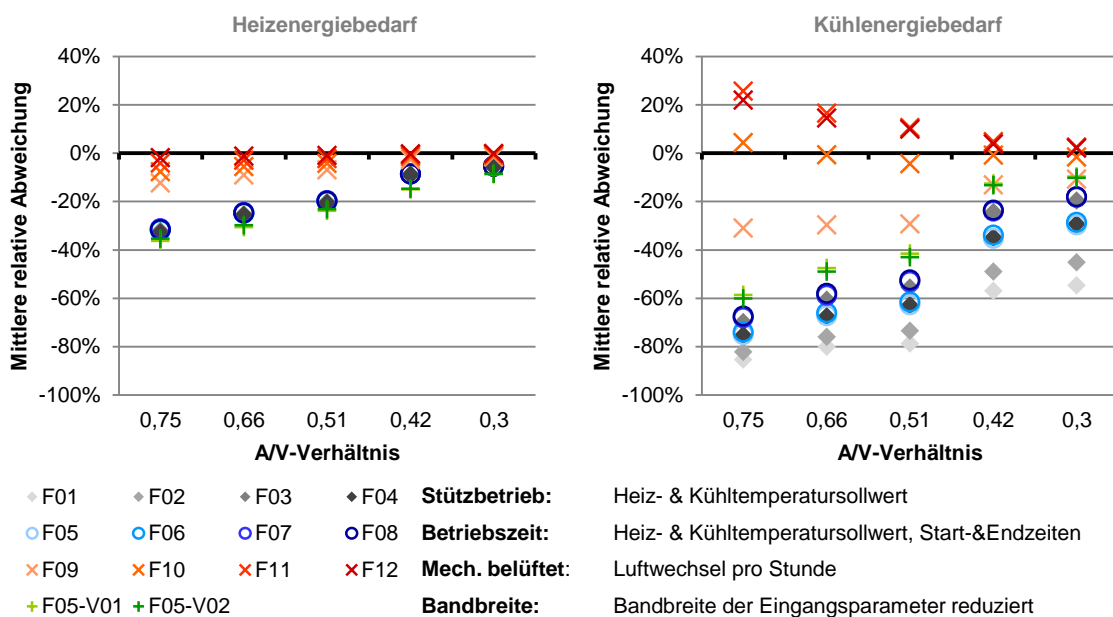


Abbildung 5.14: Auswirkung des A/V-Verhältnisses auf die mittlere relative Abweichung des Heiz-(l.) und Kühlenergiebedarfs (r) über alle bisher durchgeführten Versuchsreihen

Lineare Regression als Korrekturverfahren

Die mittlere relative Abweichung des Heizenergiebedarfs ist leichter zu korrigieren als die des Kühlenergiebedarfs. Dies bestätigen zum einen die ähnlich großen Regressionskoeffizienten und zum anderen die hohen Bestimmtheitsmaße ($>0,95$). Die einzelnen Werte befinden sich im Anhang A.3 auf Seite 187. Eine Gegenüberstellung der Werte findet sich in Abbildung 5.15.

Die Korrektur des Heizenergiebedarfs für die Versuche ohne mechanische Belüftung sind annähernd gleich. Die Reduktion der Bandbreiten erhöht das Bestimmtheitsmaß bei sonst ähnlichen Koeffizien-

ten. Für die Versuche mit mechanischer Belüftung scheint eine Unterscheidung hinsichtlich niedriger und hoher Luftwechselraten notwendig.

Die Korrektur des Kühlenergiebedarfs ist schwieriger. Einerseits unterscheiden sich die Regressionskoeffizienten der einzelnen Versuche deutlich. Andererseits sind die Bestimmtheitsmaße niedriger, mit überwiegend $> 0,85$ noch ausreichend genau. Ursachen hierfür sind der generell niedrige Kühlenergiebedarf und die angesetzten Bandbreiten der Eingangsparameter. Die Problematik verstärkt der unterschiedlich starke Einfluss des Solarertrags als einzige Kühllast in der Energiebilanz, z.B. führt die Reduktion des Kühltemperatursollwertes in den Versuchen F01 bis F03 zu einem höheren Regressionskoeffizienten und somit wachsendem Einfluss.

Darüber hinaus muss auch der Abstand zum Heiztemperatursollwert beachtet werden. Je kleiner der Abstand, desto kleiner der Bereich in dem weder geheizt noch gekühlt wird. Dies beeinflusst den Bereich, in dem der Solarertrag maßgeblich auf die Energiebilanz wirken kann, z.B. sinkt der Kühlenergiebedarf mit größer werdendem Abstand zwischen Raumtemperatursollwert für Heizen und Kühlen. Wie bereits bekannt, tendieren jedoch niedrigere Energiebedarfswerte zu größeren Abweichungen, daher sind größere Korrekturfaktoren des Kühlenergiebedarfs bei größeren Abständen der Heiz- und Kühltemperatursollwerte erforderlich (s. Abbildung 5.16). Für den Heizenergiebedarf ist dieser Zusammenhang nicht feststellbar.

In den Versuchen mit mechanischer Belüftung erfolgt ein Richtungswechsel in der Korrektur. Ist mit einem 2-fachen Luftwechsel (F09) eine Erhöhung notwendig, wird ab einem 4-fachen Luftwechsel (F10) mit einer Reduktion gerechnet. Es verändern sich dabei die Einflussstärken des Solarertrags, des Luftwechsels und des A/V-Verhältnisses auf die relative Abweichung des Kühlenergiebedarfs. Dies zeigt sich insbesondere am geringen Bestimmtheitsmaß von 0,39 des Versuchs F10. Nur die Versuchsreihe F10 weist positive sowie negative Abweichungen auf (s. Tabelle A.1 S. 187). Mit weiter ansteigender Luftwechselzahl steigt das Bestimmtheitsmaß an. Die Modelle F11 und F12 mit einem mittleren Luftwechsel von 8 bzw. 16 weisen ähnliche Regressoren auf. Dies gilt ebenfalls für die Versuche F05-V01 und F05-V02. Im Vergleich zur Basisvariante F05 sind die Koeffizienten dennoch sehr verschieden. Zusammenfassend erscheint eine einheitliche und übergeordnete Korrektur für die Versuche F01 bis F08 infolge der genannten Argumente als schwierig umsetzbar.

Zu beachtende Einflussfaktoren im A/V-Korrekturverfahren

Das Korrekturverfahren auf Basis des A/V-Verhältnisses ist anwendbar, da für den Heiz- und Kühlenergiebedarf eine Abhängigkeit der relativen Abweichung vom A/V-Verhältnis aufgezeigt werden konnte. Folgende Bedingungen sind zu beachten. Einerseits ist hinsichtlich einer vorhandenen mechanischen Belüftung zu unterscheiden, denn die Luftwechselzahl wirkt ab einem Schwellenwert sichtlich auf die relative Abweichung. Andererseits ist der Abstand der Temperatursollwerte zwischen Heizen und Kühlen zu berücksichtigen. Gegenüber Abstandsveränderungen ist die Korrektur des Kühlenergiebedarfs sensibler als die des Heizenergiebedarfs. Darüber hinaus haben die Bandbreiten der Eingangsparameter Auswirkungen auf die Genauigkeit der Regressionsgleichung.

Kleinere Bandbreiten führen zu einem höheren Bestimmtheitsmaß. Zudem erweisen sich größere Energiebedarfswerte als leichter korrigierbar als kleinere, denn die RRM erkennt höhere Energiebedarfswerte sicherer als niedrigere und das Verhalten der relativen Abweichung ist gleichmäßiger. Fließen diese Faktoren mit ein, kann sich das A/V-Korrekturverfahren als ein schnelles und einfaches Verfahren beweisen.

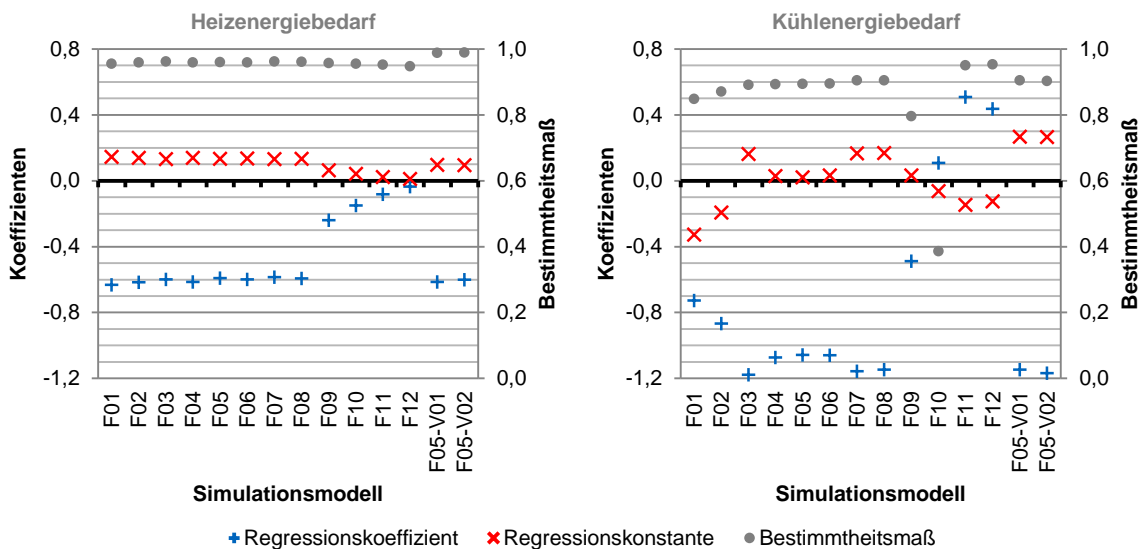


Abbildung 5.15: Koeffizienten des linearen Regressionsmodells zur Fehleranpassung der Modelle

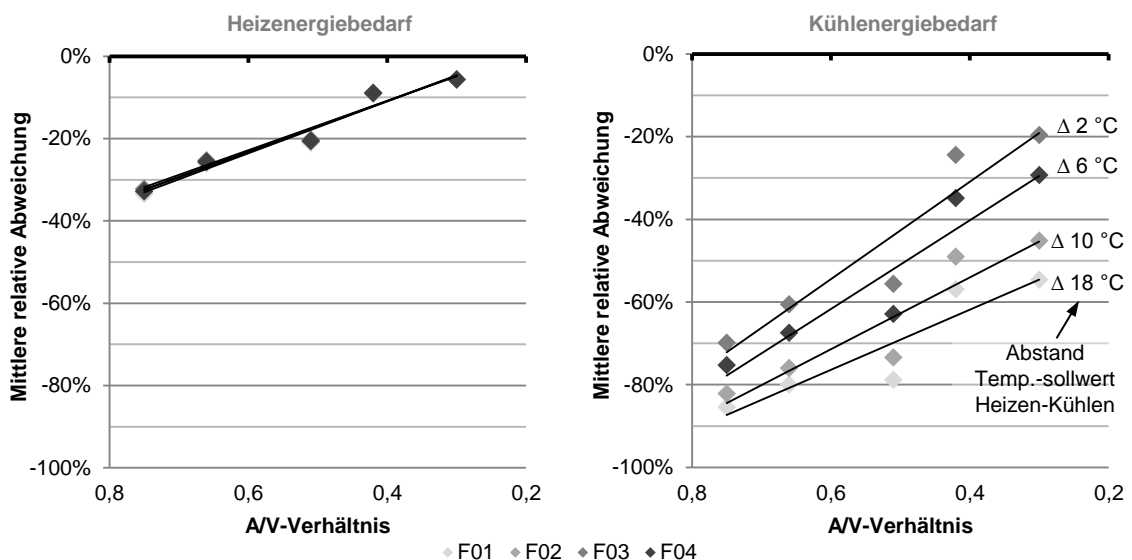


Abbildung 5.16: Auswirkungen des Heiz- und Kühltemperatursollwertes sowie der daraus resultierende Abstand auf das Korrekturverfahren auf die Versuche F01 bis F04

5.3.2 Analyse und Bewertung des Korrekturverfahrens

Die RRM ist eine stark vereinfachte Gebäudesimulation auf Basis von 1-Zonenmodellen der zu untersuchenden Nutzungen. Sie kann daher nicht alle in einer Gebäudesimulation auftretenden Prozesse abbilden. Die Bewertungsqualität der RRM erfolgt mit dem Vergleich der Stichprobenmittelwerte und der resultierenden mittleren relativen Abweichung zwischen RRM und Gebäudemodell. Dazu werden die Ergebnisse der RRM und des Gebäudemodells als zwei voneinander unabhängige Stichproben betrachtet. Ob die Verfahren bedeutungsvolle Unterschiede in den Ergebnissen oder Verteilungen aufweisen, kann mittels statistischer Tests herausgefunden und beurteilt werden.

Korrekturfaktoren und deren Auswirkung auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf

Die nachfolgenden Ergebnisse beruhen auf dem vorgestellten A/V-Korrekturverfahren. Das A/V-Verhältnis dient als Eingangsgröße x für das lineare Regressionsmodell. Die Korrekturmodelle liefern als Ergebnis einen Korrekturfaktor mit dem das Ergebnis der RRM zu multiplizieren ist. Die Korrektur der Heizenergie erfolgt auf Basis der Versuchsreihe F01 bis F08 mit F05-V01 und F05-V02. Es wird dabei folgende Korrekturgleichung verwendet:

$$K_{\text{Heizenergie}} = f(x) = \frac{1}{(1 + (b_1x + b_0))} = \frac{1}{1 + ((-0,60) \cdot x + 0,12)} \quad (5.1)$$

Die übergeordnete Korrektur des Kühlenergiebedarfs ist in Folge der fehlenden Homogenität in den Regressoren schwieriger. Als Lösungsvorschlag wird das Korrekturmodell auf den Ergebnissen der Versuche F05-V01 und F05-V02 aufgebaut. Die im Heizenergiebedarf vorhandene hohe Ähnlichkeit in der Versuchsreihe F05 unterstützt dieses Vorgehen. Alle Versuche weisen einen Energiebedarf auf und die relative Abweichung ist auf einem ähnlichen Niveau konstant. Für die Korrektur wird folgende Gleichung angesetzt:

$$K_{\text{Kühlenergie}} = f(x) = \frac{1}{(1 + (b_1x + b_0))} = \frac{1}{1 + ((-1,16) \cdot x + 0,27)} \quad (5.2)$$

Für das A/V-Verhältnis von 0,42 ergibt sich eine zu korrigierende mittlere Abweichung für den Heizenergiebedarf von ca. -13% mit dem Korrekturfaktor 1,15; für den Kühlenergiebedarf von ca. -22% mit einem Korrekturfaktor 1,28. Die Korrektur in der RRM erhöht in diesem Fall die Ergebnisse. Wie in Abbildung 5.17 gezeigt, nähern sich die Graphen für alle Versuche (vgl. Ausgangssituation in Abbildung 5.11) der Nulllinie an. Die Korrektur wirkt sich dabei nicht auf die Streuung der relativen Abweichung aus.

Die Korrektur verringert die absoluten Abweichungen und verschiebt die Punktwolke der Ergebnisse in Richtung des Nullpunktes (vgl. Abbildung 5.18). Die Werte von F05-V01 und V02 konzentrieren sich in einem sehr engen Bereich. Für die Basisversion F05 sind weiterhin relative Abweichungen mit -100% vorhanden, da ein in der Referenzzone fehlender Kühlenergiebedarf nicht angehoben werden kann. Die damit einhergehende absolute Verfehlung spielt in der energetischen Bewertung kaum eine Rolle.

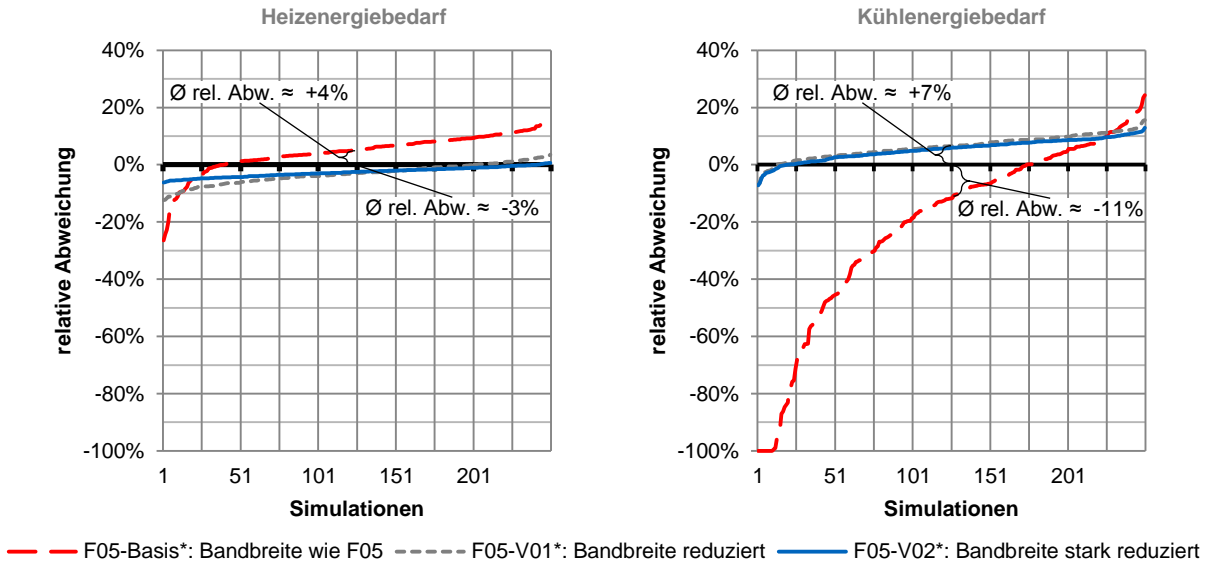


Abbildung 5.17: Relative Abweichung des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) nach Korrektur für das Basismodell F05

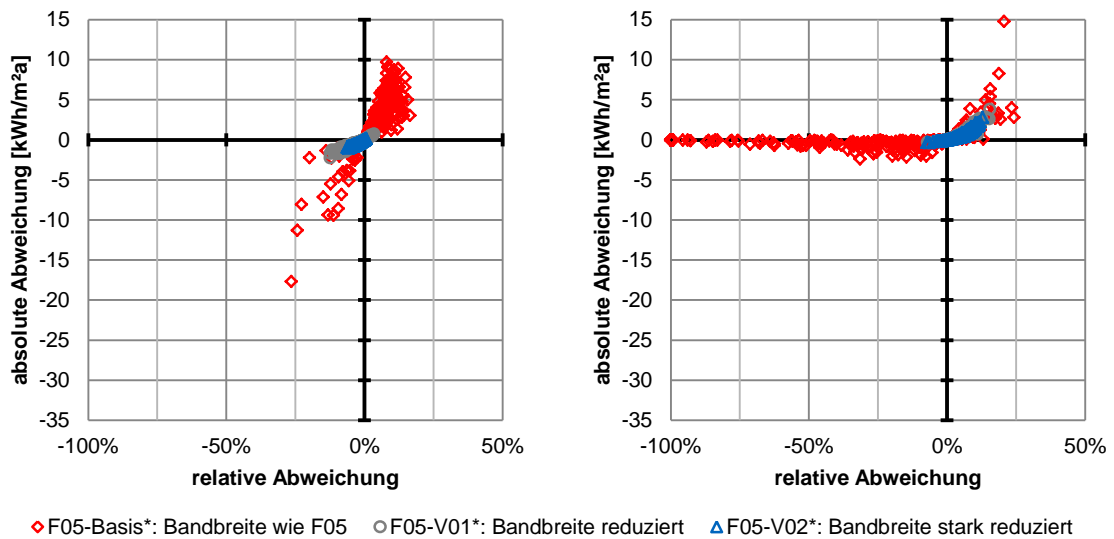


Abbildung 5.18: Beziehung zwischen absoluter und relativer Abweichung des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) nach Korrektur des Basismodells F05

Auswirkungen auf die Modellgenauigkeit

Die resultierende Abweichung zwischen RRM und Gebäudemodell wird anhand der Differenz der Mittelwerte diskutiert. In Tabelle 5.5 sind die grundlegenden Informationen zusammengefasst. Die Reduktion der Bandbreiten in den Eingangsparametern verringert die Standardabweichungen in allen Gebäudemodellen. Die Differenz der Mittelwerte wird in Bezug zu der Standardabweichung des Gebäudemodells gesetzt. Je kleiner der gebildete Koeffizient wird, desto unbedeutender ist die vorhandene Abweichung hinsichtlich der im Modell vorhandenen Streuung.

Tabelle 5.5: Auswirkung der auftretenden Differenzen zwischen RRM und Gebäudemodell ohne und mit Korrekturfaktor auf Basis der Effektgröße

	Heizenergiebedarf			Kühlenergiebedarf			
	F05-Basis	F05-V01	F05-V02	F05-Basis	F05-V01	F05-V02	
<i>Gebäudemodell</i>							
\bar{X}	54,8	16,8	18,9	7,2	12,3	11,1	kWh/m ² a
s	22,7	3,1	2,3	9,8	4,1	3,6	kWh/m ² a
<i>Referenzraummethode</i>							
	ohne Korrektur			ohne Korrektur			
\bar{X}	49,8	14,2	16,0	5,7	10,3	9,2	kWh/m ² a
Δ	-9,1	-15,7	-15,2	-20,4	-16,4	-17,1	%
δ	-0,22	-0,85	-1,26	-0,15	-0,49	-0,52	
	*mit Korrektur			*mit Korrektur			
\bar{X}	57,1	16,3	18,4	7,3	13,1	11,7	kWh/m ² a
Δ	4,2	-3,4	-2,8	1,7	6,9	5,9	%
δ	0,10	-0,18	-0,23	0,01	0,21	0,18	

\bar{X} : Mittelwert; s: Standardabweichung; Δ : relative Abweichung; δ : Effektgröße

Erfolgt keine Korrektur, so sind die Effekte in F05-V01 und V02 auf den Heizenergiebedarf als „groß“ und auf den Kühlenergiebedarf als „mittelgroß“ zu bewerten. Im Basismodell sind sie „gering“ und daher von geringer Bedeutung. Nach erfolgter Korrektur gelten die Effektgrößen des Heiz- und Kühlenergiebedarfs nur noch als „gering“. Die bleibende Abweichung verliert somit an Bedeutung. In diesem Fall gilt eine Abweichung von ca. $\pm 3\%$ im Heizenergiebedarf und ca. $\pm 6\%$ im Kühlenergiebedarf für die Gebäudebewertung durch die RRM als akzeptabel. Folglich kann ohne Qualitätsverlust in der Bewertung die relative Abweichung zunehmen, wenn Unsicherheiten die Bandbreiten der Eingangsparameter erhöhen.

Bewertung des Korrekturverfahrens

Statistische Testverfahren werden für die Bewertung der Differenzen zwischen Mittelwert und Standardabweichung beider Stichproben eingesetzt. Sie geben Auskunft, ob ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen RRM und Gebäudemodell besteht. Die Ergebnisse sind qualitativ in Tabelle 5.6 zusammengefasst und beruhen auf den aufgelisteten Tests in Anhang A ab Seite 188. Die

Standardabweichung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs ist für fast alle Versuche nicht signifikant unterschiedlich, daher wird sie für die weiteren Untersuchungen als gleich betrachtet.

Die Bewertung des Mittelwertes des Heiz- und Kühlenergiebedarfs ist verschieden. Für die Versuche ohne mechanische Belüftung (F01 bis F08) wird ein signifikanter Unterschied festgestellt, für die Versuche mit mechanischer Belüftung (F09 bis F12) dagegen nicht. Annähernd umgekehrt ist das Verhalten für die Bewertung des Kühlenergiebedarfs. Die Reduktion der Bandbreiten der Eingangsparmeter führt bei beiden Energiearten überwiegend zu keiner Veränderung. Die Differenzen in den Mittelwerten werden als signifikant unterschiedlich ausgewiesen.

A/V-Verhältnis für Korrektur geeignet

Das Korrekturverfahren reduziert die Effektgrößen der verbleibenden Abweichungen von „mittelgroß“ und „groß“ auf „gering“. Die statistisch signifikanten Abweichungen verlieren damit an Bedeutung. Die Standardabweichungen bzw. deren Varianz sind nicht signifikant unterschiedlich. Sie werden damit als gleich angenommen und bilden die Grundlage der varianzbasierten Sensitivitätsanalysen. Im Vergleich mit dem Gebäudemodell liefert die RRM für die Bewertung eines homogenen Gebäudes ausreichend genaue Mittelwerte und gleiche Standardabweichungen. Das A/V-Verhältnis ist folglich als Korrekturfaktor zur Reduktion der Abweichung geeignet.

Tabelle 5.6: Zusammenfassung der statistischen Tests zur Überprüfung auf Unterschiede der Mittelwerte und Standardabweichungen zwischen Gebäudemodell und RRM

Versuch	Heizenergiebedarf				Kühlenergiebedarf			
	ohne Korrektur		mit Korrektur		ohne Korrektur		mit Korrektur	
	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	$\mu_{\text{Geb}} \neq \mu_{\text{RRM}}$	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	$\mu_{\text{Geb}} \neq \mu_{\text{RRM}}$	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	$\mu_{\text{Geb}} \neq \mu_{\text{RRM}}$	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	$\mu_{\text{Geb}} \neq \mu_{\text{RRM}}$
F01	nein	ja	-	-	nein	nein	-	-
F02	nein	ja	-	-	nein	nein	-	-
F03	nein	ja	-	-	nein	nein	-	-
F04	nein	ja	-	-	nein	nein	-	-
F05	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein
F06	nein	ja	-	-	nein	nein	-	-
F07	nein	ja	-	-	nein	nein	-	-
F08	nein	ja	-	-	nein	nein	-	-
F09	nein	nein	-	-	ja	ja	-	-
F10	nein	nein	-	-	nein	nein	-	-
F11	nein	nein	-	-	nein	ja	-	-
F12	nein	nein	-	-	nein	ja	-	-
F05-V01	nein	ja	nein	nein	nein	ja	nein ¹	ja ¹
F05-V02	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein ¹	ja ¹

¹ Versuchsreihe mit reduzierter Stichprobenanzahl und der Bedingung eines Mindest-Kühlenergiebedarfs von 5 kWh/m²a im Gebäudemodell

5.4 Vergleich der einflussreichen Parameter

Sensitivitätsindizes dienen der Kennzeichnung von wesentlichen Einflussfaktoren im Modell und beschreiben die Einflussstärke einzelner Faktoren. Typische Vertreter sind z.B. die standardisierten Regressionskoeffizienten. Die Abbildung 5.19 stellt alle standardisierten Regressionskoeffizienten der Versuche F01 bis F12 aus der RRM dem Gebäudemodell in einem Scatter-Plot gegenüber.

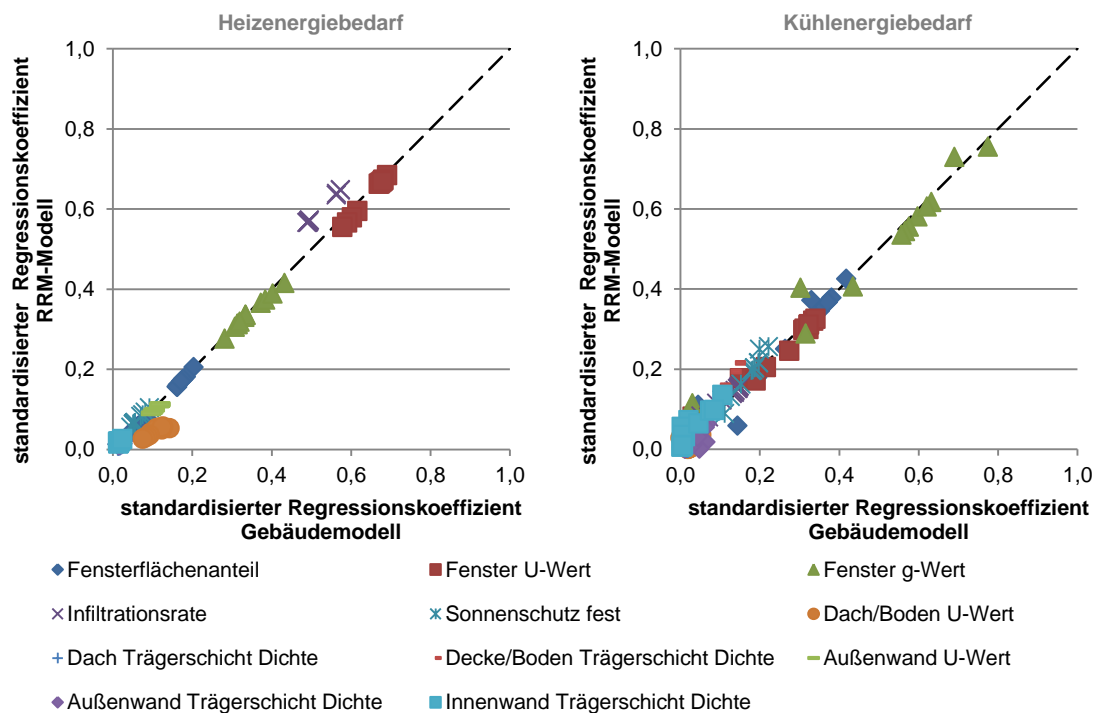


Abbildung 5.19: Vergleich der standardisierten Regressionskoeffizienten zwischen RRM und Gebäudemodell für den Heiz-(l.) und Kühlenergiebedarf (r.)

Der Einfluss wird mit dem Bereich von 0 (keinen Einfluss) bis 1 (starker Einfluss) qualitativ abgebildet. Bewerten die Modelle einen Faktor gleich, dann befindet sich seine Position auf der gestrichelt dargestellten Winkelhalbierenden. Die standardisierten Regressionskoeffizienten der RRM sind nach der Fläche gewichtet. Beide Modelle identifizieren für den Heiz- und Kühlenergiebedarf die gleichen Faktoren und weisen qualitativ gleiche Einflussstärken auf. Es sind nur leichte Verschiebungen zu erkennen, die jedoch die qualitative Einstufung des einzelnen Parameters nicht beeinflussen. Die Haupteinflussfaktoren auf die Heizenergie sind U-Wert des Fensters, Infiltrationsluftmenge und der g-Wert der Verglasung. Für die Kühlenergie sind es g-Wert der Verglasung, Fensterflächenanteil und U-Wert des Fensters. Innere Lasten durch Personen oder Geräteausstattung wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt, um die Auswirkungen des fehlenden Gebäudegeometriemodells auf die Genauigkeit der RRM nachvollziehbar untersuchen zu können.

Die RRM erkennt wie das Gebäudemodell die gleichen Faktoren als wesentlich und stellt diese mit fast gleicher Wichtigkeit dar; die Vereinfachungen in der Gebäudegeometrie haben somit vernachlässigbare Auswirkungen und die Skalierung der Ergebnisse auf Gebäudeebene funktioniert. Darüber

hinaus kann die Standardabweichung als gleich angenommen werden. Beides eröffnet eine Analyse der Parameter auf Raumebene und Gebäudeebene.

5.5 Zusammenfassung

Die RRM besitzt im Vergleich zum Gebäudemodell bereits ohne Korrektur nur eine mittlere relative Abweichung von ca. -7% im Heizenergiebedarf und -14% im Kühlenergiebedarf. Die Berechnungsgenauigkeit ist als gut einzustufen, wenn die Abweichungen im Vergleich zu den im BESTEST (s. [131]) aufgeführten Abweichungen innerhalb der Testfälle anderer Simulationswerkzeuge stehen (Mittlere Abweichung in den Testfällen der Serie 900: Heizenergiebedarf ca. $\pm 17\%$, Kühlenergiebedarf ca. $\pm 26\%$). Der Haupteinflussfaktor der Abweichung ist der Beitrag des solaren Ertrags in der Energiebilanz. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt dies anhand der wesentlichen Faktoren U-Wert Fenster, g-Wert Verglasung und Fensterflächenanteil. Der solare Ertrag ist von der Lage der Zone im Gebäude abhängig. Die Lage beeinflusst darüber hinaus die Wärmetransmissionsverluste und damit die Abweichungen der Mittelwerte zwischen Referenzzone und Gebäudezonen.

Das A/V-Verhältnis steht mit der relativen Abweichung in Zusammenhang. Je größer es ist, desto größer ist die Abweichung. Das A/V-Verhältnis ist als ein Korrekturfaktor zur Reduktion der relativen Abweichung geeignet. Die Korrektur erweist sich für den Heizenergiebedarf leichter als für den Kühlenergiebedarf. Mit Hilfe der Korrektur werden die Abweichungen reduziert und nachfolgend die Effekte der Abweichung als *gering* eingestuft. Die Bandbreiten der Eingangsparameter wirken auf das Verhalten der relativen Abweichung. Je kleiner die Bandbreite, desto gleichmäßiger bildet sich eine über die Versuchsreihe hinweg gleiche relative Abweichung aus. Dies wirkt sich positiv auf die übergeordnete Korrektur der RRM aus.

Mit Hilfe des A/V-Korrekturverfahrens können z.B. im Modell F05-V01 die relativen Abweichungen des Heizenergiebedarfs auf ca. -3% und des Kühlenergiebedarfs auf ca. +7% reduziert werden. Die Standardabweichungen bzw. die Varianzen beider Modelle weisen keinen signifikanten Unterschied auf. Die qualitativen Sensitivitätsindizes werden mit gleicher Stärke in der Referenzzone identifiziert und können flächengewichtet auf Gebäudeebene skaliert werden. Die Mittelwerte werden überwiegend als signifikant unterschiedlich bewertet. Der Effekt der Mittelwertdifferenzen ist abhängig von der Standardabweichung im Modell. Er wird nach der Modellkorrektur als „gering“ eingestuft.

Mit realen Nutzungen kommen weitere Effekte hinzu und diese vergrößern die Standardabweichung. Neue Energieströme (interne Lasten, Lüftungswärmeverluste etc.) erweitern die Energiebilanz und können einen großen Anteil in dieser einnehmen. Damit verlieren zugleich die Energieströme der Wärmetransmission und des solarer Ertrags an Bedeutung. Besonders deutlich wird dies z.B., wenn die thermische Gebäudehülle durch Öffnen eines Fenster überbrückt wird und infolge dessen der Lüftungswärmeverlust ansteigt. Dies lässt vermuten, dass der Effekt des fehlenden Gebäudegeometriemodells auf die relative Abweichung noch weiter an Bedeutung verlieren wird. Die Auswirkungen von realen Nutzungen auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf werden nachfolgend weiter untersucht.

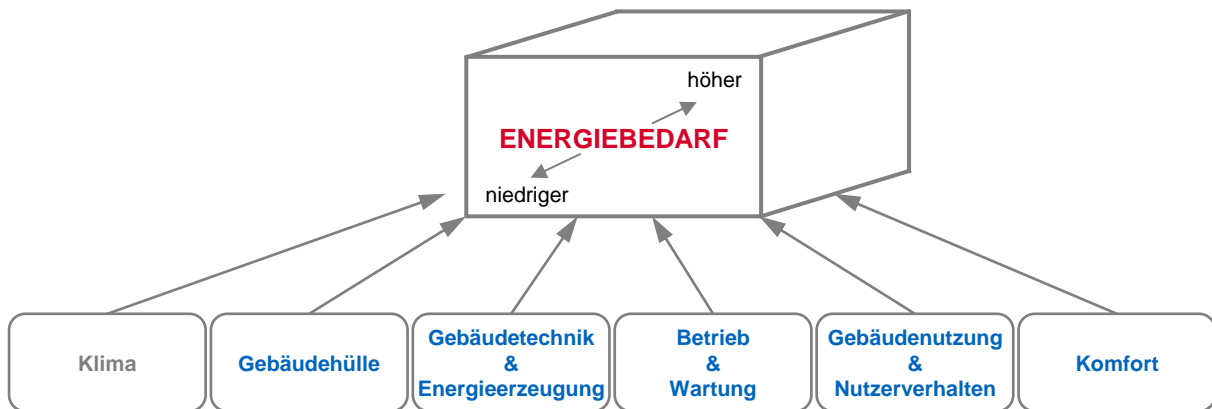
KAPITEL 6

Einfluss von Nutzungsarten auf den Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen

6.1 Vorgehen und angesetzte allgemeine Randbedingungen

Tätigkeiten in einem Raum und die dafür notwendige Ausstattung können als Nutzungsarten zusammengefasst werden. Sie stellen unterschiedliche Anforderungen an das zu gewährleistende Raumklima, die für den Prozess erforderliche technische Ausstattung, die variablen Zugangsmöglichkeiten zum Arbeitsplatz und somit auch an die technische Gebäudeausrüstung (TGA), die diese Dienste zur Verfügung stellen und gewährleisten muss. Folglich ist der Energiebedarf direkt mit der vorhandenen Nutzung und Nutzungszeit gekoppelt. Das Gebäude bietet den hierfür erforderlichen Raum. Die Verschiedenartigkeit innerhalb einer Nutzungsart und über andere Nutzungsarten hinweg erschwert eine eindeutige, nachvollziehbare und sichere Abschätzung des Energiebedarfs auf Raum- und Gebäudeebene.

Hochschulen sind großflächig nach dem System der DIN 277 zur eindeutigen Beschreibung von Nutzungsarten erfasst. Die Beschreibungen der Nutzungen können im Wortlaut so detailliert sein, dass eine Übertragbarkeit zu anderen, ähnlichen Nutzungen faktisch nicht möglich ist. Erst mit der allgemeineren, energetischen Beschreibung einer Nutzung lässt sich diese Hürde überwinden und mehrere Nutzungen können in Gruppen zusammengefasst werden. Dies führt zu einer Reduktion sowohl des Zeitaufwands für eine Gebäudebegehung als auch des erforderlichen Datenvolumens für die Parametrierung. Der auf die Nutzung im Raum gelegte Fokus der Referenzraummethode bietet somit die Möglichkeiten einer hohen Skalier- und Übertragbarkeit. Nutzungen sind über charakteristische Parameter energetisch zu beschreiben. Mittelwerte und Bandbreiten der charakterisierenden Parameter sind nicht nur erforderlich, um die Vielzahl an Abstufungen einer Nutzung zu beschreiben, sondern auch, um deren unterschiedliche Auslastungen zu beachten. Neben den spezifischen Nutzungs- und Komfortanforderungen sind für den Energiebedarf auch die charakteristischen Parameter der Gebäudehülle, Gebäudetechnik und deren Betrieb relevant. In ihrer Kombination wirken sie deutlich auf den zu erwartenden Energiebedarf einer Nutzung und somit auch des Gebäudes. Daher werden entsprechend Abbildung 6.1 die Effekte der als energetisch relevant eingestuften Parameter auf den Energiebedarf untersucht, wenn Nutzungseffekte in einer Bewertung mit integriert sind.



Übersicht: Eingesetzte Parameter in der Modellierung der Simulationsmodelle

Baukonstruktionsabhängige Parameter		Nutzungsabhängige Parameter	
Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch
<ul style="list-style-type: none"> • Fensterflächenanteil • Fenster U-Wert • Fenster g-Wert • Sonnenschutz fest • Außenwand U-Wert 	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltrationsrate 	<ul style="list-style-type: none"> • Raumtemperatursollwert-anpassung $\pm\Delta\theta$ • Raumlufffeuchte Max. • Raumlufffeuchte Min. • Beleuchtung Anschlussleistung • TGA Δt Einschaltzeitpunkt • WRG Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Person Belegungsdichte • Person Wärmeabgabe • Person Anwesenheit • Person Frischluftbedarf • Luftwechselzahl • Raumtemperatur Heizen • Raumtemperatur Kühlen • Sonnenschutz beweglich • Elek. Geräte Anschlussleistung • Elek. Geräte Standby • Nutzungsbeginn • Nutzungsende

Abbildung 6.1: Studienkonzept zur Analyse von Nutzungseffekte auf den Nutzenergiebedarf eines Raumes bei Variation ausgewählter Parameter

Die nachfolgende Untersuchung beschreibt die unterschiedlich starken Auswirkungen einzelner Parameter auf den Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen in den Nutzungen Verkehrsfläche, büroähnliche Nutzung, Hörsaal als Raum für seminaristischen Unterricht und Forschungslabor. Sie liefert Anhaltspunkte, welche Parameter in einer Analyse oder Datenerhebung ausschlaggebend sind. Faktoren wirken infolge der Kombination aus vorhandener Nutzung und Gebäudequalität unterschiedlich stark auf den Energiebedarf. Der elektrische Energiebedarf wird infolge des deterministischen Modells¹⁰ im Bezug zur Fläche eindeutig bestimmt und ist daher nicht relevant für diese Untersuchung. Die aufgeführten Nutzungen weisen steigende Raumklimaanforderungen und größer werdende innere Lasten auf. Als Folge erhöhen sie die Anforderungen an das technische Raumkonditionierungssystem. Die übergeordneten Parameter und eine Beschreibung der Simulationen sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

¹⁰Der elektrische Energiebedarf wird im Modell eindeutig über Nutzungszeiten und fest definierte Leistungswerte (W/m^2) beschrieben. Er unterliegt damit nicht den Unschärfen infolge der angesetzten Vereinfachungen im Gebäudegeometrie-modell. Er ist damit eindeutig in Abhängigkeit der angesetzten Flächen bestimmbar.

Tabelle 6.1: Raumgeometrien und Eigenschaften für die Simulationsmodelle der verschiedenen Nutzungsarten

Nutzungsart	Achsen		Raumdimensionen			Flächen		Volumen
	Raster [m]	Anzahl [-]	Länge [m]	Tiefe [m]	Höhe [m]	Raum [m ²]	Fassade [m ²]	Raum [m ³]
büroähnliche Nutzung:	1,35	3	4	5	3	20	12	61
Hörsaal:	1,35	8	11	5	3	54	32	162
Labor:	1,35	6	8	4	3	32	24	97
Verkehrsfläche:	1,35	6	8	4	3	32	24	97

Bezeichnungen in den Simulationen:

- oWSchV: energetischer Baustandard ohne Wärmeschutzverordnung
- mWSchV: energetischer Baustandard mit Wärmeschutzverordnung
- EnEV: energetischer Baustandard nach Energieeinsparverordnung
- W1: Fassade mit Fensterflächenanteil 25 - 45 %
- W2: Fassade mit Fensterflächenanteil 45 - 65 %
- W3: Fassade mit Fensterflächenanteil 65 - 85 %

Technische Parameter sind leichter zu modellieren als das Nutzerverhalten. Bleibt die in der Nutzung enthaltene Unsicherheit in der Bewertung unbeachtet, weisen Parameter falsch gewichtete Effekte auf den Energiebedarf aus. Negative Folgen sind ggf. die Auswahl von weniger wirkungsvollen Energieeinsparmaßnahmen auf Basis falscher Einsparpotenziale und die einhergehende Notwendigkeit fehlende Einspareffekte dem Kunden zu erklären. Auf Energieeinspareffekte wirkt die Beziehung zwischen Gebäudequalität-TGA-Nutzung stark. Sie wird mittels der Parameter in Tabelle 6.2 untersucht und in vier Kategorien gebündelt. Die Parameterauswahl erfolgte nach den gleichen Kriterien, wie bereits in Abschnitt 4.2 aufgeführt.

Tabelle 6.2: Untersuchungsparameter für die Analyse von unterschiedlichen Nutzungen

Baukonstruktionsabhängige Parameter		Nutzungsabhängige Parameter	
statisch	dynamisch	statisch	dynamisch
- Fensterflächenanteil	- Infiltration	- Raumtemperatursollwert- anpassung $\pm\Delta\theta$	- Person Belegungsdichte
- Fenster U-Wert		- Raumluftfeuchte Max.	- Person Wärmeabgabe
- Fenster g-Wert		- Raumluftfeuchte Min.	- Person Anwesenheit
- Sonnenschutz fest		- Beleuchtung Anschluss- leistung	- Person Frischluft
- Außenwand U-Wert		- TGA Δt Einschaltzeitpunkt	- Luftwechselzahl
- Außenwand Wärmekapazität		- WRG Wirkungsgrad	- Raumtemperatur Heizen
			- Raumtemperatur Kühlen
			- Sonnenschutz beweglich
			- Elek. Geräte Anschlussleistung
			- Elek. Geräte Standby
			- Nutzungsbeginn
			- Nutzungsende

Kurzbezeichnung der Kategorien:

K1:BauKonstPar_stat

K2:BauKonstPar_dyn

K3:NutzPar_stat

K4:NutzPar_dyn

Die Untersuchung baut auf zwei Stufen auf. In der ersten Stufe bilden 1-Zonenmodelle mit jeweils einer Fassade je Haupthimmelsrichtung die Datengrundlage für die Regressionsmodelle. Die Innenwände, die Decke und der Fußboden werden im Rahmen des Simulationsmodells in EnergyPlus als adiabatisch angenommen. Das in der Monte Carlo Simulation verwendete Eingangssample beinhaltet für die jeweilige Nutzung 832 Stichproben aus den angegebenen Wertebereichen der Untersuchungsparameter. Die Stichprobenziehung der 23 Untersuchungsparameter aus Tabelle 6.2 für die Nutzungsanalyse erfolgt auf Basis der Sobol-Sequenzen. In der zweiten Stufe werden die erzeugten Regressionsmodelle verwendet, um die varianzbasierten Sensitivitätsindizes mit den Schätzern nach Saltelli und Jansen zu berechnen. Die über die Sensitivitätsindizes gebildete Summe ergibt nicht immer den zulässigen Wert 1. Dies tritt mit größerer Differenz und sehr häufig für die Schätzung nach Jansen auf. Daher erfolgt die Bewertung anhand der geschätzten Sensitivitätsindizes nach Saltelli. Die Indizes nach Jansen werden als Bestätigung der Tendenz im Anhang mit angegeben. Ein weiterer Grund für die Summendifferenz ist die geringe Wirkung einzelner Parameter auf die Varianz des Ergebnisses, damit können diese Parameter vernachlässigt werden. Der Nachweis ihrer genauen Wirkung ist nur mit einer noch größeren Stichprobe sicher möglich. Um diese Ungenauigkeiten zu berücksichtigen, erfolgt für die grafische Aufbereitung eine Skalierung auf 100%. Für einen verständlichen Überblick erfolgt die Untersuchung anhand der Nutzungen mit Süd-Fassade.

In der Statistik ist es üblich, zwei unterschiedliche Tests zur Prüfung einer Hypothese zu verwenden. Damit soll eine größere Robustheit, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Ergebnisse erreicht werden. Aus diesem Grund werden je Nutzungsart zwei individuell erzeugte Eingangssamples (Nutzung 1 und Nutzung 2) verwendet, die sich in den Mittelwerten und Bandbreiten ausgewählter Untersuchungsparameter voneinander unterscheiden. Die gewählten Bandbreiten und Mittelwerte der Untersuchungsparameter lassen sich in der Praxis per Literaturrecherche oder Begehungen erheben und stellen hier nur einen Auszug aus den vielen Möglichkeiten an Abstufungen dar. Die zu den Untersuchungsparametern gehörenden Werte und Bandbreiten sowie die Berechnungsergebnisse aller Nutzungen und Orientierungen sind im Anhang B ab Seite 195 aufgeführt.

Die berechneten Sensitivitätsindizes sind die Datenbasis der in diesem Kapitel eingesetzten Radar-Charts. Parameter weisen Werte zwischen 0 (kein Effekt) und 1 (alleiniger Effekt) auf. Sie repräsentieren den Anteil eines Untersuchungsparameters an der Streuung des Ergebnisses. Der Radar-Chart ist in Form einer Tonne aufgetragen. Je stärker der Effekt eines einzelnen Parameters ist, desto stärker wird die Tonne nach innen keilförmig verformt. Wirken mehrere Effekte einer Kategorie sichtbar auf das Ergebnis, dann ist die Tonne schwächer und großflächiger deformiert.

6.2 Nutzungsarten und ihre energetischen Einflussfaktoren

6.2.1 Verkehrsfläche

Zu Beginn wird die Nutzungsart Verkehrsfläche analysiert. Ihr Anteil beträgt ca. 20-30% der Gesamtfläche eines Gebäudes. Auch wenn sie im eigentlichen Sinne keine aktive Nutzung von Personen beschreibt, gibt es Parameter, die den Heizenergiebedarf beeinflussen. Verkehrsflächen sind angesichts des großen Flächenanteils und des verschiedenen energetischen Verhaltens zwischen innen und außen liegenden Flächen in einer energetischen Gebäudebewertung zu unterscheiden. Bei innen liegenden Nutzungen sind die Wärmetransmissionsprozesse mit Nachbarräumen bei ähnlichen Temperaturbedingungen schwach und meist vernachlässigbar. Die Infiltrationsluftmenge ist klein und kaum schätzbar. Ist sie vorhanden, so ist sie von Vorräumen temperiert und wirkt unwesentlich auf den Energiebedarf. Wichtiger sind Flächen mit Außenwänden. Ihr Heizenergiebedarf steht über Wärmetransmission, Infiltration und Lüftung über die Fassade in direkter Verbindung mit dem Klima.

Sensitivitätsindizes der Eingangsparameter

Baukonstruktionsabhängige Parameter oder Nutzungsparameter, wie z.B. der U-Wert der Außenwand oder der Heiztemperatursollwert, beeinflussen den Heizenergiebedarf. Für sie ergeben sich auf Basis der Abbildung 6.2 folgende Beziehungen. Für größere Fensterflächenanteile gemäß dem Modell W3 ist der U-Wert des Fensters der Haupteinflussfaktor mit Anteilen von ca. 40-55%. Für kleinere Fensterflächenanteile sind die Effekte auf die Faktoren Fenster U-Wert, Außenwand U-Wert und Raumtemperatur Heizen aufgeteilt. Ein besserer energetischer Baustandard steigert die Sensitivität gegenüber den U-Werten und reduziert sie gegenüber der Raumtemperatur Heizen. Für kleinere und mittlere Fensterflächenanteile bietet der Parameter Raumtemperatur Heizen infolge der hohen Sensitivität ein leicht erschließbares Energieeinsparpotenzial. Folglich sind für Verkehrsflächen oder ähnlich genutzte Flächen ohne Personennutzung die U-Werte der Gebäudehülle und die Raumtemperatur während des Heizbetriebs die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Heizenergiebedarf.

Normalverteilung des Heizenergiebedarfs im Simulationsmodell

Um die Auswirkungen der Parameteränderungen auf den Heizenergiebedarf zu erkennen, wird für die weitere Betrachtung Nutzung 2 mit herangezogen. Nutzung 1 hat mit 19°C eine höhere Raumtemperatur während des Heizbetriebs als Nutzung 2 mit 16°C. Die Betriebszeit ist in Nutzung 1 zwei Stunden kürzer und die wirksame Anschlussleistung der Beleuchtung ist um 1,5 W/m² niedriger. In Abbildung 6.3 sind für Nutzung 1 und 2 die Heizenergiebedarfe aufgezeigt. Sie verringern sich zum nächst besseren energetischen Baustandard um ca. 40-55%. Im direkten Vergleich ist der Heizenergiebedarf der Nutzung 1 ca. doppelt so hoch wie in Nutzung 2. Die Raumtemperatur Heizen besitzt mit den Sensitivitätsindizes 0,47 bzw. 0,38 in Nutzung 1 und 2 die höchsten Einzelwerte und ist damit die Hauptursache für den Unterschied. Wie anhand der Nutzungen 1 und 2 gezeigt, führen bereits geringe Veränderungen der Randbedingungen zu deutlich anderen Heizenergiebedarfswerten.

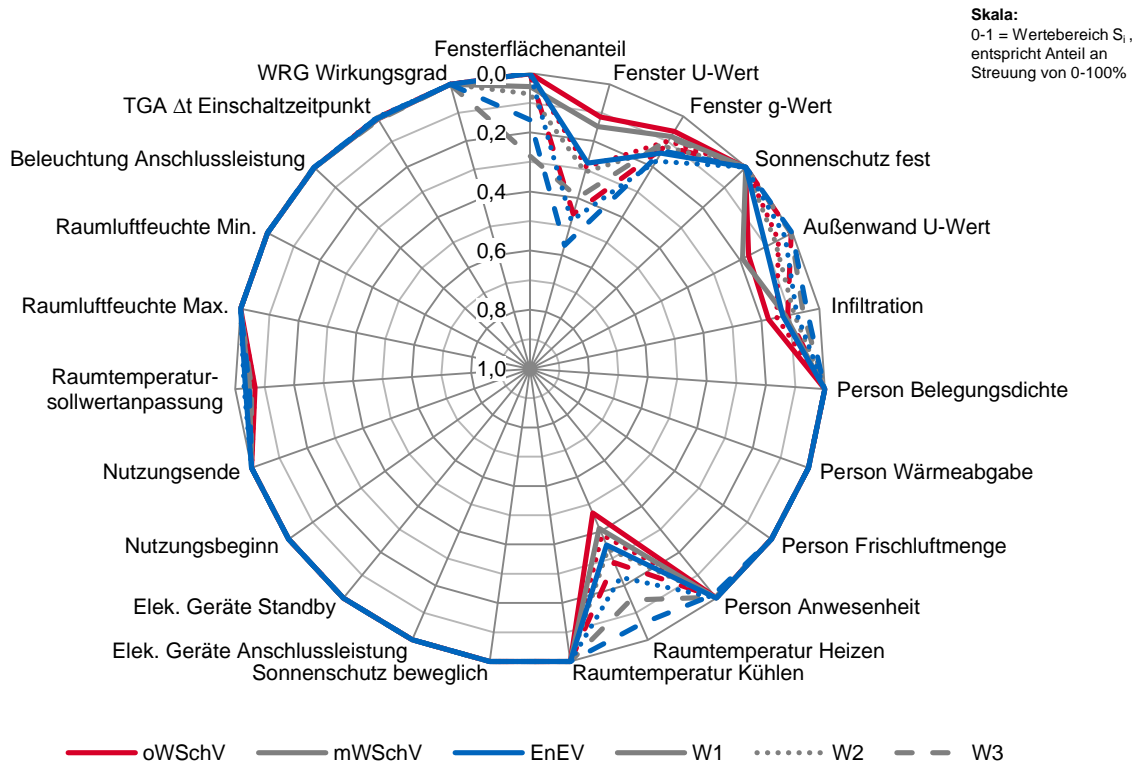


Abbildung 6.2: Radar-Chart Sensitivitätsindizes für den Heizenergiebedarf der Verkehrsfläche mit Nutzung 1

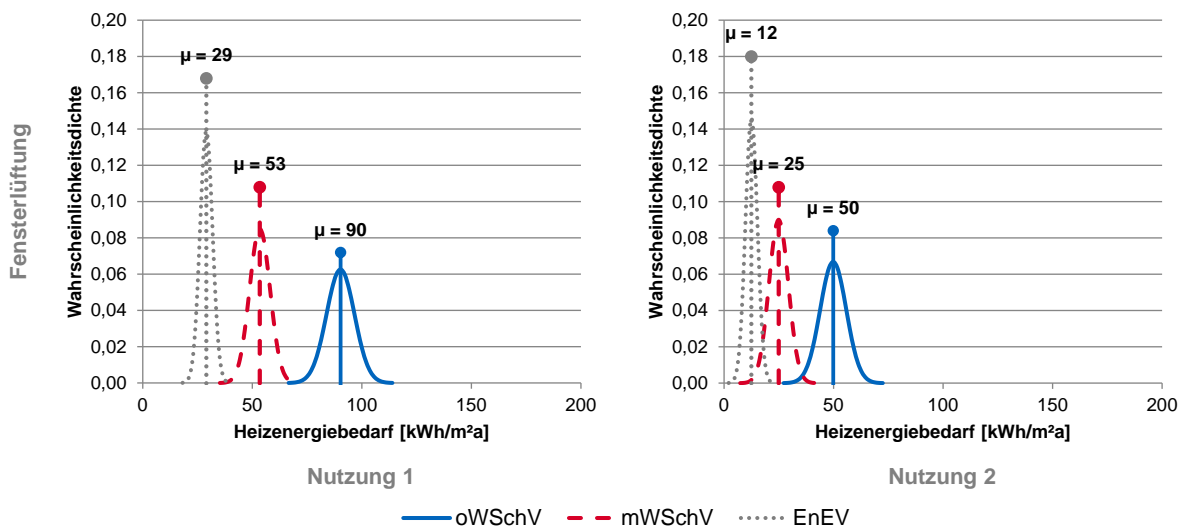


Abbildung 6.3: Normalverteilung des Heizenergiebedarfs für Verkehrsfläche mit süd-orientierter Fassade und Fensterflächenanteil W1

Einflussstärke der einzelnen Kategorien

Die Summeneffekte der gestreuten Parameter sind für Nutzung 1 und 2 in Abbildung 6.4 aufgetragen und weisen eine hohe Ähnlichkeit auf. Sie werden als gleich angenommen. Der Effekt der Kategorie K1:BauKonstPar_stat auf den Heizenergiebedarf steigt mit besserem energetischen Baustandard an, während die Effekte der anderen Kategorien abnehmen. Dies gilt ebenfalls für einen größer werdenden Fensterflächenanteil innerhalb eines Baustandards. Der Effekt der Raumtemperatur Heizen in der Kategorie K4:NutzPar_dyn sinkt am stärksten. Sie erweist sich als abhängig von dem Fensterflächenanteil und dem energetischen Baustandard. Je größer der Fensterflächenanteil und je besser der energetische Baustandard bei Nutzungen ohne Personen sind, desto geringer ist der Einfluss der eingestellten Raumtemperatur auf den Heizenergiebedarf, aber desto größer ist der Einfluss der Kategorie K1:BauKonstPar_stat. Die in den Bandbreiten abgebildete Unsicherheit der Parameter der Kategorie K1:BauKonstPar_stat überlagert folglich den Effekt der abgeschätzten Raumtemperatur während des Heizbetriebs. Der höhere Variationskoeffizient weist für Nutzung 2 eine größere Sensitivität des Heizenergiebedarfs gegenüber den Eingangsparametern aus als für Nutzung 1. Alle Variationskoeffizienten liegen in Nutzung 1 auf einem sehr ähnlichen Niveau von ca. 9%. In Nutzung 2 steigt der Variationskoeffizient mit einem besseren Wärmedämmstandard an, aber für Fensterflächenanteil W3 ist er für mWSchV und EnEV sichtbar niedriger.

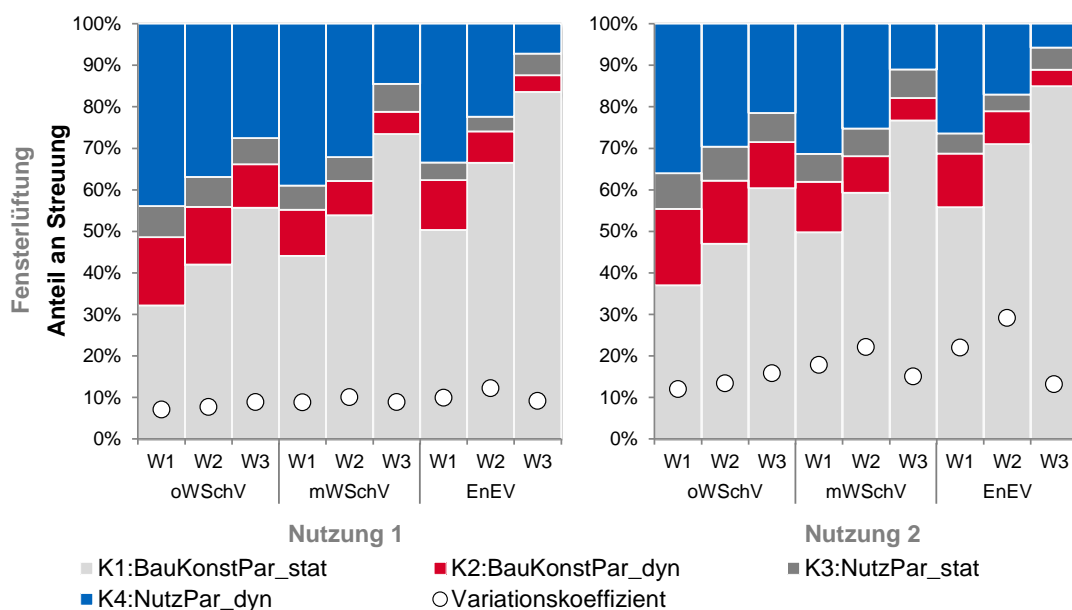


Abbildung 6.4: Anteile an der Streuung des Heizenergiebedarfs für Verkehrsflächen

Bewertung der absoluten Effekte

Betrachtet man hierzu die Mittelwerte und Standardabweichungen in Tabelle 6.3, so werden beide mit besserem energetischen Baustandard kleiner. Die Sprünge der Variationskoeffizienten für W3 in mWSchV und EnEV aus der Abbildung 6.4 resultieren aus dem höheren Mittelwert bei ähnlicher Standardabweichung im Vergleich zu den Werten in W1 und W2. Der absolute Effekt eines Untersu-

chungsparameters ist das Ergebnis aus dem Produkt des parameterspezifischen Sensitivitätsindex mit der maximalen Streuung. Für die Kategorien bedeutet dies in den Versuchen der Nutzung 1 für W1 beispielsweise, dass die gesamte Streuung von 40 kWh/m²a in oWSchV sich aus den Anteilen der Kategorien K1:BauKonstPar_stat 13 kWh/m²a (32%), K2:BauKonstPar_dyn (Infiltration) 7 kWh/m²a (16%), K3:NutzPar_stat 3 kWh/m²a (7%) und K4:NutzPar_dyn 18 kWh/m²a (44%) zusammensetzt. Die Raumtemperatur während des Heizbetriebs ist als einziger Faktor der Kategorie K4:NutzPar_dyn damit der stärkste Einflussfaktor auf den Heizenergiebedarf.

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Heizenergiebedarf für eine süd-orientierte Verkehrsfläche

Nutzungsart	energetischer Baustandard	Fensterflächen	\bar{x} ($\equiv \mu$) [kWh/m ² a]	s ($\equiv \sigma$) [kWh/m ² a]	Min. [kWh/m ² a]	Max. [kWh/m ² a]	VarK [%]
Verkehrsfläche Nutzung 1	oWSchV	W1	90	6	69	109	7
		W2	87	7	65	107	8
		W3	85	7	61	106	9
	mWSchV	W1	53	5	38	68	9
		W2	52	5	34	68	10
		W3	51	5	36	66	9
	EnEV	W1	29	3	19	37	10
		W2	28	3	17	38	12
		W3	21	2	15	28	9
Verkehrsfläche Nutzung 2	oWSchV	W1	50	6	30	68	12
		W2	47	6	26	66	13
		W3	46	7	23	66	16
	mWSchV	W1	25	4	10	39	18
		W2	22	5	5	38	22
		W3	30	4	14	44	15
	EnEV	W1	12	3	3	21	22
		W2	11	3	1	21	29
		W3	15	2	8	21	13

Auswirkungen auf den Bewertungsprozess

Für Verkehrsflächen und somit auch für Nutzungen ohne Personenanwesenheit können die baukonstruktionsabhängigen Parameter der Kategorien K1:BauKonstPar_stat und K2:BauKonstPar_dyn sowie die Wahl der Raumtemperatur während des Heizbetriebs den Heizenergiebedarf sehr stark verändern. Insbesondere für sehr gute energetische Baustandards, wie EnEV, nimmt der Einfluss der Kategorie K1:BauKonstPar_stat auf die Streuung zu. Unter Beachtung einer \pm Standardabweichung in Bezug zum Mittelwert und den berechneten Variationskoeffizienten werden ca. 68% aller Ergebnisse im Heizenergiebedarf eine relative mittlere Abweichung von ca. 9% in der Nutzung 1 und ca. 18% in der Nutzung 2 aufweisen. Die relativen Streubreiten in dieser Nutzungsklasse zeigen bereits, dass eine Identifikation von energetischen Schwachstellen und der Nachweis von Einsparmaßnahmen durch den alleinigen Vergleich eines Energiekennwertes im normalen Betrieb kaum plausibel nachweisbar sein wird. Diese Tatsache verdeutlicht die Wichtigkeit, energetische Effekte infolge von Unsicherheiten und Nutzerverhalten in der energetischen Bewertung von Gebäuden zu berücksichtigen. Dies kann mit Hilfe der vorgestellten Simulationstechniken und statistischen Verfahren erfolgen.

6.2.2 Büroähnliche Nutzungen

Die büroähnliche Nutzung umfasst unter anderem schriftliche Arbeiten, Arbeiten am Computer oder Verwaltungstätigkeiten. Sie weist viele Ausprägungen auf und wird z.B. der Administration einer Hochschule oder eines Lehrstuhls oder auch dem Raum zur Auswertung von Experimenten zugeordnet. Für Hochschulen sind Einzel- oder Gruppenbüros typisch. Die technischen Ausstattungsmerkmale sind z.B. ein PC-Arbeitsplatz mit Bildschirm, Drucker und Telefon. Obwohl die technische Ausstattung leicht zu beschreiben ist, bereitet die Abbildung ihrer Auslastung trotzdem Probleme. Die Problematik nimmt weiter zu, wenn das individuelle Nutzerverhalten in die Bewertung mit einfließt. Dies soll anhand zweier leicht unterschiedlicher büroähnlicher Nutzungen 1 und 2 beschrieben werden. Die Hauptunterschiede sind hier im Vergleich von Nutzung 1 mit 2 der Heiztemperatursollwert von 21 bzw. 22°C, der persönliche Frischluftbedarf von 54 gegenüber 31 m³/(h Person), die elektrischen Geräte mit 5 bzw. 10 W/m² und die Unsicherheiten in den Nutzungszeiten und den Parametern.

