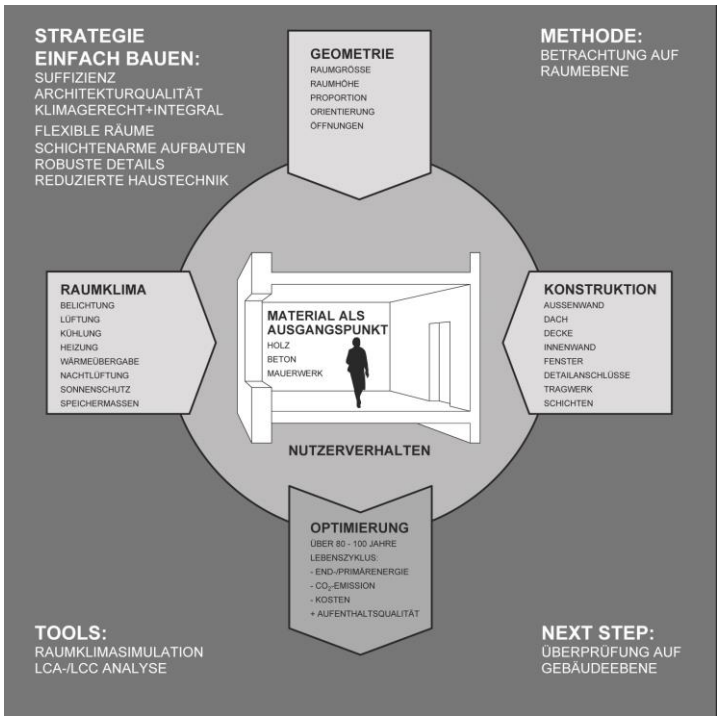
Endbericht für das Forschungsvorhaben:

Einfach Bauen

Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen – Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion



Forschungsstelle:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Florian Nagler
Arcisstraße 21
80333 München

Projektleitung:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Florian Nagler
M. A. (TUM), Dipl. Ing (FH). Architekt Tilmann Jarmer
Dipl. Ing. Architektin Anne Niemann
Mitarbeit: Antonia Cruel Cand. Arch.

Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-16.29

Projektpartner:

TUM - Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer
M.Sc. Laura Franke

TUM - Professur für Entwerfen und Holzbau
Prof. DI Hermann Kaufmann

TUM - Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Dipl.-Ing. M.A. Architekt Stephan Ott
Architekt Marco Krechel. M. Sc.

TUM - Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
Dipl. Ing. Charlotte Thiel

Förderer:

Stiftung Bayerisches Baugewerbe, München

B&O-Gruppe, Bad Aibling

Gumpp & Maier GmbH, Binswangen

Meier Betonwerke GmbH, Lauterhofen

Bearbeitungszeitraum:

01.10.2016 bis 01.10.2018

gefördert von:

Forschungsinitiative Zukunft Bau
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Deichmanns Aue 31-37
52179 Bonn

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-16.29). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

München, 01. Oktober 2018

Abstract

Die Komplexität der Konstruktionen und Gebäudetechnik steigt seit Jahrzehnten stetig. Dies betrifft die Anforderungen an Standsicherheit, Wärme-, Feuchte-, Brand- und Schallschutz, Hygiene und Gesundheit wie auch den allgemeinen Nutzerkomfort. Das äußert sich in einer fast unüberblickbaren und weiter steigenden Zahl an Normen und Baugesetzen. Das damit anvisierte Ziel der Qualitätssicherung wird oft nicht erreicht: Die Folge der Komplexität ist eine hohe Fehlerquote in Planung und Ausführung sowie eine Überforderung von Bauherren und Nutzern. Hinsichtlich der Raumqualität ist der Standard in weiten Bereichen sogar gesunken: In der Abkehr von noch heute hochgeschätzten und flexibel nutzbaren Gebäuden der Gründerzeit entstanden seit der Nachkriegszeit auf den notwendigen Mindestmaßen basierende Gebäude. Die monofunktional angelegte Planung führte dazu, dass sich diese Typologien Veränderungen der Nutzung oder der Ansprüche nur schwierig anpassen konnten. Die Folge hiervon war und ist häufig der vorzeitige Umbau.

Das Projekt soll vor diesem Hintergrund den Anfangspunkt zu einer neuen, gegenläufigen Entwicklung markieren und so einen wichtigen Impuls in der deutschen Bauwirtschaft setzen.

Dem Vorhaben liegt die folgende Hypothese zugrunde: Wohngebäude mit hochwertiger und gleichzeitig suffizienter Architektur, robuster Baukonstruktion und reduzierter Gebäudetechnik sind - über einen Lebenszeitraum von 100 Jahren - bei besserer Aufenthaltsqualität sowohl üblichen Standardwohngebäuden als auch aktuellen Passivhäusern hinsichtlich Ökobilanz und Lebenszykluskosten überlegen. Eine neue Baukultur der Vereinfachung ist denkbar:

Stringente und vielseitige Raumstrukturen, nutzungsflexible und hochwertig gestaltete Räume mit auskömmlicher Fläche (ca. 15-18 m²) und Höhe (ca. 2,60 m - 3,00 m), schichtenarme Bauteilaufbauten, zeitbeständige und haptisch ansprechende Oberflächen, einfache Anschlussdetails, Raumklimakonzepte mit reduzierter und anpassbarer Gebäudetechnik sind Bestandteile einer neuen Strategie. Diese zeichnet sich durch eine sehr ressourcenschonende Erstellung bei vertretbaren Kosten, eine dank hoher Qualität und Flexibilität lange Betriebsphase bei geringem Instandhaltungsaufwand, moderaten Energieverbrauch für Heizung, Kühlung und Lüftung sowie hervorragende Recyclingfähigkeit aus.

Ausgangspunkt der Untersuchungen sind die heute hochentwickelten Konstruktionsmaterialien Massivholz, Leichtbeton und hochwärmedämmendes Mauerwerk. Für diese Materialien wurden jeweils optimierte Konstruktionen, Raum- und Technikkonzepte, sowie Detaillösungen entwickelt und in einem Übersicht schaffenden Vergleich dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 5

1.1 Hintergrund des Forschungsvorhabens 5
1.2 Projektziele 5
1.3 Projektablauf und Zeitplan 6

2 Grundlagenermittlung (MS1) 9

2.1 Der Begriff „Einfach Bauen“ 9
2.2 Einfach Bauen im studentischen Entwurf 10
2.3 Lebensdauer von Gebäuden 11
2.4 Konstruieren mit Mauerwerk 13
2.5 Konstruieren mit Leichtbeton 22
2.6 Konstruieren mit Massivholz 30
2.7 Übersicht Gebäudetechnik 52
2.8 Zusammenstellung ausgewählter Projekte 57

3 Entwurfsstrategie Einzelraum-Betrachtung (MS 2) 62

3.1 Vergleichende Vorbetrachtungen der Ausgangsmaterialien 62
3.2 Definition Ziel & Untersuchungsrahmen 62
3.3 Bauteilvergleiche 65
3.4 Interpretation der bisherigen Ergebnisse und Ausblick 67
3.5 Voruntersuchung der Parameterintegrale für die Einzelraumsimulation 69

4 Simulation und Berechnung auf Raumebene (MS 3 – MS 7) 76

4.1 Inputparameter Raummodell 77
4.2 Tageslichtsimulation 88
4.3 Dynamische Simulation, Nutzer konstant: Optimierung der Architektur 94
4.4 Dynamische Simulation, Nutzer variabel: Untersuchung der Robustheit 104
4.5 LCA und LCC Analyse auf Raumebene 114

5 Untersuchungen auf Gebäudeebene (MS 8) 132

5.1 Inputparameter Gebäude 133
5.2 Technische Gebäudeausrüstung und Energieplanung 139
5.3 LCA und LCC Analyse auf Gebäudeebene 145

5.4 Abschätzung der Robustheit auf Gebäudeebene 161

6 Weitere Untersuchungen zu Fensterausbildung und konstruktiven Details 169

6.1 Fensterausbildung / 1:10 Modelle 169
6.2 Konstruktive Details / 1:1 Modelle 174

7 Zusammenfassung der Ergebnisse 177

7.1 Motivation und Projektziele 177
7.2 Grundlagenermittlung und Entwurfsstrategie (MS 1 / MS 2) 178
7.3 Simulation und Untersuchung auf Raumebene (MS 3 - MS 7) 180
7.4 Simulation und Untersuchung auf Gebäudeebene (MS 8 - MS 9) 183
7.5 Einfach Bauen: Potentiale und Hemmnisse 185
7.6 Weiterer Forschungsbedarf 187

Glossar 189

Abkürzungsverzeichnis 191

Abbildungsverzeichnis 192

Tabellenverzeichnis 198

Literaturverzeichnis 200

Anhang 211

1 Einleitung

1.1 Hintergrund des Forschungsvorhabens

Die Komplexität der Konstruktionen und Gebäudetechnik steigt seit Jahrzehnten stetig. Dies betrifft die Anforderungen an Standsicherheit, Wärme-, Feuchte-, Brand- und Schallschutz, Hygiene und Gesundheit wie auch den allgemeinen Nutzerkomfort. Das äußert sich in einer fast unüberblickbaren und weiter steigenden Zahl an Normen und Baugesetzen. Das damit anvisierte Ziel der Qualitätssicherung wird oft nicht erreicht: Die Folge der Komplexität ist eine hohe Fehlerquote in Planung und Ausführung sowie eine Überforderung von Bauherren und Nutzern. Hinsichtlich der Raumqualität ist der Standard in weiten Bereichen sogar gesunken: In der Abkehr von noch heute hochgeschätzten und flexibel nutzbaren Gebäuden der Gründerzeit entstanden seit der Nachkriegszeit auf den notwendigen Mindestmaßen basierende Gebäude. Die monofunktional angelegte Planung führte dazu, dass sich diese Typologien Veränderungen der Nutzung oder der Ansprüche nur schwierig anpassen konnten. Die Folge hiervon war und ist häufig der vorzeitige Umbau.

1.2 Projektziele

Das Projekt soll vor diesem Hintergrund den Anfangspunkt zu einer neuen, gegenläufigen Entwicklung markieren und so einen wichtigen Impuls in der deutschen Bauwirtschaft setzen.

Dem Vorhaben liegt die folgende Hypothese zugrunde: Wohngebäude mit hochwertiger und gleichzeitig suffizienter Architektur, robuster Baukonstruktion und reduzierter Gebäudetechnik sind - über einen Lebenszeitraum von 80-100 Jahren - bei besserer Aufenthaltsqualität sowohl üblichen Standardwohngebäuden (mit Baukosten von ca. 1.600 €/m² Wohnfläche) als auch aktuellen Passiv- und Plusenergiehäusern hinsichtlich Ökobilanz und Lebenszykluskosten überlegen. Eine neue Baukultur der Vereinfachung ist denkbar:

Stringente und vielseitige Raumstrukturen, nutzungsflexible und hochwertig gestaltete Räume mit auskömmlicher Fläche (ca. 15-18 m²) und Höhe (ca. 2,60 m - 3,00 m), schichtenarme Bauteilaufbauten, zeitbeständige und haptisch ansprechende Oberflächen, einfache Anschlussdetails, Raumklimakonzepte mit reduzierter und anpassbarer Gebäudetechnik sind Bestandteile einer neuen Strategie. Diese zeichnet sich durch eine sehr ressourcenschonende Erstellung bei vertretbaren Kosten, eine dank hoher Qualität und Flexibilität lange Betriebsphase bei geringem Instandhaltungsaufwand, moderaten Energieverbrauch für Heizung, Kühlung und Lüftung sowie hervorragende Recyclingfähigkeit aus.

Ausgangspunkt der Untersuchungen sind die heute hochentwickelten Konstruktionsmaterialien Massivholz, Leichtbeton und hochwärmedämmendes Mauerwerk. Für diese Materialien sollen jeweils optimierte Konstruktionen, Raum- und Technikkonzepte, sowie Detaillösungen entwickelt und in einem ergebnisoffenen und Übersicht schaffenden Vergleich dargestellt werden.

1.3 Projektablauf und Zeitplan

Folgende Meilensteine (MS) wurden im Verlauf des Forschungsvorhabens in einem Zeitraum von 24 Monaten behandelt:

- MS1: Definition der Grundlagen
  Abschluss aller Recherchen zu Konstruktion, Material und Technik. Es werden die Varianten und Parameter der zu untersuchenden Komponenten festgelegt. Im Nebeneffekt wird ein möglicher weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Grundlagen (Materialentwicklung) lokalisiert.

- MS2: Entwurfsstrategie (Einzelraum-Betrachtung)
  Es werden aus den zu Grunde liegenden Komponenten erfolgversprechende Kombinationen gebildet und detaillierte Entwürfe des Einzelraums entwickelt. Für die drei Materialvarianten Holz, Beton und Mauerwerk werden jeweils ca. drei möglichst divergierende Entwurfsstrategien verfolgt.

- MS3: Simulation und Berechnung (Einzelraum-Betrachtung)
  Durch die Raumklimasimulationen wird das Funktionieren der Räume hinsichtlich der Aufenthaltsqualität überprüft. Die LCA und LCC Analyse ermittelt die ökologische und ökonomische Bilanz über den Lebenszyklus.

- MS4: Entwurfsoptimierung 1 (Einzelraum-Betrachtung)
  Die Erkenntnisse aus den Simulationen und Berechnungen fließen als Rückkopplung in die Überarbeitung der Entwürfe ein.

- MS5: Überarbeitung Simulation und Berechnung 1 (Einzelraum-Betrachtung)
  Anpassung an die 1.Optimierungsphase Entwurf

- MS6: Entwurfsoptimierung 2 (Einzelraum-Betrachtung)

- MS7: Überarbeitung Simulation und Berechnung 2 (Einzelraum-Betrachtung)

- MS8: Übertragung der Einzelraum-Betrachtung auf die Gebäudeebene
  Die Ergebnisse werden in grob entwickelten Beispielentwürfen überprüft, sodass Ergebnisse entstehen, die mit realisierten Projekten vergleichbar sind. Für verschiedene Gebäudetypologien werden so valide Werte zu ökologischem und ökonomischem Verhalten über den Lebenszyklus von 100 Jahren errechnet.

- MS9: Vergleich und Bewertung der Ergebnisse
  Die Beispielgebäude werden mit ausgewählten realisierten Projekten hinsichtlich der geschilderten Kennwerte verglichen. Die Ergebnisse werden bewertet und eingeordnet. Weiterer Forschungsbedarf wird lokalisiert. Die normativen und gesetzlichen

Rahmenbedingungen werden auf sinnvolle und die neue Denkweise befördernde Deregulierungen, Vereinfachungen und Standard-Reduzierungen hin überprüft.

- MS10: Aufarbeitung Ergebnisse
  Erstellung Abschlussbericht, Präsentations-Unterlagen und Modelle (Modelle Einzelraum 1:10, Fassadenausschnitte 1:1).

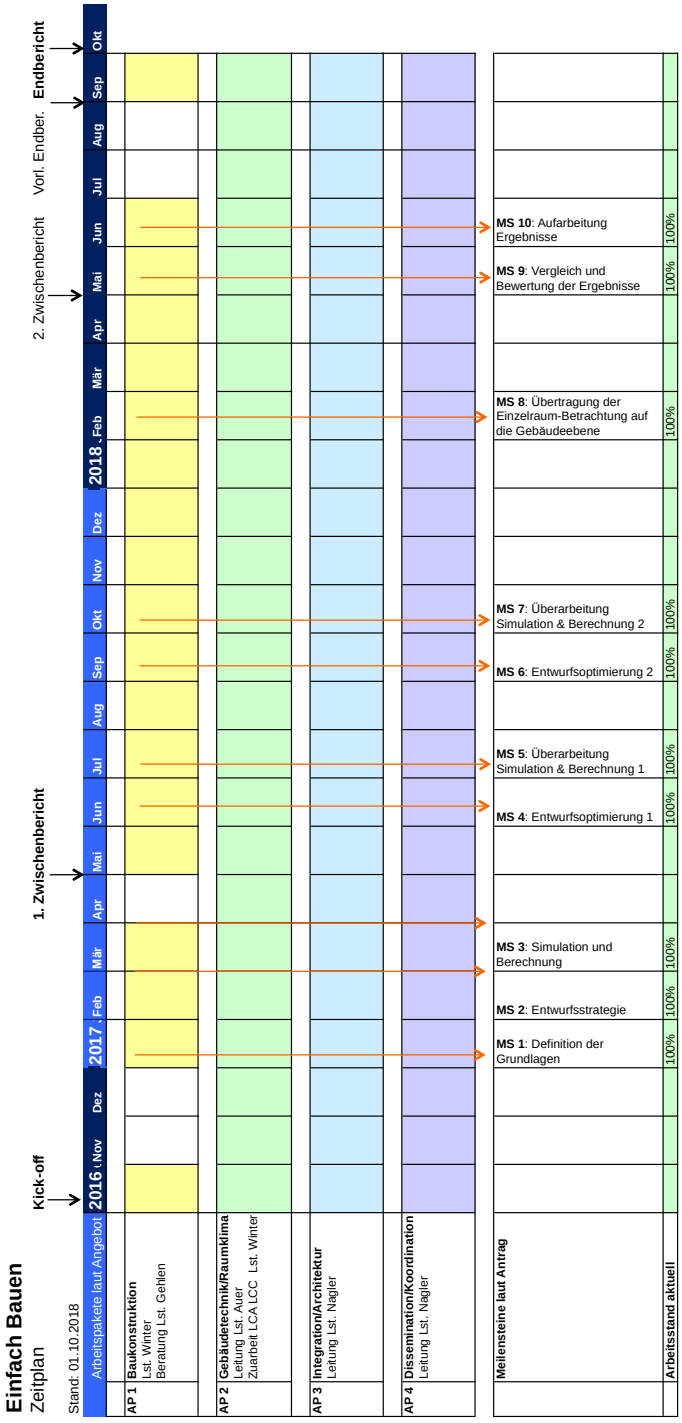


Abbildung 1: Zeitplan zum 01.10.2018

2 Grundlagenermittlung (MS1)

2.1 Der Begriff „Einfach Bauen“

Die Definition des Begriffs „Einfach Bauen“ war zentraler Bestandteil des Forschungsvorhabens. Ziel war es, klare Parameter zu definieren, die das „Einfache Bauen“ beschreibbar und bewertbar machen. Die folgenden Aspekte sind als Stoffsammlung zu verstehen:

Suffizienz / Flexibilität

Ein einfach gebautes Haus ist nutzungsoffen. Die vom Nutzer oder Bewohner an das Gebäude gestellten Anforderungen sind sehr individuell und ändern sich aufgrund veränderter Lebensumstände oder einem Wechsel der Bewohner oder Nutzer während des Lebenszyklus eines Gebäudes voraussichtlich mehrfach. Statt dieser Veränderung durch eine fortlaufende Anpassung des Gebäudes zu beatworten (Beispiel Maßanzug) schafft das einfach gebaute Haus von Beginn an einen Rahmen, der verschiedene Nutzungen ermöglicht (Sweatshirt XL), ohne dabei in das Extrem von „Anything Goes“ zu verfallen.

Architekturqualität

Ein einfach gebautes Haus erzeugt Nachhaltigkeit durch Architekturqualität. Die Qualität eines Gebäudes wird durch das angemessene Zusammenspiel von soziokultureller, funktionaler, ökonomischer, ökologischer und technischer Qualität bestimmt. Darüber gibt es aber noch eine ästhetische Qualität, die sich durch die Gestaltung der Fassaden, der Innenräume und der Beziehung zur gebauten Umgebung und der Natur ergibt. Diese ästhetische Architekturqualität bestimmt die Überlebenschancen eines Gebäudes und dessen Einzelteilen.

Klimagerechtes Gebäude

Das einfach gebaute Wohnhaus ist so konstruiert, dass Witterungseinflüsse und Einwirkung der Bewohner möglichst ohne Einsatz von Technik aufgefangen bzw. abgepuffert werden. Technik wird nur dann eingesetzt, wenn diese zum Ausgleich von klimatischen und nutzungsbedingen Extremsituationen notwendig ist.

Schichtenarme Aufbauten / Handwerkliche Details

Bei mehrschichtigen Bauteilen übernehmen die einzelnen Schichten jeweils spezielle Anforderungen. Durch die unterschiedliche Haltbarkeit und Nutzungsdauer der Bauteilschichten müssen diese Schichten, während und auch am Ende der Lebenszeit eines Gebäudes, wieder voneinander getrennt werden. Ein einfach gebautes Haus vermeidet diese problematische Mehrschichtigkeit. Dort wo ein Aufbau in mehreren Schichten nicht vermieden werden kann bzw. eine optimale Lösung darstellt, werden Bauweisen gewählt, die durch lokale Handwerker einfach repariert, ausgetauscht oder umgebaut werden können.

Robuste Haustechnik

Die technischen Systeme werden innerhalb der Lebenszeit des Gebäudes mehrfach angepasst und ausgetauscht. Ein einfach gebautes Haus vermeidet Situationen in denen Haustechnik notwendig wird. Die dann noch benötigte Haustechnik wird auf die Parameter Ressourcenverbrauch, Langlebigkeit und Austauschbarkeit hin optimiert**.**

2.2 Einfach Bauen im studentischen Entwurf

Begleitend zum Forschungsprojekt fanden am Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren (Prof. Nagler) zwei Entwurfsseminare statt, die sich mit den Aspekten des einfachen Bauens beschäftigten. Dabei wurde erprobt, die Themen aus dem Forschungsprojekt in der Ausbildung der Studenten zu verankern.

2.2.1 Aufgabe 1: The Simple House, SS 2017

Auf einem gegebenen Bauplatz sollten durch die Studierenden Entwürfe im Sinne des Konzeptes des einfachen Bauens in drei Schritten erstellt werden. Nach der Festlegung der Gebäudestruktur erfolgte die Ausarbeitung eines Geschosses und danach einer Fenstersituation.

Abbildung 2: Simple House, SS 2017, Modellfoto, Entwurf Massimo Falconi

2.2.2 Aufgabe 2: Scenario Buffered Design, WS 2017 / 2018



Die Studierenden hatten die Aufgabe, eine fünfteilige Familien-Saga über einen Zeitraum von 50 Jahren zu schreiben. Anschließend wurde eine Wohnung entworfen und alle fünf Teile darin

abgebildet. Dadurch wurde von den Studierenden geübt, einen Gebäudeentwurf als Konzept zu begreifen, das verschiedene Szenarien der Nutzung ermöglicht.

Abbildung 3: Scenario Buffered Design, WS 2017 / 2018, Szenario für 2017 und 2027, Entwurf Marion Montiel

2.3 Lebensdauer von Gebäuden

Die Projektthese geht von einer langen Lebensdauer von Gebäuden aus und betrachtet deshalb einen Zeitraum von 100 Jahren. Im Rahmen der Recherche zum Forschungsprojekt wurden statistische Erhebungen ausgewertet, um diese These zu prüfen.

Die Anzahl von Wohngebäuden in Deutschland gegliedert nach Bauzeiten wurden 2011 im Rahmen des europaweiten Projektes Zensus 2011 gezählt und die Ergebnisse 2015 veröffentlicht (Landesamt für Statistik Niedersachsen, 2015).

Die jährlichen Abgangszahlen von Wohngebäuden werden gegliedert nach Bauzeiten durch die zuständigen Landesämter für Statistik gesammelt. Grundlage dieser Daten bilden die statistischen Erhebungsbögen, die im Rahmen der Einholung der Abbruchgenehmigungen durch den Antragsteller ausgefüllt und vorgelegt werden müssen. Beim Landesamt wurden dazu im Rahmen des Forschungsprojektes die vorhandenen Daten aus den Jahren 1985 bis 2015 abgerufen. Unter Abgang wird der Abbruch aber auch die Umnutzung zu einem Nichtwohngebäude zusammengefasst.

Durch Verknüpfung dieser Daten kann der Anteil der gemeldeten Abgänge bei Wohngebäuden gegliedert nach Bauzeiten pro Jahr ermittelt werden.

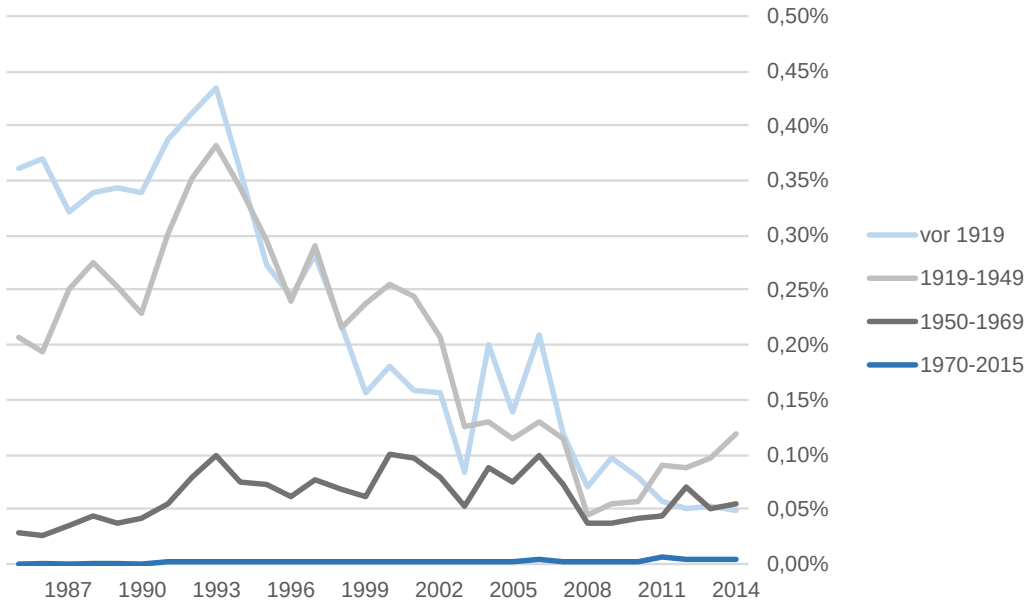


Abbildung 4: Vergleich Anteil des jährlichen Abgangs (Abbruch und Umnutzung zu Nichtwohngebäuden) am Gesamtbestand an Wohngebäuden in Bayern jeweils nur innerhalb einer bestimmten nach Bauzeit

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, ist die Abbruchrate bei älteren Gebäuden höher als bei jüngeren.

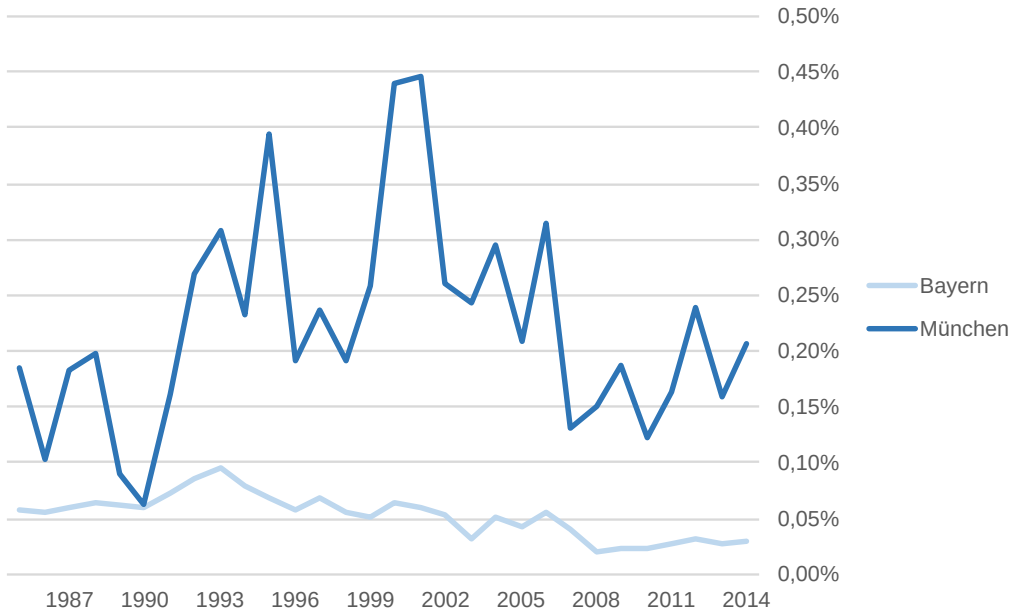


Abbildung 5: Vergleich Anteil des jährlichen Abgangs (Abbruch und Umnutzung zu Nichtwohngebäuden) am Gesamtbestand an Wohngebäuden in Bayern und München

Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, ist die Abbruchrate in München höher als im gesamten Bayern.

Das Landesamt hat in einer Pressemitteilung am 18.02.2009 mitgeteilt, dass bei der Interpretation der Daten zu berücksichtigen ist, „dass aufgrund einer Änderung der Bayerischen Bauordnung zum 01.01.2008 die Beseitigung bestimmter Gebäudeklassen nicht mehr bei den Bauaufsichtsbehörden angezeigt werden muss („verfahrensfrei“). Dies betrifft u. a. die Beseitigung freistehender Gebäude mit einer Höhe von bis zu 7 Metern und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt maximal 400 m2 Nutzfläche“ (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2009). 2008 wurden 10 % der gemeldeten Wohngebäude nicht abgebrochen, sondern sind aufgrund einer Umnutzung in Nichtwohngebäude als Abgang in die Statistik eingeflossen.

Selbst bei einer Dunkelziffer nicht erfasster Gebäude der Gebäudeklasse 3 bis 5 von 100 % würde sich für Bayern eine aktuelle Abbruchrate von weniger als 0,1 % und für München eine Rate von weniger als 0,5 % ergeben.

Eine Betrachtung des Gebäudes über einen Zeitraum von 100 Jahren ist somit durchaus sinnvoll und, sofern man eine realistische Bewertung der Nachhaltigkeit anstrebt, sogar notwendig.

2.4 Konstruieren mit Mauerwerk

Mauerwerk umfasst neben dem klassischen Klinker alle Materialien, die in Steinform geliefert werden und manuell oder mittels Robotik vor Ort mit Mörtel verbunden und verputzt werden. Häufig finden hierbei Mauerziegel aus Ton oder Lehm und Kalksandsteine sowie Leichtbetonsteine, aber auch Steine aus Recyclingbaustoffen oder Natursteine Verwendung. Im Bereich Mörtel hingegen wird nach Eigenschaften des Mörtelbetts unterschieden. Hierbei sind Normalmörtel, Dünn-, Leicht- und Mittelbettmörtel die wichtigsten Vertreter (BauNetz Media GmbH, 2018).

2.4.1 Wärmeschutz und U-Wert

Die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit der Mauersteine aus den Anforderungen der Bauproduktenverordnung, der Musterbauordnung sowie den sich verschärfenden Vorgaben der EnEV wird durch diverse Maßnahmen der Hersteller in immer kürzeren Innovationszyklen vorangetrieben, vgl. auch aktuelle Zulassungen (Jäger, 2015).

Während den Möglichkeiten, die Lochung und damit die Stege zu optimieren, zu verschlanken und Wärmebrücken innerhalb des Steins zu minimieren, bald eine Grenze gesetzt war, wenn die Festigkeit nicht wesentlich herabgesetzt werden sollte, hat man gleichzeitig auch die Rohdichten der Ziegel verringert. Das wird durch organische Zuschläge in der Lehmmasse erreicht, die beim Brennprozess verbrennen und Lufteinschlüsse im Gefüge bilden. Bei Leichtbetonsteinen sind die Zuschläge für die Steine aus stark porösem Material, beispielsweise Blähglasgranulat oder Blähton. Auch diesen Maßnahmen sind Grenzen gesetzt, wenn die Steinfestigkeiten erhalten bleiben sollen. Darum hat man sich in den letzten Jahren mit der Befüllung von Hohlräumen in

Ziegeln oder Mauersteinen mit schlecht wärmeleitendem Material bedient, einer sehr wirksamen Methode, die Wärmeleitfähigkeit um mehrere Hunderstelpunkte zu verringern. Bei Ziegeln sind die Füllmaterialien häufig schlecht wärmeleitende Perlite mit geringen Anteilen an Bindemitteln oder Mineralwollfüllungen, die lose in den Stein gesteckt sind. Bei Leichtbetonsteinen sind die Kammern ebenfalls mit Mineralwolle oder mit schlecht leitendem porenreichem Zementschaum gefüllt. Dadurch werden bei Ziegeln sehr niedrige Wärmeleitfähigkeiten von λ = 0,07 bis 0,09 W/mK erreicht. Bei Wärmedämm-Leichtbetonsteinen liegt die Wärmeleitfähigkeit momentan bei λ = 0,10 W/mK.

Beim Mauergefüge ist selbstverständlich auch die Verbesserung des Fugennetzes im Blick der Innovation. Nach den Leichtmörteln sind die Dünnbettmörtel heute Stand der Technik. Inzwischen kommen sogenannten Mörtelpads zum Einsatz, bei denen Werktrockenmörtel zu dünnen Pads mit Wasservertiefung geformt ist, die in den üblichen Ziegelmaßen auf alle Wandbreiten trocken ausgelegt werden können. Nach lückenloser Verlegung der Pads werden sie mit einem Sprühgerät gewässert und anschließend die Planziegel darauf verlegt. Die sonst sehr umständliche und reinigungsintensive Verarbeitung von Dünnbettmörteln mit Auftragsgeräten wird dadurch deutlich beschleunigt und die statische sowie die bauphysikalische Qualität der Mörtelfuge weiter verbessert.

Wärmebrücken bei sehr dicken Ziegelwänden

Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ψ (W/mK) verringert sich mit zunehmender Wanddicke. Steigt die Wärmeleitfähigkeit Lambda der Ziegelwand an, steigt auch der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient an. Soweit sind für die Wärmebrücken bei dicken, hochwärmedämmenden Ziegelwänden im Vergleich mit konventionellen Mindestwandstärken keine nachteiligen Effekte zu erwarten. Allerdings werden sich bei stark verringerten Wärmeverlusten der stark dämmenden, flächigen Bauteile die Effekte von schlechten oder auch zahlreichen Wärmebrücke auf die Gesamtenergiebilanz der Gebäude stärker auswirken.

2.4.2 Feuchteschutz

Der Feuchtehaushalt von mineralischen Mauersteinen ist in der Regel unproblematisch, da die Mauersteine kapillaraktiv sind und Feuchte einspeichern können, die sie in der Trocknungsperiode wieder abgeben. Voraussetzung ist, dass die Putz- und Anstrichschichten auf der Außenseite diffusionsoffen sind, um die Rücktrocknung zu ermöglichen. Die ungestörten Putzflächen sind im Wesentlichen für die Feuchteaufnahme und –abgabe bei Schlagregenbelastung zuständig und unterscheiden sich auch über die großen Wanddicken hinweg nicht.

Putzrisse

Risse im Putz, die die Feuchtebelastung ungünstig verändern, können durch geeignete Putze nach EN 998-1 vermieden werden (Deutsches Institut für Normung, 2003). Der gewählte Putz muss auf die Trockenrohdichte und den E-Modul des Putzgrundes abgestimmt sein und dieser

sollte aus einheitlicher Mauersteinart bestehen, eine entsprechende Leitlinie gibt der Industrieverband Werkmörtel e.V. heraus (Deutsches Institut für Normung, 2003). Mischmauerwerk benötigt eine zusätzliche Armierung des Putzes aus alkalibeständigem Glasgewebegitter in den Putz-oberlagen. Für Mauerwerk sind Feuchteschutzmaßnahmen vor allem im Bereich der erdnahen und erdberührten Bauteile erforderlich. Im Sockelbereich bis 30 cm über der anschließenden, wasserführenden Oberfläche sind sogenannte Sockelputze zum Feuchteschutz erforderlich. Diese weisen eine höhere Druckfestigkeit der Mörtelgruppe CS III auf als die Unterputze im darüber liegenden Mauerwerk und sind wasserabweisend und frostwiderstandsfähig, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Kriterien für den Regenschutz und Beschichtungen nach DIN 4108-3 bei Prüfung nach DIN EN ISO 15148

Kriterien für den Regenschutz	**Wasseraufnahme-koeffizient W_w [kg/(m²·h^{0,5})]**	**Wasserdampfdiffusions- äquivalente Luftschichtdicke s_d [m]**	**Produkt W_w · sd [kg/(m·h^{0,5})]**
wasserabweisend	$W_w \leqslant 0,5$	$s_d \leqslant 2,0$	$W_w \cdot s_d \leqslant 0,2$

Abdichtungen

Erdberührte und aufgehende Bauteile im Bereich von Spritzwasser und Bodenfeuchte sind nach der Tabelle 2 abzudichten. Weitere Hinweise enthält die Abdichtungsnorm DIN 18533:07-2017 (DIN 18533-1, 2017). Allgemeine Planungsansätze fasst das Ziegel-Lexikon wie folgt zusammen (Pröll, 2017).

Allgemeine Planungsgrundsätze:

- Bauwerk so anordnen, dass Wassereinwirkung möglichst gering
- Zu schützende Bauteile, Öffnungen, Durchdringungen oberhalb Bemessungs-wasserstand
- Gelände so gestalten, dass Niederschlagswasser vom Gebäude weggeleitet wird
- Lichtschachträndер so gestalten, dass möglichst wenig Oberflächenwasser ein-dringen kann
- Wasser aus offen endenden Regenfallrohren nicht direkt auf Wandsockel

Anforderungen an Untergrund:

- Abzudichtende Untergründe frostfrei, fest, eben, frei von Nestern und klaffenden Rissen und schädigenden Verunreinigungen
- Feuchtegehalt des Untergrunds darf zulässiges Maß nicht überschreiten

Schutz der Abdichtungsschicht erdberührter Bauteile:

- Vor: mechanischen/thermischen Beschädigungen
- Durch: andere Funktionsschichten (z.B. Dränmatten, Perimeterdämmplatten), entkoppelt durch Gelschicht

Tabelle 2: Wassereinwirkungsklasse nach Tab. 1, DIN 18533-1

Klasse	Art der Einwirkung	Bauteil + Abdichtungsbauart
W1-E	Bodenfeuchte und nichtdrückendes Wasser	Bodenplatte: Bitumen, Polymerbitumen, Kunststoff, Elastomer, PMBC, Asphaltmastix, Gussasphalt Erdberührte Wand: wie Bodenplatte ohne Asphaltmastix, Gussasphalt.
W1.1-E	Bodenfeuchte und nichtdrückendes Wasser bei Bodenplatten und erdberührten Wänden	
W1.2-E	Bodenfeuchte und nichtdrückendes Wasser bei Bodenplatten und erdberührten Wänden mit Dränung	
W2-E	Drückendes Wasser	Erdberührte Bauteile: Bitumen, Polymerbitumen, Kunststoff, Elastomer, PMBC Erdberührte Bauteile: Bitumen, Polymer, Kunststoff, Elastomer
W2.1-E	Mäßige Einwirkung von drückendem Wasser <= 3m Eintauchtiefe	
W2.2-E	Mäßige Einwirkung von drückendem Wasser > 3m Eintauchtiefe Problem: Niederschlagswasser sickert bis zur Abdichtung, muss dort abgeleitet werden Maßnahme: bei Abdichtung muss tiefster Punkt =< 30 cm über HHW/HGW liegen, Anstauhöhe darf 10 cm nicht überschreiten	
W3-E	Nicht-drückendes Wasser auf erdüberschütteten Decken	
W4-E	Spritzwasser und Bodenfeuchte am Wandsockel sowie Kapillarwasser in und unter den Wänden Problem: Wassereinwirkung auf Oberfläche, Eindringen in den Schalenzwischenraum (mehrschaliges MW) Maßnahme: Sockel- und Querschnittsabdichtung Bereich: min. 20 cm unter – 30 cm über GOK	

Luftdichter Anschluss

Luftdichtheit ist durch die Putzschichten von innen und außen gewährleistet. Im Bereich von Durchdringungen wie Fenstern oder ähnlichem kann durch vlieskaschierte Einputzbänder die Luftdichtheit hergestellt werden. Beim Anschluss von Folien oder Membranen zum Beispiel im

Dachbereich kann mit vorkomprimierten Bändern unter einer verschraubten Anpresslatte ein reversibler, nicht geklebter Anschluss hergestellt werden.

Die Luftdichtheitsnachweise werden nach DIN EN 13829 geführt (DIN EN 13829, 2001). Das Nachweisverfahren ist die Feldmessung durch die sogenannte Blower-Door-Messung. Gesetzliche Anforderungswerte für den Luftvolumenstrom n50 betragen 1,5-facher stündlicher Luftwechsel beim Vorhandensein von raumlufttechnischen Anlagen und 3-facher Luftwechsel ohne Lüftungsanlage.

Eine weitere positive Konsequenz aus guter Luftdichtheit ist die wirkungsvolle Unterbrechung der Rauch- und Luftschallweiterleitung.

2.4.3 Brandschutz

Ziegel und Mauerwerk sind entsprechend ihres Brandverhaltens in Baustoffklasse A1 als nichtbrennbarer Baustoff eingeteilt, enthalten keine brennbaren Bestandteile und zeigen folglich auch keine Rauchentwicklung sowie kein brennendes Abtropfen (Zusatzanforderungen der DIN 4102-1) (DIN 4102-1, 1998). National erfolgt die Klassifizierung in Deutschland nach DIN 4102-1, europäisch harmonisiert seit 2001 nach EN 13501-1 (DIN EN 13501-1, 2010). Für Bauarten nach MBO 2016 und M-VVTB sind Anforderungen an Bauteilaufbauten für die jeweiligen Gebäudeklassen nach Tabelle 3 einzuhalten. Die gängigen Voll- und Hochlochziegel erfüllen die Anforderungen nach DIN 4102-4 bzw. DIN EN 1996-1-2/NA, feuerbeständig F90-A oder REI90 nach EN 13501-2, bei einseitiger Brandbeanspruchung für tragende, raumabschließende Ziegelwände ab einer Dicke von 175 mm (Lochung A und B, RDK ≥ 0,9) wenn sie unverputzt sind und ab einer Dicke von 115 mm (Lochung A und B, RDK ≥ 0,9) wenn sie beidseitig verputzt sind gemäß DIN 4102-4, Abschnitt 4.5.2.10 (DIN EN 1996-1-2/NA, 2013); (DIN EN 13501-2, 2016); (DIN 4102-4, 2016).

Hochwärmedämmende Ziegel für Außenwände von energieeffizienten Gebäuden sind nicht mehr nach DIN EN 771-1 in Verbindung mit DIN 20000-401 geregelt, deshalb haben die Hersteller Einzelzulassung für ihre Produkte (DIN EN 771-1, 2015); (DIN 20000-401, 2017). Damit handelt es sich um Abweichungen von eingeführten technischen Regeln und erfordert eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung zum jeweiligen Produkt. In der folgenden Tabelle 3 werden zur Übersicht die Eigenschaften der Ziegel zur Erfüllung der Anforderungen nach DIN 4102-4 bzw. DIN EN 1996-1-2/NA als Anhaltswerte angegeben.

Tabelle 3: Brandschutztechnische Einstufung von tragenden, raumabschließenden Wänden aus Zulassungsziegeln 1

Mauerwerk aus	Ausnutzungs-faktor α_2	Mindestdicken[2] in mm			
		feuerhemmend	hochfeuerhemmend	feuerbeständig	Brandwand
wärmedämmenden Ziegeln	≤ 1,0	(240)	(300)	(300)	siehe jeweilige Zulassung
Schallschutz-Füllziegeln	≤ 1,0	175 (175)	200 (175)	200 (175)	
Planziegeln nach DIN V 105-6 Rohdichteklasse ≥ 0,9	≤ 1,0	(115)	(115)	(115)	(240)
	≤ 0,6	175 (115)	175 (115)	175 (115)	240 (175)
wärmedämmenden Planziegeln	≤ 1,0	(240)	(300)	(300)	siehe jeweilige Zulassung

1) Angegebene Werte sind Anhaltswerte. Die Regelungen der jeweiligen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen sind in jedem Fall zu beachten. Im Einzelfall können größere Wanddicken erforderlich sein.
2) Werte in Klammer gelten für Wände mit beidseitigem Putz.

2.4.4 Schallschutz

Grundlage für den Schallschutz ist die DIN 4109:2018-01 (DIN 4109-1, 2018); (DIN 4109-2, 2018). Das bauaufsichtlich nicht eingeführte Beiblatt 2 zur DIN 4109 enthält Vorschläge zum erhöhten Schallschutz (DIN 4109 Beiblatt 2, 1989). Weitere gegebenenfalls privatrechtlich relevante Vorgaben erhält die VDI Richtlinie zum Schallschutz in Wohnungen (VDI 4100, 2012).

Wärmedämmende Hochlochziegel haben eine geringere Schalldämmung als aufgrund der flächenbezogenen Masse zu erwarten ist, da sie nicht die Anforderungen an quasi-homogenes Mauerwerk erfüllen. Darum sind die Zulassungsunterlagen der Hersteller vor der Verwendung zu prüfen und als Berechnungsgrundlage dient der Schalldämmwert $R_{w,Bau,Ref}$.

Weiterhin zu berücksichtigen ist die Verwendung von Leichtmörteln oder von Dünnbettmörteln in beidseitig verputzten Ziegelwänden. Im Gegensatz zum Normalmörtel führen sie zu einer Verringerung des Direktschalldämmmaßes R_w von 0,8 bis zu 1 dB. Bei größerer Rohdichteklasse der Steine wird der Unterschied jedoch wieder geringer.

Die Herstellung von Wohnungstrennwänden stellt auch Mauerziegel vor größere Herausforderungen, um die geforderten Schalldämmmaße zu erreichen. In der Stoßstelle von Trennwand und Außenwand muss eine biegesteife Verbindung hergestellt werden, um die Flankenübertragung zu minimieren. Gleichzeitig darf der Wärmeschutz der Außenwand dabei nicht beeinträchtigt werden, siehe dazu Abbildung 6. Leichte Trennwände mit einer flächenbezogenen Masse m‘ < 150 kg/m² müssen allerdings vom angrenzenden schweren Mauerwerk

akustisch entkoppelt werden. Damit wird die Schalldämmung an den Flanken um ca. 6 dB und längs der schweren, angrenzenden Wand um ca. 12 dB verbessert.

Trennende Bauteile von hoher flächenbezogener Masse erhöhen mit zunehmender Einbindetiefe die Schalldämmung im Knotenpunkt von flankierenden Bauteilen, die eine geringere flächenbezogene Masse aufweisen. Bei dem Beispiel in Abbildung 6 ist das Direktschalldämm-Maß der flankierenden hochwärmedämmenden monolithischen Außenwand aus Planziegeln: erf. $R_{w,Bau,ref}$ ≥ 48 dB. Die schwere Trennwand bindet dabei biegesteif bis zur Hälfte in die Außenwand ein. Die Wärmebrücke wird durch einen eingeschobenen Mineralwollstreifen im äußersten Füllziegel reduziert. Um Putzrisse zu vermeiden wird im Außenputz ein Glasfasergelege über dem linearen Anschluss eingebettet, da der Füllziegel eine andere Rohdichte als das hochwärmedämmende Mauerwerk hat. Stoßstellendämm-Maß im Übertragungsweg der flankierenden Außenwand (Ff): K_{Ff} (bzw. K13): ca. 8 bis 11 dB (bei Einbindetiefe ca. 0,7·d) und das bewertete Schalldämm-Maß: R'_w ≥ 56 dB.

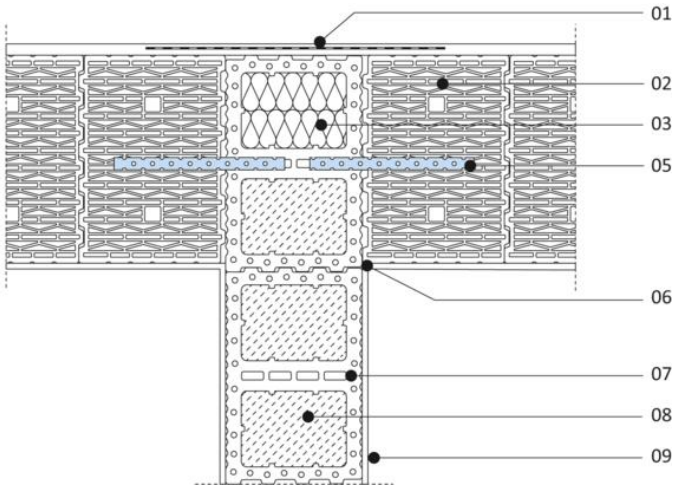


Abbildung 6: Schallschutztechnisch ideale Einbindung der Wohnungstrennwand in wärmedämmende Außenwand (Pröll, 2017)

2.4.5 Tragwerk und Standfestigkeit

Die Mehrgeschossigkeit von Bauwerken, auch bis zur GKL 5, stellt kein Problem für hochwärmedämmendes Ziegelmauerwerk dar. Die lieferbaren und zugelassenen Steinsortimente haben Steine mit ausreichenden Steinfestigkeiten, allerdings muss die Tragfähigkeit von hochwärmedämmendem Ziegelmauerwerk gesondert betrachtet werden. Durch die starke Herabsetzung der Rohdichte sinkt auch die Steinfestigkeit, daher sind bei der Planung von Gebäuden in GKL 4 und 5 die Steinfestigkeitsklassen auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen. Als Richtwert kann dabei von einer Linienlast von ca. 75 kN/m mit Stahlbetondecken ausgegangen werden. Bei 8 Stockwerken ergibt es einen Bemessungswert der Einwirkung (N_{Ed}) von rund 600 kN/m. Damit ist ein Stein der charakteristischen Druckfestigkeit f_k=5,0 und eine

Wandstärke von 425 mm erforderlich um den entsprechenden Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft (N_{Rd}), hier mit 602,1 kN/m, zu erfüllen. Für hochwärmedämmende Ziegel müssen die Materialkennwerte aus den Zulassungsdokumenten recherchiert werden.

2.4.6 Dauerhaftigkeit

Als Dauerhaftigkeit im Mauerwerk und hier besonders im Bereich des Sichtmauerwerks bezeichnet man eine möglichst lange Standzeit ohne Instandsetzungsbedarf. Die Dauerhaftigkeit hängt vor allem von der Planung, der handwerklichen Umsetzung und von den Eigenschaften der verwendeten Mauerziegel und Mauermörtel ab.

Die industriell hergestellten und qualitätsüberwachten Ziegel haben unter regulären Umständen eine als hoch zu bewertende Dauerhaftigkeit von mehreren Jahrzehnten. Außerdem ist Ziegelmauerwerk durch Putz vor Einwirkungen durch Witterung, Temperaturwechsel oder Salze geschützt bzw. die Wirkungen werden abgemildert. Stärker wirken die Beanspruchungen auf Sicht- oder Klinkermauerwerk. Die Verbindung der Mauersteine mit dem Fugenmörtel in den Lagerfugen ist ausschlaggebend für die Dauerhaftigkeit des Gesamtgebildes eines Mauerwerks aus Steinen und Fugennetz und hier liegt eine wesentliche Schadensquelle für Mauerwerk im Allgemeinen. Kommt es zu Flankenabrissen, Rissen im Mörtel oder herausgelösten Mörtelstücken, wird die Mörtelfuge schnell angegriffen und sie erodiert im weiteren Verlauf zügig. Diese Schadensmechanismen sind besonders im Sichtmauerwerk zu berücksichtigen und die Fugen so auszubilden, dass Wasser abgeleitet wird (Hörenbaum, 2005). In wärme-dämmendem, verputztem Mauerwerk ist die Fugenausbildungen im Dünnbett einfach, entweder im Auftrag mit der Walze oder mit Mörtelpads, vorausgesetzt sind plangeschliffene Mauersteine (Maxit, 2017). Durch dieses Verfahren wird eine hohe Verarbeitungsqualität gewährleistet.

Dennoch können auch Qualitätsprobleme nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Bei der Herstellung können Verunreinigungen der Ausgangsstoffe vorliegen oder es können Fremdstoffe in den Produktionsablauf gelangen, die Brenntemperatur kann vom Sollwert abweichen und der Brennprozess nicht planmäßig verlaufen. Die möglichen Schädigungsprozesse lassen sich nach den folgenden sieben Punkten klassifizieren:

- Durchfeuchtung
- Frostschädigung
- Salzkristallisation
- Oberflächenerosion
- Ausdehnung
- konstruktionsschädigende Prozesse
- biologischer Bewuchs

Die Auslöser dieser Prozesse sind bedingt durch,

Primär:

- Rohstoff, Fertigung, Äußere Belastungen (Feuchte- und Salzeintrag)

Sekundär:

- Falsche Bemessung oder unzulässige statische Belastungen
- Fehler in Bau- oder Sanierungsarbeiten
- Änderung der Nutzung oder Konstruktion
- Systemunverträgliche Reinigungsmittel, Ersatz- oder Sanierbaustoffe

Die Umsetzung der technischen Regelwerke hat zum Ziel, eine möglichst hohe Dauerhaftigkeit zu gewährleisten und Schäden zu vermeiden. Deshalb ist deren Anwendung unabdingbar, jedoch auch keine vollständige Gewähr für die Schadensfreiheit. Die Richtlinien der Verbände und die Hinweise der Hersteller zur Verarbeitung und Herstellung von Mauerwerk sind zu beachten und durch regelmäßige Qualitätskontrollen zu gewährleisten. Danach sind Risiken in Herstellung, Verarbeitung und Betrieb bereits soweit reduziert, damit die Bauweise ökonomisch vertretbar und die Lebensdauer auf den Bemessungszeitraum abgestimmt ist.

2.4.7 Vorfertigung und Montage

Die Vorfertigung von Ziegelelementen hatte in den vergangenen zwei Jahrzehnten an Bedeutung verloren und sich fast ausschließlich auf Ziegelelementdecken beschränkt. Mittlerweile sind verstärkte Bemühungen zu erkennen, dass die Ziegel- und Mauersteinhersteller werksgefertigte Wandelemente aus ihren Steinen herstellen und vertreiben möchten. Der Einsatz von Robotik spielt bei der Herstellung von Vor-Ort erstelltem Mauerwerk und Mauerwerkselementen noch eine geringe Rolle, bietet aber aufgrund der hohen Präzision und der einzigartigen Freiheit der Formgebung des Mauersteinverbands in alle drei Dimensionen eine großes Potenzial für die Anwendung auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Redaktion BaunetzWissen, 2018). Momentan hat der Schweizer Ziegelhersteller Keller ein Verfahren und eine Zulassung für geklebte, robotisch hergestellte Wandelemente. Die maximale Größe der Wand- und Fassadenelementen beträgt momentan 4,00 x 2,80 x 1,30 m (Keller Systeme AG, 2018). Da diese Thematik gerade erst in ihrer Aktualität erkannt wurde und es vermutlich noch wenige Werke gibt, die das Vorfertigungsthema aktiv angehen bzw. schon erste Erfahrungen gesammelt haben, können zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch keine weiteren Aussagen gemacht werden.

2.4.8 Kosten

Die im vorherigen Absatz angesprochene Vorfertigung und Automatisierung der Wandfertigung hängt eng mit den Kosten für die Errichtung von Mauerwerk zusammen. Da der überwiegende Anteil des Mauerwerks noch traditionell vor Ort gemauert wird, sollen und können die Kosten nicht nach Herstellungsverfahren differenziert werden. Die Kosten für die Errichtung von 300 bis

365 mm starkem Mauerwerk aus Leichthochlochziegeln mit Außen- und Innenputz liegen zwischen 220 bis 260 € je Quadratmeter Wand basierend auf Kostenwerten nach sirados und BKI im Jahr 2017 und 2018 (WEKA Media GmbH & Co. KG, 2017), (BKI-Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, 2017).

2.4.9 Strategien für Einfaches Bauen mit Mauerwerk

Durch die technologische Weiterentwicklung auf der Ebene der Mauersteine sind für den Wärmeschutz die hohen Anforderungen sehr gut erfüllbar. Auch die Anforderungen des erhöhten Schallschutzes sind mit Trennwandkonstruktionen aus 240 mm Mauerwerk mit RDK 1,8/2,0 ausreichend, mit dem ein $R'_w \geq 56$ dB erreicht wird. Die im Abschnitt Schallschutz diskutierten betongefüllten Planfüllziegeln als Trennwand bieten einen geringfügig höheren Bemessungswert und daher etwas mehr Sicherheit für die Ausführung. Für Geschoßdecken aus Ziegelelementen sind bei flächenbezogenen Massen zwischen 320 – 350 kg/m² ebenfalls ausreichendes Luftschalldämmmaß von $R'_w \geq 54$ dB und ein Trittschallpegel von $L'_{n,w} \leq 46$ dB. Allerdings wird die Verwendung von vorgefertigten Ziegelelementdecken im Geschoß-wohnungsbau bei erhöhten Schallschutzanforderung von Experten mittlerweile als riskant bezüglich der Anforderungen der 2018 neuaufgelegten Schallschutznorm und dem zugehörigen Bemessungsverfahren gesehen (Gespräch Dipl.-Ing. (FH) M. Pröll, 2018). Empfehlenswerter und auf jeden Fall innerhalb der geforderten Schalldämmmaße, auch an für die Flanken-übertragung kritischen Stellen wie Trennwandauflager und –einbindung ins Außenmauerwerk, sind im Geschoßwohnungsbau Stahlbetondecken mit einer Mindestdicke von 220 mm.

Die angestrebte hohe Lebensdauer ist mit den verfügbaren einfachen Konstruktionen in Mauerwerk realisierbar. Es kann hier wie auch für die weiteren Bauweisen der Hinweis gegeben werden, dass Lebensdauern von einfachen Konstruktionen weniger von hohen technischen Anforderungen an die Baustoffe und –bauteile als vielmehr von Qualitätsmängel in der Herstellung und Ausführung sowie mangelhaftem Unterhalt abhängen (Institut für Bauforschung e.V., 2015).

2.5 Konstruieren mit Leichtbeton

Leichtbeton (LC) bezeichnet ein Gemisch aus Wasser, Zement, Gesteinskörnung und ggf. Zusatzstoffen sowie Zusatzmitteln, dass im erhärteten Zustand eine Trockenrohdichte zwischen 800 und 2000 kg/m³ aufweist. Daneben existieren auch diverse Infraleichtbetone (ILC), auch leichte Leichtbetone, Dämmbetone, Isolationsbetone, Hochleistungs-Leichtbetone oder Ultra-leichtbetone genannt, bei denen neben dem Einsatz leichter Gesteinskörnung die Zement-steinmatrix durch Zugabe verschiedener Zusatzmittel (z.B. Schaumbildner) so optimiert wird, dass vergleichsweise hohe Druckfestigkeiten bei geringen Rohdichten (500 – 800 kg/m³) und damit geringen Wärmeleitfähigkeiten erreicht werden, vgl. Abbildung 7.

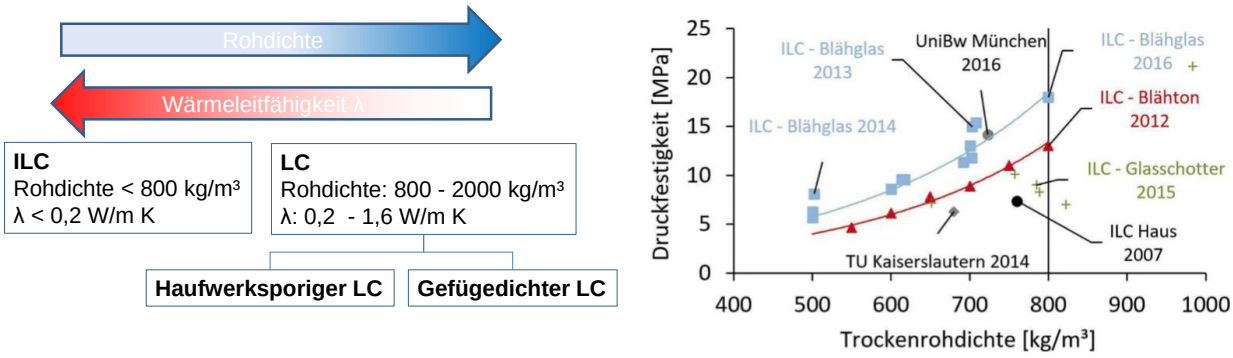


Abbildung 7: Links: Übersicht LC und ILC; Rechts: Druckfestigkeiten und Rohdichten verschiedener ILC-Zusammensetzungen aus (Schlaich and Hückler, 2017)

Beton und damit auch LC und ILC besitzt gegenüber anderen Materialien den Vorteil, dass er bei hoher Dauerhaftigkeit nahezu beliebig formbar ist. Er ermöglicht damit einen großen gestalterischen und baukonstruktiven Spielraum (Leibinger *et al.*, 2017).