Sensitivitätsindizes der Eingangsparameter

Zu Beginn werden die Effekte der Eingangsparameter auf den Heizenergiebedarf der Nutzung 1 in Abbildung 6.5 erläutert. Für Fensterflächenanteile gemäß Modell W3 hat der U-Wert des Fensters in allen Wärmedämmstandards einen starken Effekt, wobei dessen Einflussstärke mit kleinerem Fensterflächenanteil oder besserem energetischen Baustandard abnimmt. Er ist im Vergleich mit dem

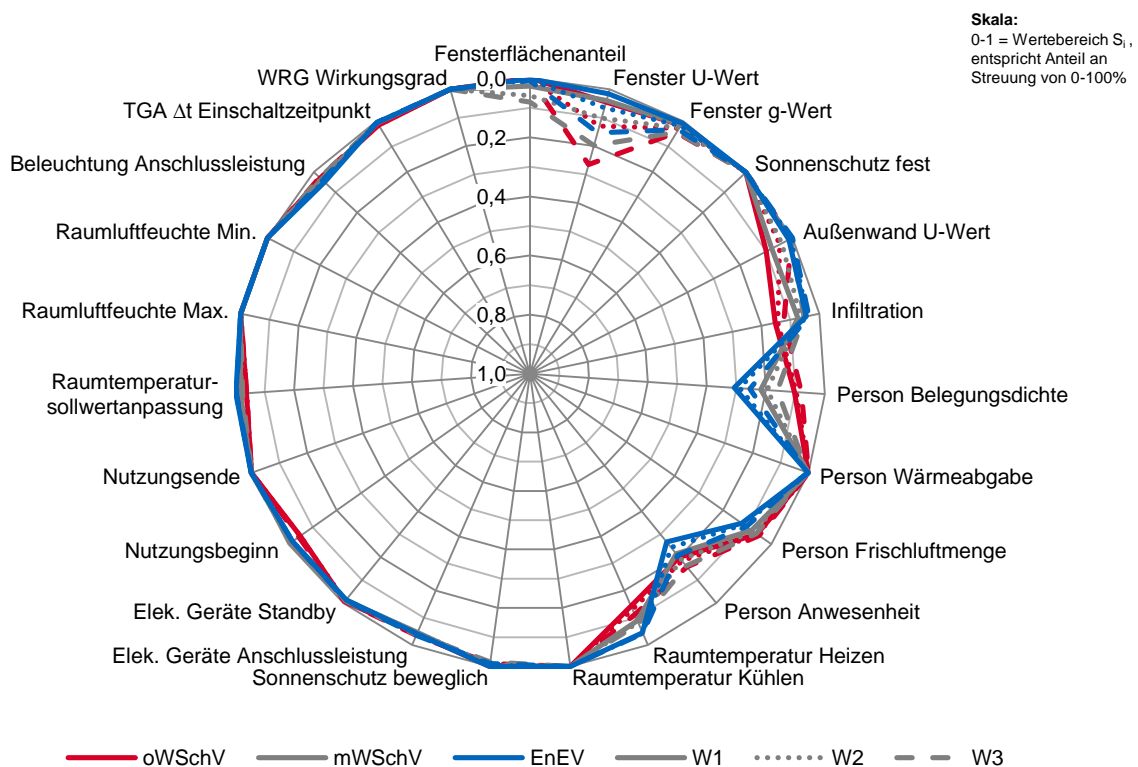


Abbildung 6.5: Radar-Chart Sensitivitätsindizes für den Heizenergiebedarf der büroähnlichen Nutzung mit Nutzung 1

generell niedrigeren U-Wert einer Außenwand einflussreicher. Der Einfluss der Nutzung ist sichtbar an der Verformung der Parameter Person Belegungsdichte, Frischluftmenge, Anwesenheit und Raumtemperatur Heizen zu erkennen. Die thermische Last der elektrischen Geräte wirkt im Mittel mit 4% kaum auf den Heizenergiebedarf; dies ist im Vergleich zu Nutzung 2 mit 15% anders. Folglich ergibt sich aus Nutzung 1 der Zusammenhang: Je besser der energetische Baustandard, desto weniger sensitiv ist der Heizenergiebedarf gegenüber den Unsicherheiten in den baukonstruktionsabhängigen Parametern, aber desto mehr gegenüber den Unsicherheiten in den Nutzungsparametern.

Normalverteilung des Heizenergiebedarfs im Simulationsmodell

Die Abbildung 6.6 zeigt den Heizenergiebedarf für Nutzung 1 und 2 sowie den Heizenergiebedarf ohne Nutzung, der jeweils für die Betriebsbereitschaft angewendet wird. Ein besserer energetischer Baustandard benötigt in allen Fällen weniger an Heizenergie. Eine vorhandene Nutzung erhöht den Heizenergiebedarf. Dabei reagieren Räume mit besserem energetische Baustandard stärker gegen-

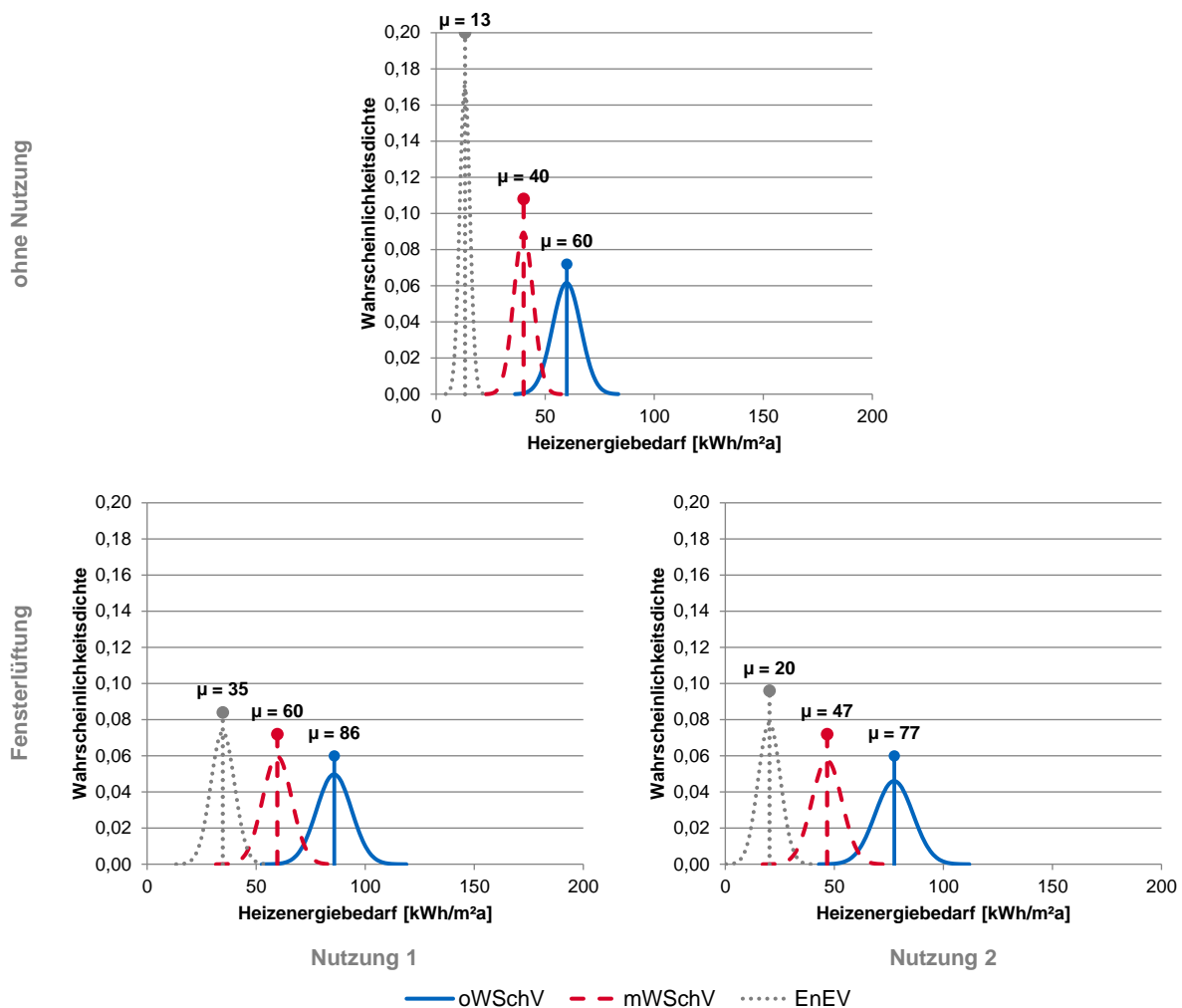


Abbildung 6.6: Normalverteilung des Heizenergiebedarfs für büroähnliche Nutzung mit süd-orientierter Fassade und Fensterflächenanteil W1

über der Nutzung, der relative Anstieg ist größer (Vgl. ohne Nutzung zu Nutzung 1: oWSchV +43%, mWSchV +50%, EnEV +169%). Die energetisch bessere Gebäudehülle z.B. des EnEV-Baustandards ermöglicht niedrigere Heizenergiebedarfswerte als Basiswert zu erreichen, solange die Wirkung der thermischen Hülle nicht durch Nutzereingriffe, wie z.B. Lüften, unterbrochen wird. Den Einfluss der Nutzungseffekte kennzeichnen die drei höchsten Werte der Sensitivitätsindizes für Personenbelegung, -anwesenheit und -frischluftmenge. Damit ändern sich sowohl die eingebrachten Luftmengen über die Fensterlüftung als auch die Lüftungswärmeverluste, die stark auf den Heizenergiebedarf wirken können. Im Bezug zum Basiswert ist der relative Anteil der Lüftungswärmeverluste in der Energiebilanz des EnEV-Baustandards höher, was zu einem größeren relativen Anstieg führt. Die Nutzung wirkt folglich stärker auf den Basis-Heizenergiebedarf und führt zu einer größeren Standardabweichung.

Trotz der vermeintlich ähnlichen Parameter in den Nutzungen 1 und 2, ist der Heizenergiebedarf für Nutzung 2 sichtlich niedriger. Die Sensitivitätsindizes bestätigen als Hauptgrund der Differenz die Nutzung, die sich aus den einflussreichen Parametern Person Belegungsdichte, Person Anwesenheit, Person Frischluftmenge, elektrische Geräte und Raumtemperatur Heizen zusammensetzt. Hier zeigt es sich, wie schwierig die Bewertung von Bedarfs- und besonders von Verbrauchswerten der Gebäude auf Basis theoretischer Modelle ist, vor allem wenn nutzungsbezogene Parameter nur geschätzt werden können.

Einflussstärke der einzelnen Kategorien

Mit Hilfe der Abbildung 6.7 werden nun die Summeneffekte der Kategorien genauer erläutert. Für das betriebsbereite Büro ohne Personennutzung besitzt die Raumtemperatur während des Heizbetriebs einen Anteil von ca. 30-50% an der Streuung. Dieser Umstand ist von Bedeutung, denn für gewöhnlich erfolgt bei der Mehrzahl der Nutzungen die Raumtemperaturregelung mit Heizkörperthermostaten als P-Regler mit bleibender Regelabweichung. Das ungenaue Ausregeln des Sollwertes kann bereits zu größeren und nicht nachvollziehbaren Streuungen in der späteren energetischen Verbrauchsbewertung führen. Der Anteil der Kategorie K3:NutzPar_stat sinkt mit besserem energetischen Baustandard. Der Einfluss der Kategorie K1:BauKonstPar_stat ist stärker vom Fensterflächenanteil als vom energetischen Baustandard abhängig.

Sobald eine Personennutzung vorhanden ist, gewinnen Nutzungseffekte mit ca. 50-85% deutlich an Einfluss (K4:NutzPar_dyn). Ein besserer energetischer Baustandard erhöht den Nutzungseinfluss und ein größerer Fensterflächenanteil reduziert ihn. Die beiden Effekte der Kategorien K1:BauKonstPar_stat und K2:BauKonstPar_dyn nehmen am stärksten ab. Die Variationskoeffizienten sind in den drei Versuchsreihen auf ähnlichem Niveau. Ein größerer Fensterflächenanteil erhöht die Variationskoeffizienten und somit die Sensitivität gegenüber den Eingangsparametern.

Bewertung der absoluten Effekte

Die Mittelwerte, die Bandbreiten zwischen Minimal- und Maximalwert sowie die Standardabweichungen des Heizenergiebedarfs nehmen mit besserem energetischen Baustandard gemäß Tabelle 6.4 ab. Für den jeweiligen Baustandard wirkt sich ein größerer Fensterflächenanteil nur gering auf den

Heizenergiebedarf aus. Die Modellierung einer Nutzung vergrößert die absolute Standardabweichung. Dagegen sinkt sie mit besserem energetischen Baustandard. Für den Fall 1 und über alle drei Wärmedämmstandards hinweg verursacht die Kategorie K4:NutzPar_dyn eine mittlere absolute Standardabweichung von ca. 4,6 kWh/m²a bzw. besitzt einen Anteil von ca. 60-85%.

Auswirkungen auf den Bewertungsprozess

Die Analyse der büroähnlichen Nutzung zeigt, wie sich Einflussfaktoren in Bezug zu den modellierten Nutzungen verändern können, und wie sie den Energiebedarf deutlich beeinflussen. Dabei nehmen Nutzungseffekte der Kategorie K4:NutzPar_dyn Anteile von mehr als 60% an der Streuung ein und sind damit Haupteinflussfaktoren. Je besser der energetische Baustandard ist, desto mehr Einfluss erlangt die Nutzung. Sie in einer Planung oder Verbrauchsbewertung unvollständig zu beachten, kann zu deutlichen Fehlern und Missverständnissen in der Interpretation der Energiebedarfs- oder Energieverbrauchswerte für Heizen und Kühlen führen.

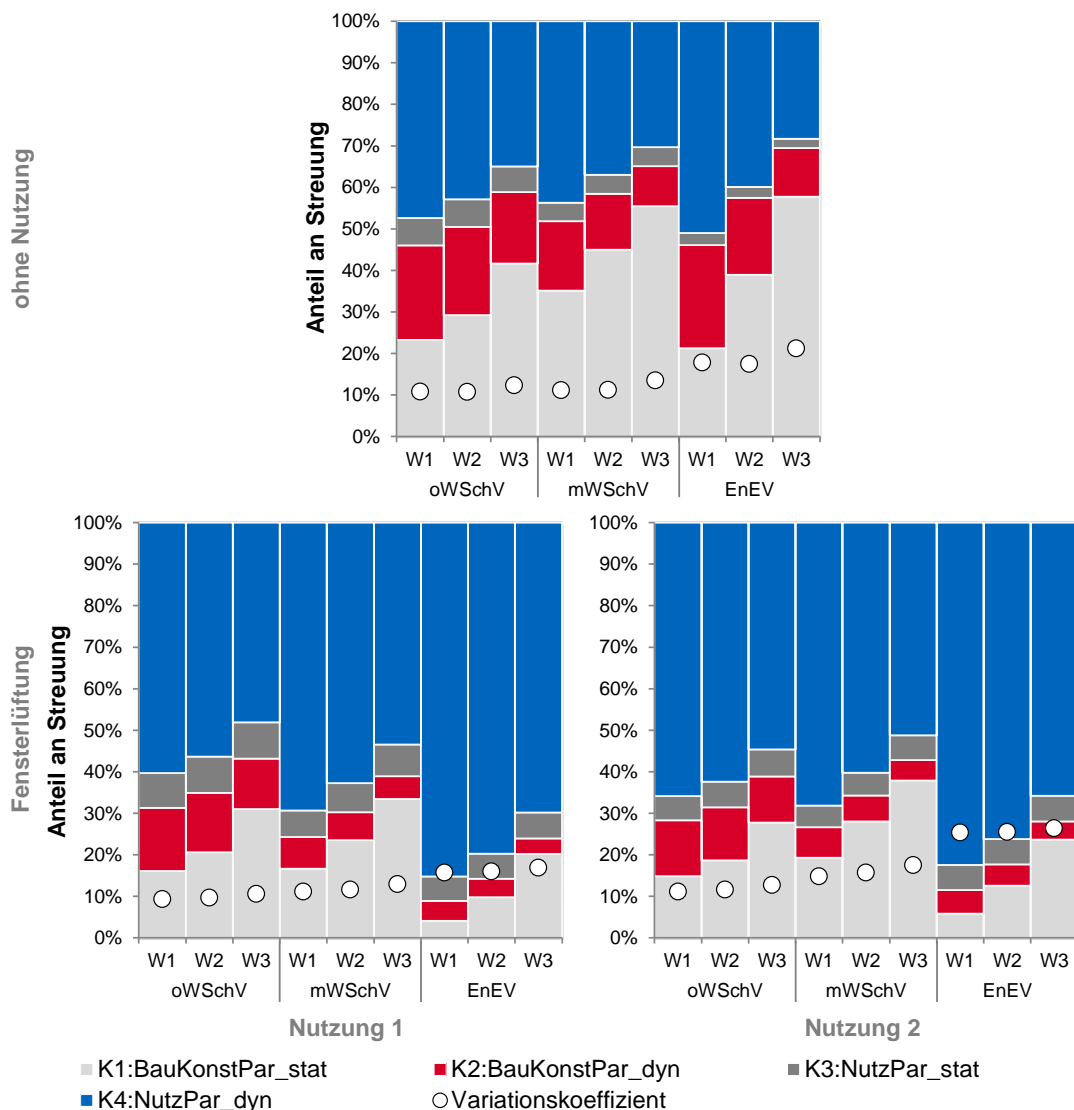


Abbildung 6.7: Anteile an der Streuung des Heizenergiebedarfs für büroähnliche Nutzung

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Heizenergiebedarf für eine süd-orientierte Büronutzung

Nutzungsart	energetischer Baustandard	Fensterflächen	\bar{x} ($\equiv \mu$) [kWh/m ² a]	s ($\equiv \sigma$) [kWh/m ² a]	Min. [kWh/m ² a]	Max. [kWh/m ² a]	VarK [%]
Büro Fensterlüftung ohne Nutzung	oWSchV	W1	60	6	39	78	11
		W2	61	7	39	80	11
		W3	58	7	34	79	12
	mWSchV	W1	40	4	25	54	11
		W2	43	5	26	59	11
		W3	41	6	22	59	14
	EnEV	W1	13	2	5	20	18
		W2	15	3	6	24	17
		W3	15	3	5	26	21
Büro Fensterlüftung Nutzung 1	oWSchV	W1	86	8	57	112	9
		W2	84	8	54	108	10
		W3	80	9	51	106	11
	mWSchV	W1	60	7	35	81	11
		W2	59	7	34	82	12
		W3	57	7	30	82	13
	EnEV	W1	35	5	15	51	16
		W2	35	6	15	52	16
		W3	34	6	14	53	17
Büro Fensterlüftung Nutzung 2	oWSchV	W1	77	9	47	104	11
		W2	75	9	43	103	12
		W3	72	9	39	101	13
	mWSchV	W1	47	7	20	70	15
		W2	47	7	20	72	16
		W3	45	8	17	73	18
	EnEV	W1	20	5	3	36	25
		W2	21	5	3	38	26
		W3	21	6	2	40	26

6.2.3 Hörsaal

Die Nutzungsklasse Hörsaal bildet hier den seminaristischen Unterricht in nicht ansteigenden Räumen ab. Neben dem normalen Vorlesungsbetrieb können Räume des Typs Hörsaal auch Studierenden für ihr Selbststudium oder ihre Projektarbeiten zur Verfügung stehen. Die Raumdimensionen orientieren sich an Klassenzimmern und können auch größere Ausmaße besitzen. Die Raumnutzung Hörsaal ist wegen der hohen Flexibilität und des geringen technischen Aufwands an Hochschulen weit verbreitet. Die Frischluftzufuhr kann entweder über Fensterlüftung oder bei höheren Belegungszahlen über eine mechanische Belüftung erfolgen. Die große Variabilität der Hörsaalnutzung erschwert eine allgemeingültige Beschreibung, insbesondere durch die Raumauslastung, die Studierendenanzahl und das Nutzerverhalten. Für ein umfassenderes Verständnis über die Einflussfaktoren auf den Heizenergiebedarf bilden zwei Nutzungen die Grundlage der Untersuchung. Nutzung 1 unterscheidet sich gegenüber Nutzung 2 in den Punkten Frischluftbedarf 54 zu 31 m³/(h Person), Personenanzahl 70 zu 75%, elektrische Geräte 5 zu 2 W/m² mit verschiedenem Standby-Anteil von 2 zu 10% und der Nutzungszeit von 6 gegenüber 11 Stunden. Ein weiterer Unterschied ist die Bewertung möglicher Unsicherheiten durch die Größe der Bandbreiten in den Untersuchungsparametern. Die Luftwechselzahlen der mechanischen Lüftung ergeben sich aus der Umrechnung des personenbezo-

genen Frischluftbedarfs auf das vorhandene Raumvolumen im Modell. Für Nutzung 1 ergibt sich ein 6-facher und für Nutzung 2 ein 3,4-facher Luftwechsel.

Sensitivitätsindizes der Eingangsparameter

Nacheinander werden nun für die Nutzung 1 die Sensitivitätsindizes für den Hörsaal mit Fensterlüftung und mechanischer Lüftung erläutert. Der obere Radar-Chart in Abbildung 6.8 zeigt für die Fensterlüftung bei allen Versuchen zwei sichtbare Verformungen an den Parametern Person Anwesenheit und Nutzungsbeginn. Beide verursachen in etwa 40-50% der Streuung und sind damit Haupteinflussfaktoren. Weitere für alle Versuche gültige Einflussfaktoren sind der Frischluftbedarf je Person und die Belegungsdichte im Raum. Mit höherem Fensterflächenanteil gewinnt der U-Wert des Fensters an Einfluss.

Ist der Hörsaal mechanisch belüftet, verändern sich die Einflussfaktoren. Im unteren Radar-Chart der Abbildung 6.8 wird für alle Versuche ein deutlicher Effekt infolge der Wärmeabgabe der Personen ausgewiesen. Die spätere Wärmelast der Personen im Raum setzt sich zusammen aus der Wärmeabgabe infolge des Aktivitätsgrads der Personen, der Belegungsdichte und der Anwesenheit. Sie ist für Nutzung 1 maximal 2,7 kW und kann damit einen erheblichen Beitrag zur Erwärmung des Raums leisten. Im Gegensatz zur Fensterlüftung wird mit Hilfe der WRG in der mechanischen Lüftung die Wärme der Abluft zur Vorerwärmung der Frischluft verwendet. Folglich sind die Wärmeverluste für die Raumbelüftung deutlich geringer. Der weitere Nutzungsparameter Raumtemperatur Heizen verliert mit besserem energetischen Baustandard an Einfluss. Infolge der mechanischen Belüftung gewinnen die nicht mit der Nutzung in Zusammenhang stehenden Parameter an Wirkung. Streuungseffekte von 20-30% sind den Parametern der Kategorie K3:NutzPar_stat zuzuordnen (minimale Raumluftfeuchte, Raumtemperaturabsenkung außerhalb der Nutzungszeit, Wirkungsgrad der WRG). Ein weiterer Effekt tritt in allen Versuchen im Zusammenhang mit der Infiltration (K2:BauKonstPar_dyn) auf. Für einen großen Fensterflächenanteil können die Streuungen der Infiltration und des U-Werts eines Fensters den Heizenergiebedarf stark beeinflussen.

Normalverteilung des Heizenergiebedarfs im Simulationsmodell

Die Normalverteilung des Heizenergiebedarfs für den Hörsaal ohne Nutzung zeigt in Abbildung 6.9 eine Reduktion des Energiebedarfs mit besserem energetischen Baustandard. Zum nächstbesseren energetischen Baustandard beträgt die Reduktion ca. 40-50% und die Standardabweichung aller Versuche wird kleiner.

Für beide Konditionierungssysteme wird mit vorhandener Personennutzung der Heizenergiebedarf sichtlich höher. Im Vergleich zu einem besseren Baustandard ist der relative Anstieg innerhalb eines schlechteren Baustandards kleiner. Gebäude mit schlechterem energetischen Baustandard reagieren folglich weniger sensitiv.

In beiden Modellen mit Fensterlüftung nimmt insbesondere bei schlechterem energetischen Baustandard oWSchV die Standardabweichung zu. Die größeren Streuungen erschweren die spätere Bewertung des Energieverbrauchs auf Basis des berechneten Energiebedarfs. Die verschiedenen

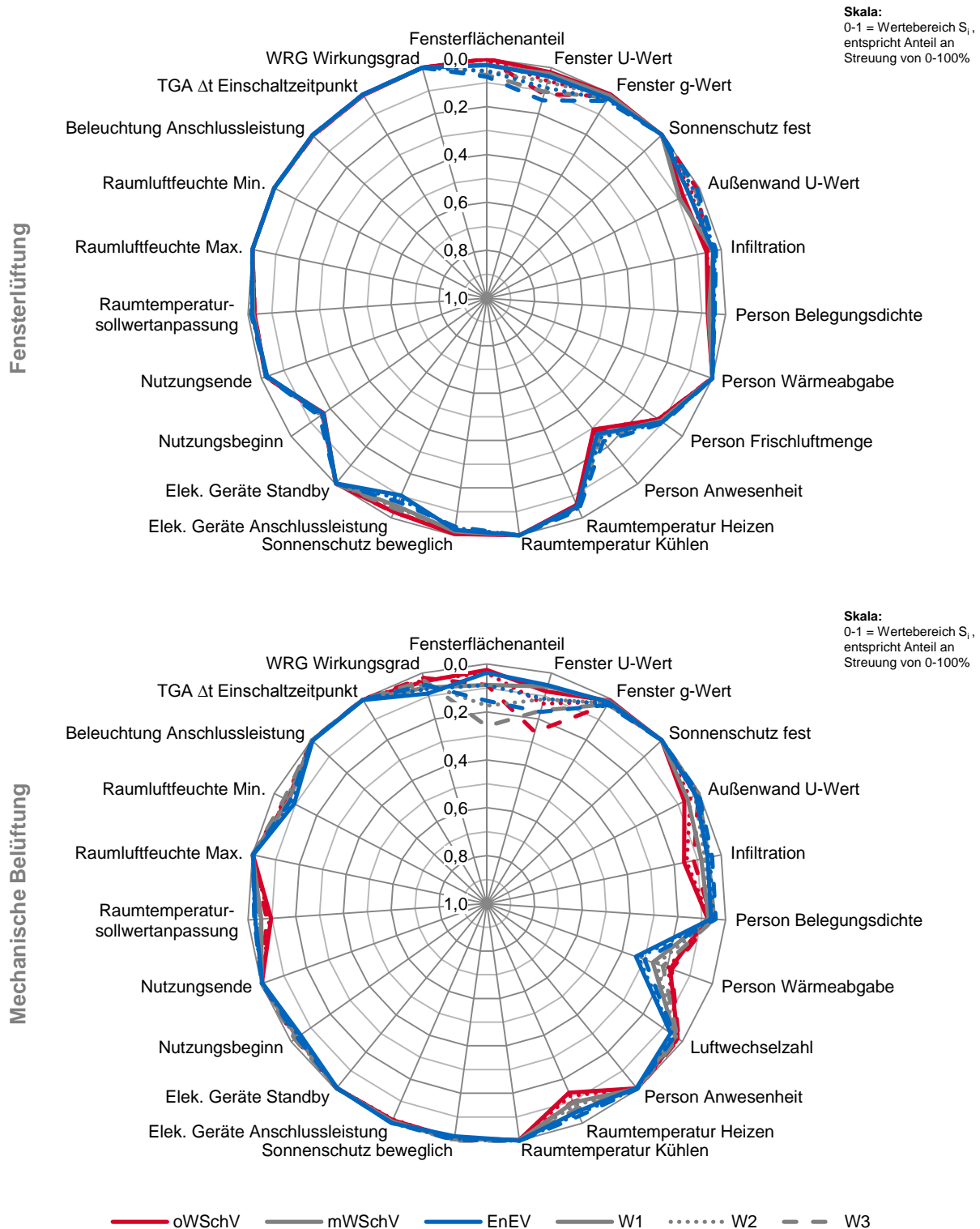


Abbildung 6.8: Radar-Chart Sensitivitätsindizes des Heizenergiebedarfs für Hörsaal Nutzung 1 mit Fensterlüftung (o.) und mechanischer Belüftung (u.)

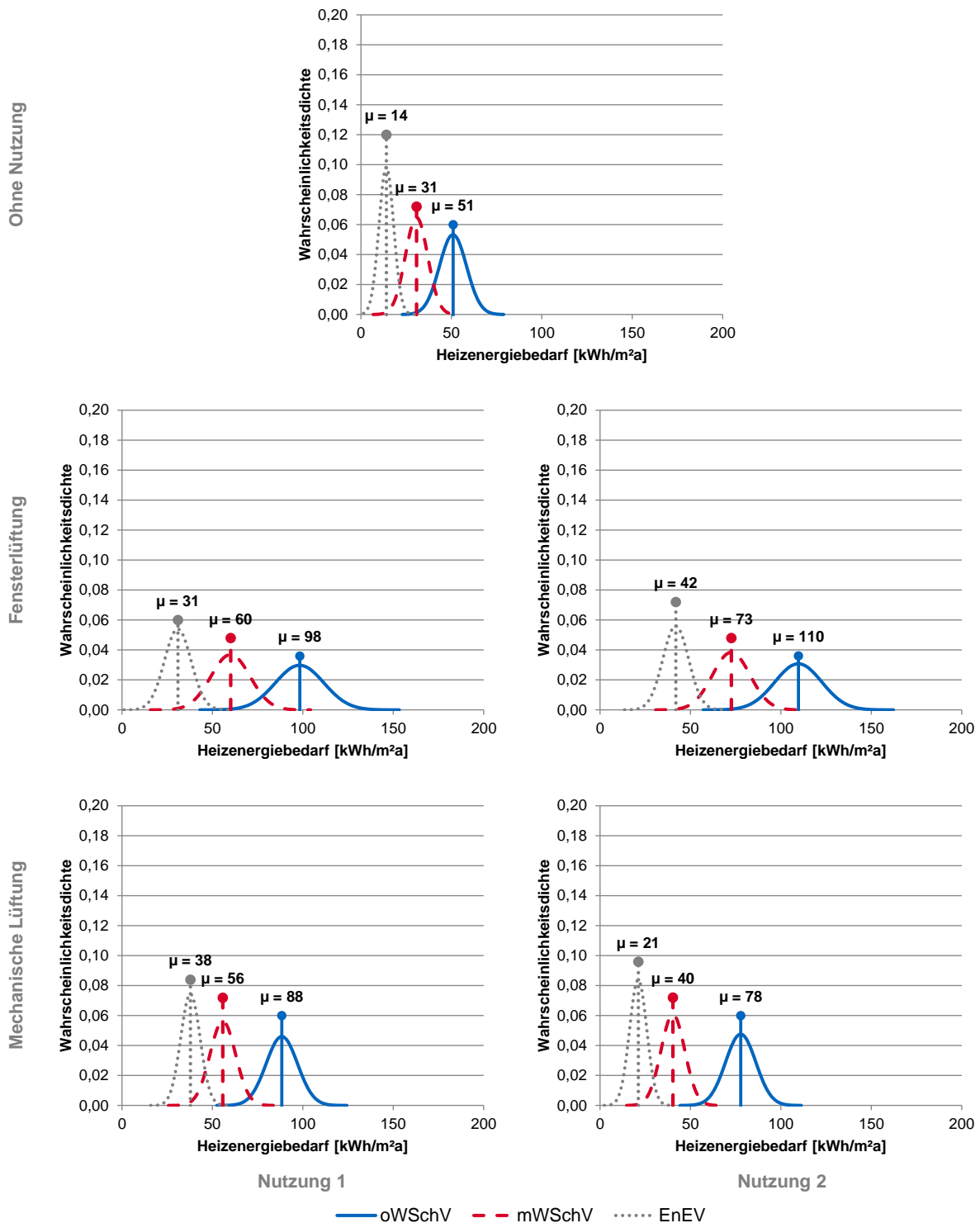


Abbildung 6.9: Normalverteilung des Heizenergiebedarfs für den Nutzungstyp Hörsaal mit süd-orientierter Fassade und Fensterflächenanteil W1

Wertebereiche der Untersuchungsparameter der Nutzungen 1 und 2 führen zu einem unterschiedlich starkem Anstieg des Heizenergiebedarfs (oWSchV +12%, mWSchV +22%, EnEV +35%) innerhalb eines Baustandards. Hauptursachen sind infolge der Sensitivitätsindizes die Ausweitung der Nutzungszeit und die Anwesenheit der Personen und damit das Nutzerverhalten insgesamt. Folglich steigt mit besserem energetischen Baustandard die Sensitivität des Heizenergiebedarfs gegenüber Nutzungseffekten.

Die mechanische Belüftung führt zu einer Reduktion der Standardabweichungen und zu näher beieinander liegenden Mittelwerten. Im Gegensatz zur Fensterlüftung weist Nutzung 1 gegenüber Nutzung 2 für alle Wärmedämmstandards einen höheren Heizenergiebedarf aus - für oWSchV ca. +13% und für EnEV ca. +45%. Hauptursachen sind gemäß der Sensitivitätsindizes die durch Personen und elektrische Geräte eingebrachten Wärmelasten sowie die gewählte Raumtemperatur im Heizbetrieb.

Im direkten Vergleich zwischen Fenster- und mechanischer Lüftung ist in allen Versuchen bis auf Nutzung 1 EnEV der Heizenergiebedarf niedriger. Die mechanische Belüftung des Hörsaals gewährleistet eine minimale Raumlufffeuchte durch eine Zuluftbefeuchtung. Auf sie weisen die Sensitivitätsindizes für Raumtemperatur Heizen und minimale Raumlufffeuchte als Ursache des Unterschieds hin. Die Befeuchtung benötigt eine größere Wärmemenge und führt folglich zu einem höheren mittleren Heizenergiebedarf bei der Nutzung 1 EnEV. Infolge der höheren Dichten in den Normalverteilungen verringert eine mechanische Belüftung die Standardabweichungen und erlaubt eine genauere Schätzung des Energiebedarfs.

Einflussstärke der einzelnen Kategorien

Der ungenutzte Hörsaal weist ein sehr ähnliches Verhalten wie die ungenutzten Räume für Büro und Verkehr auf. In Abbildung 6.10 ist deutlich der steigende Einfluss der Kategorie K1:BauKonstPar_stat auf die Streuung zu sehen, dabei gehen die Kategorien K2:BauKonstPar_dyn (Infiltration) und K3:NutzPar_stat am deutlichsten zurück. Allein der Parameter Raumtemperatur Heizen als einziger Nutzungsparameter besitzt einen Anteil von ca. 20-40% an der Streuung. Der Variationskoeffizient wird mit größerem Fensterflächenanteil und besserem Wärmedämmstandard größer. Dementsprechend nimmt die Sensitivität des Modells gegenüber den Eingangsparametern zu.

Bei Fensterlüftung beeinflusst die Nutzung (K4:NutzPar_dyn) die Streuung des Heizenergiebedarfs mit ca. 65-80% Anteil sehr deutlich. Ein größerer Fensterflächenanteil und ein besserer energetischer Baustandard erhöhen den Einfluss der Kategorie K1:BauKonstPar_sta. Beide Faktoren verursachen einen Anstieg des Variationskoeffizienten und damit der Sensitivität in beiden Nutzungen 1 und 2.

Die mechanische Belüftung bewirkt einen Rückgang des Nutzungseinflusses auf ca. 30-55%, aber zugleich einen Anstieg der statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter (K1:BauKonstPar_sta) und besonders der statischen nutzungsabhängigen Parameter (K3:NutzPar_stat) mit durchschnittlich 18%. Die nutzungsabhängigen statischen Parameter haben ihren größten Einfluss beim Baustandard EnEV, wobei ihre Wirkung in allen Baustandards mit größer werdendem Fensterflächenanteil abnimmt.

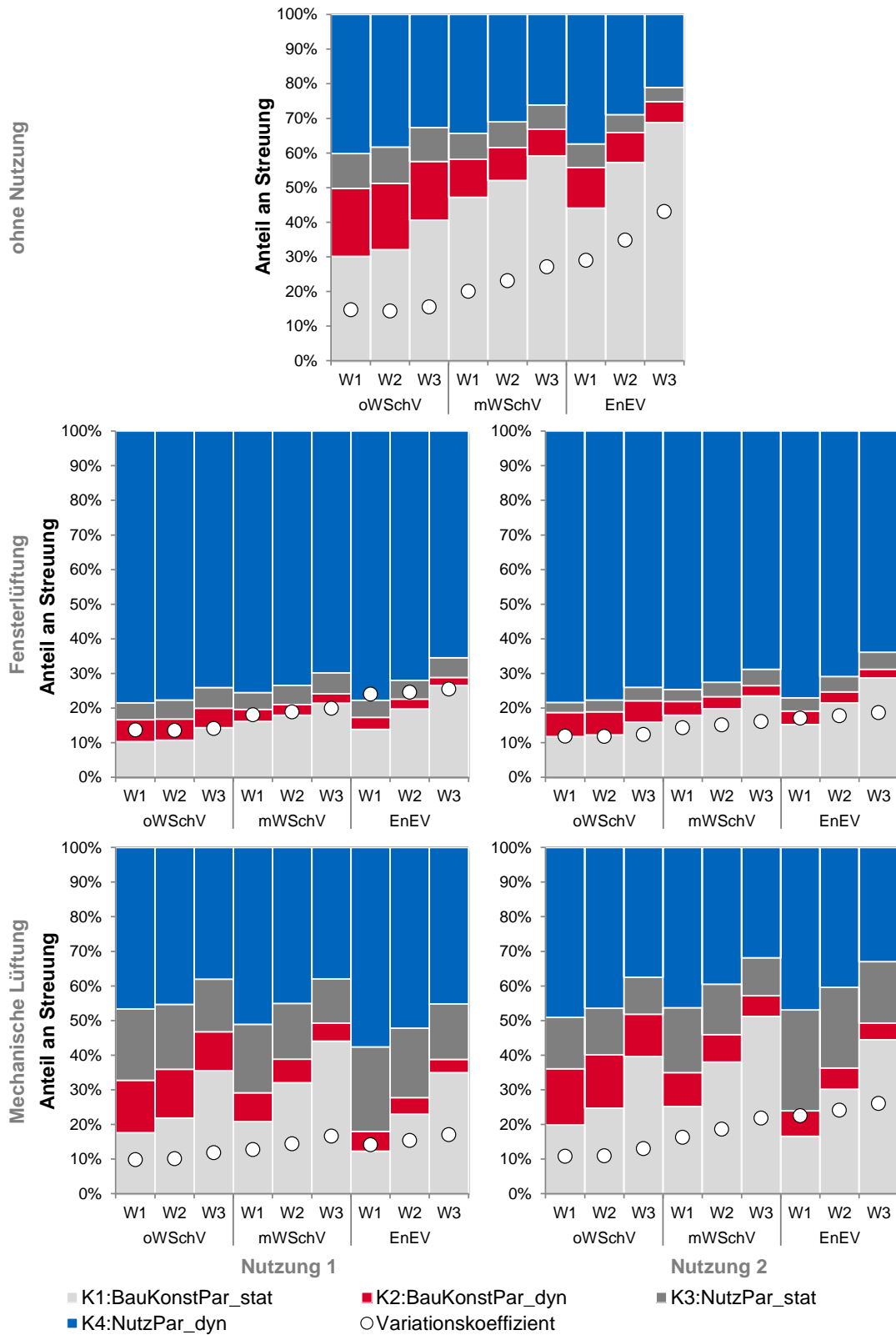


Abbildung 6.10: Anteile an der Streuung des Heizenergiebedarfs für den Hörsaal

Ist eine Lüftungsanlage vorhanden, verschieben sich gegenüber der Fensterlüftung die Anteile an der Streuung in Richtung der statischen Kategorien K1:BauKonstPar_stat und K3:NutzPar_stat. Als Folge reagiert der Heizenergiebedarf gegenüber den dynamischen Nutzungsparametern weniger sensitiv. Trotzdem besitzen die dynamischen Nutzungsparameter in allen Versuchen mindestens einen Anteil von ca. 30% an der Streuung und dürfen in der Bewertung nicht vernachlässigt werden. Für den Hörsaal mit Fensterlüftung liegt der Fokus hauptsächlich in den Unsicherheiten der dynamischen Nutzungsparameter (K4:NutzPar_dyn). Bei mechanisch belüfteten Nutzungen können weitere Effekte durch die statischen Nutzungsparameter (K3:NutzPar_stat) auftreten. Im Vergleich zur kostenintensiven Verbesserung des energetischen Baustandards können mittels der leichter optimierbaren Parameter der statischen Nutzungsparameter (K3:NutzPar_stat) und eines energiebewussten Verhaltens der Hörsaalnutzer positive Effekte hin zu einem niedrigen Energiebedarf erzielt werden.

Bewertung der absoluten Effekte

Ein höherwertiger energetischer Baustandard reduziert den mittleren Heizenergiebedarf, die maximale Streubreite und die Standardabweichung. Wie Tabelle 6.5 zeigt, kann eine Lüftungsanlage mit WRG den Heizenergiebedarf in den Versuchen weiter senken. Die relativen Einsparungen sind bei höherwertigen energetischen Baustandards größer. Die Lüftungsanlage reduziert die Standardabweichungen gegenüber der Fensterlüftung deutlich. In allen Wärmedämmstandards wirkt sich ein größerer Fensterflächenanteil nur gering auf den Heizenergiebedarf aus.

Auswirkungen auf den Bewertungsprozess

Eine Bewertung muss wegen der Sensitivität des Heizenergiebedarfs in Fensterlüftung oder mechanische Belüftung unterscheiden. Eine mechanische Belüftung führt in den Versuchen generell zu niedrigeren Heizenergiebedarfswerten und kleineren Standardabweichungen. Zudem wirkt eine Lüftungsanlage auf den Heizenergiebedarf stabilisierend. Sie gewährleistet eine konstante Luftqualität, was eine Fensterlüftung überflüssig macht. Ein unkontrollierter Luftaustausch über Fenster wird damit unterbunden. Zudem erwärmt die vorhandene WRG mittels der Abwärme in der Abluft die Zuluft, die internen Wärmequellen können effektiv genutzt werden. Beides führt zu einer Reduktion der Lüftungswärmeverluste und somit zu niedrigeren und weniger gestreuten Heizenergiebedarfswerten. Fehlt eine mechanische Lüftung, sind die schwierig erfassbaren dynamischen Nutzungsparameter (K4:NutzPar_dyn) eines Hörsaals der Haupteinflussfaktor. Ihr Anteil an der Streuung im Ergebnis beträgt meist mehr als 70%. Als Folge ist zum einen die richtige Bewertung der Verbrauchswerte und zum anderen die Erkennung von Einsparpotenzialen auf Basis berechneter Vergleichswerte schwieriger.

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Heizenergiebedarf für einen südorientierten Hörsaal

Nutzungsart	energetischer Baustandard	Fensterflächen	\bar{x} ($\equiv \mu$) [kWh/m ² a]	s ($\equiv \sigma$) [kWh/m ² a]	Min. [kWh/m ² a]	Max. [kWh/m ² a]	VarK [%]
Hörsaal Fenster ohne Nutzung	oWSchV	W1	51	7	26	73	15
		W2	52	7	26	75	14
		W3	50	8	23	74	16
	mWSchV	W1	31	6	11	51	20
		W2	28	6	5	49	23
		W3	26	7	1	48	27
	EnEV	W1	14	4	0	27	29
		W2	13	5	0	28	35
		W3	12	5	0	29	43
Hörsaal Fenster Nutzung 1	oWSchV	W1	98	13	50	142	14
		W2	99	13	50	141	14
		W3	96	14	47	137	14
	mWSchV	W1	60	11	22	96	18
		W2	60	11	20	96	19
		W3	59	12	18	97	20
	EnEV	W1	31	7	6	55	24
		W2	32	8	4	59	25
		W3	34	9	3	63	25
Hörsaal Fenster Nutzung 2	oWSchV	W1	110	13	65	153	12
		W2	110	13	65	151	12
		W3	107	13	62	149	12
	mWSchV	W1	73	10	37	107	14
		W2	72	11	34	106	15
		W3	71	11	31	107	16
	EnEV	W1	42	7	17	64	17
		W2	43	8	16	67	18
		W3	45	8	15	71	19
Hörsaal RLT Nutzung 1	oWSchV	W1	88	9	58	118	10
		W2	89	9	57	119	10
		W3	84	10	47	116	12
	mWSchV	W1	56	7	31	81	13
		W2	54	8	26	81	14
		W3	53	9	21	81	17
	EnEV	W1	38	5	20	56	14
		W2	38	6	17	57	15
		W3	38	6	15	59	17
Hörsaal RLT Nutzung 2	oWSchV	W1	78	8	50	106	11
		W2	79	9	49	106	11
		W3	72	9	40	102	13
	mWSchV	W1	40	7	18	61	16
		W2	39	7	14	61	19
		W3	38	8	10	63	22
	EnEV	W1	21	5	5	36	23
		W2	21	5	4	37	24
		W3	22	6	2	40	26

6.2.4 Labor Forschung

Der Einfluss der Eingangsparameter auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf wird an der Nutzung eines Forschungslabors analysiert. Dieses weist meist eine hohe Auslastung auf, besitzt lange Nutzungszeiten und ist bei Anforderungen an die Luftqualität mit einer mechanischen Belüftung ausgestattet. Der erforderliche Luftwechsel ist abhängig vom vorhandenen Prozess und den Sicherheitsanforderungen des Laborbetriebs. Die Eigenschaft und der Grad der Verunreinigung der Abluft legen fest, ob eine Wärmerückgewinnung zur Vorkonditionierung der Frischluft eingesetzt werden kann. Diese Tatsachen berücksichtigt die Modellierung der beiden Nutzungen 1 und 2. Nutzung 1 unterscheidet sich im Wesentlichen gegenüber Nutzung 2 in den Parametern Luftwechselzahl 8 zu 16 h^{-1} , Raumtemperatur Heizen 21 zu 23°C und minimale Raumlufffeuchte 35 zu 45% sowie in der Verwendung einer Wärmerückgewinnung.

Sensitivitätsindizes der Eingangsparameter

Die Abbildung 6.11 zeigt als Radar-Chart die Sensitivitätsindizes des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für die Nutzung 1. Die Luftwechselzahl, die minimale Raumlufffeuchte und der Wirkungsgrad der WRG zeigen sich als die drei Haupteinflussfaktoren des Heizenergiebedarfs. Für den Kühlenergiebedarf sind es die Parameter Raumtemperatur Kühlen und maximale Raumlufffeuchte. Einen sichtlich schwächeren Effekt erzeugen die Streuungen der größeren Fensterflächenanteile sowie der U-Werte der Außenwand bei kleineren Fensterflächenanteilen. Als ein weiterer allgemeiner Effekt wirkt die minimale Raumlufffeuchte auf den Kühlbedarf. Wird der Wert für die minimale Raumlufffeuchte nach oben gesetzt, verringert sich der Abstand zum Wert der maximalen Raumlufffeuchte, und somit der Bereich in dem keine Be- oder Entfeuchtung notwendig ist. Die Nutzung 2 weist für den Kühlenergiebedarf ebenfalls die gleichen Faktoren mit ähnlicher Stärke aus. Für den Heizenergiebedarf verursachen die fehlende WRG und die höhere Luftwechselzahl einen Anstieg im Einfluss der Luftwechselzahl, die damit zum alleinigen Haupteinflussfaktor wird. Die Faktoren der Kategorie K1:BauKonstPar_stat wirken in allen Versuchen minimal auf die Streuung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs.

Normalverteilung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs im Simulationsmodell

Die annähernd gleiche Lage der Mittelwerte des Heiz- und Kühlenergiebedarfs weist in Abbildung 6.12 auf einen geringeren Einfluss der Unsicherheiten in den statischen baukonstruktionsabhängigen Parametern (K1:BauKonstPar_stat) hin. In Nutzung 1 bewirkt eine Verbesserung des energetischen Baustandards ca. 10% Reduktion im Heiz- und Kühlenergiebedarf. Die absoluten Auswirkungen auf den Kühlenergiebedarf sind jedoch sehr klein. Im Vergleich dazu betragen in der Nutzung 2 die Reduktionen ca. 4-5% im Heiz- und ca. 7-11% im Kühlenergiebedarf. Auffällig ist die niedrige Wahrscheinlichkeitsdichte der mittleren Heizenergiebedarfswerte. Größere absolute Streubreiten sind damit verbunden und erschweren eine eindeutige Schätzung des Energiebedarfs. Die höhere Luftwechselzahl und die fehlende WRG verursachen einen deutlichen Unterschied mit dem Faktor 4-6 zwischen Nutzung 1 und 2 im Heizenergiebedarf; im Kühlenergiebedarf liegt der Faktor höher zwischen 7-8. In beiden Modellen ist die Energiemenge der Luftaufbereitung sehr viel größer als die über Transmission und Infiltration verursachten Wärmeverluste.

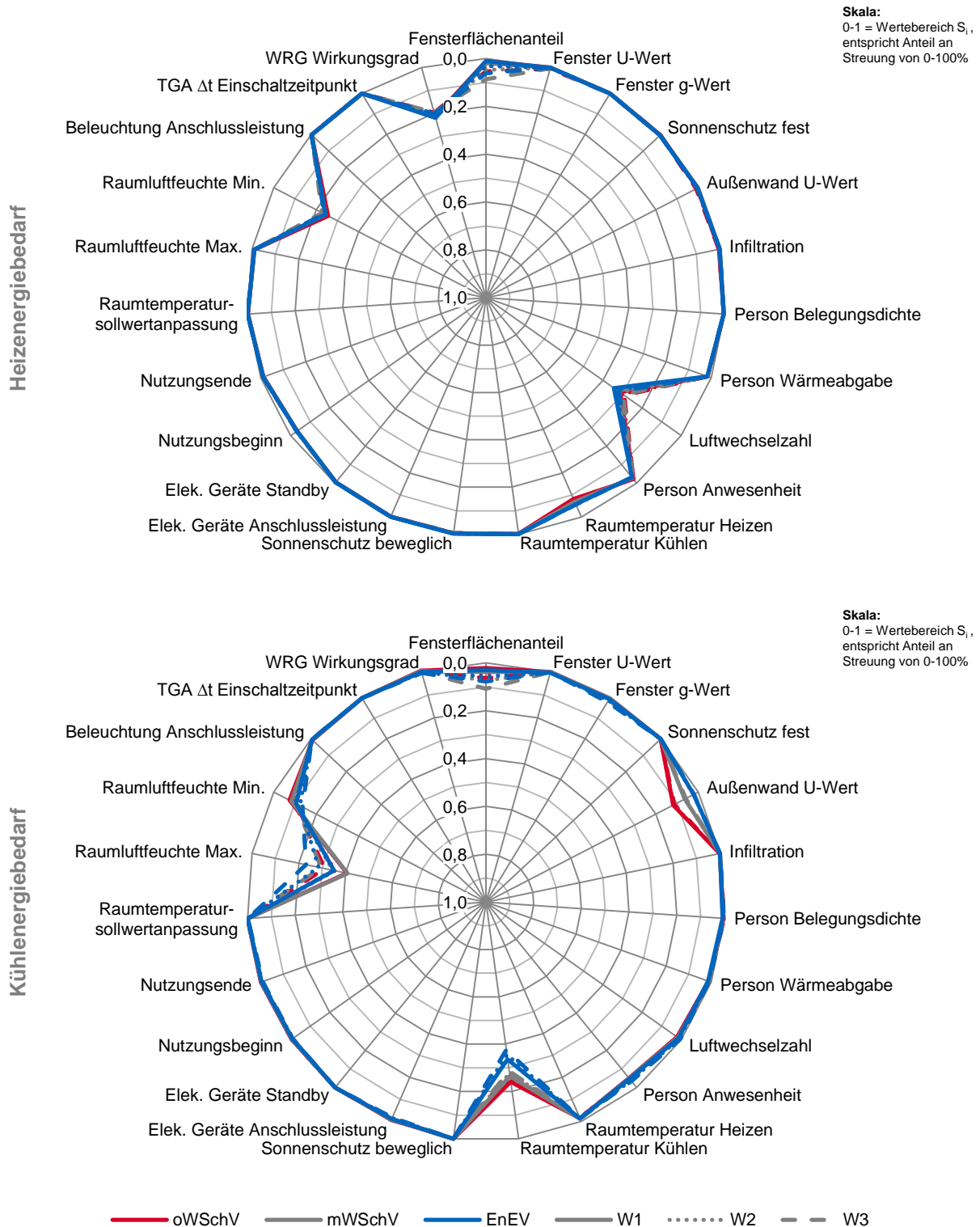


Abbildung 6.11: Radar-Chart Sensitivitätsindizes des Heiz- (o.) und Kühlenergiebedarfs (u.) für Labor Forschung Nutzung 1

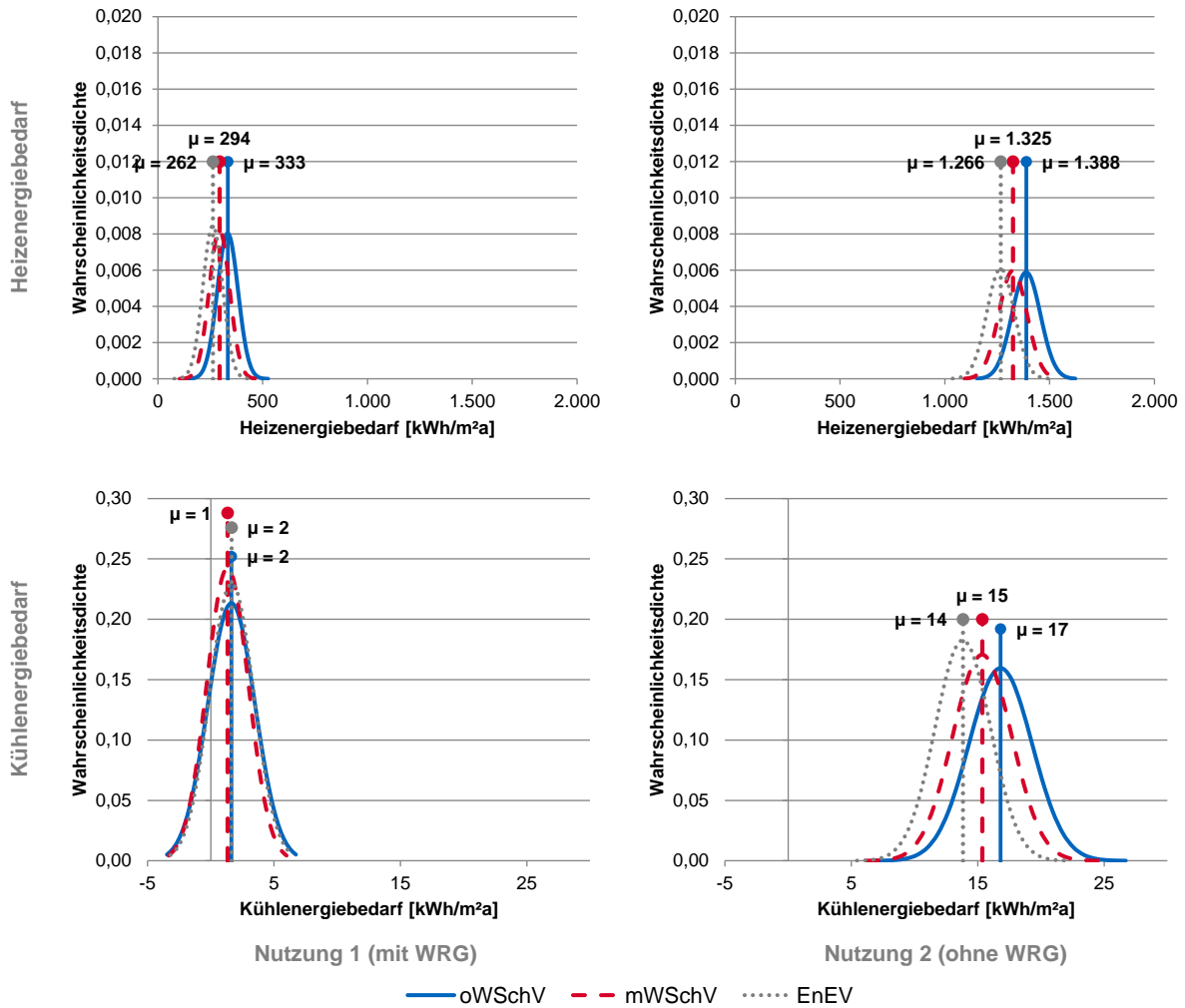


Abbildung 6.12: Normalverteilung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Nutzungstyp Labor Forschung mit süd-orientierter Fassade und Fensterflächenanteil W1

Einflussstärke der einzelnen Kategorien

Außerhalb der Nutzungszeit ist meist für ein Forschungslabor ein von der Nutzung abhängiger Mindestluftwechsel einzuhalten. Wird keine Lüftung gefordert, dann verhält sich der Energiebedarf ähnlich zu den bereits bekannten Beispielen ohne Nutzung (siehe Verkehrsfläche, büroähnliche Nutzung oder Hörsaal).

In der Abbildung 6.13 sind die Anteile an der Streuung im Heiz- und Kühlenergiebedarf für die vier Kategorien aufgeführt. In beiden Nutzungen besitzt die Infiltration (K2:BauKonstPar_dyn) keinen Anteil an den Streuungen. Die statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter (K1:BauKonstPar_stat) wirken mit max. 10% im Heizenergiebedarf und mit max. 20% im Kühlenergiebedarf im Vergleich zu den anderen nutzungsabhängigen Parametern deutlich schwächer auf die Streuung. Ist das Verhältnis im Heizenergiebedarf der Kategorien K1:BauKonstPar_stat zu K3:NutzPar_stat zu K4:NutzPar_dyn in der Nutzung 1 in etwa 1:10:10, so verändert es sich in der Nutzung 2 deutlich zu 1:6:21. Für den

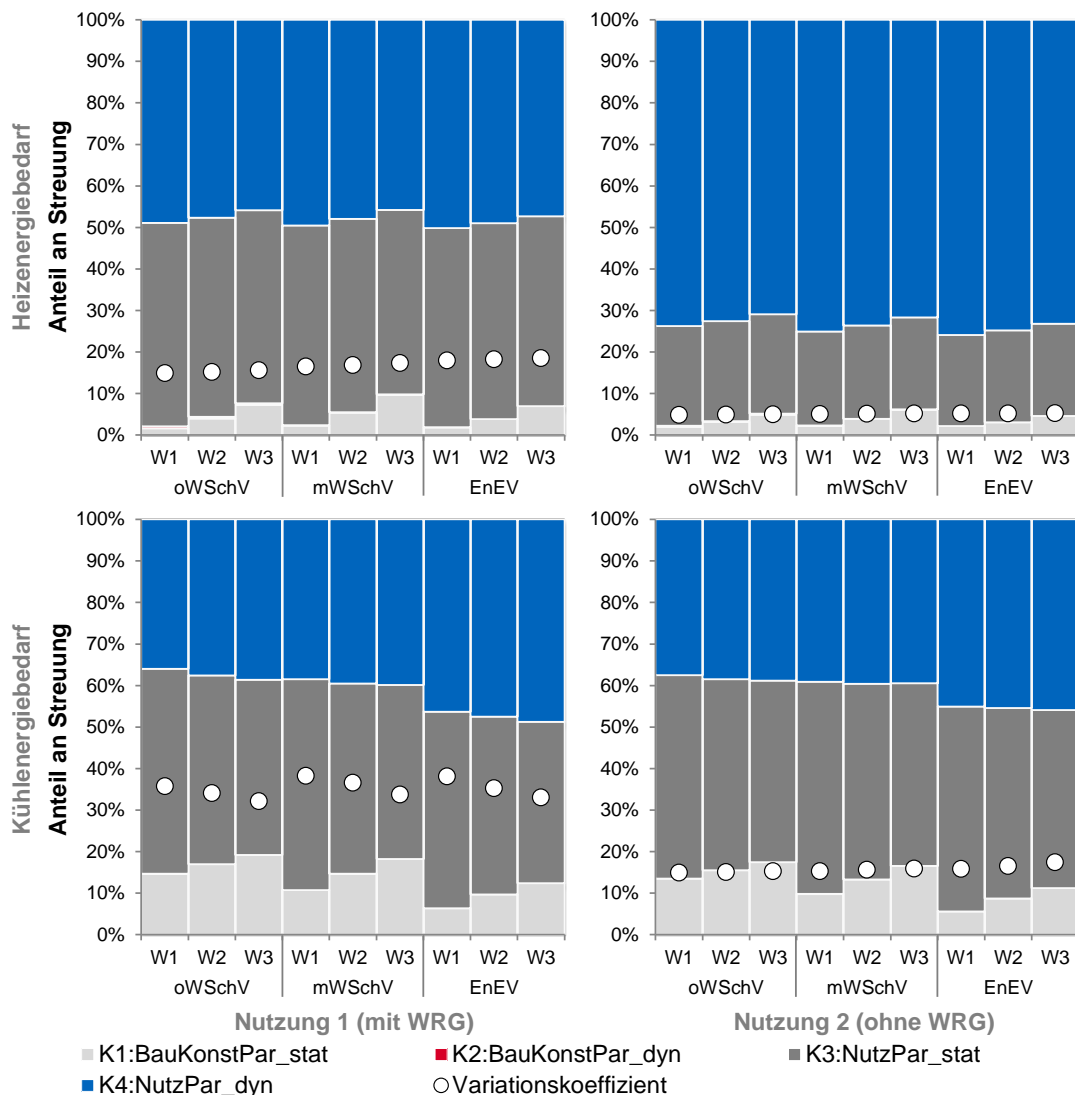


Abbildung 6.13: Anteile an der Streuung des Heizenergiebedarfs für Labor Forschung

Kühlenergiebedarf ist es 1:3:3 in Nutzung 1 und 1:4:3 in Nutzung 2. Höhere interne Lasten werden das Verhältnis weiter in Richtung nutzungsabhängiger Parameter verschieben. Im Gegensatz dazu wirken die statischen, baukonstruktionsabhängigen Parameter kaum auf die Summenanteile der vier Kategorien an der Streuung; deren Einfluss steigt erst mit einem größerer Fensterflächenanteil an.

Der Variationskoeffizient bleibt für den Heizenergiebedarf innerhalb der Versuchsreihe Nutzung 1 und 2 annähernd gleich. In Nutzung 2 ist er deutlich kleiner als in Nutzung 1. Damit ist der Heizenergiebedarf gegenüber den gestreuten Parametern weniger sensitiv. Für den Kühlenergiebedarf ist der Variationskoeffizient in beiden Nutzungen sichtlich höher. Für Nutzung 1 sinkt der Variationskoeffizient mit ansteigendem Fensterflächenanteil. Der größere Fensterflächenanteil wirkt damit stabilisierend auf den Kühlenergiebedarf. Nutzung 1 weist gegenüber Nutzung 2 einen niedrigeren bzw. teils keinen Kühlenergiebedarf aus. Dies führt zu einer größeren Sensitivität gegenüber den Eingangsparametern in Nutzung 1. Der doppelt so hohe Luftwechsel von 16 h^{-1} in Nutzung 2 benötigt für die thermische Aufbereitung der Zuluft mehr Kühlenergie und bedingt eine geringere Abhängigkeit des Kühlenergiebedarfs von wechselnden solaren und internen Lasten. Als Folge wird der Variationskoeffizient kleiner und verbleibt für alle Versuche in Nutzung 2 auf gleichem Niveau. Daraus folgt, dass der Einsatz von Lüftungsanlagen mit höherer Luftwechselzahl zu einem Anstieg der Einflussstärke der statischen ($K3:NutzPar_{stat}$) und dynamischen Nutzungsparameter ($K4:NutzPar_{dyn}$) auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf führt. Dabei zeigen die statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter einen deutlich kleineren Effekt und die Infiltration erweist sich als irrelevant. Infolge des höheren Sowieso-Energieaufwands zur thermischen Aufbereitung der Zuluft führen höhere Luftwechselzahlen zu einer geringeren Sensitivität gegenüber den untersuchten Parametern.

Bewertung der absoluten Effekte

Die Tabelle 6.6 zeigt die absoluten Werte des Heizenergiebedarfs. In beiden Nutzungen ist der Einfluss der Luftwechselzahl und der WRG am Unterschied der Mittelwerte erkennbar. Die Heizenergiebedarfswerte liegen in Nutzung 1 zwischen 260 und 340 $\text{kWh/m}^2\text{a}$ und in Nutzung 2 zwischen 1.250 und 1.390 $\text{kWh/m}^2\text{a}$. Der Fensterflächenanteil wirkt kaum auf den Heizenergiebedarf. Die Mittelwerte des Heizenergiebedarfs unterscheiden sich kaum und die Sensitivitätsindizes des Fensterflächenanteils besitzen niedrige Werte von $\leq 0,01$. Die Standardabweichung in der Nutzung 2 ist ca. 16% größer als in Nutzung 1. Trotzdem ist Nutzung 2 wegen des geringeren Variationskoeffizienten gegenüber den Eingangsparametern weniger sensitiv.

Auch im Kühlenergiebedarf sind zwischen Nutzung 1 und 2 deutliche Unterschiede in Tabelle 6.7 zu erkennen. Liegt der mittlere Kühlenergiebedarf für Nutzung 1 bei ca. 7 $\text{kWh/m}^2\text{a}$, ist er für Nutzung 2 mit ca. 16 $\text{kWh/m}^2\text{a}$ etwa doppelt so groß. Weder ein besserer energetischer Baustandard noch ein größerer Fensterflächenanteil besitzt einen sichtbaren Effekt auf den Kühlenergiebedarf. Die Standardabweichung ist für beide Nutzungen mit ca. 2 $\text{kWh/m}^2\text{a}$ annähernd gleich. Der Variationskoeffizient ist daher in Nutzung 1 größer, die Sensitivität infolge der gestreuten Parameter ebenfalls.

Tabelle 6.6: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Heizenergiebedarf für ein süd-orientiertes Labor Forschung

Nutzungsart	energetischer Baustandard	Fensterflächen	\bar{x} ($\equiv \mu$) [kWh/m ² a]	s ($\equiv \sigma$) [kWh/m ² a]	Min. [kWh/m ² a]	Max. [kWh/m ² a]	VarK [%]
Labor Forschung Nutzung 1	oWSchV	W1	333	50	177	499	15
		W2	330	50	175	501	15
		W3	328	51	174	504	16
	mWSchV	W1	294	49	144	460	17
		W2	293	49	144	465	17
		W3	292	51	143	471	17
	EnEV	W1	262	47	112	418	18
		W2	261	48	113	422	18
		W3	261	48	114	427	19
Labor Forschung Nutzung 2	oWSchV	W1	1.388	68	1.194	1.584	5
		W2	1.382	68	1.187	1.583	5
		W3	1.376	69	1.176	1.582	5
	mWSchV	W1	1.325	67	1.137	1.521	5
		W2	1.321	67	1.133	1.523	5
		W3	1.318	68	1.125	1.527	5
	EnEV	W1	1.266	65	1.078	1.460	5
		W2	1.260	66	1.074	1.455	5
		W3	1.256	66	1.071	1.453	5

Tabelle 6.7: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Kühlenergiebedarf für ein süd-orientiertes Labor Forschung

Nutzungsart	energetischer Baustandard	Fensterflächen	\bar{x} ($\equiv \mu$) [kWh/m ² a]	s ($\equiv \sigma$) [kWh/m ² a]	Min. [kWh/m ² a]	Max. [kWh/m ² a]	VarK [%]
Labor Forschung Nutzung 1	oWSchV	W1	7	2	0	14	36
		W2	7	2	0	15	34
		W3	8	3	0	16	32
	mWSchV	W1	6	2	0	13	38
		W2	6	2	0	14	37
		W3	7	2	0	15	34
	EnEV	W1	6	2	0	12	38
		W2	6	2	0	13	35
		W3	7	2	0	15	33
Labor Forschung Nutzung 2	oWSchV	W1	17	2	9	25	15
		W2	17	3	8	26	15
		W3	18	3	8	26	15
	mWSchV	W1	15	2	8	23	15
		W2	16	2	7	23	16
		W3	16	3	7	24	16
	EnEV	W1	14	2	7	21	16
		W2	14	2	6	21	17
		W3	14	2	6	21	17

Auswirkungen auf den Bewertungsprozess

Die Versuchsreihe für das Forschungslabor zeigt, dass der Energiebedarf für Heizen und Kühlen bei Nutzungen mit hohen Luftwechselzahlen sehr stark von den statischen und dynamischen Nutzungsparametern abhängt. Streuungen bzw. Unsicherheiten in den baukonstruktionsabhängigen Parametern wirken nur im geringen Maß auf Kühl- und Heizenergiebedarf. Die Infiltration erweist sich für die Streuung der Energiebedarfswerte als irrelevant. Eine fehlende Wärmerückgewinnung verstärkt die Ausprägungen zusätzlich. Es wird angenommen, dass noch höhere interne thermische Lasten (durch Geräteausstattung, Personen etc.) den Einfluss der statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter (K1:BauKonstPar_stat) weiter reduzieren.

6.3 Übergeordnete Abhängigkeiten der Einflussfaktoren

6.3.1 Einfluss des energetischen Baustandards

Nachfolgend werden bei gleichbleibendem Fensterflächenanteil die Effekte der Eingangsparameter auf den Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom energetischen Baustandard näher betrachtet. Hierzu wurden die Modelle W1 mit dem Fensterflächenanteil 25-45% verwendet. Dieses Raummodell deckt mit der Lochfassade als Außenwand einen Großteil der Fassaden bei Hochschulgebäuden ab. Es wird geklärt, wie sich die Anteile der vier Kategorien (K1:BauKonstPar_stat, K2:BauKonstPar_dyn, K3:NutzPar_stat, K4:NutzPar_dyn) und die Sensitivität anhand des Variationskoeffizienten abhängig vom energetischen Baustandard verändern. Sind die Auswirkungen bekannt, können einerseits die entscheidenden Parameter ausgewählt werden, die bei einer Begehung oder Bewertung einer Nutzungsart genauer untersucht werden müssen. Andererseits kann für eine Nutzungsart die Effektivität einer geplanten Maßnahmen abgeschätzt werden. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 6.14 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

Für die Verkehrsfläche steigt der Einfluss der Kategorie K1:BauKonstPar_stat mit besserem energetischen Baustandard an, wobei Infiltration (K2:BauKonstPar_dyn) und dynamische nutzungsabhängige Parameter (K4:NutzPar_dyn) am deutlichsten verlieren. Im Baustandard EnEV sind mehr als 50% der Streuung auf die Kategorie K1:BauKonstPar_sta zurückzuführen. Dagegen steigt die Sensitivität gering an, der Variationskoeffizient vergrößert sich von 7% in oWSchV auf 10% in EnEV. In einer energetischen Bewertung von Nutzungen ohne Personenbelegung sind folglich die Parameter, die den Wärmedämmstandard beschreiben, genauer zu erfassen und zu kontrollieren. Maßnahmen die den energetischen Baustandard verbessern, lassen den größten Effekt erwarten. Die Qualität der Ausführung ist folglich zu kontrollieren, denn die Ausführungsqualität wirkt auf den erreichbaren Wärmedämmstandard.

In der Büronutzung wirken die dynamischen Nutzungsparameter (K4:NutzPar_dyn) am stärksten auf die Streuung des Heizenergiebedarfs; für den Baustandard EnEV mit mehr als 85%. Mit einem besseren energetischen Baustandard wächst deren Einfluss weiter. Parallel nimmt die Sensitivität zu, der Variationskoeffizient steigt von 9% in oWSchV auf 16% in EnEV an. Gleichzeitig erhöht

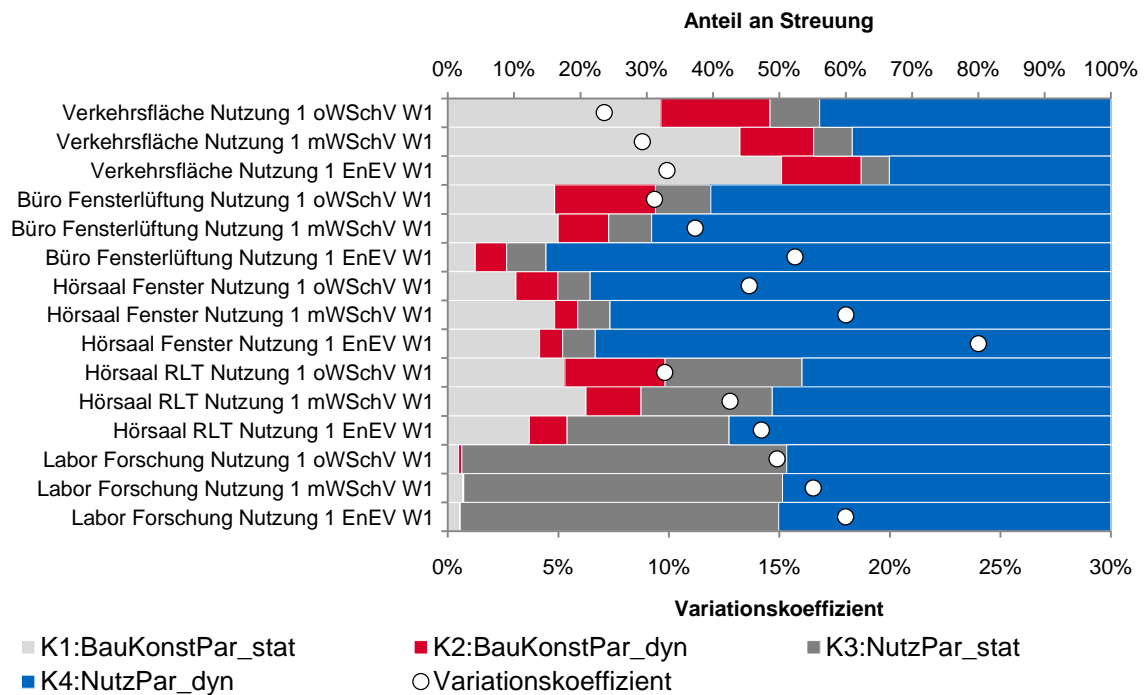


Abbildung 6.14: Gewichtung der Effekte bei unterschiedlichen Wärmedämmstandards oWSchV-EnEV und gleichem Fensterflächenanteil W1

sich mit steigender Sensitivität des Ergebnisses der Einfluss der dynamischen Nutzungsparameter (K4:NutzPar_dyn). Umso bedeutender wird die Beachtung von Nutzungseffekten bei der Bewertung von Gebäuden oder energetischen Verbesserungsmaßnahmen, um den Energiebedarf oder das Einsparpotenzial nachvollziehbar abschätzen und interpretieren zu können.

Für einen Hörsaal mit Fensterlüftung ist die ausschlaggebende Kategorie K4:NutzPar_dyn. Über alle drei Baustandards ist deren Einfluss auf die Streuung mehr als 75%. Obwohl kaum Verschiebungen der Anteile in den Kategorien mit der Verbesserung des energetischen Baustandards stattfinden, steigt die Sensitivität des Ergebnisses stark an. Zu sehen ist dies am Variationskoeffizienten von 14% in oWSchV und 24% in EnEV. Im Vergleich zum Hörsaal mit einer mechanischen Lüftung (RLT) ist die Sensitivität bei Fensterlüftung deutlich höher. Für den mechanisch belüfteten Hörsaal bleibt K4:NutzPar_dyn weiterhin die stärkste Kategorie, wobei sie deutlich Anteile an die Kategorien K2: BauKonstPar_dyn und K3: NutzPar_stat verliert. Der Einfluss der nutzungsabhängigen Parameter wächst mit einem besseren energetischen Baustandard, wobei eine mechanische Belüftung die Sensitivität des Heizenergiebedarfs gegenüber den Nutzungseffekten reduziert. Der Variationskoeffizient von 14% für das Modell EnEV mit mechanischer Belüftung ist viel kleiner als 24% bei Fensterlüftung. Der Einsatz einer mechanischen Lüftung hat weitere Vorteile. Zum einen stellt sie eine hohe Luftqualität zur Verfügung und das Lüften über Fenster ist nicht notwendig. Zum anderen erlaubt die Wärmerückgewinnung in der mechanischen Lüftung die Wärmeenergie der internen Wärmelasten zur Erwärmung des Zuluftstroms zu verwenden. Wärmeverluste über eine Fensterlüftung werden somit vermieden. Beides führt sowohl zu niedrigeren Energiebedarfswerten als auch zu einer geringeren Sensitivität gegenüber Nutzungseffekten.

Für ein Labor gelten die nutzungsabhängigen Parameter als relevant. Statische und dynamische Nutzungsparameter sind in etwa gleich stark. Eine Verbesserung des energetischen Baustandards führt zu einem geringen Anstieg der Sensitivität, aber zu keiner Veränderung in den Anteilen. Somit sind für eine energetische Bewertung zum Ersten die von der Nutzung vorgegebenen Anforderungen entscheidend. Zum Zweiten ist zu prüfen, wie diese Anforderungen über die vorhandene Gebäudetechnik (z.B. Luftwechsel, Wirkungsgrad WRG etc.) sichergestellt werden.

Wie gezeigt wurde, steigt mit einem besseren energetischen Baustandard die Sensitivität des Heizenergiebedarfs gegenüber den untersuchten Parametern an. Ist eine Personennutzung vorhanden, so ist sie Haupteinflussfaktor auf die Streuung; meist mit einem Anteil von mehr als 50%. Der Einfluss der dynamischen Nutzungsparameter kann mit einer mechanischen Lüftung reduziert werden. Dabei verschieben sich die Anteile der dynamischen in Richtung der statischen Nutzungsparameter. Im Vergleich zur Fensterlüftung sinkt die Sensitivität des Heizenergiebedarfs bei einer vorhandenen mechanischen Lüftung deutlich.

6.3.2 Einfluss des Fensterflächenanteils

In diesem Kapitel werden bei gleichbleibendem energetischen Baustandard (EnEV) die Effekte der Eingangsparameter auf den Heizenergiebedarf in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil näher betrachtet. Die Modelle der Reihe EnEV bilden dafür die Basis. Einerseits weist der EnEV-Baustandard gemäß dem vorangegangenen Kapitel die höchste Sensitivität aus. Andererseits erfolgen sowohl energetische Verbesserungen der Gebäudehülle als auch die Planung von Neubauten nach dem EnEV-Baustandard. Folglich steht die Gebäudebewertung und -verbesserung stets mit dem EnEV-Baustandard in Verbindung. Es wird gezeigt, wie sich in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil die Anteile der Kategorien (K1:BauKonstPar_stat, K2:BauKonstPar_dyn, K3:NutzPar_stat, K4:NutzPar_dyn) und die Sensitivität des Heizenergiebedarfs anhand des Variationskoeffizienten verändern. Die Höhe des Fensterflächenanteils ist für eine intelligente, energetische Nutzung des solaren Ertrags von Bedeutung. Je größer der Fensterflächenanteil ist, desto mehr solarer Ertrag kann genutzt werden. Darüber hinaus steigt der Wärmetransmissionskoeffizient der Fassade an, denn die Fenster weisen im Vergleich zu den Wandkonstruktionen einen höheren Wärmetransmissionskoeffizienten auf. In Kombination mit dem schwankenden solaren Ertrag befindet sich über die Fassade eine höhere Energiemenge im Austausch, was zu einer größeren Streuung führen kann. Es ist somit hilfreich die Abhängigkeit und die Effektivität von geplanten Maßnahmen, z.B. gegenüber den aufgeführten Kategorien aus Abbildung 6.15, erkennen und bewerten zu können. Die Zusammenhänge sind nachfolgend näher beschrieben.

Bei Verkehrsflächen steigt der Einfluss der statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter (K1:BauKonstPar_stat) mit größer werdendem Fensterflächenanteil an und erweist sich als die einflussreichste Kategorie. Am deutlichsten verlieren dabei die dynamischen Nutzungsparameter (K4:NutzPar_dyn) und die Infiltration (K2:BauKonstPar_dyn) an Einfluss. Die Sensitivität verbleibt auf einem niedrigen und ähnlichen Niveau. Die Variationskoeffizienten liegen zwischen 9 und 12%. Das bedeutet, dass bei der Bewertung von Nutzungen ohne Personenbelegung die baukonstruktionsab-

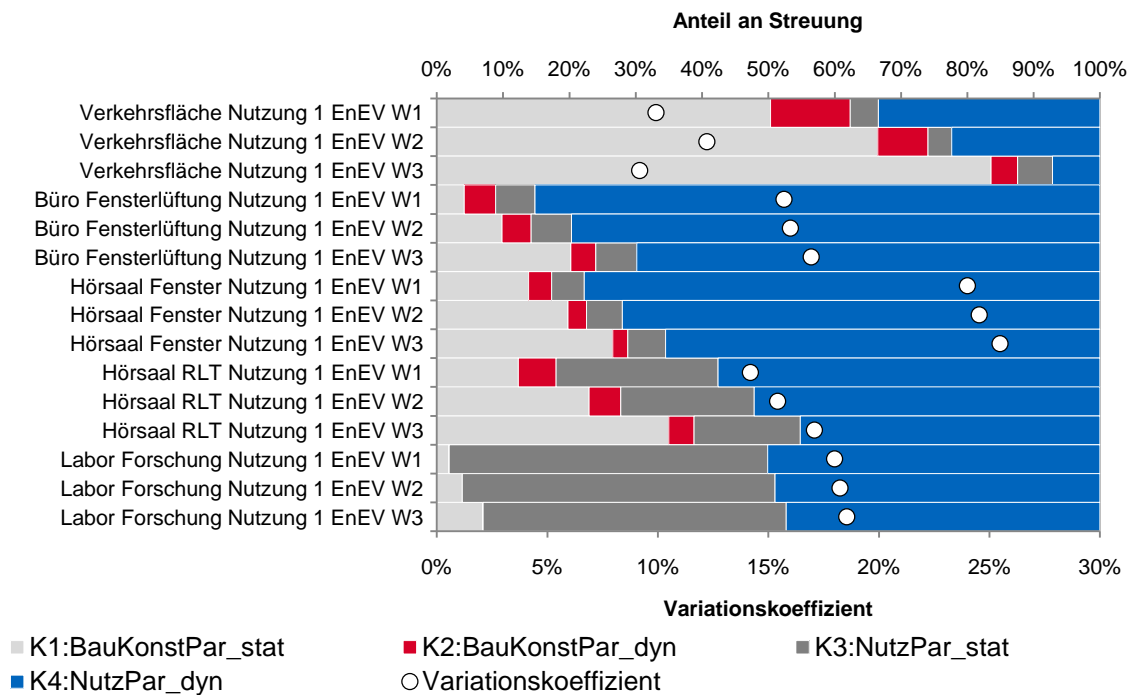


Abbildung 6.15: Gewichtung der Effekte bei unterschiedlichen Fensterflächenanteilen W1-W3 und gleichem Wärmedämmstandard EnEV

hängigen Eigenschaften der Gebäudehülle (z.B. U-Wert) gemeinsam mit der Infiltration sehr stark das Ergebnis beeinflussen können.

Für eine Büronutzung erweisen sich die dynamischen Nutzungsparameter am einflussreichsten und ihre Kategorie K4:NutzPar_dyn verursacht mindestens 70% der Streuung. Mit größerem Fensterflächenanteil verliert sie im gleichen Maße an Einfluss wie die statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter gewinnen. Die Sensitivität verbleibt mit einem Variationskoeffizienten von ca. 16% auf gleichem Niveau.

Für die Hörsaalnutzung mit Fensterlüftung sind ebenfalls die dynamischen Nutzungsparameter die entscheidenden Faktoren. Ihr Summenanteil beträgt ca. 60% an der Streuung. Die Einflussstärke der dynamischen Nutzungseffekte (K4:NutzPar_dyn) sinkt mit steigendem Fensterflächenanteil, zugleich steigt der Effekt der statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter (K1:BauKonstPar_stat).

Die Sensitivität ist bei der Hörsaalnutzung mit hoher Personenbelegung deutlich größer und unabhängig vom Fensterflächenanteil verbleibt der Variationskoeffizient bei ca. 24-25%. Ist eine mechanische Belüftung vorhanden, sinkt die Sensitivität. Die Variationskoeffizienten liegen in einem niedrigeren Bereich von 14-17%. Dabei verhält sich das Modell gegenüber einem größeren Fensterflächenanteil sensibler und zugleich wächst der Einfluss der statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter (K1:BauKonstPar_stat) mit an. Im Vergleich zum Hörsaal mit Fensterlüftung ist der Anstieg der Einflussstärke bei mechanischer Belüftung größer.

In der untersuchten Labornutzung zeigen sich die statischen und dynamischen nutzungsabhängigen Parameter am einflussreichsten. Beide verursachen gemeinsam mindestens 90% der Streuung. Ein

Anstieg im Fensterflächenanteil vergrößert den Anteil der statischen baukonstruktionsabhängigen Parameter an der Streuung, deren Effekt im Vergleich zu den nutzungsabhängigen Parametern als schwach zu werten ist. Für alle drei Fensterflächenanteile bleibt die Sensitivität mit einem Variationskoeffizienten von ca. 18% auf gleichem Niveau.

Wie für diese Modellreihe gezeigt wurde, verändert sich die Sensitivität nicht wesentlich mit dem Fensterflächenanteil. Sehr wohl verändern sich aber die Anteile der einzelnen Kategorien an der Streuung. Sichtlich steigt der Einfluss der baukonstruktionsabhängigen Parameter mit größerem Fensterflächenanteil an. Bei vorhandener Personenbelegung besitzen die Nutzungseffekte den größten Anteil an der Streuung und erweisen sich folglich als die ausschlaggebenden Parameter.

6.4 Zusammenfassung

Die Analyse zur Bestimmung wesentlicher Einflussfaktoren auf den Nutzenergiebedarf zeigt, dass Unsicherheiten oder Streuungen in den vier Kategorien K1:BauKonstPar_stat, K2:BauKonstPar_dyn, K3:NutzPar_stat und K4:NutzPar_dyn den Heiz- und Kühlenergiebedarf unterschiedlich stark beeinflussen können. Der Einfluss einer Kategorie bildet sich aus einem einzelnen oder mehreren Parametern und wird mit Hilfe der Sensitivitätsindizes abgebildet. Dabei verursacht eine Raumnutzung eine unterschiedliche Verteilung der Anteile an der Streuung sowohl innerhalb einer Kategorie als auch unter den vier Kategorien insgesamt.

Wesentliche Einflussfaktoren sind für Nebennutzungen ohne durchgehende Personenbelegung die in den baukonstruktionsabhängigen Parametern enthaltenen U-Werte der Wand und des Fensters sowie die Raumtemperatur während es Heizbetriebs. Ein größerer Fensterflächenanteil erhöht die Sensitivität gegenüber den baukonstruktionsabhängigen Parametern und reduziert sie gleichzeitig gegenüber der Raumtemperatur. Bereits geringe Unterschiede in den Untersuchungsparametern können den Heizenergiebedarf deutlich verändern.

Ist eine Personennutzung vorhanden und erfolgt die Belüftung über Fenster, dann nehmen die dynamischen Nutzungsparameter (K4:NutzPar_dyn) Anteile von mehr als 60% an der Streuung ein. Die Nutzung ist folglich Haupteinflussfaktor, in der die personenbezogenen Parameter die wesentlichen Faktoren darstellen. Je besser der Wärmedämmstandard eines Gebäudes ist, desto sensibler wird der Energiebedarf gegenüber den Nutzungseffekten.

Eine mechanische Belüftung verschiebt die Einflussstärken der Untersuchungsparameter. Sie wirkt auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf stabilisierend, infolgedessen werden die Absolutwerte der Standardabweichung kleiner. Die Sensitivität des Heiz- und Kühlenergiebedarfs gegenüber der geförderten Luftmenge erfordert eine Unterscheidung. Für Lüftungsanlagen mit einer im Bezug zur Person niedrigen Luftmenge werden Parameter aus den Kategorien K3:NutzPar_stat und K1:BauKonstPar_stat stärker, gleichzeitig die aus der K4:NutzPar_dyn schwächer. Der Heizenergiebedarf ist folglich gegenüber den dynamischen Nutzungsparametern weniger sensitiv. Sind größere Luftmengen in Bezug zur Person vorhanden, dann besitzen die statischen und dynamischen nutzungsabhängigen Parameter den größten Einfluss auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf; der Einfluss

der Infiltration ist vernachlässigbar. Die Nutzungsparameter definieren hierzu die einzuhaltenden Anforderungen an die Raumluftqualität. Ein weiterer Anstieg der Luftmenge verringert die Sensitivität des Heiz- und Kühlenergiebedarfs gegenüber den Untersuchungsparametern. Als ein Grund dafür gilt der größer werdende Sowieso-Energieaufwand zur thermischen Aufbereitung der Zuluft. Eine fehlende Wärmerückgewinnung reduziert die Sensitivität zusätzlich.

Der Variationskoeffizient weist in den Modellen bzw. Nutzungsarten die Sensitivität gegenüber den Untersuchungsparametern aus. Er setzt die Standardabweichung in Relation zum Mittelwert. Über alle Untersuchungsreihen ergibt sich ein mittlerer Variationskoeffizient von ca. $\pm 15\%$ im Heizenergiebedarf. Damit streuen auf Basis einer Standardabweichung ca. 68% aller Werte mit einer relativen Abweichung von ca. $\pm 15\%$ um ihren Mittelwert. Für den Kühlenergiebedarf ist es bei der Labornutzung für Nutzung 1 eine relative Abweichung von $\pm 35\%$ und $\pm 16\%$ für Nutzung 2.

Die Variationskoeffizienten und die Anteile der Kategorien an der Streuung sind für alle Versuche in Abbildung 6.16 aufgeführt. Deutlich entwickeln die beiden Kategorien statische baukonstruktionsabhängige und dynamische nutzungsabhängige Parameter ein eigenes Spannungsfeld. Statische baukonstruktionsabhängige Parameter zeigen sich für Flächen ohne häufige Personennutzung als die energetisch relevanten Parameter. Sobald eine zeitlich ausgeprägte Nutzung durch Personen auftritt, sind die personenbezogenen Parameter die Haupteinflussfaktoren auf den Heiz- und Kühlenergiebedarf. Eine mechanische Belüftung verschiebt die Anteile und reduziert die Sensitivität des Energiebedarfs gegenüber den dynamischen Nutzungsparametern. Die Anteile sind etwa gleich groß, wenn Lüftungsanlagen eine im Bezug zu den anwesenden Personen niedrige Luftmenge ($30\text{--}54\text{ m}^3/\text{h Person}$) aufweisen. Mit größerer Luftwechselzahl, wie z.B. im Laborbetrieb, sinkt der Anteil der baukonstruktionsabhängigen Parameter deutlich, die Anteile der nutzungsabhängigen Parameter steigen.

Die aufgeführten Effekte und deren verschiedene Ausprägungen in den einzelnen Kategorien zeigen die hohe Relevanz, mögliche Unsicherheiten und Parametervariationen in eine Bewertung mit einzubinden. Ihr Einfluss und die Verteilung hängen von der Art der Raumbelüftung, über Fenster oder über Lüftungsanlage, ab. Selbst unter gleichen Anlagentypen verändern sich die Einflussstärken der Untersuchungsparameter. Insbesondere der sehr große Anteil an der Streuung durch das Nutzerverhalten sollte angemessen beachtet werden. Eine Bewertung von Verbrauchs- oder Bedarfs-werten wird auf Basis von Standardprofilen mit einem einzigen Parametersatz nur unzureichende Ergebnisse liefern. Damit wächst die Gefahr einer falschen Interpretation der Ergebnisse. Nicht erschließbare oder falsch eingeschätzte Einsparpotenziale sind die Folge. Die Unsicherheiten und das Nutzungsverhalten angemessen abzuschätzen, sie in die Bewertung zu implementieren und sie später auf Basis belastbarer Indikatoren zu bewerten, erfordert die Einbindung von anspruchsvollen und meist zeitintensiven Simulations- und Statistikverfahren. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass sich der Aufwand lohnen kann. Mit Hilfe der Sensitivitätsindizes können energetische Effekte den Untersuchungsparametern klar zugewiesen, mögliche Einsparpotenziale abgeschätzt und der wahrscheinliche Eintritt beurteilt werden.

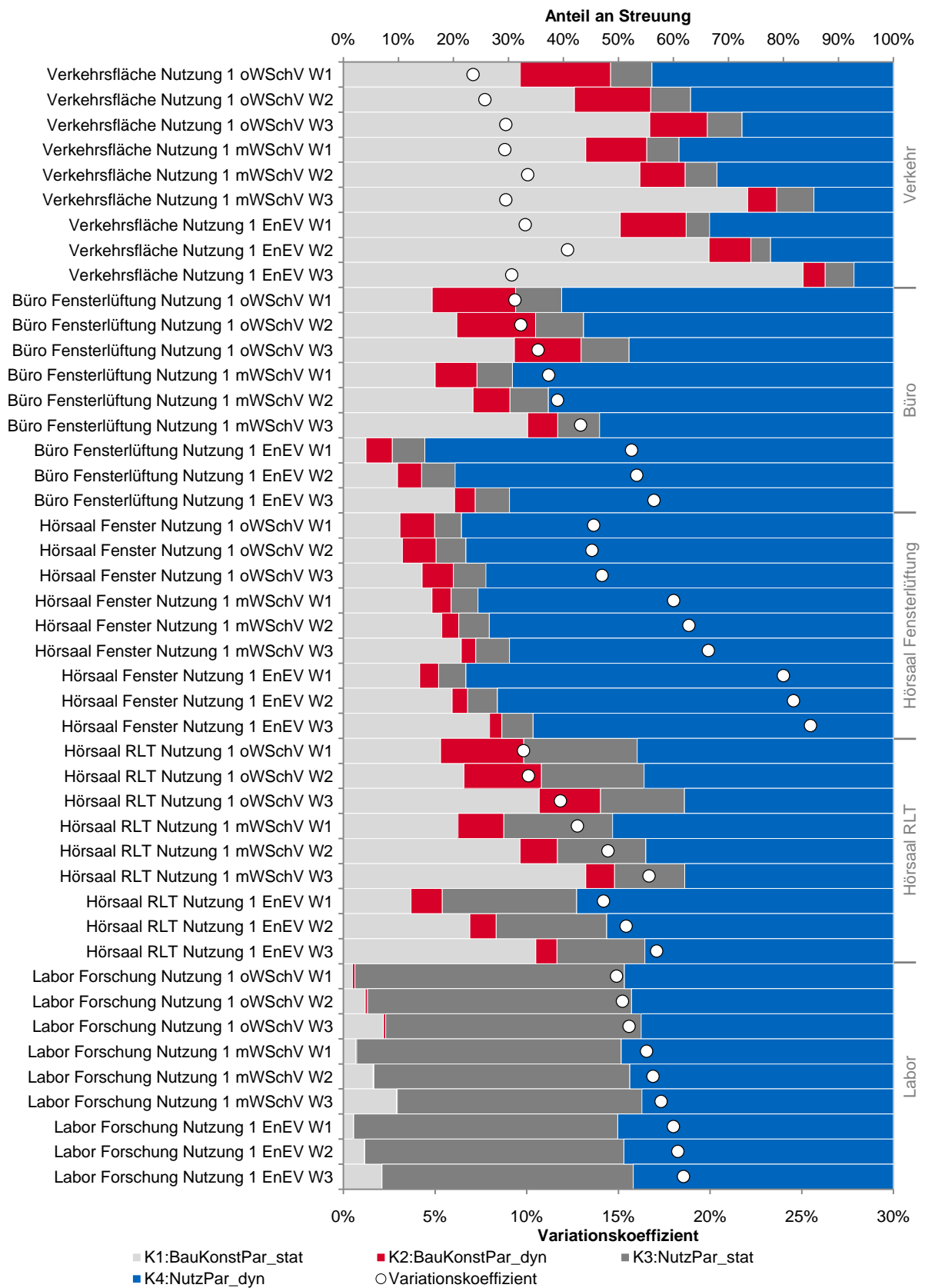


Abbildung 6.16: Einflussstärken der Kategorien und Variationskoeffizienten aus allen Versuchen der Nutzung 1

KAPITEL 7

Einsatzfähigkeit der Referenzraummethode

7.1 Rahmenbedingungen

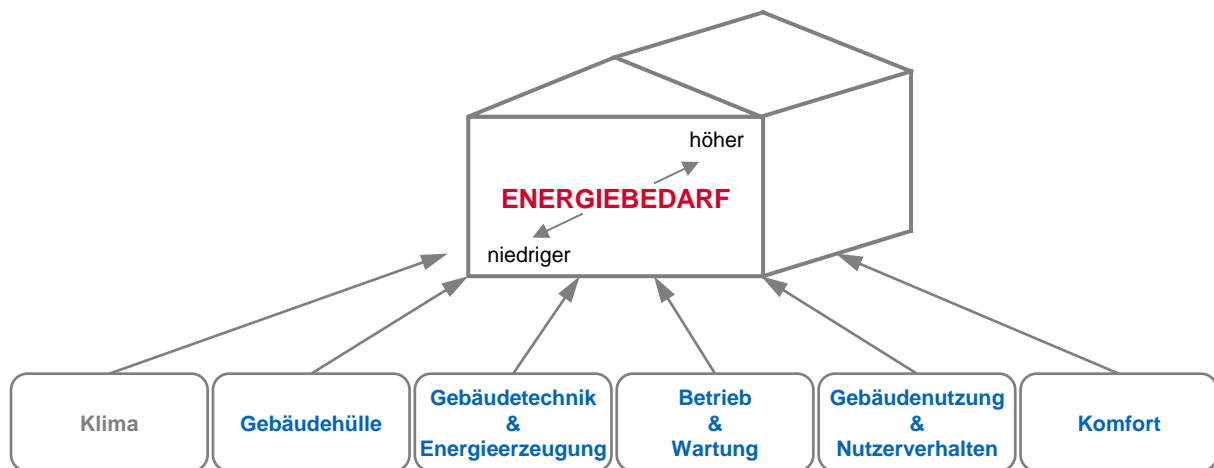
Reale Gebäude kennzeichnen sich durch das gleichzeitige Einwirken der sechs Einflussfaktoren Klima, Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Energieerzeugung, Betrieb und Wartung, Gebäudenutzung und Nutzerverhalten sowie Komfort auf den Energiebedarf. Daher ist es für eine energetische Verbesserung des Gebäudeportfolios entscheidend, dass sowohl der Energiebedarf einer Liegenschaft nachvollziehbar und sicher bestimmt wird als auch dass der Einfluss wesentlicher Parameter auf den Energiebedarf ersichtlich werden kann. Daher wird gezeigt, dass die Referenzraummethode (RRM) im Bezug zu einer Simulation mit detailliertem Gebäudemodell gleichwertige Ergebnisse liefern kann. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 5 und Kapitel 6 behandelt die Analyse der Case-Studies die Kombination der baukonstruktions- und nutzungsabhängigen Parameter entsprechend der Abbildung 7.1. Es ist hierbei von Interesse, welche der vielen Untersuchungsparameter als Haupteinflussfaktoren auf den Gebäudeenergiebedarf identifiziert werden können und wie hoch die Abweichungen durch das fehlende Gebäudegeometriemodell in der RRM ausfallen werden. Hierbei wird anhand der Berechnungsqualität der RRM diskutiert, ob die RRM für die Energiebedarfsabschätzung von Liegenschaften und für die Identifikation energierelevanter Parameter eingesetzt werden kann.

Die Leistungsfähigkeit der RRM soll anhand dreier unterschiedlicher Case-Studies dargestellt und diskutiert werden. Alle Case-Studies besitzen zwei Samples. Jedes Sample setzt sich aus mehreren und unterschiedlichen Wertekombinationen der zu betrachtenden Untersuchungsparameter als eine Sammlung von Stichproben zusammen. Die Auswahl der Untersuchungsparameter und deren in der Monte Carlo Simulation hinterlegte Bandbreiten befinden sich in den Übersichtstabellen im Anhang C ab Seite 211. Das Sample 2 besitzt gegenüber Sample 1 kleinere Bandbreiten in den Eingangsparametern. Dies soll einen sichereren Informationszustand für eine Bewertung abbilden und zeigen, wie sich die Bandbreiten der Untersuchungsparameter auf die Genauigkeit der RRM auswirken.

Die Analyse erfolgt hierzu in zwei Stufen. In Stufe 1 wird auf Basis von Sobol-Sequenzen für jedes Modell eine Stichprobe mit 400 verschiedenen Kombinationen der gewählten Untersuchungsparameter als 1. Sample erzeugt. Das 1. Sample dient als Sammlung der zu untersuchenden Eingangsparameter für das Simulationsmodell des Gebäudes und der RRM. Beide Verfahren nutzen EnergyPlus und

das jeweilige Sample zur Energieberechnung. Die Ergebnisse und Eingangsdaten aus dem 1. Sample werden verwendet, um ein vereinfachtes Ersatzmodell mit Hilfe der linearen Regression zu bestimmen. Für die weitere Analyse ist die maximale Anzahl auf die 31 einflussreichsten Untersuchungsparameter begrenzt. Aus dem Ersatzmodell werden die standardisierten Regressionskoeffizienten gebildet. Für den Energiebedarf helfen sie die einflussreichen Untersuchungsparameter auszuwählen. Das Ersatzmodell wird in Stufe 2 für die weitere Berechnung der quantitativen Sensitivitätsindizes herangezogen. Um die Effekte hinreichend genau und stabil zu bestimmen, stützt sich die Berechnung auf eine zweite umfangreichere Berechnungsprozedur mit einem eigenständigen 2. Sample aus 100.000 Stichproben. Die Werteziehung jeder Stichprobe erfolgt aus dem mehrdimensionalen Parameterraum der ausgewählten Untersuchungsparameter.

Die wesentlichen Informationen zu den Case-Studies befinden sich in Tabelle 7.1. Neben den unterschiedlichen Grundrissen ist die Modellierung der Umgebungsbebauung verschieden. Case-Study 1 und Case-Study 2 bilden zwei reale Gebäude ab. Case-Study 3 ist ein theoretisches Referenzge-



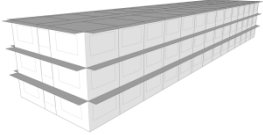

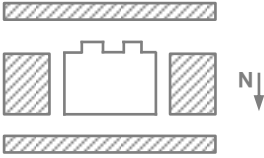





Übersicht: Eingesetzte Parameter in der Modellierung der Simulationsmodelle

Baukonstruktionsabhängige Parameter		Nutzungsabhängige Parameter	
Statisch	Dynamisch	Statisch	Dynamisch
<ul style="list-style-type: none"> • Fensterflächenanteil • Fenster U-Wert • Fenster g-Wert • Sonnenschutz fest • Dach U-Wert • Außenwand U-Wert • Bodenplatte U-Wert 	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltrationsrate 	<ul style="list-style-type: none"> • Raumtemperatursollwert-anpassung $\pm\Delta\vartheta$ • Raumlufffeuchte Max. • Raumlufffeuchte Min. • Beleuchtung Anschlussleistung • TGA Δt Einschaltzeitpunkt • WRG Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Person Belegungsdichte • Person Wärmeabgabe • Person Anwesenheit • Person Frischluftbedarf • Luftwechselzahl • Raumtemperatur Heizen • Raumtemperatur Kühlen • Sonnenschutz beweglich • Elek. Geräte Anschlussleistung • Elek. Geräte Standby • Nutzungsbeginn • Nutzungsende

Abbildung 7.1: Studienkonzept zur Bewertung der Berechnungsgenauigkeit der RRM gegenüber einem detaillierten Gebäudemodell unter Beachtung der Erkenntnisse hinsichtlich Gebäudehülle aus Kapitel 5 und Nutzungseffekte aus Kapitel 6

Tabelle 7.1: Beschreibung der Demonstrationsgebäude mit Standort München

Bezeichnung	Case-Study 1		Case-Study 2		Case-Study 3	
						
Umriss						
Fläche	BGF	4.740 m ²	BGF	1.660 m ²	BGF	2.040 m ²
	NGF	3.780 m ²	NGF	1.400 m ²	NGF	- m ²
	Außenwand- fläche	2.570 m ²	Außenwand- fläche	1.090 m ²	Außenwand- fläche	1.240 m ²
Kompaktheit	A/V	0,33	A/V	0,38	A/V	0,42
Fensterflächen- anteil	19 % N 04 % W 04 % O S 20 %		13 % N 09 % W 09 % O S 18 %		25 % N 25 % W 25 % O S 25 %	
Nutzung	Verwaltung mit Serverraum		Verwaltung		Mischnutzung	
	Büro	48 %	Büro	60 %	Büro	19 %
	Verkehr	33 %	Verkehr	25 %	Labor	17 %
	Lager	6 %	Lager	5 %	TFF	17 %
	TFF	3 %	Teeküche	4 %	Verkehr	17 %
	NNF	3 %	NNF	3 %	NNF	9 %
	Teeküche	2 %	Lager RLT	2 %	CIP-Raum	8 %
	Hörsaal	1 %	TFF	1 %	Hörsaal	7 %
	CIP-Raum	1 %			Lager	7 %
	Server	1 %				
Realer Verbrauch	Wärme	315 MWh	Wärme	103 MWh	Wärme	- MWh
	Kälte	in Strom	Kälte	0 MWh	Kälte	- MWh
	Strom	500 MWh	Strom	33 MWh	Strom	- MWh
	 Gebäude	 Nachbargebäude				

bäude und gleicht dem Gebäude aus dem Korrekturverfahren in Kapitel 5.3.1. Case-Study 3 weist dafür eine heterogene Nutzungsverteilung auf, die keine gleichen Nutzungen aneinander angrenzen lässt. Die Verteilung der Nutzungen weist deutlich höhere Flächenanteile von energieintensiveren Nutzungen wie Hörsäle, Computerräume (CIP-Raum: Computer Information Pool) oder Labore auf. Dem gegenüber erfolgt die Auswahl von Case-Study 1 und 2 aufgrund von nicht energieintensiven Nutzungen, die stärker von Umweltfaktoren beeinflusst werden. Dies ist z.B. der Fall bei büroähnlichen Nutzungen oder Lagernutzungen, wie sie in typischen Gebäuden der Verwaltung vorkommen. Case-Study 1 besitzt einen gekühlten Serverraum mit ca. 40 kW installierter elektrischer Anschlussleistung als Datenknotenpunkt der untersuchten Universität. Dieser ist insbesondere bei einem gebäudeübergreifenden Benchmarking zu beachten, denn der damit einhergehende hohe spezifische Strombedarf kann zu einer falschen Interpretation der Ergebnisse führen. Es zeigt sich, dass eine Bewertung wie die RRM ihre Berechtigung besitzt, wenn Nutzungen stärker im Vordergrund stehen.

7.2 Vergleich und Bewertung der Berechnungsergebnisse

7.2.1 Heizenergiebedarf

Angemessene Genauigkeit der RRM in den berechneten Ergebnissen und in der Abbildung des energetischen Verhaltens

Die RRM ist in der Lage den Heizenergiebedarf des Gebäudemodells abzubilden. Zur Beurteilung der Ergebnisqualität wird der berechnete Heizenergiebedarf aus der RRM mit dem Gebäudemodell als Referenz verglichen. Bereits ohne Korrekturverfahren erreicht die RRM fast den Referenzwert des Gebäudemodells. Die RRM berechnet dabei über alle Case-Studies hinweg einen niedrigeren Heizenergiebedarf. Das auf dem A/V-Verhältnis basierende Korrekturverfahren reduziert die absolute Abweichung, wobei es die Abweichungen, die auf das fehlende Gebäudegeometriemodell zurückzuführen sind, nicht vollständig ausgleichen kann. Wie deutlich die Abweichung der RRM ist, zeigt die mittlere relative Abweichung des Heizenergiebedarfs. Sie bildet sich aus der Differenz beider Mittelwerte und wird ins Verhältnis zum Mittelwert des Gebäudemodells gesetzt. Die mittlere relative Abweichung beträgt nach der Korrektur maximal -13% in Case-Study 2. In den beiden anderen Case-Studies werden deutlich kleinere mittlere relative Abweichungen von weniger als -5% erzielt. Die in Sample 2 reduzierten Bandbreiten der Eingangsparameter besitzen kaum Einfluss auf die Genauigkeit der RRM, denn die mittlere relative Abweichung bleibt annähernd gleich. Die geringen mittleren relativen Abweichungen zeigen, dass die RRM anhand der ausgewählten Untersuchungsparameter und Flächendaten den Heizenergiebedarf in ausreichender Genauigkeit bestimmen kann.

Die Streuung und die Sensitivität der Heizenergie werden in der RRM und im Gebäudemodell gleich abgebildet. Hierbei liegt die Standardabweichung der jeweiligen Case-Study auf fast gleichem Niveau. Wie sensitiv der Heizenergiebedarf auf die Streuung der Eingangsparameter reagiert, wird mit Hilfe des Variationskoeffizienten gezeigt. Der Variationskoeffizient einer Case-Study ist in der RRM und

dem Gebäudereferenzmodell annähernd gleich. Die RRM weist geringfügig höhere Variationskoeffizienten aus und reagiert folglich etwas sensibler gegenüber den Variationen der Eingangsparameter. Dieses Verhalten ist hauptsächlich auf den niedriger berechneten Heizenergiebedarf in der RRM zurückzuführen. Auch die Effekte aus der in Sample 2 veränderten Stichprobe der Eingangsparameter wird in beiden Modellen gleich abgebildet. In Sample 2 sind die Bandbreiten der Eingangsparameter reduziert. In beiden Modellen werden die erwarteten Effekte durch eine kleinere Standardabweichung des Ergebnisses und einem kleineren Variationskoeffizienten korrekt wiedergegeben. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 7.2 mit den jeweiligen Kenngrößen aufgezeigt.

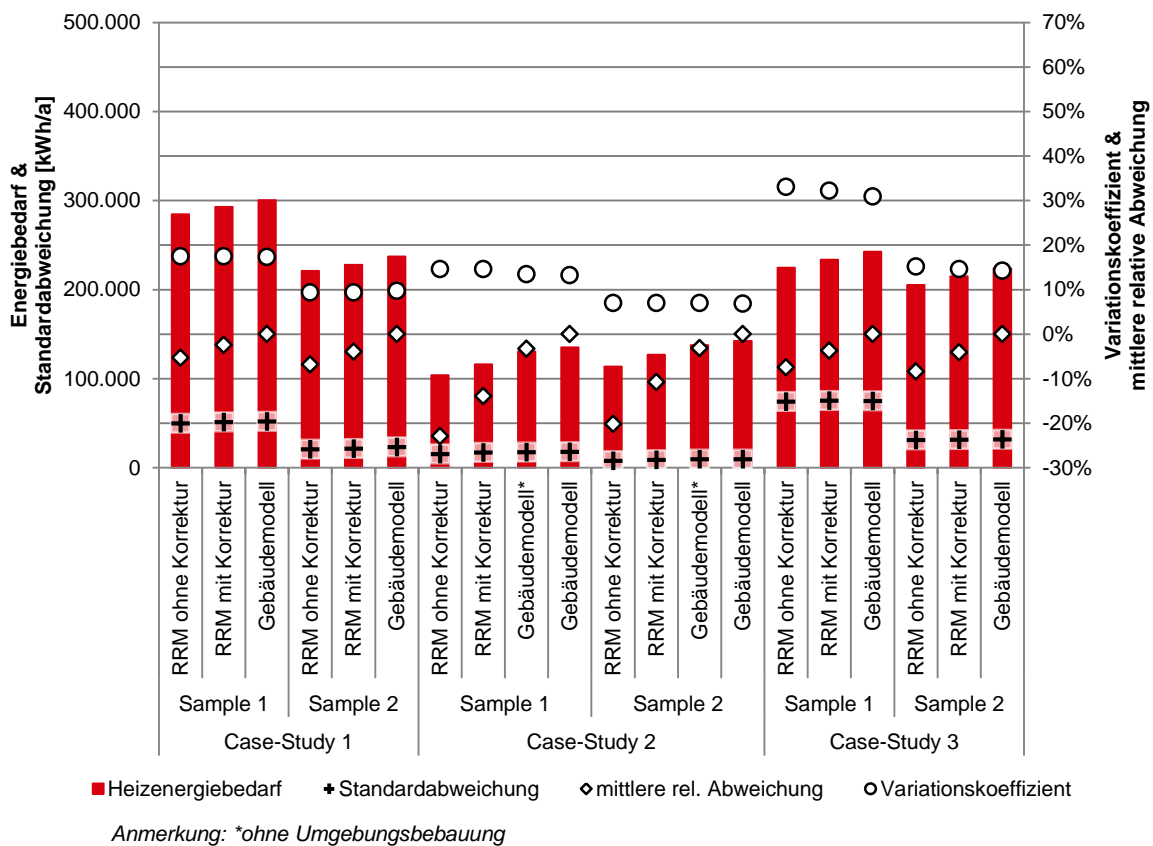


Abbildung 7.2: Vergleich des mittleren Heizenergiebedarfs zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell

Höhere Ergebnisgenauigkeit mit höherer Ähnlichkeit zum Korrekturverfahren

Die mittlere relative Abweichung stellt das Bewertungskriterium für die Berechnungsqualität dar. Sie ist selbst ein Mittelwert aus der in der Monte Carlo Simulation erzeugten Verteilung der relativen Abweichungen einer Case-Study. Das angewendete Verfahren ermöglicht gemeinsam mit der mittleren relativen Abweichung übergeordnete Aussagen zu treffen, eine globale Optimierung durchzuführen und eine zufällige Parameterkombination mit minimaler Abweichung als einzige Parameterkombination auszuschließen. Wie präzise die RRM den Heizenergiebedarf abbilden kann, wie groß die

Bandbreite der Streuung und deren Verteilung ist, werden anhand der Histogramme in Abbildung 7.3 erläutert.

Zuerst wird auf die beiden Case-Studies 1 und 2 eingegangen. Beide Gebäude gelten wegen ihrem hohen Anteil an Büronutzungen als Verwaltungsgebäude. Für büroähnliche Nutzungen reagiert der Heizenergiebedarf stärker sensitiv gegenüber den Energietransportprozessen über die Fassade als es z.B. bei Labornutzungen der Fall ist (vgl. Unterabschnitt 6.2.2). Dies zeigt sich an den größeren Bandbreiten der relativen Abweichungen in den Case-Studies 1 und 2 gegenüber Case-Study 3.

Case-Study 1 ähnelt in seinen Randbedingungen den Randbedingungen des Gebäudemodells im Korrekturverfahren hinsichtlich dem Gebäudegeometriemodell und der fehlenden Verschattung durch die umliegenden Gebäude. Als Mittelteil eines Gebäuderiegels sind die Wände nach Osten und Westen thermisch isoliert. Dieser Umstand wirkt sich positiv auf die Berechnung aus, denn thermisch isolierte Zonen sind der Referenzzone deutlich ähnlicher (vgl. Abbildung 5.13 S. 81). Folglich ist die mittlere relative Abweichung und deren eigene Streubreite kleiner. Weiterhin treten in der RRM gegenüber dem Referenzgebäudemodell negative und positive Abweichungen auf. Darüber hinaus befinden sich mehr als 100 Stichproben (> 25%) des Samples in der Gruppe mit der mittleren relativen Abweichung von 0%. Bei diesen Stichproben ist die Abbildung des Energiebedarfs somit identisch.

Das Gebäude in Case-Study 2 ist freistehend und wurde, um die Effekte der Verschattung zu bewerten, jeweils mit und ohne Umgebungsbebauung modelliert. Die Gebäudegeometrie weicht stärker von der Geometrie des Referenzgebäudes im Korrekturverfahren ab. Insbesondere das Verhältnis von Länge zu Breite ist deutlich verschieden, so dass der Anteil von Zonen mit stärkerer Sensitivität gegenüber Umwelteinwirkungen viel größer ist. Dies führt zu einer größeren mittleren relativen Abweichung und einer breiteren Streuung der Werte. Um den Modelleigenschaften der RRM ähnlicher zu werden, blieben in einer Versuchsreihe die Verschattungseffekte unberücksichtigt. Als Ergebnis ist die mittlere relative Abweichung geringer und deren Streubreite nimmt geringfügig ab. Folglich ist die RRM umso genauer, desto stärker das zu untersuchende Gebäude dem Gebäude im Korrekturverfahren gleicht.

Dies bestätigen die Ergebnisse der Case-Study 3, deren Gebäudemodell identisch mit dem Modell des Korrekturverfahrens ist. Klar erkennbar ist, dass Werte mit einer mittleren relativen Abweichung in der Gruppe -3% am häufigsten auftreten. Die Verteilung der relativen Abweichung ist sichtlich enger. Ein weiterer Grund dafür sind Nutzungen, die weniger sensitiv auf Umwelteinflüsse reagieren. Dies gilt z.B. für Hörsaal- und Labornutzungen. Bis auf wenige Ausreißer befinden sich mehr als 85% aller Werte in den Gruppen von -5 bis 0% relativer Abweichung.

Im Sample 2 bewirken die kleineren Bandbreiten in den Eingangsparametern nur eine geringe Veränderung der mittleren relativen Abweichung. Eine Veränderung in den Bandbreiten der Eingangsparameter wirkt sich folglich nur geringfügig auf die Genauigkeit der Berechnung aus. Jedoch werden die Streubreiten der relativen Abweichung kleiner und die resultierende mittlere relative Abweichung viel leichter erkennbar.

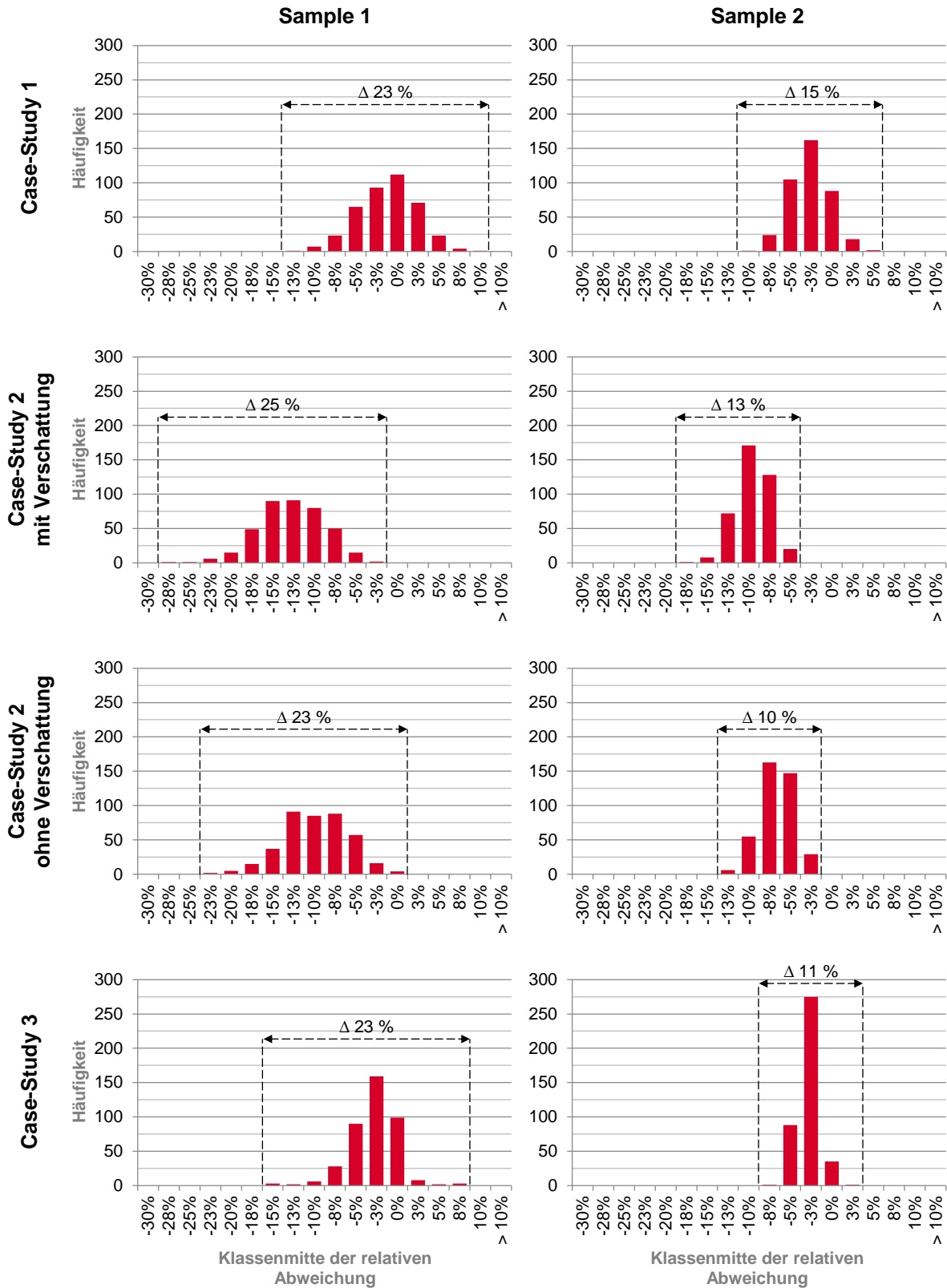


Abbildung 7.3: Häufigkeiten der relativen Abweichungen des Heizenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell

Gleiche Abbildung des energetischen Verhaltens im Heizenergiebedarf

Neben der Genauigkeit der Berechnung ist die Abbildung des Energieverhaltens ebenso relevant. Das bedeutet, dass die RRM in der Lage sein muss, die durch Veränderungen der Parameter unterschiedlichen Energiebedarfswerte in gleicher Art und Weise wiederzugeben. Hierzu werden zuerst die Ergebnisse aus der Berechnung der RRM und des Gebäudemodells mit Hilfe einer Regression in Abbildung 7.4 gegenübergestellt. Die RRM würde das Verhalten des Gebäudes perfekt abbilden, wenn Regressionskoeffizient b_1 und Bestimmtheitsmaß R^2 gleich 1 sind. Der Regressionskoeffizient b_1 gibt dabei an, ob die RRM im Vergleich zum Gebäudemodell den Heizenergiebedarf über- ($b_1 > 1$) oder unterbewertet ($b_1 < 1$). Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt dabei an, ob die im Gebäudemodell enthaltene Streuung durch die RRM vollständig ($R^2 = 1$) beschrieben werden kann.

In allen Case-Studies bewertet die RRM gegenüber dem Gebäudemodell den Heizenergiebedarf niedriger; alle Regressionskoeffizienten b_1 sind < 1 . Ein höherer Heizenergiebedarf im Gebäudemodell führt ebenfalls zu einem höheren Bedarf in der RRM. Da die RRM gegenüber dem Gebäudemodell Abweichungen aufweist, ist das Bestimmtheitsmaß R^2 stets < 1 . Dies bedeutet, dass die RRM nicht alle im Gebäudemodell vorkommende Effekte genau gleich abbilden kann und damit Ungenauigkeiten entstehen. Es zeigt sich weiter, dass die Ergebnisqualität mit der Ähnlichkeit zum Gebäudemodell des Korrekturverfahrens ansteigt (Ähnlichkeit: Case-Study 2 $<$ Case-Study 1 $<$ Case-Study 3 = Korrekturverfahren). Die Regressionskoeffizienten b_1 und die Werte für das Bestimmtheitsmaß R^2 nähern sich dem Wert 1 an. Dagegen haben Änderungen in den Bandbreiten der Eingangsparameter in Sample 2 keinen ersichtlichen Einfluss auf die Ergebnisqualität, der Regressionskoeffizient b_1 und das Bestimmtheitsmaß R^2 einer Case-Study bleiben annähernd gleich. Die RRM besitzt für den Heizenergiebedarf ein präzises Abbildungsverhalten des Gebäudemodells. Diese Eigenschaft wird von den sehr hohen Korrelationskoeffizienten ($>0,94$) nach Pearson bzw. Spearman in Tabelle 7.2 bestätigt.

Tabelle 7.2: Heizenergiebedarf: Korrelationskoeffizienten zwischen RRM und Gebäudemodell nach Pearson bzw. Spearman

Versuch	Heizenergiebedarf	
	Pearson	Spearman
Case-Study 1 - Sample 1	0,979	0,978
Case-Study 1 - Sample 2	0,970	0,966
Case-Study 2 - Sample 1	0,950	0,942
Case-Study 2 - Sample 2	0,946	0,941
Case-Study 2 - Sample 1*	0,953	0,946
Case-Study 2 - Sample 2*	0,950	0,945
Case-Study 3 - Sample 1	0,998	0,996
Case-Study 3 - Sample 2	0,997	0,996

*ohne Fremdverschattung

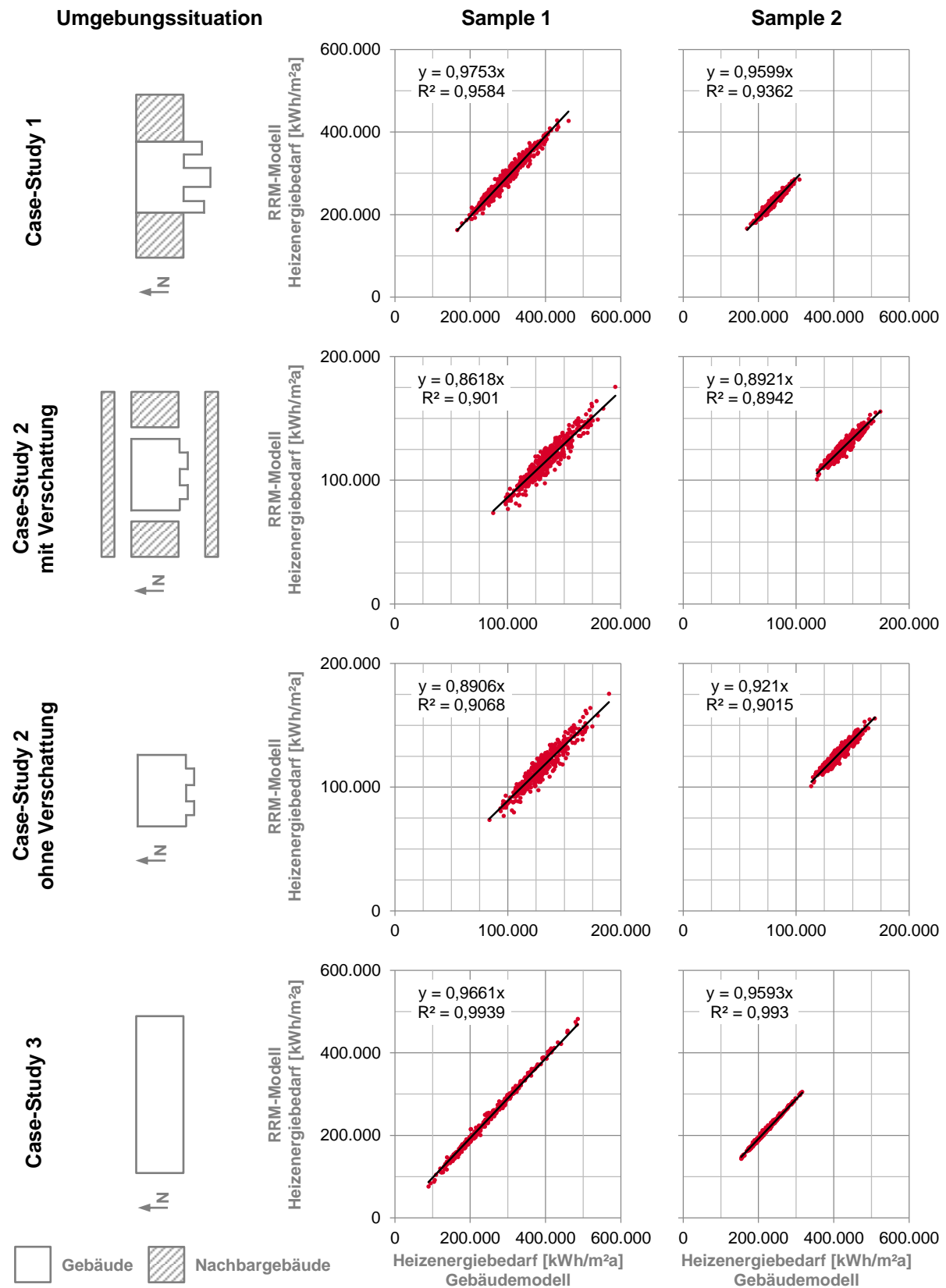


Abbildung 7.4: Verhalten des Heizenergiebedarfs in Abhängigkeit von der Umgebungssituation

7.2.2 Kühlenergiebedarf

Schätzung des Kühlenergiebedarfs mit ausreichender Genauigkeit

Für eine Schätzung des Kühlenergiebedarfs liefert die RRM ausreichend genaue Ergebnisse. Es zeigt sich, dass je größer der Kühlenergiebedarf ist, desto genauer wird dessen Vorhersage. Unter größer ist hierbei nicht direkt der absolute Kühlbedarf des gesamten Gebäudes zu verstehen, sondern vielmehr der mittlere Kühlenergiebedarf, der in einer Zone abgeführt werden muss. Weiter ist die Ursache des Kühlenergiebedarfs substanziell. Kommen Kühllasten durch einen solaren Eintrag in der Zone zustande, sind sie in den betrachteten Case-Studies in Relation zur Fläche meist gering und führen in der RRM zu größeren Abweichungen. Sind interne Lasten und die Zuluftkonditionierung die Ursachen für den Kühlenergiebedarf, dann ist die Ermittlung genauer. Hauptgrund ist hierfür, dass der Beitrag durch externe solare Erträge bedeutungsloser wird und folglich auch das fehlende detaillierte Gebäudegeometriemodell in der Kühlenergiebilanz keine entscheidende Auswirkung besitzt.