Beim sommerlichen Wärmeschutz werden grundsätzlich innenliegende Fenster bevorzugt (Verschattung nutzen). Durch die gute thermische Speicherkapazität bietet der Baustoff auch im Sommer einen guten Wärmeschutz.

2.5.1 Brandschutz (Gebäudeklasse 3, 4, 5 nach MusterBO)

LC und ILC gehören ohne besonderen Nachweis der höchsten Baustoffklasse A 1 nach DIN 4102 (Brandschutz im Hochbau) an - Beton brennt nicht. Sollte es zu einem Brand kommen, sind weder Verschwelungen noch schädliche Emissionen zu befürchten (Bundesverband Leichtbeton e.V.), da der Baustoff aus natürlichen Rohstoffen besteht. Meistens wird LC und ILC allerdings als Verbundwerkstoff mit Bewehrung aus Stahl oder CFK und GFK eingesetzt. Stahl (Bewehrung) schmilzt ab Temperaturen von 500°C. Durch entsprechende Maßnahmen, also einer entsprechend hohen Betondeckung erreicht Stahl(Leicht-)beton aber alle Feuerwiderstandsklassen. Der Brandschutznachweis erfolgt gemäß DIN EN 1992-1-2. Da LC und ILC bessere Wärmedämmeigenschaften im Vergleich zu Normalbeton aufweisen, ist dieses Vorgehen auf der sicheren Seite. Die einfachste Methode ist die Einhaltung bestimmter Bauteilabmessungen und Mindestbetondeckungen gemäß Abschnitt 5. Darüber hinaus kann der Nachweis auch rechnerisch gemäß DIN EN 1991-1-2, Abschnitt 4.3.1 und dem nationalen Anhang erfolgen. Die Gefahr des Abplatzens muss in Sonderfällen (extreme Brandgefahr) berücksichtigt bzw. ggf. durch den Einsatz von PP-Fasern unterbunden werden. PP-Fasern schmelzen bei Brandeinwirkung bereits bei 160°C und bieten so den sich durch Hitzeeinwirkungen ausdehnenden Bestandteilen des Verbundwerkstoffs genügend Ausweichraum, so

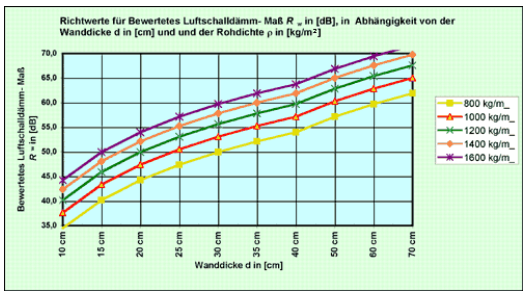
dass Abplatzungen verhindert werden. Zudem dienen die Kunststofffasern als Mikrobewehrung und reduzieren so die Rissbildung durch autogenes Schwinden.

Kunststoffe (CFK und GFK) beginnen noch früher zu brennen als Stahl. Bei Verwendung von Faserverbundwerkstoffen CFK und GFK als Bewehrung kann der Brandschutz des Materials selbst zusätzlich durch Verwendung von Phenolharzen mit höherer Glasübergangstemperatur oder Brandschutzadditiven deutlich erhöht werden, so dass das Material auch ohne Erhöhung der Betondeckung eine Feuerwiderstandsklasse F90, wie in der Gebäudeklasse 5 gefordert, erreichen kann. Alternativ muss die Betondeckung entsprechend erhöht werden. Bei der Gebäudeklasse 5 und damit der Forderung nach feuerbeständigen Materialien ergibt sich so bei Verwendung der GFK-Bewehrung Schöck ComBAR® eine Mindestbetondeckung von 65 cm.

Bei der Baukonstruktion selbst ist die Sicherstellung eines rauchdichten Anschlusses zwischen den einzelnen Bauteilen wichtig. Bei Fugen zwischen Deckenstirnseite und aufgehender Wand oder Fassade muss so beispielsweise sorgfältig eine Dämmschicht der Baustoffklasse A (Rohdichte ≥ 80 kg/m³, Schmelzpunkt > 1.000°C) angeordnet werden. Die Fuge darf mit Fugendichtstoffen nach DIN EN 26927 geschlossen werden (Mayr and Battran, 2011).

2.5.2 Schallschutz

Insbesondere im Mehrgeschosswohnungsbau werden hohe Anforderungen an den Schallschutz gestellt. Hierbei wird grundsätzlich zwischen Luft- und Körperschall unterschieden. (Infra-) Leichtbeton besitzt insbesondere beim Luftschall sehr gute Eigenschaften, so dass der Schallschutz-Nachweis bei Wahl entsprechender Fenster erfüllt wird (Bundesverband Leichtbeton e.V.)(Leibinger *et al.*, 2017). Leibinger et al. weisen zudem darauf hin, dass ein experimenteller Nachweis zu besseren Werten, als den normkonform abgeschätzten, führt (Leibinger *et al.*, 2017). Grund hierfür ist die schallbrechende Wirkung der porösen Gesteinskörnung. Abb. 8 links gibt einen Überblick das bewertete Luftschalldämm-Maß in Abhängigkeit der Dicke der Wand und der Rohdichte des Betons.



	ILC 600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800	Bemerkung
Trockenrohdichte [kg/m³]	600	650	700	750	800	
Dichte unter Normalbedingungen [kg/m³]	600	650	700	750	800	mit Trockenrohdichte gerechnet*
Abminderung [kg/m³]	50	50	50	50	50	s. DIN 4109, Beibl.1, Tab. 2
Wanddicke [cm]	55	55	55	55	55	
flächenbezogene Masse m' [kg/m²]	302,5	330	357,5	385	412,5	
Bewertetes Schalldämmmaß $R_{w,r}$ [dB]	**49**	**50**	**51**	**52**	**53**	s. DIN 4109, Beibl.1, Tab. 1, linear interpoliert

*Feuchtegehalt bei 23 °C, 80 % relativer Luftfeuchte gemäß DIN EN ISO 10456, Tab. 4, Beton mit Blähtonzuschlägen: u = 0,03kg/kg, daher hier auf sichere Seite mit Trockenrohdichte gerechnet.

(Anm.: gemäß SBT Tafel 10.63d um 2dB höhere Werte für Leichtbeton mit Blähtonzuschlag; jedoch in Beiblatt 1, Tab.1: "bis zu m' von 250kg/m3"! Daher hier nicht angesetzt.)

Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Wanddicke und dem bewerteten Luftschalldämmmaß für Betone unterschiedlicher Rohdichten; Rechts: Berechnetes Schalldämmmaß für ILC für eine Wanddicke von 55 cm, entnommen aus (Leibinger et al., 2017)

Körperschall, der beispielsweise durch Trittgeräusche entsteht, wird am besten durch die Trennung von Böden und Wänden bei gleichzeitigem Einsatz von möglichst massivem Material erreicht. Während Normalbeton alle konstruktiven Anforderungen, die an Schallschutz gestellt werden, erfüllt, bietet sich bei LC und ILC die Kombination mit Zementestrichen an. Gleichzeitig wirkt die raue und porige Oberfläche schallschluckend, so dass beim Luft- und Körperschall noch Optimierungsmöglichkeiten bestehen. So wird haufwerksporiger Beton beispielsweise erfolgreich im Straßenbau eingesetzt, um eine Lärmreduktion von 2 dB gegenüber herkömmlichen Bauweisen zu erzielen.

2.5.3 U-Wert / Speichermassen

Die niedrige Dichte wird durch Materialien wie Naturbims, Blähton, Blähschiefer, Blähglas oder Schaumglas, die einen hohen Luftporenanteil erzeugen, ermöglicht. Dieser begünstigt die Dämmeigenschaften des Leichtbetons. Während die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton etwa 2,1 W/(m·K) entspricht, können LC und ILC Werte von unter 0,2 W/(m·K) erreichen, Abb. 9.

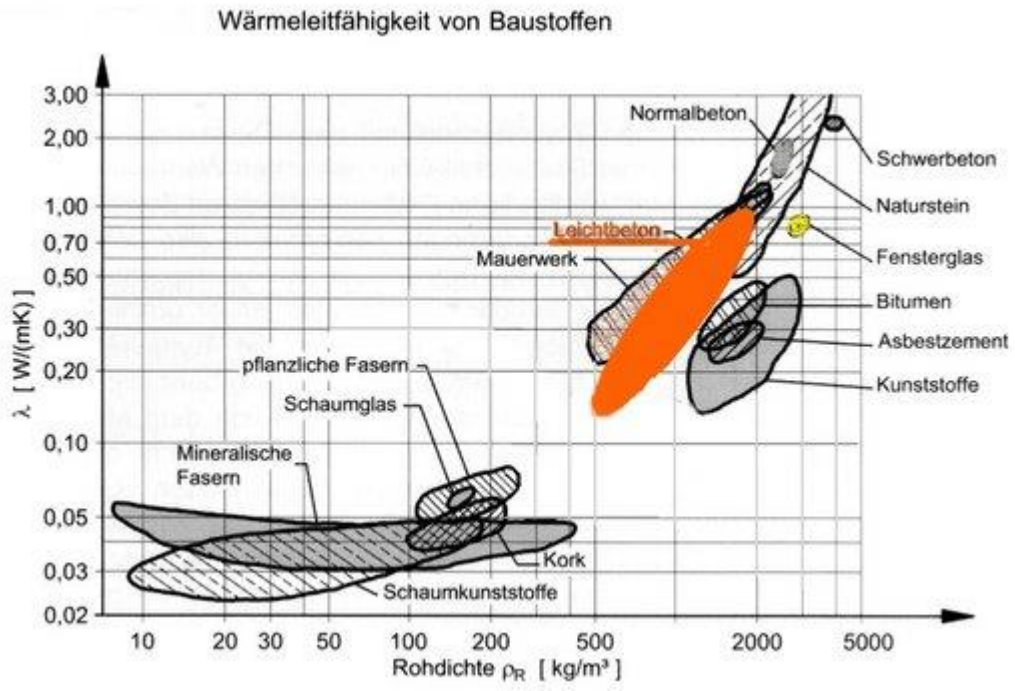


Abbildung 9: Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen (Cooperative Leichtbeton)

So kann ein Leichtbeton mit hoher Wandstärke die Anforderungen der EnEV erreichen, ohne dass eine zusätzliche Dämmschicht nötig ist (Baunetz_Wissen). ILC besitzt eine höhere Wärmespeicherkapazität als Leichtbeton und reagiert folglich träger auf Temperatur-änderungen. Gleichzeitig ist er nicht so träge wie Normalbeton, was eine schnellere Auskühlung nach heißen Tagen ermöglicht (Leibinger *et al.*, 2017).

Allerdings gilt grundsätzlich, dass mit zunehmenden Dämmeigenschaften die Rohdichte abnimmt, aber damit auch die Festigkeit. Mit zunehmender Offenporigkeit sind zudem weitere Maßnahmen nötig, um eine hohe Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Schlaich et al. (Schlaich and Leibinger, 2018) zeigten allerdings, dass die messtechnisch bestimmte Wärmeleitfähigkeit deutlich unterhalb den theoretisch berechneten Werten für ILC lag. Eine messtechnische Bestimmung bietet sich also in der Praxis an. Im KfW 70 Standard wird aktuell ein Geschossbau aus ILC in Berlin realisiert (Wohnungsbaugesellschaft Berlin-Mitte WBM, 2018), der ohne zusätzliche Dämmung auskommt und wartungsfrei ist.

2.5.4 Feuchteschutz (Witterung Außen und Tauwasser Innen)

Wenn Leichtbeton (LC) ohne zusätzliche Wärmedämmung in den Kontakt mit Tauwasser kommt, gibt es weder ein Risiko zur Korrosion noch zum Pilzbefall, da die ggf. stark saugende Gesteinskörnung beim reinen Leichtbeton durch eine dichte Zementsteinmatrix geschützt ist. Somit besteht nach DIN 4108 keine Nachweispflicht zum Tauwasserschutz (Univ.-Prof. Dr. Max J. Setzer). Durch die hygrische Speicherkapazität stellt sich bei LC und ILC ein angenehmeres Raumklima als bei Räumen aus Wärmedämmverbundsystemen ein, vgl. hierzu Leibinger et al. (Leibinger *et al.*, 2017). Wärmebrücken, also Bereiche, an denen häufig geringere Innentemperaturen anliegen, entstehen grundsätzlich an Anschlussstellen (Fenster, Zwischendecke, Balkon, etc.). Da für ILC noch kein Wärmebrückenkatalog existiert, müssen diese durch Simulation bewertet werden. Beispielhafte Berechnungen für Fenster- und Balkonanschlüsse in Leibinger et al. zeigten, dass auch mit ILC die Werte der DIN 4108 Beiblatt 2 eingehalten werden. Um Wärmebrückenverlust zu reduzieren, empfiehlt es sich, die Fenster mittig der ILC-Bauteile anzuordnen. Bei dem Anschluss einer Zwischendecke kommt es zu Wärmeverlusten, so dass eine Abschrägung und Dämmung des Zwischendeckenkopf anzustreben ist, vgl. hierzu auch Leibinger et al. (Leibinger *et al.*, 2017).

2.5.5 Statik/Standfestigkeit

LC besitzt aufgrund seiner porenhaltigen Struktur für gewöhnlich eine niedrigere Druckfestigkeit als klassischer Beton, wobei je nach Gesteinskörnungsart und Zementleim- bzw. Zementsteinqualität Druckfestigkeitswerte von bis zu 50 N/mm² möglich sind. Hochfester Leichtbeton erreicht sogar Werte bis 80 N/mm² (Dr.-Ing. Bosold and Dr.-Ing. Beck). Um Zugkräfte aufnehmen zu können, sollte LC und ILC ebenso wie Normalbeton bewehrt werden. ILC als

homogene Außenwandkonstruktion findet aktuell aufgrund der geringen Dichte seine Grenzen beim mehrgeschossigen Wohnungsbau (Leibinger *et al.*, 2017). Hier muss ggf. die Rohdichte erhöht werden und der Wärmeschutz durch zusätzliche Maßnahmen (Bauteilaktivierung, Dämmung, mehrschichtiger Wandaufbau aus LC und ILC) sichergestellt werden. Dies hat wiederum den Vorteil, dass die Wanddicke reduziert und so mehr Wohnraum (und damit auch mehr Mieteinnahmen) geschaffen werden. Aktuelle Forschung beschäftigt sich weiterhin mit der Optimierung des ILCs.

2.5.6 Vorfertigung / Montage vor Ort

Die Vorfertigung von (Infra-)Leichtbetonteilen ist für tragende und nichttragende Bauteile möglich. Im Fertigteilwerk werden die Baukörper unter Idealbedingungen hergestellt und können per Tieflader zur Baustelle transportiert werden. (Komzet Bau Bühl Kompetenzzentrum der Bauwirtschaft, 2011). Je leichter der Leichtbeton, desto eher ist die Vorfertigung vorzuziehen, da die Herstellung komplexer und die Mischungen durch den Einsatz mehrerer Zusatzmittel empfindlicher auf Umgebungsbedingungen reagieren. Die Herstellung einer Oberfläche in Sichtbetonqualität ist in stehenden Schalungen einfacher als in liegenden. Baustellenbeton ist in der Regel günstiger, muss aber gleichzeitig auch robuster sein, um bei schwankenden Einbaubedingungen Stand zu halten. Grundsätzlich wird für Leichtbeton eine plastische Konsistenz ebenso wie die Zugabe stabilisierender Zusatzmittel empfohlen, was weitere Herausforderungen an die Verarbeitung als Ortbeton stellt. Gefügedichter LC kann aber grundsätzlich mittels Automastpumpe gepumpt werden (HEIDELBERGCEMENT Group). Wichtig bei Beton ist die vorherige Planung der Haustechnik. Bei LC und ILC ist ein Stemmen der Leitungen nicht empfohlen, da ein nachträgliches Verschließen die Sichtbetonqualität beeinträchtigt, stattdessen sollte die gesamte Haustechnik oder die entsprechenden Leitungen dafür vorher in die Schalung eingelegt werden.

Darüber hinaus bieten generative Fertigungsverfahren (3D-Drucken) Planern und Unternehmen neue Möglichkeiten zur Herstellung passgenauer, frei geformter Bauteile. Am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München sowie am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion werden verschiedene Verfahren des 3-D-Drucks mit dem Werkstoff Beton grundlegend erforscht.

Egal wie der LC und ILC letztendlich hergestellt werden, wichtig ist aufgrund der hohen Bauteilabmessungen die hohe Hydratationswärmeentwicklung, Schwinden und Kriechen zu beachten und ggf. entsprechende Maßnahmen (Verwendung gekühlter Ausgangsstoffe und Zementen mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung, Einsatz schwindreduzierender Zusatzmittel, Verwendung von Wasserretentionsmittel und ausreichende Nachbehandlung) zu ergreifen.

2.5.7 Dauerhaftigkeit

Gebäude müssen in Deutschland zahlreichen Expositionen standhalten. Um eine entsprechende

Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, wird die Umgebung daher in verschiedene Expositionsklassen unterteilt und entsprechende Anforderungen an die Betonzu-sammensetzung und die Höhe der Betondeckung gestellt. So muss die Dauerhaftigkeit durch konstruktive und/oder beton-technologische Maßnahmen gegenüber dem Eindringen schädlicher Stoffe (Chloride, CO_2, Sulfate und Säuren), Frost-Tau-Wechseln und mechanischem Angriff sichergestellt werden. Gefügedichter Leichtbeton enthält bedingt durch die verwendete leichte Gesteinskörnung viele Poren. Diese Porosität ist allerdings nicht gleichbedeutend mit Permeabilität. Für gefügedichten LC sind keine Probleme mit der Dauerhaftigkeit bekannt; vielmehr gilt der Baustoff als beständig und wartungsfrei. Die Dauerhaftigkeit von Infraleichtbeton ist wesentlich von der Gefügedichtheit abhängig und muss immer durch eine Zulassung im Einzelfall nachgewiesen und ggf. zusätzlich durch eine nachträgliche Hydrophobierung gewährleistet werden. Eine Hydrophobierung schützt allerdings nur vor möglichen Feuchte- und chloridinduzierten Schäden. Gasförmiges CO_2 kann weiterhin in den Baustoff eindringen, wo es gelöst in Form von Kohlensäure mit den Bestandteilen des Zements reagiert. Diese Reaktion ist für den Beton selbst unkritisch bzw. wirkt sich sogar positiv auf die Festigkeit von Portlandzement aus, da der entstehende Calcit ein höheres Volumen besitzt als die Ausgangsprodukte. Allerdings ist diese Reaktion mit einer Absenkung des pH-Werts der Porenlösung verbunden. Der hohe pH-Wert der Porenlösung führt aber zur Depassivierung einer innenliegenden Stahlbewehrung und damit zum Schutz vor Korrosion. Folglich ist bei ILC und haufwerksporigem LC entweder ein Nachweis des Carbonaisierungs-widerstands zu führen oder auf die Verwendung korrodierender Bewehrung zu verzichten. Bei dem aktuell ältesten Gebäude aus Sichtbeton, einem von Mike Schlaich entworfenem Wohnhaus in Berlin mit GFK-Bewehrung, existieren keine Dauerhaftigkeitsprobleme und auch die Hydrophobierung musste bisher nicht erneuert werden (Stand April 2018). Leichtbeton ist wegen seiner guten inneren Nachbehandlung mindestens ebenso dauerhaft wie ein entsprechend zusammengesetzter Normalbeton; bei haufwerksporigem Leichtbeton muss, wie bereits erläutert, eine tragende Bewehrung allerdings vor Korrosion geschützt werden (Verzinkung, Einbetten in gefügedichten Beton, Beschichtung). Im Wohnungsbau wird der haufwerksporige LC als auch der ILC daher in der Regel mit nicht korrodierender Bewehrung hergestellt, verputzt, bekleidet (Vorsatzschale) oder mit einer Hydrophobierung versehen.

2.5.8 Strategien für Einfaches Bauen mit Leichtbeton

Als Strategie für Einfach Bauen, bei dem wartungsarme, dauerhafte, ökologische und energieeffiziente Bauweisen im Vordergrund stehen, bietet sich Beton aufgrund der hohen Dauerhaftigkeit, der Nichtbrennbarkeit und der guten Wärmespeichermasse grundsätzlich gut an. Um einer energieeffizienten Bauweise gerecht zu werden, kann Beton grundsätzlich in Kombination mit Wärmedämmmaterialien eingesetzt werden, was aber mit den bekannten Nachteilen der geringen Dauerhaftigkeit und je nach Dämmmaterial auch mit Problemen beim Brandschutz verbunden ist. Leicht- (LC) und Infraleichtbeton (ILC) bieten aber beides: Gute bauphysikalische Eigenschaften bei hoher Dauerhaftigkeit. Das wohl berühmteste Beispiel für

Leichtbeton, das Pantheon in Rom, ist bereits 1900 Jahre alt. Aufgrund der Nichtbrennbarkeit von LC und ILC sind diese Baustoffe beim Brandschutz besonders gut im Rahmen des Einfachen Bauens geeignet. Bauteilanschlüsse müssen immer rauchdicht ausgeführt werden.

Auch beim Luftschall sind sie als sehr gut zu bewerten, da die porige Gesteinskörnung schallbrechend wirkt. Beim Körperschall wäre eine monostoffliche Kombination mit Zementestrich und Stahlbetondecke aufgrund der geringen Kosten sinnvoll. Weiteres Optimierungspotential besteht beim Schallschutz in der Ausbildung der Oberfläche. LC ist ein bewährter Baustoff und bietet sich aufgrund der beliebigen Formbarkeit und der hohen Dauerhaftigkeit gut als einfache Bauweise an. Auch ILC ist bereits in der Praxis erprobt und kann gute Erfahrungen verzeichnen (Hückler, A., Reyher, B.). Folglich kann also auf erprobte, zugelassene Rezepturen mit guten bauphysikalischen und dauerhaften Eigenschaften zurückgegriffen werden.

Insbesondere ILC bietet aufgrund der gegenüber Normalbeton und LC besseren Dämmeigenschaften großes Potential als monolithische und nachhaltige Bauweise. Je nach geforderter Druckfestigkeit, beträgt die Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,14 und 0,20 W/(m · K), womit sich die Energieeinsparverordnung (EnEV 2016) für ein Gebäude mit ca. 50 bis 60 cm Wandstärke über den „Gebäudenachweis“ einhalten lässt. Strengeren Anforderungen können zukünftig mit Wandaktivierungen begegnet werden (Stephan, 2018). Allerdings müssen an dieser Stelle auch die Anforderungen der ENEV 2016 in Frage gestellt werden. So führen stark gedämmte und damit dichte Bauweisen zu Problemen beim Feuchteschutz bzw. erfordern sie den Einbau einer Lüftungsanlage (Einbaukosten > 65/m² Wohnfläche) (Andreas Thaler). Diese gewährt zwar prinzipiell ein behagliches Raumklima, muss aber regelmäßig gewartet werden. Zudem benötigt sie Energie und widerspricht damit dem Gedanken des Einfach Bauens.

Nachteilig bei einer einfachen Bauweise aus ILC sind die hohen Bauteildicken, die mit einem Verlust an Wohnfläche einhergehen. Zudem gilt: Je leichter der Leichtbeton, desto geringer die Festigkeit und desto komplexer die Herstellung. So muss bereits bei der Planung die zeitabhängige Formänderung vorab untersucht werden und schwindreduzierende Zusatzmittel verwendet werden. Bei einem erwarteten Frostangriff sollte eine geschlossene Oberfläche erzielt werden. Da ILC nicht genormt ist, muss eine Bauaufsichtliche Zulassung erfolgen oder idealerweise bereits vorliegen. Bei ILC wird eine Hydrophobierung in Kombination mit einem Dachüberstand als zusätzlichem Schutz vor Schlagregenbeanspruchung empfohlen. Weiteres Optimierungspotential besteht in der Gradierung der Wärmedämmeigenschaften als Werkzeug zur optimalen Materialausnutzung.

2.6 Konstruieren mit Massivholz

2.6.1 Holzmassivbau Allgemeines

Der Holzmassivbau hat sich in der vergangenen Dekade sehr dynamisch entwickelt und zahlreiche Innovationen hervorgebracht. Gleichzeitig ist er aus dem frühen Experimentalstadium nach der Neuentwicklung in den 1990er Jahren herausgetreten und hat einen breiten, kommerziellen Anwendungsbereich sowie notwendige Standardisierungen hervorgebracht. Durch seine Anwendung sind urbane, mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise keine Seltenheit mehr. Mit der Verwendung von großformatigen Wand- und Deckenelement ist die Holzmassivbauweise gleichzeitig rationell und für weitere Einsatzgebiete im Verwaltungs-, Gewerbe- und Sonderbau geeignet, wobei hier der Fokus auf den Wohnbauten liegen soll.

Ziel ist der Einsatz von Massivholz ohne weitere Bekleidungs- oder Funktionsschichten im Innenbereich, im Außenbereich ist ein Witterungsschutz zum Schutz vor Nässe unabdingbar. Im weiteren Verlauf werden die Randbedingungen und notwendigen Maßnahmen zur Erreichung dieses Ziels in der Diskussion geeigneter Konstruktionen von Bauelementaufbauten und ausgewählte Anschlüssen dargelegt.

2.6.2 Wärmeschutz

<u>Wärmeleitfähigkeit</u>

Holz hat als natürlicher Werkstoff trotz seiner hohen Festigkeiten, durch die er in tragenden Anwendungen zum Einsatz kommt, sehr gute wärmetechnische Eigenschaften. Diese sind durch jüngere Untersuchungen nochmals in neuem Licht zu sehen und erschließen ein neues Potential jenseits der normativen Kennwerte und Leistungen. In dem zurückliegenden Forschungsprojekt „Netzwerk Massivblock 20+“ der ARGE Blockhausbau, Salzburg, wurde bei bestehenden Wohngebäuden und einem Testgebäude ein tatsächlicher Heizenergieverbrauch ermittelt, der 35 - 40% niedriger lag als dies nach den Berechnungen gemäß OIB-Richtlinien zu erwarten gewesen wäre (Holzcluster Salzburg, 2014).

Bei früheren Forschungsprojekten hat sich gezeigt, dass bei Holzbauten in Massivholzbauweise der real gemessene Heizenergieverbrauch um 35 bis 40 % unter den Ergebnissen der Wärmebedarfsberechnungen lag. Deshalb wurden die tatsächlichen Holzfeuchten in den Wandaufbauten aus den Monitoringprojekten in den Wintermonaten 2012/2013 und 2013/2014 einem Langzeitversuch gemessen. Das Ergebnis ergab, dass die gemessenen Holzfeuchten im Winter zwischen u = 5,5 % und u = 14,1 % schwankten. Aus den 15 gemessenen Objekten ergab sich über beide Messperioden ein Mittelwert von u = 7,6 %.

Im Anschluss daran wurde das Wärmeleitverhalten von 2 Gruppen mit je 6 Brettsperrholz-Probekörpern (3-lagig, Dicke ca.100 mm) in einem Prüflabor des Instituts für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe der Universität für Bodenkultur Wien mit Hilfe des Einplatten-

Messverfahrens nach EN 12667 untersucht (EN 12667, 2001). Alle Probekörper wurden auf einen Holzfeuchtegehalt von ca. 7,5% vorkonditioniert. Es ergaben sich aus den Messergebnissen ein anderes Bild als der normative Kennwert aus der EN 12524, der bei λ = 0,13 W/mK liegt (EN 12524, 2000). Das Minimum der gemessenen Wärmeleitfähigkeit lag bei λ = 0,0856 W/mK, das Maximum bei λ = 0,0979 W/mK und der Mittelwert der gemessenen 12 Proben lag bei λ = 0,0924 W/mK und somit um 30 % unterhalb es Normwertes. Dies verdeutlicht den Zusammenhang der Holzfeuchte mit der Leitfähigkeit des Materials.

Aufgrund der organischen Struktur hängt die Wärmeleitfähigkeit von Holz linear mit dem Feuchtegehalt zusammen. Zahlreiche normierte λ-Werte beziehen sich auf eine Materialfeuchte, die sich bei einem Klima 23°C und 80% rel. Luftfeuchte einstellt. Für die Nadelholzarten Fichte, Tanne, Kiefer und Lärche ergibt sich unter diesen Bedingungen ein Feuchtegehalt von 16%.

2.6.3 Speichermassen

Massivholz hat eine hohe thermische Speichermasse von c = 1.600 J/kgK, allerdings nur bei einer mittleren Rohdichte von ρ_{atro} = 380 kg/m³ (Festigkeitsklasse C24). Das hat Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf und den thermischen Komfort durch sommerliche Überhitzung. Der sommerliche Wärmeschutz ist dadurch und die oben genannte niedrige Wärmeleitfähigkeit durch reine Holzoberflächen nur schwierig zu gewährleisten, da die Wärmeaufnahme nur sehr langsam stattfindet. An einem realen Testkubus aus Brettsperrholz wurden Untersuchen zur Speicherfähigkeit messtechnisch durchgeführt (Ertl, 2017). Zudem wurde eine Parameterstudie des identisch modellierten Kubus erstellt, die das Simulationswerkzeug WUFI®plus verwendet (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP). Im Ergebnis sind dabei die Effekte auf den Heizwärmebedarf sowie die Überhitzung festgestellt worden.

Die Parameter Rohdichte und spezifische Wärmekapazität wurden dabei variiert und verschiedene Randbedingungen untersucht, darunter der Heizwärmebedarf mit und ohne Nachtabsenkung, dazu die Übertemperaturstunden bei konstantem Luftwechsel sowie bei erhöhtem Nachtluftwechsel, vgl. Abbildung 10. Die Ergebnisse zeigen einen positiven Einfluss bei höherer Rohdichte und spez. Wärmespeicherkapazität, der allerdings geringer ausfällt (nur bis Faktor 1,4) als der Effekt der Reduzierung der Übertemperatur (bis zum Faktor 5) zwischen leichtestem Bauteil mit geringsten Speichervermögen und schwersten Bauteil mit höchstem Speichervermögen.

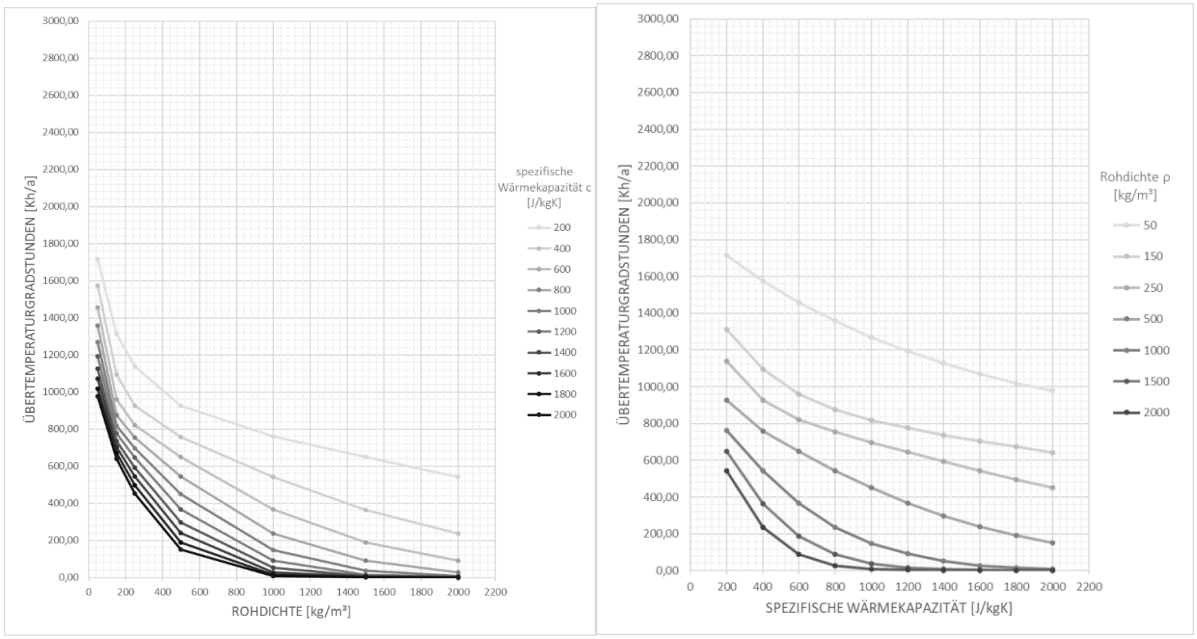


Abbildung 10: Parameterstudie zum Einfluss von Rohdichte und Wärmekapazität auf Übertemperatur-gradstunden (Ertl, 2017)

2.6.4 Brandschutz

Seit Einführung der Musterbauordnung 2002 und der Muster-Richtlinie über brand-schutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHHolzR 2004-07) ist die Errichtung von Gebäuden bis Gebäudeklasse 4 mit tragenden und aussteifenden Strukturen aus Holz ohne bauaufsichtliche Abweichungen möglich geworden (MFHHolzR, 2004). Voraussetzung ist eine „brandschutztechnisch wirksame Bekleidung“ der Holzbauteile mit dem Ziel, eine Beteiligung der konstruktiven Holzbauteile am Brandgeschehen innerhalb der ersten 60 Minuten eines Brandes zu verhindern. Aus Sicht des Brandschutzes sind solche Bauteile daher innerhalb der Schutzzeit gleichwertig mit entsprechenden nichtbrennbaren mineralischen Bauteilen. In Gebäudeklasse 5 bestehen noch Hürden für die Umsetzung von Holzbauten, da hier Anforderungen an die Nichtbrennbarkeit der verwendeten Baustoffe als Regel vorgegeben sind. Sollen Vollholzelemente mit sichtbarer Holzoberfläche und ohne zusätzliche schützende Bekleidung eingesetzt werden, sind die Regeln eindeutig abzugrenzen, die Risiken zu beschreiben und mögliche Lösungen zu skizzieren.

<u>Regulatorische Anforderung</u>

Nach BayBO (2017) Art. 24 Abs. 2 Satz 2 Nr. 2 müssen tragende und aussteifende Teile feuerbeständiger Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen und bei raumab-

schließender Anforderung zusätzlich eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen haben. Dieses Kriterium kann auch mit sichtbaren Holzoberflächen (z.B. Deckenbekleidung einer massiven Stahlbetondecke mit Holz) eingehalten werden. Für tragende sichtbare Holzkonstruktionen hingegen handelt es sich um eine Abweichung entsprechend Abs. 3.2.1. Für feuerbeständige Bauteile werden im Rahmen der Projektbearbeitung die Anforderungen der M-HFHHolzR für hochfeuerhemmende Bauteile als Grundlage herangezogen. Nach BayBO Art. 24 Abs. 2 Satz 2 Nr. 2 sowie entsprechend der M-HFHHolzR, werden im Falle tragender und aussteifender brennbarer Bauteile eine allseitig brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen sowie Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen gefordert.

Ausführung sichtbarer Holzoberflächen

Tragende Massivholzdecken sowie lineare Holzbauteile (Stützen/Träger) sollen innerhalb einzelner Räume bzw. Nutzungseinheiten mit sichtbaren Holzoberflächen ausgeführt werden können. Mit nicht brennbaren Dämmstoffen vollausgedämmte Rippen- oder Balkendecken werden unterseitig mit einer brennbaren Schutzbekleidung (sichtbare Holzoberfläche) ausgeführt.

Es liegt somit eine materielle Abweichung entsprechend BayBO Art. 63 Abs. 1 von den Anforderungen aus BayBO Art. 24 Abs. 2 Satz 2 Nr. 2, außerdem aufgrund der Abweichung von der M-HFHHolzR eine Abweichung von BayBO Art. 3 Abs. 2 vor.

Durch die Verwendung brennbarer Bauteiloberflächen ist eine Beteiligung am Brandgeschehen zu erwarten. Es darf trotz der brennenden Bekleidungslage bzw. Bauteiloberfläche keine Brand- und Rauchweiterleitung, weder im Bauteil noch im weiteren Verlauf über die Grenzen von Nutzungseinheiten hinweg, über den notwendigen Schutzzeitraum erfolgen. Grundsätzlich darf durch die gewählte Bauweise keine Verschlechterung der Möglichkeit zur Durchführung wirksamer Löscharbeiten eintreten.

2.6.5 Schallschutz

Grundlage für den Schallschutz ist die DIN 4109, die 2016 grundlegend überarbeitet wurde. Der Teil 1 und Teil 2 von 2016 wurden nochmals überarbeitet und im Januar 2018 neu herausgegeben. Das bauaufsichtlich nicht eingeführte Beiblatt 2 zur DIN 4109 enthält Vorschläge zum erhöhten Schallschutz. Die Schallschutzstufen I, II, III nach VDI 3. 4100:2012-10 sind im Einzelfall privatrechtlich relevant und ihre Einforderung muss vertraglich festgehalten sein.

Nutzer bzw. Bewohner empfinden bei gleichem, nach Norm gemessenem Normtrittschallpegel schwere massive Decken als deutlich besser gegenüber leichten Holzbalkendecken. Normgemäß werden beim Trittschall nur die Frequenzen zwischen 100 und 3.150 Hz gemessen und bewertet. Durch das Begehen und Stühle rücken etc. werden aber Geräusche erzeugt, die vorrangig im Frequenzbereich zwischen etwa 50 bis 200 Hz liegen. Eine gute Decke sollte also

gerade in diesem Frequenzbereich gut dämmen. Bei gleichem Fußbodenaufbau, Zementestrich auf Mineralfasertrittschallschutzmatte, ist der Norm-trittschallpegel in diesem niedrigen Bereich bei Massivholzdecken etwa 5 dB besser als bei Holzbalkendecken. Die einzelnen Frequenzbereiche werden unterschiedlich stark gedämmt. Hohe Frequenzen werden gut durch Entkopplung und Hohlraumdämpfung gedämmt, tiefe Frequenzen, die bei üblicher Nutzung einer Geschossdecke dominieren, mehr durch Masse.

Luftschalldämmung

Gemäß DIN 4109, Abschn. 6.4.1a ist bei bewerteten Schalldämm-Maßen R_w von Wänden und Decken zwischen dem Prüfstandswert $R_{w,P}$ und dem für den Verwendungszweck erforderlichen Rechenwert des Bauteils $R_{w,R}$ ein Vorhaltemaß von 2 dB zu berücksichtigen.

Im eingebauten Zustand muss das jeweilige Bauteil den Anforderungswert erf. R'_w einhalten. Hierbei sind die Einflüsse angrenzender (flankierender) Bauteile auf die Schalldämmung zu berücksichtigen - wie in den Nachweisverfahren gem. DIN EN 12354 erläutert. Der bauliche Schallschutz in Bezug auf die Luftschalldämmung, d.h. die schalltechnische Eignung des jeweiligen Bauteils ist unter folgender Bedingung erfüllt:

$R_{w,R}$ abzüglich Korrekturen von Flankenübertragungen am Bau ≥ erf. R'_w

Die Flankenübertragungen am Bau hängen besonders im Leicht- und Holzbau von der jeweiligen Einbausituation des Trennbauteils, d.h. von den Anschlüssen des Trennbauteils an die flankierenden Bauteile ab und können entsprechend variieren.

Trittschalldämmung

Die gemessene Trittschalldämmung von Decken im Prüfstand mit unterdrückter Flankenweg-übertragung wird durch den bewerteten Norm-Trittschallpegel ohne Flankenübertragung Ln,w,P gekennzeichnet. Die Trittschalldämmung für unter Baustellenbedingungen errichteten Decken wird, zunächst ohne Berücksichtigung von Flankenübertragungen, durch den Rechenwert L n,w,R gekennzeichnet. Am Bau tritt zusätzlich eine Schallübertragung über die flankierenden Bauteile (i.d.R. Wände) auf. Im eingebauten Zustand muss die Decke den für den Verwendungszweck erforderlichen Wert erf. L‘ n,w einhalten.
Für diese Unterscheidungen sind entsprechende Korrekturwerte erforderlich.

- Korrektur zur Ermittlung des allein auf die Decke bezogenen Rechenwertes Ln,w,R aus dem Prüfstandswert Ln,w,P der unter günstigen Laborbedingungen hergestellten Decke
- Korrektur zur Ermittlung des Rechenwertes L‘n,w,R der Decke am Bau unter Berück-sichtigung der Einflüsse angrenzender (flankierender) Bauteile auf die Trittschall-dämmung aus dem Rechenwert Ln,w,R ohne diese Einflüsse.

Der bauliche Schallschutz in Bezug auf die Trittschalldämmung, d.h. die schalltechnische Eignung des jeweiligen Bauteils ist unter folgender Bedingung erfüllt:

Ln,w,P zuzüglich o. g. Korrekturwerte ≤ erf. L‘n,w

Vollholzelemente

Die Rohelemente aus Vollholz können weder als biegesteif (Stahlbetonscheiben) noch als biegeweich (Holztafelelemente) eingestuft werden. Durch entsprechende Fußbodenaufbauten können die Anforderungen an den erhöhten Schallschutz trotzdem erfüllt werden. Wände müssen gegebenenfalls durch Vorsatzschalen ertüchtigt werden.

Für die Planung heißt das, dass Aufbauten konsequent nach dem Masse-Feder-Masse Prinzip aufgebaut werden müssen. Ein schwimmend verlegter Estrich ist biegeweich und muss auf einer möglichst weichen Trittschalldämmung verlegt werden, deren dynamische Steifigkeit s‘ ≤ 10 MN/m³ beträgt. Weiterhin ist die fehlende Masse durch Schüttungen oder aufgeklebte Betonplatten mit ρ ≥ 1300 kg/m³ auszugleichen. Wenn die Massen auch noch dämpfen, wie bei latexgebundene Kiesschüttungen, ist es ideal und Schichthöhen deutlich über 100 mm sowie Estrichstärken über 50 mm ermöglichen den Verzicht auf Unterdecken.

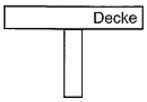
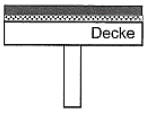
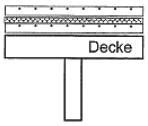
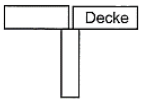
Skizze	Decke	Wand	Messwerte für l_{lab} = 4,30 m, $S_{S,lab}$ = 11,8 m²
	160 mm BSP	80 mm BSP	$R_{Ff,w}$ = 44 dB $R_{Fd,w}$ = 50 dB $R_{Df,w}$ = 50 dB
	50 mm ZE 40 mm MFT 160 mm BSP	80 mm BSP	$R_{Ff,w}$ = 46 dB $R_{Fd,w}$ = 50 dB $R_{Df,w}$ = 50 dB
	50 mm ZE 40 mm MFT 60 mm Splitt 160 mm BSP	80...140 mm BSP	$R_{Ff,w}$ = 61 dB $R_{Fd,w}$ = 55 dB $R_{Df,w}$ = 55 dB
	160 mm BSP getrennt	80...140 mm BSP	$R_{Ff,w}$ = 50 ... 54 dB $R_{Fd,w}$ = 51 ... 53 dB $R_{Df,w}$ = 51 ... 53 dB
		2 x 18 mm GF 80...140 mm BSP 2 x 18 mm GF	$R_{Ff,w}$ = 54 ... 58 dB $R_{Fd,w}$ = 58 ... 60 dB $R_{Df,w}$ = 58 ... 60 dB

Abbildung 11: Messwerte für das Flankendämmmaße $R_{Ff,w}$ $R_{Fd,w}$ und $R_{Df,w}$ einer flankierenden Sperrholzdecke (Rabold, 2017)

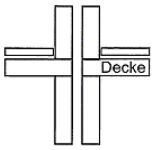
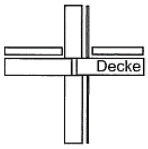
Skizze	Trennbauteil	Maßgebliche Flankenbauteile
	Haus-trennwand	• Trennfuge im ganzen Gebäude durchgehend • Im DG: $R_{Ff,w}$ des flankierenden Dachs beachten • Im EG: $R_{Ff,w}$ der flankierenden Kellerdecke beachten
	Wohnungs-trennwand	• $R_{Ff,w}$ der flankierenden Decke beachten. Decke auf Trennwand nach Möglichkeit trennen, Rohdeckenbeschwerung m' ≥ 120 kg/m² oder Unterdecke • Im DG: $R_{Ff,w}$ des flankierenden Dachs beachten • Im EG: $R_{Ff,w}$ der flankierenden Kellerdecke beachten

Abbildung 12: Anschlusssituationen und Ausführungshinweise für flankierende Massivbauteile (Rabold, 2017)

Elastische Lagerung von Fügungspunkten

Sind keine entkoppelten Vorsatzschalen oder Unterdecken gewünscht sollten die Decken auf elastischen Lagern auf den Wänden aufgelagert werden. Die Elastomerlager benötigen keine besonderen schalltechnisch optimierten Befestigungen, dies haben Messungen ergeben. In Bezug auf die flankierende Luft- und Trittschallübertragung sind relevante Verbesserungen durch Einsatz der elastischen Lager erreichbar (z.B. 6 dB beim Trittschall und 8 dB beim Luftschall).

Auch insgesamt können dadurch je nach Fügungssituation Verbesserungen der Luft- und Trittschalldämmung erreicht werden. Beim Trittschallschutz im Holzbau ist jedoch anzumerken, dass auch bei Einhaltung der öffentlich-rechtlichen Anforderungswerte je nach Verhalten der Decken im tieffrequenten Bereich unter 100 Hz Trittschallgeräusche durch Bewohner häufig als besonders belästigend empfunden werden. Bei Einbeziehung des tieffrequenten Bereiches unter 100 Hz können durch die elastischen Lager teilweise deutlich geringere Verbesserungen bzw. keine Verbesserungen eintreten.
Bei unterseitig sichtbarer Holzdecke sind die Lager nur oberhalb der Decke anzuordnen. Für die Decke mit einem Aufbau aus dicker Splittschüttung, weicher Trittschalldämmung und dickem Estrich ist ein Luftschalldämmmaß von $R_w \geq 65$ dB und ein Trittschallpegel von $L_{n,w} \leq 47$ dB erreichbar, sofern Trennwände und Decken durch Elastomerlager getrennt sind.

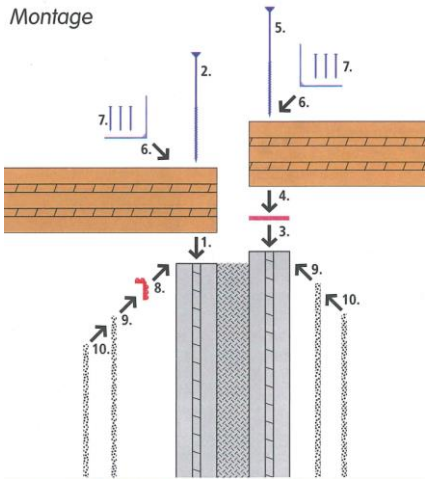


Abbildung 13: Positionierung des entkoppelnden Schalldämmelements (rot) in der Montagefolge (Borsch-Laaks et al., 2018)

2.6.6 Feuchteschutz

Der Feuchteschutz von Holzbauteilen durch konstruktive Maßnahmen ist in der DIN 68800 Teil 1 und Teil 2 geregelt (DIN 68800-1, 2011), (DIN 68800-2:2012-02, 2012). Sie regelt die Verwendbarkeit von Hölzern und teilt sie in Gebrauchsklassen (GKL) ein. Für die Zuordnung der natürlichen Dauerhaftigkeit von Hölzer nach der Klassifikation der DIN EN 350 siehe den nachfolgenden Abschnitt 2.6.8. Als wesentliches Kriterium ist in DIN 68800 die maximale Holzfeuchte von u = 18 % festgelegt, die deutlich unter dem Fasersättigungsbereich (FSB) ist, der bei den meisten einheimischen Hölzern zwischen 22 und 35 % liegt (Niemz, 2005). Der FSB von Nadelhölzern ohne Farbkern, wie z.B. Fichte, beträgt zwischen 30 und 34 %, bei zerstreutporigen Laubhölzern ohne Farbkern, wie z.B. Buche, liegt dieser zwischen 32 und 35 % (Trendelenburg, 1955). Im hygroskopischen Bereich unterhalb des FSB treten bei Änderung der Holzfeuchte Form- und Volumenänderungen des Querschnittes in Form von Schwinden und

Quellen auf. Damit ist ein ausreichender Sicherheitsabstand gegeben, ab dem Holz wesentlich an Festigkeit verliert und biologische Schadensmechanismen massive und schnell fortschreitende Schäden verursachen.

Luftdichtheit

Die Dichtheit von Massivholzelementen gegenüber Diffusion und Konvektion ist durch die vollflächige Verklebung der Lagen oder durch mehrfaches Verschränken der Brettquerschnitte gegeben. Eine vollständige Luftdichtheit in der Plattenfläche ist nur durch die zusätzliche Schmalseitenverklebung aller Lagen bei den dreischichtigen Aufbauten gegeben. Ab 5-schichtigen Aufbauten ist die Schmalseitenverklebung der Decklagen ausreichend. Die NurHolz Elemente mit genagelten Brettlagen wurden bei einer Dicken von 185 mm geprüft und weisen laut Prüfzeugnis, einen Luftdichtheitswert von q_{50} = 0,59 [m³/m²·h] aus. Dieser Wert ist als sehr gut für das Bauteil zu bewerten, da bei Klasse A ein q_{50} = 1 [m³/m²·h] verlangt wird.

Somit ist mit Konvektion lediglich an den Stoßstellen der Elemente und an den notwendigen Durchdringungen von Fenstern und Türen ein mögliches Risiko. Hier ist auf die Ausführung der Anschlüsse nach dem aktuellen Stand der Technik zu achten (Tietze *et al.*, 2017), (RAL, 2016), (Jehl and Benitz-Wildenberg, 2014).

Diffusion kommt bei nahezu allen Baustoffen in bestimmten Umfang vor in Abhängigkeit vom materialspezifischen Diffusionskoeffizienten und der Schichtdicke. Durch die Diffusion kommt es zu Feuchtetransport im Material von der Seite mit hohem zur Seite mit niedrigem Partialdampfdruck, was in den Wintermonaten durch den Antrieb der Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenklima gegeben ist. Aufgrund der Isothermenverteilung mit niedrigen Temperaturen in den äußeren Randbereichen des Bauteils kann es dort zu Kondensation der Porenluftfeuchte und zur Anreicherung von Feuchte kommen, die kurzzeitig über den in der DIN 68800-1 genannten Grenzen für die Holzfeuchte liegen. Bei diffusionsoffenen Rand- bzw. Bekleidungsschichten findet in den Sommermonaten ein Rücktrocknungsprozess statt, bei dem die Feuchte wieder deutlich abgesenkt wird.

Feuchtebelastung dicker Vollholzwände

Bei Holzmassivwänden in großen Dicken wurden im Bericht zum Forschungsprojekt „Untersuchung zeitgemäßer, monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Eigenschaften“ der TU Kaiserslautern, bereits die entsprechenden Randbedingungen ausführlich dargelegt, darin werden auch Bedenken hinsichtlich der Feuchtesicherheit von sehr dicken Holzmassivwänden geäußert (Tersluisen *et al.*, 2017). Dies geht auf deren Ergebnisse aus hygrothermischen Simulationen mit WUFI® zurück. Der

Feuchtegehalt der untersuchten 550 mm dicken Wände, über 20 Jahre, ergab jeweils in den Wintermonaten einen erhöhten Feuchtegehalt von um die 21,5 % ohne jährlichen Zuwachs. Damit wird das Kriterium der Norm nicht eingehalten. Allerdings fällt die Holzfeuchte im Sommer um den sehr hohen Betrag 15,5% bis zum Wert von 6 % ab, was als extrem niedrig einzustufen ist. Bei diesem niedrigen Wert kann es zu keinen fortschreitenden biologischen Zerfallsprozessen kommen. Bei hohen Feuchtewerten im Winter sind nur unter bestimmten Umständen Zerfalls-prozesse oder Schimmelwachstum möglich, wenn die Temperaturen hoch genug sind, um die biologischen Schadensmechanismen zu befördern, d.h. um Pilzwachstum zu ermöglichen und wenn gleichzeitig der erhöhte Feuchtezustand lange genug vorhält.

Zusätzlich ist anzumerken, dass der im Bericht vorgestellte Wandaufbau außenseitig als äußerst riskant einzustufen ist. Die sehr dünne Holzweichfaserplatte hat hohe Feucht-aufnahmekapazität wenn der Putz rissig werden sollte. Außenseitig wird dadurch wenig bis gar nichts von einer Auffeuchtung zu sehen sein. Die Feuchte wird von der Holzweichfaserplatte weiter bis zu tragenden Konstruktion transportiert werden und dort können unbemerkt Schäden entstehen. Eine mögliche Verfärbung der tragenden Massivholzwand durch erhöhte Feuchtigkeit raumseitig ist aufgrund ihrer Dicke sehr spät zu erwarten.

Holzkonstruktionen unterliegen einer Vielzahl von biotischen und abiotischen Wirkstoffen, die zu Abbau und Zerstörung führen können (Brischke and Meyer-Veltrup, 2016). Der häufig als Schädigungsindikator genannte Schimmelpilzbefall ist nur bedingt aussagekräftig, auch wenn Schimmelwachstum auf erhöhte Holzfeuchte im Material hindeutet. Schimmelpilze an sich sind nicht holzzerstörend. Die Gefahr durch Schimmelsporen besteht in der Kontamination der Raumluft. Sie sind somit nur auf der Raumseite als kritisch einzustufen, weil sie die Bewohner aufgrund zu hoher Konzentration bzw. durch spezifische humantoxische Sporen negativ beeinträchtigen können. Das Wachstum von Pilzen kann durch verschiedene Modelle vorher-gesagt und durch Bewertungsmodelle in ihrer Gefährdungspotential eingestuft werden. Eines der ältesten und immer noch verwendeten Modelle ist von Viitanen (Viitanen and Ritschkoff, 1991). Ein aktuell in deutschsprachigen Raum häufig verwendetes Pilzwachstumsmodelle ist in der Dissertation von Sedlbauer behandelt (Sedlbauer, 2001). Darin wird das Wachstum in Abhängigkeit von zum Wachstum notwendiger Feuchte aus dem Holzfeuchtegehalt, der Umgebungstemperatur und dem vorliegenden Substrat in sogenannten Isoplethenkurven abgebildet, vgl. Abbildung 14. Dazu gibt es eine Implementierung des Modells in die hygrothermische Simulationssoftware WUFI, das sogenannte WUFIBio, (Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2017). Dieses sogenannte biohygrothermische Modell ist allerdings spezifisch für das Schimmelwachstum im Innenraum und mit für den Menschen gefährlichen Pilzarten ausgelegt. Für Schimmelpilz-wachstum kann alternativ auch das Mould Resistance Design (MRD) Modell verwendet werden (Thelandersson and Isaksson, 2013).

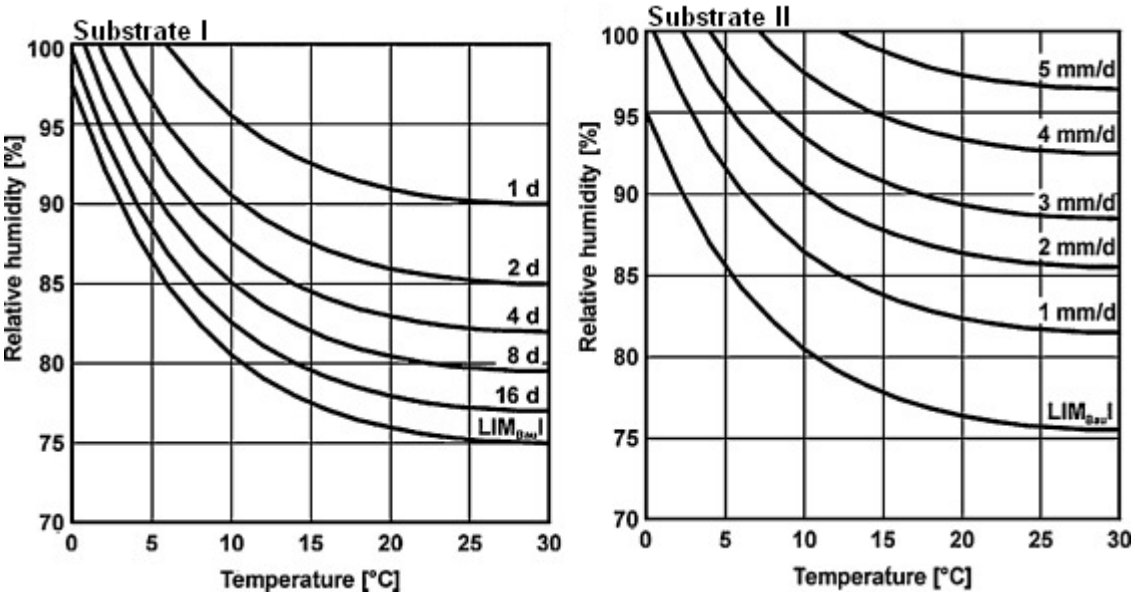


Abbildung 14: Isoplethenkurven zur Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Bauteiloberfläche im Gebäudeinneren auf unterschiedlichem Substrat I und II (Sedlbauer, 2001).

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Materialgrundlagen von drei wichtigen Schimmelmodellen (Tietze et al., 2017).

VTT			**IBP**			**MRD**	
Sensitivity Class	Materials	Min RH	Substrate	Materials	Min RH		Min RH
			0	Optimal culture medium	70 %		
Very Sensitive	Pine sapwood	80 %	1	Biodegradable building materials	76 %	Spruce and Pine (Original and Planed)	75 %
Sensitive	Glued wooden boards, PUR with paper surface, spruce	80 %					
Medium resistant	Concrete, aerated and cellular concrete, glass wool, polyester wool	85 %	2	Building materials containing some biodegradable compounds	79 %	Modified variety of wood	75 %
Resistant	PUR polished surface	85 %	3	Non-biodegradable building materials without nutrients	80 %		

Tabelle 5: Bewertung des Schimmelwachstums und deren Kriterien (Tietze et al., 2017).

<table>
<tr><td colspan="4">Categorization of degree of mould according to three selected mould models</td><td colspan="3">Assessment criteria</td></tr>
<tr><td colspan="2">VTT</td><td>MRD</td><td>IBP</td><td>WUFI-Bio</td><td colspan="2">Traffic Light</td></tr>
<tr><td>VTT Index</td><td>Description of the growth rate</td><td></td><td>MG [mm]</td><td></td><td>Interior</td><td>Interfaces</td></tr>
<tr><td rowspan="2">0</td><td>No growth</td><td></td><td>0</td><td rowspan="2">Usually acceptable</td><td rowspan="2">Acceptable/ Green light</td><td rowspan="4">Acceptable/ Green light</td></tr>
<tr><td>50</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>1</td><td>Small amounts of mould surface (microscope), initial stages of local growth</td><td>Onset of mould</td><td>130</td><td rowspan="3">Additional criteria or investigations required to assess acceptability</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Several local mould growth colonies on surface (microscope)</td><td></td><td>175</td><td>Yellow traffic light</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td>200</td><td colspan="2"></td><td rowspan="5">Usually not acceptable</td><td rowspan="5">Unacceptable/ Red light</td></tr>
<tr><td>Visual findings of mould on surface, <10% coverage, or <50% coverage of mould (microscope)</td><td></td><td>238</td><td>Yellow traffic light</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Visual findings of mould on surface, 10 - 50 % coverage, or >50% coverage of mould (microscope)</td><td></td><td>335</td><td rowspan="3">Unacceptable/ Red light</td></tr>
<tr><td>5</td><td>Plenty of growth on surface, > 50% coverage (visual)</td><td></td><td>450</td></tr>
<tr><td>6</td><td>Heavy and tight growth, coverage about 100%</td><td></td><td>575</td></tr>
</table>

Holzfäule (Weiß- oder Rotfäule) ist einer der mikrobiologischen Zerstörungsprozesse an Holz, der zu Veränderungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Holz führt und folglich die Steifigkeit, Festigkeit und andere Widerstandseigenschaften von Holz verringert (Eaton and Hale, 1993). Wenn Holzfäule auftritt, ist die Gebrauchstauglichkeit der Tragstruktur aber auch der bauphysikalischen Funktionen teilweise beeinträchtigt, bis hin zum völligen Versagen. Für die Holzfäule existieren kaum Modelle, die auch noch im experimentellem Stadium sind (Isaksson *et al.*, 2013). Insofern ist es geboten mit dem bekannten Holz-feuchtekriterium zu arbeiten, das eine zuverlässigere Vorhersage ermöglicht.