Case-Study 1 und 3 sind die Versuchsreihen mit Kühlenergiebedarf, die anhand Abbildung 7.5 näher untersucht werden. Case-Study 1 besitzt einen Server-Raum im Kellergeschoss des Gebäudemodells. Die spezifischen internen Lasten sind mit 40 kW sehr hoch. Das Raummodell in der RRM ist im Vergleich zum Gebäudemodell als oberirdischer Raum mit einer Außenwand und dem

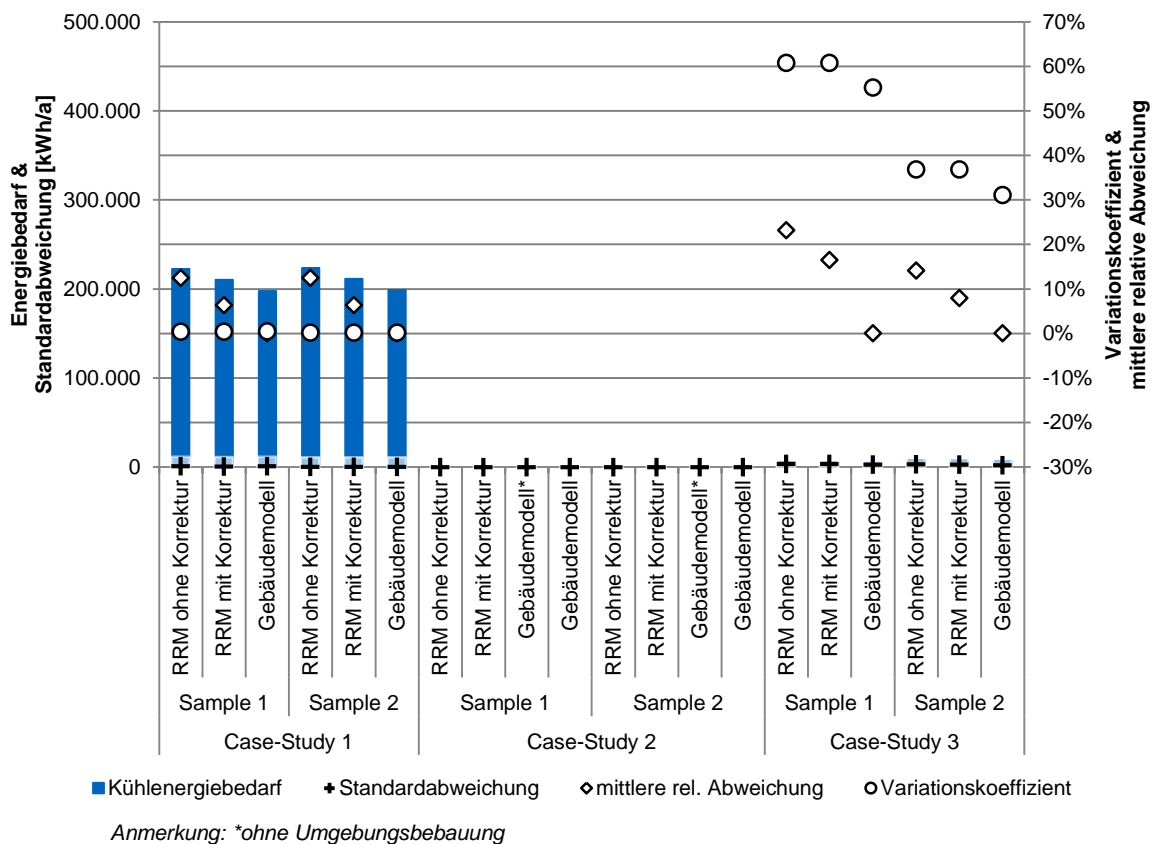


Abbildung 7.5: Vergleich des mittleren Kühlenergiebedarfs zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell

gebäudespezifischen Fensterflächenanteil modelliert. Dieser Umstand wirkt sich auf die Transmissionsverluste und solaren Erträge der Zone aus. Das Resultat sind höhere thermische Lasten und einhergehend ein höherer Kühlbedarf. Die RRM ermittelt einen größeren Kühlenergiebedarf und die mittlere relative Abweichung liegt nach Anwendung des Korrekturverfahrens bei ca. +8%. Die Standardabweichungen liegen auf gleichem Niveau und sind im Verhältnis zum mittleren Kühlbedarf sehr klein. Damit führen die hohen, fest eingestellten internen Lasten dazu, dass der Kühlenergiebedarf gegenüber den Parametervariationen nicht sensitiv reagiert. Der Variationskoeffizient liegt nahe bei 0%. Die Parametrierung in Case-Study 3 wurde so vorgenommen, dass ein Kühlenergiebedarf (\varnothing 6.600 kWh; \varnothing 19 kWh/m²a) für die Konditionierung der Laborflächen entsteht. Ein merklicher Einfluss des solaren Eintrags auf den Kühlenergiebedarf ist hier zu erwarten. Der Kühlenergiebedarfswert der RRM weist ohne Korrekturverfahren eine mittlere relative Abweichung von mehr als +13% aus. Das A/V-Korrekturverfahren reduziert die relative mittlere Abweichung um ca. 6%. Wegen den hohen Variationskoeffizienten in Sample 1 (>50%) und Sample 2 (>30%) ist für alle Modelle der Kühlenergiebedarf gegenüber den gestreuten Eingangsparametern als sehr sensitiv einzustufen. Die RRM reagiert dabei infolge der höheren Variationskoeffizienten stärker als das Gebäudemodell. Die Verkleinerung der Bandbreiten in Sample 2 verursacht einen höheren Kühlenergiebedarf und lässt die Genauigkeit der RRM ansteigen. Die Genauigkeit der RRM profitiert folglich von Kühllasten, die weniger von Umwelteinflüssen verursacht werden. Weiter führen Stichproben mit kleineren Bandbreiten der Eingangsparameter zu einer Reduktion der mittleren relativen Abweichung. Denn sie verstetigen die Kühllast und erhöhen den mittleren Kühlenergiebedarf.

Höhere Ergebnisgenauigkeit mit höheren internen Lasten und kleineren Bandbreiten der Untersuchungsparameter

Neben der mittleren relativen Abweichung ist auch die Verteilung der relativen Abweichungen innerhalb einer Case-Study interessant und soll anhand Abbildung 7.6 beschrieben werden. Die RRM erreicht bei kleineren Bandbreiten der Eingangsparameter und höheren internen Lasten eine höhere Genauigkeit in der Berechnung im Bezug zum Gebäudemodell.

Zuerst wird Case-Study 1 mit den hohen internen Lasten des Servers betrachtet. Auffällig ist, dass die relative Abweichung konstant in die Gruppe +7% zugewiesen wird und andere bedeutsame Abweichungen nicht vorkommen. Folglich besitzt die Variation der Eingangsparameter keinen Einfluss auf die Abweichung. Diese entsteht somit in den unterschiedlich bewerteten Energietransportprozessen der Wände und Fenster in der Kühlenergiebilanz. Die definierten internen Lasten können die Beiträge und Effekte von Transmission und Strahlung deutlich überlagern. Ein gänzlich anderes Bild zeigt sich für Case-Study 3 mit niedrigeren Kühllasten in den Labornutzungen. Solange die gesamte Kühllast klein und der Anteil des solaren Ertrags an der Kühllast verhältnismäßig groß ist, solange kann die RRM den Kühlenergiebedarf nur ungenau bestimmen. Dies zeigt sich am Sample 1 zum einen an der sehr breiten Streuung der relativen Abweichung (-20 bis +70%) und zum anderen an der hohen Anzahl sehr großer relativer Abweichungen (\pm 35%). Erst durch die Reduktion der Bandbreiten in Sample 2 und der damit einhergehenden Verstetigung der internen Lasten, werden die Streubreiten der relativen Abweichung sichtlich kleiner und die mittlere relative Abweichung nimmt bei höheren

Kühllasten ab. Die Bandbreite der relativen Abweichung verkleinert sich auf den Bereich von -5 bis +45%. Weiter nimmt die Anzahl von deutlich größeren Abweichungen im Sample 2 (ab $\pm 35\%$) sichtlich ab.

Gleiche Abbildung des energetischen Verhaltens im Kühlenergiebedarf

Wie passend die RRM das Verhalten im Kühlenergiebedarf abbilden kann, wird zuerst mit Hilfe eines Regressionsmodells in Abbildung 7.7 aufgezeigt. Ein ideales Verhalten liegt vor, wenn Regressionskoeffizient b_1 und Bestimmtheitsmaß R^2 jeweils den Wert 1 einnehmen. In beiden Case-Studies bildet die RRM einen ansteigenden oder abfallenden Kühlenergiebedarf des Gebäudemodells ausreichend genau nach.

In Case-Study 1 verursachen die beiden Samples eine im Verhältnis zum Gesamtwert nur kleine Streuung. Der geringe Einfluss der gestreuten Eingangparameter auf den Kühlenergiebedarf ist daraus schwieriger abzuleiten, so dass das Bestimmtheitsmaß R^2 in beiden Samples deutlich kleiner 0,9 ist. Einflüsse der Eingangparameter werden somit in der RRM gegenüber dem Gebäudemodell teilweise deutlich anders bewertet. Eine Ursache ist der bereits erwähnte Unterschied in der Lage und damit auch der Modellierung des Referenzraums. Die unterschiedliche Bewertung von Effekten ist infolge der im Verhältnis zum gesamten Kühlenergiebedarf sehr kleinen Streuungen belanglos. Die RRM bewertet den Kühlenergiebedarf in der Case-Study 1 über. Der Regressionskoeffizient b_1 ist jeweils mit ca. 1,06 größer 1. Das Abbildungsverhalten der RRM in Case-Study 3 ist mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von jeweils $> 0,9$ genauer. Auch für Case-Study 3 besitzt die RRM mit den Regressionskoeffizienten b_1 von 1,18 bzw. 1,09 eine Überbewertung des Kühlenergiebedarfs. Weiter scheint die Bandbreite der Eingangparameter die Überbewertung durch die RRM zu beeinflussen. Sample 2 bildet eine kleinere Streuung der Eingangparameter ab und der Regressionskoeffizient b_1 ist gegenüber Sample 1 sichtlich kleiner.

Die hohen Korrelationskoeffizienten nach Pearson bzw. Spearman in Tabelle 7.3 weisen für die RRM einen sehr starken linearen Zusammenhang in der Abbildung des Kühlenergieverhaltens des Gebäudemodells nach. Die RRM ist folglich in der Lage den Kühlenergiebedarf des Gebäudemodells angemessen abzubilden.

Tabelle 7.3: Kühlenergiebedarf: Korrelationskoeffizienten zwischen RRM und Gebäudemodell nach Pearson bzw. Spearman

Versuch	Kühlenergiebedarf	
	Pearson	Spearman
Case-Study 1 - Sample 1	0,933	0,935
Case-Study 1 - Sample 2	0,863	0,861
Case-Study 2 - Sample 1	-	-
Case-Study 2 - Sample 2	-	-
Case-Study 2 - Sample 1*	-	-
Case-Study 2 - Sample 2*	-	-
Case-Study 3 - Sample 1	0,960	0,966
Case-Study 3 - Sample 2	0,956	0,972

*ohne Fremdverschattung

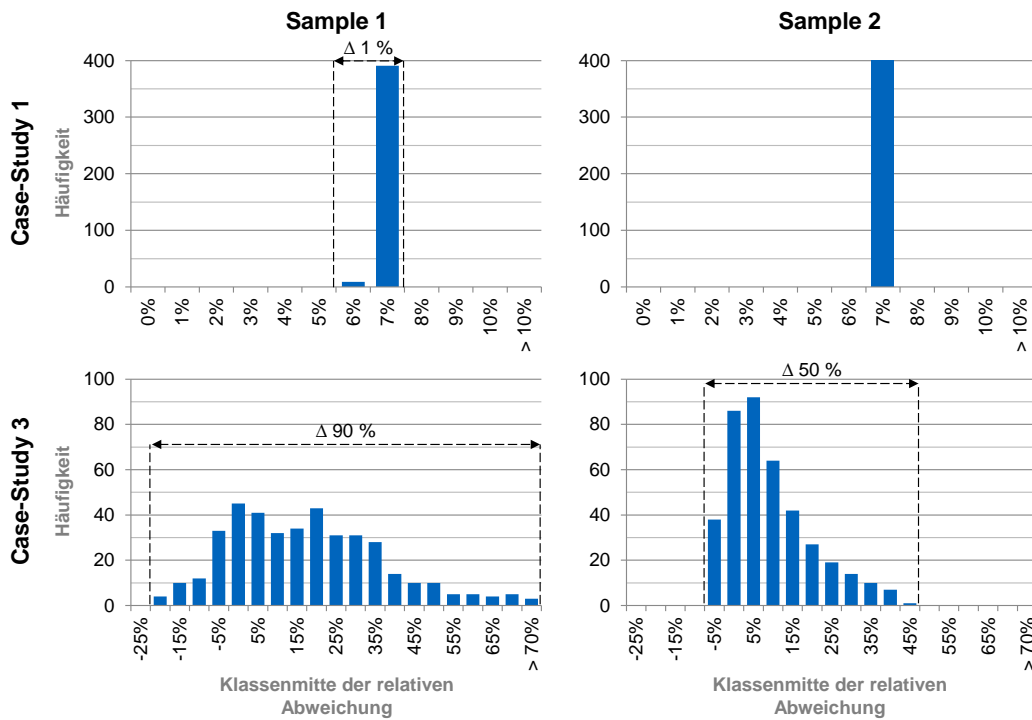


Abbildung 7.6: Häufigkeiten der relativen Abweichungen des Kühlenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell

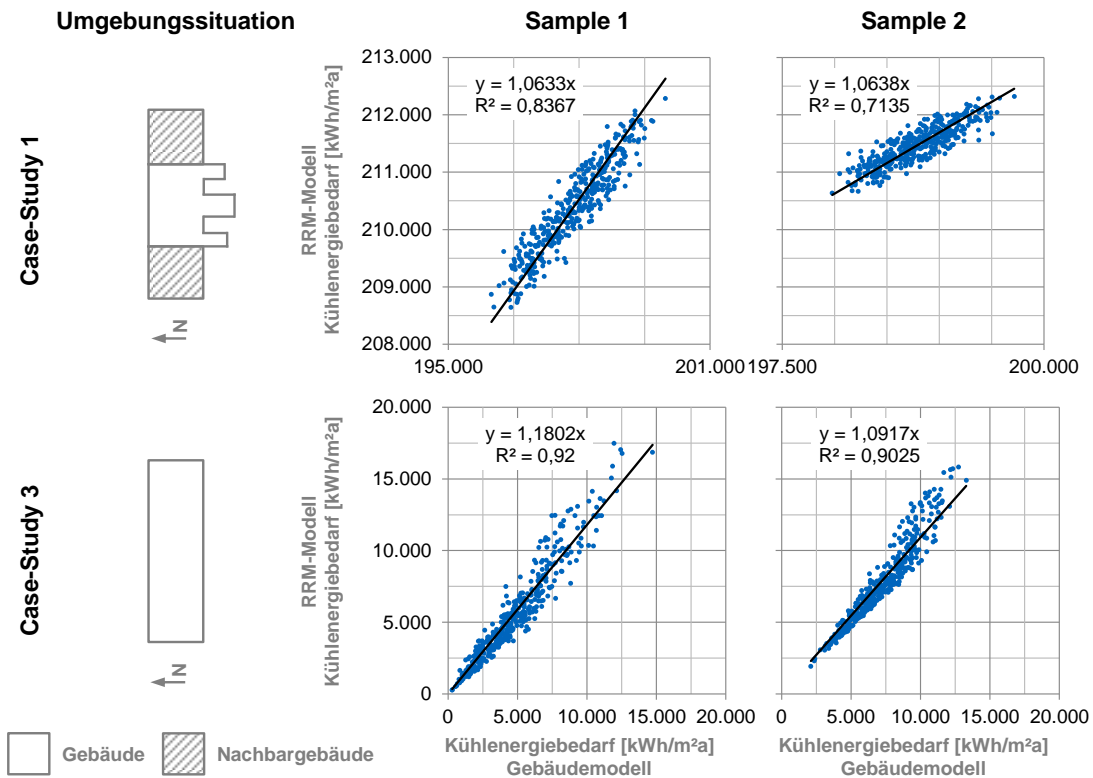


Abbildung 7.7: Verhalten des Kühlenergiebedarfs in Abhängigkeit von der Umgebungssituation

7.2.3 Elektrischer Bedarf für Geräte und Beleuchtung

Die Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs ist notwendig, um zum einen interne elektrische Lasten an einen realen Verbrauch anzupassen und zum anderen eine sinnvolle Aufteilung der Verbraucher für eine Bewertung vornehmen zu können. Zu Beginn soll auf einen wesentlichen Unterschied zwischen den Modellen zur Berechnung des Strombedarfs und der zur Konditionierung der Zonen notwendigen thermischen Energie (Heizen, Kühlen) hingewiesen werden. Die Bestimmung der thermischen Energie erfolgt auf Basis von physikalischen Gesetzmäßigkeiten oder Transfergleichungen und beinhaltet ebenfalls zeitabhängige Belade- und Entladeprozesse. Daraus resultieren Zusammenhänge, die nicht vollständig linear abbildbar sind. Abweichungen in den linearen Regressionsmodellen, wie sie in der RRM eingesetzt werden, sind die Folge. Dagegen ist das Modell für den Strombedarf vollständig deterministisch und kontrollierbar, d.h. die vom Nutzer festgesetzten Randbedingungen, wie z.B. Betriebszeiten oder spezifische Lastdaten, können eindeutig in einen Strombedarf umgewandelt werden, der sehr genau in einem linearen Regressionsmodell nachgebildet werden kann. Somit ermittelt die RRM den Strombedarf der elektrischen Geräte und der Beleuchtung gleich. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.8 und C.5 (Anhang S.222) zusammengefasst. Sind weitere elektrische Verbraucher in der Energiebilanz notwendig und über deterministische Modelle abbildbar, so sollten sich auf deren Energieverhalten diese Eigenschaften übertragen lassen.

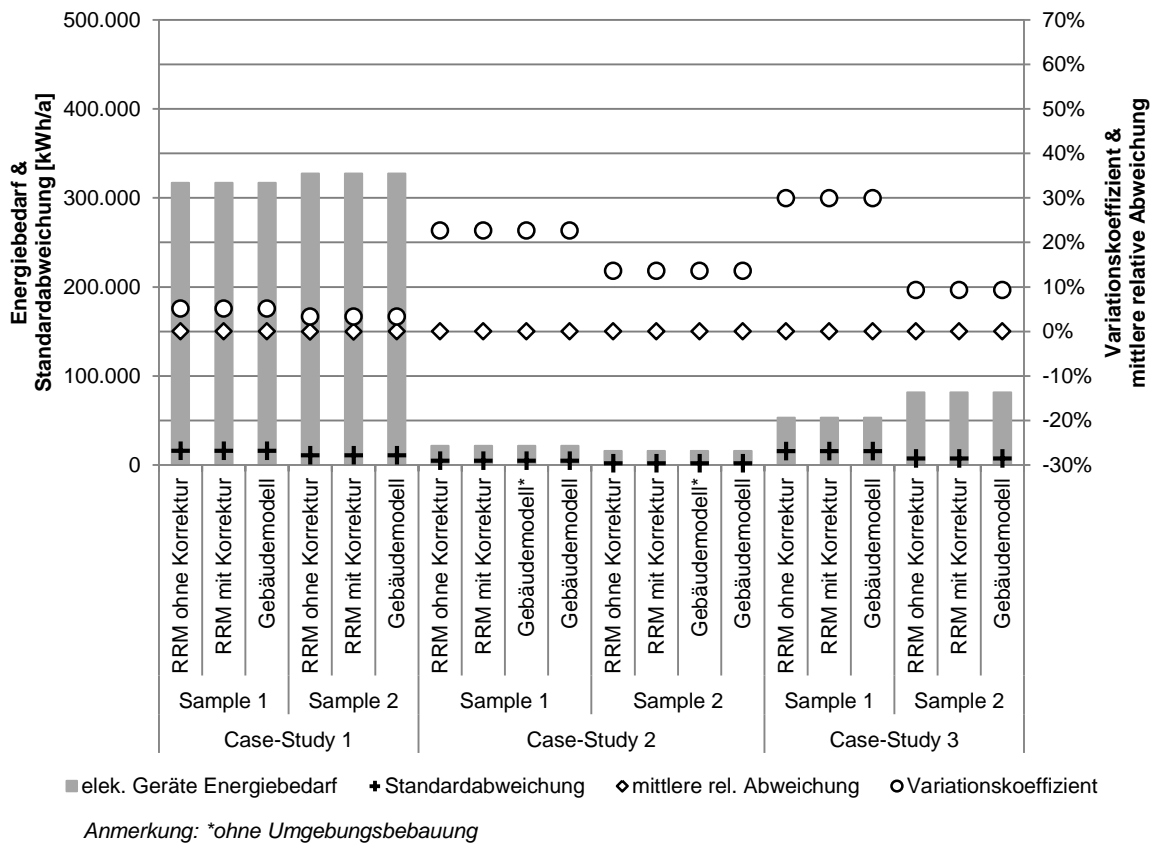


Abbildung 7.8: Vergleich des mittleren Energiebedarfs für elektrische Geräte zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell

7.2.4 Gesamtenergiebedarf

Die Bewertung der Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes ist immer dann notwendig zu betrachten, wenn Maßnahmen getroffen werden, die mehrere Energiesysteme betreffen. Für die Case-Studies wurden alle Energiegrößen gleichwertig mit dem Faktor 1 zusammengefasst. Dies bedeutet weiter, dass sich positive und negative Abweichungen ohne eine Gewichtung ausgleichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.9 dargestellt.

Die absoluten Energiebedarfsmengen der RRM und des Gebäudemodells unterscheiden sich kaum voneinander. Die Streuung wird mit einer annähernd gleichen Standardabweichung identisch abgebildet. Die mittlere relative Abweichung beträgt maximal $\pm 11\%$. Dessen Reduktion ist einerseits auf den Ausgleich der Abweichungen der Heiz- und Kühlenergie und andererseits auf die deutlich größere Bezugsenergiemenge zurückzuführen. In dieser ist der in RRM und Gebäudemodell identisch berechnete Strombedarf enthalten und führt eher zu einer scheinbaren Verbesserung des Ergebnisses. Die Variationskoeffizienten der RRM gleichen den Koeffizienten des Gebäudemodells. Die Gesamtenergie weist daher gegenüber den gestreuten Eingangsparametern die gleiche Sensitivität in RRM und Gebäudemodell auf.

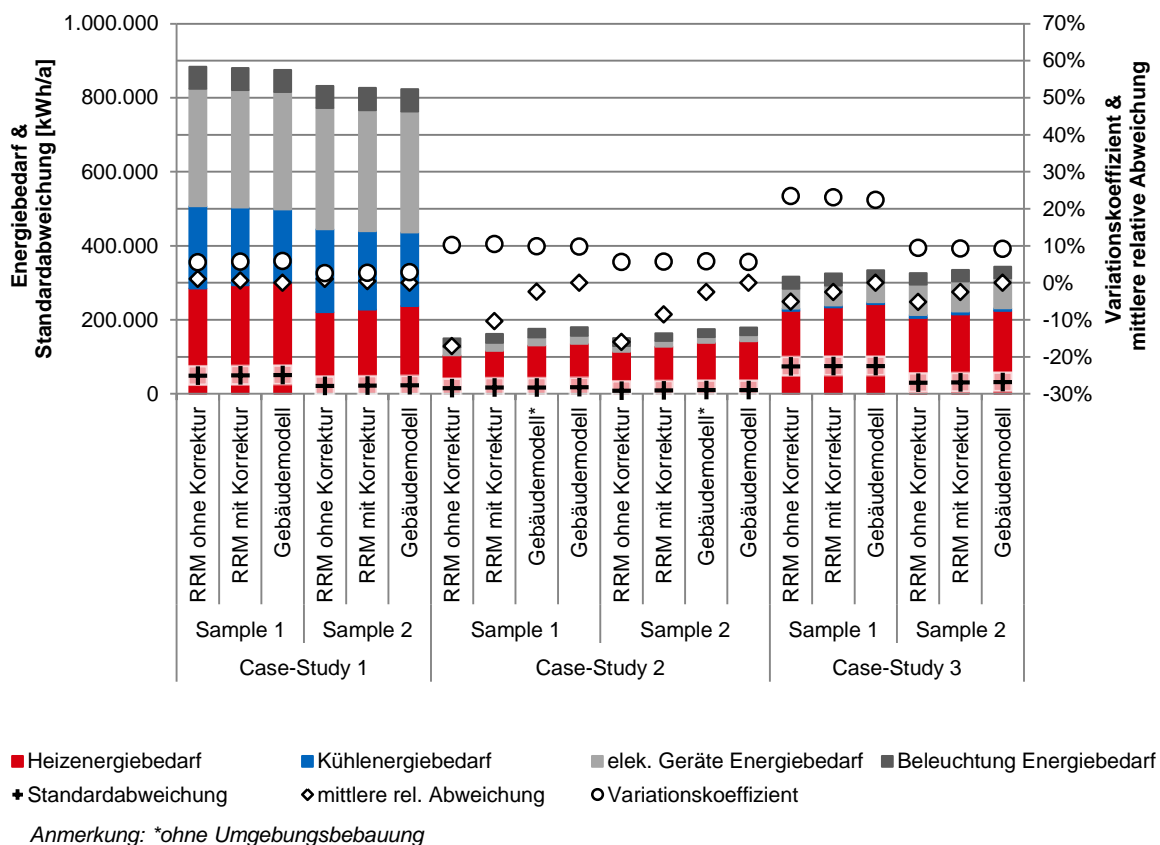


Abbildung 7.9: Vergleich der Mittelwerte der Gesamtenergie zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell

7.3 Vergleich und Bewertung der Sensitivitätsindizes

7.3.1 Qualitative Sensitivitätsindizes - standardisierte Regressionskoeffizienten

Für die Bewertung eines Gebäudes ist neben dem Energiebedarf auch die richtige Abbildung des Energieverhaltens entscheidend. Das Verhalten zeigt sich u.a. in der Streuung bzw. der Varianz um den Mittelwert. Parameter beeinflussen die Varianz unterschiedlich stark. Die richtige Identifikation der Parameter ist somit für eine Bewertung von Interesse. Entscheidend ist dabei, die relevanten Parameter und deren Einfluss auf das Ergebnis zu erkennen. Dies kann mit Hilfe von Sensitivitätsindizes erfolgen. In dieser Arbeit beruht die Herleitung der Indizes auf der Varianz. Sie sollte daher zwischen Gebäudemodell und RRM als gleich angenommen werden können. Für die Case-Studies können im Fall der Heizenergie diese Anforderungen als erfüllt betrachtet werden, für die Kühlenergie nur teilweise (vgl. Tabelle 7.4). Weiterführende Ergebnisse befinden sich im Anhang C.4 ab Seite 217.

Tabelle 7.4: Zusammenfassung der statistischen Tests über alle Case-Studies

Versuch	Heizenergiebedarf		Kühlenergiebedarf	
	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	$\mu_{\text{Geb}} \neq \mu_{\text{RRM}}$	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	$\mu_{\text{Geb}} \neq \mu_{\text{RRM}}$
Case-Study 1 - Sample 1	nein	ja	nein	ja
Case-Study 1 - Sample 2	nein	ja	nein	ja
Case-Study 2 - Sample 1	nein	ja	-	-
Case-Study 2 - Sample 2	nein	ja	-	-
Case-Study 2 - Sample 1*	nein	ja	-	-
Case-Study 2 - Sample 2*	nein	ja	-	-
Case-Study 3 - Sample 1	nein	ja	ja	ja
Case-Study 3 - Sample 2	nein	ja	ja	ja

*ohne Fremdverschattung

Zuerst wird der standardisierte Regressionskoeffizient bewertet. Der Regressionskoeffizient eines Parameters wird auf Basis des Verhältnisses von eigener Varianz zur Varianz des Ergebnisses normalisiert und ist mit den Koeffizienten der anderen Modellparameter vergleichbar. Dies erlaubt, die Parameter in eine qualitative Ordnung entsprechend ihrer Wichtigkeit zu überführen. Die Gegenüberstellung der Indizes zwischen RRM und Gebäudemodell erfolgt in Abbildung 7.10.

Für die Heizenergie weist die RRM die gleichen Parameter und diese in ähnlicher Stärke wie das Gebäudemodell aus. Es erfolgt sowohl eine Über- als auch eine Unterbewertung einzelner Parameter. Die relative Abweichung in der Gewichtung der Parameter nimmt mit steigendem Einfluss eines Parameters ab. Die Bewertungsdifferenz der RRM liegt dabei überwiegend in dem Bereich $< \pm 30\%$.

Für den Kühlenergiebedarf zeigt sich ein ähnliches Bild. Bis auf wenige Ausnahmen identifizieren beide Modelle die Parameter mit gleicher Wichtigkeit. Jedoch sind hier vereinzelt bei Parametern mit geringem Einfluss deutlich größere Abweichungen bei den Koeffizienten zu erkennen bis hin zu

einer fehlenden Identifikation in der RRM. Letzteres gründet darauf, dass einige Parameter, wie z.B. der Dach- oder Kellerbodenkonstruktion, in der RRM fehlen. Damit verschieben sich die Anteile der anderen Parameter, was zu einer größeren Abweichung führt. Im Falle der Heizenergie besaßen diese Faktoren einen kleineren Anteil und die Verschiebung der Effekte trat nicht deutlich hervor.

Durch die gleiche Abbildung des Strombedarfs treten keine Abweichungen auf. Daher werden alle Parameter in gleicher Art und Weise erkannt und ihre Wichtigkeit gleich eingestuft.

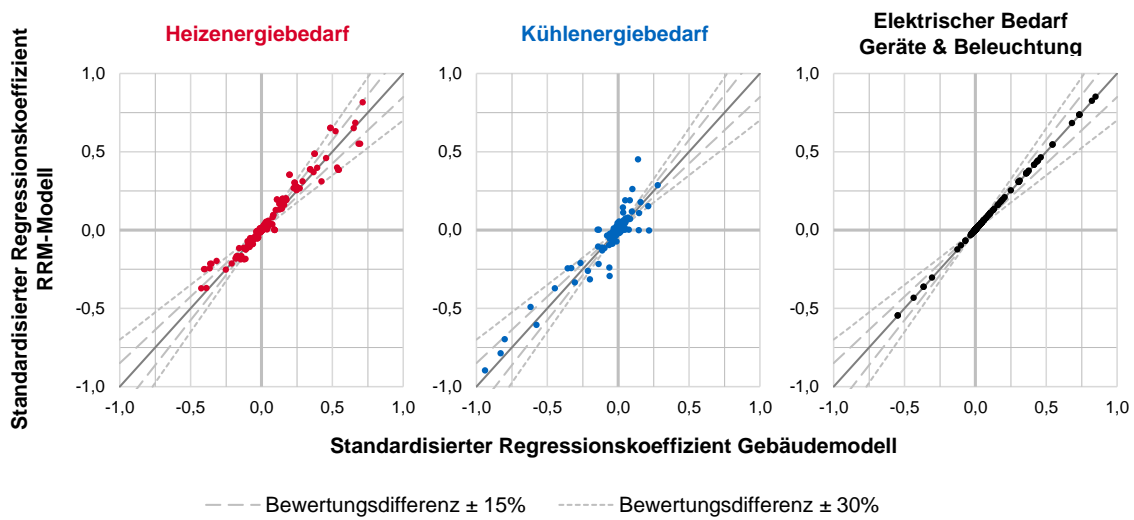


Abbildung 7.10: Vergleich der standardisierten Regressionskoeffizienten zur qualitativen Bewertung der Eingangsparameter aller Case-Studies

7.3.2 Quantitative Sensitivitätsindizes - die Sensitivitätsindizes erster Ordnung

Neben der qualitativen Einstufung eines Faktors, ob er wichtiger oder unwichtiger ist, erweist sich eine quantitative Aussage, wie groß z.B. der Anteil eines Parameters an der Streuung ist, als viel aufschlussreicher. Es kann somit eine direkte Verbindung zwischen der Änderung eines Untersuchungsparameters (z.B. Absenkung der Raumtemperatur um 1 °C) und die energetische Auswirkung (z.B. Heizenergiebedarf -10%) hergestellt werden. Hierbei helfen die quantitativen Sensitivitätsindizes (s. Kapitel 3.5.3 ab S. 46). Dabei erfolgt vorab eine Auswahl der Untersuchungsparameter auf Basis der standardisierten Regressionskoeffizienten. Untersuchungsparameter wurden ausgewählt, wenn ihr standardisierter Regressionskoeffizient einen Wert $<-0,05$ oder $>0,05$ besitzt. Somit sollen auch Parameter berücksichtigt werden, die zumindest gemäß standardisiertem Regressionskoeffizienten noch einen Effekt vermuten lassen. Weiter ist es von Interesse, wie sich bereits die in den standardisierten Regressionskoeffizienten festgestellten Unterschiede auf die Ergebnisqualität der quantitativen Sensitivitätsindizes erster Ordnung auswirken. Die Diskussion erfolgt anhand Abbildung 7.11 für alle Case-Studies mit den Eingangsdaten aus Sample 1 in die Monte Carlo Simulation.

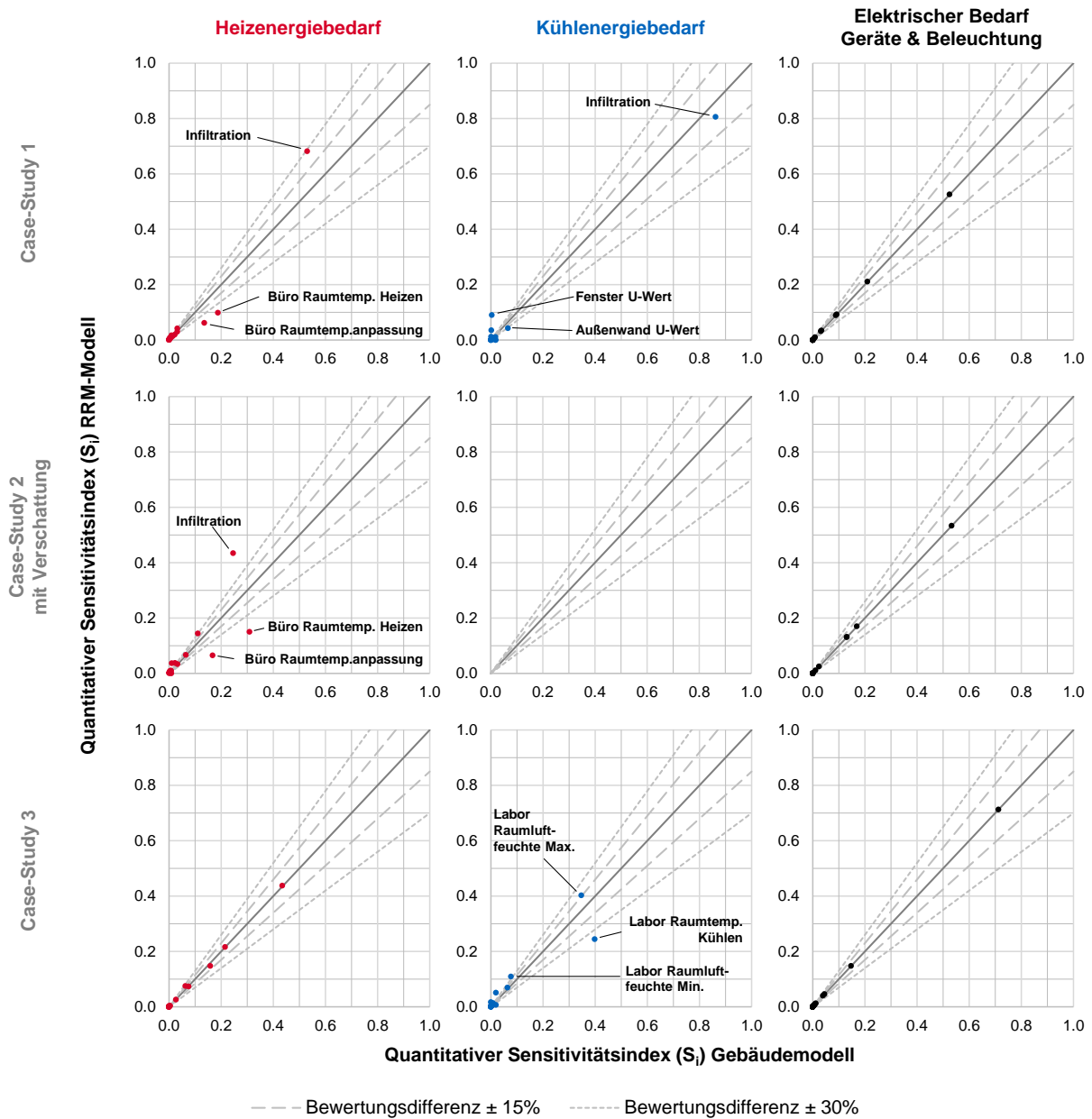


Abbildung 7.11: Vergleich der 1st-Order Sensitivitätsindizes S_i zur quantitativen Bewertung ausgewählter Eingangsparameter aller Case-Studies mit Sample 1

In der Heizenergie kann die RRM mit ausreichender Genauigkeit die gleichen Parameter bestimmen wie das Gebäudemodell. Da in dem angewendeten Verfahren - einfach gesprochen - die Varianz auf die Parameter aufgeteilt wird, zieht eine Überbewertung eines Faktors eine Unterbewertung eines anderen Faktors nach sich. Gleiches gilt für den umgekehrten Fall. Die jeweils fünf ausschlaggebenden Faktoren können sicher bestimmt werden (die Ranglisten befinden sich im Anhang C.7 ab Seite 223). Der Einfluss des Korrekturverfahrens, insbesondere die Ähnlichkeit zum Referenzgebäude, zeigt sich an den Bewertungsdifferenzen. Sie sind um so kleiner, desto ähnlicher das Gebäude dem Referenzgebäude im Korrekturverfahren ist. Somit weist Case-Study 3 die kleinsten und Case-Study 2 die größten Abweichungen auf.

Die Identifikation und Gewichtung der Sensitivitätsindizes des Kühlenergiebedarfs gleicht dem Verhalten der Heizenergie. In Case-Study 1 ist die falsche Indikation zweier Parameter auf den Modellansatz eines im Vergleich zum Gebäudemodell oberirdischen Raumes zurückzuführen. Die Fensterparameter erfahren daher eine falsche Überbewertung.

Die Indizes des Strombedarfs werden infolge fehlender Abweichung in der RRM gleich erkannt und gewichtet. Es treten keine Unterschiede zwischen RRM und Gebäudemodell auf.

Daraus folgt, dass die RRM die Indizes in ansprechender Genauigkeit bestimmen und damit verlässlich die wesentlichen Parameter ermitteln kann. Rein lineare Modelle, wie sie im Modell für elektrische Geräte und Beleuchtung zur Anwendung kamen, können ohne Qualitätsverlust eingesetzt werden. Sind in den Modellen nicht-lineare Zusammenhänge vorhanden (wie es in der Heiz- und Kühlenergie der Fall ist), sind Ungenauigkeiten durch die zu Grunde gelegte Linearisierung im Regressionsmodell zu erwarten. Zur Verbesserung der Ergebnisqualität ist eine Erweiterung bzw. Anpassung des Korrekturverfahrens und/oder die Anwendung anderer Modellansätze zu untersuchen.

7.4 Vergleich und Bewertung der Berechnungszeit

Je kürzer die Ausführungszeit einer Methode ist, desto schneller können Ergebnisse diskutiert und bewertet werden. Im Allgemeinen ist der Zeitaufwand zur Berechnung der Ergebnisse in dynamischen Methoden sehr hoch. Ursache sind die vielen zu lösenden Gleichungen im Modell. Dies führt zum einen dazu, dass in der Praxis dynamische Simulationsverfahren für Gebäude wenn überhaupt nur für Detailuntersuchungen eingesetzt werden. Zum anderen, dass infolge der hohen Berechnungszeiten statistische Methoden wie die Monte Carlo Simulation nur selten angewendet werden, um Eingaben in das Modell zu verifizieren oder deren Auswirkungen auf die Ergebnisse zu bewerten. Gebäudemodelle mit einer hohen Anzahl an einzelnen Zonen benötigen nochmals mehr an Berechnungszeit. Für eine Bewertung von mehreren Gebäuden in einem Portfolio sind die Ausführungszeiten grundlegend zu hoch, um für jedes Gebäude einen individuellen Vergleichswert zu bestimmen. Von Vorteil ist es folglich, wenn zeitnah Rückmeldungen zu den Eingaben erfolgen und Ergebnisse ohne lange Wartezeit diskutiert werden können.

Zum Vergleich sind die Berechnungszeiten der detaillierten Gebäudemodelle und der RRM in Abbildung 7.12 dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die RRM gegenüber dem Gebäudemodell in

allen Case-Studies schneller ist. Die Einsparungen in der Berechnungszeit der RRM liegen mindestens bei über 85%. Auch wenn für das Gebäudemodell die Berechnungszeiten über einen oder zwei Arbeitstage hinaus als akzeptabel erscheinen, kann mit Hilfe der RRM viel häufiger eine Überprüfung der Eingaben und der Ergebnisse erfolgen. Eine Fehlerkorrektur ist somit deutlich einfacher möglich. Findet zusätzlich der Aufwand für die Parametrierung Beachtung, dann wird die RRM gegenüber dem Gebäudemodell wegen der viel einfacheren Definition der Modellgeometrien ein weiteres Mal Zeit einsparen. Der Fokus auf einzelne Referenzräume erlaubt somit in der Gebäudebewertung eine erfolgreiche Integration von statistischen Methoden bei gleichzeitig niedrigen Berechnungszeiten.

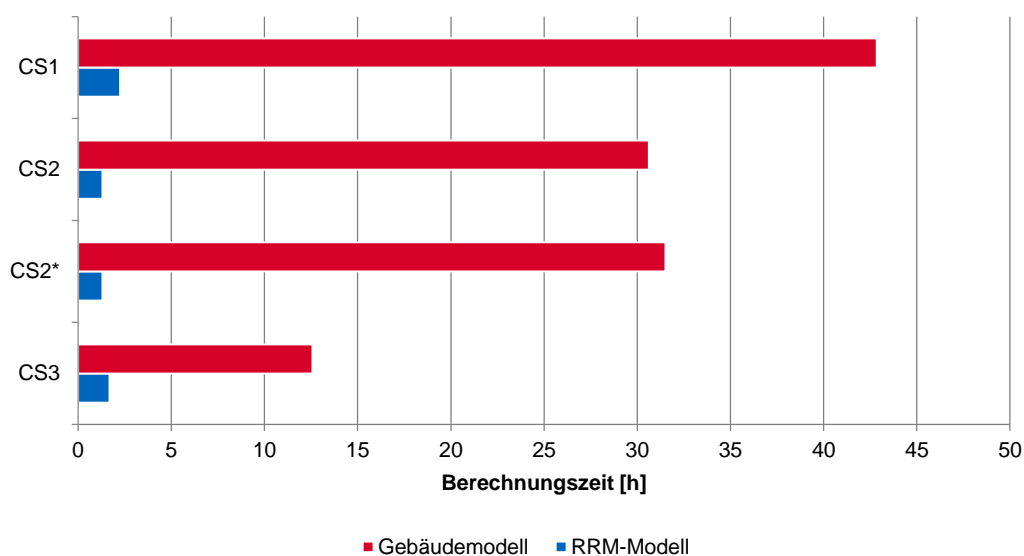


Abbildung 7.12: Vergleich der Berechnungszeit zwischen Gebäudemodell und RRM

7.5 Zusammenfassung

Die Referenzraummethode erlaubt es, den Energiebedarf und sein Verhalten hinreichend genau zu berechnen. Dies gilt für die einzelnen Energiebedarfe sowie für den Gesamtenergiebedarf. Der Energiebedarf für elektrische Geräte und Beleuchtung ist wegen der deterministischen Modelle gleich. Der Heizenergiebedarf wird unter- und der Kühlenergiebedarf überbewertet. Die Abweichungen in den Case-Studies belaufen sich für den Heiz- und den Kühlenergiebedarf auf weniger als $\pm 15\%$. Die hohen Korrelationskoeffizienten nach Pearson bzw. Spearman ($> 0,85$) weisen für die RRM einen sehr starken linearen Zusammenhang nach. Die RRM kann folglich das Verhalten des Energiebedarfs des Gebäudemodells angemessen abbilden.

Die Streuung der Energiemengen kann für die Heizenergie als gleich angenommen werden, in der Kühlenergie gilt dies nur mit Einschränkungen. Andere Bandbreiten der Eingangsparameter verändern die Genauigkeit der RRM nicht. Sind sie kleiner, führen sie zu einer Reduktion der

Streubreiten der relativen Abweichung. Somit ist die Ausbildung der mittleren relativen Abweichung klarer.

Die RRM erkennt auf Basis der qualitativen und quantitativen Sensitivitätsindizes die gleichen Eingangsparameter als ausschlaggebend. Sie bewertet die Eingangsparameter grundsätzlich in ähnlicher Stärke, weist den quantitativen Indizes aber unterschiedliche Anteile zu. Dies führt letztendlich zu gering unterschiedlichen Ranglisten der Eingangsparameter.

Die Berechnungszeiten der RRM sind gegenüber denen der Gebäudemodelle deutlich niedriger. Über alle Case-Studies hinweg kann die RRM eine Zeitersparnis von durchschnittlich mehr als 85% erreichen. Für den Nutzer sind eine schnellere Rückmeldung über die Auswirkungen einzelner Eingangsparameter auf das Ergebnis und Diskussion der Ergebnisse selbst für die Anpassung und Verbesserung des Modells von großem Vorteil. Mit dem modularen und auf einem Raum fokussierten Ansatz der Referenzraummethode sind nur Referenzräume neu zu berechnen, bei denen die Eingangsparameter geändert wurden. Im Gegensatz zum Gebäudemodell, bei dem das gesamte Modell neu berechnet werden muss, spart die RRM deutlich an Zeit ein und ermöglicht zugleich für den Anwender eine schnellere Rückmeldung über die neuen Eingaben.

Größere, stetige oder von Umwelteinflüssen weniger beeinflusste Energiebedarfsmengen verbessern die Genauigkeit der RRM in der Heiz- und Kühlenergiebedarfsberechnung. Sie nimmt weiter zu, je mehr sich das zu untersuchende Gebäude dem Gebäude im Korrekturverfahren gleicht. Eine Verbesserung in der Erkennung und der Gewichtung der Sensitivitätsindizes geht damit einher. Rein lineare Modelle, wie sie im Modell für elektrische Geräte und Beleuchtung vorkommen, können ohne Qualitätsverlust eingesetzt werden. Sind in den Modellen nichtlineare Zusammenhänge vorhanden (wie es in der Heiz- und Kühlenergie der Fall ist), sind Ungenauigkeiten durch die zu Grunde gelegte Linearisierung im Regressionsmodell zu erwarten.

Für die Beachtung weiterer Gebäudegeometrien und Umgebungssituationen ist das Korrekturverfahren zu erweitern. Als weitere Grundlage für das A/V-Korrekturverfahren eignen sich Modelle mit der Gebäudeform eines Blocks oder eines Kammes. Auch wird ein Effekt in dem Breiten-Längen-Höhen-Verhältnis des Gebäudes vermutet, das auch das A/V-Verhältnis beeinflusst. Neben den geometrischen Veränderungen kann der solare Eintrag eine wesentliche Rolle im Energiebedarf eines Gebäudes einnehmen. Daher ist es ratsam in zukünftigen Arbeiten die Verschattungseffekte durch die Umgebungsbebauung im A/V- oder einem neuen, eigenständigen Korrekturverfahren zu berücksichtigen. Auch der Einsatz anderer Ersatz-Modelle anstatt des linearen Regressionsmodells zur Verbesserung der Berechnungsgenauigkeit von Energiebedarf und Sensitivitätsindizes ist zu untersuchen.

KAPITEL 8

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

8.1 Bewertung der erzielten Ergebnisse und Schlussfolgerung

Grundlegendes

Diese Arbeit widmete sich dem Thema der energetisch-thermischen Bewertung von komplexen Liegenschaften im Quartier am Beispiel von Hochschulen. Zwei Dinge spielten dabei eine wesentliche Rolle. Zum einen sollte der Bewertungsprozess vereinfacht werden. Hierzu wurde eine auf Nutzungen basierte Methodik, die Referenzraummethode, entwickelt und mit Hilfe von EnergyPlus untersucht. Zum anderen sind Vereinfachungen im Modell und Annahmen bei den Eingabeparametern stets mit Unsicherheiten versehen. Der Einsatz statistischer Verfahren erlaubt die Thematik der Unsicherheit zu adressieren und weiter die Wichtigkeit einzelner Eingangsparameter bzw. die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber den Eingangsparametern zu untersuchen und zu quantifizieren.

Anforderungen an Bewertungswerkzeuge

Die Komplexität der Bewertungswerkzeuge ist an die Anforderungen aus der Fragestellung gekoppelt. Je schwieriger eine Frage zu beantworten oder eine Anforderung nachzuweisen ist, desto komplexer ist das Werkzeug. Daneben bildet das Gebäude ein komplexes Konstrukt aus Klima, Gebäudehülle, Gebäudetechnik und Energieerzeugung, Betrieb und Wartung, Gebäudenutzung und Nutzerverhalten sowie Komfort. Diese Bereiche sind in einer Bewertung durch das Werkzeug angemessen zu berücksichtigen, denn sie beeinflussen den Energiebedarf eines Gebäudes deutlich. Das Gebäude bildet somit einen individuellen Charakter aus, der schließlich in einer Einzelbewertung oder Bewertung des Gebäudeportfolios beachtet werden muss. Erschwerend kommt hinzu, dass einige Parameter, insbesondere die der Nutzung, sich ständig verändern und der Einsatz eines einzigen Parametersatzes diese Variabilität nicht abbilden kann. Aufwendige statistische Verfahren sind daher erforderlich, um Ergebnisse robuster und leichter nachvollziehbar zu gestalten.

Notwendigkeit statistischer Verfahren

Zur Beachtung der Variabilität und der in Eingangsparameter enthaltenen Unsicherheit wurde das Monte-Carlo Simulationsverfahren eingesetzt. Auf Basis einer größeren Stichprobe mit unterschiedlichen Parameterkombinationen können statistische Kennzahlen, wie Mittelwert oder Standardabweichung, und die Verteilung der Ergebnisse untersucht werden. Der Einsatz der Sobol-Sequenzen

zur Stichprobenziehung erlaubt die Anzahl der erforderlichen Kombinationen zu reduzieren. Auf Basis der Berechnungsergebnisse können lineare Regressionsmodelle und die standardisierten Regressionskoeffizienten als qualitative Sensitivitätsindizes entwickelt werden. Lineare Regressionsmodelle sind leicht verständlich und vor allem schnell ausführbar. Sie bilden die Grundlage für das rechenintensive Simulationsverfahren zur Bestimmung der quantitativen Sensitivitätsindizes. Auf Basis der quantitativen Indizes ist es möglich den Anteil eines einzelnen Parameters an der Streuung zu ermitteln und davon abgeleitet eine Rangliste nach Einfluss zu entwickeln.

Neben den Simulationsverfahren sind auch statistische Tests für den Vergleich der Ergebnisse zwischen Referenzraummethode und Gebäudemodell erforderlich. Die Ungleichheit der Mittelwerte wurde mit Hilfe des t-Tests für unabhängige Stichproben bestätigt. Da die Varianz die Basis für die varianzbasierten Sensitivitätsindizes bildet, wurde sie auf Ungleichheit der Varianzen mittels statistischer Testverfahren überprüft. Die Varianz kann für den Heizenergiebedarf als gleich angenommen werden, für den Kühlenergiebedarf ist diese Annahme nicht immer gültig.

Keine Beachtung von Nutzungseffekten - keine nachvollziehbare Verbrauchsbewertung

Der Fokus der Referenzraummethode liegt auf Nutzungsarten. Darauf aufbauend wird der Gebäudeenergiebedarf entwickelt. Wie sich der Energiebedarf von Nutzungen auf die Veränderung einzelner Parameter verhält, kann mit Hilfe des Variationskoeffizienten als Maß der Sensitivität ausgedrückt werden. In der durchgeführten Studie mit unterschiedlich energieintensiven Nutzungen zeigt sich, dass für den Heizenergiebedarf ein mittlerer Variationskoeffizient von ca. $\pm 15\%$ und für den Kühlenergiebedarf von ca. $\pm 25\%$ ausgewiesen wird. Dies bedeutet, dass bereits bei moderaten Veränderungen der Eingangsparameter deutliche Veränderungen im Ergebnis festzustellen sind. Dies zeigt wie essentiell es ist, mögliche Unsicherheiten und Parametervariationen im Rahmen einer Bewertung zu beachten.

Für Nutzungen ohne permanente Personennutzung sind die baukonstruktionsabhängigen Parameter die wesentlichen Einflussfaktoren. Hierzu zählen u.a. die U-Werte der Wand und des Fensters. Weiter wird die Raumtemperatur während des Heizbetriebs als starker Einflussfaktor identifiziert. Bereits geringe Unterschiede bei diesen Parametern verändern den Heizenergiebedarf deutlich.

Ist eine Personennutzung vorhanden, so sind die nutzungsabhängigen Parameter die wesentlichen Faktoren. Sie nehmen einen Anteil von mehr als 60% an der Streuung ein. Hierzu zählen z.B. die eingestellte Raumtemperatur und die personenbezogene Frischluftmenge, entweder über Fenster oder mechanische Belüftung. Eine höhere Technisierung reduziert dabei die Sensitivität des Heiz- und Kühlenergiebedarfs gegenüber den Nutzungsparametern. Zusätzlich gilt je besser der energetische Baustandard des Gebäudes ist, desto sensitiver wird der Energiebedarf gegenüber den Nutzungsparametern.

Berechnungsqualität der Referenzraummethode

Wenn der Fokus der Referenzraummethode auf den Nutzungen liegt und die Effekte in der Bewertung auch abgebildet werden, wie hoch ist deren Genauigkeit im Gebäudeenergiebedarf? Die Referenzraummethode verzichtet auf ein detailliertes Gebäudegeometriemodell und das hat zur

Folge, dass die Effekte des solaren Ertrags und des Wärmetransports über die gesamte Gebäudehülle nicht vollständig abgebildet werden können. In der Studie ohne Nutzungseinfluss zeigt sich, dass eine Beziehung zwischen A/V-Verhältnis und der mittleren Abweichung besteht. Je größer das A/V-Verhältnis ist, desto größer ist die relative mittlere Abweichung. Die Ursache liegt hier im Einfluss des Solarertrags und der Transmissionsverluste auf die Energiebilanz sowie in der Modellierung der adiabaten Innenflächen (Innenwand, Decke, Fußboden) der Referenzzone. Diese reagiert damit weniger sensitiv gegenüber Umwelteinflüssen als Zonen in einem Gebäude, die eine stärkere Verbindung zu der Umgebung aufweisen, z.B. mehr als eine Außenwand besitzen oder an Zonen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus angrenzen. Als Folge bewertet die Referenzraummethode den Heizenergiebedarf zu niedrig und den Kühlenergiebedarf zu hoch. Über das A/V-Verhältnis kann die Abweichung zum Großteil korrigiert werden. Trotz Abweichungen erfolgt eine gleiche Erkennung und Bewertung der standardisierten Regressionskoeffizienten als erste qualitative Sensitivitätsindizes.

Kommen nun Nutzungseffekte hinzu, wie in den untersuchten Case-Studies dargestellt, wird der Effekt des solaren Ertrags in der Gesamtenergiebilanz abgeschwächt. Nutzungseffekte wirken sich deutlich stärker aus. Die Referenzraummethode berechnet den Energiebedarf und bildet sein Verhalten hinreichend genau ab. Die Abweichungen in den Case-Studies belaufen sich für den Heiz- und Kühlenergiebedarf auf weniger als $\pm 15\%$ und können als gut gewertet werden. Der Energiebedarf für elektrische Geräte und Beleuchtung ist wegen der deterministischen Modelle gleich. Die hohen Korrelationskoeffizienten nach Pearson bzw. Spearman ($> 0,85$) weisen für die Referenzraummethode einen sehr starken linearen Zusammenhang nach. Folglich kann das energetische Verhalten des Gebäudemodells angemessen abgebildet werden. Die Streuung der Energiemengen kann für die Heizenergie als gleich angenommen werden, in der Kühlenergie gilt dies nur mit Einschränkungen. Auf Basis der Streuungen bewertet die Referenzraummethode die gleichen Eingangsparameter mit Hilfe der qualitativen und quantitativen Sensitivitätsindizes als ausschlaggebend.

Hohe Ausführungsgeschwindigkeit dank modularem Aufbau

Der Berechnungsprozess des Gebäudemodells und der Referenzraummethode enthält jeweils die Monte Carlo Simulation und das Verfahren zur Berechnung der Sensitivitätsindizes. Der modulare und auf Raum basierte Ansatz der Referenzraummethode erhöht im Vergleich zu den normalen Berechnungsverfahren eines Gebäudes deutlich die Ausführungsgeschwindigkeit. Die Referenzraummethode kann damit mehr als 85% an Berechnungszeit einsparen. Sie ermöglicht eine viel frühere Rückmeldung sowie eine im gleichen Zeitraum mehrmalige Überprüfung und Korrektur der Eingaben anhand der Sensitivitätsindizes. Sie erlaubt es in der Gebäudeenergiebedarfsberechnung nur die Referenzzonen neu zu berechnen, die eine Veränderung erfahren. Dagegen muss im Gebäudemodell bereits bei einer einzigen Veränderung das gesamte Modell neu berechnet werden. In der Referenzraummethode können Informationen und Ergebnisse bereits vorhandener Referenzräume zur Bewertung anderer Gebäude wiederverwendet werden. Gegenüber einem klassischen Berechnungsprozess mit Gebäudemodell spart beides Berechnungsaufwand ein und resultiert in einer höheren Ausführungsgeschwindigkeit. Folglich kann die Referenzraummethode innerhalb kurzer Zeit und mit adäquater Genauigkeit für ein Gebäude den individuellen Energiekennwert und dessen Verteilung

bereitstellen sowie über energetisch relevante Einflussfaktoren auf Basis der Sensitivitätsindizes informieren.

Schlussfolgerung

Wie dargestellt wurde, kann die Referenzraummethode den Energiebedarf und die wesentlichen Einflussfaktoren schnell und mit ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stellen. Dabei reagiert sie dank ihres modularen Aufbaus in der Berechnungsmethodik flexibel auf die bauliche und technische Vielfalt sowie auf die Vielzahl an Nutzungsarten. Für jedes Gebäude kann somit auf eine einfache Art und Weise der individuelle Gebäudeenergiebedarf bestimmt werden. Darüber hinaus erlaubt es der modulare Ansatz der Referenzraummethode (Nutzungsarten und Flächenbedarf), die unterschiedlichen Dimensionen, beginnend vom Raum über das Gebäude bis hin zum Quartier, energetisch zu bewerten und die gewonnenen Erkenntnisse in Szenarios zur Erkennung von spezifischen bis hin zu übergeordneten Sanierungsmaßnahmen zu verwenden. Das Verständnis über den Zusammenhang zwischen Gebäude, Gebäudetechnik, Nutzungsarten und resultierendem Energiebedarf ermöglicht es, technische Sanierungskonzepte präziser aufeinander abzustimmen, damit die Energieeffizienz zu steigern und den Einsatz erneuerbarer Energien zu fördern, folglich auch den Energiebedarf und den CO₂-Ausstoß sichtlich zu senken.

8.2 Limitierungen der Referenzraummethode

Die Referenzraummethode verzichtet auf ein detailliertes Gebäudegeometriemodell und in dieser Arbeit auf eine Modellierung der Umgebung. Durch diesen Verzicht werden die Effekte des solaren Ertrags teilweise deutlich beeinflusst. Höhere Abweichungen sind bei Gebäuden zu erwarten, deren Entwurf dem solaren Ertrag einen hohen Stellenwert zuweist (z.B. Solararchitektur).

Die Genauigkeit der Hochrechnung in der Referenzraummethode profitiert von strahlungsunabhängigen Einflussgrößen, wie sie typischer Weise durch innere Lasten oder bei der Zuluftaufbereitung entstehen. Je größer deren Anteil in der Gesamtenergiebilanz im Energiemodell ist, desto genauer wird die Hochrechnung ausfallen.

Zur Bestimmung der quantitativen Sensitivitätsindizes sind lineare Regressionsmodelle als Gebäudeersatzmodell eingesetzt worden. Gebäude besitzen im Energiebedarf kein vollständig lineares Verhalten. In Verbindung mit den Regressionsmodellen kann dies in der Berechnung der Sensitivitätsindizes zu Ungenauigkeiten führen, obwohl die Qualitätskriterien für das Regressionsmodell erfüllt sind.

Die A/V-Korrektur erfolgt aktuell auf Basis einer einzigen Gebäudegeometrie, dem Zweibund, und aus dieser wurden unterschiedliche A/V-Verhältnisse abgeleitet. Hierbei sind verschiedene Längen-Breite-Höhen-Verhältnisse nur unzureichend berücksichtigt. Sie können sich aber sehr deutlich in Abhängigkeit von der gewählten Gebäudeform unterscheiden. Das Längen-Breite-Höhen-Verhältnis spielt im Korrekturverfahren mit hinein, denn der energetische Austausch der Referenzzone mit einer einzigen Außenwand wird darüber auf das Gesamtgebäude skaliert.

8.3 Beantwortung der Forschungsfragen

Ist ein statistisches Verfahren für eine Gebäudebewertung auf Basis von Referenzräumen mit wenigen essentiellen Informationen für komplexe Gebäude ausreichend genau, um damit auf eine aufwendige und umfangreiche Gebäudesimulation zur Portfoliobewertung verzichten zu können?

Die Referenzraummethode liefert für den Nutzenergiebedarf hinreichend genaue Ergebnisse, die mit wenigen Eingangsinformationen erzielt werden können. Ihre auf Nutzungen aufbauende Berechnungssystematik erlaubt es, Gebäude mit Hilfe eines Baukastens aus vorhandenen Nutzungen flexibel und schnell aufzubauen. Der erzeugte gebäudespezifische Energiekennwert berücksichtigt den individuellen Gebäudecharakter und kann als Grundlage für ein übergreifendes Benchmarking im Gebäudeportfolio dienen. Die Referenzraummethode ersetzt nicht eine vollständige Gebäudesimulation. Vielmehr können auf Basis der fundierten Ergebnisse der Referenzraummethode die Gebäude ausgewählt werden, für die weitere Energieeinsparmaßnahmen sowie der Einsatz der aufwendigen und leistungsstarken Simulationswerkzeuge vielversprechend erscheinen.

Kann eine aussagekräftige Bewertung erfolgen trotz wenigen bzw. nicht vorhandenen Daten und den darin enthaltenen Unsicherheiten?

Die Referenzraummethode ist in der Lage mit den Unsicherheiten in den Eingangsdaten angemessen umzugehen und liefert ausreichend genaue Ergebnisse für eine Gebäudebewertung. Hierzu setzt sie auf die Monte Carlo Simulation und erlaubt damit nicht vorhandene oder unsichere Eingangsparameter über eine mögliche Bandbreite zu schätzen. Der Effekt auf das Ergebnis einzelner Parameter kann mit Hilfe der Sensitivitätsindizes beurteilt werden. Weisen einzelne geschätzte Parameter einen zu großen Einfluss (hohe quantitative Sensitivitätsindizes) auf das Ergebnis auf, können deren Eingaben durch gezielte Nachbegehungen kontrolliert und ggf. an das reale Verhalten angepasst werden. Die Schätzung wird folglich genauer und die Unsicherheiten nehmen weiter ab.

Ist es möglich, eine einfach anwendbare und flexible Methode zur schnellen und fundierten Abschätzung des Energiebedarfs komplexer Liegenschaften aufzubauen?

Die Referenzraummethode kann hierzu die Basis liefern. Sie ist

1. einfach, denn sie benötigt nur wenige Informationen über die Nutzungsarten und die jeweiligen Flächenanteile.
2. flexibel, denn sie baut das Gebäude aus den leicht austauschbaren Nutzungen und deren Flächenanteile auf.
3. schnell, denn der Rechenaufwand ist für 1-Zonenmodelle deutlich geringer und die Wiederverwendung von bereits berechneten Ergebnissen erlaubt eine hohe Skalierung.
4. fundiert, denn sie bindet aufwendige statistische Verfahren zum einen zur Bestimmung der Mittelwerte und Verteilungen und zum anderen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten und zur Erkennung von Sensitivitäten mit ein.

8.4 Ausblick

Bedeutung der Ergebnisse

Das Verfahren kann dazu eingesetzt werden ein softwaregestütztes Werkzeug zu entwickeln, das für die Gebäudebewertung den Fokus auf Nutzungen legt. Hierbei kann den Effekten der Nutzungen mehr Gewicht eingeräumt werden, denn diese sind zum einen durch ihre höhere Unsicherheit in der Parametrierung und zum anderen durch den sehr starken Effekt auf den Energiebedarf die wesentlichen Größen, wenn es darum geht, ein Gebäude auch ohne Investitionen zu verbessern.

Mit der Integration von Sensitivitätsindizes ist es möglich, die wesentlichen Faktoren zu identifizieren und auch deren Wichtigkeit zu bestimmen. Die vorgestellten Indizes erlauben es, die Faktoren zu erkennen und zu gewichten. Damit wird es dem Anwender leichter fallen, Zusammenhänge im und Effekte auf den Energiebedarf nachzuvollziehen. Auch das Verständnis für Abweichungen innerhalb einer Stichprobe oder für einen spezifischen Energieverbrauch kann damit steigen.

Der Fokus auf Räume und die nachfolgende Hochrechnung des Gebäudeenergiebedarfs erlaubt es, die bereits berechneten Ergebnisse zu skalieren. Dies bedeutet, dass neue Nutzungen in Räumen auf Gleichheit oder Ähnlichkeit geprüft werden können. Damit kann ein erneuter Rechenaufwand vermieden werden. Somit lassen sich raumbezogene Informationen auf andere Gebäude übertragen. Aus den Raumdaten lässt sich ein Ersatzmodell für das Gebäude einfach und schnell entwickeln. Die Berechnung der zeitintensiven und aufwendigen quantitativen Indizes auf Basis des Ersatzmodells ist damit leicht möglich.

Sind die grundlegenden Daten, z.B. über Nutzungsarten oder Baustandards, vorhanden, so können die Informationen auch in der Planung von neuen Gebäuden Einsatz finden. Durch eine schnelle Prüfung auf Gleichheit und einen automatisierten Prozess zur Zuteilung von Flächen lässt sich der Energiebedarf für ein Gebäude abschätzen. Auch hier ist es mit kleinem zeitlichen Verzug möglich, die wesentlichen Faktoren auf Basis der Sensitivitätsindizes ermitteln zu lassen.

Der Einsatz von EnergyPlus erlaubt es, in hoher Auflösung das thermische und energetische Verhalten im Raum abzubilden. Damit ist es möglich weitere Kriterien, z.B. zur Behaglichkeit in der Referenzzone oder zu Lastdaten, in eine Bewertung mit einzubinden und einen ganzheitlicheren Bewertungsansatz zu verfolgen.

Empfehlungen für weiteren Forschungsbedarf

Die Arbeit hat gezeigt, dass noch weiterer Forschungsbedarf in mehreren Bereichen existiert. Die Hochrechnung des Gebäudeenergiebedarfs beruht neben den Flächenmaßen auch auf einer Korrektur der Gebäudegeometrie. Für die Korrektur blieben viele weitere Geometrien, wie z.B. Kamm oder Block mit Atrium, unberücksichtigt, obwohl das Korrekturverfahren ein breites Spektrum für das A/V-Verhältnis der blockartigen Gebäudegeometrie des Zweibundes abdeckt. Gerade zu dem Verhältnis von Breite-Länge-Höhe besteht weiterer Untersuchungsbedarf. Dieses Verhältnis gibt an, wie viel mehr an Fläche mit der Umgebung im energetischen Austausch steht als die Außenwand der Referenzzone als deren einzige Austauschfläche.

Weiter ist die Frage zu klären, ob die Genauigkeit der Bestimmung der Sensitivitätsindizes durch Einsatz anderer Ersatzmodelle gesteigert werden kann. Das eingesetzte lineare Regressionsmodell nimmt an, dass sich das Ursprungsmodell ideal linear verhält. Für den Gebäudeenergiebedarf und das thermische Verhalten ist dies nicht vollständig gültig.