Insgesamt ist festzuhalten, dass es aufgrund der Diffusionsoffenheit des Werkstoffes und bei Einhaltung der Regeln der DIN 68800-1 und -2 genug Rücktrocknungspotential vorhanden sein sollte. Außerdem können viele historische aber auch jüngere Holzbauten beobachtet werden, deren Querschnitte sogar teilweise in Nutzungsklasse II oder frei bewittert sind und die außer Rissen oder den Auswaschungen und Abwitterungen der oberen Faserschichten selbst nach Jahrzehnten keine Fäule im Holz aufweisen. Lediglich horizontale Hölzer im Bereich von

Schwellen, Brüstungen oder vorstehenden Kanten und mit ungeschütztem Hirnholz können durch langanhaltende Witterungsbeanspruchung ansteigende Durchfeuchtung bis zur Fäulnis aufweisen. Dies kann durch Langzeitmessung an Buchenbrettschichtholz, das in der NKL II eingesetzt wurde bestätigt werden (Knorz *et al.*, 2016). Buche selbst ist nach EN 350-2 in die Klasse 5 als nicht dauerhaft gegen holzzerstörende Pilze eingestuft. Die untersuchten Bauteile weisen zwar Risse auf, die allerdings in keiner Weise die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen. Außerdem sind keinerlei Spuren von Schimmelwachstum oder Fäul-nisentwicklung zu beobachten, obwohl in den Wintermonaten im Trägerrandbereich die Holzfeuchte Werte über 25 % erreichte, danach aber wieder austrocknen. Eine ähnliches Verhalten aber mit weniger hohen Holzfeuchten bis zu maximal 16 % wurde bei der Untersuchung an Nadelholzbindern in kritischen, feuchtwarmen Hallenklimata (Eishallen, Schwimmbäder) festgestellt (Gamper *et al.*, 2015).

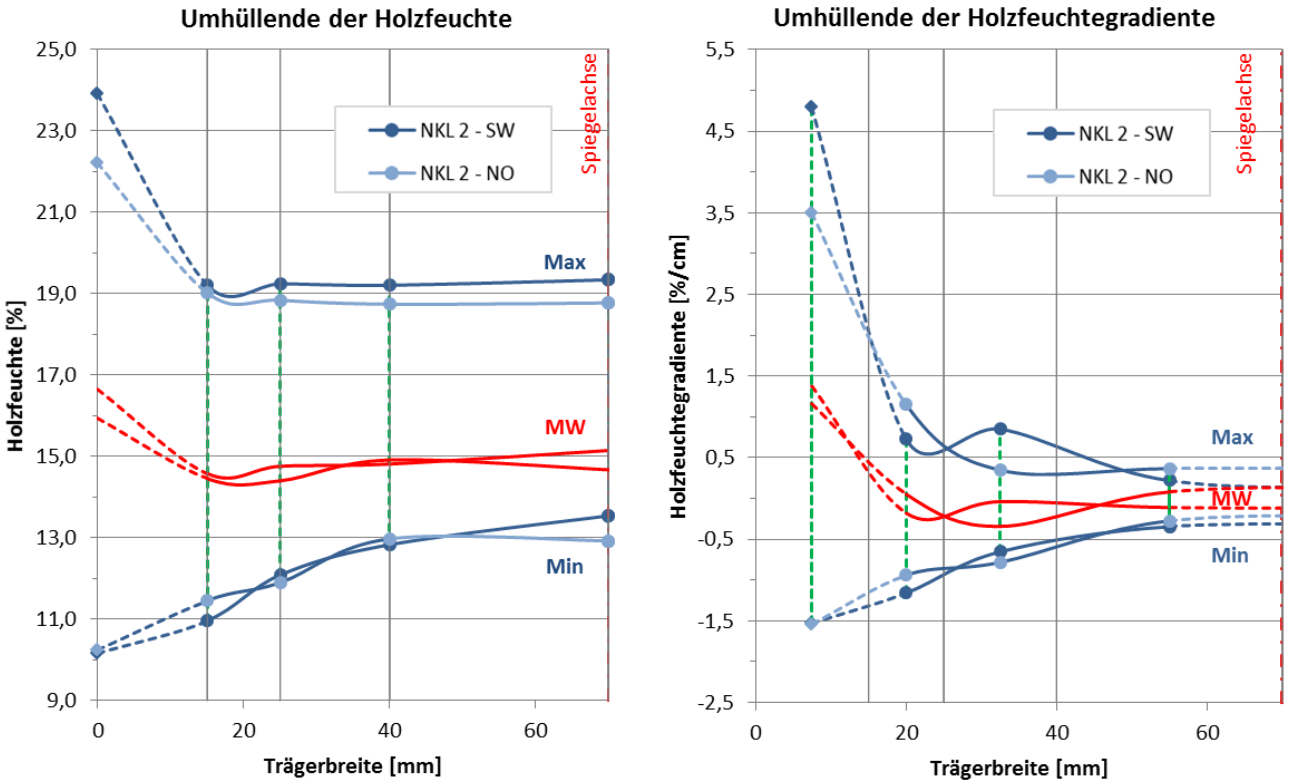


Abbildung 15: Gegenüberstellung der Umhüllenden der Holzfeuchte (links) und Holzfeuchtegradiente (rechts) über den Querschnitt des Tragwerks in NKL 2 im Süd-Westen und Nord-Osten des Gebäudes (Knorz et al., 2016).

Somit kann für dicke Massivholzbauteile zwar noch keine Unbedenklichkeit ausgesprochen werden, es muss vielmehr der Effekt, der sich in der thermischen Simulation im Vorhaben der TU Kaiserslautern ergeben hat, nochmals genauer untersucht werden (Tersluisen *et al.*, 2017). Dazu sollte mit grundlegenden Simulationen in WUFI der Sachverhalt untersucht werden sowie in

Folgeprojekten bei der Realisierung von Forschungsgebäuden ein geeignetes Feuchte-monitoring dieser dicken, massiven Holzaußenwände realisiert werden, um auch im Feldtest validierte Aussagen treffen zu können.

2.6.7 Tragwerk

Massivholzelemente aus Brettsperrholz sind spezielle, ebene Holzbauteile, die aus mindestens drei Schichten Weichholzbrettern bestehen. Benachbarte Schichten sind im Winkel von 90 ° miteinander verklebt. Der Querschnittsaufbau der Elemente ist symmetrisch. Der Begriff Symmetrie bezieht sich nur auf die Tragfähigkeit: Geometrie (Faserrichtung der Längs- und Querlagen) und Festigkeit des eingesetzten Holzes (Sortierung und Klassifizierung). Die Elemente sollen als tragende und / oder versteifende oder nicht tragende Wand-, Decken- / Boden-, Dach- und Sonderbauteile für Holzkonstruktionen verwendet werden. Zum Aufnehmen und Übertragen von Lasten können diese sowohl senkrecht zur Elementebene als auch in der Elementebene beansprucht werden. Bretter sind visuell oder maschinell sortiert. Nur technisch getrocknetes Holz darf verwendet werden. Es dürfen nur Bretter verwendet werden, die auf beiden Seiten der Außenschicht gehobelt sind. Die einzelnen Bretter können durch Keilzinkung nach EN 385 in Längsrichtung verleimt werden. Stoßfugen sind nicht zulässig.

Vollholzelemente, insbesondere massive in kreuzweisen Lagen verklebte oder genagelte Brettsperrholzelemente sind sehr druck- und schubfest, vgl. Tabelle 6. Die Widerstandswerte aus den Zulassungen liegen weit über den Einwirkungen der Flächenpressung am unteren Auflager, selbst bei bis zu achtgeschossigen Wohnungsbauten in Gebäudeklasse 5.

Tabelle 6: Einwirkung Druck in Richtung der Decklagen bei unterschiedlichen Deckenkonstruktionen. Widerstandwerte von Brettsperrholz RD= 9692 kN/m², Luftkammer-Holz RD= 7846 kN/m²

		BSP-Decke [kN/m²]			**HBV-Decke [kN/m²]**			**StB-Decke [kN/m²]**		
	Geschoßzahl	**1-3**	**4-6**	**7-8**	**1-3**	**4-6**	**7-8**	**1-3**	**4-6**	**7-8**
A	Vollholz d= 270 mm (U < 0,35 W/m²K)	556,97	1227,30	1674,19	735,60	1566,70	2120,77	1145,97	2387,45	3215,10
	Vollholz d= 400 mm (U < 0,24 W/m²K)	411,01	898,54	1223,56	531,58	1127,63	1525,00	808,59	1681,64	2263,67
	Vollholz d= 620 mm (U < 0,15 W/m²K)	303,44	656,25	891,46	381,23	804,05	1085,94	559,94	1161,48	1562,50
B	Luftkammer-Holz d = 230 mm (U < 0,28 W/m²K)	1125,47	2492,91	3404,53	1506,73	3217,31	4357,69	2382,63	4969,10	6693,42
	Luftkammer-Holz d= 300 mm (U < 0,22 W/m²K)	901,81	1989,12	2713,99	1194,11	2544,49	3444,75	1865,63	3887,54	5235,48

Massive Vollholzelemente aus kreuzweise verbundenen Lagen, Variante A

Brettsperrholz oder Vollholz genagelt, Wanddicke von 270, 400 mm bis zu 620 mm (siehe Tabelle in Kapitel 4).

Tabelle 7: Kennwerte für Vollholzwandelemente (geklebtes BSP, genageltes BSP) nach Zulassungen der diversen Hersteller

Leistungsmerkmal	**Nachweisverfahren**	**Klasse / Nutzungkategorie / Zahlenwert**
$f_{c,0,k}$	EN 338	21 MPa
Festigkeitsklasse:	EN 338	C24
Dauerhaftigkeit: Nutzungsklasse	EN-1995-1-1	I und II
Lambda		0,095 – (0,11) W/mK
Wärmetechnischer Bemessungswert in ()		

Massive Vollholzelemente aus vertikalen Blockhölzern mit schmalen Luftkammern, Variante B

Die Vollholzelemente mit Luftkammern werden von der Firma HRW-Vollholzwandsysteme hergestellt (Reßle, 2018). Es sind stehende, press gestoßene Blockquerschnitte, die parallel zur Faser mit schmalen Rechteckkerben geschlitzt sind. Durch die Luftkammern wird die Wärmeleitfähigkeit verringert. Die Wände aus Blöcken sind auf Vorder- und Rückseite mit querliegenden Decklagen vollflächig verklebt, die zusätzlich auch schmalseitenverklebt sind. Damit werden schubsteife (Wand-) Scheiben ausgebildet, die auch luftdicht sind. Vertrieben werden zwei Wandstärken von 230 und 300 mm. Die dünnere Wand entspricht den Vorgaben der EnEV 2014 mit einem U-Wert von 0,28 W/m²K.



Abbildung 16*: Vollholzelemente aus Blockständern mit Luftkammern* (Reßle, 2018)*.*

Tabelle 8: Kennwerte für Vollholzwandelemente mit Luftkammern zur Verbesserung der Dämm-eigenschaften nach Zulassung und Prüfzeugnissen des Herstellers (Reßle, 2018).

Leistungsmerkmal	**Nachweisverfahren**	**Klasse / Nutzungkategorie / Zahlenwert**
$f_{c,0,k}$	EN 338	17 MPa
Festigkeitsklasse:	EN 338	C16
Dauerhaftigkeit: Nutzungsklasse	EN-1995-1-1	I und II
Lambda		0,07 W/mK

Als weitere Variante zu geklebten und genagelten Vollholzelementen sind die mit Buchenholzschrauben verbundenen kreuz- und diagonallagigen Wandelemente der Fa. Rombach „NURHolz“ zu nennen. Sie wurden beispielsweise beim Projekt „WoodCube“ in Hamburg eingesetzt (DeepGreen, 2018).

Feuchteeinflüsse auf die Holzfestigkeit

Die Feuchte von Holz spielt auch bei der Bemessung eine Rolle, da Feuchte die Festigkeitseigenschaften verändert und hohe massebezogene Feuchteanteile die Festigkeit verringern. Die im Bauwesen üblicherweise verwendeten Hölzer und ihre Einsatzgebiete werden in Abhängigkeit von der Feuchtebeanspruchung klassifiziert. Die DIN 1052:2008-12 bzw. DIN EN 1995-1-1:2010-12 regelt zudem die Anwendbarkeit von Hölzern in klimaabhängigen Nutzungsklassen wie in Tabelle 9 zu sehen ist.

Tabelle 9: Nutzungsklassen nach Eurocode 5 / DIN EN 1995-1-1 Abschn. 2.3.1.3

			entspricht etwa	
Nutzungs-klasse	**Klimabedingungen**	**Anwendungsbereiche**	**U [%] (1)**	**GK (2)**
I	Die Nutzungsklasse 1 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur	in allseitig geschlossenen und beheizten Bauwerken	5-15	GK 1

	für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 65 % übersteigt.			
II	Die Nutzungsklasse 2 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr einen Wert von 85 % übersteigt. ANMERKUNG In Nutzungsklasse 2 übersteigt der mittlere Feuchtegehalt der meisten Nadelhölzer nicht 20 %.	bei überdachten offenen Bauwerken)*	10-20	GK 2
III	Die Nutzungsklasse 3 erfasst Klimabedingungen, die zu höheren Feuchtegehalten als in Nutzungsklasse 2 führen.)*	für Konstruktionen, die der Witterung ausgesetzt sind	12-24	GK 3.2
)* Hinweise aus dem Nationalen Anhang zu: - 3.2 Vollholz Keilgezinktes Vollholz darf nur in den Nutzungsklassen 1 und 2 verwendet werden. - NCI NA.3.8 Balkenschichtholz Balkenschichtholz darf nur in den Nutzungsklassen 1 und 2 verwendet werden. - NCI NA.11 „Geklebte Verbindungen“, Universal-Keilzinkenverbindungen von Brettschichtholz und Balkenschichtholz Brettschichtholz und Balkenschichtholz mit Universal-Keilzinkenverbindungen darf nur in den Nutzungsklassen 1 und 2 verwendet werden.			(1) zu erwartende Gleichgewichts-feuchte im Holz (2) Gebrauchsklassen DIN 68800-1	

Mit zunehmender Feuchtigkeit:

- sinkt die Festigkeit des Holzes bis zum FSB
- steigt die Kriechverformung von Holz bei Langzeitbelastung,
- steigt die Wärmeleitfähigkeit des Holzes (auch über den FSB hinaus),
- steigt die Anfälligkeit gegenüber holzzerstörenden Pilzen (insb. über dem FSB).

Der Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Holzeigenschaften begründet sich durch den strukturellen Aufbau des Holzes und macht sich wie folgt bemerkbar, vgl. Abbildung 17.

Vollholzelemente sind einsetzbar in Nutzungsklasse I und II sofern keine anderen Vorgaben in der Zulassung des jeweiligen Herstellers bestehen. Die in verschiedenen vorgenannten Untersuchungen erhöhten Holzfeuchtewerte in den äußeren 10-15 mm Randbereich entsprechen zwar nicht den genannten Grenzen Nutzungsklasse II, dort wird allerdings auch mit dem mittleren

Feuchtegehalt argumentiert und dieser kann sowohl geometrisch über den Querschnitt oder über den Jahresverlauf gemittelt werden. In beiden Fällen ist dann von einem deutlich unter dem Sicherheitsniveau von u = 20 % liegenden Wert auszugehen, der zu keiner Schwächung der Festigkeitseigenschaften des Holzes führt. Der kurzzeitige Einfluss der Feuchte auf die Festigkeit beschränkt sich auf einen sehr schmalen Randbereich des Gesamtquerschnitts, welcher durch hohe Widerstandswert ausreichend Restsicherheit gegen Einwirkungen bei bis zu acht Stockwerke hohen Gebäude bietet.

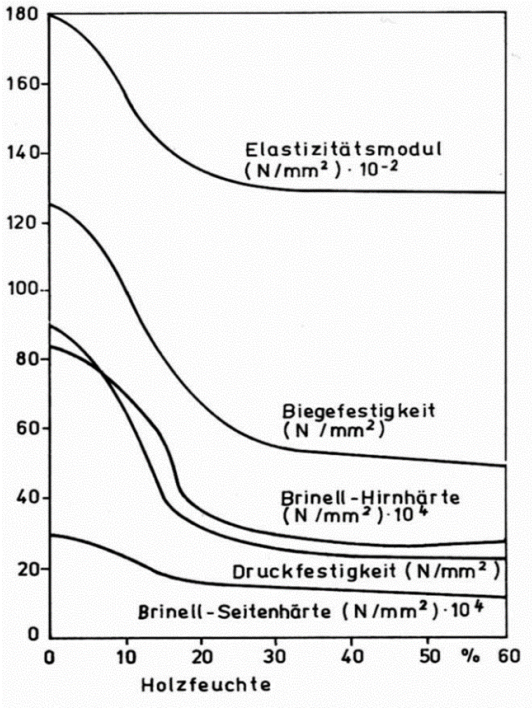


Abbildung 17: Einfluss der Holzfeuchte auf ausgewählte Eigenschaften des Holze (Kollmann, 1951).

2.6.8 Dauerhaftigkeit

Die Vollholzelemente bestehen im Wesentlichen aus Fichten- und Kiefernholz und sind in ihrer natürlichen Dauerhaftigkeit nach der Einstufung der wichtigsten Holzarten in den Dauerhaftigkeitsklassen der DIN EN 350-2 zu behandeln. Da jedoch jede Holzart eine gewisse „Dauerhaftigkeit“ gegen die verschiedenen Holzschädlinge hat, muss ihre natürliche Dauerhaftigkeit gegen jeden holzzerstörenden Organismus gesondert betrachtet werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf deren natürliche Widerstandsfähigkeit gegen Pilzbefall, bei den meisten Außenholzprodukten sind Holz schädigende Insekten von untergeordneter Bedeutung. Die Widerstandsfähigkeit gegen Pilzbefall wird in Form von Klassen ausgedrückt, wobei fünf Klassen unterschieden werden (Klasse 1 = sehr dauerhaft, Klasse 5 = nicht dauerhaft). Weitere

Anmerkungen zur Dauerhaftigkeit im Zusammenhang mit Feuchtbeanspruchung dicker Massivholzquerschnitte sind im Abschnitt 2.6.6 nachzulesen.

Tabelle 10: Dauerhaftigkeitsklassen von Hölzern nach DIN EN 350-2

Dauerhaftigkeitsklasse gem. DIN EN 350-2 für Hölzer im Erdkontakt (Gebrauchsklasse 4 / Widerstandsfähigkeit gegen Pilzbefall)	**Mittlere Standzeit (Erfahrungswerte) von Kernholz natürlich dauerhafter Holzarten Hölzer im Erdkontakt (bezogen auf Gebrauchsklasse 4)**	**Mittlere Standzeit (Erfahrungswerte) von Kernholz natürlich dauerhafter Holzarten, Hölzer ohne Erdkontakt (bezogen auf Gebrauchsklasse 3)**
1 sehr dauerhaft	13 Jahre Standdauer nur überseeische Holzarten, z.B. Teak unkultiviert	DIN EN 350-2 macht hierzu keine Angaben! Die mittlere Standzeit des Kernholzes liegt jedoch i.d.R. deutlich über den für Gebrauchsklasse 4 angegebenen Werten, wobei sie allerdings stark abhängig von den örtlichen Einsatz- und Gebrauchsbedingungen ist. Voraussetzung: Fachgerechter Einbau und - wo dies möglich ist - regelmäßige Pflege *2)
1-2 dauerhaft - sehr dauerhaft	z.B. Robinie	
2 dauerhaft	8 - 13 Jahre Standdauer z.B. Eiche, Red Cedar (unkultiviert)	
3 mäßig dauerhaft	5 - 8 Jahre Standdauer z.B. Douglasie (unkultiviert)	
3-4 wenig bis mäßig dauerhaft	z.B. Lärche, Kiefer, Douglasie (kultiviert)	
4 wenig dauerhaft	3 - 5 Jahre Standdauer z.B. Fichte, Tanne	
5 nicht dauerhaft	< als 3 Jahre Standdauer z.B. Buche	

Tabelle 11: Zuordnung der Dauerhaftigkeitsklasse DIN EN 350-2 zur Gebrauchsklasse nach DIN 68800-1

	Dauerhaftigkeitsklasse			
Gebrauchsklasse	1	2	3	4
2	+	+	+	-
3.1	+	+	+	-
3.2	+	+	-	-
4	+	-	-	-
+ = natürliche Dauerhaftigkeit ausreichend - = natürliche Dauerhaftigkeit nicht ausreichend				

Die Vollholzwandelemente haben gemäß den Herstellerzulassungen eine angenommene Nutzungsdauer von 50 Jahren, sofern die für den Transport, die Lagerung, die Installation, den Gebrauch und die Wartung und Reparatur festgelegten Bedingungen erfüllt sind. Die Angaben zur Lebensdauer können nicht als Garantie des Herstellers interpretiert werden, sondern sind nur als Mittel zur Auswahl der richtigen Produkte in Bezug auf die erwartete wirtschaftlich angemessene Nutzungsdauer des Werks zu betrachten. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass Vollholzbauteile als tragende Bauteile auch 100 und mehr Jahre genutzt werden können. Referenzbeispiele für geklebtes Vollholz sind beispielsweise die ersten schichtweise geklebten Binder von Otto Hetzer, die in den 1920er Jahren verbaut wurden und sofern erhalten, immer noch in guten Zustand sind. Voraussetzung für die lange Nutzungsdauer sind gleichmäßige und trockene Umgebungsbedingungen.

2.6.9 Vorfertigung / Montage vor Ort

Holzelemente können mit einer Breite von bis zu 3,5 m und einer Länge von bis zu 22 m als Großformat hergestellt werden. Durch Schneiden nach der Herstellung können schmalere Elemente hergestellt werden. Die vorgeschnittenen Elemente aus Brettsperrholz werden ebenfalls mit Aussparungen, Schlitzen oder integrierter Elektroverteilung und in fertiger Sichtoberfläche auf die Baustelle geliefert und dort passgenau versetzt. Somit kann mit dem Baustoff rationell und schnell montiert werden und es ist eine extrem kurze Rohbauzeit realisierbar.

Die Hersteller von Vollholzwandelementen sind im Rahmen einer Europäischen Technischen Zulassung ihrer Produkte dazu verpflichtet, werkseigene Produktionskontrollen durchzuführen, um das Produkt entsprechend den Standards qualitätszusichern. Der Hersteller muss eine ständige interne Kontrolle der Produktion ausüben. Alle vom Hersteller angenommenen Informationen, Anforderungen und Vorschriften sind systematisch in Form schriftlicher Grundsätze und Verfahren einschließlich Aufzeichnungen über die erzielten Ergebnisse zu dokumentieren. Das werkseigene Produktionskontrollsystem muss sicherstellen, dass das Produkt mit dieser europäischen technischen Zulassung übereinstimmt. Der Hersteller darf nur die in der technischen Dokumentation dieser europäischen technischen Zulassung genannten Rohstoffe und Werkstoffe verwenden. Die werkseigene Produktionskontrolle muss dem "Kontrollplan für die europäische technische Zulassung ETA-06/0009 vom 18. Juni 2013" entsprechen.

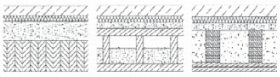
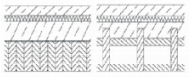
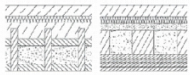
2.6.10 Kosten von Einfach Bauen in Massivholz

Die im vorherigen Absatz angesprochene Vorfertigung und Automatisierung der Wandfertigung hängt eng mit den Kosten für die Errichtung von Massivholzbauten zusammen. Die Kosten für die Errichtung von 300 bis 360 mm starkem Massivholzwänden aus Brettsperrholz mit Außenbekleidung aus vertikaler Holzschalung liegen zwischen 260 bis 290 € je Quadratmeter

Wand basierend auf statistischen Kostenwerten nach sirados und BKI im Jahr 2017 und 2018 (WEKA Media GmbH & Co. KG, 2017), (BKI-Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, 2017).

2.6.11 Strategie für Einfach Bauen in Massivholz

Wenn Trennwände doppelt ausgeführt werden und mit einer Trennlage aus Mineralwolle versehen sind lassen sich nochmals Verbesserung durch Entkopplung der Wand-Wand-Verbindung und Einführung einer mittigen Luftschicht einseitig vor der Mineralwollschicht erzielen. Zur Vermeidung von entkoppelten Bekleidungen an Wand oder Decke ist die Verwendung von Holzbetonverbunddecken überlegenswert. Dabei wird auf die entsprechenden Konstruktionen in der zweiten Tabellenzeile in Abbildung 18 verwiesen.

Bausituation	Zielwert: $L_{n,w} + C_{l,50\text{-}2500} \leq 53$ dB		$L_{n,w} + C_{l,50\text{-}2500} \leq 46$ dB	
	Belastbarkeit p		Belastbarkeit p	
	p <2,5 kN/m²	p <5 kN/m²	p <2,5 kN/m²	p <5 kN/m²
	≥ 50 mm ZE, m' ≥ 120 ≥ 40 mm TSD, s' ≤ 7 ≥ 60 mm Splitt, m' ≥ 90 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	≥ 25 mm TE, m' ≥ 25 ≥ 12 mm TSD, s' ≤ 40 ≥ 120 mm Splitt, m' ≥ 180 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	≥ 80 mm ZE, m' ≥ 190 ≥ 20 mm TSD, s' ≤ 20 ≥ 120 mm Splitt, m' ≥ 180 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	≥ 50 mm ZE, m' ≥ 120 ≥ 40 mm TSD, s' ≤ 7 ≥ 120 mm Splitt, m' ≥ 180 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	
	≥ 50 mm ZE, m' ≥ 120 ≥ 40 mm TSD, s' ≤ 7 ≥ 70 mm Beton, m' ≥ 170 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	≥ 12 mm TE, m' ≥ 13 ≥ 28 mm V20, m' ≥ 16 ≥ 30 mm TSD, s' ≤ 15 ≥ 120 mm Beton, m' ≥ 290 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	≥ 80 mm ZE, m' ≥ 190 ≥ 30 mm TSD, s' ≤ 15 ≥ 120 mm Beton, m' ≥ 290 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	≥ 50 mm ZE, m' ≥ 120 ≥ 40 mm TSD, s' ≤ 7 ≥ 120 mm Beton, m' ≥ 290 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	
		≥ 25 mm TE, m' ≥ 25 ≥ 12 mm TSD, s' ≤ 40 ≥ 70 mm Beton, m' ≥ 170 ≥ 100 mm Splitt, m' ≥ 150 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	≥ 50 mm ZE, m' ≥ 120 ≥ 20 mm TSD, s' ≤ 20 ≥ 70 mm Beton, m' ≥ 170 ≥ 100 mm Splitt, m' ≥ 150 ≥ 150 mm MHD, m' ≥50	≥ 50 mm ZE, m' ≥ 120 ≥ 40 mm TSD, s' ≤ 7 ≥ 70 mm Beton, m' ≥ 170 ≥ 100 mm Splitt, m' ≥ 150 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50	≥ 80 mm ZE, m' ≥ 190 ≥ 30 mm TSD, s' ≤ 15 ≥ 70 mm Beton, m' ≥ 170 ≥ 100 mm Splitt, m' ≥ 150 ≥ 150 mm MHD, m' ≥ 50

ZE:	Zementnassestrich mit Masse m' in kg/m²
TE:	Trockenestrich mit Masse m' in kg/m²
V20:	Spanplatte mit Masse m' in kg/m²
TSD:	Mineralfaser- oder Weichfaser-Trittschalldämmung mit dynamischer Biegesteifigkeit s' MN/m³
Splitt:	Splitt oder Kies mit Masse m' in kg/m²
Beton:	Betonplatten (Gartenplatten) auf Boden geklebt, Abmessungen ≤ 300mm, mit Masse m' in kg/m²
MHD:	Massivholz-/Hohlkastendecke mit Masse m' in kg/m²

Abbildung 18: Konstruktionshilfen für Holz-Beton-Verbund Decken (Bartlome, 2011)

Beim sommerlichen Wärmeschutz ist im Gegensatz zum Mauerwerk keine schwere und gut leitende Putzschicht oder keine schwere Decke mit hoher Wärmespeicherfähigkeit vorhanden. Hier könnte eine Erhöhung der thermischen Behaglichkeit im Sinne der Robustheit gegen sommerlicher Überhitzung der Einbezug von Gipsbekleidungen auf den Innenwand- oder Deckenoberflächen ein wichtiger, nächster Schritt in der Simulation sein. Alternativ wäre es überlegenswert ob Decken aus der harten und schweren Baubuche mit der mittleren Rohdichte von ρ = 750 kg/m³, bei einer spezifischeren Wärmespeicherkapazität von c = 1.600 J/kgK, einen Beitrag gegen Überhitzung leisten können.

Die Strategie für den Wärmeschutz bedeutet, es könnte unter Realbedingungen also mit einer deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit gerechnet werden. Damit würde ein geringerer Heizwärmebedarf einhergehen und es wäre somit ein Einfluss auf die Anlagengröße gegeben, oder die Dämmstoffdicke könnte entsprechend der verbesserten Wärmedurchgangskoeffizienten verringert werden.

Eine weitere Verringerung der Wärmeleitfähigkeit in den Außenwänden ist durch Maßnahmen am Holzquerschnitt der Vollholzwandbauteile möglich. Durch Luftkammern im Querschnitt lässt sich der Lambda-Wert noch weiter absenken. Es gibt bereits ein zugelassenes Produkt am Markt, das durch schmale, vertikale Schlitze in den vertikalen Mittellagen den Holzquerschnitt, ähnlich zu einem Hohlkammerziegel, Lufteinschlüsse ins Bauteil integriert. Dadurch ist eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit auf λ = 0,07 W/mK möglich, womit ein U-Wert von 0,28 W/m²K bereits beim Wandelement mit 230 mm Dicke erreicht wird.

Sämtliche Bauteile mit sichtbaren Holzoberflächen werden auf die baurechtlich geforderte Feuerwiderstandsdauer auf Basis Eingeführter Technischer Baubestimmungen (ETB) bzw. durch allgemein gültige bauaufsichtliche Verwendbarkeitsnachweise bemessen. Sie werden hohlraumfrei und luftdicht ausgeführt. Der Funktionserhalt der Tragfähigkeit und des Raumabschlusses wird über die Dauer von 90 Minuten erfüllt.

Durch die Ausführung sichtbarer Deckenoberflächen ist entsprechend den Untersuchungen von (Studhalter, 2013) von einem nur unwesentlich schneller eintretenden Flash-Over-Zeitpunkt auszugehen. Analog dazu kann von einem ähnlich geringfügigen Beitrag durch unbekleidete linearen Bauteilen wie Stützen und Balken ausgegangen werden. Durch einzelne lineare Bauteile oder Unterzüge ist zudem infolge ihrer lokalen und linearen Anordnung nur ein geringer Beitrag zur Brandausbreitung im Raum zu erwarten.

Durch die sichtbaren Holzoberflächen sind zusätzliche immobile Brandlasten vorhanden, deren Beteiligung am Brandgeschehen nicht auszuschließen ist. Aus diesem Grund werden diese Bauteile nur in den brandschutztechnisch abgeschlossenen Nutzungseinheiten innerhalb von Wohnräumen und nicht im Bereich von notwendigen Fluchtwegen oder Fluren verwendet. Da die Größe der Nutzungseinheit einen wesentlichen Einflussfaktor für die erfolgreiche Brandbekämpfung darstellt, soll im Falle der Verwendung von Sichtholzoberflächen die Nutzungseinheit auf maximal 200 m² begrenzt werden.

Zur Behinderung einer Brandausbreitung in bzw. innerhalb des Bauteils durch Hohlräume oder Fugen, werden die unterseitigen Brettlagen bzw. die Brettlagen der unterseitigen Bekleidung mindestens über eine Dicke des rechnerisch zu erwartenden Abbrandes (z.B. nach E-DIN 4102-4/A1 oder in Anlehnung an DIN-EN 1995-1-2:2010-12) schmalseitenverklebt und damit monolithisch hergestellt, ausgeführt. Beispielhaft wird der rechnerische Abbrand für Brettsperrholz unter einer eindimensionalen Brandbeanspruchung von 60 bzw. 90 Minuten in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Beispiel Abbrandtiefe von sichtbaren Brettsperrholzbauteilen

	Deckenbauteile (Abbrand nur innerhalb der ersten brandraumseitigen Brettlage)		**Deckenbauteile (Abbrand über die erste brandraumseitige Brettlage hinaus, Abfallen von Brettlagen möglich)**	
Abbrandrate nach E DIN 4102-4 A1	0,65 mm/min		1. Lage: 0,65 mm/min weiter Lagen: 1,3 mm/min bis zu einer Tiefe von 25 mm anschließend wieder 0,65 mm/min	
Brandbeanspruchung [min]	60	90	60	90
Abbrandtiefe [mm] Brandschutzmaßnahmen	***39***	***58,5***	***lagenabhängig***	

Als zusätzliche Maßnahme ist eine Überwachung der Baumaßnahme in Form einer Fachbauleitung Brandschutz unabdingbar. Die systematische und stichprobenartige Kontrolle während der Bauzeit soll die korrekte Ausführung der geplanten Konstruktionen, die zum Erreichen der gestellten Anforderungen notwendig ist, sicherstellen und eine hohe brandschutztechnische Ausführungsqualität gewährleisten.

2.7 Übersicht Gebäudetechnik

Was zeichnet die Gebäudetechnik des einfachen Bauens im Kontext der Zunahme von komplexer und smarter Technologie in der gebauten Umwelt aus?

Die immer komplexere Anlagentechnik lässt die Ausgaben in der Kostengruppe 400 (technische Gebäudeausrüstung) stetig steigen und ist nach Kenntnis der Baukostensenkungskommission der Bundesregierung mittlerweile hauptverantwortlich für die Kostensteigerung am Bau (Neitzel et al., 2015). Bezüglich der Betriebsphase hat es sich in der Praxis des Öfteren gezeigt, dass komplexe Haustechniksysteme fehleranfällig, mangels Monitoring ineffizient gesteuert, sowie aufwändig in der Unterhaltung sind (GEWOFAG, 2016) (Jazizadeh, 2013). Dies lässt vermuten, dass Neubauten oftmals deutlich mehr Energie verbrauchen als notwendig.

Zudem zeigen aktuelle Forschungsprojekte, dass Nutzer statisch geregelte Innenraumtemperaturen und komplexe Lüftungstechnik häufig als unkomfortabel empfinden (Schneider, 2015). Gerade dieses homogen konditionierte Raumklima ist verbunden mit einem großen technischen Aufwand und einem hohen Energieverbrauch. Hingegen ein dynamisches nutzergeregeltes Raumklima mit einer Schwankung der Raumlufttemperatur in Kombination mit natürlicher Lüftung, wird von den Nutzern präferiert und steigert ihre Zufriedenheit (Rupp, F. R. et al., 2015). Diese Aufenthaltsqualität lässt sich bereits mit passiven und robusten technischen Lösungen herstellen (z.B. Lüftungsklappen).

Eigene LCA und LCC Untersuchungen von typischen Heizsystemen haben ergeben, dass über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren Treibhauspotenzial (CO_2-Äquivalente) und Kosten für die Herstellungs-, Einbau- und Wartungsphasen gegenüber der Betriebsphase des Gebäudes verschwindend gering sind (Stöberl, 2018). Aus dieser Perspektive betrachtet, treten der ökologische und ökonomische Investitions- und Wartungsaufwand des Systems (z.B. Wärmepumpe mit Erdsondenbohrung) in den Hintergrund. Vielmehr rücken die Themen Primärenergiebedarf und Robustheit des Systems gegenüber dem „Nutzerfehlverhalten“ während der Betriebsphase in den Fokus.

Aus dieser Beobachtung wird für das vorliegende Forschungsprojekt die Hypothese abgeleitet, dass sich eine gute Aufenthaltsqualität bei einem gleichzeitig minimierten Energiebedarf durch passive, nutzergeregelte Systeme herstellen lässt. Das bedeutet, dass zuerst die Gebäudestruktur inklusive Gebäudehülle nach passiven Strategien entwickelt und mit der Gebäudetechnik zu einem robusten Konzept abgestimmt werden muss. Dabei ist das Ziel, ein gutes Raumklima zu schaffen, die notwendige Primärenergie zu minimieren, sowie diese durch erneuerbare Energien zu decken.

Die Hypothese soll anhand von Projektbeispielen betrachtet werden, um die Merkmale eines Haustechnikkonzeptes im Sinne des einfachen Bauens ableiten zu können.

2.7.1 Bürogebäude „2226“

Das Haustechnikkonzept des o.g. Gebäudes „2226“ von Baumschlager Eberle Architekten verzichtet vollständig auf Heiz-, Kühl- und Lüftungsanlagentechnik und gewährleistet gleichzeitig komfortable Aufenthaltsqualität mit operativen Raumlufttemperaturen zwischen 22 und 26°C. Lediglich die innenliegenden Nasszellen werden über dezentrale Anlagen automatisch be- und entlüftet (Eberle et al., 2016). Der Vorteil ergibt sich in schlichten Räumen ohne Übergabesysteme und einem MSR-Raum, bestehend aus einem zentralen Facility-Server. Die Entscheidung für das Mess- und Steuerungssystem bedeutet eine Ausstattung aller Räume mit CO_2- und Temperatursensoren (24 Stück), Stellmotoren (Kommunikation mit Sensoren über Bussystem) und Touchscreens, eine Wetterstation auf dem Dach, sowie die Betreuung des MSR-Systems durch einen Experten. Die Regelung der Frischluft über automatisierte Lüftungsflügel erfolgt nach einer Abfrage des CO_2-Gehaltes (Grenzwert 1200 ppm) und der Temperatur der Raumluft. Die dem CO_2-Gehalt nachgeschaltete Temperaturabfrage soll im Winterfall verhindern, dass die Lüftungsverluste zu groß werden und die Raumtemperatur unter ihren Sollwert fällt (Eberle et al., 2016). Ohne eine Zusatzregelung, wie z.B. *„Außenluft kleiner Raumluft“,* limitiert sie die Lüftungsbedürfnisse nach CO_2-Gehalt der Raumluft. Dies zeigt, dass trotz Verzicht auf Heiz-, Kühl- und Lüftungsanlagentechnik ein komplexes Techniksystem zum Einsatz kommt.

2.7.2 Haus Rauch

Das Haus Rauch ist zwar ein Stampflehmhaus und betrifft nicht die für diese Studie gewählten Konstruktionsmaterialien, doch ist das energetische Gesamtkonzept schlüssig im Sinne der oben aufgestellten Hypothese:

„Der im Obergeschoss situierte Pufferspeicher mit integriertem Boiler für Warmwasser speist sich aus drei Wärmequellen: primär von dem 14 m² großen im Dach integrierten Sonnen-kollektor und sekundär über den mit Stückholz beheizten, zentralen Lehmspeicherofen in der Küche. In diesem Speicherofen sind Absorber integriert, die ca. 50 % der produzierten Wärme mittels Schwerkraft selbstregelnd an den Pufferspeicher abgeben. Ergänzend befindet sich im Keller eine Pelletheizung, die sich automatisch zuschaltet, sobald die anderen Quellen zu wenig Energie liefern. Aus dem Pufferspeicher wird schlussendlich die großflächig im Lehmputz eingebettete Wandheizung mit der nötigen Wärme versorgt. […] Die Lüftung erfolgt durch Zirkulation innerhalb des Hauses. In den wenigen Hitzeperioden wird das Haus durch den Felsenkeller mit kühler Luft versorgt und über das ostseitige Schlafzimmerfenster entlüftet. Was es vom Nutzer verlangt, ist eine aktive Betätigung der entsprechenden Fenster und Schiebetüren mit einem kleinen Grundverständnis der Thermik und Luftbewegung, in Kombination mit praktizierter Nachtkühlung. Mit den schmalen Lüftungsflügeln neben den großflächigen Fenstern lässt sich das ideal bewerkstelligen. So ist über alle sommerlichen Hitzeperioden, ohne Energieeinsatz und Sonnenschutz, ein sehr komfortables Raumklima gewährleistet.“ (TRI-Gnbr, 2018).

2.7.3 „Lowtech“-Gebäude

Im Rahmen des interreg Projekts „Low-Tech Gebäude“ (Laufzeit 12/2015-11/2020) studiert das Projektteam Konzepte für energieeffiziente klimaverträgliche Low-Tech Gebäude im Boden-seeraum und stellt Low-Tech Komponenten als anregenden Werkzeugkasten für die Praxis der Architekten vor (Erber and Mair, 2018).



Abbildung 19: Low-Tech Komponenten des interreg Projekts "Low-Tech Gebäude" (Erber and Mair, 2018)

Dabei definiert das Team Low-Tech Haustechnik als einfache robuste Systeme, die störungsfrei laufen, und verzichtet auf wassergeführte Wärmeverteilsysteme, sowie Wärme- und Kälteerzeugung. In einem Pilot-Wohngebäude-Projekt vergleichen sie anhand thermischer Simulation die Kombinationen von Komfortlüftung bzw. reiner Abluftanlage mit Infrarotheizung bzw. Luftwärmepumpe. Das Ergebnis zeigt, dass die Infrarotheizung mit elektrischen Boilern mehr als die doppelte Energie der Luftwärmepumpe mit zentraler Warmwasserbereitung verbraucht, auch wenn sie etwas mehr des eigenen PV-Stroms aufnehmen kann. Die wirtschaftlichste Variante im Direktstromvergleich ist die Wärmepumpe mit Abluftanlage und zentraler Warmwasserbereitung mit Heizstab. (TRI-Gnbr, 2018).

2.7.4 GEWOFAG Forschungsprojekt Riem

Auch die Wohngebäudestudie der GEWOFAG kommt zu dem Schluss, dass Gebäude mit wartungsarmer und robuster Technik (z.B. Fensterkontakten) bezüglich Energieverbrauch und Nutzerzufriedenheit im Vergleich vorne liegen (GEWOFAG, 2016). Folgende Grafik aus dem Forschungsbericht der GEWOFAG gibt einen Überblick der untersuchten Gebäude:

	Heizwärmebedarf (kWh/m²a)	Primärenergie bei Fernwärme (kWh/m²a)	Primärenergie bei Erdgas (kWh/m²a)	Investitionskosten KG 300 + 400 (€ brutto/m²)	Jährliche Kosten nach VDI 2067 (€/m²a)	Wohnflächen-verlust (m²)	Zugluftgefahr	Wartungskosten Lüftung (€/a)	Zuständigkeit Filterreinigung	Nutzer-zufriedenheit Heizsystem
Haus 1 Referenz	72,9	19,9	171	1126	37,9	0	ja	188	Mieter	gut
Haus 2 Dämmung	72,2	19,8	170	1150	39,4	0	ja	188	Mieter	gut
Haus 3 Fensterkontakt	55,9	18,7	148	1134	35,8	0	ja	188	Mieter	Wird nicht von allen Befragten als vor-teilhaft empfunden
Haus 4 EER	74,6	22,8	176	1149	43,7	0	ja	188	Mieter	Raumtemperatur schwer einstellbar
Haus 5 Wandheizung	73,5	22,1	174	1279	52,9	11,8	ja	188	Mieter	Schlechte Einstell- und Regelbarkeit, gute Möblierbarkeit
Haus 6 WRG	67,6	21,9	166	1202	47,0	1,4	nein	1300	Firma	gut

Abbildung 20: Ergebnistabelle aus dem GEWOFAG Forschungsprojektbericht Riem (GEWOFAG, 2016)

Alle Gebäude verfügen über monolithisches Ziegelmauerwerk, Fenster mit Wärmeschutz-verglasung und Falzlüftung. Ihr Energiestandard entspricht der EnEV 2007. Haus 3, das als Besonderheit Fensterkontakte zur automatischen Schließung der Heizventile bei geöffnetem Fenster besitzt, schneidet bezüglich Heizwärme- und Primärenergiebedarf, sowie jährlichen Kosten am besten ab.

2.7.5 e%-Energieeffizienter Wohnungsbau

Der Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung des Modellvorhabens e% kommt bezüglich Adaptivität, Gebäudehülle und Gebäudekonzept ebenfalls zu dem Schluss, dass eine einfache Anlagentechnik (monovalente Wärmeerzeugung und Abluftanlage) vergleichbar niedrige Energieverbräuche erzielen kann wie komplexe Anlagen. Gebäude, die ihren Wärmeverbrauch durch einen hohen Anteil an regenerativer Energie decken und gleichzeitig einen geringen Anteil an strombasierter Hilfsenergie benötigen, erzielen die niedrigsten Primärenergieverbräuche. Dem Nutzerverhalten wird eine entscheidende Rolle bezüglich des Wärmeverbrauchs zugeschrieben – vor allem bei mechanischen Lüftungssystemen (Hausladen et al., 2017) . Anders ausgedrückt, verhält sich die mechanische Lüftungsanlage nicht robust

gegenüber dem Nutzerverhalten. Dies bedeutet, dass ein einzukalkulierendes „Nutzerfehlverhalten“ der mechanischen Lüftungsanlage zu starken Erhöhungen im Energieverbrauch und einem Verlust an Innenraumkomfort führt.

Aus den oben gewonnenen Erkenntnissen wird für die vorliegende Arbeit definiert, dass das einfache Bauen einer reduzierten, robusten und synergetischen Gebäudetechnik bedarf. Das bedeutet, das Gebäudetechnikkonzept

- bevorzugt passive Maßnahmen und verzichtet auf Systeme, die keine Nutzerakzeptanz haben,
- minimiert den Energiehaushalt eines Gebäudes durch Art und Zusammenspiel der passiven Gebäudekonstruktions- und Technikkomponenten: Speichermasse, natürliche Lüftung, Heizsystem, interne Wärmequellen, Tageslichtausnutzung und fixer Sonnenschutz,
- minimiert den Einfluss an MSR Technik, indem der Nutzer aktiv in die Regulierung des Raumklimas einbezogen wird,
- minimiert den Ressourcenverbrauch der verbauten Gebäudetechnik (eingebettete Energie und Betriebsenergie),
- und besteht aus langlebigen und gut austauschbaren Komponenten.

Der Anspruch an die Gebäudetechnik im Sinne des einfachen Bauens soll dabei nicht zu einer Minderung der architektonischen Qualität führen, sondern vielmehr zu neuen Architekturthemen beitragen. Die Kombination einer robusten einfachen Baustruktur mit beispielsweise integrierten Anlagen zur erneuerbaren Energieproduktion kann zu einer neuen architektonischen Qualität führen.

2.8 Zusammenstellung ausgewählter Projekte

2.8.1 Leichtbeton

Leichtbeton zeichnet sich im Vergleich zu Normalbeton insbesondere durch sein geringeres Eigengewicht, eine hohe Porigkeit und die damit verbundenen hohen Wärmedämm-eigenschaften aus. Während die Ursprünge von Leichtbeton bereits auf das 2. Jhd. V. Chr. (Faust, 2003) zurückgehen, wird heute neben der Gesteinskörnung insbesondere auch die Zementsteinmatrix optimiert. Während in der Praxis, durch Zulassungen im Einzelfall somit bereits λ- Werte von 0,185 W/(m*K) realisiert wurden (Callsen, 2017), konnten in der Forschung bereits λ- Werte von 0,141 W/(m*K) erzielt werden (Gruss, 2017; Schlaich and Hückler, 2012). Der Begriff Leichtbeton umfasst heute neben dem in der DIN 1045 (*DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206*, 2014) geregelten Leichtbeton mit einer Trockenrohdichte zwischen 800 und 2000 kg/m³, Infraleichtbeton (ILC) mit Rohdichten unterhalb von 800 kg/m³ und sogenannte Dämmbetone, die aufgrund ihrer guten Festigkeitseigenschaften

den Bau homogener Wandkonstruktionen auch bei mehrgeschossigen Gebäuden ermöglichen (Filipaj, 2010). Leichtbeton ist – wie Normalbeton - nicht brennbar und nahezu beliebig formbar. Er besteht aus natürlichen Rohstoffen oder gesundheitlich unbedenklichen Recyclingstoffen wie z.B. Blähglas und ist damit umweltverträglich (HEIDELBERGCEMENT Group). Durch weitere Eigenschaften wie Diffusionsoffenheit, Schallschutz und warme Oberflächen in Sichtbetonqualität gewährleistet Leichtbeton eine hohe Wohnqualität (Schlaich, M., Lösch, C., Hückler, A., 2015). Abb. 20 zeigt beispielhaft zwei Wohnhäuser aus Leichtbeton.





Abbildung 21: Familienhaus in Berlin (2007), (El Zareef, 2010); rechts: Einfamilienhaus in Aiterbach (2016),(Massiv und doch ganz leicht, 2016)

2.8.2 Holz

Der *woodcube*, Hamburg, Baujahr 2012, errichtet von Holzbau Thoma, ist das einzige mehrgeschossige Bauwerk in monostofflicher Massivholzbauweise. Das zur IBA Hamburg errichtete fünf Stockwerke hohe Gebäude sieht eine Mischnutzung als Wohn- und Bürogebäude vor. Die Gebäudehülle ist aus 36 cm Massivholz, kreuzlagig verdübelt, ohne Klebstoffe hergestellt und mit zusätzlich 4 cm Holzweichfaser außen bekleidet, die nicht mit dem Massivholz verklebt ist. Das Gebäude hat einen Effizienzstandard KfW 40, was 2012 einem Gesamtendenergiebedarf von 40 kWh/m²a entsprach (Hausegger).





Abbildung 22: woodcube in Hamburg (2012) (Hausegger)

Ein weiteres Projekt in reiner Brettsperrholzbauweise ist die Deutschland-Zentrale von binderholz in Kösching, erbaut 2007. Die Außenwände bestehen rein aus 276 mm Brettsperrholz ohne ergänzende, funktionale Schichten, mit einem U-Wert der Außenwand von 0,44 W/m²K. Der Wetterschutz der Brettsperrholzelemente wird durch die großen Dachüberstände gewährleistet. Dazu ist das Bürogebäude durchgängig eingeschossig und somit nur bedingt repräsentativ für urbane, multifunktionale Gebäude.

Die Konzernzentrale von Mayr-Melnhof Kaufmann Verwaltungszentrale (ehem. Stallinger) geplant von Hermann Kaufmann, in St. Georgen im Attergau (A) erbaut 2008 und das Impulszentrum Graz sind beides mehrgeschossige Holzbauten mit schichtreduzierten, zweischichtigen und bei ersterem sogar monostofflichen Außenwandaufbauten. Das 2001 errichtete Impulszentrum Graz hat als Dämmstoff Mineralwolle und einen U-Wert von 0,25 W/m²K, während die MMK Verwaltungszentrale statt Mineralwolle Holzweichfaser auf der tragenden Brettsperrholzwand verwendet und damit einen Gebäudeenergiebedarfskennwert von 36 kWh/m²a erreicht *(Kapfinger, 2009).*

2.8.3 Mauerwerk

Beispielhaft für eine monolithische Ziegelmassivbauweise stehen die drei Mehrfamilienhäuser nach Passivhausstandard der ABG in Frankfurt. Die Ausführung der Außenwände der dreigeschossigen Mehrfamilienhäuser mit Staffelgeschoss als Dachgeschoß erfolgt in Leicht-Hochlochziegeln gefüllt mit mineralischem Granulat, so dass sie ein Lambda von 0,07 W/mK, und bei 49 cm Stärke einen U-Wert von 0,14 W/m²K aufweisen. Die weiteren Gebäudekennwerte sind am Passivhausstandard orientiert, so dass ein Heizwärmebedarf von 15 kWh/m²a und ein Gesamtprimärenergiebedarf von 120 kWh/m²a eingehalten werden (Messari-Becker, 2012).

Ein weiteres Beispiel für ein mehrgeschossiges Gebäude in monolithischer Bauweise ist das multifunktionale Büro- und Wohngebäude 2226 von Baumschlager Eberle Architekten in Schwarzach (A). Bei der Stoffwahl und dem Energieversorgungskonzept wurde ein radikal einfacher Weg beschritten. Es wurde auf allen Ebenen an Materialschichten und Technik reduziert und weggelassen was nicht unbedingt notwendig war. Herausgekommen ist ein Gebäude mit geringem Heizwärmebedarf, der durch eine hochwertige Gebäudehülle, thermische Speichermassen und durch die internen und die solaren Gewinne erreicht wird.



Abbildung 23: 2226 in Lustenau (2013) (Eberle et al., 2016)

Die Außenwände des 5-stöckigen, kompakten, würfelförmigen Baus sind aus 80 cm dicken hochwärmedämmenden Hochlochziegeln, mit einem U-Wert der Wand von 0,20 W/m²K. Das Gebäude hat eine automatisch geregelte, natürliche Lüftung über motorisch betriebene Lüftungsflügel, die neben den festverglasten 3-Scheiben-Isolierglasfenstern eingebaut sind. Die hochwertige Hülle verringert die Wärmeverluste. Nach Aussage von Dr. Peter Widerin (tau), der das Monitoring für das Projekt betreibt, wird in den Wintermonaten und nach längeren Betriebspausen das Gebäude durch die Abwärme der Beleuchtung nachgeheizt. Das 2226 hat einen elektrischen Endenergiebedarf von etwa 32 kWh/m²a (Eberle et al., 2016).

Ein Gebäudebeispiel, das den Effizienzhaus-Plus Standard erreicht, ist das Einfamilienhaus in Burghausen, geplant von Architekt Georg Dasch aus Straubing. Die Außenwände bestehen aus hochwärmedämmenden Ziegeln, die mit Perlite gefüllt sind. Der Lambda-Wert beträgt 0,07 W/mK und der U-Wert 0,14 W/m²K, bei einer Wandstärke von 49 cm. Die restliche Hülle besteht im Wesentlichen aus weiteren passivhaustauglichen Bauteilen. Zur Energiegewinnung werden Solarenergie und eine Lüftungsanlage genutzt (Graubner *et al.*, 2014).

Im Mauerwerksbau wird die Thematik der Nutzung solarer Einträge auch in aktiven Systemen untersucht. Ein Beispiel ist der Energieklinker (Mähner *et al.*). Hier soll das Prinzip einer fassadenintegrierten Solarthermieanlage in Stein umgesetzt werden. Dazu werden wasserführende Kunststoffrohre mäanderförmig in oberseitige Nuten in den Vormauerklinker entlang der Lagerfugen verlegt. Es ist einer von vielen Versuchen die thermischen Einträge aus

der Hülle zu nutzen und einem Heizsystem zuzuführen. Ähnliche Produkte existieren auch als Luftkollektoren an Fassaden, weitere Beispiele sind spezifische Produkte wie gapsolar aus Österreich und die Lucido-Fassade aus der Schweiz.

2.8.4 Fazit

Als Fazit der verschiedenen Projektbeispiele kann festgehalten werden, dass in Mauerwerksbauweise und Holzmassivbauweise eine einschichtige Ausführung der Hüll- und Tragkonstruktion baukonstruktiv und -praktisch umsetzbar ist. Die erreichten Energiestandards liegen alle mindestens im Bereich von Niedrigenergie- oder sogar Passivhäusern. Sie sind somit als Musterprojekte für „Einfach Bauen“ objektivierbar.

Zur Erreichung des Passivhausstandards sind allerdings Abstriche vom einschichtigen Paradigma in Kauf zu nehmen. Trotzdem gibt es auch Beispiele, die im weitesten Sinne einstofflich arbeiten, z.B. indem die Ziegel mit mineralischen, dämmenden Füllstoffen ausgerüstet werden oder Massivholz mit Holzweichfaser kombiniert wird. Weiterhin kann festgehalten werden, dass mehr stoffliche Ressourcen in die Hüllfläche investiert werden müssen und durch die dickeren Außenwände Wohn- und Nutzfläche verloren geht. Bei Deckenaufbauten kann eine einschichtige Bauweise aus Schallschutzgründen bei beiden Stoffen kaum umgesetzt werden. Hier besteht aus konstruktiver Sicht ein Potential für Mischbauweisen, in denen Ziegel oder Holz mit Beton kombiniert werden. Die Folgen für den Rückbau und die Ökobilanz von Wand- und Deckenaufbauten werden im weiteren Verlauf genauer untersucht werden.

3 Entwurfsstrategie Einzelraum-Betrachtung (MS 2)

3.1 Vergleichende Vorbetrachtungen der Ausgangsmaterialien

Hintergrund ist die Ermittlung der Umweltwirkungen der unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten, primär innerhalb der einzelnen Materialgruppen und weniger zwischen verschiedenen Materialien, da hier die Randbedingungen bzw. vor allem die Leistungsfähigkeit der Bauteile schwer vergleichbar sind. Auf Basis der Ergebnisse soll ein weiteres Entscheidungsmerkmal für die Konstruktionsauswahl und -optimierung geschaffen werden.

3.2 Definition Ziel & Untersuchungsrahmen

3.2.1 Lebenszyklusdefinition und Systemgrenzen

Zu Beginn des ersten Meilensteins wurde festgelegt, den Lebenszyklus schwerpunktmäßig anhand der Rohstoffgewinnung / Herstellung (A1-3, cradle to gate) zu untersuchen, siehe folgende Abbildung 24. Da die Annahme getroffen wurde, dass wenig gesicherte Daten für die Errichtungsphase vorliegen, wurde das Modul A4-5 (Gebäudeerrichtung) zu Beginn der Untersuchung erst einmal ausgeschlossen. Es wird angemerkt, dass in diesem Lebenszyklusmodul gegebenenfalls ein Mehraufwand an Energie und anderen Ressourcen aufgrund eines höheren Materialinputs monolithischer Bauweisen gegeben ist und sich damit deutliche Auswirkungen auf die Umweltwirkungen ergeben. Sollte es im weiteren Projektverlauf möglich sein, diese Daten zu integrieren, wäre eine wesentlich genauere Ökobilanzierung möglich.

In der Betriebsphase (B1-7) wird insbesondere die Instandhaltung, Reparatur und der Austausch von Bauteilen sowie der Energieverbrauch betrachtet. Für das Modul des Lebensendes (EoL, engl. End of Life) und der Entsorgung (C1-C4) ist eine qualitative Betrachtung des Rückbaus, und der Abfallbearbeitung vorgesehen. Eine quantitative Betrachtung wird zu Projektbeginn als nicht sinnvoll erachtet. Ein willkürliches Abschneiden des Lebenszyklus bedeutet aber, dass der Entsorgungsaufwand am EoL trotz der beabsichtigten sehr langen Lebensdauer weiterbesteht. Ein weiterer Punkt für die vorläufige Entscheidung, es würden möglicherweise zu wenige Daten für die EoL Berechnung vorliegen kann aber nach den vorliegenden Zwischenergebnissen mit Daten aus der Ökobaudat 2016 entkräftet werden. Ferner ist die Einschränkung der Analyse auf cradle to gate als kritisch zu betrachten, denn sie darf bei der Auswertung und Interpretation der Daten nicht mit Phase D vermischt werden. Dieses ist aber in einer rein qualitativen Bewertung nur äußerst schwierig zu gewährleisten. Das hängt mit dem abschließenden Kriterium für die Systemgrenze des letzten Moduls zusammen und dieses ist der Zustand des „end of waste“ (!). Weitere, über die Systemgrenze hinausgehende, Belastungen oder Gutschriften und positive Eigenschaften liegen jenseits des betrachteten Systems. Sie werden nicht dem System selbst zugerechnet, sondern auf nachfolgende Systeme übertragen.