Die Referenzraummethode in ihrer jetzigen Form bildet nur den Nutzenergiebedarf ab und Anlagentechniken für Verteilung, Erzeugung und Speicherung bleiben unberücksichtigt. Um dieses Defizit zu reduzieren, ist die Integration von verschiedenen Anlagensystemen ratsam. Damit sollte eine präzisere Bestimmung des Endenergiebedarfs möglich sein.

Der Referenzraum kann als ein eindeutiges Objekt charakterisiert werden und besteht dann aus beschreibenden Eigenschaften und bereits berechneten Ergebnissen. Mit Hilfe des Objektes ist ein mathematischer Vergleich über die Ähnlichkeit von Referenzräumen möglich. Liegt eine ausreichende Ähnlichkeit vor, kann Rechenaufwand durch die Vermeidung einer erneuten Berechnung eines ähnlichen Referenzraums eingespart werden. Als Folge steigt die Ausführungsgeschwindigkeit weiter an. Der modulare Ansatz erlaubt darüber hinaus eine hohe Skalierbarkeit, denn Gebäude setzen sich aus den in der Datenbank vorhandenen Referenzräumen zusammen. Erfolgt eine Änderung (z.B. andere Außenwandkonstruktion) oder eine Erweiterung (z.B. neuer Wetterdatensatz) der Eingangparameter der Referenzräume, sind nur die Räume mit Veränderung neu zu berechnen. Damit stehen alle neuen Informationen den in der Datenbank hinterlegten Gebäuden zur Verfügung. Wenn eine Verbindung zwischen theoretisch erzeugten und aus Begehung erhobenen Daten hergestellt werden kann, besteht die Möglichkeit mit Hilfe von Big-Data- und Data-Mining-Technologien weitere Erkenntnisse für die Planung, Sanierung oder Betriebsoptimierung zu gewinnen.

Anwendungspotenzial für das Bauwesen

Die Referenzraummethode vereinfacht und beschleunigt durch ihr Konzept die Gebäudebewertung, indem sie die Bewertung aus leicht beschreibbaren Räumen und deren Flächenbedarf entwickelt. Darüber hinaus setzt die Referenzraummethode statistische Verfahren ein, um sowohl die Variation als auch die Unsicherheit der Parameter zu berücksichtigen. Beides kann dazu beitragen, die Akzeptanz des angewandten Verfahrens und der erzielten Ergebnisse zu erhöhen. Infolge der geringeren Informationsanforderung und der hohen Ausführungsgeschwindigkeit sinken die Bewertungskosten, die in der späteren Sanierung gewinnbringend eingesetzt werden können. Die höhere Akzeptanz und die niedrigeren Bewertungskosten können grundlegend die Bereitschaft zu einer energetischen Gebäudebewertung fördern. Je mehr Gebäude bewertet werden, desto größer ist die Anzahl an möglichen Energieeinsparmaßnahmen und folglich wächst die Wahrscheinlichkeit, dass mehr Maßnahmen umgesetzt werden. Zugleich bieten die Referenzräume die Möglichkeit, den thermischen Komfort zu bewerten und unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten zu verbessern. Die hohe Skalierbarkeit der Referenzraummethode (ausgehend von Räumen über Gebäude bis hin zum Quartier) erlaubt es, technische Lösungen sowohl mit hoher Effizienz als auch mit geringen Umweltauswirkungen zu planen und aufeinander abzustimmen. Infolgedessen kann die Referenzraummethode größeren Quartieren oder Städten helfen, deren tragende Rolle im Klimaschutz durch Effizienzsteigerung und Integration CO₂-neutraler Technologien zu erfüllen. Darüber hinaus kann mit

der Referenzraummethode auch der Raumnutzer angesprochen werden, um ihn über die energetischen Auswirkungen seines Handelns zu informieren. Ein vom Nutzer akzeptierter Komfort kann somit bei minimalen Energieaufwand und minimaler Umweltauswirkung erreicht werden. Die Referenzraummethode trägt durch ihre einfache Bewertungssystematik zum einen dazu bei, dass durch die Verbesserung von Bestandsgebäuden Ressourcen geschont werden, und zum anderen, dass die Sanierungsrate durch ein einfaches Erkennen und Umsetzen von Energieeinsparmaßnahmen gesteigert werden kann. Mit einer erhöhten Sanierungsrate sinken sowohl der Energiebedarf als auch der CO₂-Ausstoß sichtlich und zugleich wächst die Wirtschaftsleistung innerhalb des Bauwesens. Folglich kann die vereinfachte Bewertung von Liegenschaften auf Basis der Referenzraummethode wirtschafts- und umweltpolitische Ziele miteinander gewinnbringend verbinden.

Abkürzungsverzeichnis

AL	Audit-Level
EnEV	Baustandard nach Energieeinsparverordnung
FKZ	Förderkennzeichen
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
K1:BauKonstPar_stat	Statische baukonstruktionsabhängige Parameter
K2:BauKonstPar_dyn	Dynamische baukonstruktionsabhängige Parameter
K3:NutzPar_stat	Statische nutzungsabhängige Parameter
K4:NutzPar_dyn	Dynamische nutzungsabhängige Parameter
LMU	Ludwig-Maximilians Universität München
LP	Leistungsphase
mWSchV	Baustandard mit Wärmeschutzverordnung
OPT	Optimierung
OWSchV	Baustandard ohne Wärmeschutzverordnung
PI	Performance-Indikator
RLT	Raumluftechnische Anlage
RRM	Referenzraummethode
S_i	Sensitivitätsindex erster Ordnung (first-order sensitivity index)
S_{T_i}	Gesamtsensitivitätsindex (total-sensitivity index)
SA	Sensitivitätsanalyse
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TSI	Gesamtsensitivitätsindex (total-sensitivity index)
UA	Unsicherheitsanalyse
UQ	Unsicherheitsquantifizierung
W1	Fassade mit Fensterflächenanteil 25-45%
W2	Fassade mit Fensterflächenanteil 45-65%
W3	Fassade mit Fensterflächenanteil 65-85%
WRG	Wärmerückgewinnung

Literaturverzeichnis

- [1] I. E. Agency; „World Energy Outlook 2008“; International Energy Agency; Techn. Ber.; 2008; abgerufen am: 12.1.2015. Adresse: <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebseite/2008-1994/weo2008.pdf> (siehe S. 1).
- [2] H. Wang-Helmreich, N. Kreibich, V. Streitferdt, C. Arens und W. Sterk. (Sep. 2012). City-Wide Programmes of Activities - An Option for Significant Emission Reductions in Cities? English. abgerufen am: 12.1.2015; Wuppertal Institute for Climate, Environment und Energy; Adresse: http://www.jiko-bmub.de/files/basisinformationen/application/pdf/pp_city_wide_barrierefrei.pdf (siehe S. 1).
- [3] S. Pouffary und H. Rogers; „Climate Finance for Cities and Buildings - A Handbook for Local Governments“; UNEP Division of Technology, Industry und Economics (DTIE); Paris; Report; 2014; abgerufen am: 12.1.2015. Adresse: <http://apps.unep.org/publications/> (siehe S. 1).
- [4] D. J. van de Ven und R. Fouquet. (Apr. 2014). Historical Energy Price Shocks and their Changing Effects on Economy. English. abgerufen am: 2.9.2014; London School of Economics und Political Science; Adresse: <http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/2014/03/WP153-Historical-energy-price-shocks-and-their-changing-effects-on-the-economy.pdf> (siehe S. 1).
- [5] Kilian und Lutz; „The Economic Effects of Energy Price Shocks“; *Journal of Economic Literature*; Bd. 46; Nr. 4, S. 871–909; 2008. DOI: 10.1257/jel.46.4.871 (siehe S. 1).
- [6] K. Kübler; „Auf dem Weg in ein neues Energiezeitalter“; *ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN*; Bd. 63; Nr. 3; 2013; abgerufen am: 3.6.2015. Adresse: http://www.et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen_2013_03_kuebler.pdf (siehe S. 1).
- [7] *Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden*; Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, Mai 2010 (siehe S. 1, 5, 6, 22).
- [8] KOM 2010; *Mitteilung der Kommission - Europa 2020 - Eine Strategie für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum*; abgerufen am: 27.6.2014; Europäische Kommission; März 2010 (siehe S. 1).
- [9] EUCO 7/10 CO EUR 4 CONCL 1; *Europäischer Rat - Tagung am 25./26. März 2010 - Schlussfolgerungen*; abgerufen am: 27.6.2014; Europäischer Rat; März 2010 (siehe S. 1).
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung - Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Techn. Ber.; Juli 2011; abgerufen am: 27.6.2014 (siehe S. 1).

- [11] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Techn. Ber.; Apr. 2013; abgerufen am: 19.5.2014. Adresse: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/leitfaden_nachhaltiges_bauen_2013.pdf?__blob=publicationFile (siehe S. 2, 5, 11–13, 18).
- [12] C. v. Malottko, T. Koch und H. Heinzl; *Anforderungen an energieeffiziente und klimaneutrale Quartiere (EQ)*; I. W. und Umwelt GmbH, Hrsg.; Ser. Werkstatt: Praxis 81. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Juni 2013; ISBN: 978-3-87994-982-3. Adresse: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/WP/2013/heft81_DL.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (siehe S. 2, 3, 5).
- [13] C. Schittich; *Gebäudehüllen*; 2. erweiterte Auflage. Berlin: Birkhäuser GmbH, 2006; ISBN: 978-3-7643-7633-8 (siehe S. 2, 11, 12, 19, 20).
- [14] M. A. Marr und S. Wehner; „Cities and Carbon Finance: A Feasibility Study on an Urban CDM“; UNEP Division of Technology, Industry und Economics (DTIE); Techn. Ber.; 2012; abgerufen am: 12.1.2015. Adresse: http://www.unep.org/urban_environment/Publications/ (siehe S. 3, 5).
- [15] R. David, O. Jainta, R. Regel und W. Jensch; „Die Hochschule auf dem Weg zu einem energieeffizienten Gebäudebetrieb“; Hochschule für angewandte Wissenschaften München und Ebert-Ingenieure GmbH & Co. KG; Techn. Ber.; 2013; abgerufen am: 2.6.2015. Adresse: http://hoeff.info/media/schlussbericht/HoEff_Abschlussbericht_I_II_2013-04-02.pdf (siehe S. 3).
- [16] J. Owens und H. Wilhite; „Household energy behavior in Nordic countries - an unrealized energy saving potential“; *Energy*; Bd. 13; Nr. 12, S. 853–859; 1988. DOI: 10.1016/0360-5442(88)90050-3 (siehe S. 4).
- [17] E. Matthies und R.-D. Person; „BMBF-Projekt „Vom Wissen zum Handeln – Neue Wege zum nachhaltigen Konsum: Veränderung nachhaltigkeitsrelevanter Routinen in Organisationen““; in *Vortrag, Praxisseminar „Energie der HIS GmbH an der TU Clausthal (2. – 4. Juni 2008)“*; 2008. Adresse: http://www.his-he.de/veranstaltung/dokumentation/Praxisseminar_Energie_062008/pdf/vortrag_matthies.pdf (siehe S. 4).
- [18] M. Stumpf; „Energiesparen durch finanzielle Anreize für die Nutzer: Integration von technischen und verhaltensorientierten Maßnahmen an der Universität Freiburg“; in *Vortrag, Praxisseminar „Energie der HIS GmbH an der TU Clausthal (2. – 4. Juni 2008)“*; 2008. Adresse: http://www.his-he.de/veranstaltung/dokumentation/Praxisseminar_Energie_062008/pdf/vortrag_stumpf.pdf (siehe S. 4).
- [19] J. Liers und R.-D. Person; „Energiemanagement in Hochschulen“; HIS Hochschul-Information-System GmbH; Techn. Ber.; 2012; abgerufen am: 24.6.2014. Adresse: http://www.his-he.de/pdf/pub_fh/fh-201213.pdf (siehe S. 4, 5).
- [20] o.V. (Mai 2014). Zukunft des dualen Studiums von Südwestmetall und der Dualen Hochschule Baden-Württemberg. Deutsch. abgerufen am: 16.9.2014; Südwestmetall & Duale Hochschule Baden-Württemberg; Adresse: http://www.dhbw.de/fileadmin/user/public/Dokumente/Presse/2014_05_22_PM_04_Kongress_Zukunft_des_dualen_Studiums-Suedwestmetall_DHBW.pdf (siehe S. 5).

- [21] —, (Dez. 2012). Die saarländische Landesregierung plant, die Regelungen zu den Globalhaushalten der Saar-Uni und der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) um ein Jahr bis Ende 2014 zu verlängern. Deutsch. abgerufen am: 16.9.2014; Saarbrücker Zeitung Verlag und Druckerei GmbH; Adresse: <http://www.sol.de/news/uni/campus-saar-top/Saarbruecken-Etat-Hochschulen-Landesregierung-will-Etats-der-Hochschulen-um-ein-Jahr-verlaengern;art26228,3950237> (siehe S. 5).
- [22] T. Warnecke. (Jan. 2009). Studiengebühren sollen Unidefizit ausgleichen. Deutsch. abgerufen am: 16.9.2014; Der Tagesspiegel; Adresse: <http://www.tagesspiegel.de/wissen/hochschulen-studiengebuehren-sollen-unidefizit-ausgleichen/1429970.html> (siehe S. 5).
- [23] C. Legris, N. M. Ferretti und D. Choiniere; „AReport of Cost-Effective Commissioning of Existing and Low Energy Buildings“; Annex 47; Techn. Ber.; Nov. 2010; abgerufen am: 16.9.2014. Adresse: <http://www.iea-annex47.org/fichier/82048/Annex47-report1-Final.pdf>. (siehe S. 5).
- [24] *Richtlinie für die Durchführung von Bauaufgaben des Bundes*; online; abgerufen am: 3.9.2014; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Sep. 2013. Adresse: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/Bauen/rbbau_19-atl.pdf?__blob=publicationFile (siehe S. 5).
- [25] R. Regel, W. Jensch und W. Lang; „The Pareto Principle for the Energy Assessment of Heterogeneous and Complex University Buildings - A Comparison“; in *Sb13 munich - Implementing Sustainability - Barriers and Chances*; Stuttgart: Fraunhofer IRB, Apr. 2013, S. 1212–1221; ISBN: 978-3-8167-8982-6 (siehe S. 6).
- [26] W. J. Keese u. a.; „How to Hire an Energy Auditor to Identify Energy Efficiency Projects“; California Energy Commission; Techn. Ber.; Jan. 2000; abgerufen am: 23.1.2015. Adresse: http://www.energy.ca.gov/reports/efficiency_handbooks/400-00-001C.PDF (siehe S. 6).
- [27] E. Mills, H. Friedman, T. Powell, D. Claridge, T. Haasl und M. Piette; „The cost-effectiveness of commercial-buildings commissioning: a meta-analysis of energy and non-energy impacts in existing buildings and new construction in the United States“; Lawrence Berkeley National Laboratory; Techn. Ber.; 2004; abgerufen am: 23.6.2014. Adresse: <http://evanmills.lbl.gov/pubs/pdf/cx-costs-benefits.pdf> (siehe S. 6).
- [28] E. Mills; „Building commissioning: a golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse gas emissions“; Lawrence Berkeley National Laboratory; Techn. Ber.; 2009; abgerufen am: 23.6.2014. Adresse: <http://cx.lbl.gov/documents/2009-assessment/lbnl-cx-cost-benefit.pdf> (siehe S. 6).
- [29] K. Roth, D. Westphalen, M. Feng, P. Llana und L. Quartararo; „Energy Impact of Commercial Building Controls and Performance Diagnostic: Market Characterization, Energy Impact of Building Faults and Energy Savings Potential“; TIAX LCC, Cambridge, MA; Techn. Ber.; 2005; abgerufen am: 23.6.2014. Adresse: http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.tiaxllc.com/ContentPages/42428345.pdf (siehe S. 6).
- [30] Y. Heo, R. Choudhary und G. Augenbroe; „Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty“; *Energy and Buildings*; Bd. 47, S. 550–560; 2012. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.12.029 (siehe S. 6, 8).

- [31] Z. Ma, P. Cooper, D. Daly und L. Ledo; „Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art“; *Energy and Buildings*; Bd. 55, S. 889–902; 2012; Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.08.018 (siehe S. 6–8, 16).
- [32] A. Rysanek und R. Choudhary; „Adecoupled whole-building simulation engine for rapid exhaustive search of low-carbon and low-energy building refurbishment options“; *Building and Environment*; Bd. 50, S. 21–33; 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.09.024 (siehe S. 6).
- [33] U. Römming. (2008). Energieausweise der Berliner Regierungsgebäude - Dezentrale innovative Energieversorgungssysteme im Spiegelbild der Energieeinsparverordnung 2007. deutsch. abgerufen am: 8.9.2014; Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin (IEMB); Adresse: http://www.dvgw-bb.de/uploads/media/5_BET2008_Vortrag_Roemmling.pdf (siehe S. 6, 7).
- [34] M. Lichtmess; „Vereinfachungen für die energetische Bewertung von Gebäuden“; abgerufen am: 14.12.2011; Diss.; Bergische Universität Wuppertal; Sep. 2010. Adresse: <http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/servlets/DocumentServlet?id=1648> (siehe S. 7).
- [35] H. Erhorn-Kluttig, H. Erhorn und E. Gruber; „Evaluierung des dena Feldversuchs Energieausweise für Nichtwohngebäude“; Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP); Report IBP-Bericht WB 128/2055; Dez. 2005; abgerufen am: 8.9.2014. Adresse: https://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/feldversuch_nwg.pdf (siehe S. 7).
- [36] A. M. Malwaki und G. Augenbroe; *Advanced Building Simulation*; 1. Aufl. New York: Spon Press, 2003, S. 267 (siehe S. 7, 15, 42).
- [37] Bundesarchitektenkammer. (Nov. 2006). Entwurf einer Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). deutsch. abgerufen am: 8.9.2014; Bundesarchitektenkammer (siehe S. 7).
- [38] Plesser, Kuchen und Fisch; „Ergebnisse einer Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude und Schlussfolgerungen für Energieeffizienz und das Raumklima“; *Bauphysik*; Nr. 30, S. 389–392; 2008 (siehe S. 7).
- [39] H. Yoshino u. a.; „Total energy use in buildings. Analysis and evaluation methods. Final Report Annex 53“; International Energy Agency; Techn. Ber.; Nov. 2013; abgerufen am: 23.2.2015. Adresse: http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Main_Report.pdf (siehe S. 7, 18, 19, 21, 22, 24).
- [40] Y. Shao, P. Geyer und W. Lang; „Integrating requirement analysis and multi-objective optimization for office building energy retrofit strategies“; *Energy and Buildings*; Bd. 82, S. 356–368; 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.07.030 (siehe S. 11).
- [41] G. Hausladen, M. de Saldanha und P. Liedl; *ClimaSkin*. München: Callwey Verlag, 2006; ISBN: 978-3-7667-1677-4. Adresse: <http://www.callwey.de/buecher/climaskin/> (siehe S. 12, 20).
- [42] *DIN 15643-2: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität*; Deutsch; Berlin: Beuth Verlag; Deutsches Institut für Normung, Mai 2011 (siehe S. 12).
- [43] *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil 1 Nr. 37: Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen*; Deutsch; Bonn: Bundesministerium der Justiz und für Verbrau-

- cherschutz, Juli 2013. Adresse: http://www.bgbl.de/banzxaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl113s2276.pdf (siehe S. 12, 14).
- [44] N. J. Smith, T. Merna und P. Jobling; *Managing Risk in Construction Projects*; 2. Aufl. Hoboken: Blackwell Publishing, 2006; ISBN: 978-1-4051-3012-7 (siehe S. 12, 13).
- [45] J. L. LaSalle; *Green Building - Nachhaltigkeit und Bestandserhalt in der Immobilienwirtschaft*; abgerufen am: 27.1.2015; 2008 (siehe S. 12, 13).
- [46] *VDI 6039: Facility-Management, Inbetriebnahmemanagement für Gebäude*; Deutsch; Berlin: Beuth Verlag; Verein Deutscher Ingenieure, Juni 2011 (siehe S. 13).
- [47] R. Sonntag und A. Voigt; „Planungsleitfaden Zukunft Industriebau“; TU Braunschweig Institut für Baukonstruktion und Industriebau; Techn. Ber.; 2011; abgerufen am: 27.1.2015 (siehe S. 13).
- [48] H.-G. Beyer und B. Sendhoff; „Robust optimization - A comprehensive survey“; *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*; Bd. 196; Nr. 33-34, S. 3190–3218; 2007. DOI: 10.1016/j.cma.2007.03.003 (siehe S. 14).
- [49] V. Machairas, A. Tsangrassoulis und K. Axarli; „Algorithms for optimization of building design: A review“; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Bd. 31, S. 101–112; 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.11.036 (siehe S. 15).
- [50] S. Burhenne; „Monte Carlo Based Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Performance Simulation“; abgerufen am: 22.9.2014; Diss.; Karlsruher Institut für Technologie (KIT); 2013 (siehe S. 15, 40–42, 44).
- [51] M. Deru u. a.; *Procedures for Commercial Building Energy Audit*; Second; T. Circle, Hrsg.; 2. N.E. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating und Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2011; ISBN: 978-1-936504-09-1 (siehe S. 16, 17).
- [52] G. Liu u. a.; „Advanced Energy Retrofit Guide Office Buildings“; U.S. Department of Energy; Techn. Ber.; Sep. 2011; abgerufen am: 23.1.2015. Adresse: http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-20761.pdf (siehe S. 17).
- [53] X. G. Casals; „Analysis of building energy regulation and certification in Europe: Their role, limitations and differences“; *Energy and Buildings*; Bd. 38; Nr. 5, S. 381–392; 2006. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.05.004 (siehe S. 18, 22, 23).
- [54] T. Hong, W.-K. Chang und H.-W. Lin; „ASensitivity Study of Building Performance Using 30-Year Actual Weather Data“; in *Building Simulation 2013*; IBPSA - International Building Performance Simulation Association; Chambéry, France, Aug. 2013; ISBN: 978-2-7466-6294-0. Adresse: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1059.pdf (siehe S. 19).
- [55] W. Tian und P. de Wilde; „Uncertainty and sensitivity analysis of building performance using probabilistic climate projections: A {UK} case study“; *Automation in Construction*; Bd. 20; Nr. 8, S. 1096–1109; 2011. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.04.011 (siehe S. 19).
- [56] J. C. Lam; „Shading effects due to nearby buildings and energy implications“; *Energy Conversion and Management*; Bd. 41; Nr. 7, S. 647–659; 2000. DOI: 10.1016/S0196-8904(99)00138-7 (siehe S. 19).

- [57] D. H. Li und S. Wong; „Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings“; *Applied Energy*; Bd. 84; Nr. 12, S. 1199–1209; 2007. DOI: 10.1016/j.apenergy.2007.04.005 (siehe S. 19).
- [58] Y. Sun und G. Augenbroe; „Urban heat island effect on energy application studies of office buildings“; *Energy and Buildings*; Bd. 77, S. 171–179; 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.055 (siehe S. 19).
- [59] M. Kolokotroni, I. Giannitsaris und R. Watkins; „The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies“; *Solar Energy*; Bd. 80; Nr. 4, S. 383–392; 2006; Urban Ventilation. DOI: 10.1016/j.solener.2005.03.010 (siehe S. 19).
- [60] P. Tuomaala; „Implementation and evaluation of air flow and heat transfer routines for building simulation tool“; abgerufen am: 2.3.2015; Diss.; Helsinki University of Technology; 2002. Adresse: <http://www2.vtt.fi/inf/pdf/publications/2002/P471.pdf> (siehe S. 19).
- [61] D. Costola, B. Blocken und J. Hensen; „Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs“; *Building and Environment*; Bd. 44; Nr. 10, S. 2027–2036; 2009. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.02.006 (siehe S. 19).
- [62] D. B. Crawley; „Which Weather Date Should You Use for Energy Simulations of Commercial Buildings?“; English; in *ASHRAE 1998 TRANSACTION*; 2; Bd. 104; ASHRAE, 1998, S. 498–515. Adresse: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/bibliography/whichweatherdatashouldyouuseforenergysimulations.pdf> (siehe S. 19).
- [63] B. B. Ekici und U. T. Aksoy; „Prediction of building energy needs in early stage of design by using {ANFIS}“; *Expert Systems with Applications*; Bd. 38; Nr. 5, S. 5352–5358; 2011. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.10.021 (siehe S. 20).
- [64] G. Florides, S. Tassou, S. Kalogirou und L. Wrobel; „Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness“; *Applied Energy*; Bd. 73; Nr. 3-4, S. 299–328; 2002. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00119-8 (siehe S. 20).
- [65] R. Ourghi, A. Al-Anzi und M. Krarti; „A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings“; *Energy Conversion and Management*; Bd. 48; Nr. 1, S. 300–305; 2007. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.04.011 (siehe S. 20).
- [66] U. T. Aksoy und M. Inalli; „Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region“; *Building and Environment*; Bd. 41; Nr. 12, S. 1742–1754; 2006. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.011 (siehe S. 20).
- [67] O. Masoso und L. Grobler; „A new and innovative look at anti-insulation behaviour in building energy consumption“; *Energy and Buildings*; Bd. 40; Nr. 10, S. 1889–1894; 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.04.013 (siehe S. 20).
- [68] J.-J. Kim und J. W. Moon; „Impact of insulation on building energy consumption“; in *BS-2009 - 11th International IBPSA Conference*; Glasgow, Juli 2009, S. 674–680. Adresse: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0674_680.pdf (siehe S. 20).
- [69] J. F. Karlsson und B. Moshfegh; „Energy demand and indoor climate in a low energy building-changed control strategies and boundary conditions“; *Energy and Buildings*; Bd. 38; Nr. 4, S. 315–326; 2006. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.06.013 (siehe S. 20).

- [70] J. Yu, C. Yang und L. Tian; „Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China“; *Energy and Buildings*; Bd. 40; Nr. 8, S. 1536–1546; 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.020 (siehe S. 20).
- [71] *DIN V 18599-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*; Deutsch; Berlin: Beuth Verlag; Deutsches Institut für Normung, Dez. 2011 (siehe S. 20, 21).
- [72] M. Levine, S. Chen, H. Yoshino, K. Newhouse und A. Hinge; „Total energy use in buildings. Analysis and evaluation methods. Final Report Annex 53 Volume 1: Definition of terms“; International Energy Agency; Techn. Ber.; Nov. 2013; abgerufen am: 10.3.2015. Adresse: http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Appendix_Volume_1.pdf (siehe S. 20, 21).
- [73] Z. Lin, C. Lee, K. Fong und T. Chow; „Comparison of annual energy performances with different ventilation methods for temperature and humidity control“; *Energy and Buildings*; Bd. 43; Nr. 12, S. 3599–3608; 2011. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.031 (siehe S. 20).
- [74] Z. Yang und B. Becerik-Gerber; „The coupled effects of personalized occupancy profile based HVAC schedules and room reassignment on building energy use“; *Energy and Buildings*; Bd. 78, S. 113–122; 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.04.002 (siehe S. 20).
- [75] S. P. Corgnati, E. Fabrizio und M. Filippi; „The impact of indoor thermal conditions, system controls and building types on the building energy demand“; *Energy and Buildings*; Bd. 40; Nr. 4, S. 627–636; 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2007.04.017 (siehe S. 20).
- [76] L. Perez-Lombard, J. Ortiz, R. Gonzalez und I. R. Maestre; „A review of benchmarking, rating and labelling concepts within the framework of building energy certification schemes“; *Energy and Buildings*; Bd. 41; Nr. 3, S. 272–278; 2009. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.10.004 (siehe S. 21, 23, 24).
- [77] J. Nicol und M. Humphreys; „Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings“; *Energy and Buildings*; Bd. 34; Nr. 6, S. 563–572; 2002; Special Issue on Thermal Comfort Standards. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00006-3 (siehe S. 21).
- [78] D. Saelens, W. Parys und R. Baetens; „Energy and comfort performance of thermally activated building systems including occupant behavior“; *Building and Environment*; Bd. 46; Nr. 4, S. 835–848; 2011. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.10.012 (siehe S. 21, 22).
- [79] V. Fabi, R. V. Andersen, S. Corgnati und B. W. Olesen; „Occupants’ window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models“; *Building and Environment*; Bd. 58, S. 188–198; 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.07.009 (siehe S. 21, 22).
- [80] V. Fabi, R. V. Andersen und S. P. Corgnati; „Influence of occupant’s heating set-point preferences on indoor environmental quality and heating demand in residential buildings“; *HVAC & R Research*; Nr. 19, S. 635–645; 2013. DOI: DOI:10.1080/10789669.2013.789372 (siehe S. 21).
- [81] V. Fabi, T. Busi und S. Corgnati; „The Influence of Occupants’s Behaviour in a High Performing Building“; in *CLIMAMED VII. Mediterranean Congress of Climatization*; Turkish Society of

- HVAC & Sanitary Engineers; Istanbul, Okt. 2013, S. 1–9. Adresse: <http://www.climamed.org/oct-10-proceedings.pdf> (siehe S. 21).
- [82] G. Y. Yun und K. Steemers; „Time-dependent occupant behaviour models of window control in summer“; *Building and Environment*; Bd. 43; Nr. 9, S. 1471–1482; 2008. DOI: 10.1016/j.buildenv.2007.08.001 (siehe S. 21).
- [83] B. Nordman, A. Meier und M. A. Piette; „PC and monitor night status: Power management enabling and manual turn-off“; *Lawrence Berkeley National Laboratory*; 1998. Adresse: <https://publications.lbl.gov/islandora/object/ir:115936/datastream/PDF/download/citation.pdf> (siehe S. 22).
- [84] *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil 1 Nr. 67: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung*; Deutsch; online; Bonn: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Nov. 2013. Adresse: http://www.enev-online.com/enev_2014_volltext/enev_2014_verkuendung_bundesgesetzblatt_21.11.2013.pdf (siehe S. 22, 24).
- [85] *Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil 1 Nr. 36: Viertes Gesetz zur Änderung des Energieeinsparungsgesetzes*; Deutsch; abgerufen am: 05.03.2016; Bonn: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Juli 2013. Adresse: http://www.enev-online.com/enev_praxishilfen/13.07.12_eneg_2013_verkuendet_bundesgesetzblatt leseversion.pdf (siehe S. 22).
- [86] *BayBO: Bayerische Bauordnung (BayBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007 (GVBl. S. 588) (Art. 1–84)*; Deutsch; online; abgerufen am: 05.03.2016; Bayerische Staatskanzlei, Aug. 2007. Adresse: <http://gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBO> (siehe S. 22).
- [87] J. R. Stein und A. Meier; „Accuracy of home energy rating systems“; *Energy*; Bd. 25; Nr. 4, S. 339–354; 2000. DOI: 10.1016/S0360-5442(99)00072-9 (siehe S. 22).
- [88] W. L. Lee, F. W. H. Yik und J. Burnett; „A Method to Assess the Energy Performance of Existing Commercial Complexes“; *Indoor and Built Environment*; Bd. 12; Nr. 5, S. 311–327; 2003. DOI: 10.1177/142032603035424. eprint: <http://ibe.sagepub.com/content/12/5/311.full.pdf+html> (siehe S. 22, 26).
- [89] N. E. Matson und M. A. Piette; „Review of California and National Methods for Energy-Performance Benchmarking of Commercial Buildings“; Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory; Techn. Ber. LBNL No. 57364; Sep. 2005; abgerufen am: 4.2.2015. Adresse: <http://eetd.lbl.gov/sites/all/files/publications/lbnl-57364.pdf> (siehe S. 23).
- [90] S. Wang, C. Yan und F. Xiao; „Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings“; *Energy and Buildings*; Bd. 55, S. 873–888; 2012; Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.08.037 (siehe S. 23–27).
- [91] L. D. Pereira, D. Raimondo, S. P. Corgnati und M. G. da Silva; „Energy consumption in schools - A review paper“; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Bd. 40, S. 911–922; 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.010 (siehe S. 24).
- [92] P. G. Jones, R. N. Turner, D. Browne und P. J. Illingworth; *Energy Benchmarks for Public Sector Buildings in Northern Ireland*; online; abgerufen am: 5.2.2015; 2008. Adresse: <http://www.enb.gov.uk/>

- //www.researchgate.net/publication/228412378_Energy_benchmarks_for_public_sector_buildings_in_Northern_Ireland (siehe S. 24).
- [93] J. Stimmel und J. Gohs; „Scoring Our Schools: Program Implementation Lessons-Learned From Benchmarking Over 1,775 Schools for Seven Utilities“; CLEARResult Consulting, Inc.; ACEEE summer study on energy efficiency in buildings; 2008; abgerufen am: 5.2.2015. Adresse: https://www.aceee.org/files/proceedings/2008/data/papers/4_158.pdf (siehe S. 24).
- [94] F. J. S. de la Flor, J. M. S. Lissen und S. A. Dominguez; „A new methodology towards determining building performance under modified outdoor conditions“; *Building and Environment*; Bd. 41; Nr. 9, S. 1231–1238; 2006. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.05.035 (siehe S. 24).
- [95] H. Bruhns, P. Jones und R. Cohen; „CIBSE Review of Energy Benchmarks For Display Energy Certificates“; in *CIBSE Technical Symposium*; De Monfort University, Leicester; Sep. 2011. Adresse: <http://www.cibse.org/knowledge/cibse-technical-symposium-2011/cibse-review-of-energy-benchmarks-for-display-ener> (siehe S. 24).
- [96] H. Akbari; „Validation of an algorithm to disaggregate whole-building hourly electrical load into end uses“; *Energy*; Bd. 20; Nr. 12, S. 1291–1301; 1995. DOI: 10.1016/0360-5442(95)00033-D (siehe S. 25, 26).
- [97] X. Xinhua; „Model-Based Building Performance Evaluation and Diagnosis“; abgerufen am: 15.2.2015; Diss.; The Hong Kong Polytechnic University; Apr. 2005. Adresse: http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/3751/2/b18355298_ir.pdf (siehe S. 25, 27).
- [98] J. Field, J. Soper, p. Jones, W. Bordass und P. Grigg; „Energy Performance of occupied non-domestic buildings: Assessment by analysing end-use energy consumptions“; in *CIBSE A: Building Services Engineering Research and Technology*; Ser. 18; Bd. 1; 1997, S. 39–46. Adresse: <http://bse.sagepub.com/content/18/1/39.full.pdf> (siehe S. 26).
- [99] D. Robinson und H. Reichmuth; „The Use of Short-Term Measurements to Decompose Commercial Billing Data Into Primary End Uses“; in *ACEEE 1992 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*; ACEEE; Bd. 3; Washington D.C., 1992, S. 3239–3249. Adresse: http://aceee.org/files/proceedings/1992/data/papers/SS92_Panel3_Paper24.pdf (siehe S. 26).
- [100] M. A. Piette, S. K. Kinney und P. Haves; „Analysis of an information monitoring and diagnostic system to improve building operations“; *Energy and Buildings*; Bd. 33; Nr. 8, S. 783–791; 2001. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00068-8 (siehe S. 26).
- [101] M. Masoero, C. Silvi und J. Toniolo; „Energy performance assessment of HVAC systems by inspections and monitoring“; in *10th REHVA World Congress Climate 2010*; REHVA Federation of European Heating und Air-conditioning Associations; Mai 2010. Adresse: www.researchgate.net/profile/Jacopo_Toniolo/publication/228430356_Energy_performance_assessment_of_HVAC_systems_by_inspection_and_monitoring/links/0f31752fca6de5ad66000000.pdf (siehe S. 26).
- [102] T. A. Reddy, I. Maor und C. Panjapornpon; „Calibrating Detailed Building Energy Simulation Programs with Measured Data - Part II: Application to Three Case Study Office Buildings (RP-1051)“; *HVAC&R Research*; Bd. 13; Nr. 2, S. 243–265; 2007. DOI: 10.1080/10789669.2007.10390953 (siehe S. 26).

- [103] J. Sun und T. A. Reddy; „Calibration of Building Energy Simulation Programs Using the Analytic Optimization Approach (RP-1051)“; *HVAC&R Research*; Bd. 12; Nr. 1, S. 177–196; 2006. DOI: 10.1080/10789669.2006.10391173 (siehe S. 26).
- [104] S. Wang und Z. Ma; „Supervisory and Optimal Control of Building HVAC Systems: A Review“; *HVAC & R Research*; Bd. 14; Nr. 1, S. 3–32; 2008. DOI: 10.1080/10789669.2008.10390991 (siehe S. 27).
- [105] C. Diakaki, E. Grigoroudis und D. Kolokotsa; „Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings“; *Energy and Buildings*; Bd. 40; Nr. 9, S. 1747–1754; 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.03.002 (siehe S. 27).
- [106] Z. Li, Y. Han und P. Xu; „Methods for benchmarking building energy consumption against its past or intended performance: An overview“; *Applied Energy*; Bd. 124, S. 325–334; 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.03.020 (siehe S. 27, 28).
- [107] L. Sachs und J. Hedderich; *Angewandte Statistik*; 11. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2006; ISBN: 3-540-40555-0 (siehe S. 32–35).
- [108] K. Backhaus, B. Erichson, W. Plinke und R. Weiber; *Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung*; 13. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011; ISBN: 978-3-642-16490-3. DOI: 10.1007/978-3-642-16491-0 (siehe S. 35).
- [109] J. Bortz und C. Schuster; *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010; ISBN: 978-3-642-12769-4 (siehe S. 39, 40, 45, 228, 229).
- [110] J. Cohen; *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale: L. Erlbaum Associates, 1988; ISBN: 9780805802832 (siehe S. 39).
- [111] C. Forbes, M. Evans, N. Hastings und B. Peacock; *Statistical Distributions (Fourth Edition)*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011; ISBN: 978-0-470-39063-4 (siehe S. 40).
- [112] I. A. Macdonald; „Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation“; abgerufen am: 22.9.2014; Diss.; University of Strathclyde; 2002. Adresse: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/PhD/macdonald_thesis.pdf (siehe S. 40–42, 44).
- [113] L. Fahrmeir, R. Künstler, I. Pigeot und G. Tutz; *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse*; 6. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2007; ISBN: 978-4-540-69713 (siehe S. 41).
- [114] K. Pietrzyk und C.-E. Hagentoft; „Reliability analysis in building physics design“; *Building and Environment*; Bd. 43; Nr. 4, S. 558–568; 2008; Part Special: Building Performance Simulation. DOI: 10.1016/j.buildenv.2007.01.009. Adresse: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132307000121> (siehe S. 42).
- [115] P. Raftery, M. Keane und J. O'Donnell; „Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology“; *Energy and Buildings*; Bd. 43; Nr. 9, S. 2356–2364; 2011. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.05.020 (siehe S. 43).
- [116] G. E. P. Box, J. S. Hunter und W. G. Hunter; *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*; 2. Aufl. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005; ISBN: 978-0-471-71813-0 (siehe S. 44).
- [117] A. Saltelli, K. Chan und E. Scott; *Sensitivity Analysis*. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd., 2008; ISBN: 978-0-470-74382-9 (siehe S. 44, 46).

- [118] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana und S. Tarantola; *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2008; ISBN: 978-0-470-05997-5 (siehe S. 44, 45, 48).
- [119] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo und M. Ratto; *Sensitivity Analysis in Practice - A Guide to Assessing Scientific Models*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2004; ISBN: 978-0-470-87093-8 (siehe S. 44).
- [120] P. Andre; „Total energy use in buildings. Analysis and evaluation methods. Final Report Annex 53 Volume 6: Energy performance analysis“; International Energy Agency; Techn. Ber.; Nov. 2013; abgerufen am: 12.3.2015. Adresse: http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Appendix_Volume_6.pdf (siehe S. 45).
- [121] Burhenne, Jacob und Henze; „Sampling based on Sobol’ Sequences for monte carlo techniques applied to building simulations“; in *Proceedings of the 12th IBPSA Building Simulation Conference*; International Building Performance Simulation Association; Nov. 2011, S. 1816–1823. Adresse: www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1590.pdf (siehe S. 45).
- [122] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto und S. Tarantola; „Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index“; *Computer Physics Communications*; Bd. 181; Nr. 2, S. 259–270; 2010. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018 (siehe S. 45, 49).
- [123] I. Sobol; „Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates“; *Mathematics and Computers in Simulation*; Bd. 55; Nr. 1-3, S. 271–280; 2001; The Second {IMACS} Seminar on Monte Carlo Methods. DOI: 10.1016/S0378-4754(00)00270-6 (siehe S. 46).
- [124] M. J. Jansen; „Analysis of variance designs for model output“; *Computer Physics Communications*; Bd. 117; Nr. 1-2, S. 35–43; 1999. DOI: 10.1016/S0010-4655(98)00154-4 (siehe S. 49).
- [125] A. Saltelli und S. Tarantola; „On the relative importance of input factors in mathematical models: Safety assessment for nuclear waste disposal“; *Journal of the American Statistical Association*; Bd. 97; Nr. 459, S. 702–709; 2002. DOI: 10.1198/016214502388618447 (siehe S. 49).
- [126] I. Sobol; „Global sensitivity analysis indices for the investigation of nonlinear mathematical models“; *Matematicheskoe Modelirovanie*; Nr. 19, S. 23–24; 2007; in Russian (siehe S. 49).
- [127] U.S. Department of Energy. (Juli 2014). Energy Plus V8.1. English. abgerufen am: 8.7.2014; Adresse: <https://energyplus.net/> (siehe S. 54).
- [128] H. Barreto und F. Howland. (Juli 2006). Excel Add-In: OLS Regression and OLSReg Function. English. abgerufen am: 14.11.2015; Adresse: <http://www3.wabash.edu/econometrics/EconometricsBook/Basic%20Tools/ExcelAddIns/OLSRegression.htm> (siehe S. 59).
- [129] European Commission - Joint Research Centre: Institute for the Protection and Security of the Citizen; *SimLab 2.2*; 2006. Adresse: <http://ipsc.jrc.ec.europa.eu/?id=756> (siehe S. 59).
- [130] Y. Chalabi, C. Dutang, P. Savicky und D. Wuertz; *Toolbox for Pseudo and Quasi Random Number Generation and RNG Tests*; geprüft am: 10.01.2015; Dez. 2014. Adresse: <http://CRAN.R-project.org/package=randtoolbox> (siehe S. 60).

- [131] U.S. Department of Energy. (711 2013). EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Loads Test from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 - EnergyPlus Version: 8.1.0.009. English. abgerufen am: 5.3.2016; Adresse: <https://energyplus.net/testing> (siehe S. 91).
- [132] R Core Team; *R: A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing; Vienna, Austria, 2015. Adresse: <http://www.R-project.org/> (siehe S. 227, 228).
- [133] J. Gross und U. Ligges; *nortest: Tests for Normality*; R package version 1.0-3; 2015. Adresse: <http://CRAN.R-project.org/package=nortest> (siehe S. 227).
- [134] T. W. Anderson und D. A. Darling; „Asymptotic Theory of Certain "Goodness of Fit"Criteria Based on Stochastic Processes“; English; *The Annals of Mathematical Statistics*; Bd. 23; Nr. 2, 1952. Adresse: <http://www.jstor.org/stable/2236446> (siehe S. 227).
- [135] S. S. Shapiro und M. B. Wilk; „An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)“; English; *Biometrika*; Bd. 52; Nr. 3/4, 1965. Adresse: <http://www.jstor.org/stable/2333709> (siehe S. 227).
- [136] A. C. A. Hope; „ASimplified Monte Carlo Significance Test Procedure“; English; *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*; Bd. 30; Nr. 3, 1968. Adresse: <http://www.jstor.org/stable/2984263> (siehe S. 227).
- [137] M. S. Bartlett; „Properties of Sufficiency and Statistical Tests“; *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*; Bd. 160; Nr. 901, S. 268–282; 1937. DOI: 10.1098/rspa.1937.0109 (siehe S. 228).
- [138] H. Levene; „Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling“; in; S. U. Press, Hrsg. Ingram Olkin, Harold Hotelling u. a., 1960; Kap. Robust tests for the equality of variance, S. 278–292 (siehe S. 228).
- [139] J. L. Gastwirth, Y. R. Gel, W. L. W. Hui, W. Miao und K. Noguchi; *lawstat: Tools for Biostatistics, Public Policy, and Law*; R package version 2.5; 2015. Adresse: <http://CRAN.R-project.org/package=lawstat> (siehe S. 228).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Betrachtungsraum: Stadt - Quartier - Gebäude - Raum - Bauteil	2
1.2	Energiebedarf der Flächen über die Baualtersklassen am Beispiel der LMU München	4
1.3	Mittlerer Zeitbedarf zur Erstellung eines Energiebedarfsausweises (l.) und dessen Abhängigkeit von der Gebäudegröße (r.) (Eigene Grafiken; Datenquelle - links: [34] [35]; rechts: [34] [33])	7
1.4	Ablauf der Arbeit	9
2.1	Anforderungen an ein Gebäude/eine Anlage (Eigene Grafik; Datenquelle: [11] [42])	12
2.2	Gebäudelebenszyklus mit Beeinflussbarkeit und Projektwissen (Eigene Grafik; Datenquelle: [44], [47], [45] zit. n. [11], [11])	13
2.3	Optimierungsprozess innerhalb der Planung nach HOAI	14
2.4	Empfohlener Arbeitsprozess beim Einsatz von Bewertungswerkzeugen UQ = Unsicherheitsquantifizierung, UA = Unsicherheitsanalyse, SA = Sensitivitätsana- lyse, OPT = Optimierung; (Eigene Grafik; Datenquelle: [50])	15
2.5	Qualitäten in der Portfoliobetrachtung auf Basis von Gebäudevergleichskennwerten .	17
2.6	Haupteinflussfaktoren auf den Energiebedarf	18
2.7	Energiebezugsgrenzen (Eigene Grafik; Datenquelle: [71] [72])	21
2.8	Benchmarking Prozess (Eigene Grafik; Datenquelle: [76] [89])	23
2.9	Energiebestimmungsverfahren für bestehende Gebäude (Eigene Grafik; Datenquelle: [90])	25
3.1	Nutzen von Mittelwert und Standardabweichung in der Bewertung anhand der Nor- malverteilung	34
3.2	Regression zur Darstellung eines Effekts von einer unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable; mit Effekt (l.) und ohne Effekt (r.)	35
3.3	Abhängige (l.) und unabhängige (r.) Variablen	42
3.4	Unterschiedliche Qualitäten der Erhebungsmethoden von Daten	43
3.5	Schema der Monte Carlo Simulation mit Eingangsmatrix und Ergebnisvektor	45
3.6	Identifikation von einflussreichen Parametern und deren Überführung in eine Rangliste	47
3.7	Exemplarische Erzeugung der Matrizen zur Bestimmung der Sensitivitätsindizes . . .	48
4.1	Prinzip der Referenzraummethode	51
4.2	Modularer Aufbau der Referenzraummethode und deren Programmablauf	53
4.3	Studienaufbau	55
4.4	Ablaufschema zur Softwareumsetzung der Referenzraummethode	58

4.5	Interpretationsmöglichkeit der berechneten Ergebnisse	61
5.1	Studienkonzept zur Analyse des Effekts des fehlenden Gebäudegeometriemodells auf den Gebäudeenergiebedarf	64
5.2	Typischer Zweibund als Referenzgebäude mit Auswahl der Referenzzonen	64
5.3	Box-Plot des Heizenergiebedarfs der RRM und des Gebäudemodells	69
5.4	Box-Plot des Kühlenergiebedarfs der RRM und des Gebäudemodells	69
5.5	Vergleich der Abweichungen des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) der RRM gegenüber dem Gebäudemodell	70
5.6	Histogramm (o.) und Normalverteilung (u.) der relativen Abweichung des Heizenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell	71
5.7	Histogramm (o.) und Normalverteilung (u.) der relativen Abweichung des Kühlenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell	72
5.8	Geordnete Dauerlinie zur Darstellung der relativen Abweichung der RRM zum Gebäudemodell für den Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarf (r.)	75
5.9	Beziehung zwischen absoluter und relativer Abweichung von RRM zum Gebäudemodell für den Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarf (r.)	75
5.10	Konvergenz der Mittelwerte des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) des Gebäudemodells unter Berücksichtigung verschiedener Bandbreiten einzelner Eingangsparameter	78
5.11	Geordnete Dauerlinie zur Darstellung der relativen Abweichung der RRM zum Gebäudemodell für den Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarf (r.) bei unterschiedlichen Bandbreiten der Untersuchungsparameter	79
5.12	Beziehung zwischen absoluter und relativer Abweichung des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) im Modell F05 für verschiedene Bandbreiten der Eingangsparameter	80
5.13	Boxplots (o.) für Heiz- und Kühlenergiebedarf der Referenzzone und Randzonen sowie die Mittelwerte aller relevanten Zonen (u.) in Abhängigkeit der Orientierung und des Stockwerks für den Testfall F05-V02	81
5.14	Auswirkung des A/V-Verhältnisses auf die mittlere relative Abweichung des Heiz-(l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) über alle bisher durchgeführten Versuchsreihen	83
5.15	Koeffizienten des linearen Regressionsmodells zur Fehleranpassung der Modelle	85
5.16	Auswirkungen des Heiz- und Kühltemperatursollwertes sowie der daraus resultierende Abstand auf das Korrekturverfahren auf die Versuche F01 bis F04	85
5.17	Relative Abweichung des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) nach Korrektur für das Basismodell F05	87
5.18	Beziehung zwischen absoluter und relativer Abweichung des Heiz- (l.) und Kühlenergiebedarfs (r.) nach Korrektur des Basismodells F05	87
5.19	Vergleich der standardisierten Regressionskoeffizienten zwischen RRM und Gebäudemodell für den Heiz-(l.) und Kühlenergiebedarf (r.)	90
6.1	Studienkonzept zur Analyse von Nutzungseffekte auf den Nutzenergiebedarf eines Raumes bei Variation ausgewählter Parameter	94
6.2	Radar-Chart Sensitivitätsindizes für den Heizenergiebedarf der Verkehrsfläche mit Nutzung 1	98

6.3	Normalverteilung des Heizenergiebedarfs für Verkehrsfläche mit süd-orientierter Fassade und Fensterflächenanteil W1	98
6.4	Anteile an der Streuung des Heizenergiebedarfs für Verkehrsflächen	99
6.5	Radar-Chart Sensitivitätsindizes für den Heizenergiebedarf der büroähnlichen Nutzung mit Nutzung 1	101
6.6	Normalverteilung des Heizenergiebedarfs für büroähnliche Nutzung mit süd-orientierter Fassade und Fensterflächenanteil W1	102
6.7	Anteile an der Streuung des Heizenergiebedarfs für büroähnliche Nutzung	104
6.8	Radar-Chart Sensitivitätsindizes des Heizenergiebedarfs für Hörsaal Nutzung 1 mit Fensterlüftung (o.) und mechanischer Belüftung (u.)	107
6.9	Normalverteilung des Heizenergiebedarfs für den Nutzungstyp Hörsaal mit süd-orientierter Fassade und Fensterflächenanteil W1	108
6.10	Anteile an der Streuung des Heizenergiebedarfs für den Hörsaal	110
6.11	Radar-Chart Sensitivitätsindizes des Heiz- (o.) und Kühlenergiebedarfs (u.) für Labor Forschung Nutzung 1	114
6.12	Normalverteilung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs für den Nutzungstyp Labor Forschung mit süd-orientierter Fassade und Fensterflächenanteil W1	115
6.13	Anteile an der Streuung des Heizenergiebedarfs für Labor Forschung	116
6.14	Gewichtung der Effekte bei unterschiedlichen Wärmedämmstandards oWSchV-EnEV und gleichem Fensterflächenanteil W1	120
6.15	Gewichtung der Effekte bei unterschiedlichen Fensterflächenanteilen W1-W3 und gleichem Wärmedämmstandard EnEV	122
6.16	Einflussstärken der Kategorien und Variationskoeffizienten aus allen Versuchen der Nutzung 1	125
7.1	Studienkonzept zur Bewertung der Berechnungsgenauigkeit der RRM gegenüber einem detaillierten Gebäudemodell unter Beachtung der Erkenntnisse hinsichtlich Gebäudehülle aus Kapitel 5 und Nutzungseffekte aus Kapitel 6	128
7.2	Vergleich des mittleren Heizenergiebedarfs zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell	131
7.3	Häufigkeiten der relativen Abweichungen des Heizenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell	133
7.4	Verhalten des Heizenergiebedarfs in Abhängigkeit von der Umgebungssituation	135
7.5	Vergleich des mittleren Kühlenergiebedarfs zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell	136
7.6	Häufigkeiten der relativen Abweichungen des Kühlenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell	139
7.7	Verhalten des Kühlenergiebedarfs in Abhängigkeit von der Umgebungssituation	139
7.8	Vergleich des mittleren Energiebedarfs für elektrische Geräte zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell	140
7.9	Vergleich der Mittelwerte der Gesamtenergie zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell	141

7.10	Vergleich der standardisierten Regressionskoeffizienten zur qualitativen Bewertung der Eingangsparameter aller Case-Studies	143
7.11	Vergleich der 1st-Order Sensitivitätsindizes S_i zur quantitativen Bewertung ausgewählter Eingangsparameter aller Case-Studies mit Sample 1	144
7.12	Vergleich der Berechnungszeit zwischen Gebäudemodell und RRM	146
A.1	Quantile-Quantile Plot des Heizenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F01 - F04	180
A.2	Quantile-Quantile Plot des Heizenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F05 - F08	181
A.3	Quantile-Quantile Plot des Heizenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F09 - F12	182
A.4	Quantile-Quantile Plot des Kühlenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F01 - F04	183
A.5	Quantile-Quantile Plot des Kühlenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F05 - F08	184
A.6	Quantile-Quantile Plot des Kühlenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F09 - F12	185
A.7	Boxplot des Heizenergiebedarfs des RRM-Modells und des Gebäudemodells	186
A.8	Boxplot des Kühlenergiebedarfs des RRM-Modells und des Gebäudemodells	186
C.1	Quantile-Quantile Plot der Heizenergie im Gebäudemodell	217
C.2	Quantile-Quantile Plot der Heizenergie im RRM-Modell	218
C.3	Quantile-Quantile Plot der Kühlenergie im Gebäudemodell	219
C.4	Quantile-Quantile Plot der Kühlenergie im RRM-Modell	219
C.5	Vergleich der Beleuchtungsenergie zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell	222
C.6	Vergleich der 1st-Order Sensitivitätsindizes S_i zur quantitativen Bewertung ausgewählter Eingangsparameter aller Case-Studies mit Sample 2	223
C.7	Vergleich des Rankings der wichtigsten Einflussparameter auf den Heizenergiebedarf	224
C.8	Vergleich des Rankings der wichtigsten Einflussparameter auf den Kühlenergiebedarf	225
C.9	Vergleich des Rankings der wichtigsten Einflussparameter auf den Strombedarf	226

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich von Bewertungsmethoden (Eigene Tabelle; Datenquelle: [106] Tab. 1 & 2)	28
3.1	Eingesetzte statistische Testverfahren	38
3.2	Wahrscheinlichkeitsverteilung von Parametern (Eigene Tabelle; Datenquelle: [112] [50])	41
5.1	Grundlegende Informationen zum Referenzgebäude	65
5.2	Wertebereich der Untersuchungsparameter aus den Kategorien statische und dynamische baukonstruktionsabhängige Parameter	66
5.3	Kurzbeschreibung der Simulationsmodelle	66
5.4	Wertebereich der Untersuchungsparameter aus den Kategorien statische und dynamische baukonstruktionsabhängige Parameter für die Versuche F05(-Basis), F05-V01 und F05-V02	77
5.5	Auswirkung der auftretenden Differenzen zwischen RRM und Gebäudemodell ohne und mit Korrekturfaktor auf Basis der Effektgröße	88
5.6	Zusammenfassung der statistischen Tests zur Überprüfung auf Unterschiede der Mittelwerte und Standardabweichungen zwischen Gebäudemodell und RRM	89
6.1	Raumgeometrien und Eigenschaften für die Simulationsmodelle der verschiedenen Nutzungsarten	95
6.2	Untersuchungsparameter für die Analyse von unterschiedlichen Nutzungen	95
6.3	Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Heizenergiebedarf für eine süd-orientierte Verkehrsfläche	100
6.4	Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Heizenergiebedarf für eine süd-orientierte Büronutzung	105
6.5	Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Heizenergiebedarf für einen südorientierten Hörsaal	112
6.6	Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Heizenergiebedarf für ein süd-orientiertes Laborforschung	118
6.7	Ergebnisse der Sensitivitätsstudie Kühlenergiebedarf für ein süd-orientiertes Laborforschung	118
7.1	Beschreibung der Demonstrationsgebäude mit Standort München	129
7.2	Heizenergiebedarf: Korrelationskoeffizienten zwischen RRM und Gebäudemodell nach Pearson bzw. Spearman	134
7.3	Kühlenergiebedarf: Korrelationskoeffizienten zwischen RRM und Gebäudemodell nach Pearson bzw. Spearman	138
7.4	Zusammenfassung der statistischen Tests über alle Case-Studies	142
A.1	Relative Abweichungen der A/V-Studie zwischen RRM und Gebäudemodell	187
A.2	Koeffizienten der linearen Regression der betrachteten Versuchsreihe	187

A.3	Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Heizenergiebedarfs	188
A.4	Test der Modelle auf gleiche Varianz des Heizenergiebedarfs	188
A.5	Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Heizenergiebedarfs	189
A.6	Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Kühlenergiebedarfs	189
A.7	Test der Modelle auf gleiche Varianz des Kühlenergiebedarfs	190
A.8	Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Kühlenergiebedarfs	190
A.9	Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Heizenergiebedarfs nach Korrektur	191
A.10	Test der Modelle auf gleiche Varianz des Heizenergiebedarfs nach Korrektur	191
A.11	Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Heizenergiebedarfs nach Korrektur . . .	191
A.12	Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur	192
A.13	Test der Modelle auf gleiche Varianz des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur	192
A.14	Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur . . .	192
A.15	Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur und Mindestwert 5 kWh/m ² a	193
A.16	Test der Modelle auf gleiche Varianz des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur und Mindestwert 5 kWh/m ² a	193
A.17	Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur und Mindestwert 5 kWh/m ² a	193
A.18	Auswirkung der auftretenden Differenzen des Kühlenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell bei Festlegung eines minimalen Gebäudeenergiebedarfs von 5 kWh/m ² a	194
B.1	Allgemeine Eingangsparameter Baustandard und Dimensionen Fenster	195
B.2	Eingabeparameter natürlich belüfteter Nutzungsarten: Verkehrsfläche und büroähnliche Nutzung	195
B.3	Eingabeparameter natürlich belüfteter Nutzungsarten: Hörsaal	196
B.4	Eingabeparameter mechanisch belüfteter Nutzungsarten: Hörsaal und Labor Forschung	196
B.5	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Verkehrsfläche Nutzung 1	197
B.6	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Verkehrsfläche Nutzung 2	198
B.7	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Büro ohne Nutzung	199
B.8	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Büro Nutzung 1	200
B.9	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Büro Nutzung 2	201
B.10	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Hörsaal ohne Nutzung	202
B.11	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Hörsaal Nutzung 1 Fensterlüftung	203
B.12	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Hörsaal Nutzung 2 Fensterlüftung	204
B.13	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Hörsaal Nutzung 1 mechanisch belüftet . . .	205
B.14	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Hörsaal Nutzung 2 mechanisch belüftet . . .	206
B.15	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Labor Forschung Nutzung 1	207
B.16	Sensitivitätsindizes Kühlenergiebedarf: Labor Forschung Nutzung 1	208
B.17	Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Labor Forschung Nutzung 2	209
B.18	Sensitivitätsindizes Kühlenergiebedarf: Labor Forschung Nutzung 2	210
C.1	Randbedingungen Case-Study 1 - Sample 1	211
C.2	Randbedingungen Case-Study 1 - Sample 2	212

C.3	Randbedingungen Case-Study 2 - Sample 1	213
C.4	Randbedingungen Case-Study 2 - Sample 2	214
C.5	Randbedingungen Case-Study 3 - Sample 1	215
C.6	Randbedingungen Case-Study 3 - Sample 2	216
C.7	Tests auf Normalverteilung der Heizenergie über alle Case-Studies	220
C.8	Tests auf Gleichheit der Varianzen der Heizenergien über alle Case-Studies	220
C.9	Tests auf Gleichheit der Mittelwerte der Heizenergie über alle Case-Studies	220
C.10	Tests auf Normalverteilung der Kühlenergie über alle Case-Studies	221
C.11	Tests auf Gleichheit der Varianzen der Kühlenergien über alle Case-Studies	221
C.12	Tests auf Gleichheit der Mittelwerte der Kühlenergie über alle Case-Studies	221

Anhang

A Analysedaten der baukonstruktionsabhängigen Parameter

A.1 QQ-Plots zur Prüfung auf Normalverteilung

Die Betrachtung der nachfolgenden Quantile-Quantile Plots zeigt, dass für den Heizenergiebedarf eine Normalverteilung auf Basis der grafischen Werteverteilung innerhalb der Stichprobe für die Versuche F01 bis F012 angenommen werden kann. Zu den Rändern der Stichprobe hin nimmt die Ähnlichkeit zu einer Normalverteilung stärker ab.

Für den Kühlenergiebedarf zeigt sich ein anderes Bild. Die Verteilung ist deutlich zu einer Normalverteilung für die Fälle F01 bis F09 unterschiedlich. Dies ist auf die Häufung von geringen Kühlenergiebedarfswerten bzw. sogar auf die Nullwerte der Berechnungen zurückzuführen, was zu einer Deformierung der Verteilung am Ursprung (0) der Grafik führen würde. Weiter führt das vereinzelte und lokale Auftreten des Kühlenergiebedarfs zu sehr geringen Energiemengen, die die Frage eröffnen, ob überhaupt eine Kühlung vorgesehen wird.

Für die Versuche F10 bis F12 ergibt sich durch die erzwungene Luftkonditionierung ein höherer Kühlenergiebedarf, der über die Stichprobe durchwegs eine Ähnlichkeit zur Normalverteilung aufweist. Erst zu den höheren Energiewerten ergibt sich eine deutliche Abweichung zur Normalverteilung.

Unter Beachtung der Boxplots, werden einige in den Randbereichen liegenden Werte als Ausreißer bzw. Extremwert identifiziert.