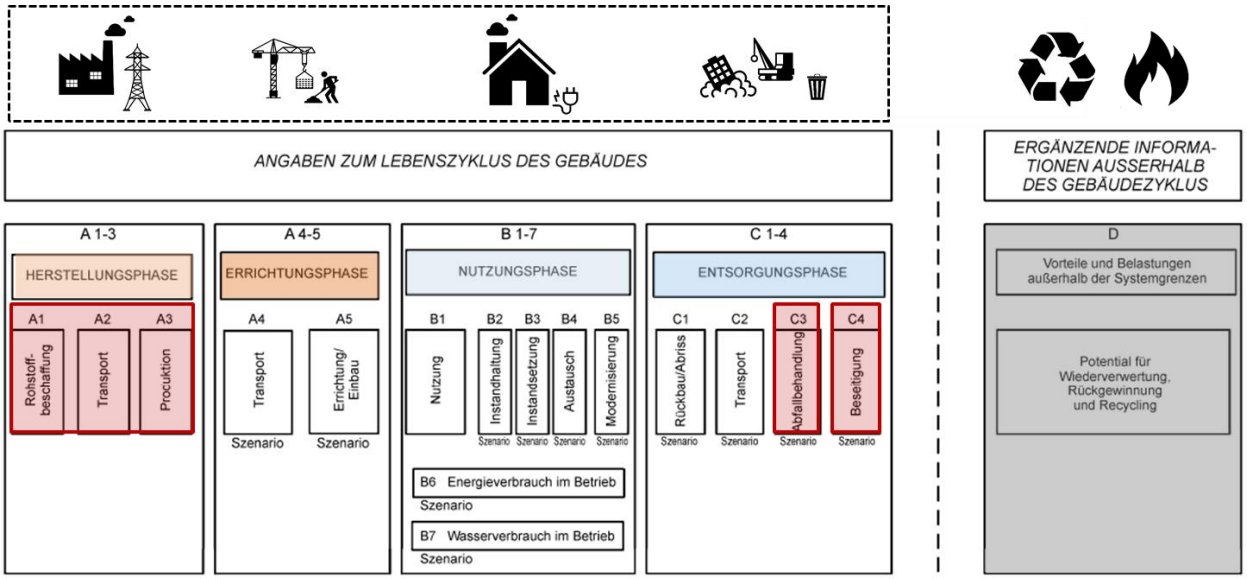


Abbildung 24: Lebenszyklusphasen für Bauprodukte nach DIN EN 15804 und für Gebäude nach DIN EN 15978, hervorgehoben die quantitativ und qualitativ untersuchten Phasen

3.2.2 Lebenszyklusdaten – Life-cycle impact assessment (LCI und LCIA)

Primär werden aktuelle Daten aus der Ökobaudat (Stand September 2016) für die Berechnungen der Ökobilanzen verwendet. Dabei werden soweit als möglich die Durchschnittsdatensätze für Deutschland ausgewählt, um eine möglichst allgemeingültige LCA zu erhalten. Ergänzend können spezifische EPD Datensätze (Environmental Product Declaration) zur Anwendung kommen. Sollten diese Daten nicht ausreichen, bzw. für bestimmte Prozesse oder Produkte nicht vorhanden sein, dann wird auf wissenschaftliche Publikationen und gegebenenfalls vereinfachte Prozessdaten aus der ecoinvent-Datenbank zurückgegriffen. Die bisher im Projekt verwendeten LCA Basisdaten sind Ökobaudat-Daten 2016-I (18.05.2016): Lebenszyklusmodul A1-3 (cradle to gate), und Modul C1-C4 (gate to grave).

Folgende Aspekte definieren das Ziel und beschreiben damit den Grund für das Durchführen einer Ökobilanz für die vorliegende Projektarbeit:

- Bewertung der Umweltwirkung der Konstruktion und evtl. die eines Gebäudes über den Lebenszyklus
- Entscheidungshilfe für Konstruktionsauswahl
- Anhaltspunkte für die Verbesserung der monolithischen Konstruktion hinsichtlich ihrer thermischen und konstruktiven Eigenschaften unter besonderer Berücksichtigung der Umweltwirkung während des Lebenszyklus

- Identifikation der wichtigsten Einflussgrößen auf die Umweltwirkung (aus den verwendeten Stoffen)
- Gegenüberstellung monolithischer und herkömmlicher Bauweisen
- Treibhauspotential (GWP) als aktuell wichtiger Wirkungsindikator
- Stärkerer Fokus auf Ressourcenverbrauch
- Betrachtung sowohl des aktuellen GWP Beitrags (A1-A3) als auch des zukünftigen Entsorgungsaufwandes (C1-C4)
- Zusätzlicher Aufwand, Transport und Errichtung größeren Mengen an Ressourcen (A4-A5) ist nicht abgebildet aber möglicherweise relevant

Für die Durchführung der Ökobilanz wurden folgende Punkte bezüglich der Sachbilanzdaten festgelegt:

- Input an Materialmengen bezogen auf jeweils 1 Quadratmeter Bauteilfläche als wesentlicher Basisgröße
- Input der Schichten aus den in der Regel mehrschichtigen Bauteilaufbauten
- Berücksichtigung der Schichten für Raumbildung mit Tragwerk und Aussteifung
- Berechnung weiterer Schichten, die bauphysikalisch funktional und damit zwangsläufig notwendig sind, beispielsweise Wetterschutz-, Luftdichtheits-, Trittschalldämm-, oder Estrichschicht
- Lebenszyklusdauer 80 oder mehr Jahre; es sind kaum Daten zur Dauerhaftigkeit moderner Konstruktionen vorhanden. Empirisches Material zu historischen Gebäuden mit „einfacher und monolithischer“ Bauweise könnte ebenfalls schwierig zu finden sein

Als zweiter Vorbereitungsschritt wurden folgende Indikatoren für die anschließende Bewertung der Bauteilvarianten definiert:

- Input an Ressourcen: Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar, Wasserverbrauch
- Schädliche Umweltwirkungen: GWP, (evtl. ADP)
- Umfang der Screening Studie
- Es wurde ein einfaches LCA-Screening der Materialien auf Einzelraumebene durchgeführt. Dabei war die Grundlage des Einzelraumscreenings ein definierter Referenzraum. Als geeigneter Referenzaufbauten wurden Wand-, Decken und Innenwandbauteile ausgewählt, die möglichst monolithisch aufgebaut sind und EnEV-Standards repräsentieren. Zusätzlich wurden bereits verbesserte Aufbauten anhand

einheitlicher Geometrie (Raumabmessung) und Leistungsfähigkeit der Konstruktionen untersucht und verglichen. Als Vergleich wurde die Umweltwirkung des 2226 Gebäudes auf Bauteil- und auf Raumebene nach der gleichen Systematik und aufgrund gleicher Daten berechnet, obwohl bereits Ökobilanzen (nach SIA Standard) für das Gebäude existieren.

3.2.3 Ergebnis und Interpretation der Screening-Studie

Damit die Screening-Ergebnisse zur Entscheidung des weiteren Vorgehens der Bauteile beitragen, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Entscheidungsbasis und Kriterien
- Einfluss der Errichtungsphase
- Qualitative Untersuchung von Rückbau und Entsorgung
- Erweitertes Screening mit Betrachtung eines Gesamtsystems Gebäude
- Trotz der angestrebten langen Lebensdauer ist der Umgang mit heutigem akuten Herstellungsaufwand und -emission äußerst kritisch zu beurteilen

3.3 Bauteilvergleiche

Für die ökobilanziellen Bauteilvergleiche wird von monolithischen Aufbauten ausgegangen, die in ihren Eigenschaften auf gleiche U-Werte festgelegt werden. Die Startwerte entsprechen den Anforderungen der aktuell gültigen EnEV 2016 (A1-Varianten in Abb. 28). Zum Vergleich werden ergänzend konventionelle Bauteilaufbauten mit Dämmschichten in mehrstofflichen Varianten untersucht (A2). Die Variante B1 untersucht monolithisch noch sinnvoll herstellbare Bauteilaufbauten. Diese Aufbauten werden auch in der dynamischen thermischen Simulation verwendet.

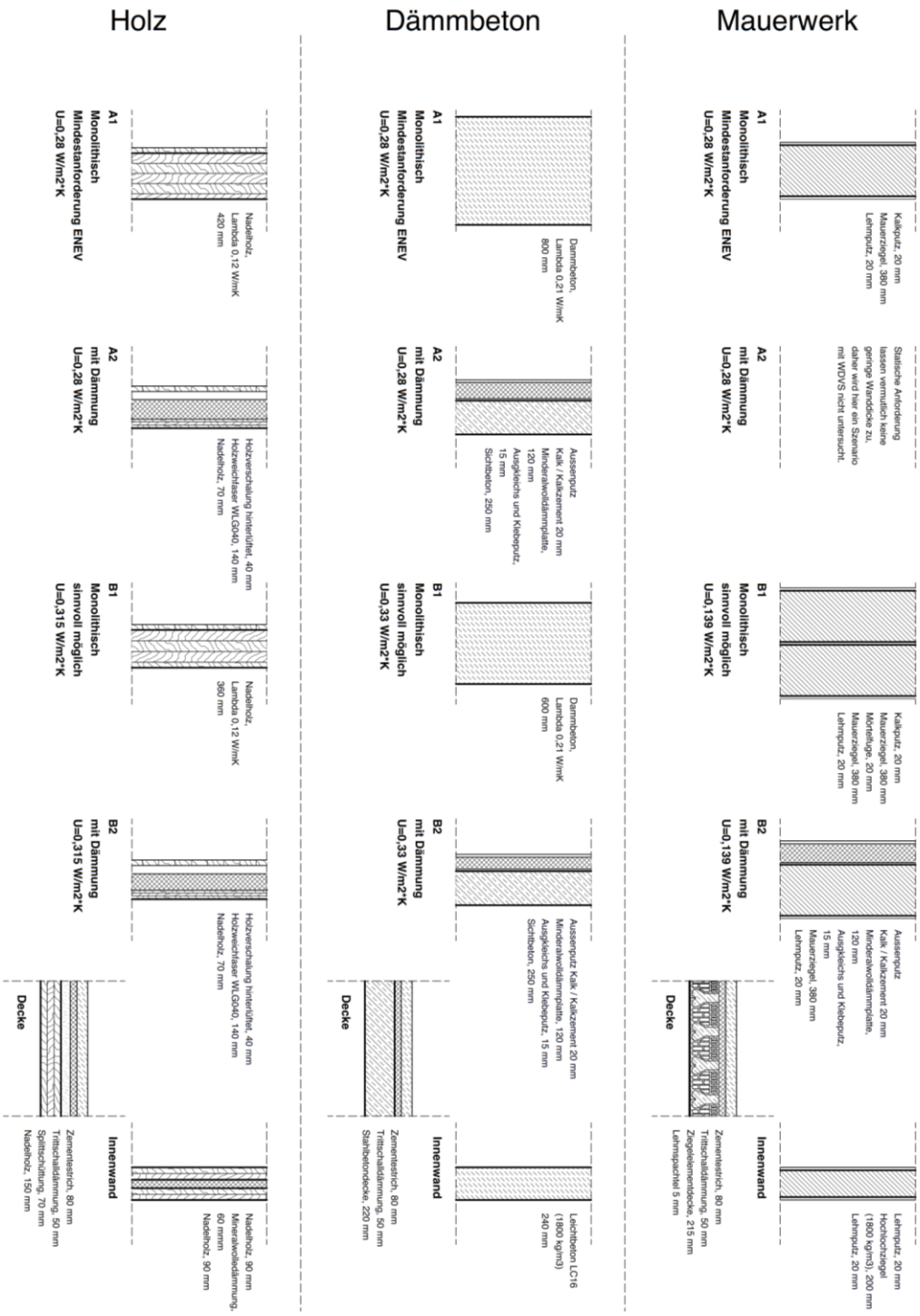
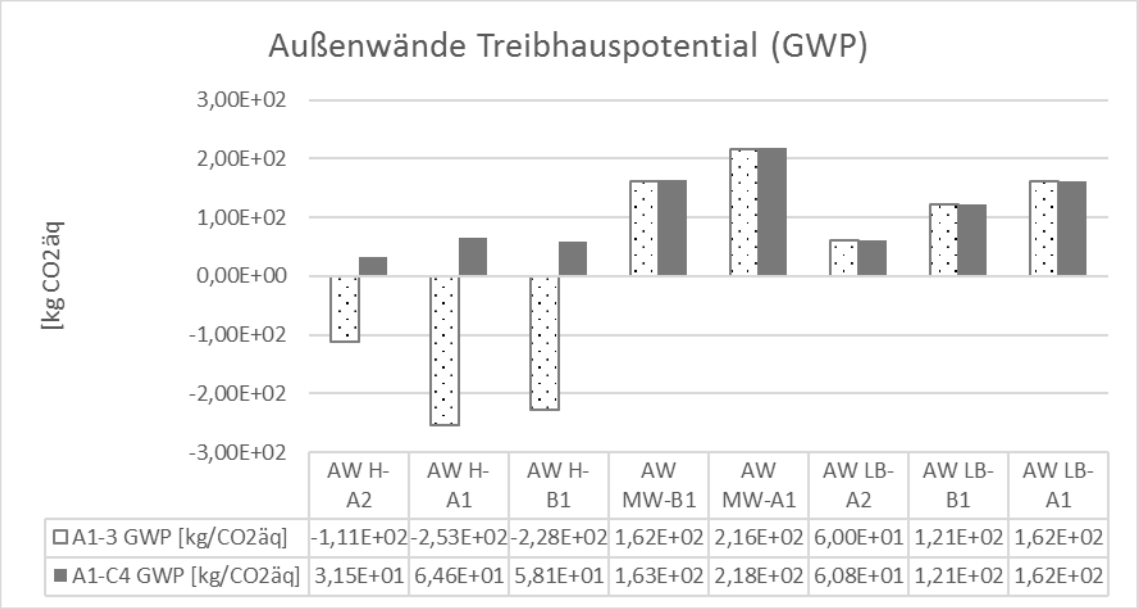


Abbildung 25: Übersicht zu den untersuchten Bauteilaufbauten

3.4 Interpretation der bisherigen Ergebnisse und Ausblick

Die Holzbauteile (Referenzraum) besitzen das geringste Treibhauspotential, da der Kohlenstoffspeicher während Lebensdauer weit über 50 Jahren liegt. Darüber hinaus ist der nicht erneuerbare Primärenergieinhalt gering. Das einzige Problem: Mehrschichtige Aufbauten sind bei Innenwand und Deckenkonstruktionen aus schall- und brandschutztechnischen Gründen die Regel. Einstoffliche Bauteile sind in diesem Bereich damit benachteiligt.



	AW H-A2	AW H-A1	AW H-B1	AW MW-B1	AW MW-A1	AW LB-A2	AW LB-B1	AW LB-A1
A1-3 GWP [kg/CO2äq]	-1,11E+02	-2,53E+02	-2,28E+02	1,62E+02	2,16E+02	6,00E+01	1,21E+02	1,62E+02
A1-C4 GWP [kg/CO2äq]	3,15E+01	6,46E+01	5,81E+01	1,63E+02	2,18E+02	6,08E+01	1,21E+02	1,62E+02

Abbildung 26: Vergleich des Treibhauspotentials der Außenwandbauteile nur Herstellung (A1-A3) und gesamter Lebenszyklus (A1-C4)

Die Referenzraummethode ergibt für die Mauerwerksbauteile das höchste GWP über Lebenszyklus, wobei ebenfalls der nicht erneuerbare Primärenergieinhalt am höchsten liegt.

Dagegen ergibt sich für die Leichtbetonbauteile ein niedriges GWP, welches bei der Lebensende-Betrachtung etwas höher liegt als Holz. Leichtbetonbauteile haben zwar keinen Kohlenstoffspeicher, doch der nicht erneuerbare Primärenergieinhalt liegt fast gleich hoch wie Holz.

Ausblick

Die weitere Untersuchung der Ressourcenverbräuche in den Modulen A1-3 und C3-4 sollte mit besonderer Berücksichtigung der Vereinfachung von Konstruktionsknoten erfolgen. Ein weiterer zu untersuchender Punkt ist der Einfluss langer Lebensdauern auf Umweltwirkungen bei Betrachtungszeiträumen von weit über 50 Jahren (Module B2-B4). Außerdem sollte die stoffliche LCA mit der Nutzungsphase und dem Energieverbrauch im Betrieb (Modul B6) gekoppelt werden.

Bei der künftigen Untersuchung der Lebenszykluskosten sollte diese Berechnung ebenfalls vor dem Hintergrund langer Lebensdauern durchgeführt werden.

Übergeordnetes Ziel ist es, einen Beitrag zur Diskussion über die Konsequenzen monolithischer bzw. einstofflicher Bauweisen auf die Schutzziele der Bauproduktenverordnung und der übergeordneten gesellschaftspolitischen Ziele zum Klima- und Ressourcenschutz leisten zu können.

3.5 Voruntersuchung der Parameterintegrale für die Einzelraumsimulation

Um bei den umfangreichen und zeitintensiven dynamischen Simulationen aufschlussreiche Ergebnisse zu erhalten und damit die gestellte Untersuchungsaufgabe zu erfüllen, haben wir uns entschieden, eine Voruntersuchung in einem vereinfachten Berechnungsverfahren vorzuschalten. Dadurch werden erste grundlegende Erkenntnisse über Zusammenhänge zwischen den Parametern des Einzelraums und dessen Auswirkung auf den Energiehaushalt gewonnen, was wiederum erste Rückschlüsse auf den Energiebedarf in der Nutzung und die Qualität des Raumklimas zulässt.

Zur Ermittlung der Energiebilanz wurde die monatsweise stationäre Methode nach DIN V 4108-6 angewendet. Dabei werden von den internen und solaren Gewinnen die Verluste über Lüftung und Transmission subtrahiert, um dadurch eine monatweise Energiebilanz für den Raum zu ermitteln. Die Ermittlung erfolgt mit einem selbsterstellten Excel-Tool

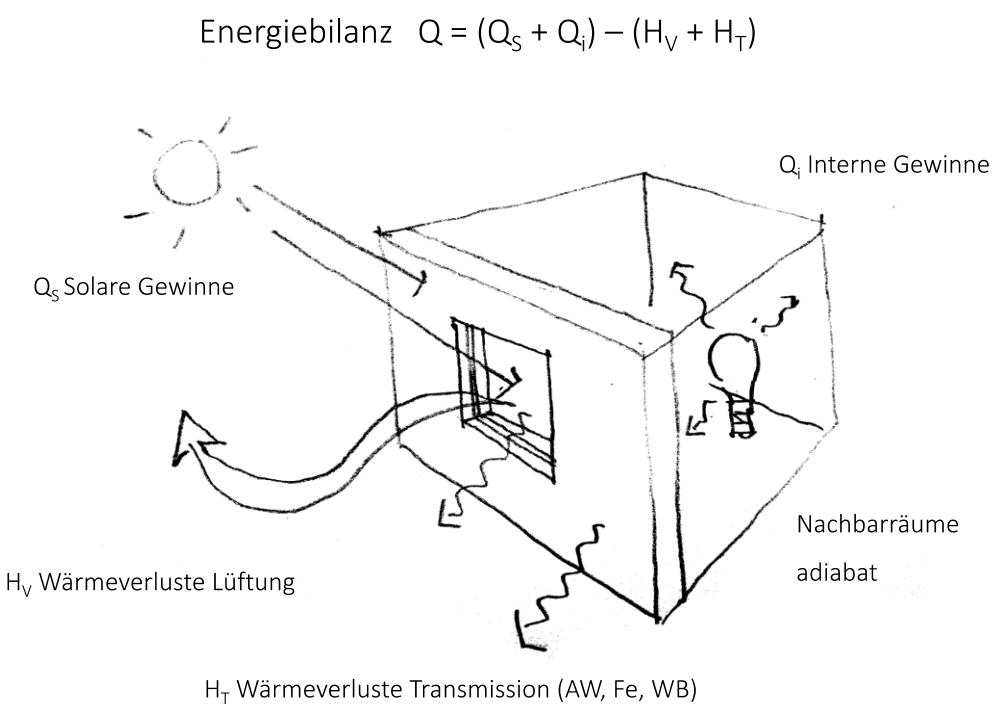


Abbildung 27: Variable Parameter der Voruntersuchung.

Für die jeweiligen variablen Parameter des Raummodells wurde jeweils ein sinnvoller Mittelwert (base case), orientiert am EnEV-Standard, sowie übliche Maximal- bzw. Mindestwerte festgelegt.

Tabelle 13: Variable Parameter der Voruntersuchung

Parameter	Einheit	Min-Wert	Base	Max-Wert
Raumtiefe	m	3	4,24	6
Raumhöhe	m	2,50	2,90	3,50
U-Wert Außenwand	W/m²K	0,14	0,28	0,56
Fensterflächenanteil	-	20 %	45 %	70 %
g-Wert	Faktor	0,4	0,6	0,8
U-Wert Fenster	W/m²K	0,7	1,3	1,9
Luftwechselrate	1/h	0,45	0,6	1,2
Wärmebrücke ΔU(WB)	W/m²K	0,025	0,05	0,1
Wärmegewinne intern	W/m²	1,875	3,75	7,5

Im Folgenden wird die Energiebilanz für den Base case danach mit den Mindestwerten für Fensterflächenanteil und g-Wert dargestellt, die übrigen Parameter behalten den Base case.

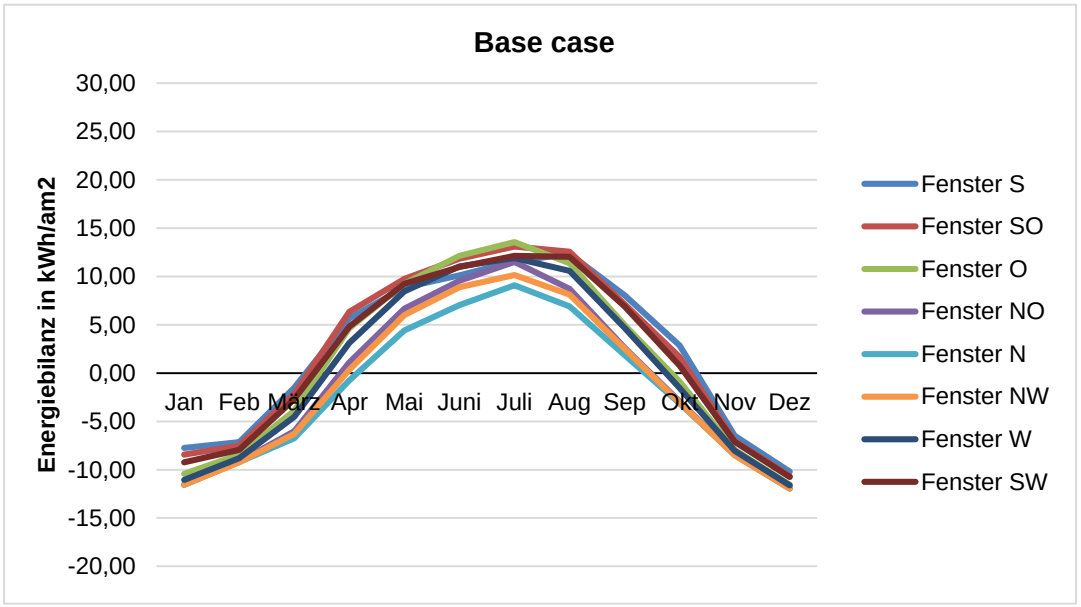


Abbildung 28: Energiebilanz der einzelnen Himmelsrichtungen für den Base case

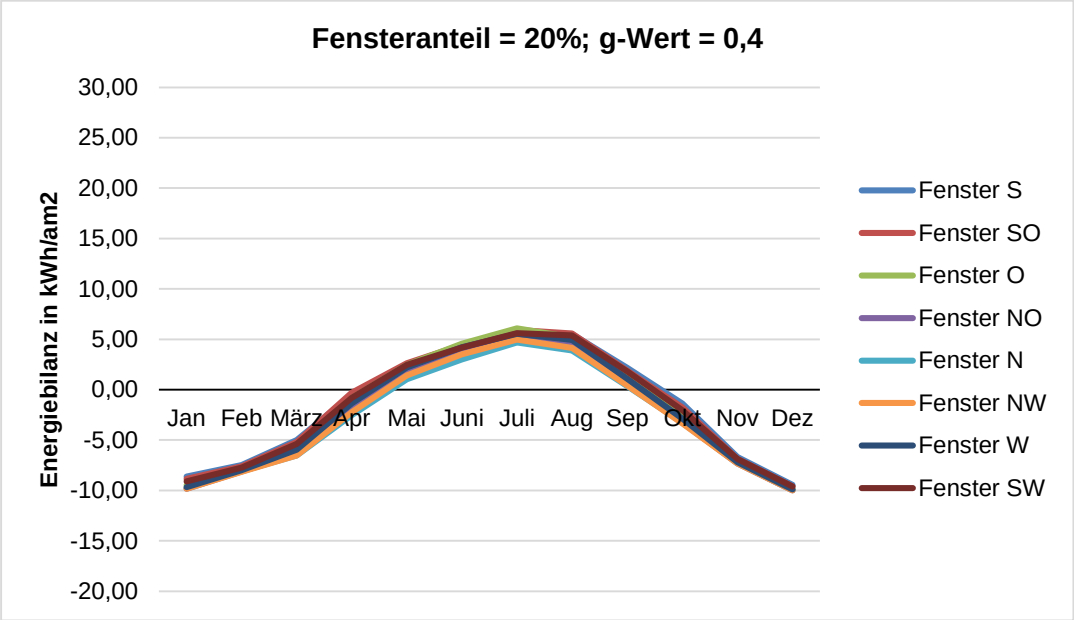


Abbildung 29: Energiebilanz der Himmelrichtungen die Mindestwerte bei Fensteranteil und g-Wert

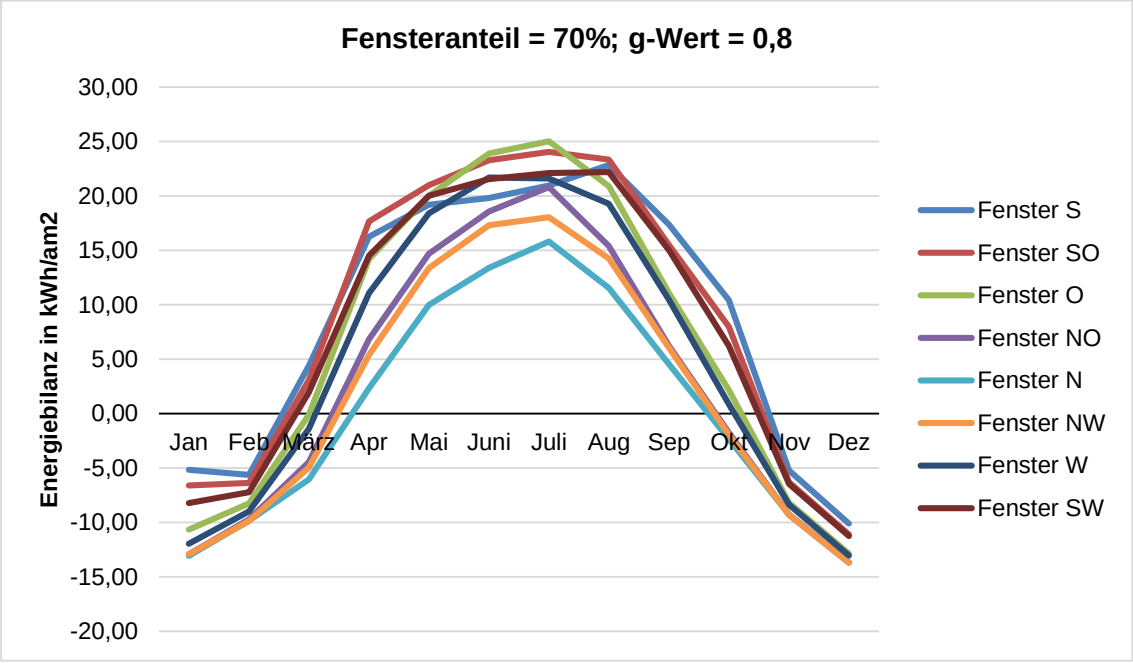


Abbildung 30: Energiebilanz der Himmelrichtungen die Maximalwerte bei Fensteranteil und g-Wert

Große Fenster und lichtdurchlässiges Glas produzieren im Sommer, wie zu erwarten war, einen hohen Energieüberschuss. Im Winter stellt sich eine zu erwartende Spreizung zwischen Nord- und Südseite ein. Gemittelt über die Himmelsrichtungen zeigt sich im Winter aber keine große Abweichung bei den oben dargestellten Parameterkombinationen. Um die unterschiedliche Auswirkung der verschiedenen Raumparameter auf den für den Energieverbrauch während der

Nutzung entscheidenden Winterfall besser diskutieren zu können, werden im Folgenden die einzelnen Parameter jeweils einzeln auf den Mindest- und Maximalwert gesetzt und mit dem Ergebnis des base case verglichen. Da hier der Winterfall betrachtet werden soll, werden nur Monate mit negativer Energiebilanz aufaddiert, und so der Heizwärmebedarf ermittelt.

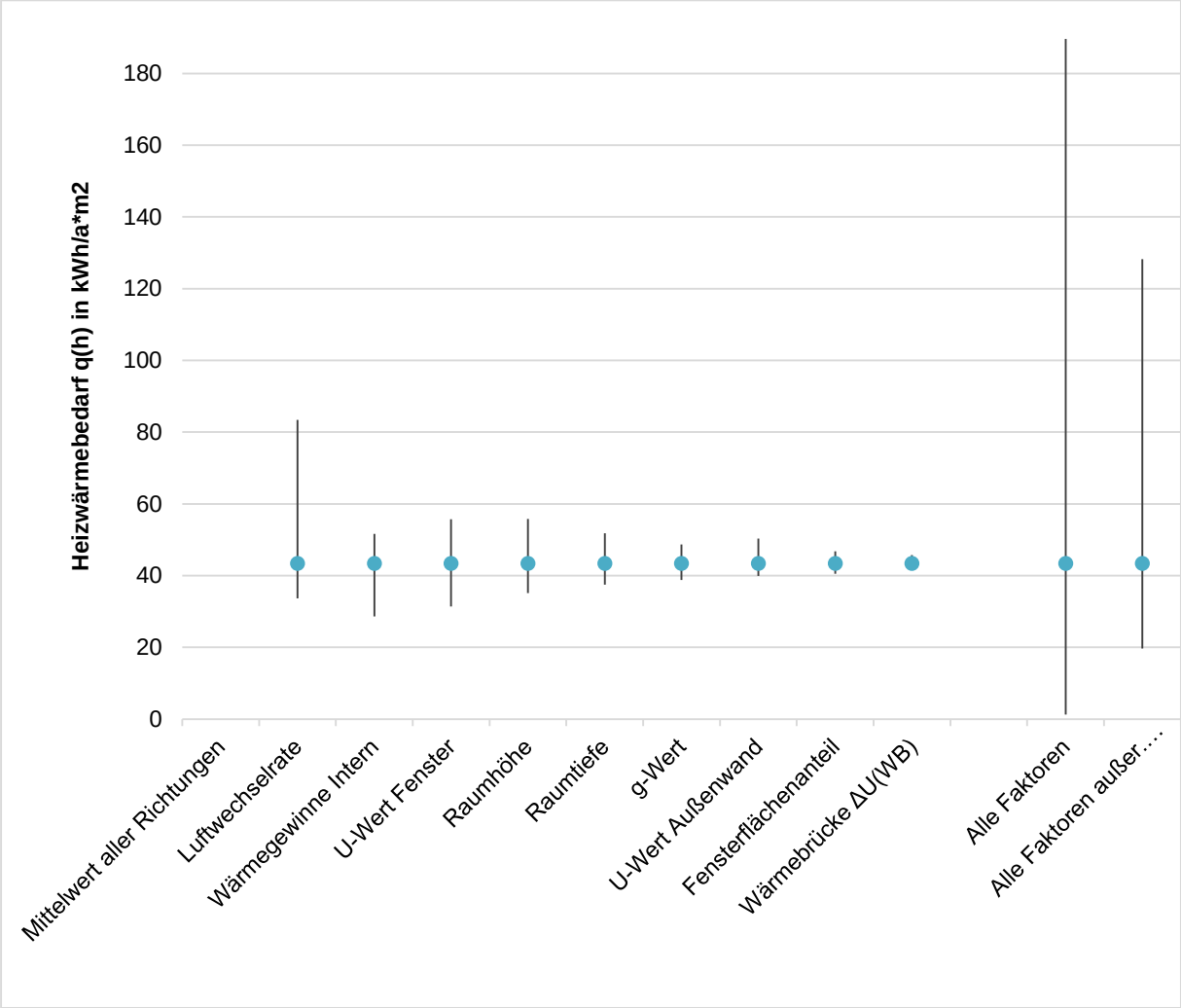


Abbildung 31: Auswirkungen der Parameterveränderungen auf den Heizwärmebedarf gemittelt über alle Haupthimmelsrichtungen

In der Abbildung 31 sind die Parameter absteigend nach Auswirkung auf den Heizwärmebedarf von links nach rechts sortiert. Ganz rechts in der Abbildung werden alle Parameter im Sinne eines geringen bzw. hohen Heizwärmebedarfs eingesetzt, um das Zusammenwirken der Änderung aller Parameter darzustellen. Daneben wird die Variante ohne Abweichung von Luftwechsel und internen Gewinnen vom base case gezeigt, also die Optimierungspotentiale dargestellt, die nur aus der Optimierung des Gebäudes möglich sind.

Die Abbildung 32 unterscheidet die einzelnen Haupthimmelrichtungen.

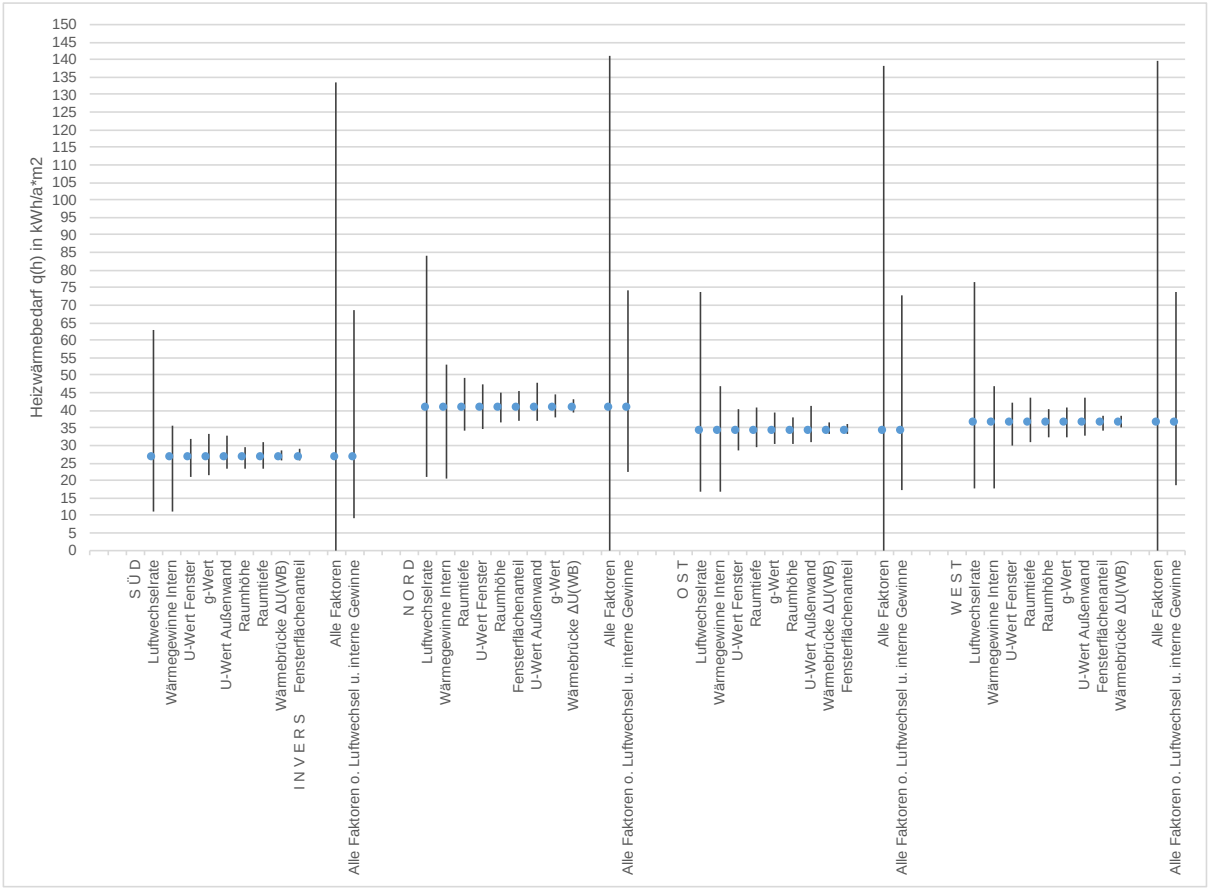


Abbildung 32: Auswirkungen der Parameterveränderungen auf den Heizwärmebedarf einzeln für die Haupthimmelsrichtungen

Diskussion der Voruntersuchung

Bezüglich des Heizwärmebedarfs zeigt sich folgende Gewichtung der Raumparameter:

Tabelle 14: Auswirkung der Raumparameter auf den Heizwärmebedarf

Parameter	Einheit	Min-Wert	base case	Max-Wert
Luftwechselrate	1/h	0,45 -22 %	0,6 100 %	1,2 +92 %
Wärmegewinne intern	W/m^2	1,875 +19 %	3,75 100 %	7,5 -34 %
U-Wert Fenster	W/m^2K	0,7 -28 %	1,3 100 %	1,9 +28 %
Raumhöhe	m	2,50 -19 %	2,90 100 %	3,50 +28 %
Raumtiefe	m	3 +19 %	1 100 %	6 -14 %
g-Wert	Faktor	0,4 +12 %	0,6 100 %	0,8 -11 %
U-Wert Außenwand	W/m^2K	0,14 -8%	0,28 100 %	0,56 +16 %
Fensterflächenanteil	%	20 -7 %	45 100 %	70% +8 %
Wärmebrücke ΔU(WB)	W/m^2K	0,025 -3 %	0,05 100 %	0,1 +5 %

Die beiden Parameter **Luftwechsel und interne Gewinne** haben innerhalb des gewählten Parameterrahmens den größten Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Der Luftwechsel wird durch den Nutzer und die Undichtigkeit des Gebäudes bestimmt. Die internen Gewinne sind vor allem abhängig von der Belegung und Nutzung des Raumes.

Der U-Wert der Fenster ist der entscheidendste baukonstruktive Parameter bezogen auf den Heizwärmebedarf. Selbst bei dem guten Ausgangswert von 1,3 W/m_2*K scheint ein substanzielles Optimierungspotential vorhanden zu sein.

Die beiden Parameter **Raumhöhe und Raumtiefe** haben Auswirkung auf die Kompaktheit eines Gebäudes. In dem gewählten Berechnungsmodell haben die Änderung dieser Parameter eine Auswirkung auf Luftwechselmenge und die Fläche von Außenwand und Fenster. Die sich einstellenden Effekte sind somit eine Überlagerung verschiedener Faktoren. Bei den weiteren Untersuchungen wird angestrebt, den Luftwechsel an ein Nutzerprofil zu knüpfen und nicht an das vorhandene Raumvolumen.

Der **g-Wert** hat gegenüber dem Fensterflächenanteil einen höheren Einfluss auf die solaren Gewinne im Winter. Dies gilt nicht für die Nordseite, dort ist der Fensterflächenanteil entscheidender. Unabhängig von der Himmelsrichtung hat der g-Wert einen entscheidenden Einfluss auf den Komfort im Sommer. Dies ist in der noch folgenden dynamischen Simulation weiter zu untersuchen.

Der Einfluss **U-Werts der Außenwand** hat verglichen mit den oben genannten Parametern einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Abhängig von der Kompaktheit, also dem Anteil der Außenwand an der gesamten Gebäudehülle, kann die Wertigkeit dieses Parameters noch variieren. Es scheint sinnvoll die Wechselwirkung zwischen Wanddicke, Flächengewinn, Heizwärmebedarf und Einfachheit der Konstruktion weiter zu untersuchen.

In Norden, Osten und Westen verringern kleine **Fensterflächen** den Heizwärmebedarf. Im Süden gibt es bezogen auf den U-Wert des Fensters von 1,3 W/m2*K fast keine Auswirkung, da sich solare Gewinne und Transmissionswärmeverluste nahezu ausgleichen.

Die **Wärmebrücken** haben im Rahmen der festgelegten Parametergrenzen einen unerwartet geringen Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Eine Verbesserung des heute in Deutschland üblichen Baustandard scheint kein Potential zur Verringerung des Heizwärmebedarfs zu haben. Es erscheint sogar sinnvoll zu untersuchen, ob einfache Konstruktionen durch deren Vorteile, wie Preis, Dauerhaftigkeit und Recyclingfähigkeit, die geringfügigen Effekte auf den Energie-verbrauch aufwiegen.

Im Ergebnis der Voruntersuchung werden die Parametergrenzen für die dynamische Simulation überprüft und teilweise verändert definiert.

4 Simulation und Berechnung auf Raumebene (MS 3 – MS 7)

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Simulation auf Raumebene beschrieben. Nach Definition eines Basis-Raummodells und der entsprechend zu variierenden Parameter (Abb. 36), wurde in einem ersten Schritt die Tageslichtverhältnisse der Varianten in der Softwareumgebung Rhinoceros/Grasshopper® mit dem Plug-in Honeybee (Radiance und Daysim) untersucht (Grasshopper, 2007) (Honeybee, 2016). Anschließend wurden die Varianten, die das Tageslichtkriterium erfüllen (Kapitel 4.2), thermisch dynamisch simuliert – ebenfalls in der Rhinoceros/Grasshopper®-Umgebung, wobei, das Plug-in TRNLizard mit dem Rechenkern der Software TRNSYS 18 genutzt wurde (TRNLizard, 2014). Die Ergebnisse zum energetischen Verhalten flossen in einem dritten Schritt in die LCA und LCC Berechnungen ein.

Für dieses Modul wurde das Nutzerverhalten sowie die Heiztechnik ideal angesetzt, und konstant ein Wetterdatensatz verwendet. In Schritt vier werden diese Parameter variiert, um das Raummodell auf seine Robustheit hin zu testen (Kapitel 4.4). Das folgende Kapitel 4.1 stellt zunächst die Eingangsparameter des Raummodells vor.

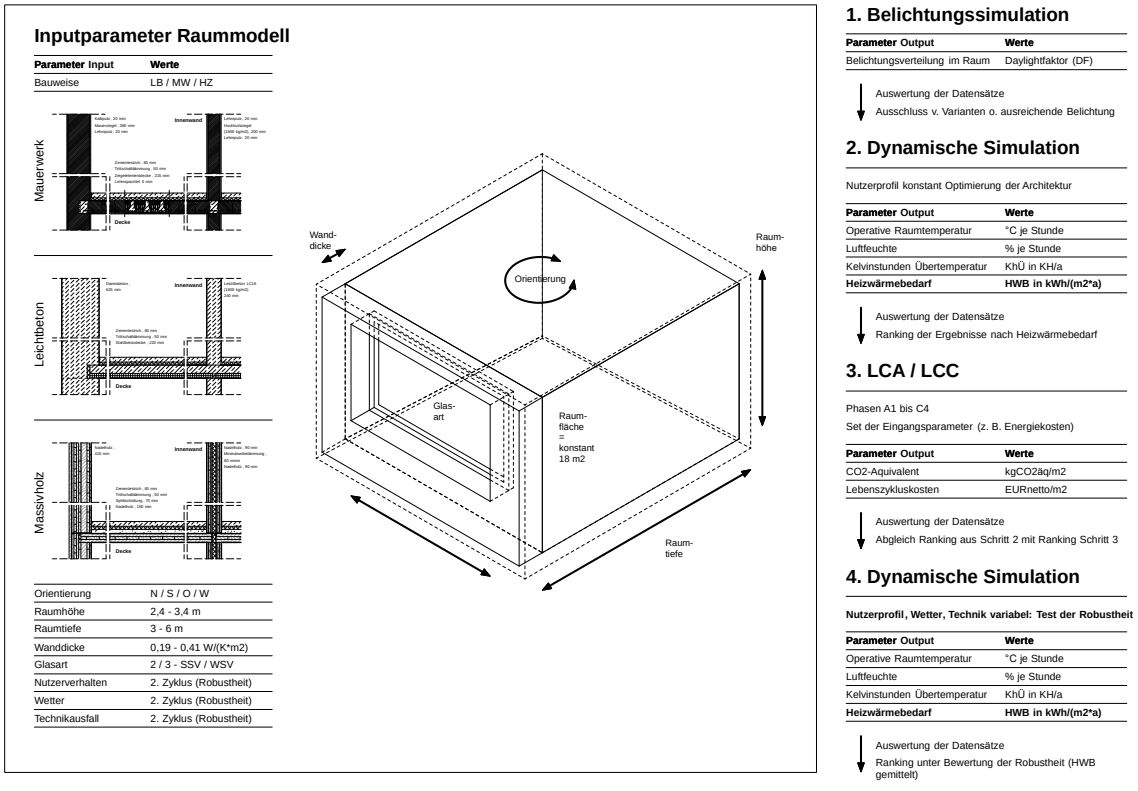


Abbildung 33: Schema der Untersuchungen auf Raumebene

4.1 Inputparameter Raummodell

4.1.1 Klimadaten

Die Studie zeigt eine Methodik auf, die die lokale Betrachtung der Klimadaten berücksichtigt. Da seit Beginn der Projektarbeit die Umsetzung der Erkenntnisse in reale Prototypen im Großraum München vorgesehen ist, werden in vorliegender Studie die Wetterdaten des Standortes München für die Simulationsvarianten des Raummodells verwendet.

Für die thermisch dynamische Simulation ist nach VDI der Testreferenzjahr-Datensatz (TRY) des Deutschen Wetterdienstes zu verwenden (VDI 6020, 2017). Der TRY-Datensatz zeigt den typischen Witterungsverlauf eines Jahres für ein bestimmtes Gebiet: Bislang wurde Deutschland in 15 TRY-Klimaregionen mit Repräsentanzstationen unterteilt, 2017 erfolgte eine Umstellung auf km²-Gebiete. Der TRY-Datensatz beinhaltet stündliche meteorologische Daten, bestehend aus repräsentativen Messwerten, die über einen langen Zeitraum ermittelt wurden (Vergleichsbasis). Für die Auslegung von heiz- und raumlufttechnische Anlagen werden extrem warme und kalte Witterungsprofile aus realen Halbjahreszeiträumen der Vergleichsbasis herangezogen (Deutscher Wetterdienst, 2018).

Der Datensatz TRY2017 als aktueller Wetterdatensatz des DWD war zum Startzeitpunkt des Projektes noch nicht veröffentlicht. Daher wurde in vorliegender Studie der Datensatz TRY2011 in den Simulationen verwendet, wobei die horizontale Direkt- und Diffusstrahlung korrigiert wurde (solartime) (Lam and Hiller, 2014). Es wurde nicht das Normaljahr, sondern die Extrem-wetterdaten gewählt, um die langfristige Funktionsfähigkeit des Raummodells testen zu können. Zudem wird berücksichtigt, dass im Zuge der Klimaveränderung die TRY2011 Extremwetterdaten die heutige Klimasituation deutlich wiederspiegeln. Die gewählte Klimaregion 13 mit der Repräsentanzstation Mühldorf wurde auf die Stadt München bezogen, indem die geodätische Höhe an den Standort (405 m) angepasst, und der „Urban Heat Island Effect“ (UHI) auf Lufttemperatur und relative Feuchte bei einer Stadtgröße von 1,3 Millionen Einwohnern berücksichtigt wurde. Im Vergleich zu Mühldorf führt hier der UHI-Effekt im Durschnitt zu 1,7 K erhöhten Lufttemperaturen. Die Bezeichnung des verwendeten Wetterdatensatzes in vorliegender Arbeit lautet: Munich_City_Region_13x.

Folgende Parameter gehen durch den Datensatz Munich_City_Region_13x in die Simulation ein:

- Lufttemperatur [°C]
- Relative Luftfeuchte [%]
- Absoluter Luftdruck [Pa]
- Direkte und diffuse Horizontalstrahlung [W/m²]
- Windgeschwindigkeit [m/s]
- Windrichtung [N = 0°]
- Bedeckungsgrad [0-8]

Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung und Windsituation werden durch folgende Grafiken für den Standort München über das Jahr veranschaulicht.

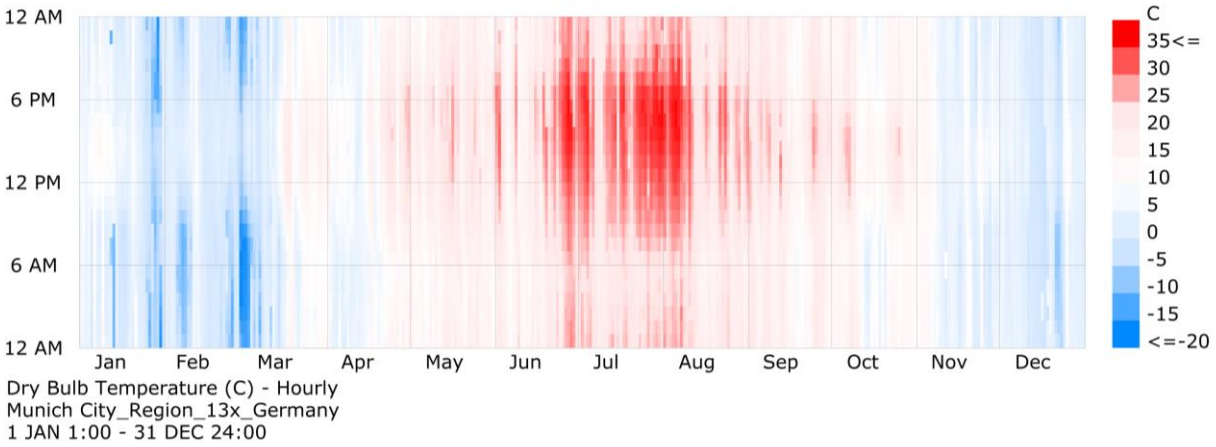


Abbildung 34: Verlauf der Außenlufttemperatur über Jahr (X-Achse) und Tag (Y-Achse)

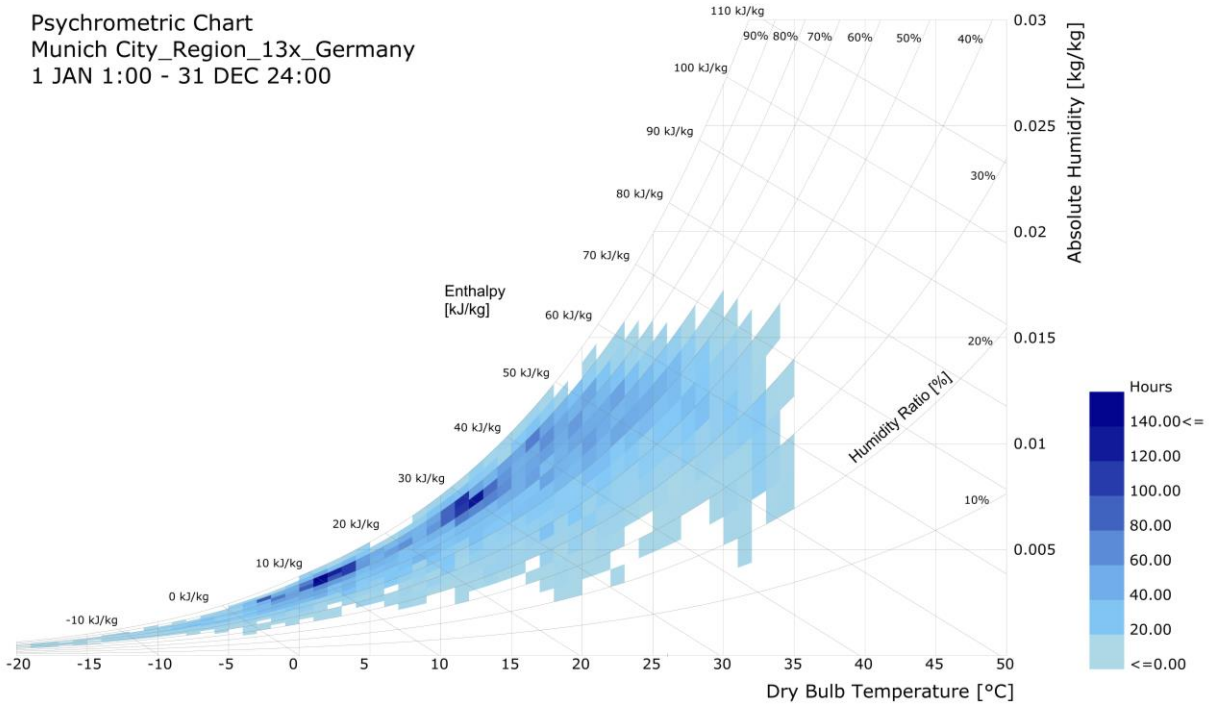


Abbildung 35: hx-Diagramm mit absoluter Feuchte (Y-Achse) über die Außenlufttemperatur (X-Achse)

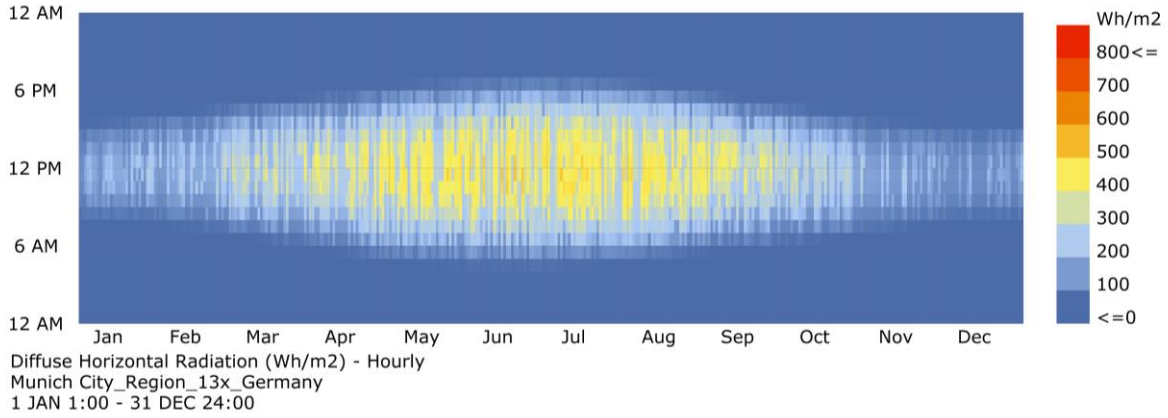


Abbildung 36: Verlauf der diffusen Horizontalstrahlung über Jahr (X-Achse) und Tag (Y-Achse)

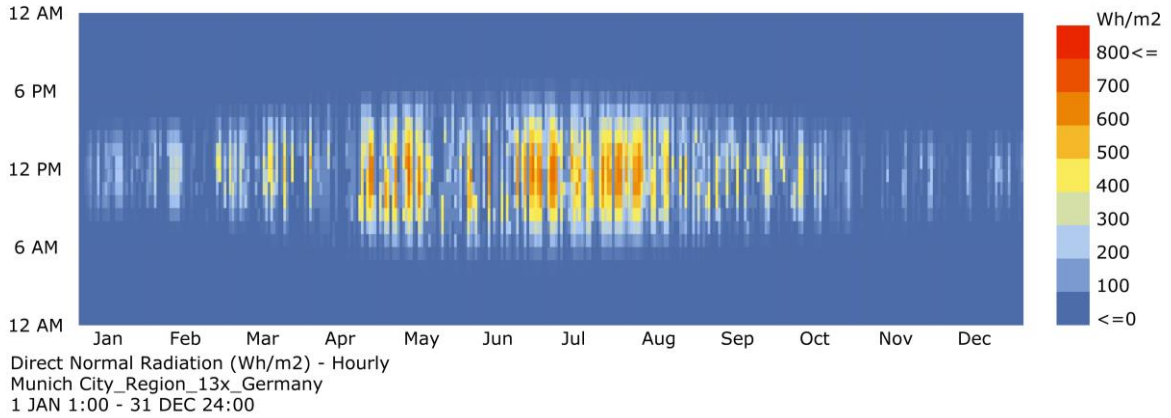


Abbildung 37: Verlauf der direkten Horizontalstrahlung über Jahr (X-Achse) und Tag (Y-Achse)

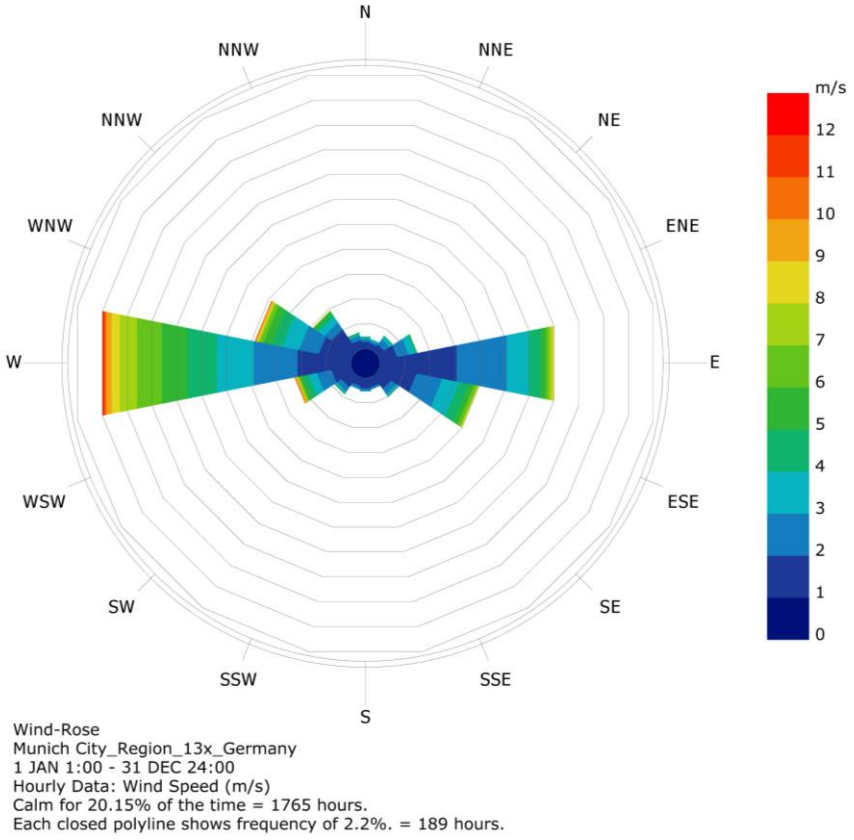


Abbildung 38: Windrose mit Angabe der Windgeschwindigkeit (Farbskala)

4.1.2 Raumgeometrie

Das Raummodell bildet ein durchschnittliches Studentenzimmer eines Wohnheimes nach und basiert auf einer Nettogrundfläche von 18 m². Dabei handelt es sich um den Mittelwert der nach den bayerischen *Richtlinien für die Förderung von Wohnraum für Studierende* vorgegebenen Minimal- und Maximalwerte (Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr, 2015). Hintergrund ist die Anwendung der Erkenntnisse auf drei Studentenwohnheime als Prototypen.

Für die Fassadengliederung sowie für die Raumtiefe wurde jeweils eine Spanne von 3 bis 6 m festgelegt (Innenraummaße), wobei die Wertepaare Tiefe/Breite in Kombination immer eine Nettogrundfläche von 18 m² ergeben. Bezüglich der Raumtiefe orientiert sich der Minimalwert an dem Mindestplatzbedarf eines Wohnraums nach Neufert (Neufert and Kister, 2012), der Maximalwert an der gesetzlichen Mindestanforderung an die Tageslichtnutzung (DIN 5034-1:2011).

Die Raumhöhe variiert von 2,40 bis 3,40 m. Der untere Grenzwert richtet sich nach MBO § 47, Abs. 1 (Bund / Bauministerkonferenz vom 21.09.2012, 2012), während der obere Grenzwert so gewählt wurde, dass eine Nutzungsflexibilität über den Lebenszyklus des Gebäudes gewährleistet werden kann.

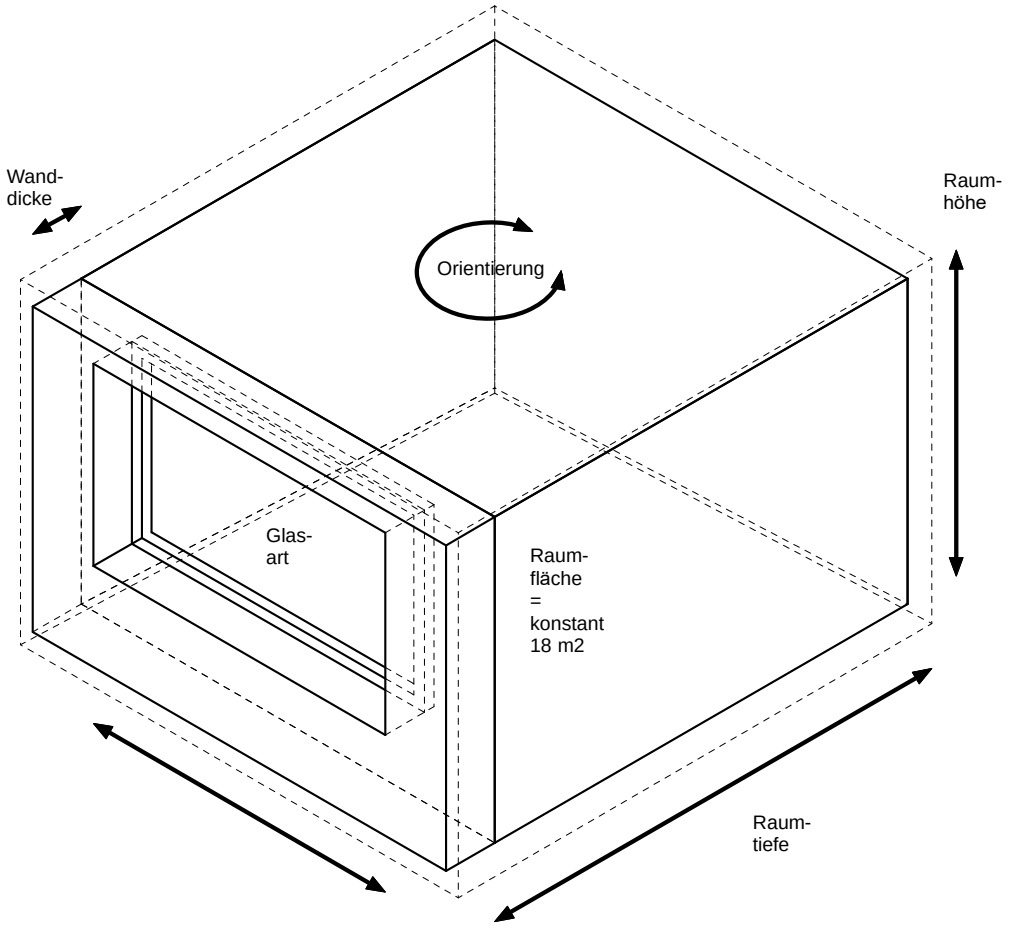


Abbildung 39: Raumgeometrie Parameter

Die Festlegung der Fensteröffnung wird auf das Verhältnis von geschlossener zu transparenter Außenwand bezogen. Der minimale Fensterflächenanteil ist dabei nach MBO § 47, Abs. 2 mit einem Rohbaumaß der Fensteröffnung von mindestens 1/8 der Nettogrundfläche des Raumes festgelegt (Bund / Bauministerkonferenz vom 21.09.2012, 2012). Die maximal mögliche Fensterfläche ist gegeben durch Brüstung- und Sturzhöhe, welche ein Fensterband aufspannen. Um nach diesen Vorgaben Raumvarianten mit funktionierenden Fensterflächen vorab selektieren zu können, wird die Tageslichtsimulation der thermisch dynamischen Simulation vorangestellt (Kapitel 4.2).

4.1.3 Glasqualitäten

Neben dem Fensterflächenanteil spielt die Qualität des Glases eine entscheidende Rolle für die Tageslichtversorgung und das thermische Verhalten eines Raumes. Flächengröße und Qualität des Glases beeinflussen die Tageslichtversorgung, den Energieeintrag, sowie die

Transmissionswärmeverluste. Bei Sonnenschutzgläsern werden die energiereichen Wellenlängen des Sonnenlichts an der Außenbeschichtung des Glases reflektiert, um so die internen solaren Gewinne zu mindern. Für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes definiert die DIN 4108-2 Gläser mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert < 0,4 als Sonnenschutzgläser.

Das proportionale Verhältnis von Lichttransmissions- (Tvis) und Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) bewirkt konträre Effekte auf Tageslichtversorgung und sommerlicher Wärmeschutz. Um diese Auswirkung auf das Raumklima in den Raummodellen zu untersuchen, werden in der Simulation neben zwei Sonnenschutzgläsern auch zwei Wärmeschutzgläser mit je unterschiedlichen Fensterflächen kombiniert. Es werden je Glasart zwei Gläser betrachtet, um auch den U-Wert des Glases variieren zu können. Tabelle 15 zeigt die in der Simulation verwendeten Glasarten und ihre Parameter.

Tabelle 15: Parameter der in der Simulation verwendeten Sonnen- und Wärmeschutzgläser

Win-ID	**U-Wert**	**g-Wert**	**Tsol**	**Tvis**	**Scheiben**
Sonnenschutzglas					
14504	0,62	0,20	0,17	0,36	3
11414	1,12	0,23	0,19	0,37	2
Wärmeschutzglas					
3306	0,63	0,49	0,41	0,71	3
3212	1,18	0,74	0,66	0,81	2

4.1.4 Baukonstruktion

Außenwand-, Innenwand-, Boden- und Deckenkonstruktionen werden jeweils in den drei oben untersuchten Materialien gelochter Ziegel, Dämmbeton und Massivholz ausgeführt. Dabei werden drei Wandstärken unterschieden, wobei die mittlere Wandstärke eines jeden Materials (Base) den U-Wert von 0,28 W/m²K nach EnEV2014/16 ergibt (Tabelle 16). Davon deutlich abweichend, stellen die Min- und Max-Wandstärken Extremfälle dar, um die Auswirkungen von U-Wert und Speichermasse auf Raumklima, Energieeffizienz, Ökologie (LCA) und Ökonomie (LCC) zu betrachten. Tabelle 16 zeigt die in der Simulation verwendeten bauphysikalischen Werte der jeweiligen Baukonstruktionen.

Tabelle 16: Bauteile des Raummodells für die thermisch dynamische Simulation

	Min	Base	Max	Wärme-		Wärme-
A1 Ziegel Monolithisch	Dicke	Dicke	Dicke	leitzahl	Rohdichte	kapazität
Außenwand	(mm)	(mm)	(mm)	λ (W/mK)	ρ (kg/m3)	c (kJ/kg*K)
Lehmputz	15	20	30	0.900	1500	1.00
Gelochter Ziegel	240	365	550	0.110	750	0.94
Aussenputz Kalk / Kalkzement	15	20	30	0.900	1500	1.00
Summe	270	405	610			
U-Wert (W/m²K)	0.419	0.283	0.191			
Decke						
Zementestrich		80		1.400	2000	1.00
Trittschalldämmung Mineralwolle		50		0.035	100	0.60
Elementziegeldecke		200		0.800	1800	0.95
Lehmputz		20		0.900	1500	1.00
Summe		350				
U-Wert (W/m²K)		5.859				
Innenwand						
Lehmputz		20		0.900	1500	1.00
Hochlochziegel (1800 kg/m3)		215		1.800	1800	0.94
Lehmspachtel		5		0.900	1500	1.00
Summe		240				
A1 Dämmbeton Monolithisch						
Außenwand						
Leichtbeton	416	625	937	0.185	800	0.87
Summe	416	625	937			
U-Wert (W/m²K)	0.413	0.282	0.191			
Decke						
Zementestrich		80		1.400	2000	1.00
Trittschalldämmung Mineralwolle		50		0.035	100	0.60
Sichtbetondecke		220		2.400	2400	1.00
Summe		350				
Innenwand						
Leichtbeton LC16 (1800 kg/m3)		240		1.150	1800	1.00
Summe		240				
A1 Holz Monolithisch						
Außenwand						
Nadelholz	270	410	615	0.120	410	1.60
Summe	270	410	615			
U-Wert (W/m²K)	0.413	0.279	0.189			
Decke						
Zementestrich		80		1.400	2000	1.00
Trittschalldämmung Mineralwolle		50		0.035	100	0.60
Splittschüttung		70		2.000	1800	1.00
Nadelholz		150		0.120	410	1.60
Summe		350				
Innenwand						
Nadelholz		90		0.120	410	1.60
Mineralwolledämmung		60		0.035	100	0.60
Nadelholz		90		0.120	410	1.60
Summe		240				

4.1.5 Verschattung

Eine Verschattung wird im ersten Simulationsdurchgang nur in Form der passiven Eigenverschattung durch die Fensterlaibungstiefen vorgenommen, ein aktiver Sonnenschutz wird

zunächst nicht herangezogen. Abhängig von den Außenwandkonstruktionen werden sowohl in der Tageslichtsimulation, als auch in der thermisch dynamischen Simulation die Laibungstiefen im Raummodell angesetzt.

Diese Methode soll aufzeigen, wie gut sich der Raumkomfort mit passiven Maßnahmen herstellen lässt. In einem zweiten Schritt wird der Effekt eines variablen außenliegenden Sonnenschutzes betrachtet (siehe Kap. 4.4).

4.1.6 Orientierung

Die solaren Einträge in den Raum sind abhängig von dem jahreszeitlichen Sonnenstand und der Orientierung. Abbildung 40 zeigt für den Standort München den Tages- und Jahresverlauf des Sonnenstands nach Himmelsrichtung und Einstrahlwinkel (Landeshauptstadt Stuttgart, 2018). Der resultierende solare Aufschlag auf die opake und transparente Fassadenfläche beeinflusst damit das Raumklima.

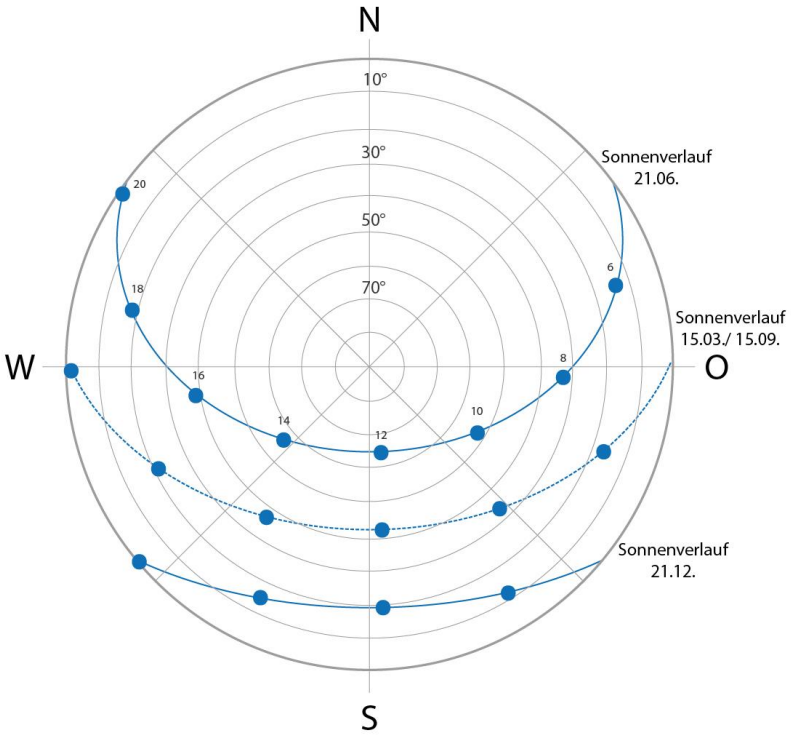


Abbildung 40: Sonnenstandsdiagramm für den Standort München (Landeshauptstadt Stuttgart, 2018)

Für den Sommer gilt: Die nach Norden orientierten Fassaden (NO, NW) werden ausschließlich in den Monaten Mai bis Juli in den frühen Morgenstunden bzw. späten Abendstunden bei

Sonnenhöchststand mit Sonnenstrahlung versorgt. Im Süden trifft die Sonnenstrahlung mittags über wenige Stunden in steilem Sonnenwinkel von ca. 50 bis 65° auf die Gebäudehülle. Dahingegen werden Ost-West Fassaden mit niedrigem Einstrahlwinkel über viele Stunden vormittags bzw. nachmittags beaufschlagt.

Für den Winter gilt: Die Sonne trifft hauptsächlich auf die nach Süden orientierte Gebäudehülle, bei einem Anstellwinkel von 5 bis 20°.

In der thermisch dynamischen Simulation werden alle Orientierungen bei unterschiedlichen Außenwandkonstruktionen und Fensterflächen berücksichtigt, wohingegen die Tageslicht-simulation den Tageslichtkoeffizienten ermittelt (nur Diffusstrahlung), und somit nicht nach Himmelsrichtung unterscheidet (Kapitel 4.2).

4.1.7 Interne Lasten

Die internen Lasten im Raummodell ergeben sich aus der Belegung von einer Person pro Studentenraum – das entspricht einer Belegungsdichte von 18 m²/Person – mit einer Wärmeabgabe der Person von 75 W sowie der Wärmeabgabe eines Laptops von 70 W. Zusätzlich fallen bei der Nutzung des Kunstlichts 4 W/m² installierte Lichtleistung an.

Die Anwesenheitszeit wurde konstant über das Jahr mit täglich 0 bis 8 Uhr und 12 bis 24 Uhr angesetzt. Das Betriebsprofil für Laptop und Kunstlicht wurde ebenfalls konstant über das Jahr mit täglich 12 Vollaststunden angegeben. Für die Steuerung des Kunstlichts nach Beleuch-tungsstärke im Raum wird je Variante der in der Tageslichtsimulation ermittelte Tages-lichtquotient (DF) in die thermisch dynamische Simulation übertragen und berücksichtigt.

Das Nutzerprofil im Zuge des Robustheitstests variiert.

4.1.8 Heizung

Für eine vergleichende Studie bezüglich der Raumqualität (ohne Einflüsse verschiedener Heizsysteme) wird ein idealer Heizer simuliert: In direkter Wirkungsweise wird die notwendige Energie aufgewendet, um den Raum auf eine operative Lufttemperatur von 21°C, mit einer Nachtabsenkung von 2 K, zu heizen. Die Wirkungsweise entspricht schnellreagierenden Heiz-systemen (z.B. Heizkörper, Infrarotheizung, Heizlack). Der ideale Heizer gleicht absolute Spitzenlasten aus, d.h. ein kurzfristiges Absinken der Raumtemperatur wird ausgeglichen, was den „worst case“ des Heizenergiebedarfs darstellt (praxisrelevant). Der Raum wird beheizt, sobald sich Außentemperaturen von unter 12°C/24h einstellen.

4.1.9 Lüftung

Die Lüftungsstrategie nutzt die Effekte der natürlichen Lüftung inklusive der freien Nachtlüftung (Speichermasse). Um in einem nutzungsflexiblen Raum den Feuchteschutz gewährleisten zu

können, wird eine konstante Luftinfiltration von *0,5 m³/(m²*h)* angesetzt. Die Angabe Luftmenge pro Quadratmeter und Stunde als fixe Bezugsgröße wurde gewählt, da aufgrund der parametrisierten Raumdimension verschiedene Raumvolumina zustande kommen – und somit die Luftwechselrate als volumenabhängige Bezugsgröße zu einer falschen Annahme führen würde. Bei den gegebenen Intervallen der Raumparameter liegt der Infiltrationsluftwechsel des mittleren Raumvolumens bei 0,17/h.

Es wird von einem intelligenten Nutzer ausgegangen, der bis zu einer Raumlufttemperatur von 23°C die Fenster so öffnet, dass ein notwendiger hygienischer Luftwechsel (mittlere Raumluftqualität IDA 2, 30 m³/(h*Person)) von 1,25 m³/(m²*h) gewährleistet wird. Bei einem mittleren Raumvolumen entspricht dies einem Luftwechsel von 0,43/h.

Ab einer Raumtemperatur von 23°C wird von einer zusätzlichen Ablüftung von Wärme durch das Öffnen der Fenster aufgrund einer Querlüftungsmöglichkeit (z.B. durch Klappen an der Innenwand zum Flur) von 11,6 m³/(m²*h) ausgegangen. Bei einem mittleren Raumvolumen entspricht dies einem 4-fachen Luftwechsel. Ab einer gefallenen Raumlufttemperatur auf 21,5°C findet keine Ablüftung statt.

Auch für die Nachtlüftung wird eine Querlüftungsmöglichkeit vorausgesetzt, so dass ein Luftwechsel von 11,6 m³/(m²*h) einsetzt, wenn die Raumlufttemperatur 23°C erreicht bzw. übersteigt. Die Fensteröffnungen schließen wieder, sobald die Raumlufttemperatur auf 21,5°C sinkt bzw. diese unterschreitet.

4.1.10 Zusammenfassung der Inputparameter

In folgender Tabelle sind die Inputparameter der Simulation (konstant und variabel) mit Angabe ihrer Werte sowie Referenzen zusammengefasst dargestellt:

Tabelle 17: Überblick der Inputparameter für das Raummodell

Inputparameter		**Referenz**
Klimadaten	Munich_City_Region_13x Sommerklimaregion B	(Deutscher Wetterdienst, 2018) (Lam and Hiller, 2014) (DIN 4108-2:2013)
Raumgeometrie		
Fassadenbreite	3,00 – 6,00 m	(Neufert and Kister, 2012)
Raumtiefe	3,00 – 6,00 m	(Neufert and Kister, 2012) (DIN 5034-1:2011)
Raumhöhe	2,40 – 3,40 m	(Bund / Bauministerkonferenz vom 21.09.2012, 2012) § 47, Abs. 1

Mindest-Fensterfläche	1/8 der NGF (Rohbaumaß)	(Bund / Bauministerkonferenz vom 21.09.2012, 2012) § 47, Abs. 2
Glasqualität		
Sonnenschutzglas	U-Wert 0,62 | 1,12 W/m²K g-Wert 0,20 | 0,23 Tvis 0,36 | 0,37	(DIN 4108-2:2013)
Wärmeschutzglas	U-Wert 0,63 | 1,18 W/m²K g-Wert 0,49 | 0,74 Tvis 0,71 | 0,81	(DIN 4108-2:2013)
Baukonstruktion	monolithisch Mauerwerk, Dämmbeton, Massivholz U-Wert: 0,19 - 0,42 W/m²K	Kapitel 4.1.4
Verschattung	Laibungsverschattung	
Orientierung	Nord, Ost, Süd, West	
Interne Lasten		
Belegung	18 m²/Person	Angelehnt an DIN 4108-2:2013 mit Anpassung an die Grundstrukturen des einfachen Bauens
Wärmeabgabe	75 W/Person	
Nutzungszeit	0-8 Uhr / 12-24 Uhr	
Geräte	1 Laptop/Person á 70 W	
Kunstlicht	4 W/m²	
Heizung		
Heizsystem	Idealer Heizer	Angelehnt an DIN 4108-2:2013 mit Anpassung an die Grundstrukturen des einfachen Bauens
Solltemperatur	T_{op} = 21°C	
Nachtabsenkung	2 K	
Heizgrenze	Außentemperatur >12°C/24h	
Lüften		
Luftinfiltration	0,5 m³/(m²*h)	Bauen mit Weitblick (laufendes TUM-Forschungsprojekt)
Nutzerlüftung (ideal)	1,25 m³/(m²*h)	IDA II, (DIN EN 13779, 2007)
Entwärmungslüftung (Tag und Nacht)	11,6 m³/(m²*h) | 21,5°C > T_{air} < 23°C	

4.2 Tageslichtsimulation

4.2.1 Tageslichtkriterium

Um die Anzahl der Varianten effizient zu gestalten – d.h. vorselektieren zu können, werden die limitierenden Kriterien Tageslicht, thermischer Komfort, und Heizwärmebedarf schrittweise vollzogen.

Zunächst wird als limitierendes Kriterium die Tageslichtversorgung in der Softwareumgebung Rhinoceros/Grasshopper® mit dem Plug-in Honeybee (Radiance und Daysim) untersucht

(Grasshopper, 2007) (Honeybee, 2016): Denn nur Raumvarianten, welche die Mindestanforderung nach Norm an die ganzjährige Tageslichtversorgung erfüllen, werden im zweiten Schritt thermisch dynamisch simuliert. Zielwert der Tageslichtsimulation ist nach DIN 5034-1 ein durchschnittlicher Tageslichtquotient DF (Daylight Factor) von wenigstens 2% (DIN 5034-1:2011).

Der DF ist das prozentuale Verhältnis der aufgrund des Tageslichts bestehenden Beleuchtungsstärke in einem Punkt (Durchschnittswert aller Sensorpunkte) im Raum auf Arbeitshöhe Ep und der gleichzeitig vorhandenen Beleuchtungsstärke im Freien auf horizontaler Ebene bei unverbauter Himmelshalbkugel und bewölktem Himmel Ea:

$$DF = \frac{Ep}{Ea} * 100\%$$

Es gilt zu beachten, dass die direkte Sonnenstrahlung bei Ep und Ea nicht berücksichtigt wird. Demnach ergibt sich kein Unterschied in der Orientierung des Raummodells, so dass die Orientierung als Parameter der Tageslichtsimulation in vorliegender Studie entfällt. Dies entspricht nicht den realen Verhältnissen und sollte in Zukunft nach Möglichkeit durch einen Index, der die diffuse und die direkte Strahlung einrechnet, ersetzt werden. Ein Beispiel wäre der sDA-Index, der jedoch bisher nur für Bürogebäude getestet wurde (Illuminating Engineering Society of North America, 2012). Vielversprechend bezüglich eines künftigen sDA-Index für den Wohnungsbau erscheinen aktuelle Publikationen (Reinhard, 2018).

4.2.2 Methode

Der Fensterflächenanteil (FFA) ist bei der Tageslichtsimulation ein entscheidender Faktor und wird als Parameter variiert. Sind keine Randbedingungen bezüglich der Fensteranordnung gegeben, so wird in der Tageslichtsimulation die Fensterfläche zentriert angeordnet, wie es die obere Fassadenmodell-Reihe in Abbildung 41 zeigt. In vorliegender Studie bestehen als Randbedingungen eine fixe Brüstungshöhe von 0,9 m sowie ein Sturz von 0,2 m. Damit ergibt sich ein Fensterband, das in der Studie mit drei Ausnutzungsgraden der maximal möglichen Fensterbandfläche ηFF untersucht wurde: 0,40, 0,65 und 0,90 (Abbildung 41, unten). Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Raumdimensionen in der Studie variieren – sich somit als die Fassadenfläche ändert und drei fixe FFA-Werte damit nicht möglich sind. Abbildung 41 zeigt drei Beispiele, welche Fensterflächenanteile FFA den jeweiligen Ausnutzungsgraden ηFF entsprechen können (60, 40, und 20%). Diese FFA-Werte ändern sich jedoch mit der sich ändernden Fassadenfläche, während der ηFF-Wert unverändert bleibt, und somit als Inputparameter für die Simulation dienen kann.

Wird dabei die nach MBO minimale Fensterfläche (18/8 = 2,25 m² Rohbaumaß) unterschritten, so wird die Variante beibehalten, sollte DF ≥ 2% sein.

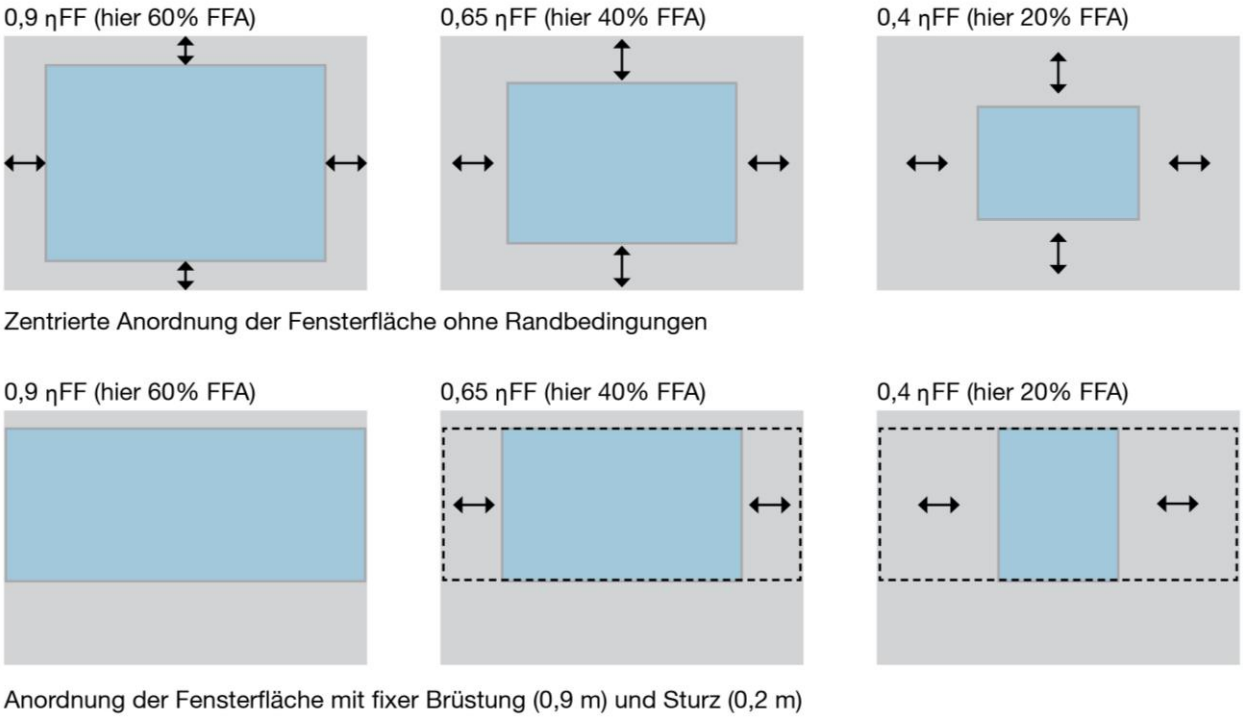


Abbildung 41: Anordnung der Fensterfläche im Tageslicht-Simulationsmodell - Normalfall (oben) und Studie (unten)

Neben dem Ausnutzungsgrad der Fensterfläche – bzw. dem Fensterflächenanteil – wurden folgende Parameter in der Simulation variiert, da sie die Beleuchtungsstärke im Raum beeinflussen:

Tabelle 18: Variierte Parameter der Tageslichtsimulation

Parameter		Anzahl
Orientierung	Nicht berücksichtigt (Bewertung nach DF – keine direkte Strahlung)	-
Raumtiefe [m]	3,00 | 4,25 | 6,00	3
Raumhöhe [m]	2,40 | 2,90 | 3,40	3

Laibungstiefe MIN [m] Laibungstiefe BASE [m] Laibungstiefe MAX [m]	0,28 (Ziegel, Holz) | 0,40 (Beton) 0,40 (Ziegel, Holz) | 0,60 (Beton) 0,62 (Ziegel, Holz) | 0,94 (Beton)	3 x 2
Lichttransmission Tvis_3s [%] Lichttransmission Tvis_2s [%]	0,36 | 0,71 0,37 | 0,81	2 x 2
Ausnutzungsgrad ηFF	0,40 | 0,65 | 0,90	3
Variantenanzahl gesamt		648

Die Varianten wurde in Gruppen nach Laibungstiefe (= Wandstärke) und Fensterglastyp 2-Scheiben bzw. 3-Scheibenverglasung) zu je 108 Varianten gerechnet und ausgewertet. Dabei wurden folgende Bezeichnungen verwendet, die im weiteren Text gebraucht werden:

Tabelle 19: Bezeichnung der gruppierten Varianten der Tageslichtsimulation

Gruppenname	DF_MIN_3s	DF_BASE_3s	DF_MAX_3s	DF_MIN_2s	DF_BASE_2s	DF_MAX_2s
Laibung	0,28 | 0,40	0,40 | 0,60	0,62 | 0,94	0,28 | 0,40	0,40 | 0,60	0,62 | 0,94
Tvis	0,36 | 0,71	0,36 | 0,71	0,36 | 0,71	0,37 | 0,81	0,37 | 0,81	0,37 | 0,81
Anzahl	108	108	108	108	108	108

4.2.3 Ergebnisse

Um einen Eindruck von der Spannweite der resultierenden DF-Werte in vorliegender Studie zu bekommen, zeigt Abbildung 42 zwei extreme Beispiele: das schlecht belichtete linke Raummodell mit einem DF von 0,53% erfüllt das Tageslichtkriterium nicht und scheidet somit aus. Das rechte Raummodell mit hoher Raumhöhe, geringer Raumtiefe, geringer Laibungstiefe, und einem Fenster mit hohem Lichttransmissiongrad und großem FFA (60%) übertrifft mit einem DF von 10,9% das Kriterium weit.

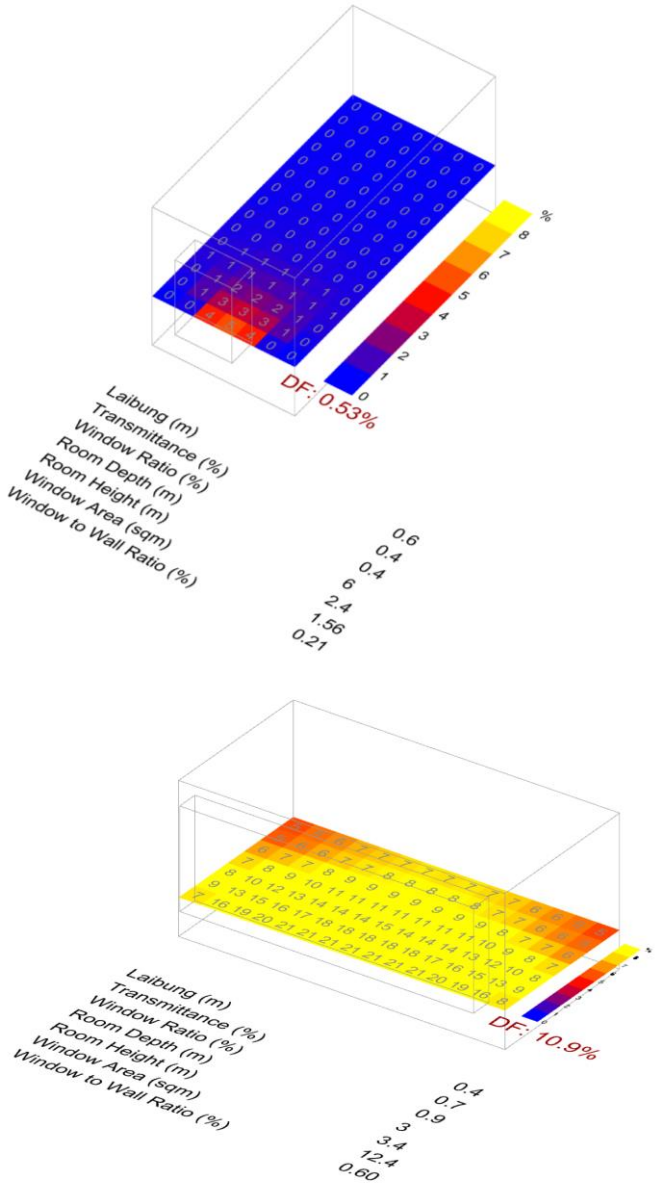


Abbildung 42: Extrembeispiele für den DF der vorliegenden Studie

Bei der weiteren Betrachtung aller Ergebnisse wurde festgestellt, dass verschiedene Raumdimensionen den gleichen DF aufweisen können. Wesentlichen Einfluss auf den DF hat dabei der FFA.

Für die sechs Varianten-Gruppen aus Tabelle 21 wurden folgende Aufteilungen nach dem DF-Kriterium erzielt:

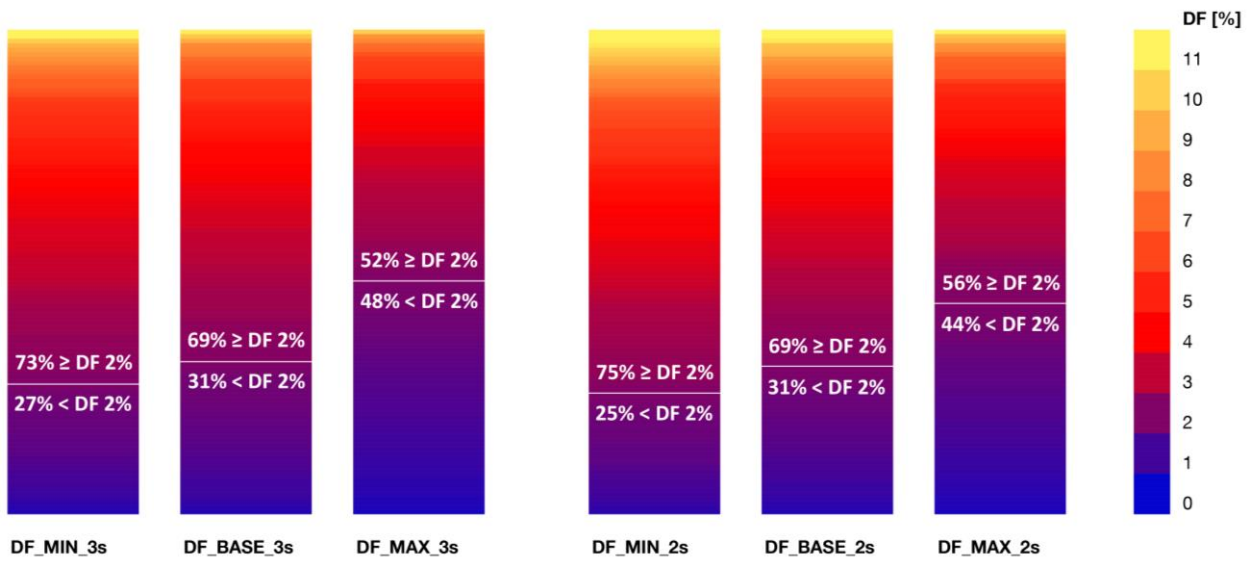


Abbildung 43: Verteilung der DF Ergebnisse je Varianten-Gruppe mit Angabe des 2%-Kriterium

Abbildung 43 zeigt, dass der geringe Unterschied in den Tvis-Werten je Verglasungstyp demnach auch keinen großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Jedoch bewirkt die starke Spanne der Wandstärke einen Unterschied der das Kriterium erfüllenden Varianten von ca. 20%. Die Gruppen mit den dünnen Wandstärken (MIN) erreichen die höchste Anzahl an Varianten, die das Tageslichtkriterium erfüllen (ca. 80):

Tabelle 20: Anzahl der Varianten nach Tageslichtkriterium DF kleiner bzw. größer gleich 2%

	DF_MIN_3s		DF_BASE_3s		DF_MAX_3s		DF_MIN_2s		DF_BASE_2s		DF_MAX_2s	
DF < 2%	29	27%	34	31%	52	48%	27	25%	33	31%	47	44%
DF ≥ 2%	79	73%	74	69%	56	52%	81	75%	75	69%	61	56%
Total	108	100%	108	100%	108	100%	108	100%	108	100%	108	100%

Für eine weitere Differenzierung werden die selektierten Varianten (grün gefärbte Zahlen in Tabelle 20) im nächsten Kapitel thermisch dynamisch untersucht.

4.3 Dynamische Simulation, Nutzer konstant: Optimierung der Architektur

Die in Kapitel 4.2 (Tageslichtsimulation) selektierten Varianten, die das Kriterium DF ≥ 2% erfüllen (Abbildung 43 zeigt, dass der geringe Unterschied in den Tvis-Werten je Verglasungstyp demnach auch keinen großen Einfluss auf das Ergebnis hat. Jedoch bewirkt die starke Spanne der Wandstärke einen Unterschied der das Kriterium erfüllenden Varianten von ca. 20%. Die Gruppen mit den dünnen Wandstärken (MIN) erreichen die höchste Anzahl an Varianten, die das Tageslichtkriterium erfüllen (ca. 80):

Tabelle 20, Kapitel 4.2), werden in einem zweiten Schritt thermisch dynamisch simuliert. Durch eine Multiplikation der Variantenanzahl mit den nun einsetzenden Parametern Orientierung (S, W, N, O), Baukonstruktion (Mauerwerk, Dämmbeton, Massivholz), Wandstärke (Min, Base, Max) und 2-Scheiben bzw. 3-Scheiben-Verglasung (U-Wert: 0,63 / 1.19 W/m²K) handelt es sich um eine Gesamtanzahl von 2604 Varianten (Tabelle 21).

Tabelle 21: Anzahl der thermisch dynamisch simulierten Varianten nach Parametergruppierung

DF_MIN_3s		DF_BASE_3s		DF_MAX_3s		DF_MIN_2s		DF_BASE_2s		DF_MAX_2s		Total	
476	18%	452	17%	348	13%	488	19%	460	18%	380	15%	2604	100 %

Zum ersten Mal kommen in diesem Umfang die Softwareprogramme *TRNLizard / TRNSYS18* in der Softwareumgebung *Grasshopper / Rhinoceros* zum Einsatz (Frenzel and Hiller, 2014).

Die Auswertung der über das Jahr stündlich ermittelten Ergebnisse je Raumvariante erfolgt angelehnt an die DIN 4108-2:2013 als anerkannte Regel der Technik und angepasst an Parameter, die der Grundstruktur des einfachen Bauens entsprechen – bzw. die durch Konzepte des einfachen Bauens realistisch umsetzbar sind (vgl. Kapitel 4.1 Inputparameter).

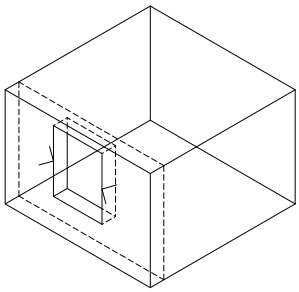
Beurteilt werden die Varianten bzw. der Einfluss der variierten Parameter nach ihrem Heizwärmebedarf (Nutzenergie) in kWh/(m²*a), sowie nach dem Anforderungswert der Übertemperaturgradstunden von 1200 Kh/a nach Norm (DIN 4108-2:2013).

Um Tendenzen des grundlegenden einfachen Bauens zu entwickeln, wurde dieser Grund-durchlauf noch ohne einen aktiven außenliegenden Sonnenschutz gerechnet. Auch das Standardnutzerprofil wird erst in Kapitel 4.5 bezüglich des Themas der Robustheit behandelt.

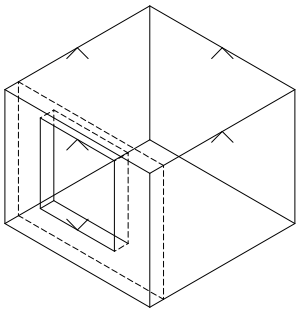
Im Folgenden werden die Ergebnisse der dynamischen Simulationen betrachtet.

In einem ersten Schritt wird die Betrachtungsmethode aus der Voruntersuchung erneut auf die Ergebnisse der dynamischen Simulation angewendet. Dabei wird ausgehend vom base case nur jeweils ein Raumparameter verändert, um dessen Auswirkung auf das Raummodell betrachten zu können. Dabei wird, wie in der Voruntersuchung, die Veränderung des Heizwärmebedarfs und, nun durch die dynamische Simulation möglich, auch die sommerliche Überhitzung (Komfortkriterium) betrachtet.

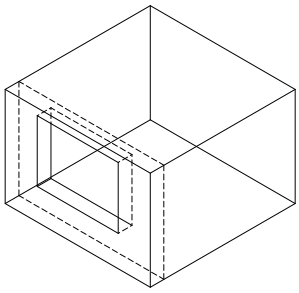
Wie schon in der Voruntersuchung aufgezeigt, hat eine Veränderung von z. B. der Raumtiefe zwangsläufig auch Auswirkungen auf andere Parameter, was wiederum Auswirkungen auf die Performance des Raumes hat.



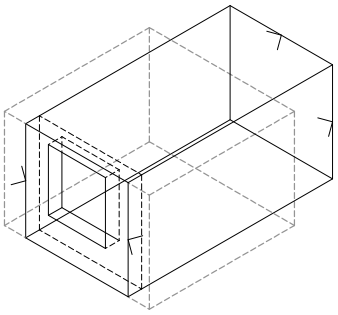
Eine Veränderung der Fensterbreite
verändert auch:
- Fläche Außenwand



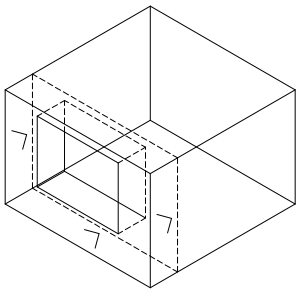
Eine Veränderung der Raumhöhe
verändert auch:
- Fläche Außenwand / Innenwand
- mögl. Fensterhöhe/ -fläche
- Raumvolumen



base case



Eine Veränderung der Raumtiefe
verändert auch:
- Fläche Außenwand / Innenwand
- mögl. Fensterhöhe/-fläche



Eine Veränderung der Wanddicke
verändert auch:
- Fläche Decken / Innenwände
- Tiefe Fensterlaibung

Abbildung 44: Abhängigkeiten der Parameter

Es hat sich gezeigt sich, dass die in der Voruntersuchung gefundene Rangordnung der Parameter bezüglich ihrer Auswirkung auf den Heizwärmebedarf durch die Ergebnisse der dynamischen Simulation bestätigt werden. In der Gegenüberstellung von jährlichem Heizwärmebedarf (HWB) und jährlichen Übertemperaturgradstunden (ÜTGS) in Abbildung 45 kann man verallgemeinernd

sagen, dass Veränderungen der Raumparameter, die zu einer Senkung des Heizwärmebedarfes führen (linke Seite der Ergebnistabellen), auch zu einer Reduktion der Überhitzung im Sommer führen. Allerdings führt eine Verringerung der Raumhöhe bei den ÜTGS ohne gleichzeitige Vertiefung des Raumes – wenn überhaupt – nur zu einer insignifikant kleinen Verbesserung (3. Ergebnisspalte). Die größte Reduktion der ÜTGS bewirken die niedrigen g- und Tvis-Werte (~0,2/0,36) der untersuchten Sonnenschutz-verglasungen, die wiederum den Heizwärmebedarf erhöhen.

Gegenüberstellung verschiedener Raumvariaten, betrachtete Bauweise: Mauerwerk

		best case HWB					base case								worst case HWB
Geometrie	**Raumtiefe in m**	6,00	6,00	4,25	4,25	4,05	4,25	4,25	4,39	4,25	4,25	4,25	3,00	4,25	3,14
	Raumbreite in m	3,00	3,00	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	6,00	4,25	6,00
	Raumhöhe in m	2,40	2,90	2,40	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	3,40	2,90	2,90	2,90	3,40
Außenwand	**Wanddicke/ Laibungstiefe in m**	0,40	0,40	0,40	0,40	0,62	0,40	0,40	0,28	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,28
	U-Wert Außenwand in W/m2*K	0,28	0,28	0,28	0,28	0,19	0,28	0,28	0,42	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,42
	Fläche Außenwand im m	6,39	7,05	8,75	11,60	9,63	9,63	7,79	9,63	9,63	10,59	9,63	13,32	9,63	11,16
Typ Verglasung	**Typ Verglasung**	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-SS	3-WS	2-WS	3-WS	2-SS	2-SS
	g-Wert = Energie-durchlassgrad	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,20	0,49	0,74	0,49	0,23	0,23
	U-Wert Glas in W/m2*K	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,63	1,18	0,63	1,12	1,12
	T-Vis Lichtdurchlässigkeit	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,36	0,71	0,81	0,71	0,37	0,37
Fenstergröße	**Fensterflächenanteil in %**	35%	40%	35%	24%	40%	40%	55%	40%	40%	43%	40%	40%	40%	60%
	Fensterfläche in m2	2,52	3,48	3,56	2,95	4,91	4,91	6,76	4,91	4,91	6,19	4,91	6,96	4,91	12,24

Dynamische Simulation

HWB [kWh/(m²*a)]	Nord	25,78	29,67	32,05	33,88	35,19	37,30	40,12	40,89	39,33	42,22	43,11	47,94	46,86	101,33
	Abweichung vom base case	-31%	-20%	-14%	-9%	-6%	0%	8%	10%	5%	13%	16%	29%	26%	172%
	Süd	20,76	22,61	24,59	27,32	26,09	26,97	26,73	29,56	34,13	29,27	28,48	33,13	40,45	76,98
	Abweichung vom base case	-23%	-16%	-9%	1%	-3%	0%	-1%	10%	27%	9%	6%	23%	50%	185%
	Ost	24,80	28,30	30,52	32,62	33,47	35,15	37,20	38,41	38,23	39,49	39,93	44,68	49,07	96,99
	Abweichung vom base case	-29%	-19%	-13%	-7%	-5%	0%	6%	9%	9%	12%	14%	27%	40%	176%
	West	24,44	27,76	29,96	32,15	32,77	34,35	36,18	37,52	37,85	38,46	38,83	43,53	45,02	91,10
	Abweichung vom base case	-29%	-19%	-13%	-6%	-5%	0%	5%	9%	10%	12%	13%	27%	31%	165%
	Mittelwert	23,95	27,08	29,28	31,49	31,88	33,44	35,06	36,59	37,39	37,36	37,59	42,32	45,35	91,60
	Abweichung vom base case	-28%	-19%	-12%	-6%	-5%	0%	5%	9%	12%	12%	12%	27%	36%	174%

ÜTGS [Kh/a]	Nord	943	864	1.089	842	970	1.041	1.239	1.088	764	999	1.321	1.256	797	1.000
	Abweichung vom base case	-9%	-17%	5%	-19%	-7%	0%	19%	5%	-27%	-4%	27%	21%	-23%	-4%
	Süd	1.059	1.042	1.263	1.008	1.112	1.315	1.623	1.459	889	1.343	1.790	1.670	949	1.450
	Abweichung vom base case	-20%	-21%	-4%	-23%	-15%	0%	23%	11%	-32%	2%	36%	27%	-28%	10%
	Ost	1.229	1.215	1.522	1.153	1.408	1.576	2.001	1.687	980	1.598	2.202	2.051	1.117	1.602
	Abweichung vom base case	-22%	-23%	-3%	-27%	-11%	0%	27%	7%	-38%	1%	40%	30%	-29%	2%
	West	1.255	1.251	1.561	1.185	1.453	1.631	2.082	1.749	1.005	1.668	2.285	2.133	1.087	1.694
	Abweichung vom base case	-23%	-23%	-4%	-27%	-11%	0%	28%	7%	-38%	2%	40%	31%	-33%	4%
	Mittelwert	1.121	1.093	1.359	1.047	1.236	1.391	1.736	1.496	909	1.402	1.900	1.778	987	1.437
	Abweichung vom base case	-19%	-21%	-2%	-25%	-11%	0%	25%	8%	-35%	1%	37%	28%	-29%	3%

gezielte Parameterveränderung abweichend vom base case

bedinge Parameterveränderung abweichend vom base case durch geometrische oder technische Abhängigkeiten

Abbildung 45: Gegenüberstellung der Auswirkungen von Änderungen der Raumparameter auf den

*jährlichen Heizwärmebedarf HWB [kWh/(m2*a)] und die jährlichen Übertemperaturgradstunden ÜTGS [Kh/a] für die Bauweise Mauerwerk*

Heizwärmebedarf HWB

Entsprechend der Rangfolge bezüglich des Einflusses auf den Heizwärmebedarf werden die einzelnen Parameter im Weiteren für die Bauweise Mauerwerk detailliert betrachtet. Die Bauweisen Leichtbeton und Massivholz verhalten sich in der relativen Auswirkung der Parameteränderungen sehr ähnlich. Die entsprechenden Ergebnistabellen und Punktediagramme befinden sich in Anhang II.

Raumtiefe HWB

Die Raumtiefe hat den größten Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Ein Raum mit einer Raumtiefe von 6 m hat gegenüber mit einer Raumtiefe von 4,25 (base case) im Mittel einen um 19 % geringeren Heizwärmebedarf. Bei einer Raumtiefe von 3 m erhöht sich der Heizwärmebedarf im Mittel um 27 %. Die größte Reduktion des HWB (best case) ergibt die Kombination „tiefer und niedriger Raum“.

Raumhöhe HWB

Durch eine Raumhöhe von 2,40 m wird der Heizwärmebedarf gegenüber einer Raumhöhe von 2,90 m (base case) im Mittel um 12 % gesenkt. Bei einer Raumhöhe von 3,40 m steigt der Heizbedarf um 12 %. Diese Effekte sind genauso wie bei der Raumtiefe zu großen Teilen auf die jeweils verringerte Hüllfläche und damit verringerten Transmissionswärmeverluste zurückzuführen.

Typ Verglasung HWB

Die Software TRNSYS18 verwendet für die Simulation die Parameter tatsächlich vorhandene Verglasungen (TRNSYS18 Window Library). Untersucht wurden 2-Scheiben- und 3-Scheibenverglasungen und dabei jeweils eine Wärme- und eine Sonnenschutzverglasung. Die Wärmeschutzverglasung ist optimiert auf hohe solare Gewinne. Die Sonnenschutzverglasung versucht diese Gewinne zu verhindern um die Aufheizung des Raumes im Sommer zu verringern.

Als base case wurde eine 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (Ug = 0,63 W/m2*K) mit einem mittleren g-Wert (0,49), also einer mittleren Durchlässigkeit für Licht und solare Wärmeeinstrahlung gewählt. Diese Konfiguration stellt auch gleichzeitig den best case HWB dar.

Bei der 2-Scheiben-Wärmeschutzverlasung mit hohem Gesamtenergiedurchlassgrad aber verschlechtertem U-Wert (Ug=1,18 W/m2*K, g-Wert = 0,74) erhöht sich der HWB gegenüber dem base case um durchschnittlich 12 %. Die erhöhten Transmissionswärmeverluste werden durch

die höheren solaren Wärmegewinne nicht ausgeglichen. Dies schlägt vor allem auf der Nordseite mit 16 % zu Buche, auf der Südseite erhöht sich der Heizwärmebedarf dadurch nur um 6 %.

Auch um 12 % im Mittel erhöht sich der Heizwärmebedarf bei der 3-Scheiben-Sonnenschutzverglasung mit niedrigem Gesamtenergiedurchlassgrad und gutem U-Wert (Ug=0,63 W/m2*K, g-Wert = 0,20). Dies ist auf die entgangenen solaren Gewinne zurückzuführen, die durch die Beschichtung der Gläser abgehalten werden. Dieser Effekt zeigt sich vor allem auf der Südseite (+27 %) und weniger auf der Nordseite (+5 %). Die diesbezüglich ungünstigste Verglasung stellt die 2-Scheiben-Sonnenschutzverglasung dar. Hier summieren sich die entgangenen solaren Gewinne und die im Vergleich zum base case erhöhten Transmissionswärmeverluste zu einer Erhöhung von durchschnittlich 36 % auf.

Wanddicke HWB

Wird die Dicke der Wand im Vergleich zum base case um 50 % erhöht, verändert sich der U-Wert entsprechend um 47 % und sinkt von 0,28 auf 0,19 W/m2*K. Der Heizwärmebedarf sinkt vergleichsweise geringfügig um 5 % im Mittel. Wird die Wanddicke um 50 % verringert, steigt der Heizwärmebedarf im Mittel um 9 %.

Fensterflächenanteil HWB

Eine Veränderung des Fensterflächenanteils hat von den betrachteten Parametern die geringste Auswirkung auf den Heizwärmebedarf: -6 % bei 24 % Fensterflächenanteil und +5 % bei 55 % Fensterflächenanteil sind die Auswirkungen bezogen auf den base case (FFA 40 %) . Dies ist vor allem auf die guten Eigenschaften des im base case gewählten Fensters zurückzuführen, bei dem die Transmissionswärmeverluste durch die solaren Gewinne kompensiert werden können. Auf der Südseite steigt der Heizwärmebedarf sogar geringfügig, wenn man das Fenster verkleinert.

best case / worst case HWB

Die Raumparameter für best und worst case sind für die Himmelsrichtungen jeweils gleich. Dies und ist möglicherweise begründet durch das grobe Raster der Parameterschritte, welches manche Unterschiede der Orientierungen nicht detailliert genug abbilden kann.

Den worst case innerhalb der untersuchten Parameter ist der Raum mit der geringsten Raumtiefe, der größten Raumhöhe, dem größten Fensterflächenanteil, der dünnsten Außenwand und der 2-Scheiben-Sonnenschutzverglasung. Dies war zu erwarten, da diese Parameterkombination hohe Transmissionswärmeverluste und vergleichsweise geringe solare Gewinne verursacht. Der Heizwärmebedarf erhöht sich im Mittel um 174 %, steigt also fast um das Dreifache.

Es wäre zu erwarten, dass der best case jeweils die entgegengesetzten Parameter zeigt. Es weichen aber nur die Raumtiefe (6 m) und die Raumhöhe (2,40 m) vom base case ab. Das liegt

einerseits daran, dass die Verglasung des base case schon das Optimum der untersuchten Verglasungen bezogen auf den Heizwärmebedarf darstellt. Andererseits sind die Varianten mit einer dickeren Wand oder einem kleineren Fensterflächenanteil bei der vorgeschalteten Tageslichtsimulation ausgeschieden, da diese in Kombination mit der großen Raumtiefe und der geringen Raumhöhe unterhalb des festgelegten Schwellenwertes für die Belichtung des Raumes mit natürlichem Tageslicht lagen.

Übertemperaturgradstunden im Sommer (ÜTGS)

Die dynamische Simulation liefert auch die Überschreitungen der operativen Innenraumtemperaturen oberhalb des Komfortbandes nach DIN 4108-2:2013. Die obere Grenze des Komfortbandes ist dabei abhängig von der Außentemperatur. Die Überschreitung pro Stunde wird in Grad Kelvin ermittelt, über das Simulationsjahr aufsummiert und als Übergradstunden mit der Einheit Kh/a (Kelvinstunden pro Jahr) ermittelt. Ein Gebäude mit ÜTGS unterhalb des Grenzwertes von 1200 Kh/a oder keinen Übergradstunden muss nicht gekühlt werden und hat im Sommer einen hohen Komfort. Dieses Kriterium stellt damit den sommerlichen Wärmeschutz nach Norm dar.

Die Auswirkungen der Parameter werden in der gleichen Folge, wie soeben für den Heizwärmebedarf geschehen, detaillierter betrachtet.

Raumtiefe ÜTGS

Der Modellraum mit einer Raumtiefe von 6 m hat gegenüber einer Raumtiefe von 4,25 m (base case) im Mittel 21 % weniger Übertemperaturgradstunden im Jahr. Bei einer Raumtiefe von 3 m erhöhen sich die Übertemperaturgradstunden im Mittel um 28 %. Dies ist mit der sich verändernden Fensterfläche und anteiligen Verschattung durch die Laibung zu begründen, die die solaren Gewinne entsprechend erhöhen.

Raumhöhe ÜTGS

Durch eine Raumhöhe von 2,40 m werden die Übertemperaturgradstunden gegenüber einer Raumhöhe von 2,90 m (base case) im Mittel um -2 % gesenkt. Bei einer Raumhöhe von 3,40 m steigt die Anzahl der Übergradstunden um 1 %. Die Nordseite verhält sich mit Werten von 5 % und -4 % entgegengesetzt, da sich hier die Veränderung in der Fenstergröße (solare Gewinne) mit Veränderung des Raumvolumens und der Speichermassen anders als auf Süd-, Ost und Westseite überlagern.

Typ Verglasung ÜTGS

Beim Wechsel auf 2- und 3-Scheiben-Sonnenschutzglas gegenüber der 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung des base case verringern sich die Übergradstunden mit 29 bzw. 35 % im Mittel deutlich.

Den worst case stellt die 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung dar. Hier treiben die zusätzlichen solaren Wärmegewinne die Übertemperaturgradstunden im Mittel um 37 % nach oben.

Wanddicke ÜTGS

Die Veränderung der Wanddicke um +50 % und -50 % führt zu einer Veränderung der Übertemperaturgradstunden um -11 % und +8 %. Hauptgrund dafür ist wahrscheinlich die veränderte Verschattung des innenbündig gesetzten Fensters durch die tiefere bzw. schlankere Laibung, wobei hierbei auch die Speichermasse Einfluss nimmt.

Fensterflächenanteil ÜTGS

Eine Veränderung des Fensterflächenanteils (base case 40 %), hat durch die geänderten solaren Wärmegewinne eine Auswirkung auf die jährlichen Kelvinstunden von -25 % (24 % Fensterflächenanteil) bzw. +25 % (55 % Fensterflächenanteil). Das bedeutet, der in dieser Studie veränderte Fensterflächenanteil lässt das ÜTGS-Ergebnis um je ein Viertel des base case Wertes schwanken.

Wechselwirkung Heizwärmebedarf und Übergradstunden

Welche Parameterkonfigurationen vereinigen nun am besten den Wunsch nach einem geringen Heizwärmebedarf und wenigen Übertemperaturgradstunden im Gebäude?

Der Heizwärmebedarf wird primär durch Maßnahmen gesenkt, die die Transmissionswärmeverluste über die Hülle verringern und sekundär über Maßnahmen, die die solaren Gewinne erhöhen. Die Übertemperaturgradstunden werden primär über die Vermeidung von solaren Gewinnen und sekundär über mehr Speichermasse gesenkt.

Ein Gebäude mit geringen Transmissionswärmeverlusten benötigt demnach weniger Heizwärme ohne die Erwärmung im Sommer wesentlich zu beeinflussen. Umgekehrt führt die Erhöhung der Speichermasse zur Senkung der Übertemperaturgradstunden ohne den Heizwärmebedarf wesentlich zu beeinflussen.

Betrachtet man Verringerung solarer Gewinne, dann muss man feststellen, dass diese vor allem die Übertemperaturgradstunden positiv beeinflussen, aber den Heizwärmebedarf durch entgangene Gewinne im Winter erhöhen.

Ein adaptives System, das solare Wärmeeinträge im Sommer vermeidet und solare Wärmegewinne im Winter ermöglicht, könnte diesen Konflikt auflösen.

Allerdings wird, sofern das System nicht stabil gegenüber des „Nutzerfehlverhaltens“ ist, die Robustheit vermindert, da im Falle einer Fehlfunktion keine Verbesserung, sondern eine

Verschlechterung entsteht, z. B. durch einen geschlossenen Sonnenschutz im Winter oder eine ungeschützte Glasfassade auf der Südseite im Sommer.

Eine robustere Strategie wäre die Fensteröffnung so zu gestalten, dass die Belichtung des Raumes auch bei einem kleinen Fensterflächenanteil noch ausreichend gegeben ist. Dies wäre durch höhere Räume zu erreichen, da dadurch die Belichtungswirkung der Fensteröffnung verbessert wird, weil das Licht tiefer in den Raum gelangt.

Wie in der detaillierten Auswertung der Parameterstudie in Anhang II zu entnehmen ist, befindet sich zum Beispiel die Variante mit maximaler Raumtiefe und Raumhöhe, geringem Fensterflächenanteil und 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung immer unter den Top 10 bei den Übertemperaturgradstunden und in der Top 30 bezüglich des Heizwärmebedarfs.