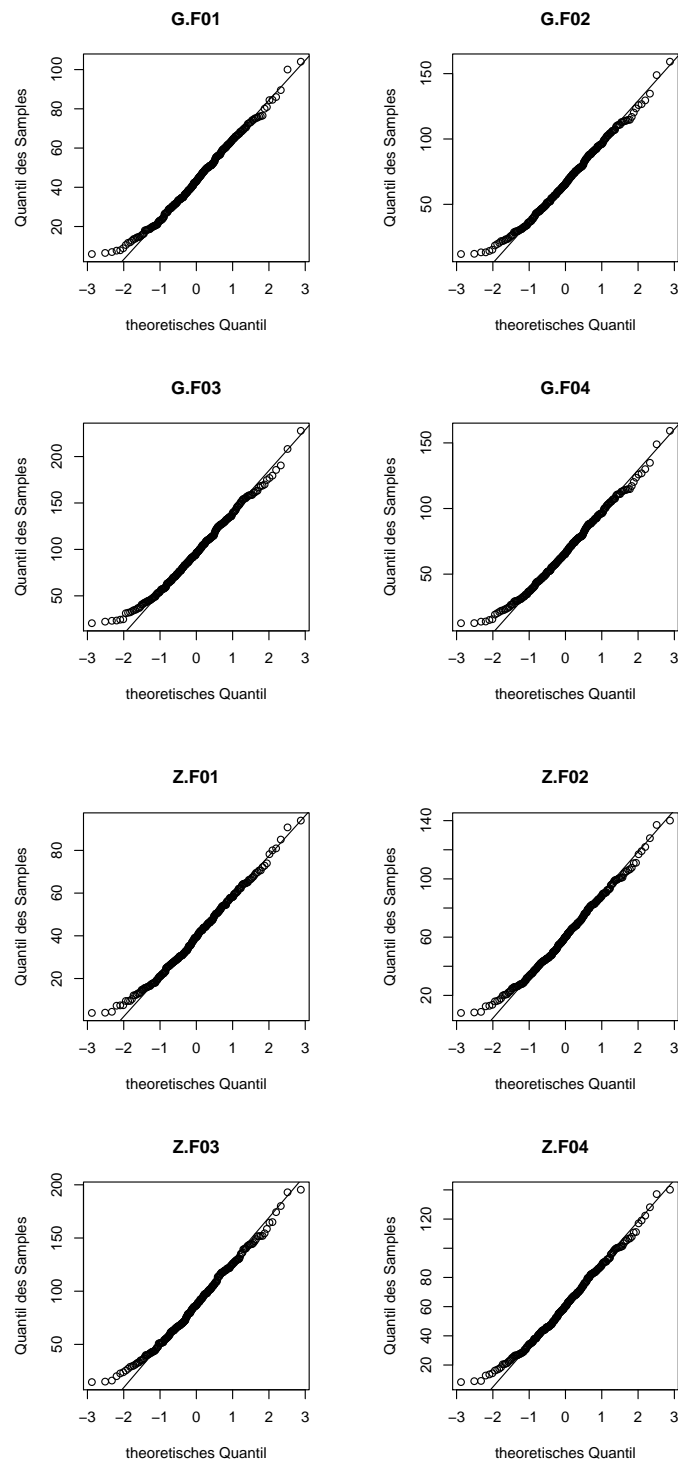


Abbildung A.1: Quantile-Quantile Plot des Heizenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F01 - F04

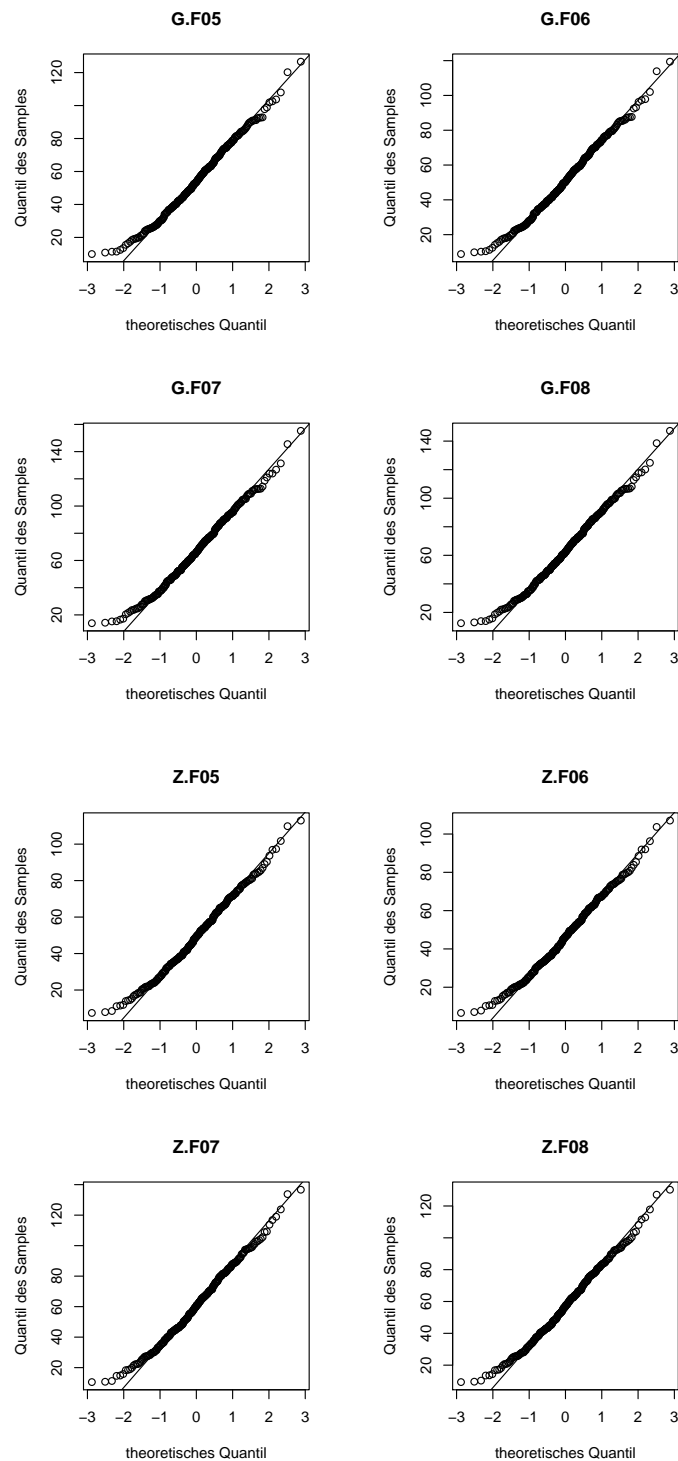


Abbildung A.2: Quantile-Quantile Plot des Heizenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F05 - F08

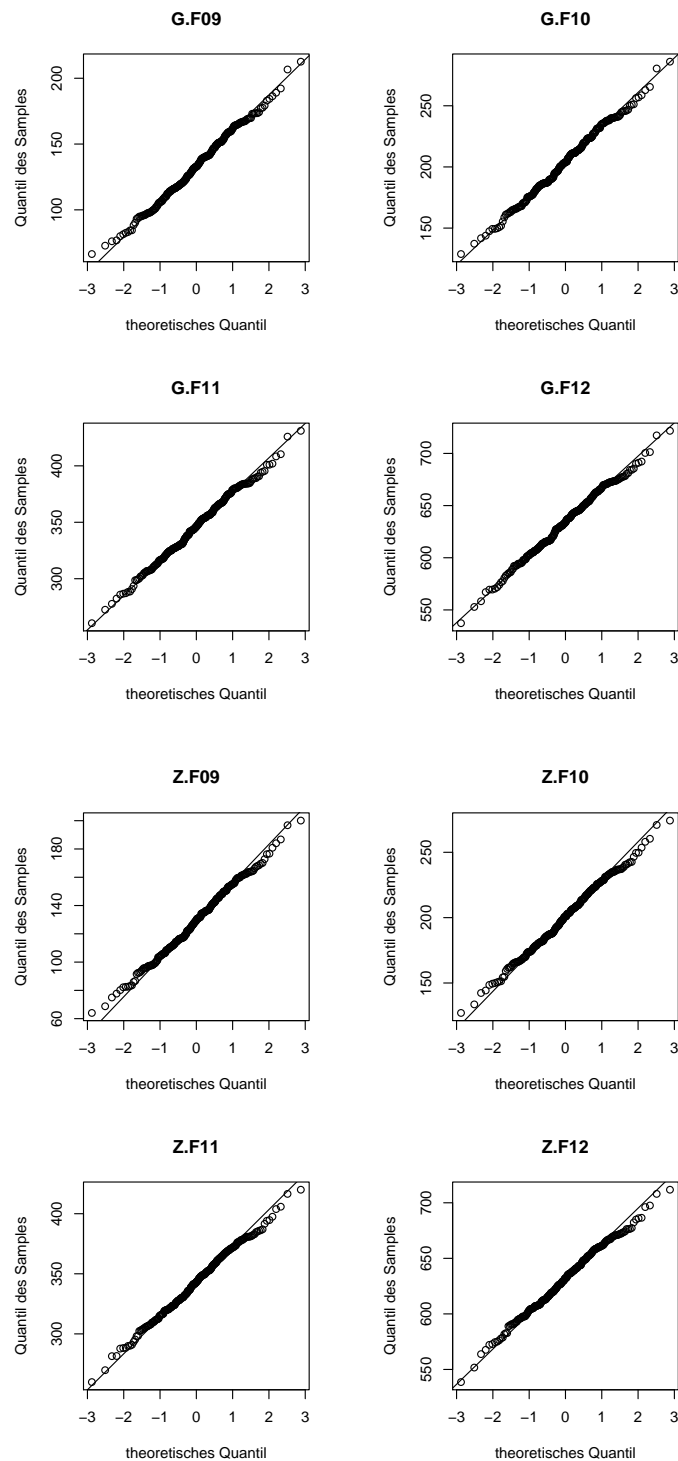


Abbildung A.3: *Quantile-Quantile Plot des Heizenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F09 - F12*

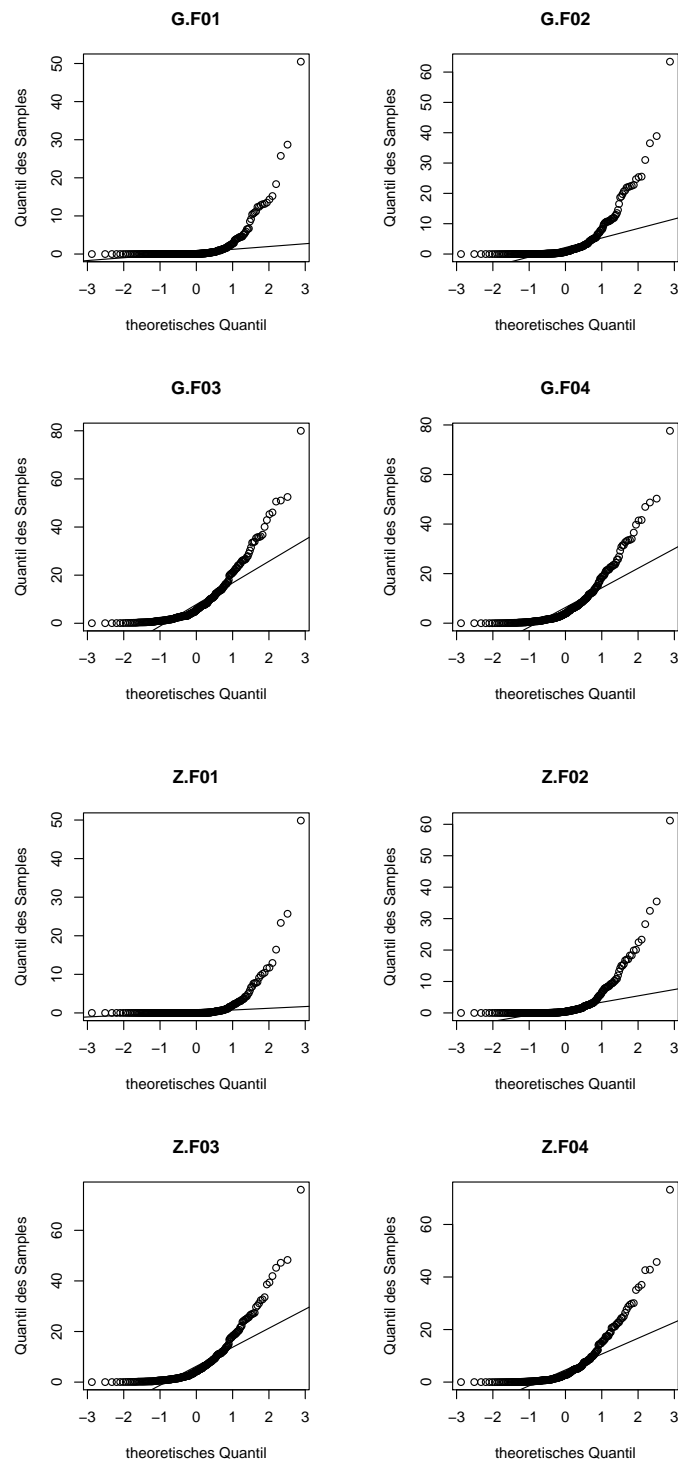


Abbildung A.4: Quantile-Quantile Plot des Kühlenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F01 - F04

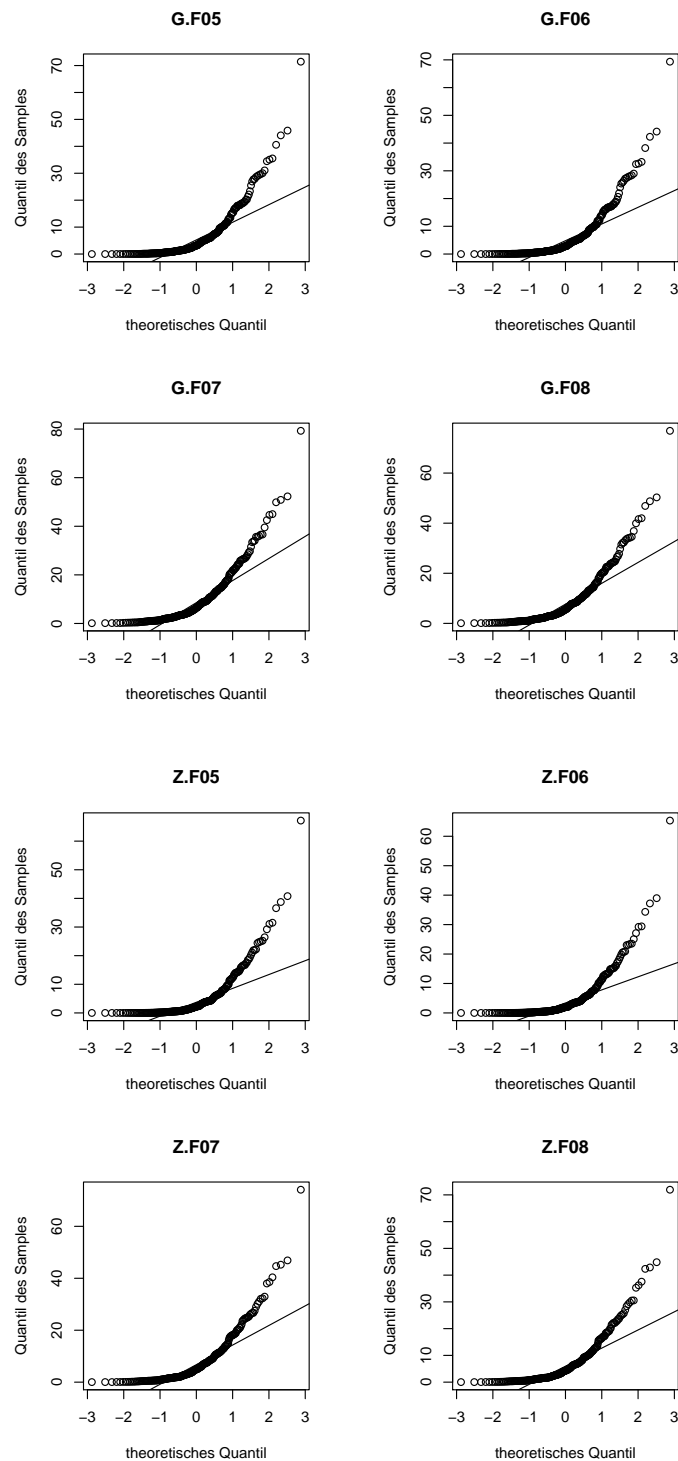


Abbildung A.5: Quantile-Quantile Plot des Kühlenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F05 - F08

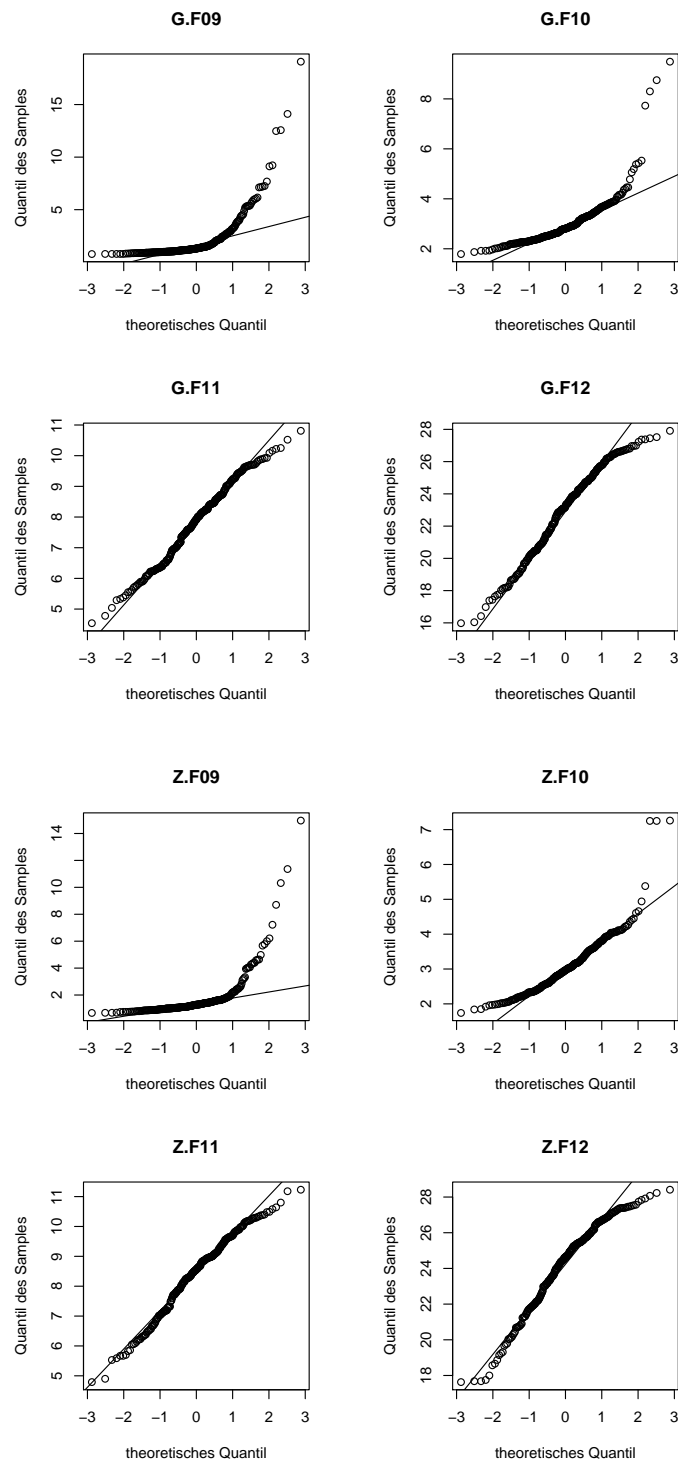


Abbildung A.6: Quantile-Quantile Plot des Kühlenergiebedarfs der Gebäudemodelle (G.F) und RRM-Modelle (Z.F) F09 - F12

A.2 Boxplots der berechneten Heiz- und Kühlenergie

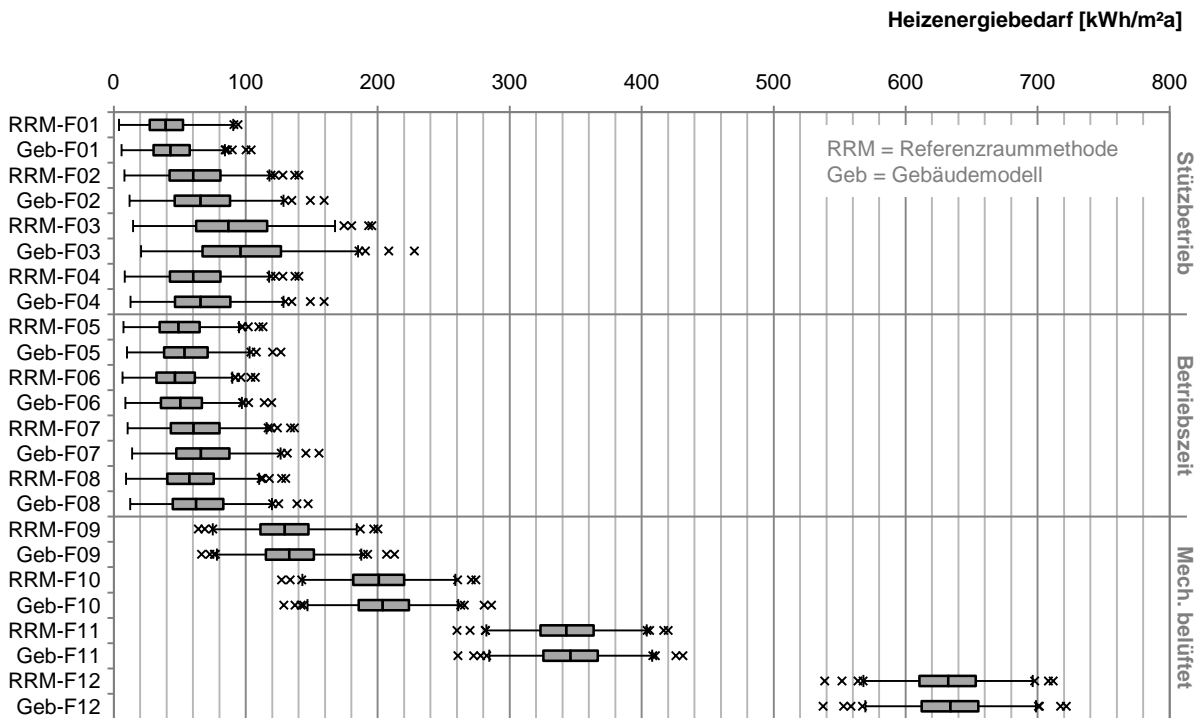


Abbildung A.7: Boxplot des Heizenergiebedarfs des RRM-Modells und des Gebäudemodells

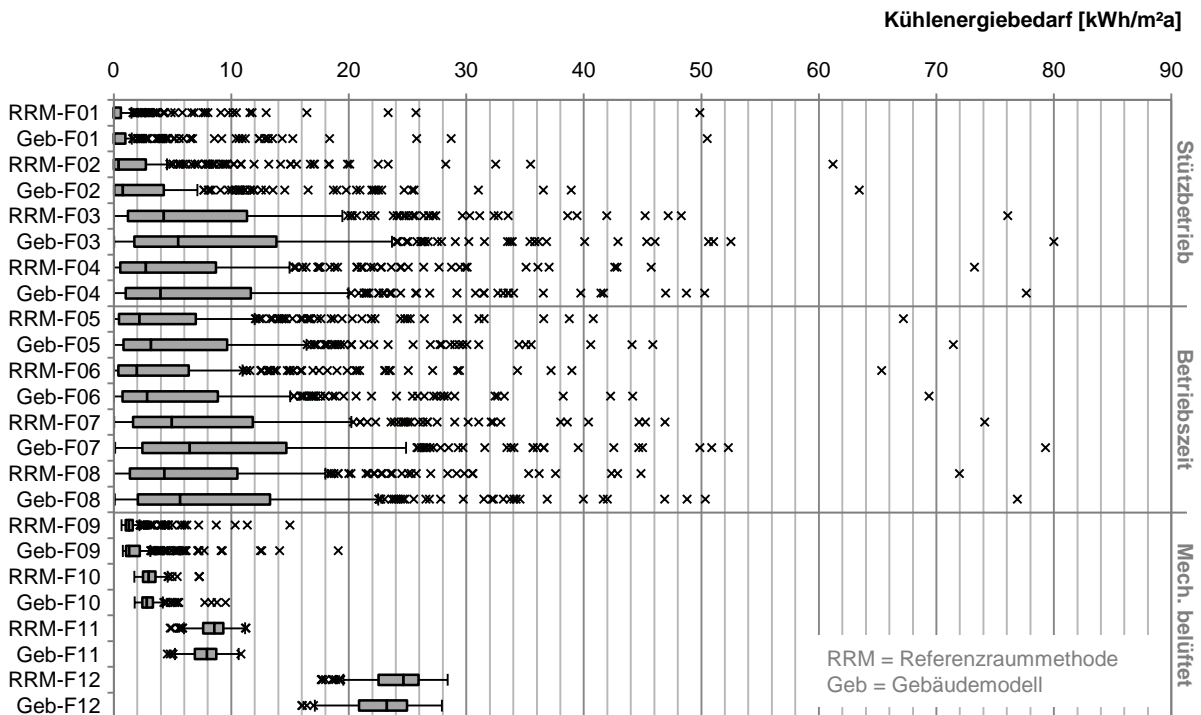


Abbildung A.8: Boxplot des Kühlenergiebedarfs des RRM-Modells und des Gebäudemodells

A.3 Basisdaten der Regressionskoeffizienten aller Versuchsmodelle

Tabelle A.1: Relative Abweichungen der A/V-Studie zwischen RRM und Gebäudemodell

Versuch	rel. Abweichung Heizenergiebedarf [%]					rel. Abweichung Kühlenergiebedarf [%]					
	A/V:	0,75	0,66	0,51	0,42	0,30	0,75	0,66	0,51	0,42	0,30
F01		-33,5	-26,1	-21,1	-8,8	-5,6	-85,4	-80,0	-78,8	-57,0	-54,6
F02		-32,9	-25,8	-20,7	-9,0	-5,7	-82,2	-76,0	-73,4	-49,0	-45,2
F03		-32,2	-25,3	-20,3	-9,1	-5,7	-69,9	-60,6	-55,6	-24,4	-19,6
F04		-32,8	-25,6	-20,6	-8,9	-5,6	-75,3	-67,5	-62,9	-34,9	-29,3
F05		-31,6	-24,7	-19,8	-8,6	-5,4	-75,0	-67,2	-62,7	-35,2	-29,7
F06		-31,9	-24,9	-20,0	-8,6	-5,4	-74,1	-66,1	-61,5	-34,0	-28,7
F07		-31,3	-24,5	-19,6	-8,7	-5,4	-68,0	-58,7	-53,1	-24,0	-18,4
F08		-31,6	-24,8	-19,8	-8,7	-5,4	-67,4	-58,0	-52,5	-23,5	-18,1
F09		-12,3	-9,0	-7,0	-2,6	-1,6	-31,0	-29,7	-29,3	-13,2	-10,8
F10		-7,7	-5,5	-4,2	-1,5	-0,9	4,3	-0,7	-4,4	-0,9	-1,7
F11		-4,2	-2,9	-2,2	-0,8	-0,5	25,6	16,5	10,5	4,7	2,4
F12		-1,8	-1,3	-1,0	-0,3	-0,2	21,9	14,5	9,9	3,8	2,1
F05-V01		-36,3	-30,6	-23,9	-15,0	-8,8	-58,7	-47,5	-41,6	-12,5	-9,7
F05-V02		-35,4	-29,9	-23,3	-14,7	-8,5	-60,1	-49,1	-43,1	-13,3	-10,3

Tabelle A.2: Koeffizienten der linearen Regression der betrachteten Versuchsreihe

Versuch	Heizenergiebedarf				Kühlenergiebedarf			
	R ²	Kor(x,y)	b ₁	b ₀	R ²	Kor(x,y)	b ₁	b ₀
F01	0,96	-0,98	-0,63	0,14	0,85	-0,92	-0,73	-0,33
F02	0,96	-0,98	-0,62	0,14	0,87	-0,93	-0,87	-0,19
F03	0,96	-0,98	-0,60	0,13	0,89	-0,94	-1,18	0,16
F04	0,96	-0,98	-0,62	0,14	0,89	-0,94	-1,07	0,03
F05	0,96	-0,98	-0,59	0,13	0,89	-0,95	-1,06	0,02
F06	0,96	-0,98	-0,60	0,14	0,89	-0,95	-1,06	0,03
F07	0,96	-0,98	-0,59	0,13	0,90	-0,95	-1,16	0,17
F08	0,96	-0,98	-0,59	0,13	0,90	-0,95	-1,15	0,17
F09	0,96	-0,98	-0,24	0,06	0,80	-0,89	-0,49	0,03
F10	0,95	-0,98	-0,15	0,04	0,39	0,62	0,11	-0,06
F11	0,95	-0,98	-0,08	0,02	0,95	0,97	0,51	-0,15
F12	0,95	-0,97	-0,04	0,01	0,95	0,98	0,44	-0,13
F05-V01	0,99	-0,99	-0,62	0,10	0,90	-0,95	-1,15	0,27
F05-V02	0,99	-0,99	-0,60	0,09	0,90	-0,95	-1,17	0,27

lineares Modell: $f(x) = b_1x + b_0$

A.4 Statistische Testverfahren für die RRM und das Gebäudemodell ohne Korrektur

Tests für den Heizenergiebedarf

Tabelle A.3: Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Heizenergiebedarfs

Reihe	Modell	Anderson-Darling Test			Shapiro-Wilk Test		
		$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p
F01	Geb	nein	0,501	0,206	ja	0,989	0,046
	RRM	nein	0,525	0,180	nein	0,989	0,058
F02	Geb	nein	0,532	0,173	ja	0,988	0,034
	RRM	nein	0,549	0,156	nein	0,989	0,050
F03	Geb	nein	0,555	0,150	ja	0,988	0,029
	RRM	nein	0,561	0,145	nein	0,989	0,051
F04	Geb	nein	0,540	0,165	ja	0,988	0,032
	RRM	nein	0,556	0,150	ja	0,989	0,049
F05	Geb	nein	0,524	0,180	ja	0,988	0,043
	RRM	nein	0,566	0,141	nein	0,989	0,050
F06	Geb	nein	0,531	0,173	ja	0,988	0,042
	RRM	nein	0,574	0,135	ja	0,989	0,048
F07	Geb	nein	0,522	0,182	ja	0,988	0,039
	RRM	nein	0,548	0,157	nein	0,989	0,053
F08	Geb	nein	0,525	0,180	ja	0,988	0,039
	RRM	nein	0,551	0,155	nein	0,989	0,051
F09	Geb	nein	0,368	0,428	nein	0,995	0,595
	RRM	nein	0,369	0,425	nein	0,996	0,696
F10	Geb	nein	0,400	0,359	nein	0,995	0,665
	RRM	nein	0,357	0,452	nein	0,996	0,773
F11	Geb	nein	0,387	0,387	nein	0,996	0,729
	RRM	nein	0,349	0,474	nein	0,996	0,786
F12	Geb	nein	0,404	0,352	nein	0,995	0,666
	RRM	nein	0,370	0,424	nein	0,996	0,695

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 250$;

W = Prüfgröße; Geb = Gebäudemodell; RRM = Referenzraummethode

Tabelle A.4: Test der Modelle auf gleiche Varianz des Heizenergiebedarfs

Reihe	F-Test			Bartlett-Test			Levene-Test		
	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p
F01	nein	1,159	0,244	nein	1,356	0,244	nein	1,368	0,243
F02	nein	1,176	0,200	nein	1,639	0,200	nein	1,612	0,205
F03	nein	1,198	0,155	nein	2,023	0,155	nein	1,970	0,161
F04	nein	1,177	0,199	nein	1,647	0,199	nein	1,621	0,204
F05	nein	1,179	0,195	nein	1,682	0,195	nein	1,663	0,198
F06	nein	1,175	0,204	nein	1,613	0,204	nein	1,611	0,205
F07	nein	1,188	0,176	nein	1,833	0,176	nein	1,781	0,183
F08	nein	1,183	0,185	nein	1,759	0,185	nein	1,724	0,190
F09	nein	1,137	0,311	nein	1,027	0,311	nein	0,974	0,324
F10	nein	1,128	0,344	nein	0,895	0,344	nein	0,843	0,359
F11	nein	1,126	0,349	nein	0,876	0,349	nein	0,823	0,365
F12	nein	1,135	0,318	nein	0,999	0,318	nein	0,892	0,345

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 250$; W = Prüfgröße

Tabelle A.5: Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Heizenergiebedarfs

Reihe	t-Test		
	$\mu_{\text{Geb}} \neq \mu_{\text{RRM}}$	W	p
F01	ja	2,382	0,018
F02	ja	2,526	0,012
F03	ja	2,705	0,007
F04	ja	2,533	0,012
F05	ja	2,554	0,011
F06	ja	2,525	0,012
F07	ja	2,625	0,009
F08	ja	2,590	0,010
F09	nein	1,722	0,086
F10	nein	1,472	0,142
F11	nein	1,179	0,239
F12	nein	0,783	0,434

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$;Stichprobenumfang $n = 250$; W = Prüfgröße**Tests für den Kühlenergiebedarf****Tabelle A.6:** Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Kühlenergiebedarfs

Reihe	Modell	Anderson-Darling Test			Shapiro-Wilk Test		
		$\sigma \neq \sigma_{\text{normal}}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{\text{normal}}$	W	p
F01	Geb	ja	51,268	0,000	ja	0,403	0,000
	RRM	ja	56,292	0,000	ja	0,335	0,000
F02	Geb	ja	35,429	0,000	ja	0,569	0,000
	RRM	ja	39,883	0,000	ja	0,512	0,000
F03	Geb	ja	16,771	0,000	ja	0,772	0,000
	RRM	ja	18,582	0,000	ja	0,746	0,000
F04	Geb	ja	19,874	0,000	ja	0,737	0,000
	RRM	ja	22,853	0,000	ja	0,699	0,000
F05	Geb	ja	21,303	0,000	ja	0,714	0,000
	RRM	ja	24,394	0,000	ja	0,673	0,000
F06	Geb	ja	22,382	0,000	ja	0,700	0,000
	RRM	ja	25,308	0,000	ja	0,659	0,000
F07	Geb	ja	14,672	0,000	ja	0,792	0,000
	RRM	ja	16,548	0,000	ja	0,765	0,000
F08	Geb	ja	15,831	0,000	ja	0,776	0,000
	RRM	ja	17,681	0,000	ja	0,748	0,000
F09	Geb	ja	32,701	0,000	ja	0,575	0,000
	RRM	ja	36,664	0,000	ja	0,520	0,000
F10	Geb	ja	12,681	0,000	ja	0,723	0,000
	RRM	ja	3,366	0,000	ja	0,880	0,000
F11	Geb	ja	0,876	0,025	ja	0,988	0,034
	RRM	ja	1,371	0,001	ja	0,982	0,003
F12	Geb	ja	1,684	0,000	ja	0,974	0,000
	RRM	ja	2,677	0,000	ja	0,959	0,000

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 250$;

W = Prüfgröße; Geb = Gebäudemodell; RRM = Referenzraummethode

Tabelle A.7: Test der Modelle auf gleiche Varianz des Kühlenergiebedarfs

Reihe	F-Test			Bartlett-Test			Levene-Test		
	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p
F01	nein	1,247	0,082	nein	3,029	0,082	nein	0,996	0,319
F02	ja	1,286	0,048	ja	3,927	0,048	nein	1,544	0,215
F03	nein	1,236	0,095	nein	2,784	0,095	nein	1,453	0,229
F04	nein	1,279	0,053	nein	3,754	0,053	nein	1,912	0,167
F05	ja	1,302	0,038	ja	4,313	0,038	nein	2,031	0,155
F06	ja	1,307	0,035	ja	4,435	0,035	nein	1,966	0,162
F07	nein	1,271	0,059	nein	3,556	0,059	nein	1,923	0,166
F08	nein	1,280	0,052	nein	3,777	0,052	nein	1,921	0,166
F09	ja	1,884	0,000	ja	24,529	0,000	ja	5,303	0,022
F10	ja	1,444	0,004	ja	8,350	0,004	nein	0,011	0,916
F11	nein	0,979	0,865	nein	0,029	0,865	nein	0,081	0,776
F12	nein	1,230	0,103	nein	2,661	0,103	nein	3,752	0,053

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 250$; W = Prüfgröße

Tabelle A.8: Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Kühlenergiebedarfs

Reihe	t-Test		
	$\mu_{Geb} \neq \mu_{RRM}$	W	p
F01	nein	1,004	0,316
F02	nein	1,329	0,184
F03	nein	1,602	0,110
F04	nein	1,748	0,081
F05	nein	1,777	0,076
F06	nein	1,716	0,087
F07	nein	1,946	0,052
F08	nein	1,886	0,060
F09	ja	2,363	0,019
F10	nein	-0,513	0,608
F11	ja	-5,185	0,000
F12	ja	-5,579	0,000

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$;

Stichprobenumfang $n = 250$; W = Prüfgröße

A.5 Statistische Testverfahren für die RRM und das Gebäudemodell mit Korrektur

Tests für den Heizenergiebedarf

Tabelle A.9: Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Heizenergiebedarfs nach Korrektur

Reihe	Modell	Anderson-Darling Test			Shapiro-Wilk Test		
		$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p
F05-Basis	Geb	nein	0,524	0,180	ja	0,988	0,043
	RRM	nein	0,566	0,141	nein	0,989	0,0503
F05-V01	Geb	nein	0,614	0,109	nein	0,989	0,066
	RRM	nein	0,747	0,051	ja	0,988	0,036
F05-V02	Geb	nein	0,447	0,279	nein	0,991	0,151
	RRM	nein	0,572	0,136	nein	0,990	0,075
F05-Basis*	Geb	nein	0,524	0,180	ja	0,988	0,043
	RRM	nein	0,566	0,141	nein	0,989	0,0503
F05-V01*	Geb	nein	0,614	0,109	nein	0,989	0,066
	RRM	nein	0,747	0,051	ja	0,988	0,036
F05-V02*	Geb	nein	0,447	0,279	nein	0,991	0,151
	RRM	nein	0,572	0,136	nein	0,990	0,075

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 250$;

W = Prüfgröße; Geb = Gebäudemodell; RRM = Referenzraummethode

*mit Korrekturfaktor

Tabelle A.10: Test der Modelle auf gleiche Varianz des Heizenergiebedarfs nach Korrektur

Reihe	F-Test			Bartlett-Test			Levene-Test		
	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p
F05-Basis	nein	1,179	0,195	nein	1,682	0,195	nein	1,663	0,198
F05-V01	nein	1,231	0,102	nein	2,679	0,102	nein	2,352	0,126
F05-V02	nein	1,131	0,332	nein	0,942	0,332	nein	0,756	0,385
F05-Basis*	nein	0,890	0,359	nein	0,840	0,359	nein	0,928	0,336
F05-V01*	nein	0,930	0,565	nein	0,332	0,565	nein	0,514	0,474
F05-V02*	nein	0,854	0,214	nein	1,544	0,214	nein	1,948	0,163

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 250$; W = Prüfgröße

*mit Korrekturfaktor

Tabelle A.11: Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Heizenergiebedarfs nach Korrektur

Reihe	t-Test		
	$\mu_{Geb} \neq \mu_{RRM}$	W	p
F05-Basis	ja	2,554	0,011
F05-V01	ja	9,979	0,000
F05-V02	ja	14,475	0,000
F05-Basis*	nein	-1,204	0,229
F05-V01*	nein	1,773	0,077
F05-V02*	ja	2,172	0,030

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$;

Stichprobenumfang $n = 250$; W = Prüfgröße

*mit Korrekturfaktor

Tests für den Kühlenergiebedarf

Tabelle A.12: Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur

Reihe	Modell	Anderson-Darling Test			Shapiro-Wilk Test			Chi-Quadrat Test			dF
		$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	
F05-Basis	Geb	ja	21,303	0,000	ja	0,714	0,000	ja	>1000	0,000	8
	RRM	ja	24,394	0,000	ja	0,673	0,000	nein	14	0,077	8
F05-V01	Geb	ja	1,425	0,001	ja	0,978	0,001	nein	11,993	0,152	8
	RRM	ja	1,555	0,001	ja	0,976	0,000	ja	>1000	0,000	8
F05-V02	Geb	ja	1,687	0,000	ja	0,975	0,000	nein	14,208	0,077	8
	RRM	ja	1,725	0,000	ja	0,975	0,000	nein	11,993	0,152	8
F05-Basis*	Geb	ja	21,303	0,000	ja	0,714	0,000	ja	>1000	0,000	8
	RRM	ja	24,394	0,000	ja	0,673	0,000	nein	14	0,077	8
F05-V01*	Geb	ja	1,425	0,001	ja	0,978	0,001	nein	11,993	0,152	8
	RRM	ja	1,554	0,001	ja	0,976	0,000	ja	>1000	0,000	8
F05-V02*	Geb	ja	1,687	0,000	ja	0,975	0,000	nein	14,208	0,077	8
	RRM	ja	1,725	0,000	ja	0,975	0,000	nein	11,993	0,152	8

Anmerkungen:
 Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang n = 250;
 W = Prüfgröße; dF = Freiheitsgrade; Geb = Gebäudemodell; RRM = Referenzraummethode
 *mit Korrekturfaktor

Tabelle A.13: Test der Modelle auf gleiche Varianz des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur

Reihe	F-Test			Bartlett-Test			Levene-Test		
	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p
F05-Basis	ja	1,302	0,038	ja	4,313	0,038	nein	2,031	0,155
F05-V01	nein	1,233	0,099	nein	2,724	0,099	nein	3,012	0,083
F05-V02	nein	1,248	0,081	nein	3,041	0,081	nein	3,401	0,066
F05-Basis*	nein	0,791	0,064	nein	3,422	0,064	nein	0,225	0,635
F05-V01*	ja	0,749	0,023	ja	5,178	0,023	ja	5,195	0,023
F05-V02*	ja	0,758	0,029	ja	4,763	0,029	ja	4,907	0,027

Anmerkungen:
 Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang n = 250; W = Prüfgröße
 *mit Korrekturfaktor

Tabelle A.14: Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur

Reihe	t-Test		
	$\mu_{Geb} \neq \mu_{RRM}$	W	p
F05-Basis	nein	1,777	0,076
F05-V01	ja	5,814	0,000
F05-V02	ja	6,174	0,000
F05-Basis*	nein	-0,165	0,869
F05-V01*	ja	-2,283	0,023
F05-V02*	ja	-2,006	0,045

Anmerkungen:
 Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$;
 Stichprobenumfang n = 250; W = Prüfgröße
 *mit Korrekturfaktor

Tests für den Kühlenergiebedarf mit Mindest-Energiemenge im Gebäudemodell

Tabelle A.15: Test der Versuchsreihen auf Normalverteilung des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur und Mindestwert 5 kWh/m²a

Reihe	Modell	Anderson-Darling Test			Shapiro-Wilk Test			Chi-Quadrat Test			
		$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	dF
F05-Basis	Geb	ja	5,373	0,000	ja	0,798	0,000	ja	3119	0,000	8
	R RM	ja	5,652	0,000	ja	0,776	0,000	nein	7,821	0,451	8
F05-V01	Geb	nein	0,429	0,304	nein	0,989	0,557	nein	2,380	0,967	8
	R RM	nein	0,385	0,388	nein	0,988	0,469	ja	3119	0,000	8
F05-V02	Geb	nein	0,340	0,492	nein	0,989	0,572	nein	7,821	0,451	8
	R RM	nein	0,290	0,605	nein	0,990	0,593	nein	2,380	0,967	8
F05-Basis*	Geb	ja	5,373	0,000	ja	0,798	0,000	ja	3119	0,000	8
	R RM	ja	5,652	0,000	ja	0,776	0,000	nein	7,821	0,451	8
F05-V01*	Geb	nein	0,429	0,304	nein	0,989	0,557	nein	2,380	0,967	8
	R RM	nein	0,384	0,389	nein	0,988	0,471	ja	3119	0,000	8
F05-V02*	Geb	nein	0,340	0,492	nein	0,989	0,572	nein	7,821	0,451	8
	R RM	nein	0,290	0,607	nein	0,990	0,594	nein	2,380	0,967	8

Anmerkungen:
 Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang n = 106; Trashold $\geq 5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
 W = Prüfgröße; dF = Freiheitsgrade; Geb = Gebäudemodell; RRM = Referenzraummethode
 *mit Korrekturfaktor

Tabelle A.16: Test der Modelle auf gleiche Varianz des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur und Mindestwert 5 kWh/m²a

Reihe	F-Test			Bartlett-Test			Levene-Test		
	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p
F05-Basis	nein	1,197	0,358	nein	0,844	0,358	nein	0,484	0,488
F05-V01	nein	1,239	0,274	nein	1,199	0,274	nein	1,522	0,219
F05-V02	nein	1,260	0,238	nein	1,392	0,238	nein	1,735	0,189
F05-Basis*	nein	0,727	0,104	nein	2,646	0,104	nein	0,696	0,405
F05-V01*	nein	0,753	0,147	nein	2,103	0,147	nein	1,935	0,166
F05-V02*	nein	0,765	0,172	nein	1,867	0,172	nein	1,940	0,165

Anmerkungen:
 Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang n = 106; W = Prüfgröße; Trashold $\geq 5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
 *mit Korrekturfaktor

Tabelle A.17: Test der Modelle auf gleiche Mittelwerte des Kühlenergiebedarfs nach Korrektur und Mindestwert 5 kWh/m²a

Reihe	t-Test		
	$\mu_{Geb} \neq \mu_{RRM}$	W	p
F05-Basis	nein	1,914	0,057
F05-V01	ja	4,269	0,000
F05-V02	ja	4,857	0,000
F05-Basis*	nein	-0,440	0,660
F05-V01*	ja	-2,476	0,014
F05-V02*	ja	-2,300	0,022

Anmerkungen:
 Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; W = Prüfgröße
 Stichprobenumfang n = 106; Trashold $\geq 5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
 *mit Korrekturfaktor

Tabelle A.18: Auswirkung der auftretenden Differenzen des Kühlenergiebedarfs zwischen RRM und Gebäudemodell bei Festlegung eines minimalen Gebäudeenergiebedarfs von 5 kWh/m²a

	Kühlenergiebedarf			
	F05-Basis	F05-V01	F05-V02	
<i>Gebäudemodell</i>				
\bar{X}	14,9	14,3	13,4	kWh/m ² a
s	10,9	3,7	3,3	kWh/m ² a
<i>Referenzraummethode</i>				
		ohne Korrektur		
\bar{X}	12,2	12,2	11,3	kWh/m ² a
Δ	-18,3	-14,6	-15,6	%
δ	-0,25	-0,56	-0,63	
		*mit Korrektur		
\bar{X}	15,6	15,7	14,5	kWh/m ² a
Δ	4,8	9,6	8,4	%
δ	0,07	0,37	0,34	

\bar{X} : Mittelwert; s: Standardabweichung; Δ : relative Abweichung; δ : Effektgröße

B Analysedaten der Nutzungsparameter

B.1 Eingabeparameter der Nutzungen

Tabelle B.1: Allgemeine Eingangparameter Baustandard und Dimensionen Fenster

	Baustandard									
	oWSchV			mWSchV			EnEV			
	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	
Wand U-Wert	20%	2,00	2,40 1,60	20%	1,00	1,2 0,8	20%	0,40	0,48 0,32	[W/m²K]
Fenster U-Wert	15%	2,00	2,30 1,70	15%	1,50	1,7 1,3	15%	1,10	1,27 0,94	[W/m²K]
Fenster g-Wert	10%	0,75	0,83 0,68	10%	0,70	0,8 0,6	10%	0,70	0,77 0,63	[-]
Infiltration	10%	0,50	0,55 0,45	10%	0,30	0,3	10%	0,20	0,22 0,18	[h ⁻¹]

	Fensterflächenanteil & Auskrägung									
	ohne Nutzung			Nutzung 1			Nutzung 2			
	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	
W1 (25 - 45%)	20%	35,00	42,0 28,0	20%	35,00	42,0 28,0	30%	35,00	45,5 24,5	[%]
W2 (45 - 65%)	20%	55,00	66,0 44,0	20%	55,00	66,0 44,0	30%	55,00	71,5 38,5	[%]
W3 (65 - 85%)	20%	75,00	90,0 60,0	20%	75,00	90,0 60,0	30%	75,00	97,5 52,5	[%]
Sonnenschutz fest	20%	0,30	0,4 0,2	20%	0,30	0,4 0,2	20%	1,00	1,2 0,8	[m²]

Tabelle B.2: Eingabeparameter natürlich belüfteter Nutzungsarten: Verkehrsfläche und büroähnliche Nutzung

	Verkehrsfläche						büroähnliche Nutzung												
	ohne Nutzung			Nutzung 1			ohne Nutzung			Nutzung 1			Nutzung 2						
	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min				
Person Belegungsdichte				0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	17,5	25%	14,0	15,4	[m²/Pers.]			
Person Wärmeabgabe				0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	125,0	25%	100,0	100,0	[W/Pers.]			
Person Frischluftbedarf				0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	59,4	10%	54,0	35,2	[m³/Pers. h]			
Person Anwesenheit										0%	0,0	88,0	10%	80,0	93,5	[%]			
Raumtemperatur Heizen				3%	19,0	19,6 18,4	3%	16,0	16,5 15,5	3%	22,0	22,7 21,3	2%	21,0	21,4 20,6	3%	22,0	22,7 21,3	[°C]
Raumtemperatur Kühlen																			[°C]
Raumtemperatur-sollwertanpassung ±Δθ				10%	4,0	4,4 3,6	10%	4,0	4,4 3,6	10%	4,0	4,4 3,6	10%	4,0	4,4 3,6	10%	4,0	4,4 3,6	[°C]
Raumluftfeuchte Max.																			[%]
Raumluftfeuchte Min.																			[%]
Sonnenschutz beweglich				0%	200,0	200,0	0%	200,0	200,0	0%	200,0	200,0	10%	200,0	220,0 180,0	10%	200,0	220,0 180,0	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung				0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	20%	5,0	6,0 4,0	20%	10,0	12,0 8,0	[W/m²]
Elek. Geräte Standby				0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	0%	0,0	0,0	50%	5,0	7,5 2,5	50%	5,0	7,5 2,5	[%]
Beleuchtung Anschlussleistung				10%	2,5	2,8 2,3	10%	4,0	4,4 3,6	0%	0,0	0,0	10%	14,0	15,4 12,6	10%	14,0	15,4 12,6	[W/m²]
Nutzungsbeginn				0%	6:00	6:00	0%	6:00	6:00	0%	6:00	6:00	10%	8:00	8:48 7:12	3%	8:00	8:14 7:45	[-]
Nutzungsende				0%	19:00	19:00	0%	21:00	21:00	0%	19:00	19:00	5%	17:00	17:51 16:09	2%	17:00	17:15 16:44	[-]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt				34%	1:30	2:00 0:59	34%	1:30	2:00 0:59	34%	1:30	2:00 0:59	30%	2:00	2:36 1:24	10%	2:00	2:12 1:48	[-]
WRG Wirkungsgrad																			[%]

Tabelle B.3: Eingabeparameter natürlich belüfteter Nutzungsarten: Hörsaal

	Hörsaal Fensterlüftung										
	ohne Nutzung			Nutzung 1			Nutzung 2				
	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min		
Person Belegungsdichte	0%	0,0	0,0	25%	2,7	3,4 2,0	10%	2,7	3,0 2,4		[m ² /Pers.]
Person Wärmeabgabe	0%	0,0	0,0	25%	100,0	125,0 75,0	5%	100,0	105,0 95,0		[W/Pers.]
Person Frischluftbedarf	0%	0,0	0,0	10%	54,0	59,4 48,6	15%	30,6	35,2 26,0		[m ³ /Pers. h]
Person Anwesenheit	0%	0,0	0,0	15%	70,0	80,5 59,5	15%	75,0	86,3 63,8		[%]
Raumtemperatur Heizen	3%	22,0	22,7 21,3	2%	21,0	21,4 20,6	3%	21,0	21,6 20,4		[°C]
Raumtemperatur Kühlen											[°C]
Raumtemperatur-sollwertanpassung ±Δθ	10%	4,0	4,4 3,6	10%	4,0	4,4 3,6	5%	4,0	4,2 3,8		[°C]
Raumluftfeuchte Max.											[%]
Raumluftfeuchte Min.											[%]
Sonnenschutz beweglich	0%	200,0	200,0 200,0	10%	200,0	220,0 180,0	10%	200,0	220,0 180,0		[W/m ²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	0%	0,0	0,0 0,0	20%	5,0	6,0 4,0	20%	2,0	2,4 1,6		[W/m ²]
Elek. Geräte Standby	0%	0,0	0,0 0,0	50%	2,0	3,0 1,0	50%	10,0	15,0 5,0		[%]
Beleuchtung Anschlussleistung	0%	0,0	0,0 0,0	10%	14,0	15,4 12,6	10%	14,0	15,4 12,6		[W/m ²]
Nutzungsbeginn	0%	6:00	6:00 6:00	10%	10:00	11:00 9:00	10%	8:00	8:48 7:12		[-]
Nutzungsende	0%	19:00	19:00 19:00	5%	16:00	16:48 15:12	5%	19:00	19:57 18:03		[-]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	34%	1:30	2:00 0:59	25%	2:00	2:30 1:30	25%	2:00	2:30 1:30		[-]
WRG Wirkungsgrad											[%]

Tabelle B.4: Eingabeparameter mechanisch belüfteter Nutzungsarten: Hörsaal und Labor Forschung

	Hörsaal mechanisch belüftet						Labor Forschung mechanisch belüftet															
	ohne Nutzung			Nutzung 1			Nutzung 2			ohne Nutzung				Nutzung 1			Nutzung 2					
	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min		[-,µ,-]	µ	Max Min	[-,µ,-]	µ	Max Min			
Person Belegungsdichte				25%	2,7	3,4 2,0	10%	2,7	3,0 2,4				25%	10,0	12,5 7,5	10%	11,0	12,1 9,9				[m ² /Pers.]
Person Wärmeabgabe				25%	100,0	125,0 75,0	5%	100,0	105,0 95,0				25%	140,0	175,0 105,0	25%	140,0	175,0 105,0				[W/Pers.]
Luftwechselzahl				5%	6,0	6,3 5,7	5%	3,4	3,6 3,2				10%	8,0	8,8 7,2	10%	16,0	17,6 14,4				[h ⁻¹]
Person Anwesenheit				15%	70,0	80,5 59,5	15%	75,0	86,3 63,8				10%	80,0	88,0 72,0	10%	80,0	88,0 72,0				[%]
Raumtemperatur Heizen				2%	21,0	21,4 20,6	3%	21,0	21,6 20,4				2%	21,0	21,4 20,6	2%	23,0	23,5 22,5				[°C]
Raumtemperatur Kühlen				2%	28,0	28,6 27,4	3%	28,0	28,8 27,2				2%	28,0	28,6 27,4	2%	28,0	28,6 27,4				[°C]
Raumtemperatur-sollwertanpassung ±Δθ				10%	4,0	4,4 3,6	5%	4,0	4,2 3,8				10%	2,0	2,2 1,8	10%	2,0	2,2 1,8				[°C]
Raumluftfeuchte Max.				10%	70,0	77,0 63,0	10%	70,0	77,0 63,0				10%	55,0	60,5 49,5	10%	55,0	60,5 49,5				[%]
Raumluftfeuchte Min.				10%	30,0	33,0 27,0	10%	30,0	33,0 27,0				10%	35,0	38,5 31,5	10%	45,0	49,5 40,5				[%]
Sonnenschutz beweglich				10%	200,0	220,0 180,0	10%	200,0	220,0 180,0				10%	200,0	220,0 180,0	10%	200,0	220,0 180,0				[W/m ²]
Elek. Geräte Anschlussleistung				20%	5,0	6,0 4,0	20%	2,0	2,4 1,6				20%	10,0	12,0 8,0	20%	10,0	12,0 8,0				[W/m ²]
Elek. Geräte Standby				50%	2,0	3,0 1,0	50%	10,0	15,0 5,0				20%	15,0	18,0 12,0	20%	15,0	18,0 12,0				[%]
Beleuchtung Anschlussleistung				10%	14,0	15,4 12,6	10%	14,0	15,4 12,6				10%	14,0	15,4 12,6	10%	14,0	15,4 12,6				[W/m ²]
Nutzungsbeginn				10%	10:00	11:00 9:00	10%	8:00	8:48 7:12				10%	8:00	8:48 7:12	10%	8:00	8:48 7:12				[-]
Nutzungsende				5%	16:00	16:48 15:12	5%	19:00	19:57 18:03				5%	17:30	18:22 16:37	5%	17:30	18:22 16:37				[-]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt				33%	0:15	0:19 0:10	33%	0:15	0:19 0:10				33%	0:15	0:19 0:10	33%	0:15	0:19 0:10				[-]
WRG Wirkungsgrad				10%	80	88,0 72,0	10%	80	88,0 72,0				10%	80	88,0 72,0	0%	0	0,0 0,0				[%]



Tabelle B.9: Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Büro Nutzung 2

energetischer Baustandard	Fensterflächenanteil	Orientierung der Fassade	Sensitivitätsindex (S)	\bar{x} ($\pm \mu$) [kWh/m²a]	s ($\pm \sigma$) [kWh/m²a]	Min [kWh/m²a]	Max [kWh/m²a]	Fensterflächenanteil	Fenster U-Wert	Fenster g-Wert	Infiltration	Sonenschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegungsichte	Person Wärmeabgabe	Person Frischluftmenge	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatursollwertanpassung ±1σ	Raumlüftfeuchte Max.	Raumlüftfeuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sonenschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δt Einschaltzeitpunkt	WRG Wirkungsgrad
									0,04	0,14																				
oWSchV	W1	South	S_Xi_Saltelli	77,4	8,7	47	104		0,04	0,14			0,09		0,04	0,29							0,13	0,20		0,03				
oWSchV	W1	South	S_Xi_Jansen	77,4	8,7	47	104			0,12			0,07		0,04	0,27							0,11	0,18						
oWSchV	W1	North	S_Xi_Saltelli	86,6	9,0	55	115	0,04		0,13					0,04	0,30			0,03				0,13	0,16		0,03				
oWSchV	W1	North	S_Xi_Jansen	86,6	9,0	55	115			0,11					0,02	0,28							0,11	0,14						
oWSchV	W1	East	S_Xi_Saltelli	82,9	8,7	52	110	0,04		0,14					0,04	0,29			0,03				0,13	0,18		0,03				
oWSchV	W1	East	S_Xi_Jansen	82,9	8,7	52	110			0,12					0,02	0,27							0,11	0,16						
oWSchV	W1	West	S_Xi_Saltelli	82,4	8,7	52	110	0,04		0,14					0,04	0,29			0,03				0,13	0,18		0,03				
oWSchV	W1	West	S_Xi_Jansen	82,4	8,7	52	110			0,12					0,02	0,27							0,11	0,16						
mWSchV	W1	South	S_Xi_Saltelli	46,5	6,9	20	70	0,06	0,04	0,07			0,08	0,03		0,05	0,20						0,17	0,23		0,03				
mWSchV	W1	South	S_Xi_Jansen	46,5	6,9	20	70	0,06	0,03	0,07			0,08	0,03		0,05	0,20						0,16	0,23		0,03				
mWSchV	W1	North	S_Xi_Saltelli	52,4	7,1	25	77	0,06	0,04	0,07			0,11	0,02		0,05	0,20						0,16	0,18		0,03				
mWSchV	W1	North	S_Xi_Jansen	52,4	7,1	25	77	0,06	0,03	0,07			0,11	0,02		0,05	0,20						0,16	0,18		0,03				
mWSchV	W1	East	S_Xi_Saltelli	50,0	7,0	24	74	0,06	0,04	0,07			0,10	0,03		0,05	0,20						0,16	0,21		0,03				
mWSchV	W1	East	S_Xi_Jansen	50,0	7,0	24	74	0,06	0,03	0,07			0,10	0,03		0,05	0,19						0,16	0,20		0,03				
mWSchV	W1	West	S_Xi_Saltelli	49,8	7,0	23	73	0,06	0,04	0,07			0,10	0,03		0,05	0,20						0,16	0,21		0,03				
mWSchV	W1	West	S_Xi_Jansen	49,8	7,0	23	73	0,06	0,03	0,07			0,10	0,03		0,05	0,20						0,16	0,20		0,03				
EnEV	W1	South	S_Xi_Saltelli	20,2	5,1	3	36			0,06			0,05		0,10	0,12							0,18	0,35		0,06				
EnEV	W1	South	S_Xi_Jansen	20,2	5,1	3	36	0,03		0,07	0,02		0,03	0,07		0,11	0,13						0,19	0,03	0,35		0,07			
EnEV	W1	North	S_Xi_Saltelli	23,3	5,2	5	39			0,06			0,03	0,05		0,10	0,13						0,19	0,31		0,06				
EnEV	W1	North	S_Xi_Jansen	23,3	5,2	5	39	0,02	0,03	0,02			0,07	0,02	0,04	0,06							0,19	0,03	0,31		0,07			
EnEV	W1	East	S_Xi_Saltelli	22,1	5,1	4	38			0,06			0,02	0,05		0,10	0,12						0,18	0,33		0,06				
EnEV	W1	East	S_Xi_Jansen	22,1	5,1	4	38	0,02	0,03	0,02			0,07	0,02	0,04	0,06							0,19	0,03	0,33		0,07			
EnEV	W1	West	S_Xi_Saltelli	21,9	5,1	4	38			0,06			0,02	0,05		0,10	0,12						0,18	0,33		0,06				
EnEV	W1	West	S_Xi_Jansen	21,9	5,1	4	38	0,02	0,03	0,02			0,07	0,02	0,04	0,06							0,19	0,03	0,33		0,07			
oWSchV	W2	South	S_Xi_Saltelli	74,8	8,7	43	103			0,11	0,02		0,13		0,04	0,03	0,27			0,03			0,14	0,18		0,03				
oWSchV	W2	South	S_Xi_Jansen	74,8	8,7	43	103			0,09			0,12		0,03	0,02	0,25			0,03			0,12	0,17						
oWSchV	W2	North	S_Xi_Saltelli	82,4	8,9	50	111			0,11	0,03		0,13		0,07	0,04	0,28			0,03			0,13	0,14		0,03				
oWSchV	W2	North	S_Xi_Jansen	82,4	8,9	50	111			0,09			0,12		0,06	0,02	0,26			0,02			0,12	0,13						
oWSchV	W2	East	S_Xi_Saltelli	79,3	8,7	48	107			0,11	0,03		0,13		0,06	0,04	0,27			0,03			0,13	0,16		0,03				
oWSchV	W2	East	S_Xi_Jansen	79,3	8,7	48	107			0,09			0,12		0,05	0,02	0,25			0,02			0,11	0,15						
oWSchV	W2	West	S_Xi_Saltelli	79,0	8,7	47	107			0,11	0,03		0,13		0,06	0,04	0,27			0,03			0,13	0,16		0,03				
oWSchV	W2	West	S_Xi_Jansen	79,0	8,7	47	107			0,09			0,12		0,05	0,02	0,25			0,02			0,11	0,15						
mWSchV	W2	South	S_Xi_Saltelli	46,5	7,3	20	72	0,12	0,09	0,02			0,06		0,04	0,02		0,05	0,17				0,16	0,19		0,03				
mWSchV	W2	South	S_Xi_Jansen	46,5	7,3	20	72	0,12	0,09	0,02			0,06		0,04	0,03		0,04	0,18		0,02		0,15	0,19		0,03				
mWSchV	W2	North	S_Xi_Saltelli	51,9	7,5	24	78	0,14	0,09	0,03			0,06		0,06	0,02		0,05	0,18				0,15	0,15		0,03				
mWSchV	W2	North	S_Xi_Jansen	51,9	7,5	24	78	0,14	0,09	0,03			0,06		0,06	0,02		0,04	0,18				0,15	0,15		0,03				
mWSchV	W2	East	S_Xi_Saltelli	49,7	7,4	23	75	0,13	0,09	0,03			0,06		0,05	0,02		0,05	0,18				0,15	0,17		0,03				
mWSchV	W2	East	S_Xi_Jansen	49,7	7,4	23	75	0,13	0,09	0,02			0,06		0,05	0,02		0,04	0,18		0,02		0,15	0,17		0,03				
mWSchV	W2	West	S_Xi_Saltelli	49,5	7,4	22	75	0,13	0,09	0,03			0,06		0,05	0,02		0,05	0,18				0,15	0,17		0,03				
mWSchV	W2	West	S_Xi_Jansen	49,5	7,4	22	75	0,13	0,09	0,02			0,06		0,05	0,03		0,04	0,18		0,02		0,15	0,17		0,03				
EnEV	W2	South	S_Xi_Saltelli	20,6	5,3	3	38			0,07			0,05		0,05	0,09	0,11						0,18	0,31		0,05				
EnEV	W2	South	S_Xi_Jansen	20,6	5,3	3	38	0,03	0,08	0,03			0,07	0,03	0,02	0,06		0,11	0,13		0,02		0,19	0,03	0,31		0,07			
EnEV	W2	North	S_Xi_Saltelli	24,2	5,3	6	41			0,03	0,08		0,03	0,05		0,04	0,09	0,12					0,18	0,27		0,05				
EnEV	W2	North	S_Xi_Jansen	24,2	5,3	6	41	0,05	0,09	0,04			0,07	0,03	0,03	0,06		0,10	0,13				0,19	0,03	0,28		0,07			
EnEV	W2	East	S_Xi_Saltelli	22,8	5,3	5	40			0,03	0,07		0,02	0,05		0,04	0,09	0,11					0,17	0,29		0,05				
EnEV	W2	East	S_Xi_Jansen	22,8	5,3	5	40	0,04	0,08	0,04			0,07	0,03	0,03	0,06		0,10	0,13				0,18	0,03	0,29		0,07			
EnEV	W2	West	S_Xi_Saltelli	22,6	5,3	4	40			0,03	0,07		0,02	0,05		0,05	0,09	0,11					0,17	0,29		0,05				
EnEV	W2	West	S_Xi_Jansen	22,6	5,3	4	40	0,04	0,08	0,04			0,07	0,03	0,03	0,06		0,10	0,13				0,19	0,03	0,29		0,07			
oWSchV	W3	South	S_Xi_Saltelli	71,6	9,1	39	101			0,23	0,04		0,11			0,03	0,23			0,03			0,12	0,16		0,02				
oWSchV	W3	South	S_Xi_Jansen	71,6	9,1	39	101			0,21	0,02		0,11			0,03	0,22			0,03			0,11	0,15						
oWSchV	W3	North	S_Xi_Saltelli	77,2	9,2	44	107			0,23	0,05		0,12			0,03	0,25			0,03			0,12	0,12		0,03				
oWSchV	W3	North	S_Xi_Jansen	77,2	9,2	44	107			0,21	0,04		0,11			0,03	0,23			0,03			0,10	0,11						
oWSchV	W3	East	S_Xi_Saltelli	74,8	9,1	42	104			0,23	0,05		0,12			0,03	0,24			0,03			0,11	0,14		0,02				
oWSchV	W3	East	S_Xi_Jansen	74,8	9,1	42	104			0,21	0,03		0,11			0,03	0,23			0,03			0,10	0,13						
oWSchV	W3	West	S_Xi_Saltelli	74,6	9,1	42	104			0,23	0,05		0,11			0,03	0,24			0,03			0,12	0,14		0,02				
oWSchV	W3	West	S_Xi_Jansen	74,6	9,1	42	104			0,22	0,03		0,11			0,03	0,23			0,03			0,10	0,13						
mWSchV	W3	South	S_Xi_Saltelli	45,1	7,9	17																								