4.4 Dynamische Simulation, Nutzer variabel: Untersuchung der Robustheit

4.4.1 Robuste Optimierung

Für den Begriff der Robustheit gibt es bisher keine allgemein anerkannte Definition. Bei der *robusten Optimierung* als Verfahren in der Mathematik wird ein System im Sinne eines Designs bzw. Prozesses (Technologie, Produkt) dann als robust bezeichnet, wenn es gegenüber den Schwankungen der Eingangsfaktoren minimal sensibel bzw. unempfindlich (Rhein, 2014) (Taguchi, 2000). Anders formuliert funktioniert ein robustes System auch dann, wenn die Eingangsvariablen große Toleranzen aufweisen. Ein robustes Verhalten bzw. eine robuste Optimierung lässt sich wissenschaftlich beschreiben (Maderspacher, 2017) (Rhein, 2014). Abbildung 49 zeigt mathematisch abstrahiert die Idee der Robustheit:

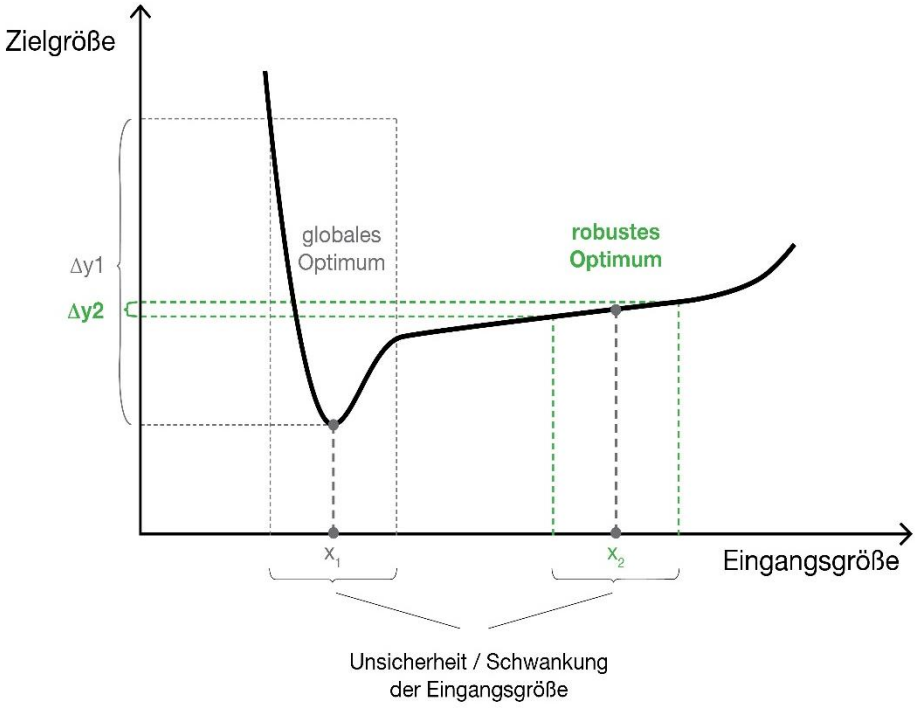


Abbildung 46: Unterschied zwischen einem globalen und einem robusten Optimum; eigene Darstellung nach Rhein (Rhein, 2014).

Der Graph zeigt den Unterschied eines globalen und eines robusten Optimums – reduziert auf zwei Parameter: die unsichere Eingangsgröße (Δx) und die davon beeinflusste Zielgröße der Funktion (Δy). Das Ergebnis des globalen Optimums (Δy1) ist erheblich von der Schwankung der Eingangsgröße beeinflusst. Demgegenüber wirkt sich dieselbe Streuung der Eingangsgröße (Δx) beim robusten Optimum (x2) nur geringfügig auf das Ergebnis aus (Δy2).

Ein robustes System (flache Region der Funktion) erreicht also nicht das bestmögliche Ergebnis – das globale Optimum bzw. deterministisches Minimum der Funktion – reagiert dafür aber unsensibel auf sich verändernde Eingangsgrößen.

Bisherige Design-, Produkt- und Planungsprozesse haben zum Ziel, für die jeweilige Aufgabe das globale Optimum zu finden. Mittlerweile ist die robuste Optimierung in vielen Industriezweigen Stand der Technik. Im Bauwesen hat sie jedoch noch keinen Einzug gefunden (Nguyen *et al.*, 2014). Doch gerade im Gebäudesektor würde diese Methode helfen, um negative Effekte schwankender Eingangsgrößen zu minimieren – also robust zu bauen.

Um die Robustheit ansatzweise innerhalb vorliegender Studie zu testen, wird der Begriff der Robustheit definiert: Über eine Lebensspanne von 100 Jahren können sich Randbedingungen verändern, die in der thermisch dynamischen Simulation der vorliegenden Studie bislang als „ideal“ angenommen wurden. Diese schwankenden Eingangsgrößen – sogenannte unsichere Randbedingungen – stellen beispielweise eine Klimaveränderung, ein Wechsel in der Nutzung bzw. im Nutzerverhalten, aber auch ein Fehlfunktionieren eines technischen Systems dar.

4.4.2 Untersuchung der Robustheit auf Raumebene

Ausgehend von der Untersuchung auf Raumebene werden die optimierten Varianten je Materialität ausgewählt. Die Auswahl wird auf Raumebene dem Standardgebäude und Niedrigenergiehaus bezüglich unsicherer Randbedingungen gegenübergestellt. Dieser Vorgang wird als Robustheitsanalyse bezeichnet. Es ergeben sich sechs Varianten, bestehend aus

- vier Einfach Bauen-Varianten
  - Mauerwerk einstofflich,
  - Leichtbeton einstofflich,
  - Holz-Hybrid, und
  - Holz einstofflich (mit Sonnenschutz),
- einer Standardvariante nach EnEV 2014/16 („Standard“), sowie
- einer Niedrigenergie-/Passivhausstandard Variante („Niedrigenergie“).

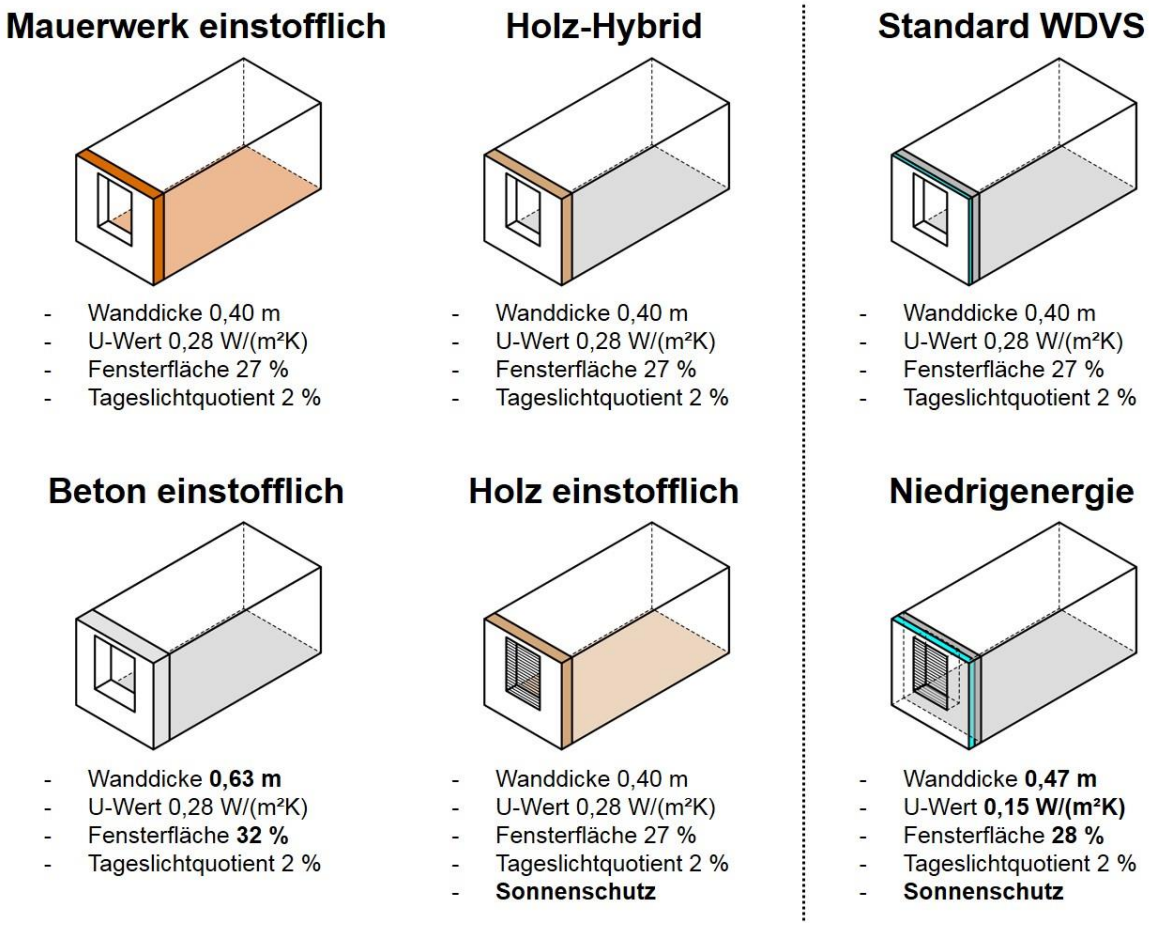


Abbildung 47: Untersuchte Raumvarianten der Robustheitsanalyse

Abbildung 50 zeigt die herangezogenen Raumvarianten. Abweichungen bezüglich der bauphysikalischen Hauptparameter ergeben sich bezüglich

- Wanddicke in Verbindung mit Fensterfläche bei der Einfach Bauen Variante *Beton einstofflich*,
- Wanddicke in Verbindung mit U-Wert bei der Niedrigenergievariante, sowie
- Außenliegender Sonnenschutz bei *Holz einstofflich* und Niedrigenergievariante.

Im Anhang III sind in Tabelle 1 die sechs Varianten jeweils als Mittelraum und als Eckraum aufgeführt. Ebenfalls im Anhang III zeigt Tabelle 3 die geometrischen und bauphysikalischen Parameter je Variante.

Um die Varianten auf ihre Robustheit hin zu testen, wurden folgende unsichere Randbedingungen als Kriterien für die Robustheitsanalyse festgelegt: eine extreme Ver-änderung bezüglich

- des Klimas,
- des Nutzerverhaltens,
- der internen Gewinne, sowie
- des Sonnenschutzsystems.

Letzteres Kriterium bezieht sich ausschließlich auf die Variante *Holz einstofflich* und die Niedrigenergievariante, welche jeweils einen außenliegenden variabel gesteuerten Lamellen-sonnenschutz vorweisen. Abbildung 51 zeigt die untersuchten Veränderungen (unsichere Randbedingungen) ausgehend von dem Base Case als Kriterien der Robustheitsanalyse. Im Anhang III führt Tabelle 2 die zum Base Case abweichenden Varianten auf (Name = Spalte 1).

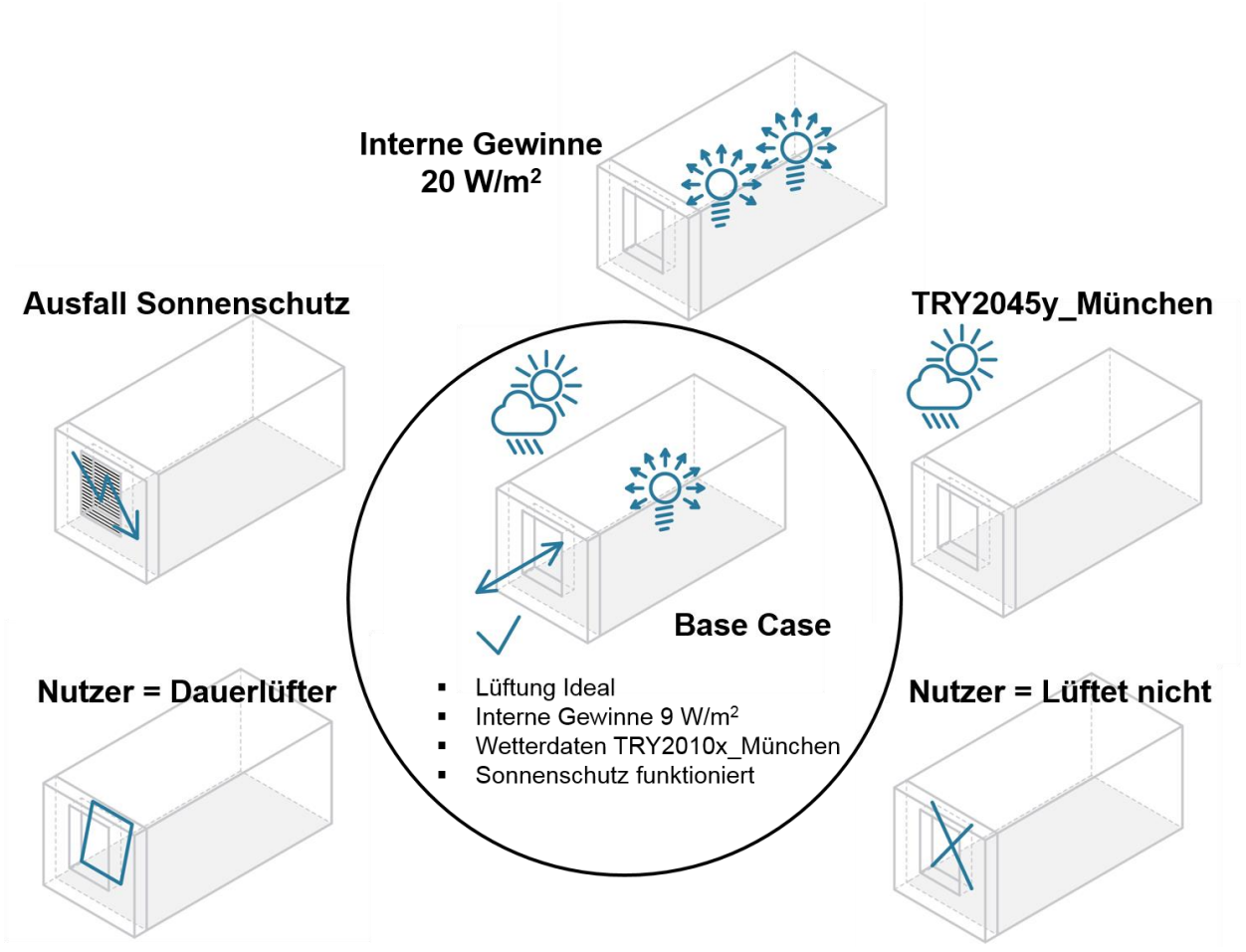


Abbildung 48: Unsichere Randbedingungen als Kriterien der Robustheitsanalyse

Kriterium Klima – *„TRY2045y_München“*

Hierbei wird das mittlere Zukunftstestreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes (Testreferenzjahr TRY) für das Jahr 2045 verwendet (TRY2045y_Muenchen). Dieser Datensatz berücksichtigt nur die Standardabweichung der Außenlufttemperatur des sogenannten Kontrollzeitraums 1971-2000. Die Globalstrahlung wurde mangels zuverlässiger Aussagen regionaler Klimamodelle nicht berücksichtigt (TRJ, 2017, S.37). Der Wetterdatensatz beschreibt ein milderes Wetter, da die Temperaturwerte im Winter nicht so tief sinken als im Winterzeitraum des extremen Testreferenzjahres von 2010, und im Sommer auch nicht höher liegen (s. Abbildung 52). Auf das extreme Zukunftstestreferenzjahr (2045x) wurde für die Analyse verzichtet, da sich der Außenlufttemperaturverlauf gegenüber dem Ausgangsfall ähnlicher verhält als der mittlere Datensatz (2045y), wie Abbildung 52 zeigt. Für zukünftige Analysen sollte ein extremerer Datensatz verwendet werden, der auch Extremwerte für die Globalstrahlung sowie die Außenluftfeuchte enthält.

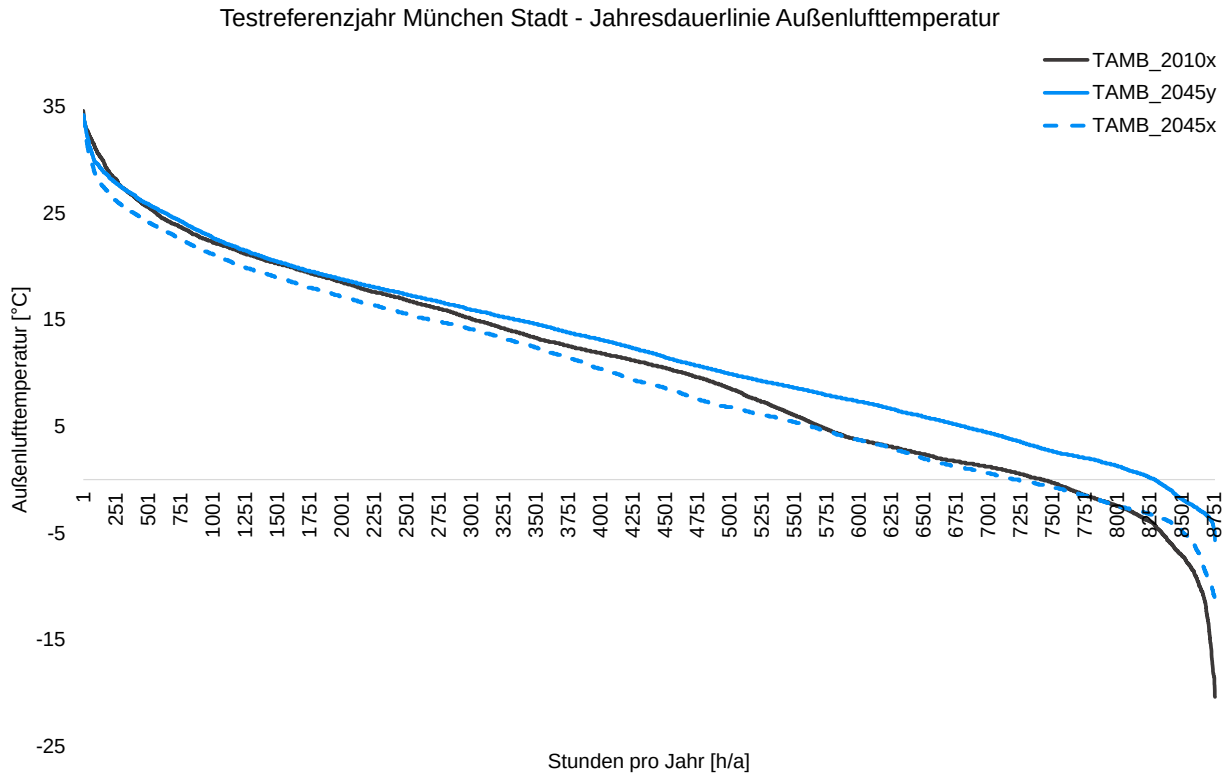


Abbildung 49 Testreferenzjahr 2010 und 2045 im Vergleich nach Außenlufttemperatur (eigene Grafik)

Kriterium Nutzerverhalten - *„Nutzer lüftet nicht / dauerhaft“*

Bei der Änderung der Randbedingung Nutzerverhalten wird der Extremfall angenommen, der Nutzer lüfte tagsüber zu keinem Zeitpunkt. Damit besteht der Luftwechsel tagsüber ausschließlich aus der Infiltrationsluftwechselrate von n = 0,2/h. Bei Nacht wird ein Luftwechsel von n = 4/h angenommen. Als entgegengesetztes Verhalten lüftete der Nutzer konstant. In diesem Fall lüftet der Nutzer tagsüber mit einem konstanten Luftwechsel von n = 2,0/h. Für den Infiltrationsluftwechsel und die Nachspülung werden die gleichen Werte wie zuvor angesetzt.

Kriterium Interne Gewinne – *„Interne Gewinne erhöht“*

Als Extremfall des Kriteriums Interne Gewinne werden die internen Lasten von 9 auf 20 W/m² mehr als verdoppelt, um den Effekt auf Heizwärmebedarf und sommerlichen Wärmeschutz zu testen.

Kriterium Sonnenschutzsystem – *„Ausfall Sonnenschutz“*

Für die Konzepte, die einen Sonnenschutz integriert haben, wird der gänzliche Ausfall des Sonnenschutzsystems als Extremfall des Kriteriums „Ausfall Sonnenschutz“ simuliert. Im Base Case ist der außenliegende Sonnenschutz mit einem Abminderungsfaktor von 80% angesetzt; Dies entspricht einem typischen Fc-Wert von 0,2 nach DIN 4108-2:2013. Es wird angenommen, dass der Sonnenschutz das Tageslicht im oberen Drittel so umgelenkt, dass bei direkter Strahlung auf die Fassade eine Tageslichtversorgung im Raum gewährleistet ist. Die Steuerung erfolgt nach operativer Raumtemperatur und mittlerer Einstrahlung auf die Fassade: ab einer operativen Raumlufttemperatur von 24°C und einer Strahlung von 200 W/m² ist der Sonnenschutz aktiv. Werden die 24°C unterschritten und liegt die Strahlung bei weniger als 150 W/m², so wird das System deaktiviert. Die Temperatur ist dabei das übergeordnete Kriterium.

Die fünf beziehungsweise sechs (inkl. Ausfall Sonnenschutz) Kriterien der Robustheit werden bei jeder der 12 Varianten für die Ausrichtungen Nordost und Südwest untersucht. Insgesamt ergeben sich damit 128 Fallunterscheidungen (siehe Anhang III Tabelle 3).

Ergebnisse der Robustheitsanalyse

Ausgehend von den sechs Änderungen der unsicheren Randbedingung als Robustheitskriterien zeigt im Anhang III Tabelle 4 die resultierenden Werte für den Heizwärmebedarf in kWh/(m²a) (Robustheit im Winter) und Tabelle 5 die Ergebnisse der Übertemperaturgradstunden in Kh/a (Robustheit im Sommer).

Die folgenden Punktediagramme zeigen die Robustheit als Streuung der Zielgrößen auf der y-Achse, sortiert nach den zwei Zielgrößen Heizwärmebedarf (HWB) und sommerlicher Wärmeschutz (ÜTGS). Je Zielgröße werden zwei Ausrichtungen des Raumes betrachtet – Südwest und Nordost.

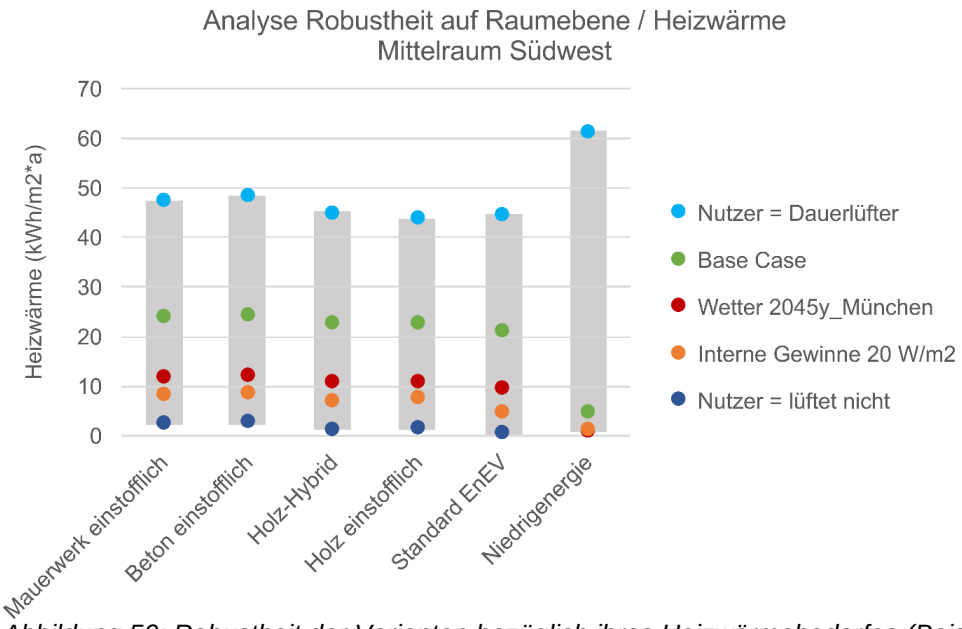


Abbildung 50: Robustheit der Varianten bezüglich ihres Heizwärmebedarfes (Beispiel Mittelraum Südwest)

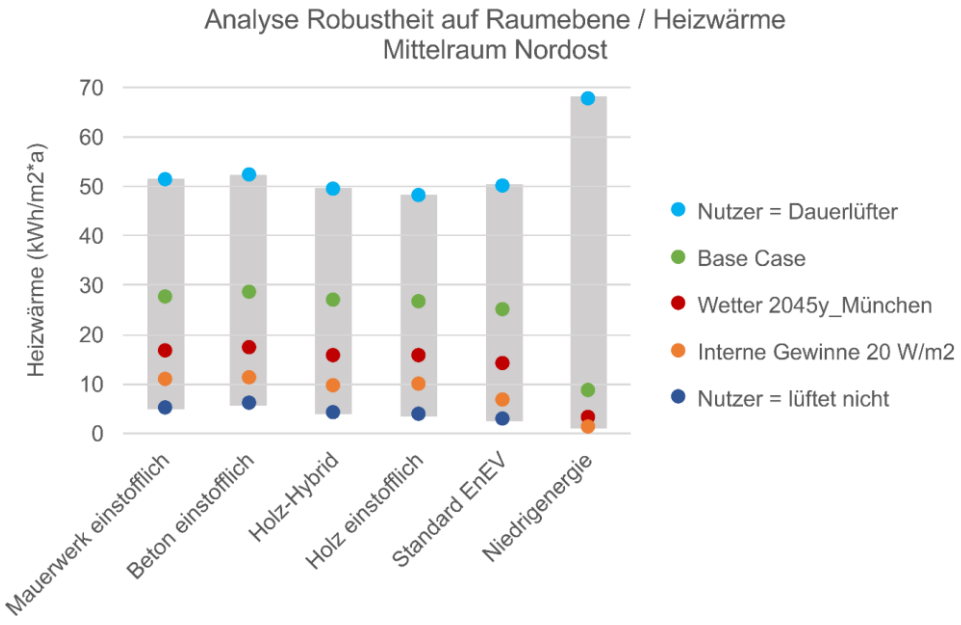


Abbildung 51: Robustheit der Varianten bezüglich ihres Heizwärmebedarfes (Beispiel Mittelraum Nordost)

Der grüne Punkt einer jeden Variante stellt den Base Case dar. Alle weiteren Punkte stehen für eine veränderte unsichere Randbedingung. Die vertikale Anordnung der Punkte je Variante geschieht nach Wärmegewinnen/–verlusten bzw. Kelvinstunden auf der y-Achse. Der graue Balken entspricht der Streuung der Zielgröße induziert durch die Schwankung der unsicheren Randbedingungen. Somit lassen sich die Varianten bezüglich ihrer Robustheit vergleichen.

Die Analyse der Ergebnisse für den Heizwärmebedarf zeigt:

Ausrichtung Südwest

Die Einfach Bauen Varianten sind ähnlich robust wie die Standard EnEV Variante und robuster als die Niedrigenergievariante. Letzteres ist auf das technische System mit mechanischer Lüftungsanlage zurückzuführen: dieses „versagt“ durch das Öffnen der Fenster in der Kategorie „Nutzer lüftet dauernd“.

Ausrichtung Nordwest

Hier zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei der Südwestausrichtung: Einfache Bauten sind bezüglich der getesteten Kategorien ähnlich robust wie der EnEV-Standard. Gegenüber dem Niedrigenergiestandard sind sie in der Kategorie "Nutzer lüftet dauernd" deutlich robuster.

Insgesamt wird beobachtet, dass sich die Abweichungen des Heizwärmebedarfs, ausgelöst durch die unsicheren Randbedingungen, ökologisch wie ökonomisch in einem vertretbaren Rahmen halten.

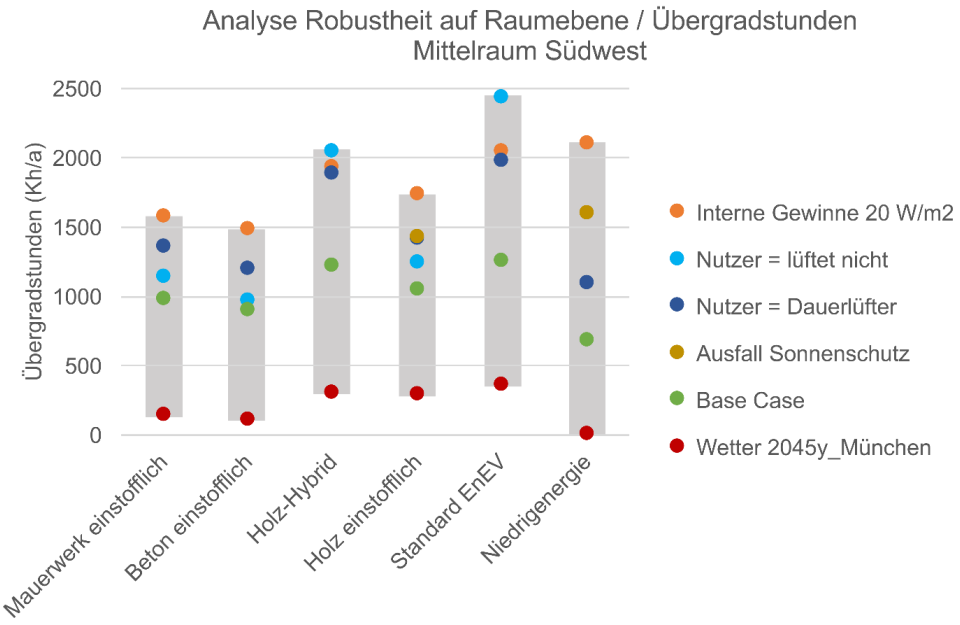


Abbildung 52: Robustheit der Varianten bezüglich ihres Sommerlichen Wärmeschutzes (Beispiel Mittelraum Südwest)

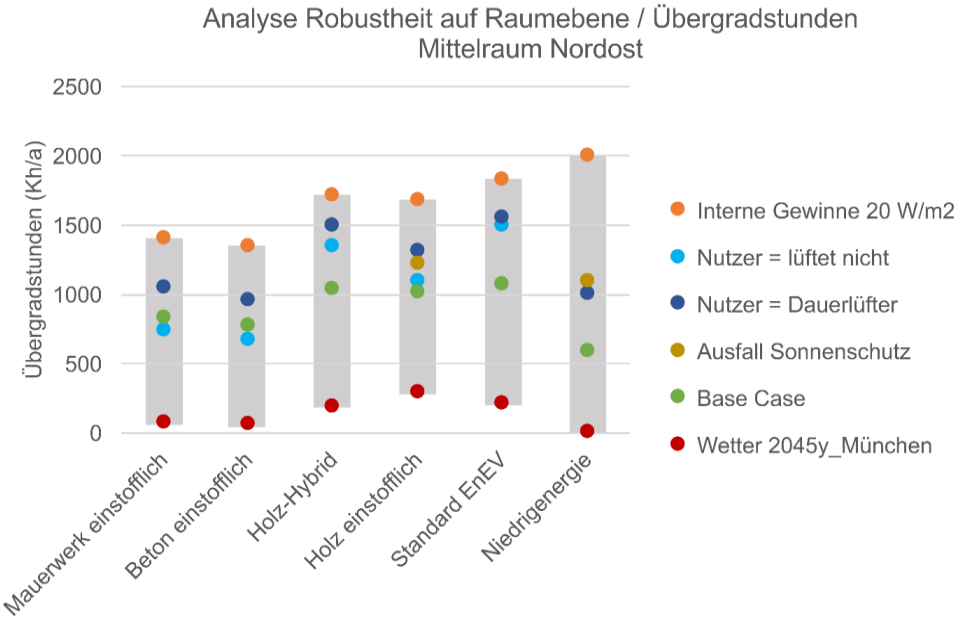


Abbildung 53: Robustheit der Varianten bezüglich ihres Sommerlichen Wärmeschutzes (Beispiel Mittelraum Nordost)

Die Diagramme zum sommerlichen Wärmeschutz sind gleichen Aufbaus wie die Diagramme zur Zielgröße Heizwärmebedarf. Anders als zuvor zeigt die Zielgröße auf der y-Achse die jährlichen

Übertemperaturgradstunden an. Um den sommerlichen Wärmeschutz zu gewährleisten muss nach DIN 4108-2:2013 der Grenzwert von 1200 Kh/a eingehalten werden.

Auch in diesen Diagrammen zeigt der grüne Punkt je Variante den Base Case. Die restlichen Punkte stehen für dieselben Robustheitskriterien wie die der Diagramme zum Heizwärme-bedarf.

Die Analyse der Ergebnisse für den sommerlichen Wärmeschutz zeigt für beide Ausrichtungen:

- Die Anordnung je nach Wärmegewinnen bzw. –verlusten nicht so homogen wie bei der Zielgröße Heizwärmebedarf.
- Die Effekte der Speichermasse und des Sonnenschutzes sind zu erkennen.
- Südwest: Die Einfach Bauen Varianten sind etwas robuster als die Standard EnEV- und Niedrigenergievarianten, da die Streuung um den Base Case geringer ausfällt.
- Südwest versus Nordost: Hier zeigt sich ein Effekt durch den Unterschied der solaren Gewinne.
- Die Robustheit zeigt bezüglich der Nordostausrichtung ein ruhigeres Bild als bei einer Südwestorientierung.
- Einfache Bauten sind deutlich robuster als die Niedrigenergievariante bezüglich der Kategorie "Interne Gewinne erhöht".
- Die einstofflichen Varianten Mauerwerk, Beton und Holz (mit Sonnenschutz) fallen im Vergleich am robustesten aus.

Insgesamt wird beobachtet, dass sich die maximal abweichenden Übertemperaturgradstunden des grauen Streuungsbereichs, ausgelöst durch die unsichere Randbedingung „Interne Gewinne erhöht“ – oberhalb des Norm-Grenzwertes von 1200 Kh/a befinden. Im Vergleich überschreiten die einstofflichen Einfach Bauen Varianten Mauerwerk und Beton den Grenzwert nur gering, währen die Niedrigenergievariante die stärkste Überschreitung aufweist.

Diese Ergebnisse sollen ein erstes Herantasten an die Robustheit auf Raumebene darstellen. Detailliertere Studien müssen folgen, um wissenschaftlich belegte Tendenzen ableiten zu können. Grundsätzlich lässt ein Unterschied der Varianten in der Robustheit auf Raumebene darauf schließen, dass die Robustheit auch auf der Gebäudeebene eine wichtige Rolle spielt. Aus diesem Grund werden in den Kapiteln der LCA und LCC die Effekte der Robustheit berücksichtigt.

4.5 LCA und LCC Analyse auf Raumebene

4.5.1 Definition Ziel & Untersuchungsrahmen

Lebenszyklusdefinition und Systemgrenzen

Zu Beginn des Meilensteins MS1 wurde festgelegt, den Lebenszyklus schwerpunktmäßig anhand der Rohstoffgewinnung / Herstellung (cradle to gate) (A1-3) zu untersuchen. Da die Annahme getroffen wurde, dass wenig gesicherte Daten für die Errichtungsphase vorliegen wird das Modul A4-5 (Gebäudeerrichtung) zu Beginn der Untersuchung ausgeschlossen. Es wird angemerkt, dass in diesem Lebenszyklusmodul ggfs. ein Mehraufwand an Energie und anderen Ressourcen aufgrund des höheren Materialinputs monolithischer Bauweisen innerhalb der Gebäudehülle gegeben sind und sich damit signifikante Auswirkungen auf die Umweltwirkungen ergeben, wie dies in Abschnitt 3.3 bereits ansatzweise sichtbar wurde.

In der Betriebsphase (B1-7) wird insbesondere die Reparatur (B3) und der Austausch (B4) von Bauteilen sowie der Energieverbrauch (B6) betrachtet. Die Umweltwirkungen aus dem Betrieb werden aufgrund der sehr langen gewählten Lebensdauer von 100 Jahren als entscheidend eingeschätzt. Trotzdem müssen die Bilanzergebnisse pro Jahr im Auge behalten werden, um Einflüsse des Mehraufwandes für monolithische Bauteile der Gebäudehülle festzustellen und einzuschätzen.

Für das Modell des Lebensendes (EoL, engl. End of Life) und der Entsorgung (C1-C4) wird eine quantitative Betrachtung des Rückbaus und der Abfallbearbeitung mit den Daten der ÖKOBAUDAT durchgeführt. Die ersten EoL-Zwischenergebnisse, die noch mit Daten aus der ÖKOBAUDAT 2016 erstellt wurden, konnten Zweifel an lückenhaften Entsorgungsdaten entkräftet. Außerdem ist die Einschränkung der Analyse auf cradle-to-gate ohne Optionen als kritisch zu betrachten. Die End-of-Life Phase darf bei der Auswertung und Interpretation der Daten auch nicht mit der Phase D vermischt werden. Diese eindeutige Abgrenzung ist aber in einer rein qualitativen Bewertung nur äußerst schwierig zu gewährleisten. Das hängt mit dem abschließenden Kriterium für die Systemgrenze des letzten Moduls zusammen und dieser ist der Zustand des „end-of-waste“! Weitere, über die Systemgrenze hinausgehende Belastungen oder Gutschriften / positive Eigenschaften liegen jenseits des betrachteten Systems werden nicht dem System selbst zugerechnet, sondern auf nachfolgende Systeme übertragen.

Zusätzlich wird eine qualitative Betrachtung der einstofflichen Bauteile (z.B. im Vergleich mit den derzeitig in der Bauindustrie verwendeten Kompositbauteilen) im vorliegenden Entsorgungs-szenario angestellt. In den Umwelt-Produktdeklarationen und in den Datensätzen der ÖKOBAUDAT sind zum größten Teil Annahmen bzw. Entsorgungsszenarien hinterlegt. Für einen vereinfachten Lösungsweg wird auf die Unterteilung der Abfallmengen in Recyclingmenge, Verwertungsmenge und Bauschuttmenge zurückgegriffen, da diese sich über die Massen bzw. das Volumen der Baustoffe eines Bauteils ermitteln lassen. Die Masse des jeweiligen Baustoffs

wird anteilig auf die drei Kategorien der Abfallmenge aufgeteilt. Die Entsorgungswege aus den EPDs und der ÖKOBAUDAT beruhen meist auf Herstellerangaben. Somit gehen die möglichen Recyclingansätze vom idealen Fall aus und entsprechen nicht immer der gängigen Baupraxis. Aus diesem Grund werden zwei Recycling-Szenarien für die jeweiligen Baustoffe definiert. Im ersten Szenario „Baupraxis“ wird sich an der gängigen Baupraxis und dem Regelfall orientiert. Auf Basis aktueller Statistiken und anderen Quellen werden hier Annahmen für das Recycling getroffen. Das zweite Szenario „theoretisches Maximum“ geht von idealen Bedingungen aus, d.h. es wird anhand derzeitiger Forschungsprojekte und Herstellerangaben eine Recyclingquote festgelegt. Für dieses zweite Szenario wird von einem selektiven bzw. kontrollierten Rückbau ausgegangen. Bei dieser Art des Rückbaus ist eine sorgfältig geplante und schrittweise Demontage besonders wichtig. Dabei kommen verschiedenste Techniken zum Einsatz und auch Abbruchverfahren können angewandt werden. Der selektive Rückbau ermöglicht eine sortenreine Erfassung der Baurestmassen. Ziele sind vor allem die Minimierung der Abfallströme und die Erhöhung der Qualität der Stoffströme. Damit lässt sich das Recyclingpotenzial verbessern (Weimann *et al.*, 2013). Außerdem wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass das Recycling von Baustoffen fokussiert wird. Bereits jetzt gibt es Richtlinien und Verordnungen, die die Ressourcenschonung und damit das Recycling vorantreiben wollen. In der EU-Abfallrahmen-richtlinie wird das Recycling höher eingestuft als die thermische Verwertung. Auch werden konkrete Recyclingziele genannt. So sollen etwa 70 Gewichtsprozent der Bau- und Abbruchabfälle bis 2020 wiederverwendet oder stofflich verwertet werden (Krauß and Werner, 2014).

Neben der EU-Abfallrahmenrichtlinie sei an dieser Stelle auch die EU-Bauproduktenverordnung (kurz EU-BauPVO) genannt. Diese gibt Rahmenbedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten in Europa vor, um somit gleiche Standards sicherzustellen. Seit 2013 werden zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Umweltauswirkungen von Gebäuden und deren Nachhaltigkeit gestellt (Bosse, 2016). In Anhang 1, Punkt 7 der EU-BauPVO (2011-03) ist die nachhaltige Nutzung der Ressourcen geregelt. Danach müssen Bauwerke so geschaffen und abgerissen werden, dass deren Baustoffe nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können (EU-BauPVO, 2011). Das Recyclingpotenzial selbst wird über das Verhältnis der gesamten Recyclingmenge zur Gesamtmasse gebildet und in der Einheit Prozent angegeben. Somit kann sowohl für jeden einzelnen Baustoff der Konstruktionen ein Anteil an recyceltem Material bestimmt werden als auch für den gesamten Aufbau. Da diese Größe im Wesentlichen auf Annahmen beruht, dient das Recyclingpotenzial zur überschlägigen Einschätzung bzw. Orientierung. Es ermöglicht einen groben Vergleich zwischen den Konstruktionen hinsichtlich ihrer Recyclingfähigkeit. In der Praxis kann es zu abweichenden Werten kommen. Zum Beispiel können bei falsch eingebauten Baustoffen Schäden an der Konstruktion aufgrund von eintretender Feuchte oder ähnlichen Nachfolgend die Betrachtung des Entsorgungswegs sowie eines möglichen Recyclingpotenzial aufgrund der Zusammensetzung der Außenwandbauteile.

Die Ergebnisse in Tabelle 22 veranschaulichen die momentane Undeutlichkeit der Zuordnung und die starken Einflüsse der Annahmen für die jeweiligen Aufbauten. Insofern ist die Aussage-

kraft über das Recyclingpotential sehr stark eingeschränkt. Eine weitergehende Betrachtung ist im Rahmen des Projekts nicht vorgesehen, die Diskussion der Recyclingfähigkeit ist aber für Folgeprojekte eine wichtige Fragestellung.

Tabelle 22: Prozentuale Anteile potenzieller Recyclingquoten der konventionellen und der einfachen Bauweise

	Konventionell		**Einfach (monolithisch)**	
	Konv_Praxis	Konv_Max	EB_Praxis	EB_Max
MW	15,86 %	79,28 %	14,62 %	96,00 %
StB/LB	17,54 %	87,49 %	18,12 %	86,97 %
HM	13,93 %	92,04 %	14,14 %	97,36 %

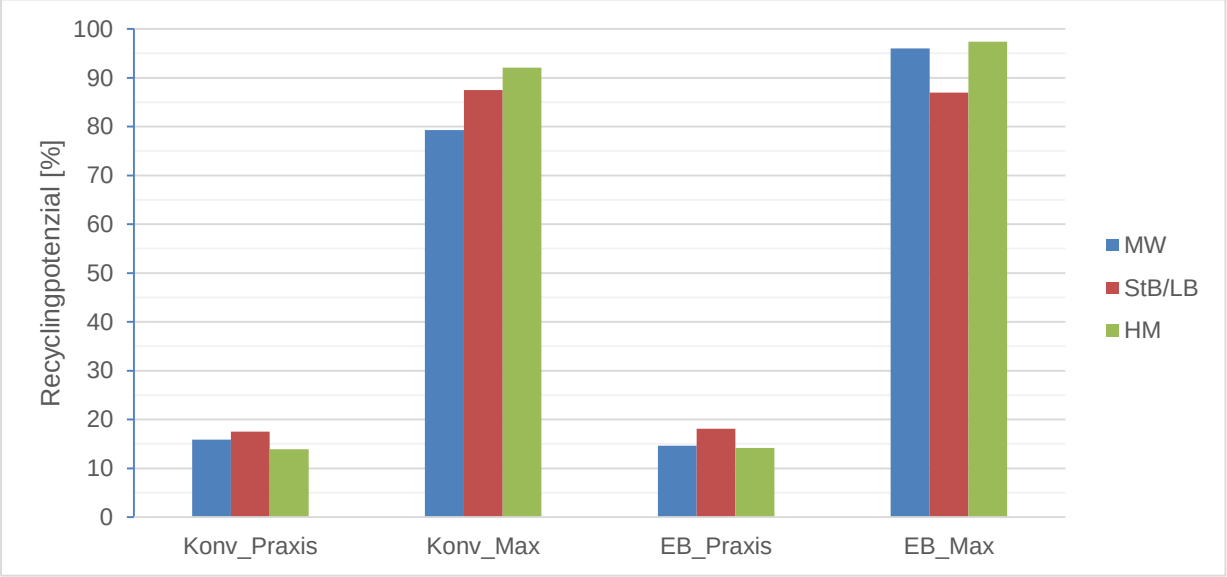


Abbildung 54: Balkendiagramm der beiden Bauweisen und Entsorgungsszenarien bezogen auf das Recyclingpotenzial

Datengrundlage (LCI und LCIA)

Primär werden aktuelle Daten aus der Ökobaudat (Stand Oktober 2017) für die Berechnungen der Ökobilanzen verwendet. Dabei werden soweit als möglich die Durchschnittsdatensätze für Deutschland ausgewählt, um eine möglichst allgemeingültige LCA zu erhalten. Ergänzend können spezifische EPD-Datensätze zur Anwendung kommen. Sollten diese Daten nicht ausreichen, bzw. für bestimmte Prozesse oder Produkte nicht vorhanden sein, dann wird auf

wissenschaftliche Publikationen und ggfs. vereinfachte Prozessdaten aus Ökobilanzinventaren wie GaBi oder ecoinvent zurückgegriffen (Thinkstep AG, 2018), (Ecoinvent Association, 2018).

LCA Basisdaten: ÖKOBAUDAT 2017-I (27.11.2017), Lebenszyklusmodul A1-3 (cradle to gate), B4 (Austausch) und Modul C1-C4 (gate to grave)

Aspekte der Zieldefinition, überarbeitet

- Schritt 1: Bewertung der Umweltwirkung der Konstruktion und
- Schritt 2: abschließender Hochrechnung der Raumbetrachtung auf generische Gebäudetypen den Lebenszyklus von 100 Jahren
- Anhaltspunkte für die Verbesserung der monolithischen Konstruktionen hinsichtlich ihrer thermischen und konstruktiven Eigenschaften unter besonderer Berücksichtigung der Umweltwirkung während des Lebenszyklus,
- Identifikation der wichtigsten Einflussgrößen auf die Umweltwirkung (aus den verwendeten Stoffen und aus dem Energiebedarf im Betrieb (Modul B)
- aktueller GWP Beitrag (A1-A3) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C1-C4)

<u>Sachbilanzdaten</u>

- Input an Materialmengen bezogen auf jeweils 1 Quadratmeter Bauteilfläche als wesentlicher Basisgröße für Bauteilbetrachtung
- Berücksichtigung der Schichten aus den in der Regel mehrschichtigen Bauteilaufbauten mit bauphysikalisch funktional und damit zwangsläufig notwendig sind bspw. Wetterschutz-, Luftdichtheits-, Trittschalldämm-, Estrichschicht
- Variation von Schichtdicken für Raumbildung mit Tragwerk und Aussteifung
- Lebenszyklusdauer 100 Jahre mit Lebensdauern nach LNB (BBSR, 2001)
- Annahme, der vollständigen 100a Lebensdauer für Tragkonstruktionen ohne Austausch

<u>Indikatoren</u>

- Input an Ressourcen: Primärenergie erneuerbar und nicht erneuerbar
- Schädliche Umweltwirkungen: GWP

<u>Systembeschreibung</u>

- Ort und Geometrie - Schritt 1: raumweise Betrachtung sowie auf Bauteilebene (2. Zwischenbericht)
- Ort und Geometrie - Schritt 2: Extrapolation von Typengebäuden auf Basis der Ausgangsbauteile (Schlussbericht)
- Detaillierung der Geometrie und der Bauteile
- Definition der Referenzaufbauten und des Referenzraums

4.5.2 Vergleichende Vorbetrachtungen der Ausgangsmaterialien

Hintergrund ist die Ermittlung der Umweltwirkungen der unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten. Primär innerhalb der einzelnen Materialgruppen und weniger zwischen verschiedenen Materialien, da hier die Randbedingungen bzw. vor allem die Leistungsfähigkeit der Bauteile schwer vergleichbar sind. Auf Basis der Ergebnisse soll ein weiteres Entscheidungsmerkmal für die Konstruktionsauswahl und -optimierung geschaffen werden.

4.5.3 Bauteil- und Raumvergleich best-case Ziegelmauerwerk

Die LCA Untersuchung startet mit einer Grundlagenbetrachtung eines Baustoffs für einen Raumvergleich auf der Basis des „best-case“ der Konstruktionsvariante in Ziegelmauerwerk mit dem niedrigsten Heizwärmebedarf. Die Voraussetzung für den Bauteil- und Raumvergleich in Herstellungs-, Betriebs- und Entsorgungsphase ist die LCA-Berechnung der Bauteilaufbauten je Quadratmeter des Bauteils. Für die Berechnung der Herstellungsphase und die Kombination mit der Betriebsphase wird ein selbst erstelltes Excel-Tool verwendet, in dem die aktuellen Daten der ÖKOBAUDAT 2017 hinterlegt sind (BMUB, 2017). Die Definition der verwendeten Baustoffe und Bauteilaufbauten ist in Abschnitt 4.3 erfolgt. Sofern keine identischen Baustoffe in der Ökobaudat-Datenbank vorliegen werden geeignete ähnliche Datensätze verwendet. Die Ergebnisse für die Betriebsphase werden aus der thermischen Simulation ebenfalls gemäß Abschnitt 4.3 übernommen. Die Eingangsparameter für die raumweise Betrachtung sind in den Tabellen 23 und 24 als Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 23: Eingangsparameter für die Berechnung des Raummodells in Mauerwerk

HWB	**Raumtiefe**	**Raumhöhe**	**Fläche_AW**	**FFA**	**Fläche_Fenster**
[kWh/m²a]	[m]	[m]	[m²]	-	[m²]
21 (ohne COP)	6.00	2.40	7.20	0.35	2.52

Tabelle 24: Grundlagen für die thermische Simulation der Ergebnisse in der Betriebsphase B6

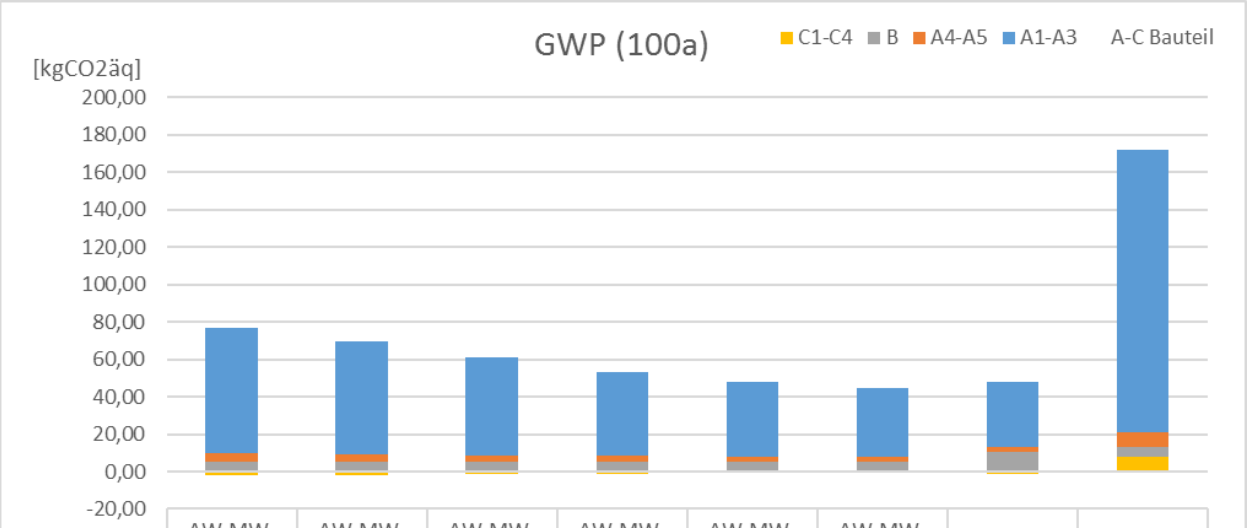
Konstruktion	**Orientierung**	**Kriterium**	**KhÜ**	**DF**	**Laibung**	**Verglasung**
			[Kh/a]	[%]	[m]	[Tvis]
ZIEGEL (LHlz)	Süd	HWB	1197	2.2	0.40	0.7 (WSV)

Für das Verhalten der Konstruktion über die Lebensdauer von 100 Jahren sind die folgenden Annahmen zugrunde gelegt worden:

- Tragkonstruktion muss in den 100 a nicht ausgetauscht werden
- Erneuerung Anstriche werden vernachlässigt
- Erneuerung Innenputz 45 a
- Gesamtlebensdauer 100 a

LCA Ergebnisse für Mauerwerk im Referenzraum

Die Untersuchung des besten Falles in Mauerwerksbauweise dient zur Überprüfung des Vorgehens und der ersten Abstimmung mit der thermischen Simulation. Es vergleicht das Treibhauspotential bei unterschiedlichen Wandaufbauten mit jeweils einem Quadratmeter Bauteilfläche und zusätzlich werden die innere Trennwand und die Decke aus Ziegelelementen danebengestellt. Das Ergebnis zeigt eine lineare Verringerung des GWP mit der Verringerung der Außenwandstärke, siehe Abb. 55. Das ist plausibel, weil der Ziegelanteil und Fugenmörtel jeweils in der Schichtdicke variiert wird und die restlichen Schichten aus Putz unverändert bleiben. Die Decken und Trennwände werden nicht variiert, sie sind gemäß den Anforderungen der Statik und des Schallschutzes dimensioniert. Es wird gleichzeitig deutlich, dass Trennwände und Decken einen ebenso relevanten Beitrag zum GWP leisten. Die Trennwand ist vergleichbar mit einer 240 mm dicken Außenwand mit knapp 52 kgCO2äq und die Decke mit etwa 171 kgCO2äq liegt sogar noch deutlich über dem Wert der mit 42,5 cm dicksten Außenwand, die ein GWP von etwa 74 kgCO2äq aufweist.



	AW-MW-42.2	AW-MW-36.5	AW-MW-30.0	AW-MW-24.0	AW-MW-20.0	AW-MW-17.5	TW-MW	DE-MW
A1-A3	67,04	60,14	52,28	45,02	40,18	37,15	34,71	150,60
A4-A5	4,75	4,20	3,58	3,00	2,62	2,38	2,68	8,08
B	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	10,26	5,13
C1-C4	-2,17	-1,86	-1,51	-1,19	-0,97	-0,84	-1,33	8,01
A-C Bauteil	74,88	67,74	59,61	52,09	47,09	43,96	46,32	171,82

Abbildung 55: Vergleich des GWP pro m² der jeweiligen Bauteile

In folgenden Schritt werden, wie in Abb. 56 zu sehen ist, die Bauteilschichten mit den jeweiligen absoluten Flächen für den 18 Quadratmeter großen Referenzraum verglichen. Dasselbe Muster wie aus der Bauteilberechnung wird auch für den Gesamtraum deutlich. Die Hauptbeiträge zum GWP kommen aus den Trennwänden und den Decken.

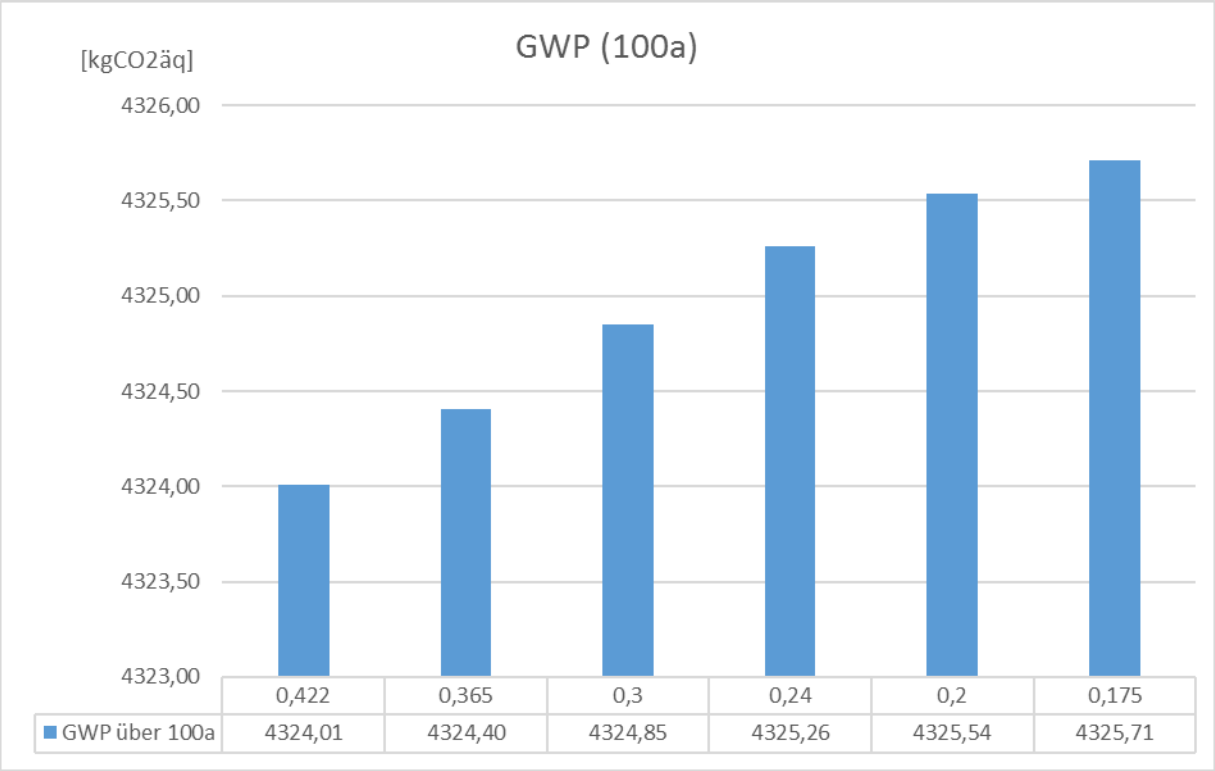


Abbildung 56: Vergleich des GWP pro Referenzraum

Betrachtet man den Indikator des erneuerbaren Ressourcenverbrauchs PERE, für den gesamten Referenzraum aus Mauerwerk, in Abb. 57 ist ein vergleichbares Muster zu erkennen. Die Außenwände liegen im Verhältnis sogar noch deutlich unter der Trennwand und der Decke. Im Vergleich zum nicht erneuerbaren Ressourcenverbrauch PENRE wird nur etwa ein Fünftel bis ein Sechstel der Herstellungsenergie aus erneuerbaren Quellen gedeckt.

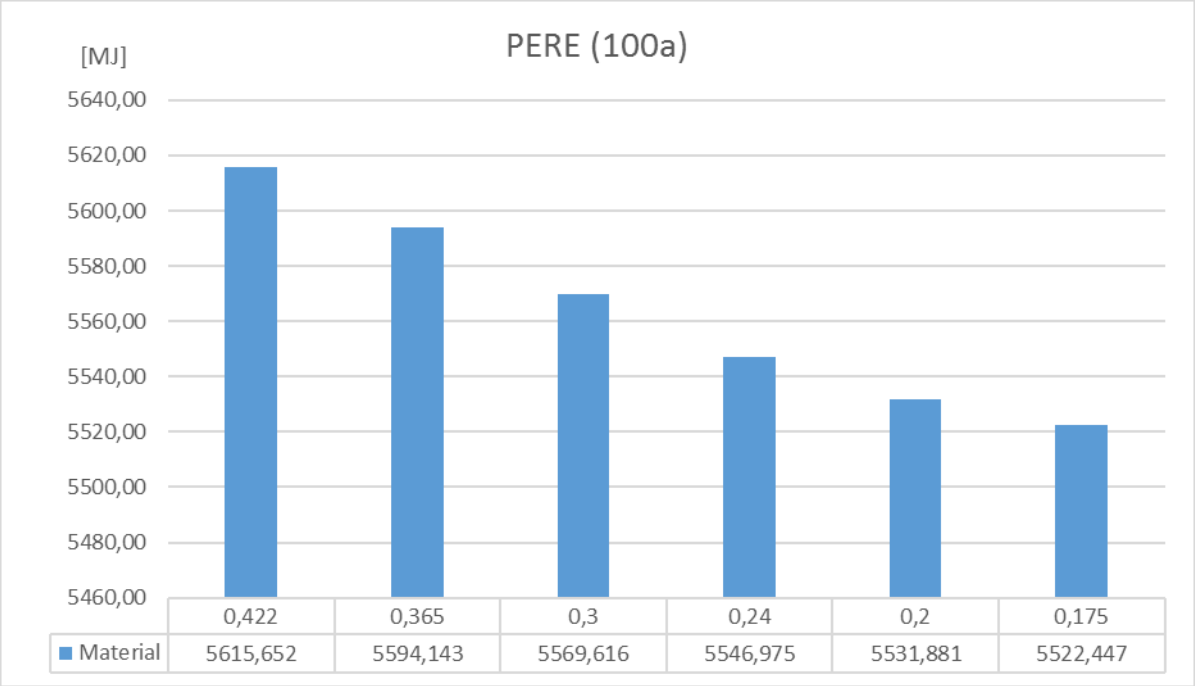


Abbildung 57: Vergleich des PERE pro Referenzraum

Der nicht erneuerbaren Ressourcenverbrauch PENRE für den Referenzraum macht auch wieder das Übergewicht der Trennwände und Decken im nicht erneuerbaren Herstellungsenergiebedarf deutlich, wie es in Abb. 58 zu sehen ist. Der Unterschied zum PERE ist etwa beim Faktor fünf bis sechs.

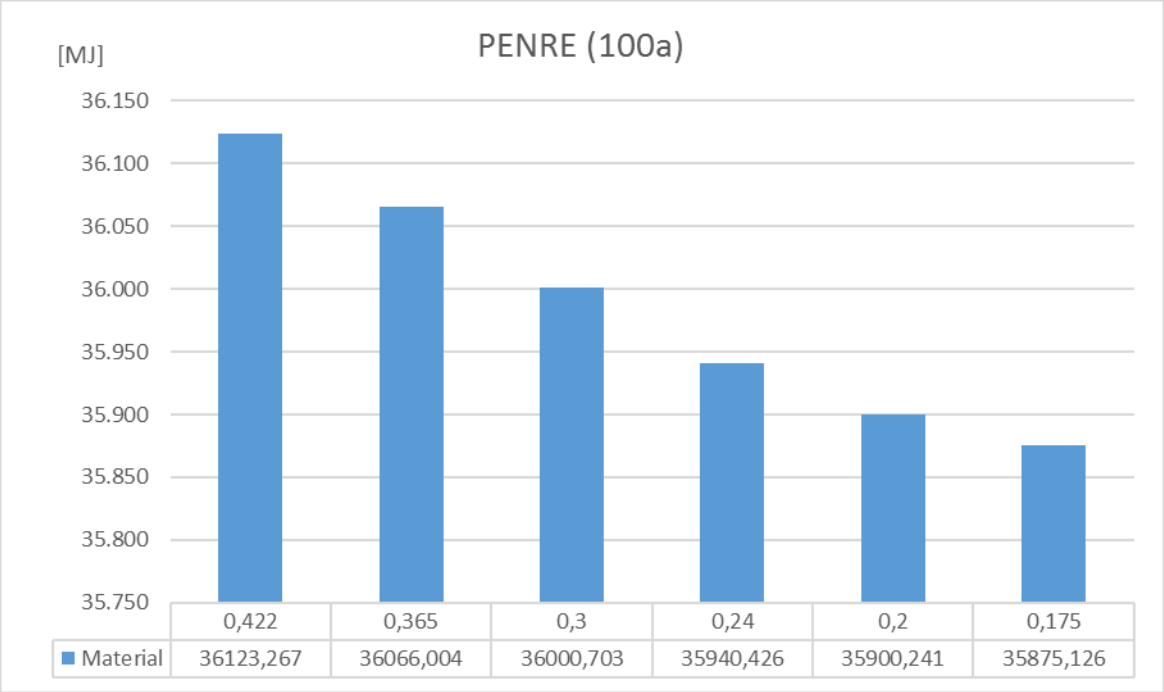


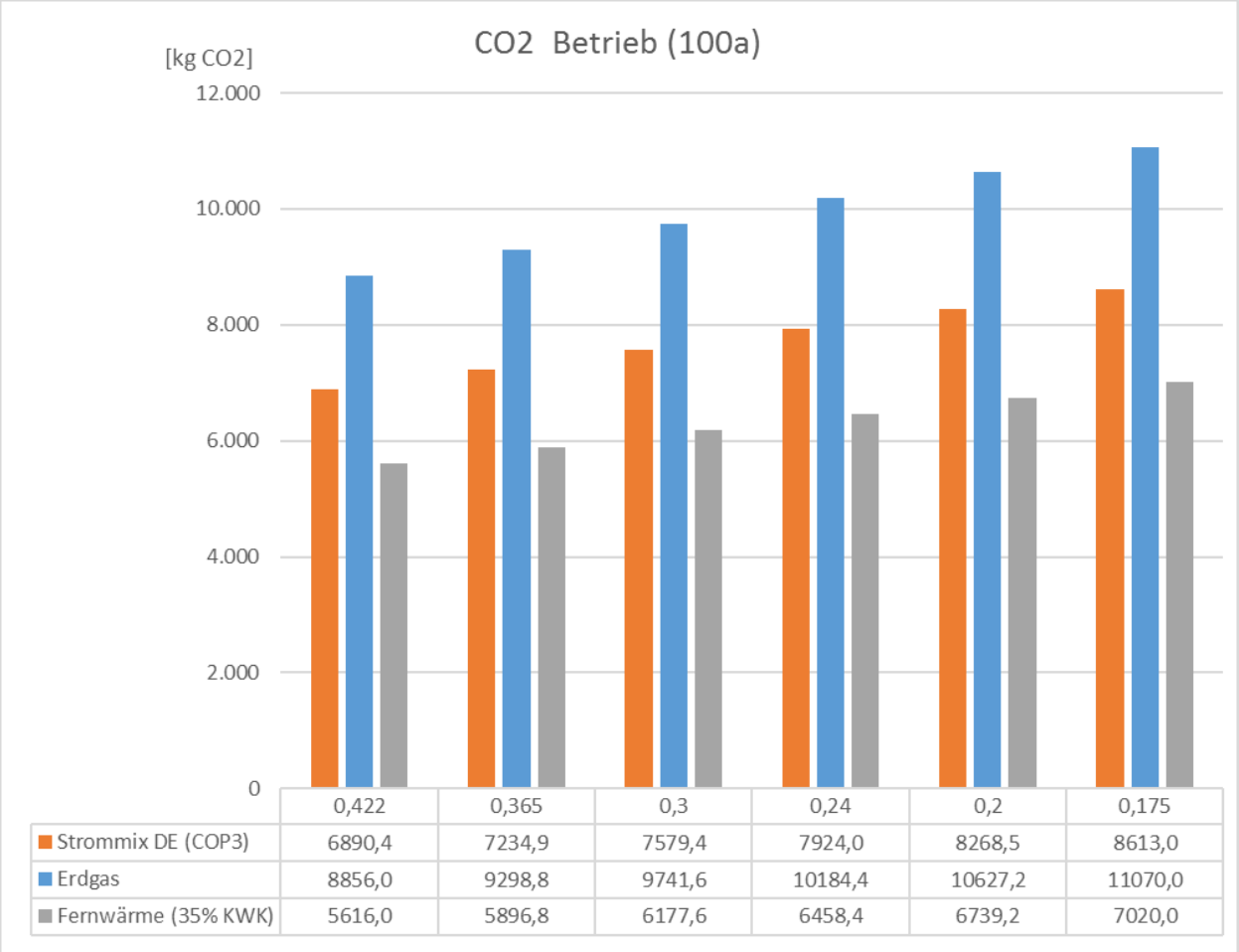
Abbildung 58: Vergleich des PENRE pro Referenzraum

Gesamtbetrieb mit Heizung

Der Einbezug des Heizwärmebedarfs in die Betrachtung der verschiedenen außenwand-dickengesteuerten Szenarien des gesamten Lebenszyklus verdeutlicht die Umweltwirkungen in Abhängigkeit vom Primärenergieträgerträger. Außerdem wird das Verhältnis von physischem Herstellungs-, Instandhaltungs- und Entsorgungsaufwand zu den gesamten Umweltwirkungen, inklusive der Emissionen aus dem 100-jährigen Betrieb deutlich.

Eingangs einer ausführlichen Untersuchung des Gesamtbetriebs soll der Einfluss des Primärenergieträgers kurz verdeutlicht werden. In Abb. 59 ist die Verteilung der Emissionen der unterschiedlichen Wandaufbauten der Außenwand dargestellt. Zudem werden die Emissionen aufgrund unterschiedlicher Primärenergieträger abgebildet. Während die schlechtere Dämmwirkung einen Anstieg der Emissionen um bis zu ein Drittel vom 425 mm bis zum nur 175 mm dicken Mauerwerk ausmacht. Das Basisszenario bildet eine Wärmepumpe mit COP 3 ab, deren Emissionen aus dem Stromverbrauch mit dem Strommix für Deutschland aus dem Jahr 2013 berechnet ist (IINAS, 2013). Demgegenüber steht ein Anstieg der Emissionen von einem Drittel, wenn im zweiten Szenario statt einer Wärmepumpe eine Gastherme mit Erdgas als Brennstoff zur Wärmeerzeugung verwendet wird. Um ein weiteres Drittel auf einen etwa 60% höheren Wert gegenüber dem Basisszenario steigen die Emissionen, wenn als drittes Szenario Fernwärme mit nur 35 % KWK Anteil verwendet wird. Die Emissionswerte für Erdgas und

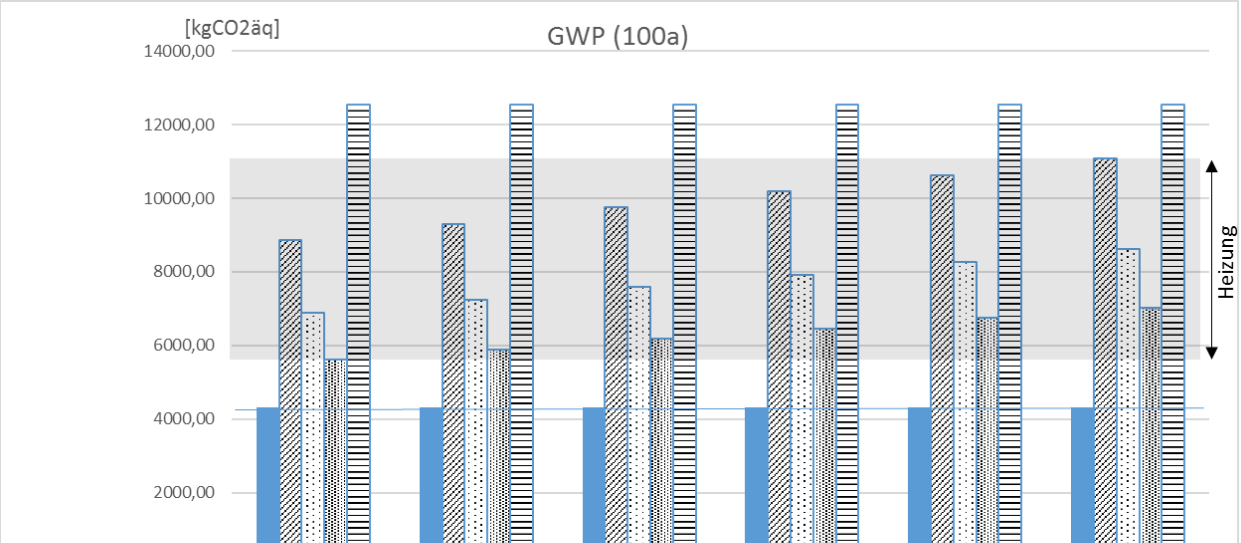
Fernwärme sind wie der Strom ebenfalls der Gemis Datenbank entnommen. Als Fazit kann festgehalten werden, dass sowohl passive Maßnahmen wie eine gute Gebäudehülle für die Reduzierung der Umweltwirkungen einfacher Bauten wichtig sind. Dazu muss noch ganz genau auf den Energieträger geachtet werden, der ein signifikantes Effizienzpotenzial bei der Reduzierung der Treibhausgasemissionen darstellt, das noch über dem Potenzial der guten Gebäudehülle liegt.



	0,422	0,365	0,3	0,24	0,2	0,175
Strommix DE (COP3)	6890,4	7234,9	7579,4	7924,0	8268,5	8613,0
Erdgas	8856,0	9298,8	9741,6	10184,4	10627,2	11070,0
Fernwärme (35% KWK)	5616,0	5896,8	6177,6	6458,4	6739,2	7020,0

Abbildung 59: Treibhausgasausstoß des Raumes für verschiedenen Außenwandaufbauten über 100 a und mit verschiedenen Energieträgern

Die relativ geringen Anteile der Herstellungsemissionen gegenüber den Betriebsemissionen zeigt die Abb. 60 mit den Szenarien der Außenwandaufbauten gegenüber dem Betrieb einer Gastherme. Während die Schwankungen für die Baukonstruktion zwischen den verschiedenen Wandstärken des Referenzraums mit 5% eher gering ausfallen ist die Variation der Emissionen aus dem Betrieb der Gastherme über 100 a mit bis zu 80 % Unterschied zwischen bester und schlechtester dämmender Außenwand sehr deutlich.



	0,422	0,365	0,3	0,24	0,2	0,175
GWP [kg CO2äq]	4324,01	4324,40	4324,85	4325,26	4325,54	4325,71
Erdgas	8856,0	9298,8	9741,6	10184,4	10627,2	11070,0
Strommix DE (COP3)	6890,4	7234,9	7579,4	7924,0	8268,5	8613,0
Fernwärme (35% KWK)	5616,0	5896,8	6177,6	6458,4	6739,2	7020,0
Strommix DE (Haushalt)	12528,0	12528,0	12528,0	12528,0	12528,0	12528,0

Abbildung 60: Übersicht Herstellung und Betrieb über 100 a des Referenzraums aus Mauerwerk

Lebenszykluskosten

In der Lebenszykluskostenanalyse werden die monetären Einflüsse der verschiedenen Konstruktionsweisen untersucht. Mittels einer Gegenüberstellung der jeweiligen entstehenden Kosten über den Lebenszyklus soll herausgefunden werden, inwiefern welche Konstruktionsart und die Materialwahl als effizient zu betrachten ist.

Zunächst werden die Herstell-, Instandhaltungs- und Abbruchkosten ermittelt und zusammenfassend mittels einer dynamischen Kostenrechnung analysiert. Bei der angewendeten Kapitalwertmethode werden alle über den Zeitraum entstehenden Kosten auf den heutigen Betrachtungszeitpunkt diskontiert. Der daraus resultierende Kapitalwert gibt Aufschluss über die Vorteilhaftigkeit der Investition. Ist der Kapitalwert positiv, ist die Investition als vorteilhaft anzusehen. Bei einem Vergleich ist diejenige Investition am lohnendsten, die den höchsten Kapitalwert aufweist. Mithilfe von Aufwandswerten für bestimmte Baustellenabläufe kann der zeitliche Einsatz für die Errichtung der Bauteile abgeschätzt werden. Dadurch soll qualitativ der Montageaufwand für die unterschiedlichen Konstruktionsweisen beurteilt werden. Da es sich um einen Vergleich zwischen Bauteilen von 1 m² Wandfläche handelt und um kein ganzes Gebäude, bei welchem positive Zahlungen in Form von beispielsweise Mieteinnahmen entstehen, kommen nur Auszahlungen für die Investition, Instandhaltung und den Rückbau auf. Der Kapitalwert ist somit am Ende theoretisch rechnerisch negativ, da die Investition keine Gewinne abwirft. Für den

Bauteilvergleich allerdings kann trotzdem die Vorteilhaftigkeit der Investition abgeschätzt werden. Je geringer der Negativwert der Investition ist, desto rentabler und damit effizienter ist das Bauteil.

Betrachtet man die Kosten nur auf der Ebene der Bauteile ohne die Betriebsenergie ist ein ähnliches Bild wie bei den Umweltwirkungen zu erkennen. Die Kosten für die Trennwände und Decken dominieren die Verteilung wie aus Abb. 61 im Vergleich der absoluten Lebens-zykluskosten für Herstellung, Instandhaltung und Abbruch der Bauteilaufbauten für den Referenzraum über 100 a zu erkennen ist.

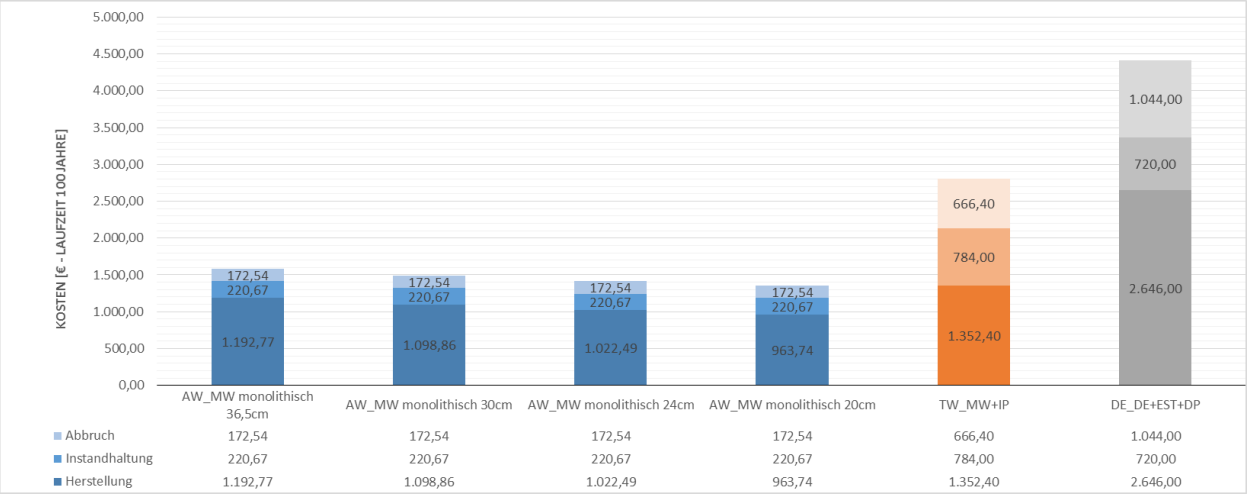


Abbildung 61: LCC der Bauteile für best-case Ziegel über 100 a

Eine ganz andere Verteilung ergibt sich, wenn man nach den verschiedenen Szenarien der Wandstärken der Außenwand unterscheidet und die Betriebsenergie über 100 a dazu nimmt. Dabei wird in Abb. 62 klar, dass die Herstellungskosten für den Referenzraum weiterhin dominieren und die Energiekosten im Szenario Gastherme nur einen Anteil von 26 % ausmachen. Außerdem schwanken die Energiekosten über die verschiedenen Wand-stärkeszenarien nur in einer relativ geringen Bandbreite.

Abb. 65 zeigt den Vergleich für den Referenzraum absolut inklusive des Heizwärmebedarfs über 100 a.

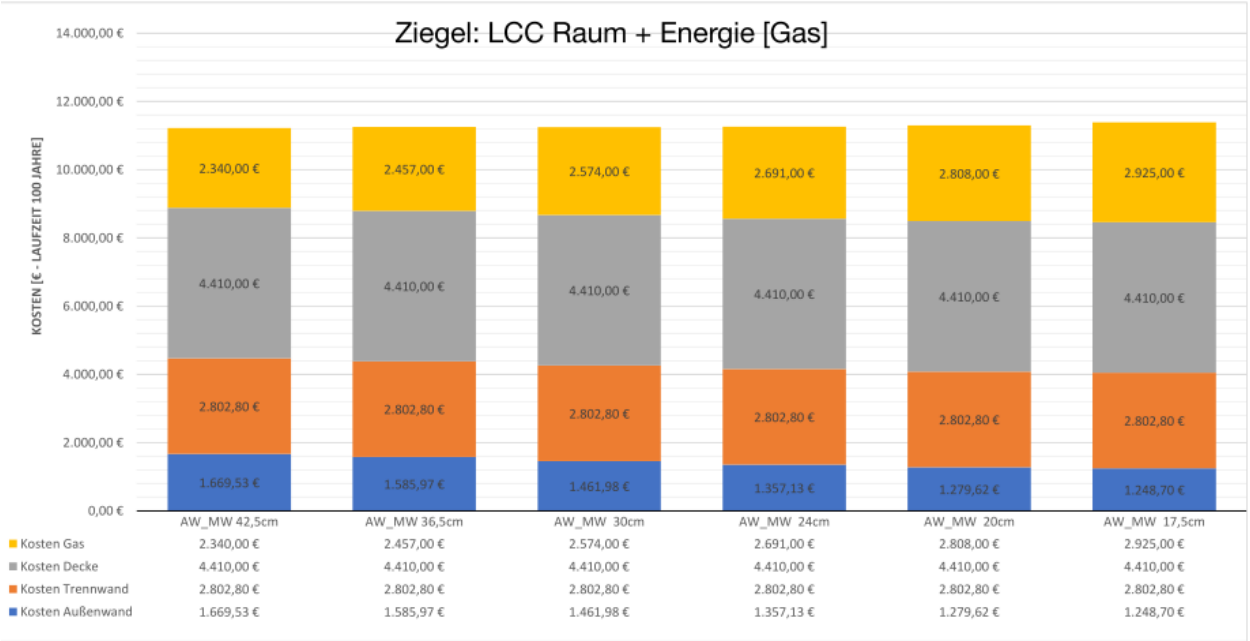


Abbildung 62: LCC best-case Ziegel inklusive Heizwärme über 100a

Zusammenfassend kann man folgende Schlussfolgerungen aus der Betrachtung des Referenzraumes ziehen:

- Verringerung der Außenwandstärke auf Kosten der Wärmetransmission (indirekt den HWB) reduziert die Umweltwirkungen über den Lebenszyklus nur eingeschränkt
- Höhere Wärmeverluste bedeuten deutlich mehr Heizwärmebedarf und damit mehr Emissionen, insbesondere falls fossile Energieträger zur Wärmeerzeugung verwendet werden
- Lebenszykluskosten ändern sich nur geringfügig bei dünneren Außenwandaufbauten. Dafür steigen die Energiekosten etwas an.
- Ideal wäre eine Verringerung des HWB bei gleichzeitig geringerem Materialverbrauch.

Dieses Idealszenario setzt bessere Materialeigenschaften (kleineres Lambda) der Außenwand, damit mit weniger Herstellungsemissionen ein ebenfalls geringerer Heizwärmebedarf entsteht, der dann bevorzugt aus erneuerbaren Quellen gedeckt werden sollte.

4.5.4 Lebenszyklusanalyse auf Basis des Raummodells

Die Parameterstudie der thermischen Simulation bildet die Grundlage, die in den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 ausgeführt ist. Zum Verständnis des Referenzraumansatzes ist ergänzend die Übersicht über die Raumkonfiguration sowie die verwendeten bzw. variierten Parameter in Abschnitt 3.6 anzuführen. Die Kennwerte aus der Simulation werden mit den Kennwerten für die

restlichen Lebenszyklusphasen von A1-A3, B3-4 und C1-4, also alle Größen die die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der materiellen Bestandteile der Raumvarianten erweitert. Bei der aktuellen Untersuchung der Umweltwirkungen der Parameterstudie einen Überblick zu schaffen und im Wesentlichen die Trends aufgrund höhere Stärken der Bauteilaufbauten und den daraus resultierenden Variationen des Heizwärmebedarfs in einer ersten Abschätzung zu evaluieren.

Es werden die drei einfachen, monolithischen Bauweisen aus Ziegelmauerwerk, Leichtbeton und Massivholz untersucht. Dabei finden die Mauerwerkskennwerte für LCA und LCC aus der Bauteilberechnung Eingang und für die anderen zwei Bauweisen werden die Umwelt- und Kostenkennwerte der Bauteilaufbauten entsprechend ermittelt.

Die folgende Auswertung in Abbildung 63 fasst die gesamten Emissionen an Treibhausgasen von Errichtung, Betrieb und Entsorgung über einen Zeitraum von 100 Jahren pro Raum zusammen und stellt sie in Abhängigkeit zum spezifischen Heizwärmebedarf der Raumvarianten dar. Dabei wird die Bauweise, also die Materialität als weiteres Merkmal farblich unterschieden. Die drei Bauweisen liegen alle drei recht nahe beieinander, was die jeweiligen Punktewolken betrifft. Innerhalb der Punktewolken zeigt sich die recht breite Streuung des spezifischen Heizwärmebedarfs von etwa 25 kWh/m²a bis zu rund 95 kWh/m²a und die daraus linear abhängige Beziehung zu den Umweltwirkungen von rund 22.000 kgCO2äq bis zu 52.000 kgCO2äq pro Raum. Mit steigendem Heizwärmebedarf steigt also auch das GWP linear an. Dabei kumuliert sich das betriebsbedingte GWP über den Zeitraum von 100 Jahren zum dominierenden Anteil mit etwa Dreivierteln und dem Anteil in der Konstruktion von einem Viertel des Gesamtvolumens an GWP auf.

Die Verteilung der Kennwerte innerhalb der Punktewolken macht auch die Schwerpunkte deutlich. Der weitaus größte Anteil des Heizwärmebedarfs und er Emissionen liegt in der unteren Hälfte also bis etwa 55 kWh/m²a und dazugehörigen maximal an die 40.000 kgCO2äq.

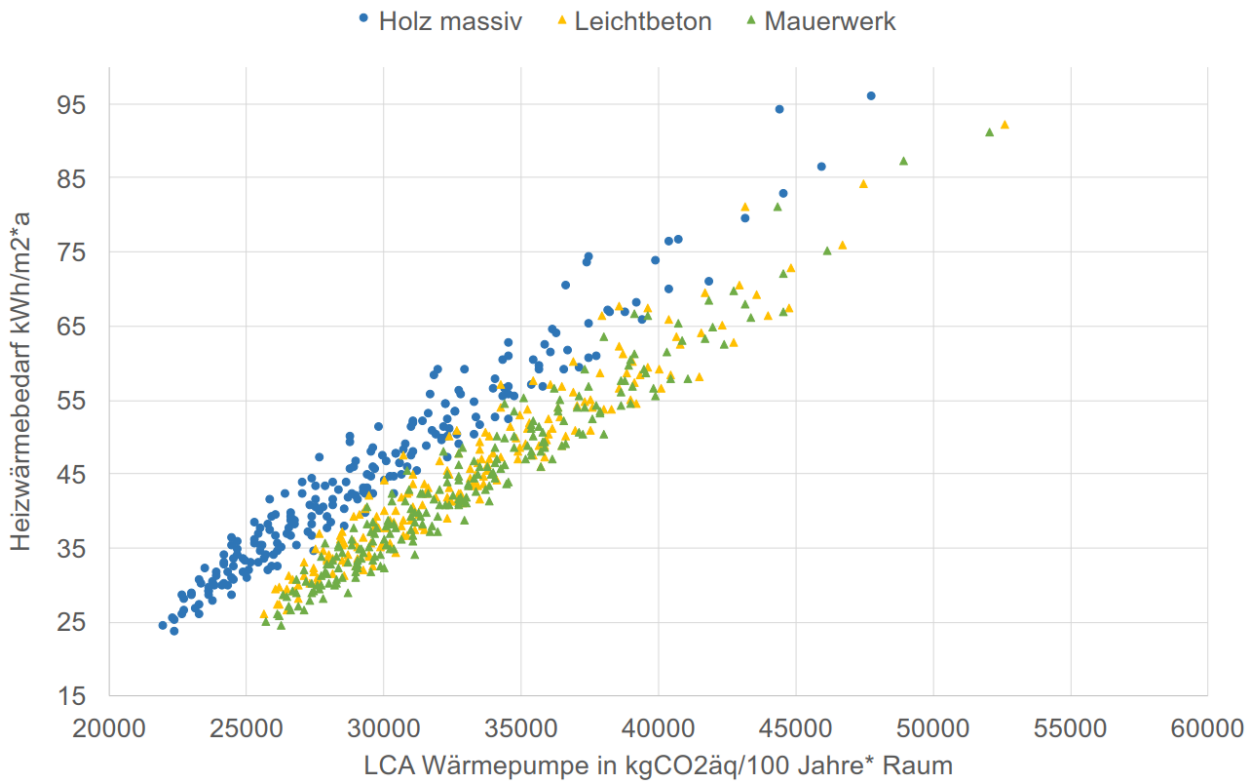


Abbildung 63: Exemplarischer Mittelraum, westorientiert, mit Darstellung des Gesamt-GWP gegenüber spezifischem Heizwärmebedarf

Für die Lebenszykluskosten entsteht eine ähnliche Abhängigkeit von dem Heizwärmebedarf, wie bei den Treibhausgasemissionen, wie in Abbildung 64 gut zu sehen ist. Die Bauweisen lassen sich wieder klar unterscheiden. Die Punktewolken liegen aber auch hier alle drei recht nahe beieinander. Die niedrigsten Werte des spezifischen Heizwärmebedarfs liegen bei etwa 25 kWh/m²a und steigen an bis zu rund 95 kWh/m²a und die daraus linear abhängige Beziehung zu den Kosten reicht von rund 58.000 € netto bis zu knapp 125.000 € netto pro Raum. Mit steigendem Heizwärmebedarf steigt die Kosten linear an. Der Hauptbereich der Kostenpunkte liegt bei bis zu 100.000 € netto bei einem spez. Heizwärmebedarf von bis zu 55 kWh/m²a. Somit ist auch für die Lebenszykluskosten ein bestimmender Faktor im Wärmebedarf über die gesamte Lebensdauer von 100 Jahren zu erkennen.

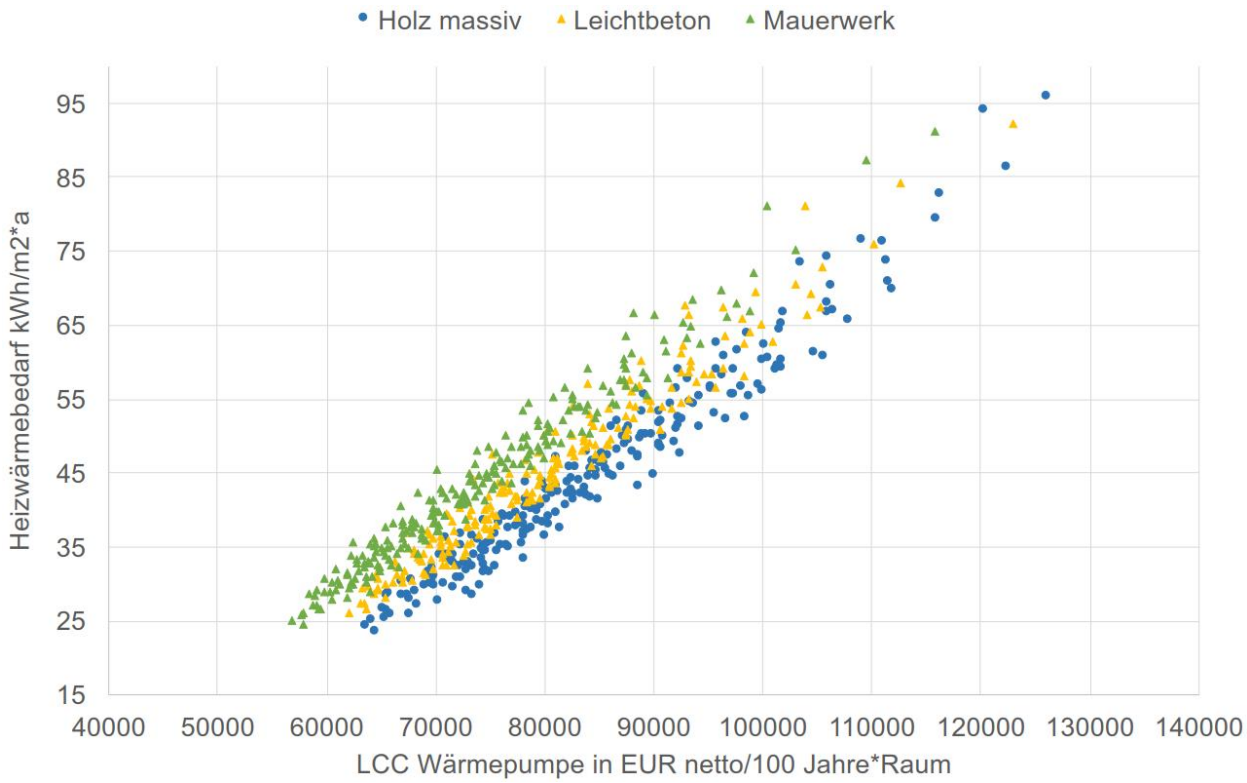


Abbildung 64: Exemplarischer Mittelraum, westorientiert, mit Darstellung des Gesamt-LCC gegenüber spezifischem Heizwärmebedarf

Weitere Ergebnisse für die anderen Himmelsrichtungen (Norden, Osten, Süden) und für die untersuchten Eckräume sind im Anhang zu finden.

Außerdem wird die Abhängigkeit der Emissionen und Kosten vom Lichtstromverbrauch untersucht. Auch hier finden sich die Ergebnisdiagramme im Anhang. Für den Lichtstromverbrauch der verschiedenen Raumvarianten in der Parameterstudie ergibt sich kein so eindeutiges Bild wie beim Heizwärmebedarf und es kann keine lineare Abhängigkeit des Lichtstromverbrauchs von den Umweltwirkungen oder den Kosten festgestellt werden.

Zusammenfassung und Interpretation der Datenauswertung:

- Der Einfluss der Außenwandorientierung macht sich beim Heizwärmebedarf bemerkbar.
- Mit der Zunahme der Außenwandstärke bzw. mit der verbesserten Wärmedämmung allein ist ein niedriges GWP über den 100 a Lebenszyklus nicht allein zu gewährleisten.
- Zusätzlich darf die Fenstergröße nicht zu groß werden.
- Der Fenster-U-Wert muss sehr gering sein, um einen niedrigen Heizwärmebedarf zu gewährleisten.
- Der Materialeinfluss auf die Treibhausgasemissionen ist bei 100 a Betrachtungszeitraum gering.

- Der Einfluss des Lichtstroms auf die Emissionsbilanz ist nicht so eindeutig wie der Heizwärmebedarf.

5 Untersuchungen auf Gebäudeebene (MS 8)

Nach der Untersuchung auf Raumebene erfolgt nun eine Erweiterung auf die Gebäudeebene.

Inputparameter Gebäude

Parameter Input	Werte
Typologie	Solitär
	Zeile
	Baulücke
Bauweise	LB / MW / HZ / St / NE

Inputparameter Technik

Parameter Input	Werte
Technikkonzept	spezifisch je Gebäude

Mengenermittlung

Parameter Input	Werte
Konstruktion	Alle Bauteile
Hülle	Alle Bauteile
Ausbau	relevante Bauteile
Technik	relevante Bauteile

1. Verbrauch

Verbrauchermittlung: Heizwärmebedarf wird über eine Berechnung angelehnt an das Monatsbilanz-Verfahren nach DIN V 4108-6 abgeschätzt. Aus Technikkonzepten und Nutzerdichte wird weiterer Energiebedarf abgeleitet

Parameter Output	Werte
Heizwärmebedarf	HWB in kWh/(m2*a)
Betriebsenergie	BE in kWh/(m2*a)

2. LCA / LCC

Phasen A1 bis C4

Set der Eingangsparameter (z. B. Energiekosten)

Parameter Output	Werte
CO2-Aquivalent	kgCO2äq/m2
Lebenszykluskosten	EURnetto/m2

Auswertung der Datensätze

Vergleichende Bewertung Bauweisen
Verknüpft mit Robustheitsuntersuchung
auf Raumebene

Abbildung 65: Schema Untersuchung auf Gebäudeebene

5.1 Inputparameter Gebäude

Grob gehaltene Entwürfe, welche sich modular aus ähnlichen Raummodulen zusammensetzen, werden gebildet. Dies erleichtert die Skalierbarkeit sowie die Mengenermittlung. Als Gebäudemodelle werden drei übliche Typen von Geschosswohnungsbauten untersucht.

Die Möglichkeiten in diesen Gebäudegrößen Räume anzuordnen, sind nahezu unendlich groß. Die hier gewählten drei Grobentwürfe sollen deshalb nicht als Beispiel für Grundrisslösungen angesehen werden, sondern als Objekt einer Dichtekategorie im Geschosswohnungsbau, an dem die geplanten LCA- und LCC-Analysen durchgeführt werden können.

Im Folgenden werden die drei Kategorien Solitär (Gebäudeklasse 3), Zeile (Gebäudeklasse 4) und Baulücke (Gebäudeklasse 5) kurz vorgestellt und auf Basis der spezifischen Parameter städtebaulich eingeordnet. Als Raster soll hier die Untersuchung zur Dichte aus der Veröffentlichung „Dichte Atmosphäre“ von Eberle/Tröger dienen (Eberle/ Tröger, 2017).

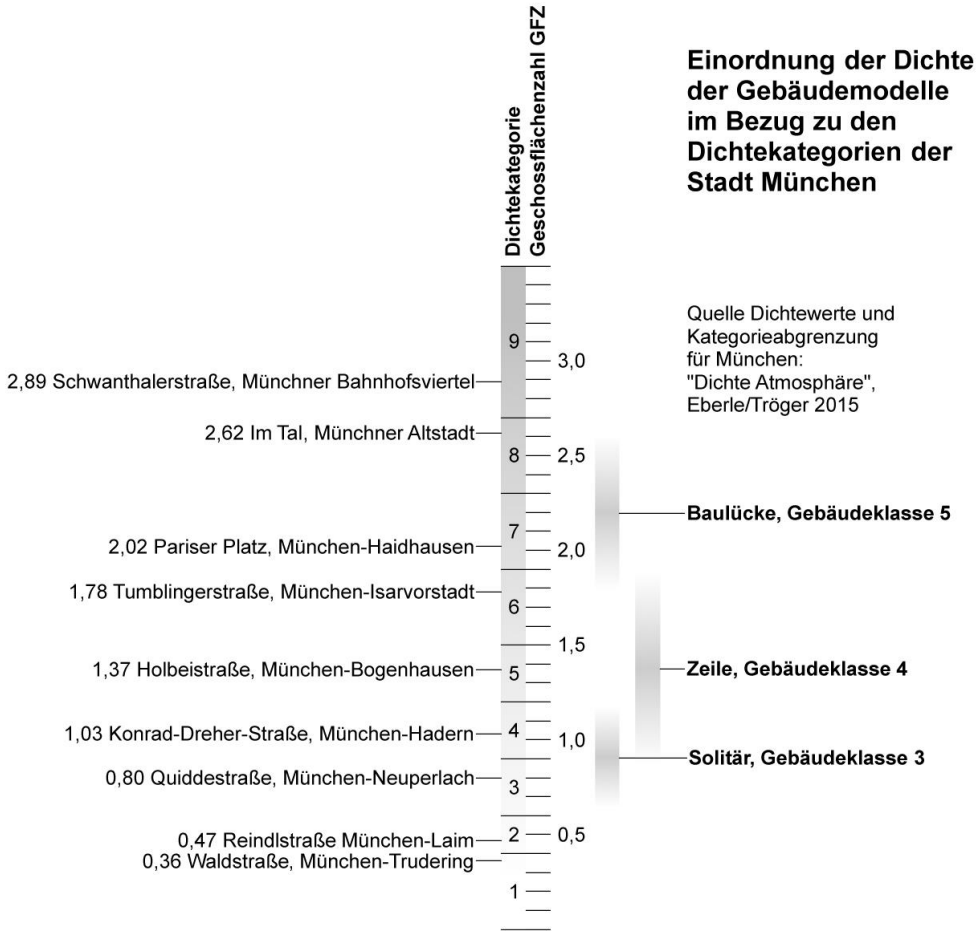
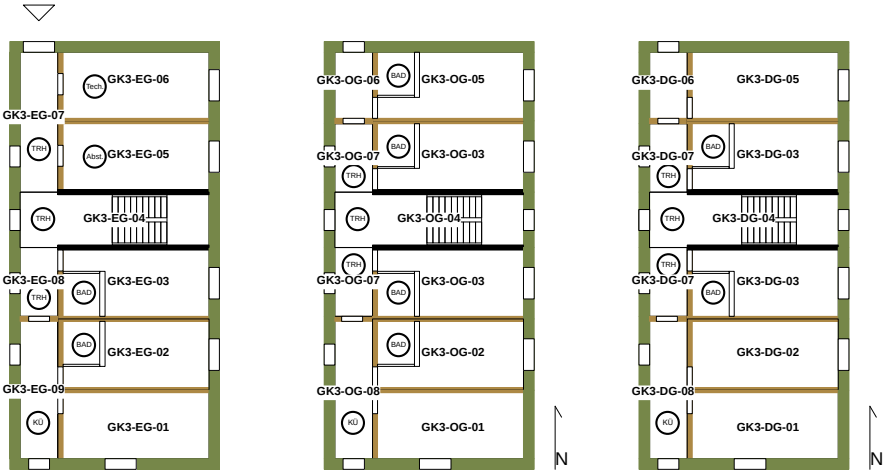


Abbildung 66: Einordnung der Dichte der Gebäudemodelle im Bezug zu den Dichtekategorien der Stadt München, eigene Darstellung, (Eberle/ Tröger, 2017)

5.1.1 Solitär



Erdgeschoss
Gebäude GK 3

1. Obergeschoss
Gebäude GK 3

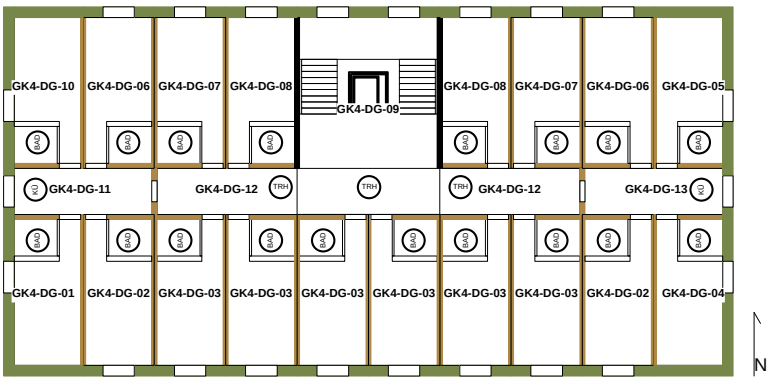
Dachgeschoss
Gebäude GK 3

Abbildung 67: Grundrisse Grobentwurf Solitär Gebäudeklasse 3 (GK 3)

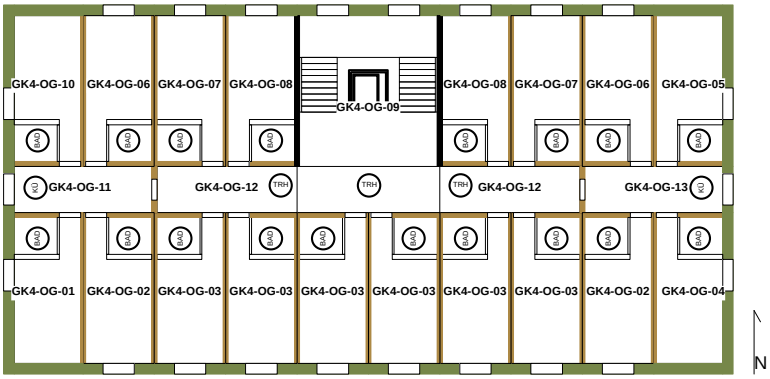
Mit einem dreigeschossigen freistehenden Baukörper lassen sich städtebauliche Dichten (GFZ) von 0,64 bis 1,17 erzielen. In einem Umfeld mit kleinteiliger Bebauung kann somit eine Flächeneffizienz erreicht werden, die um das Dreifache höher ist als eine Bebauung mit Einfamilienhäusern.

5.1.2 Zeile

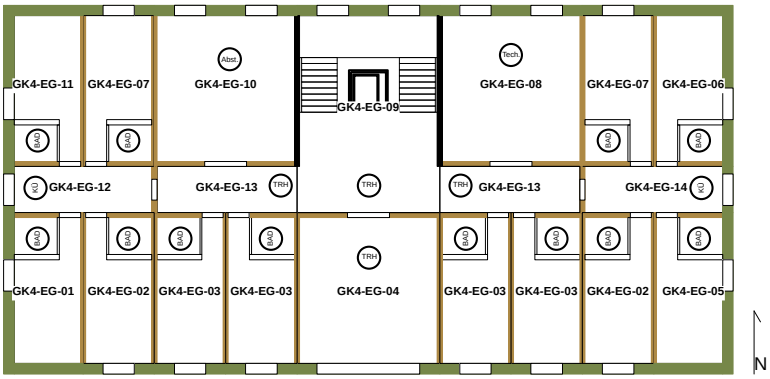
Mit einem viergeschossigen freistehenden Baukörper lassen sich städtebauliche Dichten (GFZ) von 0,87 bis 1,88 erreichen. Dies entspricht Stadterweiterungsflächen in offener Bauweise.



Dachgeschoss
Gebäude GK 4



1. und 2. Obergeschoss
Gebäude GK 4



Erdgeschoss
Gebäude GK 4

Abbildung 68: Grundrisse Grobentwurf Zeile Gebäudeklasse 4 (GK 4)

5.1.3 Baulücke

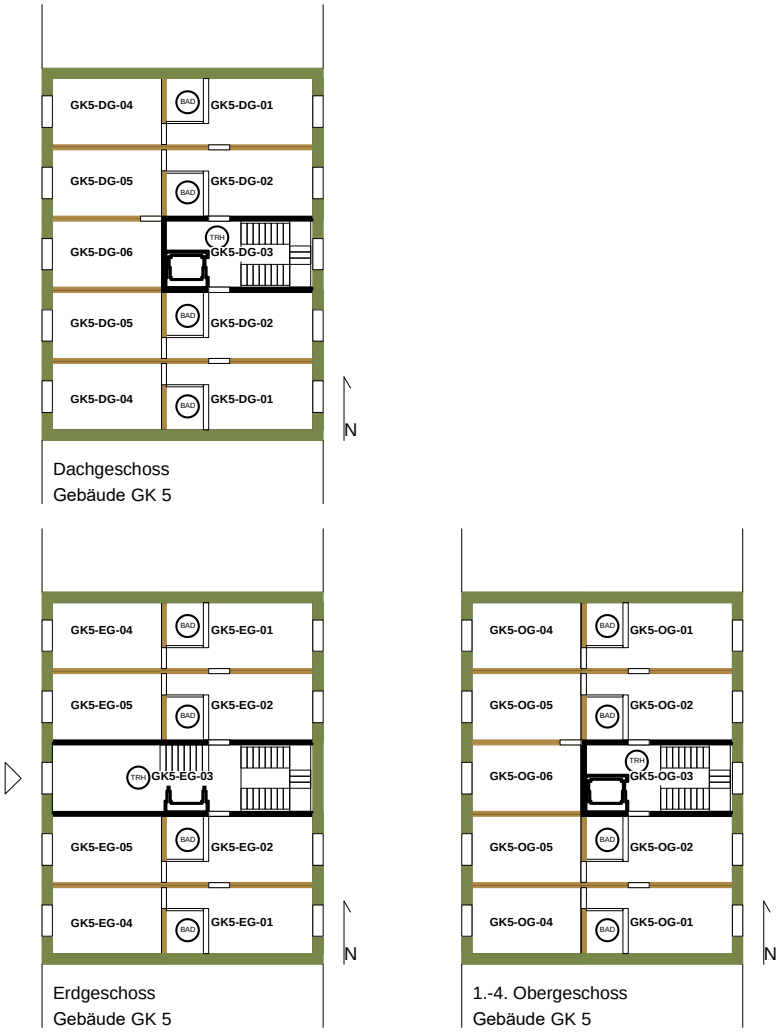


Abbildung 69: Grundrisse Grobentwurf Baulücke Gebäudeklasse 4 (GK 5)

Städtebauliche Dichten (GFZ) von 1,0 bis 2,0 können damit erreicht werden.

Mit einem sechsgeschossigen Baukörper als Teil einer Blockrandbebauung lassen sich städtebauliche Dichten (GFZ) von 1,79 bis 2,60 erreichen. Dadurch ist diese Bauform geeignet für Nachverdichtung in Innenstadtgebieten.

5.1.4 Abhängigkeit von städtebaulicher Dichte und Transmissionswärmeverlusten über die Gebäudehülle

Entscheidend für die Umweltauswirkung eines Gebäudes sind der Flächenverbrauch, der Erschließungsaufwand und das Verkehrsaufkommen durch Nutzung

Diese hängen direkt und indirekt von der Dichte der Siedlungsstruktur ab. Die oben genannten Einflussgrößen liegen außerhalb des Untersuchungsrahmens dieses Projektes. Es gibt aber Parameter, die direkt mit der Dichte zusammenhängen und deren Einfluss sich im Ergebnis unserer Analysen zeigen lassen:

- Materialeinsatz beim Bau
- Energieverbrauch im Betrieb

Wie in Tabelle 25 zu erkennen ist, steht das Verhältnis von Nutzfläche zu Hüllfläche (A/AN) im direkten Zusammenhang mit dem Dichtekennwert GFZ. So hat z. B. das untersuchte Gebäudemodell „Baulücke“ eine viermal kleinere Hüllfläche pro Nutzfläche als ein Einfamilienhaus (EFH) und damit auch ca. viermal weniger Wärmeverluste über diese Hülle. Auch der Materialeinsatz ist entsprechend geringer.

Tabelle 25: Baukörperkennwerte der drei Gebäudemodelle den Bauweisen Einfamilienhaus und Reihenhaus gegenübergestellt.

	EFH	Reihenhaus	Solitär	Zeile	Baulücke
Gebäudeklasse	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5
Nutzfläche AN in m2	192,00	184,32	704,00	2.820,10	1.614,59
Volumen Ve in m3	600,00	576,00	2.200,00	8.812,80	5.045,60
Hüllfläche A (ohne Brandwand) in m2	440,00	288,00	927,17	2.225,28	971,92
Verhältnis Hüllfläche zu Volumen (A/Ve)	0,73	0,50	0,42	0,25	0,19
Verhältnis Hüllfläche zu Nutzfläche (A/AN)	2,29	1,56	1,32	0,79	0,60
Bebaute Fläche (GR) in m2	100,00	96,00	204,00	612,00	238,00
Geschossfläche (GF) in m2	200,00	192,00	612,00	2.448,00	1.428,00
ca. Grundstück min in m2	350,00	200,00	525,00	1.300,00	550,00
ca. Grundstück max in m2	1.000,00	500,00	950,00	2.800,00	800,00
ca. GRZ max	0,29	0,48	0,39	0,47	0,43
ca. GRZ min	0,10	0,19	0,21	0,22	0,30
ca. GFZ max	0,57	0,96	1,17	1,88	2,60
ca. GFZ min	0,20	0,38	0,64	0,87	1,79

5.1.5 Bauteilschichten für die Untersuchung

Für die Untersuchung auf Gebäudeebene werden je Baustandard folgende Bauteilschichten und Schichtdicken angesetzt:

Tabelle 26: Bauteilaufbauten für die Untersuchung auf Gebäudeebene.

	Dicke (mm)
Einfach Bauen Mauerwerk (EB-MW)	**405**
Außenwand	
Lehmputz	20
Luftkammer-Ziegel	365
Aussenputz Kalkzement	20
Verglasung	
3-Scheiben Wärmeschutzverglasung	
g = 0,49; U-Wert Glas = 0,63 W/m2*K	
Decken	**375**
Zementestrich	55
Trittschalldämmung MiWo.	20
Überbeton	40
Elementziegeldecke	240
Lehmputz	20
Innenwände	**240**
Lehmputz	20
Hochlochziegel	200
Lehmputz	20
Bodenplatte	**530**
Zementestrich	80
Holzfaserdämmung	200
Stahlbetonbodenplatte	250
Dachkonstruktion	**490**
Dachabdichtung / -belag	
Holzwerkstoffplatte	
Luftschicht	
Holzfaserdämmung	250
Ziegelelementdecke	240

	Dicke (mm)
Einfach Bauen Leichtbeton (EB-LB)	**625**
Außenwand	
Infraleichtbeton	625
Hydrophobierung	
Verglasung	
3-Scheiben Wärmeschutzverglasung	
g = 0,49; U-Wert Glas = 0,63 W/m2*K	
Decken	**350**
Zementestrich	80
Trittschalldämmung MiWo.	50
Stahlbetondecke	220
Innenwände	**240**
Leichtbetonmauerwerk	240
Bodenplatte	**530**
Zementestrich	80
Holzfaserdämmung	200
Stahlbetonbodenplatte	250
Dachkonstruktion	**500**
Dachabdichtung / -belag	
Holzwerkstoffplatte	
Luftschicht	
Holzfaserdämmung	250
Stahlbetonbodenplatte	250

	Dicke (mm)
Einfach Bauen Massivholz (EB MH)	**410**
Außenwand	
Nadelholz	410
Holzverschalung	
Anstrich Holzlasur	
Verglasung	
3-Scheiben Wärmeschutzverglasung	
g = 0,49; U-Wert Glas = 0,63 W/m2*K	
Decken	**340**
Zementestrich	60
Trittschalldämmung MiWo.	40
Splittschüttung	100
Nadelholz	140
Innenwände	**240**
Nadelholz	90
Mineralwolledämmung	60
Nadelholz	90
Bodenplatte	**530**
Zementestrich	80
Holzfaserdämmung	200
Stahlbetonbodenplatte	250
Dachkonstruktion	**390**
Dachabdichtung / -belag	
Holzschalung	
Luftschicht	
Holzfaserdämmung	250
Nadelholz	140

	Dicke (mm)
Standard (ST)	**390**
Außenwand	
Stahlbetonwand	250
Ausgkleichs- und Klebeputz	15
Minderalwolldämmplatte	120
Aussenputz	5
Verglasung	
3-Scheiben Sonnenverglasung	
g = 0,20; U-Wert Glas = 0,63 W/m2*K	
Decken	**350**
Zementestrich	60
Trittschalldämmung MiWo.	40
Stahlbetondecke	250
Innenwände	**150**
Leichtbauplatte	12,5
Mineralwolledämmung	125
Leichtbauplatte	12,5
Bodenplatte	**340**
Zementestrich	60
Trittschalldämmung MiWo	40
Stahlbetonbodenplatte	250
Extrudiertes Polyserol	50
Dachkonstruktion	**410**
Dachabdichtung / -belag	
Expandiertes Polyserol	160
Stahlbetondecke	250

	Dicke (mm)
Niedrigenergie (NE)	**470**
Außenwand	
Stahlbetonwand	250
Ausgkleichs- und Klebeputz	15
Minderalwolldämmplatte	200
Aussenputz	5
Verglasung	
3-Scheiben Wärmeschutzverglasung	
g = 0,49; U-Wert Glas = 0,63 W/m2*K	
Decken	**350**
Zementestrich	60
Trittschalldämmung MiWo.	40
Stahlbetondecke	250
Innenwände	**150**
Leichtbauplatte	12,5
Mineralwolledämmung	125
Leichtbauplatte	12,5
Bodenplatte	**550**
Zementestrich	60
Trittschalldämmung MiWo.	40
Stahlbetonbodenplatte	250
Extrudiertes Polystyrol	200
Dachkonstruktion	**550**
Dachabdichtung / -belag	
Expandiertes Polystyrol	300
Stahlbetondecke	250

5.2 Technische Gebäudeausrüstung und Energieplanung

In diesem Kapitel werden die technische Gebäudeausrüstung und Energieplanung beschrieben. Das Energiekonzept des Einfachen Bauens wird mit den Konzepten des Standardgebäudes nach EnEV 2016 und des Niedrigenergiestandards verglichen. Dabei wird je nach Gebäude-standard auf folgende Aspekte eingegangen:

- Heizungs- und TWW-Konzept
- Raumluftkonzept
- Mess-, Steuer- und Regelungskonzept (MSR-Konzept)

Die Elektrotechnik sowie die Sanitärtechnik werden für alle Gebäudestandards gleich angesetzt und deshalb nicht vergleichend behandelt. Bezüglich der Gebäudetypologien (Solitär, Zeile, Baulücke) beziehungsweise Gebäudeklassen (GK 3, 4, und 5) unterscheiden sich die vorgestellten Energiekonzepte je Gebäudestandard nicht. Es wird angemerkt, dass die Auslegung der Komponenten an den Energiebedarf des Gebäudetyps angepasst werden muss.

5.2.1 Energiekonzept EnEV-Standard

Für das Energiekonzept eines EnEV-Standardgebäudes wurde in dieser Arbeit – nach aktuellem Stand der Technik und Anforderung der Verordnung – der häufigste Fall angenommen:

Eine Wärmeerzeugung und -bereitstellung durch einen Gasbrennwertkessel in Kombination mit Solarkollektoren, einem Kombi-Pufferspeicher für Trinkwarmwasser, sowie einer Wärmeübertragung in den Räumen durch Radiatoren. In der Simulation wird während der Wintermonate die Raumluft auf 21°C operative Temperatur geheizt. Die Leistung des Systems ist auf 40W/m² begrenzt. Damit werden bei kurzfristigem Absinken der Raumlufttemperatur (Fensterlüftung im Winter) keine Lastspitzen ausgeglichen. Das Absinken der Raumlufttemperatur wird zum Zwecke der Energieeffizienz akzeptiert.

Die natürliche Lüftungsstrategie beinhaltet einen statischen Luftwechsel über die Wintermonate nach EnEV von n=0,7/h. Darüber hinaus wird von einem intelligenten Nutzer ausgegangen, der durch das Öffnen der Fenster mit einer Querlüftungsmöglichkeit durch Klappen in der Badezimmertüre und Ablüfter im Badezimmer einen 2-fachen Luftwechsel ab 23°C Raumlufttemperatur bewirkt, bis sich die Raumluft auf 21,5°C abgekühlt hat. Ist die größer als 23°C und liegt die Außenlufttemperatur höher als die Raumlufttemperatur, so stellt der Nutzer lediglich den hygienischen Mindestluftwechsel her (mittlere Raumluftqualität IDA II, 30m³/(h*Pers)). Die Nachtspülung setzt grundsätzlich ab einer Außenlufttemperatur von mindestens 12°C/24h ein und wird in der Simulation mit einem Luftwechsel von n=4,0/h angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass der Nutzer vor dem Zubettgehen die Fenster öffnet und nach dem Aufstehen wieder schließt. Demnach wird die Nachtlüftung von 22 bis 8 Uhr angesetzt.

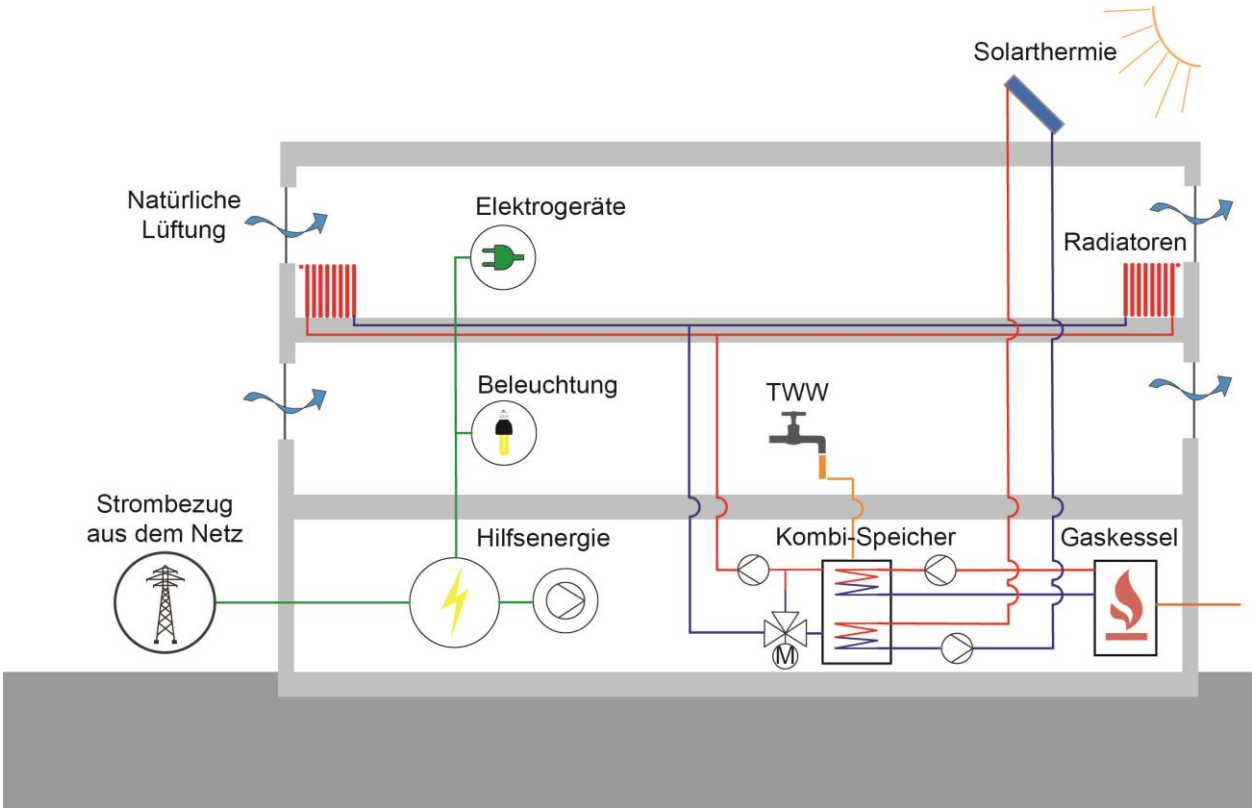


Abbildung 70: Energiekonzept EnEV-Standard

Zusammenfassung des Energiekonzepts:

- Heizungskonzept
  - Wärmeerzeuger: Gasbrennwertkessel und Solarthermie
  - Wärmeverteiler: Radiatoren
- Raumluftkonzept: Natürliche Lüftung
  - Zuluft über Fensterfalzlüfter und Fenster öffnen durch Nutzer
  - Abluft über Badezimmer
  - Nachtspülung über Fensteröffnung
  - Luftwechsel:
    - Winter: 0,7/h konstant
    - Sommer: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + Ablüften durch Nutzer 2,0/h; Nachtlüftung 4,0/h
- MSR-Konzept: keine komplexe Steuerung nötig (Thermostat an Radiatoren und Pufferspeicher)

5.2.2 Energiekonzept Niedrigenergiestandard

Angelehnt an Energiekonzepte der Passiv- und Niedrigenergiehäuser nach aktuellem Stand der Technik besteht das Energiekonzept aus einer Wärmepumpe mit Kombi-Speicher und Fußbodenheizung (Heizkonzept), sowie einer mechanischen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und Erdwärmetauscher (Lüftungskonzept).