B.4 SI-Werte: Hörsaal

Tabelle B.10: Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Hörsaal ohne Nutzung

energetischer Baustandard	Fensterflächenanteil	Orientierung der Fassade	Sensitivitätsindex (S)	\bar{x} ($\equiv \mu$) [kWh/m²a]	s ($\equiv \sigma$) [kWh/m²a]	Min [kWh/m²a]	Max [kWh/m²a]	Fensterflächenanteil		Infiltration	Sommerschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegungsfläche	Person Wärmeabgabe	Person Frischluftmenge	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatur-sollwertanpassung ±Δθ	Raumluftfeuchte Max.	Raumluftfeuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sommerschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δt Einschaltzeitpunkt	WRG Wirkungsgrad
								Fenster U-Wert	Fenster g-Wert																				
oWSchV W1	South	S_Xi_Sattelli	50,9	7,5	26	73		0,06	0,21			0,24				0,43	0,09												0,02
oWSchV W1	South	S_Xi_Jansen	50,9	7,5	26	73			0,16			0,20				0,38	0,05												0,02
oWSchV W1	North	S_Xi_Sattelli	63,5	8,1	37	87		0,05				0,29				0,42	0,08												0,02
oWSchV W1	North	S_Xi_Jansen	63,5	8,1	37	87			0,14			0,25				0,37	0,05												0,02
oWSchV W1	East	S_Xi_Sattelli	57,7	7,7	33	81		0,06				0,28				0,41	0,08												0,02
oWSchV W1	East	S_Xi_Jansen	57,7	7,7	33	81			0,15			0,24				0,36	0,05												0,02
oWSchV W1	West	S_Xi_Sattelli	57,2	7,7	32	80		0,06				0,27				0,42	0,08												0,02
oWSchV W1	West	S_Xi_Jansen	57,2	7,7	32	80			0,15			0,24				0,36	0,05												0,02
mWSchV W1	South	S_Xi_Sattelli	30,7	6,1	11	51		0,10	0,08	0,03		0,12				0,36	0,06												0,02
mWSchV W1	South	S_Xi_Jansen	30,7	6,1	11	51			0,07	0,04		0,08				0,32	0,04												0,02
mWSchV W1	North	S_Xi_Sattelli	37,9	6,6	16	59		0,10	0,07	0,03		0,10				0,35	0,06												0,02
mWSchV W1	North	S_Xi_Jansen	37,9	6,6	16	59			0,07	0,03		0,07				0,31	0,03												0,02
mWSchV W1	East	S_Xi_Sattelli	34,4	6,4	14	55		0,11	0,08	0,03		0,11				0,35	0,06												0,02
mWSchV W1	East	S_Xi_Jansen	34,4	6,4	14	55			0,07	0,04		0,07				0,31	0,03												0,02
mWSchV W1	West	S_Xi_Sattelli	34,2	6,4	13	55		0,11	0,08	0,03		0,11				0,35	0,06												0,02
mWSchV W1	West	S_Xi_Jansen	34,2	6,4	13	55			0,07	0,04		0,07				0,31	0,03												0,02
EnEV W1	South	S_Xi_Sattelli	14,0	4,1	0	27		0,10	0,12	0,08		0,12				0,40	0,06												0,02
EnEV W1	South	S_Xi_Jansen	14,0	4,1	0	27			0,07	0,08	0,04	0,09				0,36	0,03												0,02
EnEV W1	North	S_Xi_Sattelli	17,9	4,3	3	32		0,12	0,11	0,09		0,12				0,38	0,05												0,02
EnEV W1	North	S_Xi_Jansen	17,9	4,3	3	32			0,09	0,07	0,05	0,08				0,34	0,03												0,02
EnEV W1	East	S_Xi_Sattelli	15,7	4,2	1	29		0,12	0,11	0,08		0,12				0,38	0,05												0,02
EnEV W1	East	S_Xi_Jansen	15,7	4,2	1	29			0,08	0,07	0,04	0,09				0,34	0,03												0,02
EnEV W1	West	S_Xi_Sattelli	15,7	4,2	1	29		0,12	0,11	0,08		0,12				0,38	0,05												0,02
EnEV W1	West	S_Xi_Jansen	15,7	4,2	1	29			0,08	0,07	0,04	0,09				0,34	0,03												0,02
oWSchV W2	South	S_Xi_Sattelli	51,7	7,4	26	75		0,19	0,03	0,21		0,12				0,41	0,09												0,02
oWSchV W2	South	S_Xi_Jansen	51,7	7,4	26	75			0,14		0,16	0,08				0,36	0,06												0,02
oWSchV W2	North	S_Xi_Sattelli	60,5	7,8	33	85		0,17	0,04	0,19		0,14				0,41	0,09												0,02
oWSchV W2	North	S_Xi_Jansen	60,5	7,8	33	85			0,12		0,15	0,10				0,36	0,06												0,02
oWSchV W2	East	S_Xi_Sattelli	56,3	7,6	30	80		0,18	0,03	0,20		0,13				0,41	0,09												0,02
oWSchV W2	East	S_Xi_Jansen	56,3	7,6	30	80			0,13		0,16	0,10				0,36	0,06												0,02
oWSchV W2	West	S_Xi_Sattelli	56,1	7,6	30	80		0,18	0,03	0,20		0,13				0,41	0,09												0,02
oWSchV W2	West	S_Xi_Jansen	56,1	7,6	30	80			0,13		0,15	0,09				0,36	0,06												0,02
mWSchV W2	South	S_Xi_Sattelli	27,9	6,4	5	49		0,18	0,19	0,04		0,10				0,33	0,06												0,02
mWSchV W2	South	S_Xi_Jansen	27,9	6,4	5	49			0,14	0,15	0,06	0,11				0,29	0,04												0,02
mWSchV W2	North	S_Xi_Sattelli	34,2	7,0	10	57		0,22	0,16	0,05		0,09				0,31	0,06												0,02
mWSchV W2	North	S_Xi_Jansen	34,2	7,0	10	57			0,18	0,12	0,06	0,12				0,27	0,03												0,02
mWSchV W2	East	S_Xi_Sattelli	31,0	6,7	8	53		0,20	0,17	0,05		0,09				0,31	0,06												0,02
mWSchV W2	East	S_Xi_Jansen	31,0	6,7	8	53			0,17	0,13	0,06	0,12				0,27	0,03												0,02
mWSchV W2	West	S_Xi_Sattelli	31,0	6,7	8	53		0,20	0,17	0,05		0,09				0,31	0,06												0,02
mWSchV W2	West	S_Xi_Jansen	31,0	6,7	8	53			0,17	0,13	0,06	0,12				0,27	0,03												0,02
EnEV W2	South	S_Xi_Sattelli	13,1	4,6	0	28		0,17	0,26	0,09	0,09	0,07				0,30	0,05												0,02
EnEV W2	South	S_Xi_Jansen	13,1	4,6	0	28			0,14	0,22	0,05	0,06	0,04			0,27	0,02												0,02
EnEV W2	North	S_Xi_Sattelli	17,8	4,9	0	34		0,25	0,22	0,10	0,08	0,07				0,28	0,04												0,02
EnEV W2	North	S_Xi_Jansen	17,8	4,9	0	34			0,22	0,19	0,06	0,05	0,04			0,24	0,03												0,02
EnEV W2	East	S_Xi_Sattelli	15,3	4,7	0	31		0,22	0,24	0,09	0,09	0,07				0,28	0,04												0,02
EnEV W2	East	S_Xi_Jansen	15,3	4,7	0	31			0,19	0,20	0,06	0,06	0,04			0,25	0,03												0,02
EnEV W2	West	S_Xi_Sattelli	15,3	4,8	0	31		0,22	0,24	0,09	0,09	0,07				0,28	0,04												0,02
EnEV W2	West	S_Xi_Jansen	15,3	4,8	0	31			0,19	0,20	0,06	0,05	0,04			0,25	0,03												0,02
oWSchV W3	South	S_Xi_Sattelli	50,0	7,8	23	74		0,35	0,04	0,18		0,03				0,35	0,09												0,02
oWSchV W3	South	S_Xi_Jansen	50,0	7,8	23	74			0,31		0,14	0,03				0,31	0,06												0,02
oWSchV W3	North	S_Xi_Sattelli	56,5	8,1	29	82		0,33	0,06	0,17		0,03				0,35	0,08												0,02
oWSchV W3	North	S_Xi_Jansen	56,5	8,1	29	82			0,28		0,13	0,03				0,31	0,06												0,02
oWSchV W3	East	S_Xi_Sattelli	52,9	7,9	26	77		0,34	0,05	0,18		0,03				0,35	0,08												0,02
oWSchV W3	East	S_Xi_Jansen	52,9	7,9	26	77			0,30		0,14	0,03				0,31	0,06												0,02
oWSchV W3	West	S_Xi_Sattelli	52,9	7,9	26	77		0,34	0,05	0,18		0,03				0,35	0,08												0,02
oWSchV W3	West	S_Xi_Jansen	52,9	7,9	26	77			0,30		0,14	0,03				0,31	0,06												0,02
mWSchV W3	South	S_Xi_Sattelli	25,6	7,0	1	48		0,22	0,30	0,05	0,08	0,05				0,28	0,06												0,02
mWSchV W3	South	S_Xi_Jansen	25,6	7,0	1	48			0,19	0,26	0,05	0,05	0,05			0,24	0,04												0,02
mWSchV W3	North	S_Xi_Sattelli	31,4	7,7	4	56		0,31	0,25	0,06	0,07	0,05				0,25	0,05												0,02
mWSchV W3	North	S_Xi_Jansen	31,4	7,7	4	56			0,28	0,21	0,03	0,04	0,05			0,21	0,03												0,02
mWSchV W3	East	S_Xi_Sattelli	28,1	7,3	2	52		0,27	0,27	0,06	0,08	0,05				0,26	0,05												0,02
mWSchV W3	East	S_Xi_Jansen	28,1	7,3	2	52			0,24	0,23	0,02	0,04	0,05			0,22	0,03												0,02
mWSchV W3	West	S_Xi_Sattelli	28,3	7,																									

Tabelle B.11: Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Hörsaal Nutzung 1 Fensterlüftung

energetischer Baustandard	Fensterflächenanteil	Orientierung der Fassade	Sensitivitätsindex (S)	\bar{x} ($\pm \mu$) [kWh/m²a]	s ($\pm \sigma$) [kWh/m²a]	Min [kWh/m²a]	Max [kWh/m²a]	Fensterflächenanteil	Fenster U-Wert	Fenster g-Wert	Infiltration	Sonnenschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegdichte	Person Wärmeabgabe	Person Frischluftmenge	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatur-entwässerung ±Δ9	Raumluftfeuchte Max.	Raumluftfeuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sonnenschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δt Einschaltzeitpunkt	WRG Wirkungsgrad		
								Fenster U-Wert	Fenster g-Wert	Infiltration	Sonnenschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegdichte	Person Wärmeabgabe	Person Frischluftmenge	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatur-entwässerung ±Δ9	Raumluftfeuchte Max.	Raumluftfeuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sonnenschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δt Einschaltzeitpunkt	WRG Wirkungsgrad			
oWSchV W1	South	S_Xi_Sattelli		98,2	13,4	50	142						0,08	0,07	0,12	0,06	0,12	0,06	0,03		0,03		0,29			0,17	0,02					
oWSchV W1	South	S_Xi_Jansen		98,2	13,4	50	142	0,03	0,02	0,08			0,10	0,09	0,14	0,08	0,14	0,08	0,05		0,04		0,31	0,02	0,03	0,18	0,03	0,02				
oWSchV W1	North	S_Xi_Sattelli		109,6	13,5	62	154						0,12	0,07	0,12	0,06	0,12	0,06	0,03		0,03		0,27			0,16						
oWSchV W1	North	S_Xi_Jansen		109,6	13,5	62	154	0,03		0,08			0,12	0,08	0,14	0,08	0,14	0,08	0,05		0,04		0,28	0,02	0,02	0,17	0,03					
oWSchV W1	East	S_Xi_Sattelli		105,1	13,4	57	149						0,09	0,07	0,12	0,06	0,12	0,06	0,03		0,03		0,28			0,16	0,02					
oWSchV W1	East	S_Xi_Jansen		105,1	13,4	57	149	0,03		0,08			0,12	0,08	0,14	0,08	0,14	0,08	0,05		0,04		0,29	0,02	0,02	0,18	0,03					
oWSchV W1	West	S_Xi_Sattelli		104,5	13,4	57	149						0,09	0,07	0,12	0,06	0,12	0,06	0,03		0,03		0,28			0,16	0,02					
oWSchV W1	West	S_Xi_Jansen		104,5	13,4	57	149	0,03	0,02	0,08			0,12	0,08	0,14	0,08	0,14	0,08	0,05		0,04		0,29	0,02	0,02	0,18	0,03					
mWSchV W1	South	S_Xi_Sattelli		60,0	10,8	22	96	0,03	0,03	0,03			0,09	0,07	0,11	0,05	0,11	0,05	0,02		0,05		0,26			0,16	0,02					
mWSchV W1	South	S_Xi_Jansen		60,0	10,8	22	96	0,05	0,04	0,03	0,05	0,02	0,12	0,08	0,13	0,07	0,13	0,07	0,02	0,04	0,02	0,02	0,07	0,02	0,28	0,04	0,03	0,18	0,04	0,02	0,02	
mWSchV W1	North	S_Xi_Sattelli		65,8	10,9	27	102	0,03	0,03	0,04			0,12	0,06	0,11	0,06	0,11	0,06	0,02		0,06		0,24			0,16	0,02					
mWSchV W1	North	S_Xi_Jansen		65,8	10,9	27	102	0,05	0,04	0,03	0,05		0,14	0,07	0,13	0,07	0,13	0,07	0,04		0,07		0,25	0,03	0,02	0,17	0,03					
mWSchV W1	East	S_Xi_Sattelli		63,7	10,8	25	99	0,03	0,03	0,03			0,11	0,07	0,11	0,05	0,11	0,05	0,02		0,05		0,25			0,16	0,02					
mWSchV W1	East	S_Xi_Jansen		63,7	10,8	25	99	0,05	0,04	0,03	0,05		0,13	0,08	0,13	0,07	0,13	0,07	0,04		0,07	0,02	0,26	0,04	0,02	0,18	0,03					
mWSchV W1	West	S_Xi_Sattelli		63,4	10,8	25	99	0,03	0,03	0,03			0,11	0,07	0,11	0,05	0,11	0,05	0,02		0,05		0,25			0,16	0,02					
mWSchV W1	West	S_Xi_Jansen		63,4	10,8	25	99	0,05	0,04	0,03	0,05		0,13	0,08	0,13	0,07	0,13	0,07	0,04		0,07	0,02	0,26	0,04	0,02	0,18	0,03					
EnEV W1	South	S_Xi_Sattelli		30,8	7,4	6	55	0,03	0,04	0,02	0,03		0,05	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05			0,10		0,27	0,02		0,16	0,03					
EnEV W1	South	S_Xi_Jansen		30,8	7,4	6	55	0,04	0,05	0,04	0,05		0,07	0,06	0,12	0,07	0,12	0,07		0,04		0,12	0,02	0,28	0,04	0,02	0,18	0,04				
EnEV W1	North	S_Xi_Sattelli		33,6	7,3	8	58	0,04	0,04	0,03	0,04		0,06	0,05	0,11	0,06	0,11	0,06			0,10		0,25	0,02		0,16	0,02					
EnEV W1	North	S_Xi_Jansen		33,6	7,3	8	58	0,05	0,05	0,04	0,05		0,08	0,06	0,12	0,07	0,12	0,07		0,04		0,12	0,02	0,25	0,04	0,02	0,17	0,03				
EnEV W1	East	S_Xi_Sattelli		32,6	7,3	8	57	0,03	0,04	0,03	0,04		0,06	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05			0,10		0,26	0,02		0,16	0,03					
EnEV W1	East	S_Xi_Jansen		32,6	7,3	8	57	0,05	0,05	0,04	0,05		0,08	0,06	0,12	0,07	0,12	0,07		0,04		0,12	0,02	0,27	0,04	0,02	0,17	0,04				
EnEV W1	West	S_Xi_Sattelli		32,4	7,3	7	57	0,03	0,04	0,03	0,04		0,06	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05			0,10		0,26	0,02		0,16	0,03					
EnEV W1	West	S_Xi_Jansen		32,4	7,3	7	57	0,05	0,05	0,04	0,05		0,08	0,06	0,12	0,07	0,12	0,07		0,04		0,12	0,02	0,27	0,04	0,02	0,17	0,04				
oWSchV W2	South	S_Xi_Sattelli		98,8	13,4	50	141						0,06	0,06	0,04	0,07	0,12	0,05	0,03		0,03		0,29			0,17	0,02					
oWSchV W2	South	S_Xi_Jansen		98,8	13,4	50	141	0,02	0,07	0,03	0,08	0,02	0,06	0,09	0,15	0,08	0,15	0,08	0,02	0,05	0,02	0,02	0,04	0,02	0,31	0,03	0,03	0,18	0,03	0,02	0,02	
oWSchV W2	North	S_Xi_Sattelli		106,2	13,3	58	149						0,06	0,06	0,05	0,06	0,13	0,06	0,03		0,03		0,27			0,16						
oWSchV W2	North	S_Xi_Jansen		106,2	13,3	58	149	0,07	0,03	0,08			0,07	0,08	0,15	0,08	0,15	0,08	0,05		0,04		0,28	0,03	0,03	0,18	0,03					
oWSchV W2	East	S_Xi_Sattelli		103,5	13,3	55	146						0,06	0,06	0,04	0,07	0,13	0,06	0,03		0,03		0,28			0,17						
oWSchV W2	East	S_Xi_Jansen		103,5	13,3	55	146	0,02	0,07	0,03	0,08		0,07	0,08	0,15	0,08	0,15	0,08	0,05		0,04	0,02	0,29	0,03	0,03	0,18	0,03	0,02				
oWSchV W2	West	S_Xi_Sattelli		103,1	13,3	55	145						0,06	0,06	0,04	0,07	0,13	0,06	0,03		0,03		0,28			0,17						
oWSchV W2	West	S_Xi_Jansen		103,1	13,3	55	145	0,02	0,07	0,03	0,08		0,07	0,08	0,15	0,08	0,15	0,08	0,05		0,04	0,02	0,29	0,03	0,03	0,18	0,03	0,02				
mWSchV W2	South	S_Xi_Sattelli		59,5	11,2	20	96	0,05	0,06	0,03			0,05	0,07	0,11	0,05	0,11	0,05	0,02		0,05		0,26	0,02		0,16	0,02					
mWSchV W2	South	S_Xi_Jansen		59,5	11,2	20	96	0,07	0,07	0,04	0,05	0,02	0,07	0,09	0,13	0,07	0,13	0,07	0,02	0,05	0,02	0,02	0,07	0,02	0,28	0,05	0,03	0,18	0,04	0,02	0,02	
mWSchV W2	North	S_Xi_Sattelli		64,0	11,2	25	101	0,07	0,06	0,02	0,03		0,06	0,06	0,11	0,05	0,11	0,05			0,05		0,23	0,02		0,15	0,02					
mWSchV W2	North	S_Xi_Jansen		64,0	11,2	25	101	0,10	0,07	0,04	0,05	0,02	0,08	0,07	0,13	0,07	0,13	0,07	0,02	0,05	0,02	0,02	0,07	0,02	0,24	0,04	0,03	0,17	0,04	0,02	0,02	
mWSchV W2	East	S_Xi_Sattelli		62,5	11,2	24	99	0,06	0,06	0,03			0,05	0,06	0,11	0,05	0,11	0,05	0,02		0,05		0,24	0,02		0,16	0,02					
mWSchV W2	East	S_Xi_Jansen		62,5	11,2	24	99	0,09	0,07	0,04	0,05	0,02	0,08	0,08	0,13	0,07	0,13	0,07	0,02	0,05	0,02	0,02	0,07	0,02	0,26	0,05	0,03	0,17	0,04	0,02	0,02	
mWSchV W2	West	S_Xi_Sattelli		62,2	11,2	23	99	0,06	0,06	0,03			0,05	0,06	0,11	0,05	0,11	0,05	0,02		0,05		0,24	0,02		0,16	0,02					
mWSchV W2	West	S_Xi_Jansen		62,2	11,2	23	99	0,09	0,07	0,04	0,05	0,02	0,08	0,08	0,13	0,07	0,13	0,07	0,02	0,05	0,02	0,02	0,07	0,02	0,26	0,05	0,03	0,17	0,04	0,02	0,02	
EnEV W2	South	S_Xi_Sattelli		32,3	7,9	4	59	0,05	0,09	0,03	0,03		0,03	0,05	0,10	0,04	0,10	0,04			0,09		0,25	0,03		0,16	0,02					
EnEV W2	South	S_Xi_Jansen		32,3	7,9	4	59	0,07	0,09	0,05	0,05	0,02	0,05	0,06	0,12	0,06	0,12	0,06	0,02													

Tabelle B.12: Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Hörsaal Nutzung 2 Fensterlüftung

energetischer Baustandard	Fensterflächenanteil Orientierung der Fassade	Sensitivitätsindex (S)	Sensitivitätsindizes				Einflussfaktoren																							
			\bar{x} (μ) [kWh/m ² a]	s (σ) [kWh/m ² a]	Min [kWh/m ² a]	Max [kWh/m ² a]	Fensterflächenanteil	Fenster U-Wert	Fenster g-Wert	Infiltration	Sonnenschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegdichte	Person Wärmeabgabe	Person Frischluftmenge	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatursollwertanpassung \pm 0,9	Raumlüftleuchte Max.	Raumlüftleuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sonnenschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δ t Einschaltzeitpunkt	WRG Wirkungsgrad	
oWSchV W1	South S_Xi_Saltelli	109,6	13,0	65	153			0,02		0,07					0,09	0,13							0,03	0,36			0,11	0,03		
oWSchV W1	South S_Xi_Jansen	109,6	13,0	65	153			0,02		0,08	0,10			0,10	0,14							0,04	0,36			0,12	0,03			
oWSchV W1	North S_Xi_Saltelli	118,7	13,1	74	163					0,07	0,11			0,09	0,15							0,04	0,32			0,11	0,03			
oWSchV W1	North S_Xi_Jansen	118,7	13,1	74	163					0,07	0,12			0,10	0,15							0,04	0,32			0,11	0,02			
oWSchV W1	East S_Xi_Saltelli	115,0	13,0	71	159					0,07	0,10			0,09	0,14							0,04	0,34			0,11	0,03			
oWSchV W1	East S_Xi_Jansen	115,0	13,0	71	159			0,02		0,07	0,12			0,10	0,14							0,04	0,34			0,12	0,02			
oWSchV W1	West S_Xi_Saltelli	114,4	13,0	70	158					0,07	0,10			0,09	0,14							0,04	0,34			0,11	0,03			
oWSchV W1	West S_Xi_Jansen	114,4	13,0	70	158			0,02		0,07	0,11			0,10	0,14							0,04	0,34			0,12	0,02			
mWSchV W1	South S_Xi_Saltelli	72,5	10,4	37	107			0,03	0,03	0,04	0,10			0,08	0,12							0,04	0,32			0,12	0,03			
mWSchV W1	South S_Xi_Jansen	72,5	10,4	37	107			0,04	0,03	0,02	0,05	0,12		0,09	0,13						0,02	0,05	0,33	0,03		0,12	0,03			
mWSchV W1	North S_Xi_Saltelli	76,7	10,5	41	112			0,04	0,03	0,04	0,13			0,08	0,13							0,05	0,29			0,11	0,03			
mWSchV W1	North S_Xi_Jansen	76,7	10,5	41	112			0,05	0,03	0,05	0,15			0,09	0,14							0,05	0,29	0,03		0,11	0,03			
mWSchV W1	East S_Xi_Saltelli	75,1	10,4	40	110			0,03	0,03	0,04	0,12			0,08	0,12							0,05	0,30			0,11	0,03			
mWSchV W1	East S_Xi_Jansen	75,1	10,4	40	110			0,05	0,03	0,05	0,14			0,09	0,13							0,05	0,31	0,03		0,12	0,03			
mWSchV W1	West S_Xi_Saltelli	74,8	10,4	39	110			0,03	0,03	0,04	0,12			0,08	0,12							0,05	0,30			0,11	0,03			
mWSchV W1	West S_Xi_Jansen	74,8	10,4	39	110			0,05	0,03	0,05	0,14			0,09	0,13					0,02	0,05	0,31	0,03		0,12	0,03				
EnEV W1	South S_Xi_Saltelli	41,8	7,1	17	64			0,03	0,04	0,03	0,04			0,05	0,08	0,12						0,07	0,33	0,03		0,11	0,04			
EnEV W1	South S_Xi_Jansen	41,8	7,1	17	64			0,04	0,05	0,04	0,05			0,07	0,09	0,13					0,03	0,08	0,33	0,04		0,12	0,04			
EnEV W1	North S_Xi_Saltelli	43,4	7,1	18	66			0,04	0,04	0,03	0,04			0,07	0,08	0,13						0,07	0,30	0,02		0,11	0,03			
EnEV W1	North S_Xi_Jansen	43,4	7,1	18	66			0,05	0,04	0,04	0,05			0,08	0,09	0,14					0,03	0,08	0,30	0,03		0,11	0,03			
EnEV W1	East S_Xi_Saltelli	42,7	7,1	18	65			0,04	0,04	0,03	0,04			0,06	0,08	0,12						0,07	0,31	0,02		0,11	0,03			
EnEV W1	East S_Xi_Jansen	42,7	7,1	18	65			0,05	0,04	0,04	0,05			0,08	0,09	0,13					0,03	0,08	0,31	0,04		0,12	0,04			
EnEV W1	West S_Xi_Saltelli	42,5	7,1	17	65			0,04	0,04	0,03	0,04			0,06	0,08	0,12						0,07	0,31	0,03		0,11	0,03			
EnEV W1	West S_Xi_Jansen	42,5	7,1	17	65			0,05	0,04	0,04	0,05			0,08	0,09	0,13				0,03	0,08	0,31	0,04		0,12	0,04				
oWSchV W2	South S_Xi_Saltelli	109,8	13,0	65	151			0,06		0,07	0,04			0,09	0,13							0,03	0,36			0,11	0,03			
oWSchV W2	South S_Xi_Jansen	109,8	13,0	65	151			0,06		0,08	0,02	0,06	0,02	0,11	0,14		0,02					0,04	0,36	0,02	0,02	0,12	0,03			
oWSchV W2	North S_Xi_Saltelli	115,1	12,9	71	156			0,06		0,07	0,05			0,10	0,14							0,04	0,32			0,11	0,03			
oWSchV W2	North S_Xi_Jansen	115,1	12,9	71	156			0,06	0,02	0,08	0,07			0,11	0,15							0,04	0,33	0,02		0,12	0,02			
oWSchV W2	East S_Xi_Saltelli	113,1	12,9	69	154			0,06		0,07	0,05			0,09	0,13							0,04	0,34			0,11	0,03			
oWSchV W2	East S_Xi_Jansen	113,1	12,9	69	154			0,06		0,08	0,06			0,11	0,14		0,02					0,04	0,35	0,02	0,02	0,12	0,03			
oWSchV W2	West S_Xi_Saltelli	112,7	12,9	68	154			0,06		0,07	0,05			0,09	0,13							0,04	0,34			0,11	0,03			
oWSchV W2	West S_Xi_Jansen	112,7	12,9	68	154			0,06		0,08	0,06			0,11	0,14		0,02					0,04	0,35	0,02	0,02	0,12	0,03			
mWSchV W2	South S_Xi_Saltelli	71,5	10,8	34	106			0,06	0,07	0,03	0,05			0,08	0,11							0,04	0,32	0,02		0,11	0,03			
mWSchV W2	South S_Xi_Jansen	71,5	10,8	34	106			0,07	0,07	0,03	0,05	0,02	0,07	0,07	0,02		0,02				0,02	0,05	0,33	0,04	0,02	0,12	0,04			
mWSchV W2	North S_Xi_Saltelli	74,4	10,9	36	110			0,08	0,07	0,02	0,04			0,06	0,09	0,12						0,04	0,28	0,03		0,11	0,03			
mWSchV W2	North S_Xi_Jansen	74,4	10,9	36	110			0,10	0,07	0,03	0,05			0,08	0,02		0,02				0,02	0,05	0,28	0,04	0,02	0,11	0,03			
mWSchV W2	East S_Xi_Saltelli	73,3	10,8	35	108			0,07	0,07	0,03	0,03			0,06	0,09	0,11						0,04	0,30	0,03		0,11	0,03			
mWSchV W2	East S_Xi_Jansen	73,3	10,8	35	108			0,09	0,07	0,03	0,05	0,02	0,08	0,08	0,02		0,02				0,02	0,06	0,30	0,04	0,02	0,12	0,04			
mWSchV W2	West S_Xi_Saltelli	73,1	10,8	35	108			0,07	0,07	0,03	0,03			0,06	0,08	0,11						0,04	0,30	0,03		0,11	0,03			
mWSchV W2	West S_Xi_Jansen	73,1	10,8	35	108			0,09	0,07	0,03	0,05			0,08	0,02		0,02			0,02	0,02	0,06	0,30	0,04	0,02	0,12	0,04			
EnEV W2	South S_Xi_Saltelli	43,1	7,7	16	67			0,06	0,09	0,03	0,03			0,03	0,08	0,10						0,06	0,30	0,03		0,11	0,03			
EnEV W2	South S_Xi_Jansen	43,1	7,7	16	67			0,07	0,10	0,05	0,05			0,05	0,02		0,02				0,03	0,07	0,31	0,05		0,12	0,04			
EnEV W2	North S_Xi_Saltelli	44,7	7,7	16	70			0,09	0,09	0,04	0,03			0,03	0,08	0,11						0,06	0,26	0,03		0,10	0,03			
EnEV W2	North S_Xi_Jansen	44,7	7,7	16	70			0,11	0,09	0,05	0,05			0,03	0,09	0,12					0,03	0,07	0,27	0,04		0,11	0,03			
EnEV W2	East S_Xi_Saltelli	44,1	7,7	16	69			0,08	0,09	0,04	0,03			0,05	0,08	0,10						0,06	0,28	0,03		0,10	0,03			
EnEV W2	East S_Xi_Jansen	44,1	7,7	16	69			0,10	0,09	0,05	0,05			0,05	0,09	0,12				0,02		0,03	0,07	0,29	0,05	0,11	0,04			
EnEV W2	West S_Xi_Saltelli	43,8	7,7	16	68			0,08	0,09	0,04	0,03			0,03	0,08	0,10						0,06	0,28	0,03		0,10	0,03			
EnEV W2	West S_Xi_Jansen	43,8	7,7	16	68			0,10	0,09	0,05	0,05			0,05	0,09	0,12			0,02		0,03	0,07	0,29	0,05		0,11	0,04			



B.5 SI-Werte: Labor Forschung

Tabelle B.15: Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Labor Forschung Nutzung 1

energetischer Baustandard	Fensterflächenanteil	Orientierung der Fassade	Sensitivitätsindex (S)					Fensterflächenanteil	Fenster U-Wert	Fenster g-Wert	Infiltration	Sommerschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegungsfläche	Person Wärmeabgabe	Luftwechsellzahl	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatur-sollwertanpassung ±Δθ	Raumluftfeuchte Max.	Raumluftfeuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sonnenschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δt Einschaltzeitpunkt	WRG Wirkungsgrad
				\bar{x} (≙ μ) [kWh/m²a]	s (≙ σ) [kWh/m²a]	Min [kWh/m²a]	Max [kWh/m²a]																							
oWSchV W1 South S_Xi_Satelli				332,8	49,6	177	499								0,31	0,08						0,02			0,03				0,21	
oWSchV W1 South S_Xi_Jansen				332,8	49,6	177	499								0,29	0,06													0,21	
oWSchV W1 North S_Xi_Satelli				346,3	49,7	191	514								0,31	0,08							0,02			0,03			0,21	
oWSchV W1 North S_Xi_Jansen				346,3	49,7	191	514								0,29	0,06													0,21	
oWSchV W1 East S_Xi_Satelli				340,7	49,6	186	507								0,31	0,08							0,02			0,03			0,21	
oWSchV W1 East S_Xi_Jansen				340,7	49,6	186	507								0,29	0,06													0,21	
oWSchV W1 West S_Xi_Satelli				340,2	49,6	185	507								0,31	0,08							0,02			0,03			0,21	
oWSchV W1 West S_Xi_Jansen				340,2	49,6	185	507								0,29	0,06													0,21	
mWSchV W1 South S_Xi_Satelli				293,6	48,5	144	460								0,33	0,07							0,03			0,03			0,22	
mWSchV W1 South S_Xi_Jansen				293,6	48,5	144	460								0,30	0,05													0,22	
mWSchV W1 North S_Xi_Satelli				300,9	48,7	152	469								0,33	0,07							0,03			0,03			0,22	
mWSchV W1 North S_Xi_Jansen				300,9	48,7	152	469								0,30	0,05													0,22	
mWSchV W1 East S_Xi_Satelli				297,9	48,6	149	465								0,33	0,07							0,03			0,03			0,22	
mWSchV W1 East S_Xi_Jansen				297,9	48,6	149	465								0,30	0,05													0,22	
mWSchV W1 West S_Xi_Satelli				297,8	48,6	149	465								0,33	0,07							0,03			0,03			0,22	
mWSchV W1 West S_Xi_Jansen				297,8	48,6	149	465								0,30	0,05													0,22	
EnEV W1 South S_Xi_Satelli				261,9	47,1	112	418								0,34	0,06								0,03		0,03			0,22	
EnEV W1 South S_Xi_Jansen				261,9	47,1	112	418								0,32	0,03													0,22	
EnEV W1 North S_Xi_Satelli				265,2	47,3	115	422								0,34	0,06								0,03		0,03			0,22	
EnEV W1 North S_Xi_Jansen				265,2	47,3	115	422								0,32	0,04													0,22	
EnEV W1 East S_Xi_Satelli				263,9	47,2	114	420								0,34	0,06								0,03		0,03			0,22	
EnEV W1 East S_Xi_Jansen				263,9	47,2	114	420								0,32	0,04													0,22	
EnEV W1 West S_Xi_Satelli				263,9	47,2	114	420								0,34	0,06							0,03		0,03				0,22	
EnEV W1 West S_Xi_Jansen				263,9	47,2	114	420								0,32	0,04													0,22	
oWSchV W2 South S_Xi_Satelli				330,0	50,2	175	501	0,03							0,30	0,08							0,02		0,03				0,21	
oWSchV W2 South S_Xi_Jansen				330,0	50,2	175	501								0,28	0,06													0,21	
oWSchV W2 North S_Xi_Satelli				339,6	50,4	185	512	0,03							0,30	0,08								0,03		0,03			0,21	
oWSchV W2 North S_Xi_Jansen				339,6	50,4	185	512								0,28	0,06													0,21	
oWSchV W2 East S_Xi_Satelli				335,7	50,2	181	507	0,03							0,30	0,08							0,02		0,03				0,21	
oWSchV W2 East S_Xi_Jansen				335,7	50,2	181	507								0,28	0,06													0,21	
oWSchV W2 West S_Xi_Satelli				335,5	50,2	181	507	0,03							0,30	0,08							0,02		0,03				0,21	
oWSchV W2 West S_Xi_Jansen				335,5	50,2	181	507								0,28	0,06													0,21	
mWSchV W2 South S_Xi_Satelli				292,6	49,4	144	465	0,05							0,31	0,07							0,03		0,03				0,21	
mWSchV W2 South S_Xi_Jansen				292,6	49,4	144	465	0,03							0,29	0,05													0,21	
mWSchV W2 North S_Xi_Satelli				297,9	49,7	150	472	0,05							0,31	0,07							0,03		0,03				0,21	
mWSchV W2 North S_Xi_Jansen				297,9	49,7	150	472	0,03							0,28	0,05													0,21	
mWSchV W2 East S_Xi_Satelli				295,9	49,5	147	469	0,05							0,31	0,07							0,03		0,03				0,21	
mWSchV W2 East S_Xi_Jansen				295,9	49,5	147	469	0,03							0,29	0,05													0,21	
mWSchV W2 West S_Xi_Satelli				295,9	49,5	148	469	0,05							0,31	0,07							0,03		0,03				0,21	
mWSchV W2 West S_Xi_Jansen				295,9	49,5	148	469	0,03							0,29	0,05													0,21	
EnEV W2 South S_Xi_Satelli				261,0	47,6	113	422	0,03							0,33	0,06							0,03		0,03				0,21	
EnEV W2 South S_Xi_Jansen				261,0	47,6	113	422								0,31	0,04													0,21	
EnEV W2 North S_Xi_Satelli				264,1	47,8	116	427	0,04							0,33	0,06							0,04		0,03				0,21	
EnEV W2 North S_Xi_Jansen				264,1	47,8	116	427								0,30	0,04													0,21	
EnEV W2 East S_Xi_Satelli				263,0	47,7	115	425	0,03							0,33	0,06							0,03		0,03				0,21	
EnEV W2 East S_Xi_Jansen				263,0	47,7	115	425								0,30	0,04													0,21	
EnEV W2 West S_Xi_Satelli				263,1	47,7	115	425	0,03							0,33	0,06							0,03		0,03				0,21	
EnEV W2 West S_Xi_Jansen				263,1	47,7	115	425								0,30	0,04													0,21	
oWSchV W3 South S_Xi_Satelli				328,0	51,1	174	504	0,05							0,29	0,08							0,02		0,03				0,20	
oWSchV W3 South S_Xi_Jansen				328,0	51,1	174	504	0,03							0,27	0,06													0,20	
oWSchV W3 North S_Xi_Satelli				334,2	51,3	181	511	0,06							0,29	0,08							0,03		0,03				0,19	
oWSchV W3 North S_Xi_Jansen				334,2	51,3	181	511	0,04							0,26	0,06													0,20	
oWSchV W3 East S_Xi_Satelli				331,7	51,2	178	508	0,05							0,29	0,08							0,02		0,03				0,20	
oWSchV W3 East S_Xi_Jansen				331,7	51,2	178	508	0,04							0,27	0,06													0,20	
oWSchV W3 West S_Xi_Satelli				331,8	51,2	178	508	0,06							0,29	0,08							0,02		0,03				0,19	
oWSchV W3 West S_Xi_Jansen				331,8	51,2	178	508	0,04							0,27	0,06													0,20	
mWSchV W3 South S_Xi_Satelli				292,2	50,6	143	471	0,09							0,30	0,07							0,03		0,03				0,20	
mWSchV W3 South S_Xi_Jansen				292,2	50,6	143	471	0,07							0,27	0,05													0,20	
mWSchV W3 North S_Xi_Satelli				296,1	51,1	145	477	0,10							0,29	0,07							0,03		0,03				0,19	
mWSchV W3 North S_Xi_Jansen				296,1	51,1	145	477	0,08							0,26	0,05													0,20	
mWSchV W3 East S_Xi_Satelli				294,8	50,8	144	474	0,09							0,29	0,07							0,03		0,03				0,19	
mWSchV W3 East S_Xi_Jansen				294,8	50,8	144	474	0,08							0,27	0,05													0,20	
mWSchV W3 West S_Xi_Satelli				294,9	50,9	144	475	0,09							0,29	0,07							0,03		0,03				0,19	
mWSchV W3 West S_Xi_Jansen				294,9	50,9	144	475	0,08							0,27	0,05													0,20	
EnEV W3 South S_Xi_Satelli				260,9	48,4	114	427	0,06							0,32	0,06							0,03		0,03				0,20	
En																														

Tabelle B.16: Sensitivitätsindizes Kühlenergiebedarf: Labor Forschung Nutzung 1

energetischer Baustandard	Fensterflächenanteil	Orientierung der Fassade	Sensitivitätsindex (S)	Sensitivitätsindizes				Einflussfaktoren																										
				\bar{x} ($\pm \mu$) [kWh/m²a]	s ($\pm \sigma$) [kWh/m²a]	Min [kWh/m²a]	Max [kWh/m²a]	Fensterflächenanteil	Fenster U-Wert	Fenster g-Wert	Infiltration	Sonnenschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegdichte	Person Wärmeabgabe	Luftwechsellzahl	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatursollwertanpassung ±0,9	Raumluftfeuchte Max.	Raumluftfeuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sonnenschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δt Einschaltzeitpunkt	WRG Wirkungsgrad				
oWSchV W1	South	S_Xi_Sattelli	6,8	2,4	0	14	0,02												0,24	0,02	0,41	0,07												
oWSchV W1	South	S_Xi_Jansen	6,8	2,4	0	14	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,14	0,03	0,04	0,05	0,04	0,28	0,03	0,40	0,10	0,03	0,03	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	
oWSchV W1	North	S_Xi_Sattelli	8,9	2,5	1	16													0,19		0,52	0,07												
oWSchV W1	North	S_Xi_Jansen	8,9	2,5	1	16	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,14	0,04	0,04	0,05	0,04	0,23	0,04	0,52	0,10	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03		
oWSchV W1	East	S_Xi_Sattelli	7,4	2,4	0	14													0,24		0,44	0,08												
oWSchV W1	East	S_Xi_Jansen	7,4	2,4	0	14	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,14	0,04	0,04	0,05	0,04	0,28	0,03	0,44	0,11	0,04	0,03	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
oWSchV W1	West	S_Xi_Sattelli	7,3	2,4	0	14													0,24		0,43	0,08												
oWSchV W1	West	S_Xi_Jansen	7,3	2,4	0	14	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,15	0,04	0,04	0,05	0,04	0,28	0,03	0,43	0,11	0,04	0,03	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03		
mWSchV W1	South	S_Xi_Sattelli	5,9	2,3	0	13	0,04												0,06		0,26													
mWSchV W1	South	S_Xi_Jansen	5,9	2,3	0	13	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03	0,09	0,04	0,04	0,05	0,04	0,30	0,03	0,41	0,11	0,04	0,03	0,08	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	
mWSchV W1	North	S_Xi_Sattelli	7,5	2,3	0	14													0,23		0,49	0,09												
mWSchV W1	North	S_Xi_Jansen	7,5	2,3	0	14	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,11	0,05	0,04	0,05	0,05	0,28	0,04	0,49	0,12	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03		
mWSchV W1	East	S_Xi_Sattelli	6,4	2,3	0	13	0,03												0,26		0,43	0,09												
mWSchV W1	East	S_Xi_Jansen	6,4	2,3	0	13	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,10	0,04	0,04	0,05	0,05	0,31	0,04	0,44	0,12	0,05	0,04	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03		
mWSchV W1	West	S_Xi_Sattelli	6,3	2,2	0	13	0,02												0,27		0,43	0,09												
mWSchV W1	West	S_Xi_Jansen	6,3	2,2	0	13	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,10	0,04	0,04	0,05	0,05	0,31	0,04	0,43	0,13	0,05	0,04	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	
EnEV W1	South	S_Xi_Sattelli	5,6	2,1	0	12	0,03												0,34		0,35	0,10												
EnEV W1	South	S_Xi_Jansen	5,6	2,1	0	12	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,38	0,03	0,35	0,13	0,05	0,03	0,08	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04		
EnEV W1	North	S_Xi_Sattelli	7,3	2,1	0	14													0,31		0,42	0,11												
EnEV W1	North	S_Xi_Jansen	7,3	2,1	0	14	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,35	0,04	0,43	0,15	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
EnEV W1	East	S_Xi_Sattelli	6,3	2,1	0	13	0,02												0,33		0,37	0,11												
EnEV W1	East	S_Xi_Jansen	6,3	2,1	0	13	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,38	0,04	0,38	0,15	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
EnEV W1	West	S_Xi_Sattelli	6,2	2,1	0	13	0,02												0,34		0,37	0,12												
EnEV W1	West	S_Xi_Jansen	6,2	2,1	0	13	0,06	0,04	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,38	0,04	0,38	0,15	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
oWSchV W2	South	S_Xi_Sattelli	7,3	2,5	0	15	0,04												0,26		0,38	0,09												
oWSchV W2	South	S_Xi_Jansen	7,3	2,5	0	15	0,07	0,03	0,03	0,03	0,03	0,14	0,03	0,04	0,04	0,04	0,29	0,02	0,35	0,11	0,03	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02		
oWSchV W2	North	S_Xi_Sattelli	10,1	2,5	2	17													0,22		0,47	0,09												
oWSchV W2	North	S_Xi_Jansen	10,1	2,5	2	17	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,15	0,04	0,04	0,05	0,04	0,26	0,04	0,48	0,12	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03			
oWSchV W2	East	S_Xi_Sattelli	8,5	2,5	0	16	0,02												0,26		0,38	0,10												
oWSchV W2	East	S_Xi_Jansen	8,5	2,5	0	16	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,14	0,03	0,04	0,04	0,04	0,30	0,03	0,40	0,13	0,04	0,03	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
oWSchV W2	West	S_Xi_Sattelli	8,4	2,5	0	16	0,11												0,27		0,38	0,10												
oWSchV W2	West	S_Xi_Jansen	8,4	2,5	0	16	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,14	0,03	0,04	0,04	0,04	0,31	0,03	0,39	0,13	0,04	0,03	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
mWSchV W2	South	S_Xi_Sattelli	6,5	2,4	0	14	0,07												0,28		0,35	0,10												
mWSchV W2	South	S_Xi_Jansen	6,5	2,4	0	14	0,11	0,03	0,04	0,03	0,03	0,09	0,03	0,04	0,04	0,04	0,32	0,03	0,36	0,12	0,04	0,03	0,08	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
mWSchV W2	North	S_Xi_Sattelli	8,9	2,4	1	16													0,25		0,44	0,11												
mWSchV W2	North	S_Xi_Jansen	8,9	2,4	1	16	0,06	0,04	0,06	0,04	0,04	0,11	0,05	0,04	0,05	0,05	0,30	0,04	0,45	0,15	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	
mWSchV W2	East	S_Xi_Sattelli	7,5	2,4	0	15	0,05												0,28		0,38	0,11												
mWSchV W2	East	S_Xi_Jansen	7,5	2,4	0	15	0,08	0,04	0,05	0,04	0,04	0,10	0,04	0,04	0,05	0,05	0,32	0,03	0,39	0,14	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
mWSchV W2	West	S_Xi_Sattelli	7,5	2,3	0	15	0,04												0,29		0,37	0,11												
mWSchV W2	West	S_Xi_Jansen	7,5	2,3	0	15	0,08	0,04	0,05	0,04	0,04	0,10	0,04	0,04	0,05	0,05	0,33	0,03	0,38	0,14	0,05	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
EnEV W2	South	S_Xi_Sattelli	6,3	2,2	0	13	0,06												0,36		0,28	0,12												
EnEV W2	South	S_Xi_Jansen	6,3	2,2	0	13	0,09	0,03	0,05	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,40	0,03	0,29															

Tabelle B.17: Sensitivitätsindizes Heizenergiebedarf: Labor Forschung Nutzung 2

energetischer Baustandard	Fensterflächenanteil	Orientierung der Fassade	Sensitivitätsindex (S)	\bar{x} ($\pm \mu$) [kWh/m²a]	s ($\pm \sigma$) [kWh/m²a]	Min [kWh/m²a]	Max [kWh/m²a]	Fensterflächenanteil	Fenster U-Wert	Fenster g-Wert	Infiltration	Sonnenschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegungsdichte	Person Wärmeabgabe	Luftwechselszahl	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatursollwertanpassung ±1σ	Raumlufffeuchte Max.	Raumlufffeuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sonnenschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δt Einschaltzeitpunkt	WRG Wirkungsgrad		
																															0,22	0,25
oWSchV	W1	South	S_Xi_Sattelli	1388,0	67,7	1194	1584									0,61	0,06														0,22	0,25
oWSchV	W1	South	S_Xi_Jansen	1388,0	67,7	1194	1584										0,61	0,05													0,22	0,25
oWSchV	W1	North	S_Xi_Sattelli	1407,0	67,9	1213	1605										0,61	0,06												0,22	0,25	
oWSchV	W1	North	S_Xi_Jansen	1407,0	67,9	1213	1605										0,61	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W1	East	S_Xi_Sattelli	1397,0	67,8	1203	1594										0,61	0,06												0,22	0,25	
oWSchV	W1	East	S_Xi_Jansen	1397,0	67,8	1203	1594										0,61	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W1	West	S_Xi_Sattelli	1396,3	67,8	1203	1593										0,61	0,06												0,22	0,25	
oWSchV	W1	West	S_Xi_Jansen	1396,3	67,8	1203	1593										0,61	0,05												0,22	0,25	
mWSchV	W1	South	S_Xi_Sattelli	1324,5	66,7	1137	1521										0,63	0,05												0,21	0,24	
mWSchV	W1	South	S_Xi_Jansen	1324,5	66,7	1137	1521										0,63	0,04												0,21	0,24	
mWSchV	W1	North	S_Xi_Sattelli	1336,4	66,9	1149	1534										0,63	0,05												0,20	0,23	
mWSchV	W1	North	S_Xi_Jansen	1336,4	66,9	1149	1534										0,63	0,04												0,21	0,24	
mWSchV	W1	East	S_Xi_Sattelli	1330,0	66,8	1142	1527										0,63	0,05												0,23	0,26	
mWSchV	W1	East	S_Xi_Jansen	1330,0	66,8	1142	1527										0,63	0,04												0,21	0,24	
mWSchV	W1	West	S_Xi_Sattelli	1329,7	66,8	1142	1527										0,63	0,05												0,21	0,24	
mWSchV	W1	West	S_Xi_Jansen	1329,7	66,8	1142	1527										0,63	0,04												0,21	0,24	
EnEV	W1	South	S_Xi_Sattelli	1266,1	65,5	1078	1460										0,65	0,04												0,20	0,23	
EnEV	W1	South	S_Xi_Jansen	1266,1	65,5	1078	1460										0,65	0,03												0,20	0,23	
EnEV	W1	North	S_Xi_Sattelli	1272,7	65,6	1085	1467										0,65	0,04												0,20	0,23	
EnEV	W1	North	S_Xi_Jansen	1272,7	65,6	1085	1467										0,65	0,03												0,20	0,23	
EnEV	W1	East	S_Xi_Sattelli	1269,0	65,5	1081	1463										0,65	0,04												0,20	0,23	
EnEV	W1	East	S_Xi_Jansen	1269,0	65,5	1081	1463										0,65	0,03												0,20	0,23	
EnEV	W1	West	S_Xi_Sattelli	1268,8	65,5	1081	1463										0,65	0,04												0,20	0,23	
EnEV	W1	West	S_Xi_Jansen	1268,8	65,5	1081	1463										0,65	0,03												0,20	0,23	
oWSchV	W2	South	S_Xi_Sattelli	1381,8	68,1	1187	1583										0,60	0,06												0,22	0,25	
oWSchV	W2	South	S_Xi_Jansen	1381,8	68,1	1187	1583										0,60	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W2	North	S_Xi_Sattelli	1396,6	68,3	1200	1599										0,60	0,06												0,22	0,25	
oWSchV	W2	North	S_Xi_Jansen	1396,6	68,3	1200	1599										0,60	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W2	East	S_Xi_Sattelli	1388,8	68,2	1193	1590										0,60	0,06												0,22	0,25	
oWSchV	W2	East	S_Xi_Jansen	1388,8	68,2	1193	1590										0,60	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W2	West	S_Xi_Sattelli	1388,3	68,2	1193	1590										0,60	0,06												0,22	0,25	
oWSchV	W2	West	S_Xi_Jansen	1388,3	68,2	1193	1590										0,60	0,05												0,22	0,25	
mWSchV	W2	South	S_Xi_Sattelli	1321,0	67,2	1133	1523										0,61	0,05												0,20	0,23	
mWSchV	W2	South	S_Xi_Jansen	1321,0	67,2	1133	1523										0,61	0,04												0,20	0,23	
mWSchV	W2	North	S_Xi_Sattelli	1330,5	67,5	1141	1535	0,02									0,61	0,05												0,20	0,23	
mWSchV	W2	North	S_Xi_Jansen	1330,5	67,5	1141	1535										0,61	0,04												0,20	0,23	
mWSchV	W2	East	S_Xi_Sattelli	1325,5	67,4	1137	1529	0,02									0,61	0,05												0,20	0,23	
mWSchV	W2	East	S_Xi_Jansen	1325,5	67,4	1137	1529										0,61	0,04												0,20	0,23	
mWSchV	W2	West	S_Xi_Sattelli	1325,2	67,4	1136	1529	0,02									0,61	0,05												0,20	0,23	
mWSchV	W2	West	S_Xi_Jansen	1325,2	67,4	1136	1529										0,61	0,04												0,20	0,23	
EnEV	W2	South	S_Xi_Sattelli	1260,3	65,7	1074	1455										0,64	0,04												0,20	0,23	
EnEV	W2	South	S_Xi_Jansen	1260,3	65,7	1074	1455										0,64	0,03												0,20	0,23	
EnEV	W2	North	S_Xi_Sattelli	1265,4	65,8	1080	1461										0,63	0,04						0,02						0,20	0,23	
EnEV	W2	North	S_Xi_Jansen	1265,4	65,8	1080	1461										0,63	0,03												0,20	0,23	
EnEV	W2	East	S_Xi_Sattelli	1262,6	65,8	1077	1458										0,63	0,04												0,20	0,23	
EnEV	W2	East	S_Xi_Jansen	1262,6	65,8	1077	1458										0,63	0,03												0,20	0,23	
EnEV	W2	West	S_Xi_Sattelli	1262,3	65,7	1077	1457										0,63	0,04												0,20	0,23	
EnEV	W2	West	S_Xi_Jansen	1262,3	65,7	1077	1457										0,63	0,03												0,20	0,23	
oWSchV	W3	South	S_Xi_Sattelli	1376,1	68,8	1176	1582	0,02									0,58	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W3	South	S_Xi_Jansen	1376,1	68,8	1176	1582										0,58	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W3	North	S_Xi_Sattelli	1386,8	69,0	1185	1594	0,02									0,58	0,06												0,22	0,25	
oWSchV	W3	North	S_Xi_Jansen	1386,8	69,0	1185	1594										0,58	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W3	East	S_Xi_Sattelli	1381,2	68,9	1180	1588	0,02									0,58	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W3	East	S_Xi_Jansen	1381,2	68,9	1180	1588										0,58	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W3	West	S_Xi_Sattelli	1380,8	68,9	1180	1588	0,02									0,58	0,05												0,22	0,25	
oWSchV	W3	West	S_Xi_Jansen	1380,8	68,9	1180	1588										0,58	0,05												0,22	0,25	
mWSchV	W3	South	S_Xi_Sattelli	1318,4	68,1	1125	1527	0,04									0,60	0,05												0,20	0,23	
mWSchV	W3	South	S_Xi_Jansen	1318,4	68,1	1125	1527										0,59	0,05												0,20	0,23	
mWSchV	W3	North	S_Xi_Sattelli	1325,5	68,5	1130	1536	0,05									0,59	0,05												0,20	0,23	
mWSchV	W3	North</																														

Tabelle B.18: Sensitivitätsindizes Kühlenergiebedarf: Labor Forschung Nutzung 2

energetischer Baustandard	Fensterflächenanteil	Orientierung über Fassade	Sensitivitätsindex (S)	\bar{x} ($\pm \mu$) [kWh/m²a]	s ($\pm \sigma$) [kWh/m²a]	Min [kWh/m²a]	Max [kWh/m²a]	Fensterflächenanteil	Fenster U-Wert	Fenster g-Wert	Infiltration	Sonnenschutz fest	Außenwand U-Wert	Person Belegdichte	Person Wärmeabgabe	Luftwechszahl	Raumtemperatur Heizen	Raumtemperatur Kühlen	Raumtemperatur-Sollwertanpassung $\pm 1\%$	Raumlüftfeuchte Max.	Raumlüftfeuchte Min.	Elek. Geräte Anschlussleistung	Elek. Geräte Standby	Person Anwesenheit	Sonnenschutz beweglich	Beleuchtung Anschlussleistung	Nutzungsbeginn	Nutzungsende	TGA Δt Einschaltzeitpunkt	WRC Wirkungsgrad		
oWSchV	W1	South	S_Xi_Sattelli	16,8	2,5	9	25							0,11		0,07	0,23		0,37	0,11			0,05									
oWSchV	W1	South	S_Xi_Jansen	16,8	2,5	9	25							0,10		0,06	0,23		0,38	0,10			0,04									
oWSchV	W1	North	S_Xi_Sattelli	18,5	2,5	10	26							0,10		0,06	0,18		0,48	0,10			0,02									
oWSchV	W1	North	S_Xi_Jansen	18,5	2,5	10	26							0,10		0,06	0,19		0,50	0,10			0,02									
oWSchV	W1	East	S_Xi_Sattelli	16,6	2,5	8	25							0,10		0,05	0,23		0,41	0,12			0,03									
oWSchV	W1	East	S_Xi_Jansen	16,6	2,5	8	25							0,10		0,05	0,24		0,42	0,11			0,03									
oWSchV	W1	West	S_Xi_Sattelli	16,5	2,5	8	24							0,11		0,05	0,23		0,40	0,12			0,03									
oWSchV	W1	West	S_Xi_Jansen	16,5	2,5	8	24							0,11		0,05	0,24		0,42	0,11			0,03									
mWSchV	W1	South	S_Xi_Sattelli	15,4	2,3	8	23	0,03						0,06		0,06	0,25		0,38	0,13			0,05									
mWSchV	W1	South	S_Xi_Jansen	15,4	2,3	8	23	0,03						0,06		0,06	0,26		0,39	0,12			0,05									
mWSchV	W1	North	S_Xi_Sattelli	16,2	2,3	9	23							0,07		0,04	0,22		0,46	0,13			0,02									
mWSchV	W1	North	S_Xi_Jansen	16,2	2,3	9	23							0,07		0,05	0,23		0,48	0,12			0,02									
mWSchV	W1	East	S_Xi_Sattelli	14,9	2,3	7	22	0,02						0,06		0,04	0,25		0,41	0,14			0,03									
mWSchV	W1	East	S_Xi_Jansen	14,9	2,3	7	22	0,03						0,06		0,04	0,26		0,42	0,13			0,03									
mWSchV	W1	West	S_Xi_Sattelli	14,9	2,3	7	22	0,02						0,06		0,04	0,26		0,40	0,14			0,03									
mWSchV	W1	West	S_Xi_Jansen	14,9	2,3	7	22	0,02						0,06		0,04	0,27		0,42	0,13			0,03									
EnEV	W1	South	S_Xi_Sattelli	13,8	2,2	7	21	0,03						0,02		0,04	0,32		0,33	0,16			0,04									
EnEV	W1	South	S_Xi_Jansen	13,8	2,2	7	21	0,03						0,02		0,04	0,33		0,34	0,15			0,04									
EnEV	W1	North	S_Xi_Sattelli	14,5	2,2	7	21							0,02		0,02	0,29		0,40	0,17			0,02									
EnEV	W1	North	S_Xi_Jansen	14,5	2,2	7	21							0,03		0,03	0,31		0,42	0,17			0,02									
EnEV	W1	East	S_Xi_Sattelli	13,4	2,2	6	20							0,02		0,03	0,32		0,35	0,17			0,02									
EnEV	W1	East	S_Xi_Jansen	13,4	2,2	6	20	0,03						0,03		0,03	0,33		0,37	0,17			0,03									
EnEV	W1	West	S_Xi_Sattelli	13,4	2,2	6	20							0,02		0,03	0,32		0,35	0,18			0,02									
EnEV	W1	West	S_Xi_Jansen	13,4	2,2	6	20	0,02						0,02		0,03	0,34		0,37	0,17			0,03									
oWSchV	W2	South	S_Xi_Sattelli	17,2	2,6	8	26	0,04						0,11		0,06	0,24		0,32	0,13			0,05									
oWSchV	W2	South	S_Xi_Jansen	17,2	2,6	8	26	0,04						0,11		0,06	0,25		0,34	0,12			0,04									
oWSchV	W2	North	S_Xi_Sattelli	18,6	2,6	10	26							0,11		0,04	0,21		0,44	0,14			0,02									
oWSchV	W2	North	S_Xi_Jansen	18,6	2,6	10	26							0,11		0,04	0,22		0,46	0,13			0,02									
oWSchV	W2	East	S_Xi_Sattelli	16,9	2,6	8	25							0,11		0,04	0,25		0,36	0,15			0,02									
oWSchV	W2	East	S_Xi_Jansen	16,9	2,6	8	25	0,02						0,10		0,04	0,26		0,38	0,14			0,03									
oWSchV	W2	West	S_Xi_Sattelli	16,9	2,5	8	25							0,11		0,04	0,25		0,36	0,15			0,03									
oWSchV	W2	West	S_Xi_Jansen	16,9	2,5	8	25							0,10		0,04	0,26		0,37	0,14			0,03									
mWSchV	W2	South	S_Xi_Sattelli	15,7	2,5	7	23	0,06						0,06		0,05	0,28		0,32	0,15			0,04									
mWSchV	W2	South	S_Xi_Jansen	15,7	2,5	7	23	0,07						0,06		0,05	0,28		0,33	0,14			0,05									
mWSchV	W2	North	S_Xi_Sattelli	16,4	2,4	8	23							0,07		0,03	0,24		0,41	0,17			0,02									
mWSchV	W2	North	S_Xi_Jansen	16,4	2,4	8	23							0,07		0,03	0,26		0,44	0,17			0,02									
mWSchV	W2	East	S_Xi_Sattelli	15,1	2,4	7	22	0,04						0,06		0,03	0,27		0,35	0,17			0,02									
mWSchV	W2	East	S_Xi_Jansen	15,1	2,4	7	22	0,05						0,07		0,04	0,28		0,37	0,16			0,03									
mWSchV	W2	West	S_Xi_Sattelli	15,2	2,4	7	22	0,04						0,06		0,03	0,27		0,35	0,17			0,02									
mWSchV	W2	West	S_Xi_Jansen	15,2	2,4	7	22	0,04						0,06		0,04	0,29		0,37	0,17			0,03									
EnEV	W2	South	S_Xi_Sattelli	13,9	2,3	6	21	0,05						0,02		0,03	0,33		0,26	0,19			0,04									
EnEV	W2	South	S_Xi_Jansen	13,9	2,3	6	21	0,06		0,02				0,03		0,03	0,35		0,28	0,18			0,04									
EnEV	W2	North	S_Xi_Sattelli	14,6	2,3	7	21							0,02		0,02	0,31		0,34	0,22			0,02									
EnEV	W2	North	S_Xi_Jansen	14,6	2,3	7	21			0,02	0,03			0,03		0,02	0,33		0,37	0,22	0,02		0,02					0,02				
EnEV	W2	East	S_Xi_Sattelli	13,3	2,3	6	20	0,03						0,02		0,02	0,34		0,29	0,22			0,02									
EnEV	W2	East	S_Xi_Jansen	13,3	2,3	6	20	0,04		0,03				0,03		0,02	0,36		0,31	0,22	0,02		0,02									
EnEV	W2	West	S_Xi_Sattelli	13,5	2,3	6	20	0,02						0,02		0,02	0,34		0,29	0,22			0,02									
EnEV	W2	West	S_Xi_Jansen	13,5	2,3	6	20	0,03		0,03				0,03		0,02	0,36		0,31	0,22	0,02		0,02									
oWSchV	W3	South	S_Xi_Sattelli	17,6	2,7	8	26	0,06						0,11		0,05	0,25		0,28	0,14			0,04									
oWSchV	W3	South	S_Xi_Jansen	17,6	2,7	8	26	0,06						0,10		0,05	0,27		0,30	0,13			0,04									
oWSchV	W3	North	S_Xi_Sattelli	19,1																												

C Analysedaten der Case-Studies

C.1 Case-Study 1 - Verwaltungsgebäude mit Server

Tabelle C.1: Randbedingungen Case-Study 1 - Sample 1

Allgemeine Gebäudedaten:													
	Min	Max	Δ										
Außenwand λ Ziegel	0,75	0,95	0,2	[W/mK]									
Oberste Geschossdecke λ Mineralfaser	0,03	0,05	0,02	[W/mK]									
Dach λ Mineralfaser	0,03	0,05	0,02	[W/mK]									
Fenster U-Wert	1,5	3	1,5	[W/m²]									
Fenster g-Wert	0,6	0,8	0,2	[-]									
Sonnenschutz bew eglich	150	300	150	[W/m²]									
Infiltration	0,2	0,5	0,3	[h ⁻¹]									
Nutzungsdaten:													
	Büroähnliche Nutzung			CIP-Raum			Gemeinschaftsraum			Hörsaal			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte	12	16	4	3	4	1	5	7	2	3	3,5	0,5	[m²/Person]
Person Anwesenheit	70	100	30	70	100	30	0	30	30	70	100	30	[%]
Ventilation Luftmenge Person	30,0	55,0	25,0	30,0	55,0	25,0				30,0	55,0	25,0	[m³/h Person]
Ventilation Luftmenge Fläche							3,5	4,5	1,0				[m³/m²h]
Ventilation Luftw echselrate													[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	16	20	4	8	16	8	10	18	8	16	20	4	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	8	16	8	5	25	20	2	5	3	3	7	4	[W/m²]
Elek. Geräte Standby	5	20	15	5	30	25	20	60	40	0	10	10	[%]
Raumtemperatur Heizen	20	23	3	20	23	3	20	23	3	20	23	3	[°C]
Raumtemperaturanpassung ±Δθ	0	4	4	0	4	4	0	4	4	0	4	4	[°C]
WRG Wirkungsgrad													[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]
	Lager			Nebennutzfläche			Technik			Verkehrsfläche			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte													[m²/Person]
Person Anwesenheit	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	[%]
Ventilation Luftmenge Person													[m³/h Person]
Ventilation Luftmenge Fläche	0,1	0,2	0,1	7,5	15,0	7,5	0,1	0,2	0,1				[m³/m²h]
Ventilation Luftw echselrate													[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	2	5	3	7	10	3	2	5	3	2	5	3	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung										0	2	2	[W/m²]
Elek. Geräte Standby	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	50	50	[%]
Raumtemperatur Heizen	16	18	2	16	18	2	16	20	4	16	20	4	[°C]
Raumtemperaturanpassung ±Δθ	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	[°C]
WRG Wirkungsgrad													[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]

Tabelle C.2: Randbedingungen Case-Study 1 - Sample 2

Allgemeine Gebäudedaten:													
	Min	Max	Δ										
Außenwand λ Ziegel	0,8	0,9	0,1	[W/mK]									
Oberste Geschossdecke λ Mineralfaser	0,03	0,04	0,01	[W/mK]									
Dach λ Mineralfaser	0,03	0,04	0,01	[W/mK]									
Fenster U-Wert	1,5	2	0,5	[W/m²]									
Fenster g-Wert	0,6	0,8	0,2	[-]									
Sonnenschutz bew eglich	150	300	150	[W/m²]									
Infiltration	0,2	0,3	0,1	[h ⁻¹]									

Nutzungsdaten:													
	Büroähnliche Nutzung			CIP-Raum			Gemeinschaftsraum			Hörsaal			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte	13	15	2	3	4	1	5,5	6,5	1	3	3,5	0,5	[m²/Person]
Person Anwesenheit	70	100	30	70	100	30	0	30	30	70	100	30	[%]
Ventilation Luftmenge Person	30,0	55,0	25,0	30,0	55,0	25,0				30,0	55,0	25,0	[m³/h Person]
Ventilation Luftmenge Fläche							3,5	4,5	1,0				[m³/m²h]
Ventilation Luftw echselrate													[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	17	19	2	14	16	2	16	18	2	17	19	2	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	12	14	2	15	25	10	4	5	1	4	6	2	[W/m²]
Elek. Geräte Standby	5	20	15	5	30	25	50	60	10	5	10	5	[%]
Raumtemperatur Heizen	21	23	2	20	23	3	20	23	3	20	23	3	[°C]
Raumtemperaturanpassung ±Δθ	2	4	2	2	4	2	2	4	2	2	4	2	[°C]
WRG Wirkungsgrad													[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]

	Lager			Nebennutzfläche			Technik			Verkehrsfläche			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte													[m²/Person]
Person Anwesenheit	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	[%]
Ventilation Luftmenge Person													[m³/h Person]
Ventilation Luftmenge Fläche	0,1	0,2	0,1	7,5	15,0	7,5	0,1	0,2	0,1				[m³/m²h]
Ventilation Luftw echselrate													[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	3	4	1	8	9	1	3	4	1	3	4	1	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung										0	2	2	[W/m²]
Elek. Geräte Standby	0	1	1	0	1	1	0	1	1	30	50	20	[%]
Raumtemperatur Heizen	17	18	1	17	18	1	17	18	1	16	20	4	[°C]
Raumtemperaturanpassung ±Δθ	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	[°C]
WRG Wirkungsgrad													[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]

C.2 Case-Study 2 - Verwaltungsgebäude freistehend

Tabelle C.3: Randbedingungen Case-Study 2 - Sample 1

Allgemeine Gebäudedaten:													
	Min	Max	Δ										
Außenwand λ Ziegel	0,6	0,8	0,2	[W/mK]									
Bodenplatte λ Material	0,8	1	0,2	[W/mK]									
Dach λ Mineralfaser	0,03	0,05	0,02	[W/mK]									
Fenster U-Wert	1,5	2,5	1	[W/m²]									
Fenster g-Wert	0,6	0,8	0,2	[-]									
Sonnenschutz bew. eglich	150	300	150	[W/m²]									
Infiltration	0,2	0,4	0,2	[ACH]									
Nutzungsdaten:													
	büroähnliche Nutzung			Gemeinschaftsraum			Nebennutzfläche			Technik			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte	12	16	4	5	7	2							[m²/Person]
Person Anwesenheit	70	100	30	0	30	30	0	1	1	0	1	1	[%]
Ventilation Luftmenge Person	6,0	45,0	39,0										[m³/h Person]
Ventilation Luftmenge Fläche				3,5	4,5	1,0	7,5	15,0	7,5	0,1	0,2	0,1	[m³/m²h]
Ventilation Luftw. echselrate													[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	10	15	5	8	12	4	5	10	5	2	5	3	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	4	10	6	2	5	3							[W/m²]
Elek. Geräte Standby	0	5	5	20	60	40	0	1	1	0	1	1	[%]
Raumtemperatur Heizen	20	23	3	20	23	3	16	18	2	16	20	4	[°C]
Raumtemperaturanpassung ±Δθ	0	4	4	0	4	4	0	2	2	0	2	2	[°C]
WRG Wirkungsgrad													[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]
	Verkehrsfläche			Lager einfach			Lager RLT						
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ				
Person Belegungsdichte													[m²/Person]
Person Anwesenheit	0	1	1	0	1	1	0	100	100				[%]
Ventilation Luftmenge Person													[m³/h Person]
Ventilation Luftmenge Fläche				0,1	0,2	0,1							[m³/m²h]
Ventilation Luftw. echselrate							0,50	1,25	0,75				[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	2	5	3	2	5	3	2	5	3				[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	0	2	2				0	0	0				[W/m²]
Elek. Geräte Standby	0	50	50	0	1	1	0	100	100				[%]
Raumtemperatur Heizen	16	20	4	16	18	2	16	18	2				[°C]
Raumtemperaturanpassung ±Δθ	0	2	2	0	2	2	0	2	2				[°C]
WRG Wirkungsgrad							60	90	30				[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00				[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00				[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00				[hh:mm]

Tabelle C.4: Randbedingungen Case-Study 2 - Sample 2

Allgemeine Gebäudedaten:												
	Min	Max	Δ									
Außenwand λ Ziegel	0,6	0,7	0,1	[W/mK]								
Bodenplatte λ Material	0,8	0,9	0,1	[W/mK]								
Dach λ Mineralfaser	0,03	0,04	0,01	[W/mK]								
Fenster U-Wert	1,5	2	0,5	[W/m²]								
Fenster g-Wert	0,6	0,8	0,2	[-]								
Sonnenschutz bew eglich	150	300	150	[W/m²]								
Infiltration	0,3	0,3	0	[ACH]								

Nutzungsdaten:													
	büroähnliche Nutzung			Gemeinschaftsraum			Nebennutzfläche			Technik			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte	13	15	2	5,5	6,5	1							[m²/Person]
Person Anwesenheit	70	100	30	0	30	30	0	1	1	0	1	1	[%]
Ventilation Luftmenge Person	30,0	55,0	25,0										[m³/h Person]
Ventilation Luftmenge Fläche				3,5	4,5	1,0	7,5	15,0	7,5	0,1	0,2	0,1	[m³/m²h]
Ventilation Luftw echselrate													[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	10	12	2	8	10	2	5	7	2	3	4	1	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	4	6	2	2	4	2							[W/m²]
Elek. Geräte Standby	0	2	2	20	30	10	0	1	1	0	1	1	[%]
Raumtemperatur Heizen	21	23	2	20	23	3	17	18	1	17	18	1	[°C]
Raumtemperaturanpassung ±Δθ	2	4	2	2	4	2	0	1	1	0	1	1	[°C]
WRG Wirkungsgrad													[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]

	Verkehrsfläche			Lager einfach			Lager RLt			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte										[m²/Person]
Person Anwesenheit	0	1	1	0	1	1	0	100	100	[%]
Ventilation Luftmenge Person										[m³/h Person]
Ventilation Luftmenge Fläche				0,1	0,2	0,1				[m³/m²h]
Ventilation Luftw echselrate							0,50	0,70	0,2	[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	3	4	1	2	3	1	2	3	1	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	0	2	2				0	0	0	[W/m²]
Elek. Geräte Standby	30	50	20	0	1	1	0	100	100	[%]
Raumtemperatur Heizen	16	20	4	17	18	1	17	18	1	[°C]
Raumtemperaturanpassung ±Δθ	0	1	1	0	1	1	0	1	1	[°C]
WRG Wirkungsgrad							75	90	15	[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]

C.3 Case-Study 3 - Referenzgebäude Zweibund

Tabelle C.5: Randbedingungen Case-Study 3 - Sample 1

Allgemeine Gebäudedaten:													
	Mn	Max	Δ										
Außenwand λ Mineralfaser	0,020	0,050	0,030	[W/mK]									
Oberste Geschossdecke λ Mineralfaser	0,020	0,050	0,030	[W/mK]									
Kellerboden λ Mineralfaser	0,020	0,050	0,030	[W/mK]									
Fenster U-Wert	0,7	1,3	0,6	[W/m²K]									
Fenster g-Wert	0,5	0,8	0,3	[-]									
Fenster Breite S-N	1,22	1,82	0,61	[m]									
Fenster Breite O-W	1,50	2,25	0,75	[m]									
Fenster Breite Flur	0,60	0,90	0,30	[m]									
Sonnenschutz bew eglich	150	300	150	[W/m²]									
Infiltration Nutzungen	0,1	0,5	0,4	[h ⁻¹]									
Infiltration Verkehr	0,0	0,5	0,5	[h ⁻¹]									

Nutzungsdaten:													
	Büroähnliche Nutzung			CIP-Raum			Hörsaal			Labor			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte	10	20	10	3	4	1	3	4	1	10	20	10	[m²/Person]
Person Anwesenheit	70	100	30	70	100	30	70	100	30	70	100	30	[%]
Ventilation Luftmenge Fläche	30	55	25	30	55	25	30	55	25				[m³/h Person]
Ventilation Luftw echselrate										8	16	8	[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	14	20	6	7	15	8	14	20	6	14	20	6	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	5	15	10	1	21	20	2	6	4	6	36	30	[W/m²]
Elek. Geräte Standby	0	15	15	0	25	25	0	10	10	0	50	50	[%]
Raumtemperatur Heizen	19	23	4	19	23	4	19	23	4	20	23	3	[°C]
Raumtemperaturanpassung -Δθ	0	4	4	0	4	4	0	4	4	0	4	4	[°C]
Raumtemperatur Kühlen										24	28	4	[°C]
Raumtemperaturanpassung +Δθ										0	4	4	[°C]
Raumluftfeuchte Min.										30	55	25	[%]
Raumluftfeuchte Max.										55	70	15	[%]
WRG Wirkungsgrad										50	90	40	[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	0:00	0:30	0:30	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]

	Lager			Nebennutzfläche			Technik			Verkehrsfläche			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte													[m²/Person]
Person Anwesenheit	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	[%]
Ventilation Luftmenge Fläche	0	0	0	0	0	0	0	0	0				[m³/h Person]
Ventilation Luftw echselrate													[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	2	5	3	2	5	3	2	5	3	2	5	3	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung										0	2	2	[W/m²]
Elek. Geräte Standby	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	50	50	[%]
Raumtemperatur Heizen	16	20	4	16	20	4	16	20	4	16	20	4	[°C]
Raumtemperaturanpassung -Δθ	0	4	4	0	4	4	0	4	4	0	4	4	[°C]
Raumtemperatur Kühlen													[°C]
Raumtemperaturanpassung +Δθ													[°C]
Raumluftfeuchte Min.													[%]
Raumluftfeuchte Max.													[%]
WRG Wirkungsgrad													[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	[hh:mm]

Tabelle C.6: Randbedingungen Case-Study 3 - Sample 2

Allgemeine Gebäudedaten:												
	Min	Max	Δ									
Außenwand λ Mineralfaser	0,030	0,035	0,005	[W/mK]								
Oberste Geschossdecke λ Mineralfaser	0,035	0,035	0,000	[W/mK]								
Kellerboden λ Mineralfaser	0,030	0,035	0,005	[W/mK]								
Fenster U-Wert	0,9	1,1	0,2	[W/m²K]								
Fenster g-Wert	0,6	0,7	0,1	[-]								
Fenster Breite S-N	1,40	1,60	0,20	[m]								
Fenster Breite O-W	1,70	1,90	0,20	[m]								
Fenster Breite Flur	0,70	0,80	0,10	[m]								
Sonnenschutz bew eglich	150	300	150	[W/m²]								
Infiltration Nutzungen	0,3	0,4	0,1	[h ⁻¹]								
Infiltration Verkehr	0,1	0,2	0,1	[h ⁻¹]								

Nutzungsdaten:													
	Büroähnliche Nutzung			CIP-Raum			Hörsaal			Labor			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte	12	15	3	3	4	1	3	4	1	12	14	2	[m²/Person]
Person Anwesenheit	70	100	30	50	70	20	50	75	25	70	100	30	[%]
Ventilation Luftmenge Fläche	30	55	25	30	55	25	30	55	25				[m³/h Person]
Ventilation Luftw echselrate										11	14	3	[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	14	18	4	7	10	3	14	18	4	14	17	3	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung	8	12	4	15	20	5	4	6	2	30	36	6	[W/m²]
Elek. Geräte Standby	5	10	5	10	20	10	5	10	5	15	50	35	[%]
Raumtemperatur Heizen	21	23	2	21	23	2	21	23	2	21	23	2	[°C]
Raumtemperaturanpassung -Δθ	0	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	[°C]
Raumtemperatur Kühlen										26	28	2	[°C]
Raumtemperaturanpassung +Δθ										0	2	2	[°C]
Raumluftfeuchte Min.										35	45	10	[%]
Raumluftfeuchte Max.										50	60	10	[%]
WRG Wirkungsgrad										65	85	20	[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	0:45	1:15	0:30	0:45	1:15	0:30	0:45	1:15	0:30	0:00	0:10	0:10	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:30	8:30	1:00	7:30	8:30	1:00	7:30	8:30	1:00	8:00	9:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:30	18:30	1:00	17:30	18:30	1:00	17:30	18:30	1:00	18:00	19:00	1:00	[hh:mm]

	Lager			Nebennutzfläche			Technik			Verkehrsfläche			
	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	Min	Max	Δ	
Person Belegungsdichte													[m²/Person]
Person Anwesenheit	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	[%]
Ventilation Luftmenge Fläche	0	0	0	0	0	0	0	0	0				[m³/h Person]
Ventilation Luftw echselrate													[h ⁻¹]
Beleuchtung Anschlussleistung	3	4	1	4	5	1	4	5	1	4	5	1	[W/m²]
Elek. Geräte Anschlussleistung													[W/m²]
Elek. Geräte Standby	0	1	1	0	1	1	0	1	1	25	50	25	[%]
Raumtemperatur Heizen	16	20	4	16	20	4	16	20	4	16	20	4	[°C]
Raumtemperaturanpassung -Δθ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	[°C]
Raumtemperatur Kühlen													[°C]
Raumtemperaturanpassung +Δθ													[°C]
Raumluftfeuchte Min.													[%]
Raumluftfeuchte Max.													[%]
WRG Wirkungsgrad													[%]
TGA Δt Einschaltzeitpunkt	0:00	0:05	0:05	0:00	0:05	0:05	0:00	0:05	0:05	1:00	2:00	1:00	[hh:mm]
Nutzungsbeginn	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	7:00	9:00	2:00	6:30	7:30	1:00	[hh:mm]
Nutzungsende	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	17:00	19:00	2:00	18:00	19:00	1:00	[hh:mm]

C.4 Testergebnisse der verwendeten statistischen Methoden

Tests der Heizenergie auf Normalverteilung sowie der Gleichheit von Varianz und Mittelwert

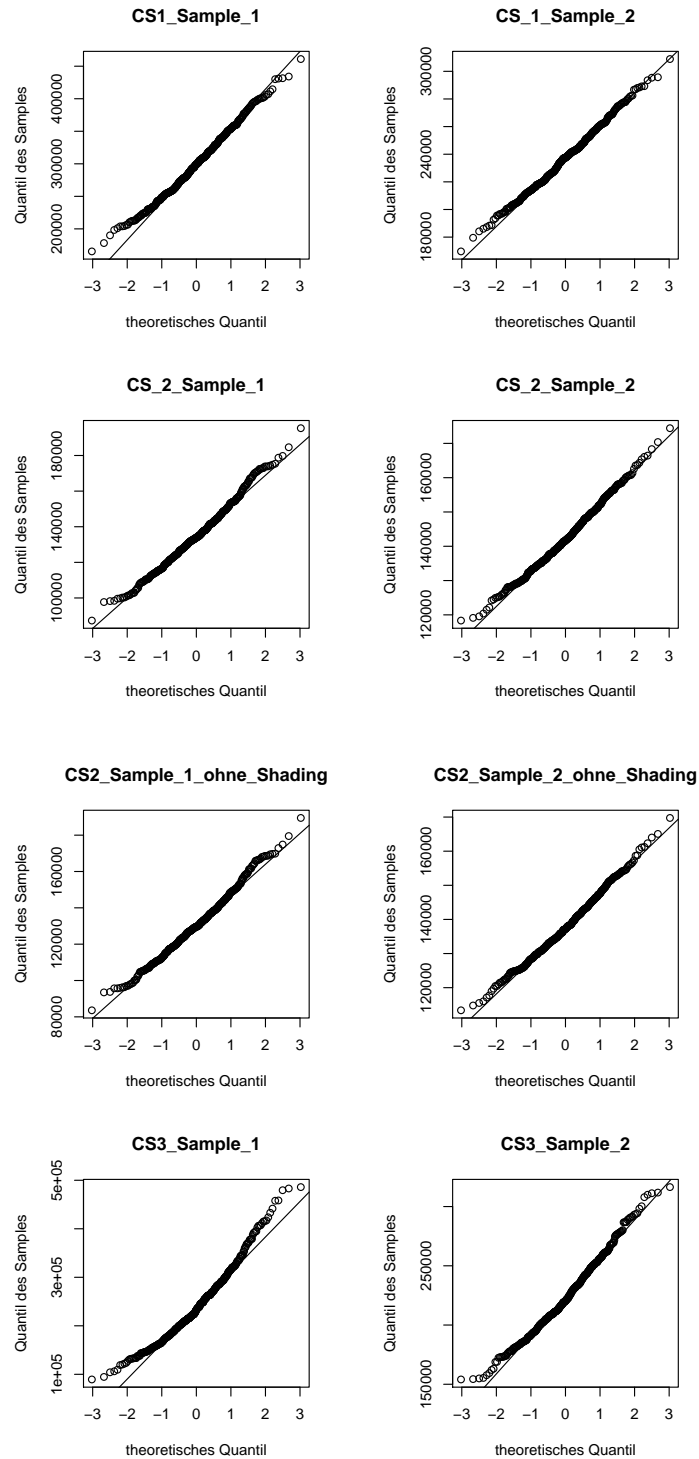


Abbildung C.1: Quantile-Quantile Plot der Heizenergie im Gebäudemodell

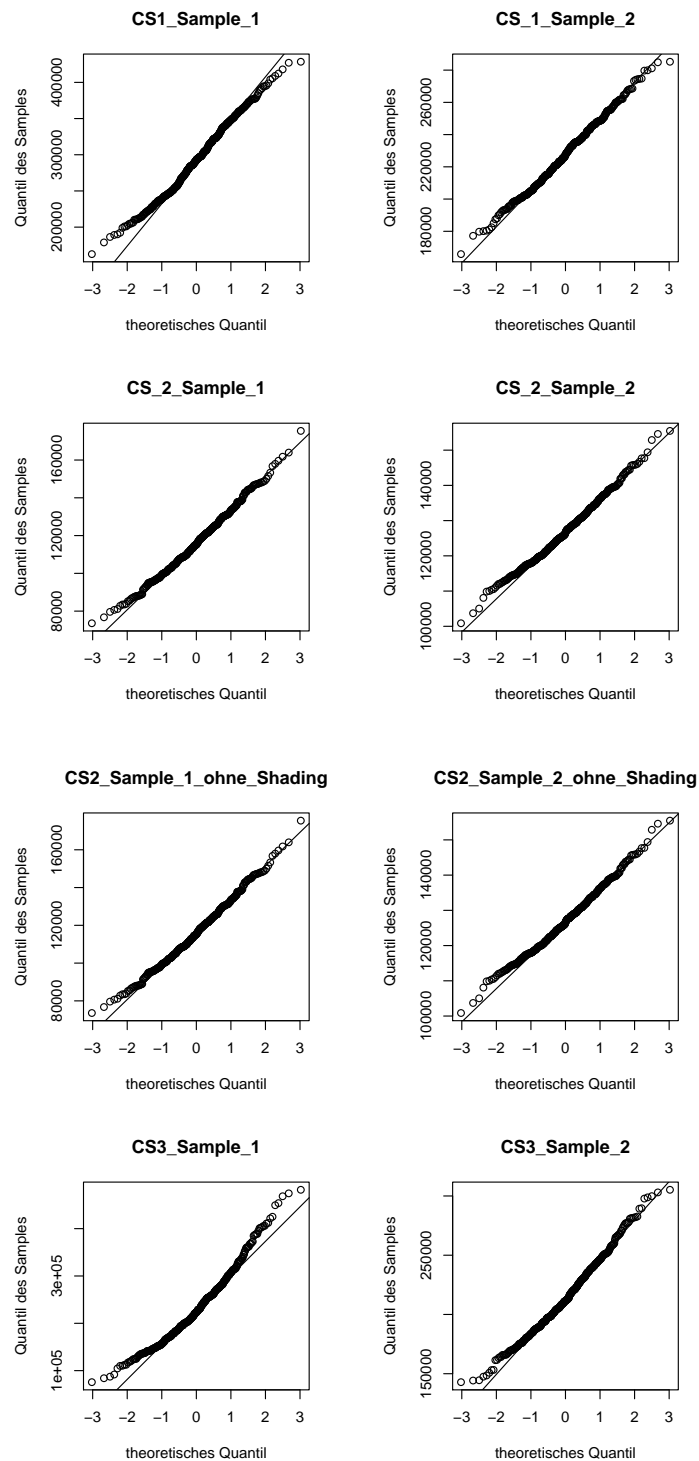


Abbildung C.2: *Quantile-Quantile Plot der Heizenergie im RRM-Modell*

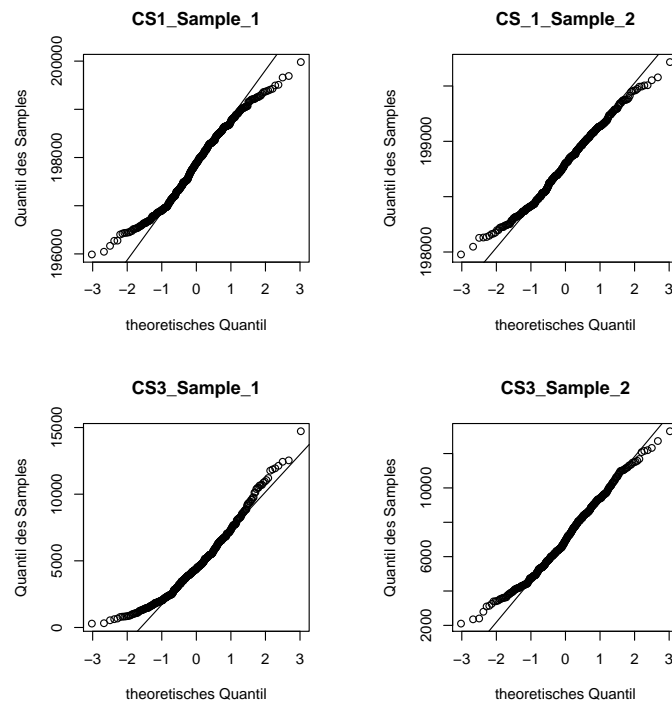


Abbildung C.3: *Quantile-Quantile Plot der Kühlenergie im Gebäudemodell*

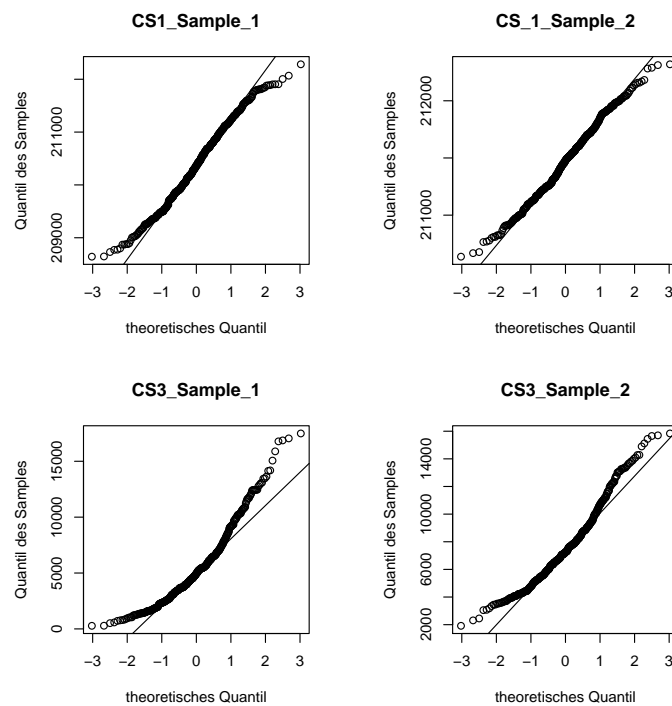


Abbildung C.4: *Quantile-Quantile Plot der Kühlenergie im RRM-Modell*

Tabelle C.7: Tests auf Normalverteilung der Heizenergie über alle Case-Studies

Reihe	Modell	Anderson-Darling Test			Shapiro-Wilk Test		
		$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{normal}$	W	p
Case-Study 1 - Sample 1	Gebäude	nein	0,591	0,122	nein	0,994	0,097
	RRM	ja	0,924	0,019	ja	0,992	0,024
Case-Study 1 - Sample 2	Gebäude	nein	0,394	0,372	nein	0,997	0,689
	RRM	nein	0,487	0,223	nein	0,996	0,373
Case-Study 2 - Sample 1	Gebäude	ja	0,766	0,046	ja	0,992	0,031
	RRM	nein	0,517	0,189	nein	0,994	0,146
Case-Study 2 - Sample 2	Gebäude	nein	0,625	0,103	nein	0,994	0,123
	RRM	nein	0,670	0,080	nein	0,994	0,097
Case-Study 2 - Sample 1*	Gebäude	nein	0,742	0,053	ja	0,992	0,038
	RRM	nein	0,517	0,189	nein	0,994	0,146
Case-Study 2 - Sample 2*	Gebäude	nein	0,629	0,100	nein	0,994	0,136
	RRM	nein	0,670	0,080	nein	0,994	0,097
Case-Study 3 - Sample 1	Gebäude	ja	2,837	0,000	ja	0,969	0,000
	RRM	ja	2,864	0,000	ja	0,970	0,000
Case-Study 3 - Sample 2	Gebäude	ja	1,175	0,004	ja	0,988	0,002
	RRM	ja	1,076	0,008	ja	0,989	0,004

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 400$;

W = Prüfgröße; Geb = Gebäudemodell; RRM = Referenzraummethode

*ohne Fremdverschattung

Tabelle C.8: Tests auf Gleichheit der Varianzen der Heizenergien über alle Case-Studies

Reihe	F-Test			Bartlett-Test			Levene-Test		
	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p	$\sigma_{Geb} \neq \sigma_{RRM}$	W	p
Case-Study 1 - Sample 1	nein	1,032	0,753	nein	0,099	0,753	nein	0,004	0,950
Case-Study 1 - Sample 2	nein	1,177	0,105	nein	2,635	0,105	nein	1,447	0,229
Case-Study 2 - Sample 1	nein	1,105	0,320	nein	0,990	0,320	nein	0,165	0,684
Case-Study 2 - Sample 2	nein	1,184	0,092	nein	2,839	0,092	nein	2,143	0,144
Case-Study 2 - Sample 1*	nein	1,064	0,535	nein	0,385	0,535	nein	0,002	0,964
Case-Study 2 - Sample 2*	nein	1,160	0,139	nein	2,187	0,139	nein	1,574	0,210
Case-Study 3 - Sample 1	nein	0,993	0,943	nein	0,005	0,943	nein	0,003	0,956
Case-Study 3 - Sample 2	nein	1,034	0,741	nein	0,109	0,741	nein	0,119	0,730

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 400$; W = Prüfgröße

*ohne Fremdverschattung

Tabelle C.9: Tests auf Gleichheit der Mittelwerte der Heizenergie über alle Case-Studies

Reihe	t-Test		
	$\mu_{Geb} \neq \mu_{RRM}$	W	p
Case-Study 1 - Sample 1	ja	1,998	0,046
Case-Study 1 - Sample 2	ja	5,956	0,000
Case-Study 2 - Sample 1	ja	15,188	0,000
Case-Study 2 - Sample 2	ja	23,295	0,000
Case-Study 2 - Sample 1*	ja	11,744	0,000
Case-Study 2 - Sample 2*	ja	16,576	0,000
Case-Study 3 - Sample 1	nein	1,704	0,089
Case-Study 3 - Sample 2	ja	4,111	0,000

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$;

Stichprobenumfang $n = 400$; W = Prüfgröße

*ohne Fremdverschattung

Tests der Kühlenergie auf Normalverteilung sowie der Gleichheit von Varianz und Mittelwert

Tabelle C.10: Tests auf Normalverteilung der Kühlenergie über alle Case-Studies

Reihe	Modell	Anderson-Darling Test			Shapiro-Wilk Test		
		$\sigma \neq \sigma_{\text{normal}}$	W	p	$\sigma \neq \sigma_{\text{normal}}$	W	p
Case-Study 1 - Sample 1	Gebäude	ja	2,201	0,000	ja	0,981	0,000
	RRM	ja	1,184	0,004	ja	0,987	0,001
Case-Study 1 - Sample 2	Gebäude	ja	0,955	0,016	ja	0,990	0,011
	RRM	ja	0,763	0,047	ja	0,992	0,037
Case-Study 3 - Sample 1	Gebäude	ja	3,550	0,000	ja	0,960	0,000
	RRM	ja	7,081	0,000	ja	0,933	0,000
Case-Study 3 - Sample 2	Gebäude	ja	1,399	0,001	ja	0,987	0,001
	RRM	ja	4,076	0,000	ja	0,963	0,000

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 400$;

W = Prüfgröße; Geb = Gebäudemodell; RRM = Referenzraummethode

Tabelle C.11: Tests auf Gleichheit der Varianzen der Kühlenergien über alle Case-Studies

Reihe	F-Test			Bartlett-Test			Levene-Test		
	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	W	p	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	W	p	$\sigma_{\text{Geb}} \neq \sigma_{\text{RRM}}$	W	p
Case-Study 1 - Sample 1	nein	1,102	0,334	nein	0,933	0,334	nein	1,870	0,172
Case-Study 1 - Sample 2	nein	0,955	0,644	nein	0,213	0,644	nein	0,177	0,674
Case-Study 3 - Sample 1	ja	0,608	0,000	ja	24,410	0,000	ja	13,778	0,000
Case-Study 3 - Sample 2	ja	0,611	0,000	ja	23,901	0,000	ja	12,097	0,001

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$; Stichprobenumfang $n = 400$; W = Prüfgröße

Tabelle C.12: Tests auf Gleichheit der Mittelwerte der Kühlenergie über alle Case-Studies

Reihe	t-Test		
	$\mu_{\text{Geb}} \neq \mu_{\text{RRM}}$	W	p
Case-Study 1 - Sample 1	ja	-218,037	0,000
Case-Study 1 - Sample 2	ja	-527,854	0,000
Case-Study 3 - Sample 1	ja	-3,668	0,000
Case-Study 3 - Sample 2	ja	-3,136	0,002

Anmerkungen:

Konfidenzintervall = 0,95; $\alpha_0 = 0,05$;

Stichprobenumfang $n = 400$; W = Prüfgröße

C.5 Energiebedarfsberechnung für Beleuchtung

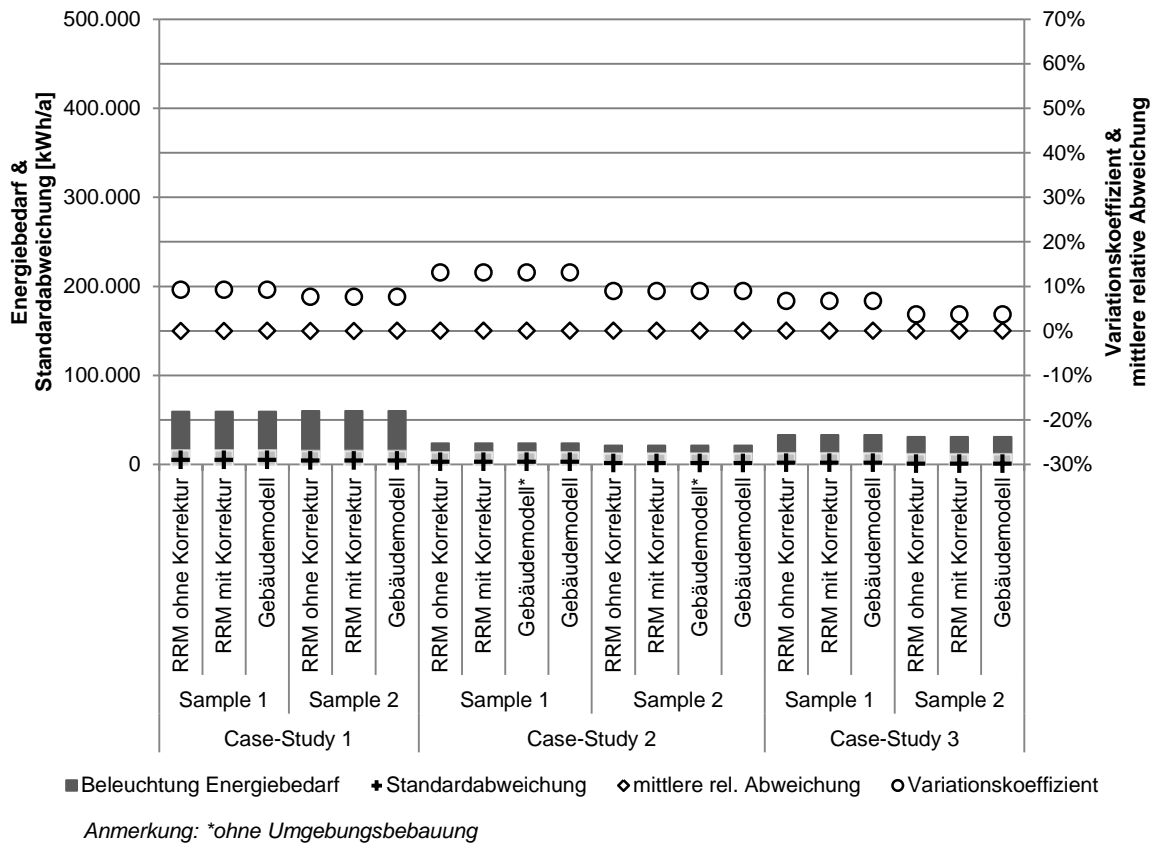


Abbildung C.5: Vergleich der Beleuchtungsenergie zwischen Referenzraummethode (RRM) und Gebäudemodell

C.6 Vergleich der quantitativen Sensitivitätsindizes Sample 2

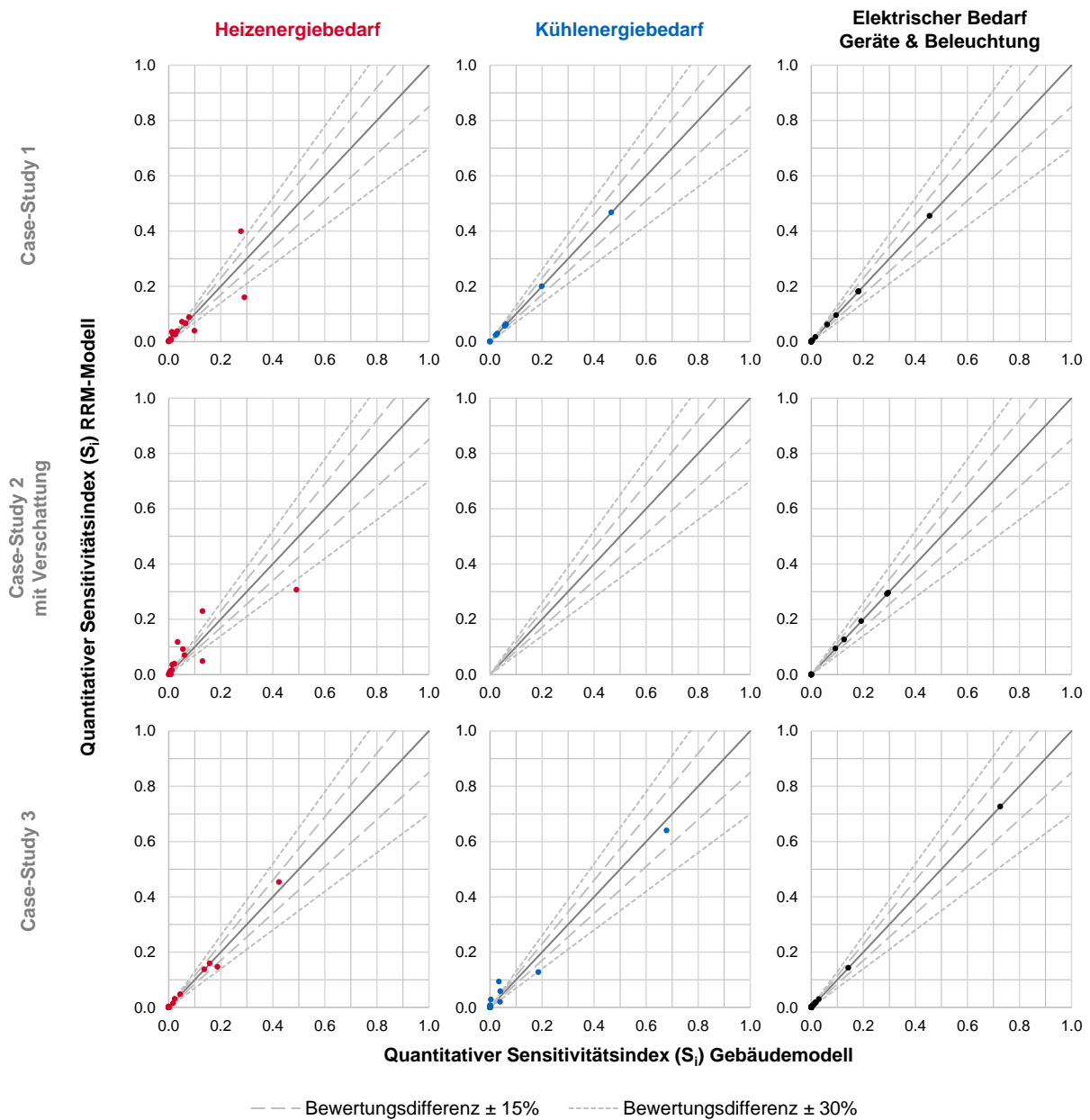


Abbildung C.6: Vergleich der 1st-Order Sensitivitätsindizes S_i zur quantitativen Bewertung ausgewählter Eingangsparameter aller Case-Studies mit Sample 2

C.7 Rangliste der Einflussparameter

	Gebäude		Parameter	RRM	
	Rang	S_i		S_i	Rang
Case-Study 1 Sample 1	1	0,53	Infiltration Nutzungen	0,68	1
	2	0,19	Büro-Heiztemperatursollwert	0,10	2
	3	0,14	Büro-Set-Back_Heiztemperatursollwert	0,06	3
	4	0,03	Büro-Elekt._Geräte_Leistung	0,03	5
	5	0,03	Fenster_U-Wert	0,04	4
	6	0,02	Außenwand λ Mineralfaser	0,02	6
Case-Study 1 Sample 2	1	0,29	Büro-Heiztemperatursollwert	0,16	2
	2	0,28	Infiltration Nutzungen	0,40	1
	3	0,10	Büro-Set-Back_Heiztemperatursollwert	0,04	6
	4	0,08	Büro-Ventilation	0,09	3
	5	0,07	Büro-Standby-_Elekt._Geräte	0,07	5
	6	0,05	Verkehr-Heiztemperatursollwert	0,07	4
Case-Study 2 Sample 1	1	0,31	Büro-Heiztemperatursollwert	0,15	2
	2	0,25	Infiltration Nutzungen	0,43	1
	3	0,17	Büro-Set-Back_Heiztemperatursollwert	0,06	5
	4	0,11	Büro-Ventilation	0,14	3
	5	0,06	Außenwand λ Mineralfaser	0,07	4
	6	0,03	Büro-Elekt._Geräte_Leistung	0,03	8
Case-Study 2 Sample 2	1	0,49	Büro-Heiztemperatursollwert	0,31	1
	2	0,13	Büro-Ventilation	0,23	2
	3	0,13	Büro-Set-Back_Heiztemperatursollwert	0,05	6
	4	0,06	Außenwand λ Mineralfaser	0,07	5
	5	0,06	Büro-Verfügbarkeit_Personen	0,09	4
	6	0,04	Verkehr-Heiztemperatursollwert	0,12	3
Case-Study 3 Sample 1	1	0,43	Labor Forschung-Feuchte_unterer_Sollwert	0,44	1
	2	0,22	Labor Forschung-Ventilation_Luftwechselrate	0,22	2
	3	0,16	Labor Forschung-Wirkungsgrad_WRG	0,15	3
	4	0,08	Labor Forschung-Heiztemperatursollwert	0,07	5
	5	0,06	Infiltration_Nutzungen	0,07	4
	6	0,03	Labor Forschung-Set-Back_Heiztemperatursollwert	0,03	6
Case-Study 3 Sample 2	1	0,42	Labor Forschung-Feuchte_unterer_Sollwert	0,45	1
	2	0,19	Labor Forschung-Wirkungsgrad_WRG	0,15	3
	3	0,16	Labor Forschung-Heiztemperatursollwert	0,16	2
	4	0,14	Labor Forschung-Ventilation_Luftwechselrate	0,14	4
	5	0,04	Labor Forschung-Set-Back_Heiztemperatursollwert	0,05	5
	6	0,02	Infiltration_Nutzungen	0,03	6

Heizenergiebedarf, S_i = Sensitivitätsindex

Abbildung C.7: Vergleich des Rankings der wichtigsten Einflussparameter auf den Heizenergiebedarf

	Gebäude		Parameter	RRM	
	Rang	S_i		S_i	Rang
Case-Study 1 Sample 1	1	0,86	Infiltration Nutzungen	0,81	1
	2	0,07	Außenw and λ Mineralfaser	0,04	3
	3	0,02	Büro-Heiztemperatursollwert	0,00	10
	4	0,02	Büro-Set-Back_Heiztemperatursollwert	0,00	14
	5	0,02	Büro-Verfügbarkeit_Personen	0,01	6
	6	0,00	Büro-Nutzungsbeginn	0,01	7
Case-Study 1 Sample 2	1	0,47	Infiltration Nutzungen	0,47	1
	2	0,20	Sollwert_Verschattung	0,20	2
	3	0,06	Fenster_U-Wert	0,06	3
	4	0,06	Büro-Verfügbarkeit_Personen	0,06	4
	5	0,06	Außenw and λ Mineralfaser	0,06	5
	6	0,06	Fenster_g-Wert	0,06	6
Case-Study 2 Sample 1					
Case-Study 2 Sample 2					
Case-Study 3 Sample 1	1	0,40	Labor Forschung-Kühltemperatursollwert	0,24	2
	2	0,35	Labor Forschung-Feuchte_oberer_Sollwert	0,40	1
	3	0,08	Labor Forschung-Feuchte_unterer_Sollwert	0,11	3
	4	0,06	Labor Forschung-Ventilation_Luftw echselrate	0,07	4
	5	0,02	Labor Forschung-Elekt._Geräte_Leistung	0,01	10
	6	0,02	Labor Forschung-Heiztemperatursollwert	0,05	5
Case-Study 3 Sample 2	1	0,68	Labor Forschung-Feuchte_oberer_Sollwert	0,64	1
	2	0,19	Labor Forschung-Kühltemperatursollwert	0,13	2
	3	0,04	Labor Forschung-Feuchte_unterer_Sollwert	0,06	4
	4	0,04	Labor Forschung-Ventilation_Luftw echselrate	0,02	6
	5	0,04	Labor Forschung-Heiztemperatursollwert	0,09	3
	6	0,00	Labor Forschung-Set-Back_Heiztemperatursollwert	0,03	5

Kühlenergiebedarf, S_i = Sensitivitätsindex

Abbildung C.8: Vergleich des Rankings der wichtigsten Einflussparameter auf den Kühlenergiebedarf

	Gebäude		Parameter	RRM	
	Rang	S_i		S_i	Rang
Case-Study 1 Sample 1	1	0,53	Büro-Elekt._Geräte_Leistung	0,53	1
	2	0,21	Büro-Standby-_Elekt._Geräte	0,21	2
	3	0,09	Büro-Nutzungende	0,09	3
	4	0,09	Büro-Nutzungsbeginn	0,09	4
	5	0,03	Büro-Beleuchtung_Leistung	0,03	5
	6	0,03	Verkehr-Elekt._Geräte_Leistung	0,03	6
Case-Study 1 Sample 2	1	0,45	Büro-Standby-_Elekt._Geräte	0,45	1
	2	0,18	Büro-Nutzungende	0,18	2
	3	0,18	Büro-Nutzungsbeginn	0,18	3
	4	0,10	Verkehr-Elekt._Geräte_Leistung	0,10	4
	5	0,06	Büro-Elekt._Geräte_Leistung	0,06	5
	6	0,02	Büro-Beleuchtung_Leistung	0,02	6
Case-Study 2 Sample 1	1	0,53	Büro-Elekt._Geräte_Leistung	0,53	1
	2	0,17	Büro-Beleuchtung_Leistung	0,17	2
	3	0,13	Büro-Nutzungsbeginn	0,13	3
	4	0,13	Büro-Nutzungende	0,13	4
	5	0,02	Verkehr-Elekt._Geräte_Leistung	0,02	5
	6	0,01	Büro-Standby-_Elekt._Geräte	0,01	6
Case-Study 2 Sample 2	1	0,30	Büro-Nutzungsbeginn	0,30	1
	2	0,29	Büro-Nutzungende	0,29	2
	3	0,19	Büro-Elekt._Geräte_Leistung	0,19	3
	4	0,13	Verkehr-Elekt._Geräte_Leistung	0,13	4
	5	0,09	Büro-Beleuchtung_Leistung	0,09	5
	6	0,00	Außenwand λ Mineralfaser	0,00	6
Case-Study 3 Sample 1	1	0,71	Labor Forschung-Elekt._Geräte_Leistung	0,71	1
	2	0,15	Labor Forschung-Standby-_Elekt._Geräte	0,15	2
	3	0,05	Büro-Elekt._Geräte_Leistung	0,05	3
	4	0,04	CIP-Elekt._Geräte_Leistung	0,04	4
	5	0,01	Labor Forschung-Nutzungsbeginn	0,01	5
	6	0,01	Labor Forschung-Nutzungsende	0,01	6
Case-Study 3 Sample 2	1	0,73	Labor Forschung-Standby-_Elekt._Geräte	0,73	1
	2	0,14	Labor Forschung-Elekt._Geräte_Leistung	0,14	2
	3	0,03	Büro-Elekt._Geräte_Leistung	0,03	3
	4	0,02	Verkehr-Elekt._Geräte_Leistung	0,02	4
	5	0,02	Labor Forschung-Nutzungsbeginn	0,02	5
	6	0,02	Labor Forschung-Nutzungsende	0,02	6

Strombedarf für Nutzung, S_i = Sensitivitätsindex

Abbildung C.9: Vergleich des Rankings der wichtigsten Einflussparameter auf den Strombedarf

D Statistische Methoden - weiterführende Informationen

Für die korrekte Anwendung einiger Testverfahren sind Voraussetzungen zu erfüllen. Alle in dieser Arbeit verwendeten Testverfahren werden nachfolgend kurz anhand ihrer Teststatistik beschrieben. Die statistischen Verfahren wurden mit Hilfe der frei verfügbaren Statistik Software *R* durchgeführt. Soweit zu Beginn der jeweiligen Unterkapitel nichts anderes genannt ist, beziehen sich die Texte auf die Standarddokumentation gemäß [132].

D.1 Verfahren zur Überprüfung einer vorhandenen Normalverteilung

Mit Hilfe der Tests auf Normalverteilung werden Stichproben überprüft, um sicherzustellen, dass die Werte der Stichprobe aus der Grundgesamtheit der Normalverteilung stammen. Die Nullhypothese lautet entsprechend $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_{normal}^2$.

Anderson-Darling-Test

Der Anderson-Darling-Test prüft die Datenreihe auf die Eigenschaft einer Normalverteilung. Wird die Nullhypothese nicht abgelehnt, so kann davon ausgegangen werden, dass die Verteilung einer Normalverteilung folgt. Hierbei wurde das R-package *nortest* verwendet. Die hinterlegte Teststatistik des Anderson-Darling-Tests lautet nach [133] [134]:

$$A = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [2i - 1] [\ln(p_{(i)}) + \ln(1 - p_{(n-i+1)})] \quad (.1)$$

Dabei ist $p_{(i)} = \Phi([x_{(i)} - \bar{x}]/s)$. Hier ist Φ die kumulative Verteilfunktion der Normalverteilung, \bar{x} und s sind Mittelwert und Standardabweichung der Datenreihe.

Shapiro-Wilk-Test

Als ein weiterer Test zur Überprüfung auf Normalverteilung wird der Shapiro-Wilk-Test entsprechend dem R-package *stats* nach [132] eingesetzt. Die Teststatistik setzt sich wie folgt entsprechend [135] zusammen:

$$W = \frac{b^2}{(n-1)s^2} \quad (.2)$$

Die Varianzen werden nach Gleichung 3.3 bestimmt. Der Schätzer b^2 bildet sich aus einer theoretisch normal verteilten Funktion. b^2 wird mit der Varianz s^2 der Stichprobe in der Teststatistik verglichen. Der Wertebereich der Teststatistik W verläuft von 0 (nicht normalverteilt) bis 1 (ideal normalverteilt).

Chi-Quadrat-Homogenitätstest

Der Chi-Quadrat-Homogenitätstest [136] wird hier eingesetzt, wenn die höherwertigen Tests, Anderson-Darling-Test und Shapiro-Wilk-Test, eine Ablehnung der Nullhypothese ausweisen, obwohl die visuelle Kontrolle der Datenreihe eine Normalverteilung erwarten lässt. Hierzu erfolgt eine Reduktion der

Datenqualität von intervall- auf ordinalskalierte Daten, indem die zu untersuchende Datenreihe in Bereiche eingeteilt, und die Häufigkeit der vorkommenden Werte bestimmt wird. Diese Häufigkeit wird dann mit der prognostizierten Häufigkeit einer Normalverteilung verglichen. Die Ausführung des Chi-Quadrat-Homogenitätstests erfolgt mit dem R-package *stats* gemäß [132].

D.2 Verfahren zur Überprüfung eines vorhandenen Unterschiedes der Varianz

Mit Hilfe der Tests auf ungleiche Varianz wird geprüft, ob die vorhandenen normalverteilten Stichproben S_1 und S_2 aus unterschiedlichen oder gleichen Grundgesamtheiten entstammen. Die Nullhypothese, beide Stichproben besitzen die gleiche Varianz $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$, wird für zu große Werte der Teststatistik zurückgewiesen.

F-Test

Der F-Test ist ein bekannter und weit eingesetzter Test zur Prüfung auf ungleiche Varianzen. Für seine Anwendung wurde das R-package *stats* gemäß [132] verwendet. Seine hinterlegte Teststatistik lautet nach [109]:

$$F_{Stichprobe} = \frac{S_2^2}{S_1^2} = \frac{\frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} (x_{2i} - \bar{x}_2)^2}{\frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_{1i} - \bar{x}_1)^2} \quad (.3)$$

Der berechnete Wert $F_{Stichprobe}$ wird dem entsprechendem Vergleichswert $F_{kritisch}$ aus der F-Wert Tabelle gegenübergestellt. Ist $F_{Stichprobe} > F_{kritisch}$, so wird die Nullhypothese zu Gunsten der Alternativhypothese verworfen. Die Stichproben sind dann nicht aus der gleichen Grundgesamtheit.

Bartlett-Test

Der Bartlett-Test [137] prüft, ob zwei oder mehrere Stichproben k mit ihrem Stichprobenumfang n_i auf Basis ihrer Stichprobenvarianzen S_i aus der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Die Stichproben müssen hierzu normalverteilt sein. Für seine Anwendung wurde das R-package *stats* gemäß [132] verwendet. Seine hinterlegte Teststatistik X^2 lautet nach :

$$X^2 = \frac{(N - k) \ln(S_p^2) - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \ln(S_i^2)}{1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{n_i - 1} \right) - \frac{1}{N - k} \right)} \quad (.4)$$

Wobei gilt $N = \sum_{i=1}^k n_i$ und $S_p^2 = \frac{1}{N - k} \sum_{i=1}^k (n_i - 1) S_i^2$ aus der gepoolten¹¹ Varianz. Die Verteilung X^2 ist dabei annähernd χ_{k-1}^2 -verteilt. Die Nullhypothese wird verworfen, wenn $\chi^2 > \chi_{k-1, \alpha}^2$ gilt.

Levene-Test

Der Levene-Test [138] ist eine weitere Prüfmöglichkeit auf ungleiche Varianz in mehreren Stichproben. Hierzu wurde das R-package *lawstat* [139] eingesetzt. Die Teststatistik L für den Levene-Test lautet:

¹¹zusammengelegte Varianz

$$L = \frac{n - k}{k - 1} \frac{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ji} - \bar{Y})^2} \quad (.5)$$

Wobei $n = \sum_{j=1}^k n_j$, \bar{Y} ist der Stichprobenmittelwert über alle Gruppen und \bar{Y}_j ist der Stichprobenmittelwert über die Gruppe j . Die Nullhypothese wird verworfen, wenn $L > F_{\alpha, k-1, N-k}$ gilt.

D.3 Verfahren zur Überprüfung eines vorhandenen Unterschiedes des Mittelwertes

Mit Hilfe des viel eingesetzten t-Tests können die Mittelwerte μ_i zweier Variablen einer Stichprobe auf statistisch signifikante Ungleichheit geprüft werden. Die nachfolgende Herleitung und die Gleichungen beruhen auf [109] und werden in verkürzter Form wiedergegeben. Es gibt zwei grundsätzlich unterschiedliche Bedingungen für den t-Test. Für den t-Test unabhängiger Stichproben wird vorausgesetzt, dass die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens eines Merkmals in der Stichprobe unabhängig von der Wahrscheinlichkeit der anderen ist. Sie gelten damit als unabhängig voneinander. Werden hingegen mehrere Merkmalserscheinungen innerhalb einer gleichen Stichprobe untersucht, wird der t-Test für abhängige Stichproben angewendet. Für beide Tests lautet die Nullhypothese $H_0 : \mu_1 = \mu_2$.

t-Test für unabhängige Stichproben

Sind zwei Stichproben voneinander unabhängig und sind ihre Varianzen normalverteilt, so kann der t-Test für unabhängige Stichproben anhand folgender Teststatistik durchgeführt werden:

$$T = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\bar{\mu}_1 - \bar{\mu}_2)}{s_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{s_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} \quad (.6)$$

Für die Berechnung der Standardabweichung $s_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}$ wird ein Schätzer s_p mit folgender Gleichung eingesetzt:

$$s_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{s_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} \quad (.7)$$

Bei gleich großen Stichproben ergibt sich der Schätzer s_p nach:

$$s_p^2 = \frac{s_1^2 + s_2^2}{2} \quad (.8)$$

Der somit berechnete Wert wird mit einem kritischen Wert anhand der Freiheitsgrade und Signifikanzniveaus aus der t-Tabelle verglichen. Werden beim zweiseitigen Test die obere Grenze nach oben und die untere Grenzen nach unten durchschritten, dann wird die Nullhypothese zu Gunsten der Alternativhypothese verworfen und es liegt eine Ungleichheit der Mittelwerte vor.

t-Test für abhängige Stichproben

Für abhängige Stichproben ist folgende Teststatistik gegeben:

$$T = \sqrt{n} \left(\frac{\bar{d} - \mu_d}{s_d} \right) \quad (.9)$$

Dabei ist $d = x_{i1} - x_{i2}$ mit dem Mittelwert der Differenzwerte $\bar{d} = \sum_i \frac{d_i}{n}$, es gilt daher:

$$\bar{d} = \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \quad (.10)$$

Die Standardabweichung s_d erhält man mit dem Schätzer nach:

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \quad (.11)$$

Wird der kritische Wert in Abhängigkeit des gewählten Signifikanzniveaus und der Freiheitsgrade aus der t-Tabelle überschritten, dann liegt keine Gleichheit der Mittelwerte vor.

Glossar

Alternativhypothese	Annahme, dass die untersuchte Eigenschaft zweier Stichproben ungleich ist.
Anderson-Darling-Test	Statistisches Testverfahren. Prüft, ob Stichprobe der Normalverteilung entstammt.
Bartlett-Test	Statistisches Testverfahren. Prüft, ob die Varianz zweier Stichproben unterschiedlich sind.
Baualtersklasse	Beschreibung für den energetischen Baustandard eines Gebäudes in Abhängigkeit von Bau- bzw. Sanierungsjahr.
Benchmarking	Vergleich eines Wertes mit den statistischen Lagemaßen einer ausgewählten Stichprobe.
BESTEST	Testverfahren für Simulationswerkzeuge. Wird für die Validierung der Simulationsrechenkerne verwendet. Dient weiter als Datenbasis für den Vergleich mit anderen Simulationswerkzeugen.
Bestimmtheitsmaß R^2	Qualitätsmerkmal der Anpassung einer Regressionsfunktion an die vorliegenden Daten.
Betriebsoptimierung	Überwachung, Optimierung und Anpassung der Anlagenparameter an den realen Bedarf.
Bottom-Up Ansatz	Vorgehensweise in der Modellierung von einem detaillierten hin zu einem übergeordneten Ansatz.
Box-Plot	Grafische Methode zur Darstellung der Werteverteilung einer Gruppe aus Zahlen. Aus drei spezifischen Werten wird eine gemeinsame Box mit zwei Teilen gebildet. Der mittlere Strich der Box ist das 2. Quartil und wird auch Median genannt. Der Median teilt die Gruppe in zwei gleich große Teile. Der Strich mit der niedrigeren Wertzuweisung als der Median auf der Skala wird als 1. Quartil bezeichnet; 25% aller Werte in der Gruppe liegen unter diesem Wert. Der Strich mit der höheren Wertzuweisung auf der Skala wird 3. Quartil genannt; 25% aller Werte in der Gruppe liegen über diesem Wert. Das Ausmaß der gesamten

	<p>Box stellt 50% aller Gruppenwerte dar. An den beiden Enden der Box sind die Antennen, auch Whisker genannt. Sie zeigen den Bereich an, in dem jeweils die Werte kleiner dem 1. Quartil oder größer dem 3. Quartil liegen. Der Interquartilsabstand, berechnet aus der Differenz zwischen 3. und 1. Quartil, bildet die Grundlage für die Identifikation von Ausreißern. Meist werden Werte als Ausreißer gekennzeichnet, deren Abstand größer ist als das 1,5-fache des Interquartilsabstands vom 1. zum 3. Quartil.</p>
Chi-Quadrat-Homogenitätstest	Statistisches Testverfahren. Prüft, ob Stichprobe der Normalverteilung entstammt.
Commissioning	Prozess bestehend aus Inbetriebnahme, Inbetriebsetzung und Abnahme. Reicht in den Gebäudebetrieb hinein und wird von der Betriebsoptimierung abgelöst.
Continuous Commissioning	Siehe Betriebsoptimierung.
Effektgröße	Quantitativer Effekt aufbauend auf der Differenz zweier Stichprobenmittelwerte. Die Differenz wird zur besseren Vergleichbarkeit auf Basis der Standardabweichung standardisiert.
F-Test	Statistisches Testverfahren. Prüft, ob die Varianz zweier Stichproben unterschiedlich sind.
Histogramm	Grafische Form zur Darstellung einer Häufigkeitsverteilung nach vorher definierten Gruppe. Gruppen werden gebildet und die Häufigkeit des Auftretens eines Wertes einer bestimmten Gruppe zugeordnet und gezählt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt meist mit einem Balken für jede Gruppe.
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure. Beschreibung von Planungsleistungen zur Errichtung eines Gebäudes oder einer Anlage.
Homogene Nutzung	Vorhandensein weniger Nutzungen mit sehr ähnlichen Anforderungen und gleichen Raumkonditionierungssystemen.
Heterogene Nutzung	Vorhandensein mehrerer Nutzungen mit unterschiedlichen Anforderungen und ggf. verschiedenen Raumkonditionierungssystemen.
Korrelationskoeffizient	Bezeichnung auch Pearson Korrelationskoeffizient. Beschreibung der Stärke des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen.
Kovarianz	Maß für den Zusammenhang zwischen zwei Variablen auf Basis der gemeinsamen Variation.

Levene-Test	Statistisches Testverfahren. Prüft, ob die Varianz zweier oder mehrerer Stichproben unterschiedlich sind.
LMU	Ludwig-Maximilians Universität München. Dient als Forschungsobjekt der Arbeit.
Median	Angabe des beobachteten Wertes, der die Gruppe an Beobachtungen in zwei gleich große Hälften teilt.
Mittelwert	Auch arithmetischer Mittelwert. Ist die Summe aller Beobachtungen geteilt durch die Anzahl an Beobachtungen.
Monte Carlo Simulation	Statistische Methode, um verallgemeinerbare Aussagen zu erzeugen. Die Ergebnisse basieren auf einer Vielzahl unterschiedlicher Eingangskombinationen in der Modellberechnung.
Multiple Regressionsanalyse	Abbildung eines Zusammenhangs zwischen Ergebnis und mehreren Eingangsgrößen.
Normalverteilung	Aus der Verteilung der Grundgesamtheit stammende Werte einer Stichprobe.
Nullhypothese	Annahme, dass die untersuchte Eigenschaft zweier Stichproben gleich ist.
p-Wert	Kriterium zur Annahme oder Ablehnung der Nullhypothese. Bezeichnung auch als beobachtetes Signifikanzniveau.
Parallellisierung	Begriff aus der Informatik. Gleichzeitige Verarbeitung zweier oder mehrerer Prozesse durch deren Verteilung auf mehrere Rechner oder Prozessorkerne.
Parameterraum	Gültiger bzw. definierter Wertebereich für einen oder mehrerer Parameter
Parametrierung	Eingabeprozess von Daten in das Berechnungsmodell.
Performance-Indikator	Bewertungskriterium und Vergleichsgröße z.B. für ein Gebäude, eine Anlage oder ein Bauteil.
PI	Siehe Performance-Indikator.
Quantil-Quantil-Plot	Grafisches Verfahren zur optischen Überprüfung auf gleiche Verteilung zweier Stichproben. Hierzu werden beide Stichproben gegeneinander aufgetragen.
Radar-Chart	Typ des Netzdiagramms. Anzeige von Werten von mehreren gleichwertigen Kategorien auf einer gemeinsamen Skala. Typische Formen eines Sterns oder Netzes. In dieser Arbeit Verwendung einer kreisförmigen Form einer Tonne. Lage des Wertes 0 auf dem Rand der Grafik und Anstieg der Skala hin zum

	Zentrum. Weist eine Kategorie einen hohen Wert auf, entsteht ein Keil in der Tonne. Besitzen mehrere nebeneinanderstehende Kategorien einen ähnlich hohen Wert, so zeichnet sich die Form einer Delle ab.
Regression	Abbildung eines Zusammenhangs zwischen Ergebnis und einer oder mehreren Eingangsgrößen.
Regressionskoeffizient	Beschreibung für den Zusammenhang zwischen Eingangsgröße und Ergebnis.
RLT	Abkürzung für raumluftechnische Anlage. Wird in der Arbeit als Synonym für mechanische Belüftung mit thermischen Behandlungsstufen für Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten verwendet.
RRM	Abkürzung für Referenzraummethode; vereinfachte Methode zur energetischen Bewertung von komplexen Liegenschaften.
SA	Siehe Sensitivitätsanalyse.
Sensitivität	Beschreibung für die Stärke einer Veränderung im Ergebnis in Abhängigkeit von einer Änderung einer oder mehrerer Eingangsvariablen.
Sensitivitätsindex	Maßzahl zur Beschreibung des Effekts eines Parameters auf das Verhalten des Ergebnisses.
Shapiro-Wilk-Test	Statistisches Testverfahren. Prüft, ob Stichprobe der Normalverteilung entstammt.
Sensitivitätsanalyse	Statistisches Verfahren zur Identifikation und Quantifizierung von Effekten der Eingangsparameter auf das Ergebnis.
S_i	Sensitivitätsindex erster Ordnung (first-order sensitivity index). Angabe des alleinigen Effekts des Parameters auf das Ergebnis.
S_{T_i}	Gesamtsensitivitätsindex (total-sensitivity index). Angabe des gesamten Effekts des Parameters auf das Ergebnis. Beinhaltet alleinigen Effekt des Parameters und Effekte entstanden aus der Kombination mit anderen Parametern.
Sample	Sammlung von mehreren Stichproben in einer gemeinsamen Matrix.
Scatter-Plot	Typisches XY-Diagramm, z.B. zur Darstellung einer Beziehung zwischen zweier Stichproben von Zahlen.
Signifikanzniveau	Annahmehereich der Alternativhypothese.

Sobol-Sequenzen	Quasi-Random Samplingverfahren zur Erzeugung einer Stichprobe, deren Werte mit der geringsten Diskrepanz zueinander aus dem mehrdimensionalen Parameterraum gezogen werden.
Standardabweichung	Quadratwurzel der Varianz. Gleiche Einheit wie Beobachtungen; daher leichtere Interpretation.
Standardisierter Regressionskoeffizient	Qualitatives Maß für die Wichtigkeit eines Koeffizienten im Regressionsmodell.
Stichprobe	Zufällige Kombination eines bzw. mehrerer Parameter aus einem vorher bestimmten ein- bzw. mehr-dimensionalen Parameterraum.
t-Test	Statistisches Testverfahren. Prüft, ob die Mittelwerte zweier Stichproben unterschiedlich sind. Test erfordert Unterscheidung in unabhängige und abhängige Stichproben.
Teststärke	Maß der Empfindlichkeit eines Experiments zur Erkennung eines tatsächlich vorhandenen Effekts.
TSI	Gesamtsensitivitätsindex (total-sensitivity index). Siehe S_{T_i}
TGA	Abkürzung Technische Gebäudeausrüstung. Beschreibung für die notwendigen technischen Einrichtungen und Anlagen zum Betrieb eines Gebäudes.
Top-Down Ansatz	Vorgehensweise in der Modellierung von einem übergeordneten hin zu einem detaillierteren Ansatz.
UA	Siehe Unsicherheitsanalyse.
Unsicherheit	Maß für die Unkenntnis über die exakten Eigenschaften des Parameters. Beachtung mit Hilfe von Mittelwert und/oder möglicher Verteilung durch Definition von Wertebereichen und der wahrscheinlichen Verteilung des Parameters.
Unsicherheitsanalyse	Statistisches Verfahren zur Beachtung der Unkenntnis über genaue Eigenschaften von Parametern oder Modellen.
Varianz	Maßzahl für die Variabilität innerhalb einer Stichprobe um ihren eigenen Mittelwert.
Variationskoeffizient	Standardisiertes Maß für die Sensitivität des Ergebnisses in Bezug zu den Eingangsgrößen.
Wahrscheinlichkeitsdichte	Ergebnis der Funktion zur Berechnung der Normalverteilung mit der Dimension ⁻¹ als Einheit. Die Integration über die Wahrscheinlichkeitsdichte liefert als Ergebnis die Wahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeit tritt als Fläche unter dem Graphen auf.

Whisker

Teil eines Box-Plots und wird auch Antenne genannt. Gibt den Wertebereich für 0-25% bzw. 75-100% aller Beobachtungen innerhalb des Box-Plots an. Kennzeichnet durch seine Lage den unteren bzw. oberen Grenzwert als Minimum bzw. Maximum.

WRG

Abkürzung Wärmerückgewinnung. Ist ein Bauteil, das es ermöglicht Wärmeenergie zwischen zwei Stoffströmen zu übertragen. Wird z.B. in der Lüftungstechnik eingesetzt, um aus der Abluft nutzbare Energie auf die Frischluft zu übertragen.