In der Simulation wird während der Wintermonate die Raumluft auf 21°C operative Temperatur geheizt. Die Leistung des Systems ist auf 20W/m² begrenzt. Damit werden bei kurzfristigem Absinken der Raumlufttemperatur (Fensterlüftung im Winter) keine Lastspitzen ausgeglichen. Das Absinken der Raumlufttemperatur wird zum Zwecke der Energieeffizienz akzeptiert.

Die mechanische Lüftungsanlage bedeutet eine nutzerunabhängige Steuerung nach Luftqualität. Kaltluftabfälle durch Fensteröffnen im Winter werden vermieden, mittels Erdwärmekanal und Wärmetauscher werden die Lüftungswärmeverluste reduziert. Im Sommer temperiert der kontante Luftwechsel mittels Erdluftkanal-gekühlter Zuluft den Raum. Die Effekte sind bei einer Wärmekapazität der Luft mit c=0,34W/m²K nicht als sehr hoch anzusetzen, sondern sind eher als Minimierung von Spitzenlasten anzusehen.

Die Luftwechselrate der mechanischen Lüftungsanlage ist in der Simulation ganzjährig konstant auf n=0,35/h angesetzt. Zusätzlich wird von einem Nutzer ausgegangen, der im Sommer über die Fenster ablüftet, sobald die Raumlufttemperatur 23°C übersteigt, bis sich diese auf 21,5°C abgekühlt hat. Ist die Raumlufttemperatur größer als 23°C und liegt die Außenlufttemperatur höher als die Raumlufttemperatur, so öffnet der Nutzer die Fenster nicht und es bleibt bei n=0,35/h der mechanischen Lüftung. Trotz mechanischer Lüftungsanlage wird davon ausgegangen, dass der Nutzer im Sommer nachts lüftet. Die Nachtlüftung setzt ab einer Außenlufttemperatur von mindestens 12°C/24h ein und wird in der Simulation mit einem Luftwechsel von n=4,0/h angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass der Nutzer vor dem Zubettgehen die Fenster öffnet und nach dem Aufstehen wieder schließt. Demnach wird die Nachtlüftung von 22 bis 8 Uhr angesetzt.

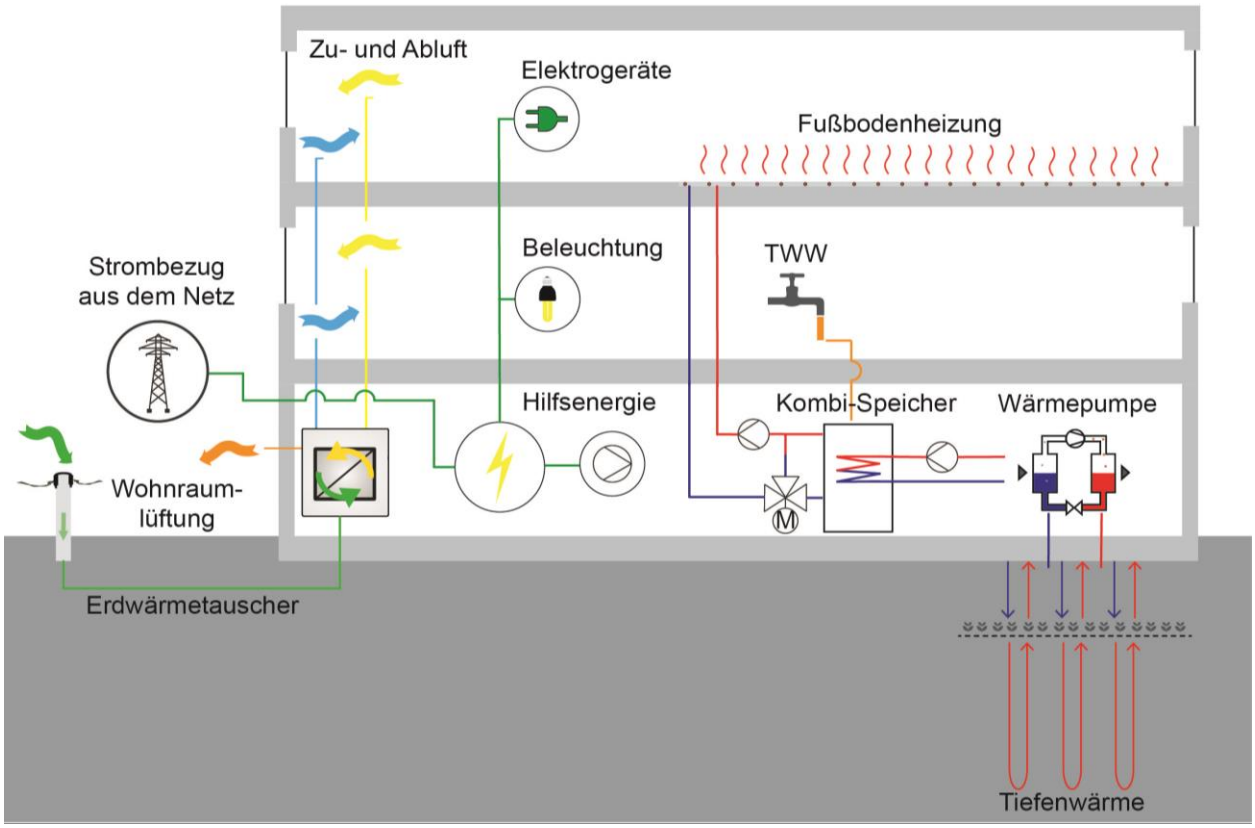


Abbildung 71: Energiekonzept Niedrigenergiestandard

Zusammenfassung des Energiekonzepts:

- Heizungskonzept
  - Wärmeerzeuger: Wärmepumpe mit Erdsonden
  - Wärmeverteiler: Fußbodenheizung (Niedertemperatursystem)
- Raumluftkonzept
  - Zuluft über mechanische Lüftungsanlage; LW = 0,35/h ganzjährig; im Sommer: Ablüften durch Nutzer 2,0/h und Nachtlüftung 4,0/h
  - Abluft über Badezimmer
  - Erdwärmetauscher; n = 0,75 (passive Luftvorerwärmung/-kühlung)
- MSR-Konzept
  - MSR Wärmepumpe
  - MSR Lüftungsanlage mit Erdwärmetauscher

5.2.3 Energiekonzept Einfach Bauen

Das Einfach Bauen zielt ab auf eine robuste, energieeffiziente, ressourcenschonende und zukunftsweisende Gebäudetechnik vor dem Hintergrund eines CO2-neutralen Gebäudebestandes, den es zu erreichen gilt. Unter Beachtung dieser Kriterien entsteht ein technisches Gebäudekonzept nach aktuellem Stand der Technik, das eine Kombination der EnEV-Standard- und Niedrigenergiestandard-Konzepte darstellt:

Die natürliche Lüftungsstrategie in den Wintermonaten beinhaltet einen Infiltrationsluftwechsel von 0,2/h, um den Feuchteschutz zu gewährleisten (Bauen mit Weitblick, 2018). Es wird von einem intelligenten Nutzer ausgegangen (idealer Nutzer), der die Fenster öffnet, sodass ein hygienischer Mindestluftwechsel nach mittlerer Raumluftqualität (IDA II, 30m³/h*Pers) vorliegt. In den Sommermonaten öffnet der Nutzer ab 23°C Raumlufttemperatur die Fenster, sodass ein 2-facher Luftwechsel zum Zweck des Ablüftens vorherrscht (siehe Lüftungsstrategie EnEV-Standard). Ist die Raumlufttemperatur größer als 23°C und liegt die Außenlufttemperatur höher als die Raumlufttemperatur, so stellt der Nutzer lediglich den hygienischen Mindestluftwechsel her (mittlere Raumluftqualität IDA II, 30m³/(h*Pers)). Die Nachtlüftung setzt ab einer Außenlufttemperatur von mindestens 12°C/24h ein und wird in der Simulation mit einem Luftwechsel von n=4,0/h angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass der Nutzer vor dem Zubettgehen die Fenster öffnet und nach dem Aufstehen wieder schließt. Demnach wird die Nachtlüftung von 22 bis 8 Uhr angesetzt.

Auf komplexe MSR-Technik wird verzichtet. Einzig die für die energieeffiziente Steuerung der Wärmepumpe notwendigen Sensoren und Regler werden eingebaut. So ergibt sich ein robustes Konzept (siehe Kapitel 4.5), das in seiner Funktionsweise mit der aktivierbaren Speichermasse der massiven Baukonstruktion harmoniert. Mit der Wärmepumpe als Wärmeerzeuger (kombinierbar mit Photovoltaik oder Solarthermie) benötigt das Gebäude ausschließlich Strom als Energieträger.

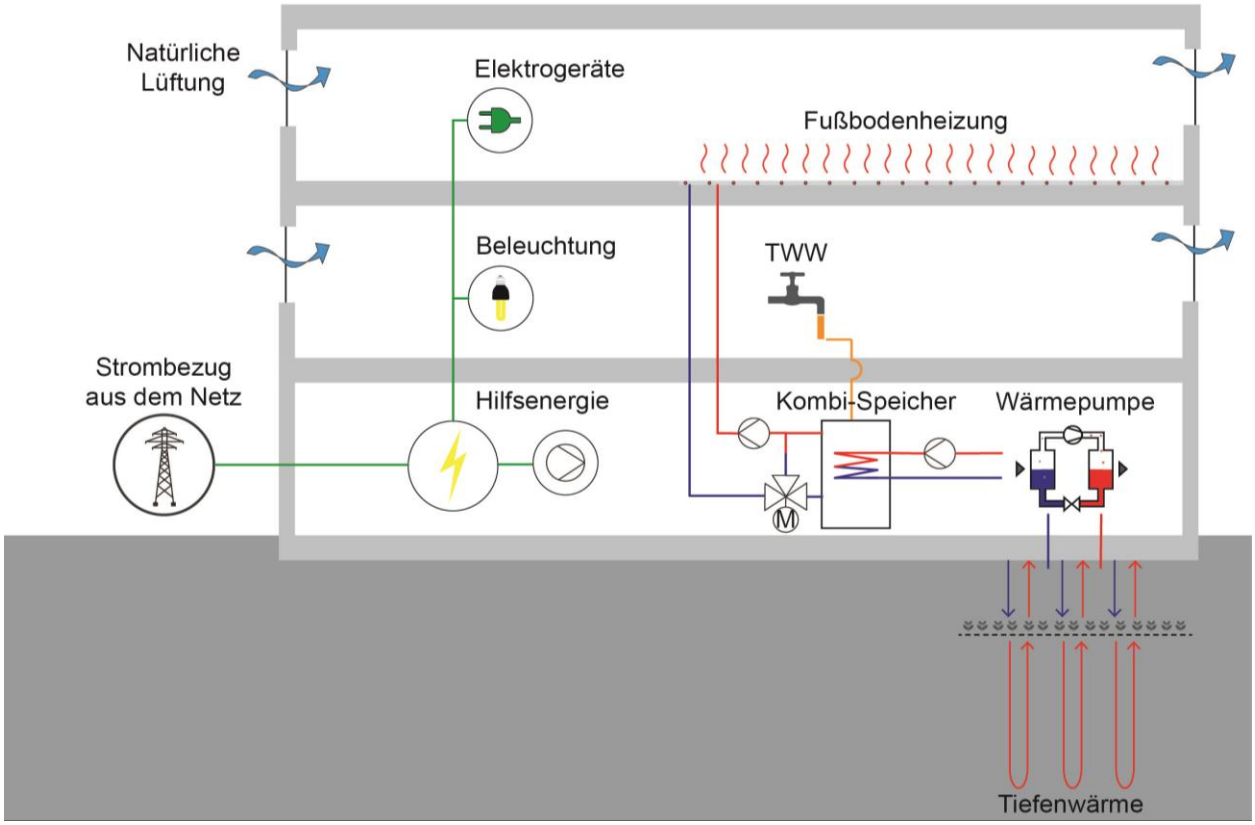


Abbildung 72: Energiekonzept Einfach Bauen

Zusammenfassung des Energiekonzepts:

- Heizungskonzept:
  - Wärmeerzeuger: Wärmepumpe + Erdsonden
  - Wärmeverteiler: Fußbodenheizung (Niedertemperatursystem)
- Raumluftkonzept: Natürliche Lüftung
  - Zuluft über Fensterfalzlüfter und Fensteröffnen durch den Nutzer
  - Abluft über Badezimmer
  - Nachtspülung über Fensteröffnen
  - Luftwechsel:
    - Winter: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + hygienischer Mindestluftwechsel (30 m³/(h*Pers)) wenn Nutzer anwesend
    - Sommer: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + Ablüften durch Nutzer 2,0/h; Nachtlüftung 4,0/h

5.3 LCA und LCC Analyse auf Gebäudeebene

5.3.1 Definition Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel- und Untersuchungsrahmen mit Systembeschreibung in Kurzfassung.

- Hochrechnung der Raumbetrachtung auf generische Gebäudetypen (3 unterschiedliche Gebäudetypen und 3 verschiedene Energiestandards) über den Lebenszyklus von 100 Jahren
- Ort und Geometrie
- Extrapolation von Typengebäuden auf Basis der Ausgangsbauteile für Decken, Außenwände, Trennwände, Fenster wie bei der Parameterstudie auf Raumebene
- Ergänzung und Differenzierung um Boden, Dächer, Innenwände, Türen, dazu Berücksichtigung besonderer Räume wie Bäder und Treppen
- Errechneter GWP Beitrag (A1-A3) und zukünftiger Entsorgungsaufwand (C1-C4)
- Errechnete Kosten für Herstellung und Betrieb äquivalent zur Identifikation der wichtigsten Einflussgrößen auf die Umweltwirkung (aus den verwendeten Stoffen (A-C) und aus dem Energiebedarf im Betrieb (B6)
- Verhältnis von Herstellung der Konstruktion und Haustechnik (Errichtung und Entsorgung A1-3, (A4-5), B4, C) zum Einfluss des Betriebs der verschiedenen Bauweisen und Energiestandards, und dabei besonders der Einfluss:
  - der Gebäudegeometrie A/V, Hüllflächenanteil und –qualität,
  - der Anlagentechnik, ihrer Effizienz und Lebensdauer,
  - des Brennstoffs bzw. der Primärenergiequelle.

Die Vorgehensweise für die LCA- und LCC-Untersuchungen wird in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels näher beschrieben. Sie folgt dabei der nachfolgenden Hypothese, die wie folgt lautet:

„[…] über den Lebenszyklus von 100 Jahren sind „einfache Bauten“ auch in einer Lebenszyklusanalyse den konventionellen Gebäuden oder Passivhäuern überlegen. Dies betrifft sowohl die Umweltwirkungen im Lebenszyklus als auch die Lebenszykluskosten […].“

Vor diesem Hintergrund werden verschiedene „einfache Bauweisen“ und unterschiedliche Gebäudevarianten miteinander verglichen, um eine Analyse der Konstruktions- und Betriebsparameter von „einfachen Konstruktionen“ auf die Lebenszykluskenndaten von Typengebäude durchzuführen. Die Baukonstruktionen auf der Basis der Untersuchung auf Raumebene werden weiterverwendet und um Sonderbauteile und –räume ergänzt.

Zur Ermittlung der Sachbilanz der im Gebäude verbauten Materialien wird eine Mengenermittlung auf der Basis von drei Typenentwürfen in den Gebäudeklassen 3-5 (GK 3-5) angestellt. Die verwendeten Konstruktionen und Gebäude sind in Kapitel 5.1 differenziert dargestellt. Als Referenz werden den einfachen Bauten in jeder Gebäudeklasse ein Standard-gebäude (ST) nach

EnEV-Standard 2016 mit Wärmepumpenheizsystem, alternativ mit konventioneller Gastherme und Solarthermie und ein Niedrigenergiegebäude (NE), dass an den Passivhausstandard angelehnt ist, gegenübergestellt.

Das Vorgehen auf der Gebäudeebene folgt in den Grundzügen der Untersuchung auf Bauteilebene und auf der Ebene des Einzelraums. Dabei werden die gleichen Bauteilaufbauten verwendet, es wird allerdings keine Parameterstudie mit unterschiedlichen Bauteilgeometrien durchgeführt. Es werden zuerst Bauweisen untersucht, die in sich weitestgehend einstofflich sind, insbesondere hinsichtlich ihrer Primärtragstruktur und Hüllaufbauten. In einem zweiten Schritt werden optimierte Varianten mit optimierten Konstruktionen berechnet. In allen Untersuchungen werden die dominanten Massen an Materialien wieder nach den Materialgruppen Ziegelmauerwerk (MW), Leichtbeton (LB) und Holzmassiv (HM) unterteilt in der zweiten Variante bleiben die Gebäudehüllen in den Materialgruppen aber für die Decken können andere Konstruktionen zum Einsatz kommen. Dadurch werden die Gebäude nicht mehr vollständig einstofflich, sondern sind hybride Bauweisen. Für die Gebäudebetrachtung werden die Konstruktionen und die Einzelräume auf drei generische Gebäudetypen und Gebäudeklassen, das Punkthaus, die Zeile und eine Blockrandbebauung in einer Baulücke skaliert.

Die Systemdefinitionen und Inputparameter für die Umweltwirkungen gelten äquivalent für die Kostenanalyse der Herstellung, des Betriebs über den Lebenszyklus von 100 Jahren. Die Grundlagen der Methodik der Lebenszykluskostenanalyse ist bei den Untersuchungen auf Raumebene bereits ausführlich dargestellt. Auch hier wird wieder ausgehend von den Bauteilen und der Mengenermittlung für die Gebäudetypen das Ergebnis der Kosten hochskaliert. Die ausgewerteten Kostenarten sind dabei die Herstellungs-, Instandhaltungs-, Abbruchkosten für das Gebäude und die TGA. Dazu kommen die Betriebskosten der gebäudespezifischen Technischen Gebäudeausstattung.

Die ausgewählte und untersuchte Größe der Umweltwirkung ist auch hier das Treibhauspotential von der Herstellung bis zur Entsorgung der Baustoffe und Bauteile und zusätzlich der wesentlichen Bestandteile der Technischen Gebäudeausstattung (TGA).

5.3.2 Sachbilanz und Inventar

Sachbilanzdaten Kurzfassung

- Input an Materialmengen bezogen auf jeweils 1 m^2 Bauteilfläche als wesentlicher Basisgröße für Bauteilbetrachtung
- Skalierung der Bauteilaufbauten auf Gebäudeebene anhand der Mengen je Bauteil und unterschiedlich für die drei Gebäudetypen mit unterschiedlicher Nutzfläche
- Berücksichtigung der Schichten aus den in der Regel mehrschichtigen Bauteil-aufbauten (bauphysikalisch funktional und damit zwangsläufig notwendig sind bspw. Wetterschutz-, Luftdichtheits-, Trittschalldämm-, Estrichschicht)

- Lebenszyklusdauer 100 Jahre mit Lebensdauern von Bauteilschichten in der Regel nach LNB
- Annahme der vollständigen 100a Lebensdauer für Tragkonstruktionen ohne Austausch
- Bilanzierung der Gebäudetechnik und des Energieverbrauchs anhand einer jeweils an die Gebäudegröße und die Bauweise angepasste Anlagenkonfiguration
- Zusammenfassung der Herstellungsbilanz der Phasen A1-3, B4 (Instandsetzung) und C1-4

In der Sachbilanz besteht die notwendige Basisgröße aus dem Stoffstrom der verbauten Baustoffe und –teile. Somit wird in der Sachbilanz auf der Gebäudeebene der Input an Materialmengen bezogen auf jeweils einen Quadratmeter der betreffenden Bauteilfläche und mit allen ungestörten Flächen des Bauteils skaliert. Insofern sind auch wieder alle an der Konstruktion beteiligten Bauteilschichten in der Sachbilanz mitberücksichtigt, bis auf die Oberflächen und Beläge. Da es durch die Klimaeinflüsse an der Hülle zu regelmäßigen Instandhaltungsmaßnahmen und Austausch einer oder mehrerer Bauteilschichten kommt und auch die TGA mit ihren relativ kurzen Erneuerungszyklen wird entsprechend betrachtet.

Die Genauigkeit der LCA- und LCC-Berechnung orientiert sich geometrisch ebenfalls am Monatsbilanzverfahren zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs und rechnet dabei die Gebäude- und Bauteilgeometrien mit Außenmaßbezug und die Fenster mit der Rohbauöffnung.

Die Leistung der Bauteile orientiert sich in diesem Abschnitt nur an den Anforderungen der EnEV bezüglich ihres Wärmedurchgangskoeffizienten, lediglich für die Referenzvariante des Niedrigenergiegebäudes werden höhere Anforderungen an die Hülle gestellt. Dazu kommen noch weitere Anforderungen und Definitionen z.B. an die Tageslichtversorgung und das Nutzerverhalten, die ausführlich im Kapitel 5.1 erörtert und festgehalten werden. Eine spezifische LCA- und LCC-Untersuchung von Detailanschlüssen und deren möglichen höheren Umweltwirkungen oder Mehrkosten wird nicht durchgeführt, da dieser Genauigkeitsgrad nicht in Entwurfsstudien der Typengebäude abgebildet ist, vgl. Tabelle 32.

Tabelle 27: Übersicht Methodik der Sachbilanz auf Gebäudeebene und Festlegung der notwendigen Inputparameter

Lebenszyklusphase	**Stoff- und Energieströme**	**Bilanzierungweise**	**Lebensdauern**
A1-A3	Baustoffe / Bauteile TGA[1] / Leitungen[2]	Immer, Ökobaudat	nach LNB; und Experteneinschätzung
A4-A5	Baustoffe / Bauteile TGA / Leitungen	bedingt, sofern Ökobaudat	-
B4	Baustoffe / Bauteile TGA / Leitungen	Immer, Ökobaudat	nach LNB; und Experteneinschätzung

B6	Energiebedarf Monatsbilanzverfahren (Brennstoff oder Strom)	Immer, Ökobaudat	Betriebsdauer = Lebensdauer 100a
C1-C4	Baustoffe / Bauteile TGA / Leitungen	Immer, Ökobaudat; Entsorgungsszenarien nach KrWG	-
Vereinfachungen	Geometrieerfassung mit Außenmaßbezug; ungestörte Bauteilflächen; Öffnungen abgezogen (bzw. als eigene Bauteile deklariert)	Immer	-
Ausschluss	Elektroinstallationen; Keine Anschlüsse mit konstruktiv-materiellem Mehraufwand	Nie	-
[1] Geräte für die Heizung und Lüftung [2] Leitungen und Übergabe für Heizung und Lüftung			

Zusätzlich wird die Elektroinstallation von der Berechnung ausgeklammert, da davon ausgegangen wird, dass diese Größe bei allen Gebäudetypen als gleichwertig anzusetzen ist und die Analyse nicht um diesen Parameter differenziert werden muss. Ergänzend dazu werden wieder die Emissionen für den benötigten Energiebedarf für den Betrieb (B6) der Gebäudetypen aufgrund deren Heizwärmebedarfs und Betriebsstroms ermittelt. Dieses Mal nicht mittels einer dynamischen Simulation, sondern auf Basis des Monatsbilanzverfahrens, weil sich aus den bisherigen Simulationsergebnissen ergeben hat, dass dieses Verfahren hinreichend genaue Ergebnisse für den vorliegenden Genauigkeitsgrad liefert. Aus diesen Ergebnissen werden die Einflussgrößen auf die Umweltwirkung aus den verwendeten Stoffen (A-C) für die Konstruktionen ermittelt. Dadurch, dass die Gebäudetechnik als neuer Parameter in die Lebenszyklusanalyse einbezogen wird, ist das Verhältnis der Umweltwirkung von Herstellung der Konstruktion und Haustechnik zueinander genauer zu analysieren. Dazu kommen die Einflüsse aus der Betriebsphase der verschiedenen Bauweisen und Energiestandards.

In der Sachbilanz unterscheiden wir generell die Primärkonstruktion, das sind alle Rohbauteile (Fundamente, tragende Wände oder Stütze, Decken, Dachtragwerk), von der Hülle und der Sekundärkonstruktion Die Gebäudehülle umfasst die Außenwände, Fassaden, Fenster, Außentüren, Bodenplatten und Dachhaut. Die Sekundärkonstruktion sind nachgeordnete, nichttragende Bauteile, z.B. Innenwände, Unterdecken oder Einbauten. Das Ergebnis der Sachbilanz zeigt generell die mengenmäßige Dominanz der Primärstruktur und der Hüllfläche vor den Ausbauten. Hier sind die größten Flächen an Bauteilen verbaut und der materialbezogene Input anhand der Bauprodukte in den Bauteilen ist ebenfalls am höchsten.

Die Ergebnisse der Lebenszykluskosten errechnen sich aus der Errichtung und Instandhaltung der Hochbaukonstruktion und der TGA. Die Instandsetzungszyklen sind nach LNB angenommen. Dazu werden für die Betriebszeit und die Instandsetzungen die Barwerte über die Nutzungszeit von 100 Jahren errechnet. Als Eingangsdaten wird ein kalkulatorischer Zins von 1,5 % und eine Energiepreissteigerung und Inflation von 4% angesetzt.

Tabelle 28: Übersicht der Sachbilanzzwischenergebnisse für alle Gebäudeklassen

Gebäude-klasse	Bauweise	Heizsystem	ZWS Sachbilanz Primär + Hüllkonstr.	ZWS Sachbilanz Sekundärkonstr.
			[m²]	[m²]
GK3	ST	WS (Wärmepumpe m.L.)	1.307,24	747,82
GK3	ST	ST (Gasbrennwert m.L.)	1.307,24	747,82
GK3	MW	EB (Wärmepumpe o.L.)	1.369,64	685,42
GK3	LB	EB (Wärmepumpe o.L.)	1.359,24	695,82
GK3	HM	EB (Wärmepumpe o.L.)	1.369,64	685,42
GK3	NE	NE (Wärmepumpe m.L.)	1.369,64	685,42
GK4	ST	WS (Wärmepumpe m.L.)	3.884,10	3.115,15
GK4	ST	ST (Gasbrennwert m.L.)	3.884,10	3.115,15
GK4	MW	EB (Wärmepumpe o.L.)	4.102,26	2.896,99
GK4	LB	EB (Wärmepumpe o.L.)	4.065,90	2.933,35
GK4	HM	EB (Wärmepumpe o.L.)	4.102,26	2.896,99
GK4	NE	NE (Wärmepumpe m.L.)	4.102,26	2.896,99
GK5	ST	WS (Wärmepumpe m.L.)	1.761,58	1.771,95
GK5	ST	ST (Gasbrennwert m.L.)	1.761,58	1.771,95
GK5	MW	EB (Wärmepumpe o.L.)	1.761,58	1.629,15
GK5	LB	EB (Wärmepumpe o.L.)	1.761,58	1.652,95
GK5	HM	EB (Wärmepumpe o.L.)	1.761,58	1.629,15
GK5	NE	NE (Wärmepumpe m.L.)	1.761,58	1.629,15

5.3.3 Basisvarianten mit LCA und LCC Ergebnissen auf Gebäudeebene

Festlegung der Basisvarianten

Ausgangspunkt für die Basisvarianten sind einfache Baukonstruktionen wie sie bereits im Kapitel 4.4 auf der Raumebene detailliert untersucht wurden. In einem ersten Schritt werden die drei verschiedenen Gebäudetypen weitgehend aus einem Baustoff und als „einfache Baukonstruktion“ berechnet und miteinander verglichen. Diese monostofflichen Konstruktionen der Basisvarianten bezeichnen wir hier als die Basiskonstruktion.

Das Ergebnis der Wirkungsbilanz bezieht sich auf den Indikator der klimaschädlichen Umweltwirkungen des Global Warming Potentials [kgCO2äq]. Die Lebenszykluskosten sind in

Euro netto [€] angegeben. Die absoluten Gesamtwerte für alle Gebäudetypen und Bauweisen werden normiert auf die jeweiligen Nutzflächen und ein Jahr. Somit sind die Ergebnisse der Gebäudetypen untereinander vergleichbar.

Eine Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse der Umweltwirkungen ergibt, dass sich die bestehenden Zusammenhänge zwischen der Gebäudegeometrie, dem Hüllflächenanteil und ihren jeweiligen Auswirkungen auf den Hüllflächenanteil und den Heizwärmebedarf und damit wiederum auf die Emissionen der Erstellung der Konstruktion und des Betriebs des Gebäudes als voneinander abhängig erweisen. Als ein weiterer Anhaltspunkt der Plausibilitätsunter-suchung dient die Anlagentechnik, in ihrer Effizienz im Brennstoffverbrauch bzw. der Energiequelle. Auch hier wird deutlich, dass eine Verbesserung von Effizienz und ein erneuerbarer Energieanteil, wie bei der Wärmepumpe, die Umweltwirkungen auf der Betriebsseite merklich senkt.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Basisvarianten

Die Berechnungsergebnisse werden in der Zusammenfassung kurz dargestellt und sind im Anhang IV *LCA/LCC der Basisvarianten auf Gebäudeebene* ausführlich dokumentiert. Bei den Umweltwirkungen des GWP zeigt sich am Ende eine ähnliche Konstellation wie bei der Betrachtung auf Raumebene. Das heißt, dass der Betrieb über 100 Jahre die dominante Größe in Bezug auf die Emissionen darstellt. Weiterhin sind nachwachsende Baustoffe besser geeignet für die Reduzierung der aktuellen Klimawirkungen bei der Herstellung der Baustoffe. Erneuerbare Energiequellen leisten einen wesentlichen Anteil zur Reduzierung des GWP aus dem Betrieb.

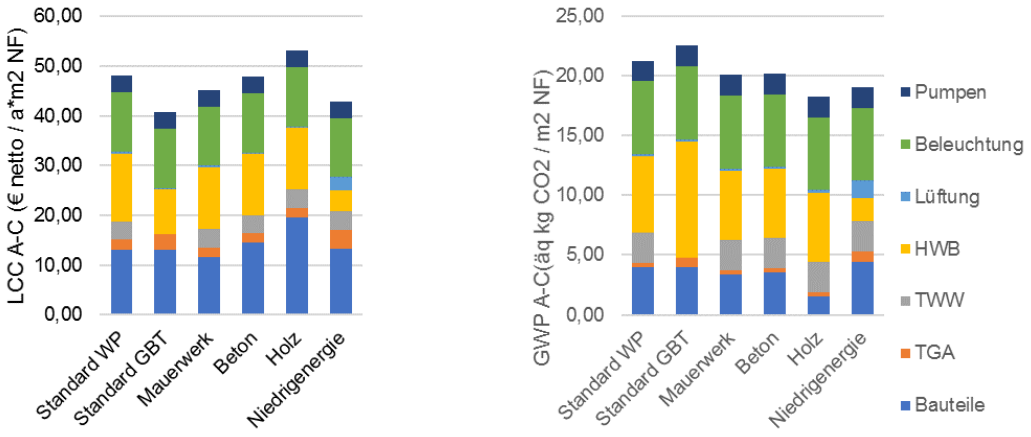


Abbildung 73: Monostoffliche „Einfache Bauten“ GK3 (Solitär) pro m² NF und a

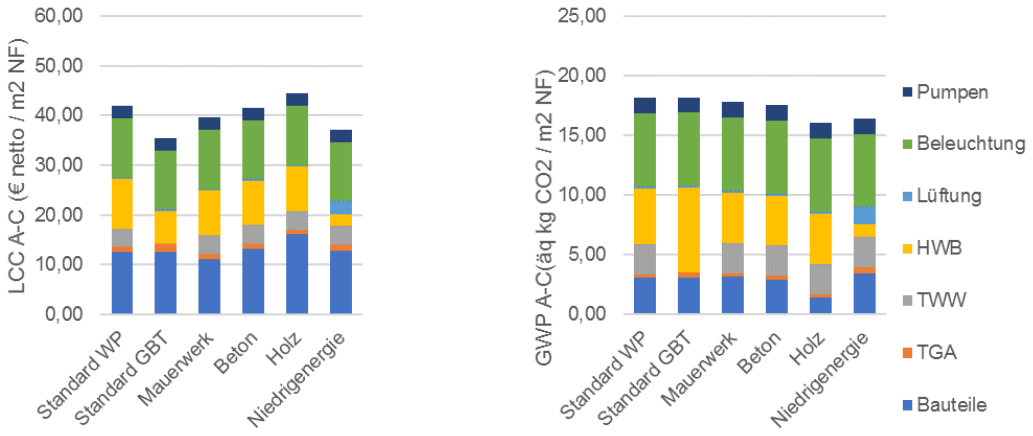


Abbildung 74: Monostoffliche „Einfache Bauten“ GK4 (Zeile) pro m² NF und a

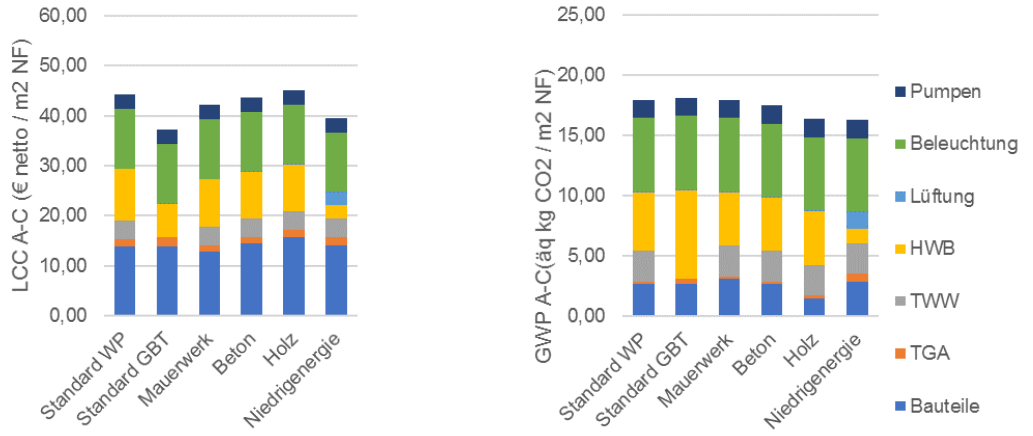


Abbildung 75: Monostoffliche „Einfache Bauten“ GK5 (Blockrand/Baulücke) pro m² NF und a

Der Betrieb dominiert bei allen Varianten deutlich über die Herstellung sowohl bei GWP als auch Betriebskosten. Je kompakter die Bauweise, desto geringer werden letztere. Das EB-Holzmassiv in der Basiskonstruktion hat sehr gute LCA GWP bei Bauteilen, ist allerdings teurer in Herstellung. Der EB-Mauerwerk ist am kostengünstigsten herstellbar, aber schlechter im GWP Herstellung. Der EB-Leichtbeton ist im Mittelfeld bezüglich der Kosten und GWP Herstellung. Alle EB-Gebäude (außer GK 5 / Baulücke) schneiden bei Herstellung GWP generell leicht besser ab als Standard- und NE-Gebäude. Das NE-Gebäude hat das niedrigste Betriebs-GWP (außer bei GK 5 / Baulücke). Das Standard-Gebäude mit Gasbrennwert-Therme und Solarthermie schneidet am günstigsten im Betrieb ab und am schlechtesten bei GWP in allen Gebäudetypen; das liegt an den schlechten Umwelteigenschaften des Energieträgers Gas beziehungsweise am niedrigen

Gaspreis verglichen mit Strom. Eine Verdopplung des Gaspreises würde die Betriebskosten in die Nähe der von Wärmepumpen rücken. Damit wird deutlich, dass eine CO2-Steuer auf fossile Brennstoffe als Klimaschutzmaßnahme diskutierenswert wäre, weil es ein einflussreiches Steuerungsinstrument der Gebäudeemissionen darstellt.

5.3.4 Hybridvarianten mit LCA und LCC Ergebnissen auf Gebäudeebene

Festlegung der optimierten Hybridvarianten

In einem zweiten Schritt werden nun die drei verschiedenen Gebäudetypen in teilweise stofflich gemischten Bauteilaufbauten, aber immer noch als „einfache Baukonstruktion“ berechnet und miteinander verglichen. Dabei werden aufwändige oder weniger leistungsfähige beziehungsweise weniger preisgünstige Bauteilaufbauten durch Aufbauten ersetzt, die eher positive Merkmale aufwiesen. Diese mehrstofflichen Hybridkonstruktionen bezeichnen wir hier als die Optimierungsvarianten.

Ziel der Optimierung ist eine Verbesserung LCA- und LCC-Ergebnisse der Konstruktionen sowohl gegenüber den untersuchten Basisvarianten einfacher Bauweise als auch gegenüber der Standardbauweise mit Wärmepumpe und mit Gasbrennwert-Therme.

Verbesserung im Holzmassivbau

Hemmnisse: Hohe Herstellungskosten; hoher Instandhaltungsaufwand; fehlende Robustheit bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes; Mehraufwand im Schallschutz. Außerdem sind die LCA Ergebnisse des Holzbaus so ausgezeichnet, dass sie aller Voraussicht nach auch von Primärbauteilen wie Betondecken nicht wesentlich benachteiligt werden.

Strategie: Deckenkonstruktion als Stahlbetondecke. Das Schallschutzproblem sowie die Überhitzungsthematik im Sommer wird durch die Erhöhung der Bauteilmasse und der thermischen Speichermasse der Betondecken deutlich reduziert. Die Wände müssen in ihren Holzmengen stark reduziert werden, damit die Herstellungskosten signifikant sinken. Diese Verringerung der Wandstärke bei gleichem U-Wert wird ebenfalls einen Einfluss für das GWP haben. Allerdings wird durch die Verringerung der Wandstärke bei gleichen Außenmaßen des Gebäudes eine höhere Nutzfläche und damit ein Raumgewinn möglich.

Verbesserung im Mauerwerk

Hemmnisse: GWP Herstellung, Schallschutz, sommerlicher Wärmeschutz

Strategie: Für die Mauerwerksbauweise sind vor allem konstruktive Maßnahmen wie der Schallschutz und der Komfort der sommerlichen Überhitzung anzusprechen. Auch dort wird als

Alternative eine Stahlbetondecke untersucht. Der Parameter der Lebenszykluskosten ist nur geringfügig bis gar nicht verbesserungsbedürftig. Bei den Umweltwirkungen besteht noch größerer Verbesserungsbedarf, der allerdings auf Baustoffherstellungsseite gelöst werden muss.

Verbesserung im Leichtbeton

Hemmnisse: Herstellungskosten, GWP Herstellung

Strategie: Die Leichtbetonbauweise zeigt sich in vielerlei Hinsicht vielversprechend. Allerdings ergeben sich noch zu lösende Schwierigkeiten bei den Umweltwirkungen der Bauweise. Dazu kommen die höheren Herstellungskosten im Vergleich zum Normalbeton. Bei den konstruktiven und bauphysikalischen Schwächen sind das mangelnde Wissen über die Dauerhaftigkeit und die zu verbessernden wärmetechnischen Eigenschaften im Heizfall zu nennen. Gerade der letzte Punkt führt wiederum zu den vorher genannten höheren Herstellungskosten, wenn größere Außenwandstärken benötigt werden um einen vergleichbaren U-Wert zu erreichen.

Bei allen Varianten wurde auch die Dachkonstruktion einheitlich gewählt, mit einer Betondecke mit aufliegender Dämmung und einem Holzdachstuhl als Kaltdach. Aus den untersuchten einfachen Bauweisen wird somit nicht mehr eine einstoffliche, sondern eine hybride Bauweise, bei der einzelne Bauteile insbesondere die Decken in alternativen Baumaterialien hergestellt werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die beabsichtigten Effekte der hybriden Konstruktionen sind bei allen drei „einfachen Baukonstruktionen“ eingetreten. Sie werden in der Zusammenfassung kurz dargestellt und sind im ausführlichen Anhang V. *Hybridvarianten – Ergebnisse LCA und LCC auf Gebäudeebene* mit den vollständigen Ergebnissen dokumentiert. Beim Betrieb treten bei allen drei Bauweisen in den Hybrid- oder auch Optimierungsvarianten keine Veränderungen auf, da die technischen Systeme belassen und lediglich die Herstellung und die Wartungszyklen der Baukonstruktion angepasst wurden.

Der Holzbau hat seine GWP Bilanz trotz Betonbauteilen nur teilweise verschlechtert und hat bei den Lebenszykluskosten deutliche Verbesserungen gezeigt, da weniger Massivholzrohstoff für die Hülle aufgewendet werden muss.

Der Mauerwerksbau, bei dem im Wesentlichen nur die Decken durch Betonbauteile ersetzt wurden, hat in allen Gebäudeklassen eine leichte Verbesserung bei den LCA-Ergebnissen gegenüber den Basisvarianten zu verzeichnen. Auch bei den Lebenszykluskosten sinkt der Aufwand über die Lebensdauer leicht zwischen 4 und 6 %

Der Leichtbetonbau bleibt fast unverändert und hat eine kaum merkliche Verschlechterung beim GWP, weil die Dachkonstruktion zusammen mit der Holz- und der Mauerwerksbauweise leicht angepasst wurde.

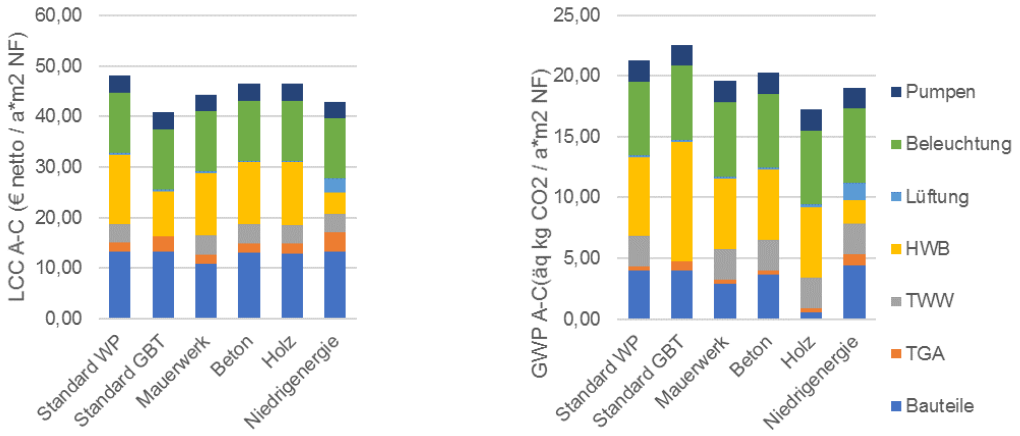


Abbildung 76: Gesamtbetrachtung LCC (links) und LCA (rechts) auf Gebäudeebene GK3 (Solitär) pro m² NF und a

Hiermit erfolgt die Gesamtbetrachtung der Lebenszykluskosten und der Umweltwirkungen für den dreistöckigen Baukörper mit circa 700 qm Nutzfläche.

Generell liegen alle Bauweisen bei Herstellungskosten der Konstruktion (pro a*m² NF) relativ nah beieinander. Die Bauteile mit TGA und der Betrieb haben ungefähr eine 40:60 Verteilung, was leicht höher liegt als bei der Raumanalyse, da auf der Gebäudeebene in die Berechnung der Bauteile der Barwert mit einfließt.

Bei dem Standardgebäude mit Gas-Brennwert-Therme sieht man hier und auch in den anderen Gebäudeklassen, dass die Trinkwarmwassererwärmung (TWW) kosten- und umweltmäßig besser abschneidet, weil das TWW über Solarthermie erzeugt wird aber die Gesamteffizienz von Einfachen Bauten (EB) kompensiert diesen leichten Vorteil des „konventionellen“ Heizsystems. In den Lebenszykluskosten schneidet die Gas-Therme wieder besser ab, da sie den günstigsten Brennstoff hat. Trotz gleichem Heizsystem ist der Bedarf der Niedrigenergievariante (NE) durch die geringeren Transmissionsverluste nochmals effizienter.

EB-Gebäude sind mit NE-Gebäuden in etwa gleichauf in der GK3, wenn man gesamte Umweltwirkungen über Herstellung und Betrieb betrachtet. Bei kompakteren und größeren Gebäuden in der GK4 verbessern sich Einfache Bauten leicht und bei der GK5 verschlechtern sie sich wieder ganz leicht. Allerdings werden ihre Betriebsemissionen mit steigender Gebäudegröße höher und sind größer als beim NE-Gebäude. Somit verschlechtert sich ihre

Gesamtbilanz der Umweltwirkungen und der Kosten über den Lebenszyklus leicht, je größer die Gebäude sind.

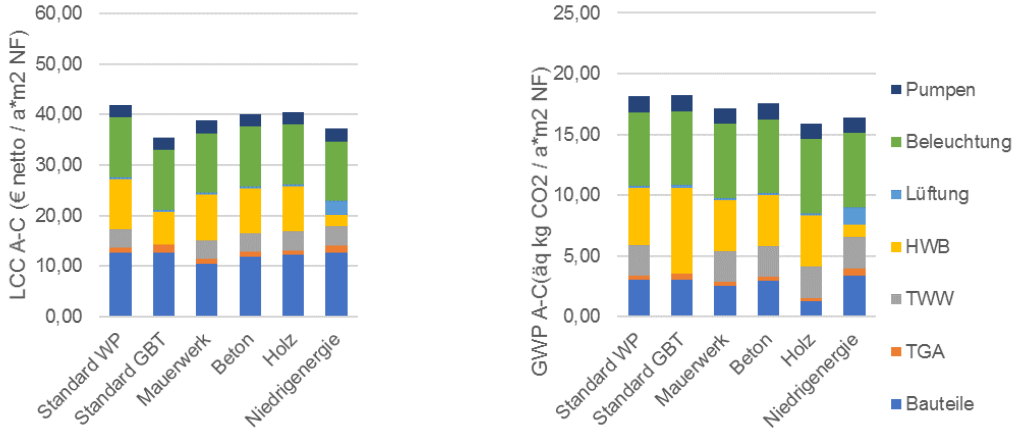


Abbildung 77 Gesamtbetrachtung LCC (links) und LCA (rechts) auf Gebäudeebene GK4 (Zeile) pro m² NF und a

Bei der genaueren Betrachtung der Gebäudeklasse 4 mit der vierstöckigen Zeilenbebauung und etwa 2800 m² Nutzfläche erkennt man ein ähnliches Bild wie bei GK3. Die Bauteile und Betrieb haben wieder etwa eine 40:60 Aufteilung. Der Heizwärmebedarf sinkt durch die höhere Nutzfläche bei kompakterem A/V-Verhältnis. Betrachtet man die Lebenszykluskosten so wird der leicht höhere Grundstock der Baukonstruktion beim Standard- und Niedrigenergiegebäude von den einfachen Bauweisen unterboten. Der sehr niedrige Heizwärmebedarf trotz der zusätzlichen Lüftungsaufwendungen rettet dem NE-Gebäude nochmal die Gesamtbilanz. Auch bei den Kosten liegen die einfachen Baute untereinander relativ nahe beieinander. EB-Gebäude in der Gesamtbetrachtung etwas günstiger als Standardgebäude und in etwa gleichauf mit den NE-Gebäude. Durch die unterschiedliche Bauweise stehen Holzbauten leicht unterhalb der Gesamtbilanz NE-Gebäude und Leichtbetonbauten leicht oberhalb.

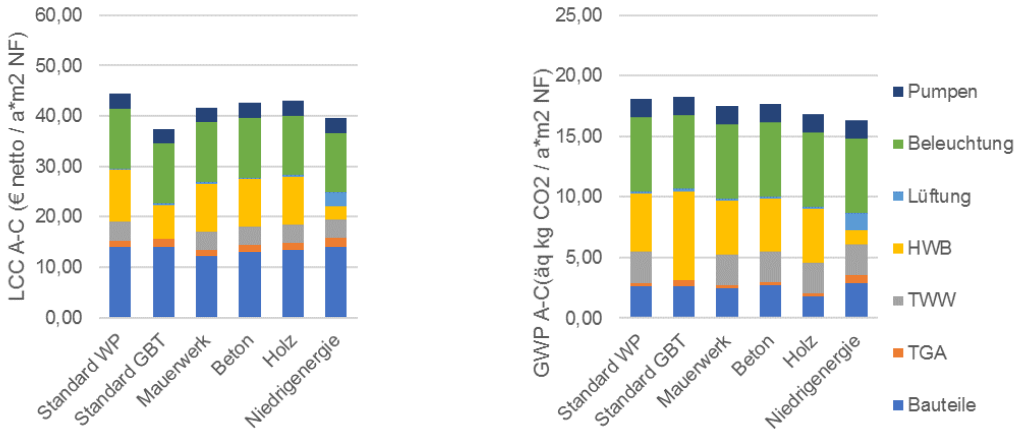


Abbildung 78: Gesamtbetrachtung LCC (links) und LCA (rechts) auf Gebäudeebene GK5 (Blockrand/Baulücke) pro m² NF und a

Abschließend wird der sechsstöckige Baukörper in der Baulücke einer innerstädtischen Blockrandbebauung mit seinen circa 1650 m² Nutzfläche analysiert. Die Bauteile und der Betrieb haben wieder etwa eine 40:60 Aufteilung wie auch die vorherigen Gebäudeklassen. Der Heizwärmebedarf sinkt wie erwartet noch weiter, da zwei adiabate Flächen in Baulücke die Hüllfläche noch weiter minimieren. EB-Gebäude sind diesmal im direkten Vergleich leicht schlechter als die NE-Gebäude.

5.3.5 Vergleich Basisvarianten mit Hybridvarianten auf Gebäudeebene

Im Folgenden wird ein direkter Vergleich der untersuchten Basisvarianten mit den Hybridvarianten von Einfach Bauen angestellt. Ergänzend werden die Ergebnisse der Untersuchung von Standardgebäuden und Niedrigenergiegebäuden mit aufgenommen.

In der Gebäudeklasse 3 zeigt sich durch das schlechte A/V Verhältnis und der geringen Stockwerkszahl eine Verringerung des GWPs bei der Mauerwerks- und bei der Holzmassivbauweise. Bei der Holzmassivbauweise ist es sogar eine Halbierung des GWPs trotz der Einführung von Betondecken für die Hybridbauweise. Die marginale Erhöhung bei der Leichtbetonbauweise liegt in der Angleichung und Änderung der obersten Geschoßdecke und des Daches für alle Bauweisen begründet. Die Lebenszykluskosten sinken bei allen Bauweisen leicht durch die Nachjustierung der Wartungszyklen und der Deckenkonstruktion. Beim Holz kommt noch eine wesentliche Einsparung durch die starke Reduzierung und damit Baustoffersparnis der Außenwände zustande. In Relation zu den Standard- und Niedrigenergiegebäuden in GK3 zeigt sich eine Verbesserung des Niveaus von ökologischer Belastung und Kosten über die Lebenszeit. Damit unterschreiten die Einfachen Hybridbauten das Niveau

der Standard und der Niedrigenergiegebäude um das bis zu 5-fache bei den Umweltwirkungen und um ca. 20 % bei den Lebenszykluskosten, in beiden Kategorien für die Errichtung, Wartung und Entsorgung.

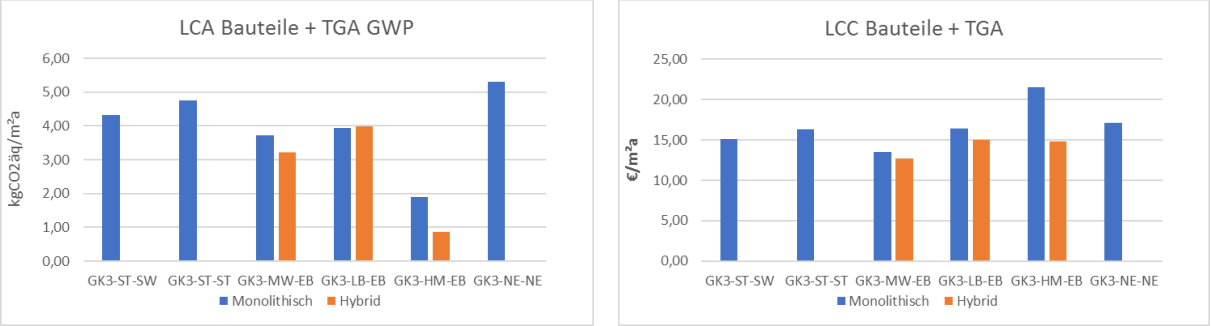


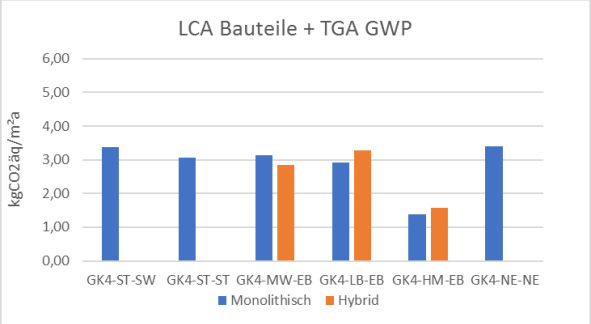
Abbildung 79: Gebäudeklasse 3 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a

Tabelle 29: Gebäudeklasse 3 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a

LCA Bauteile + TGA	Monolithisch kgCO2äq/m²a	Hybrid kgCO2äq/m²a	Abweichung %
GK3-MW-EB	3,73	3,20	-16,34
GK3-LB-EB	3,93	3,98	1,27
GK3-HM-EB	1,89	0,87	-118,23

LCC Bauteile + TGA	Monolithisch €/m²a	Hybrid €/m²a	Abweichung
GK3-MW-EB	13,54	12,71	-6,57
GK3-LB-EB	16,37	14,97	-9,37
GK3-HM-EB	21,48	14,81	-45,00

In Gebäudeklasse 4 mit immer noch hohem Anteil der Hüllfläche an der Gesamtkonstruktion, allerdings mit vier Geschoßen, fällt die Reduzierung des GWPs beim Holzmassivbau weniger deutlich aus, weil die Hülle stärker kompensiert. Beim Mauerwerksbau wird die Differenz noch etwas deutlicher, da sich beim ihm nur die Decken ändern. Für die Lebenszykluskosten ist das Gesamtbild ähnlich wie in GK3, außerdem entstehen geringere Lebenszykluskosten für alle drei Bauweisen. Vergleicht man das Niveau der Umweltwirkungen zwischen der Standard- und der Niedrigenergiebauweise mit den Einfachen Hybridbauten wird auch in GK4 eine leichte Verringerung des Niveaus der Umweltwirkungen und der Lebenszykluskosten sichtbar. Allerdings fällt diese nicht mehr so stark aus wie bei der oben untersuchten GK3.



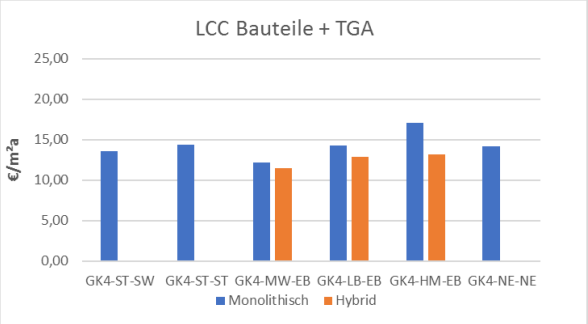


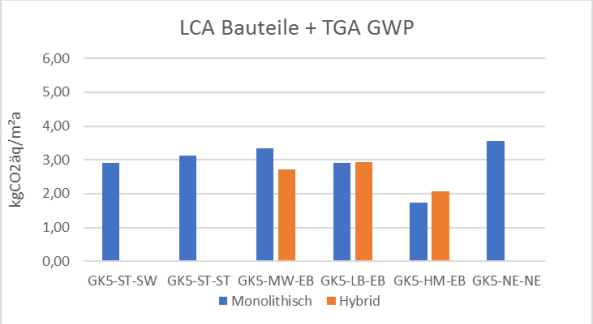
Abbildung 80: Gebäudeklasse 4 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a

Tabelle 30: Gebäudeklasse 4 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a

LCA Bauteile + TGA	Monolithisch kgCO2äq/m²a	Hybrid kgCO2äq/m²a	Abweichung %
GK4-MW-EB	3,45	2,85	-20,93
GK4-LB-EB	3,24	3,28	1,30
GK4-HM-EB	1,89	1,57	-20,63

LCC Bauteile + TGA	Monolithisch €/m²a	Hybrid €/m²a	Abweichung %
GK4-MW-EB	12,21	11,45	-6,71
GK4-LB-EB	14,29	12,85	-11,17
GK4-HM-EB	17,04	13,15	-29,65

Im Vergleich der monolithischen mit den hybriden Varianten der Gebäudeklasse 5 fällt auf, dass es durch das sehr gute A/V-Verhältnis und den geringen Hüllflächen in der Baulücke zu einer geringeren Reduzierung der Umweltwirkungen der Gebäudehülle. Dafür erhöht sich generell das GWP durch die größere Anzahl an Geschoßdecken überproportional im Vergleich zur vorher besprochenen GK4. Bei der Mauerwerksbauweise bleibt es bei der Verringerung des GWPs durch die Betondecken. Bei der Holzmassivbauweise kommt es nun zur erwarteten Umkehrung der GWP-Werte, da hier die Betondecken zur stärkeren Erhöhung des GWPs führen als durch die Reduzierung der Außenwandstärke eingespart wird. Die Lebens-zykluskosten ändern sich für die mineralischen Bauweisen nur noch sehr gering, da die Wartung der Hülle weniger stark ins Gewicht fällt. Beim Holzmassivbau sind die Erstellungs-kosten nicht ganz so stark zurückgegangen, weil sich wieder die höhere Anzahl an Decken bemerkbar macht. Die geringere Hüllfläche, die den stärkeren Preishebel aufweist, ist dabei nachrangig.



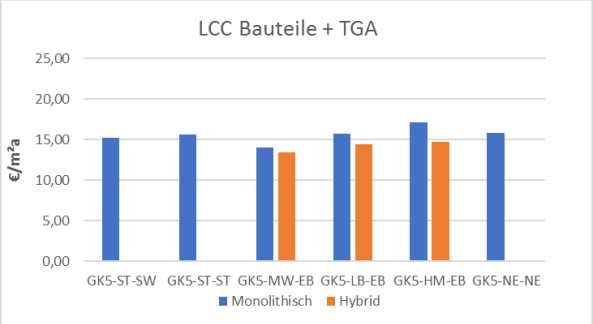


Abbildung 81: Gebäudeklasse 5 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a

Tabelle 31: Gebäudeklasse 5 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a

LCA Bauteile + TGA	Monolithisch kgCO2äq/m²a	Hybrid kgCO2äq/m²a	Abweichung %
GK5-MW-EB	3,34	2,72	-22,76
GK5-LB-EB	2,91	2,94	1,04
GK5-HM-EB	1,73	2,06	15,75

LCC Bauteile + TGA	Monolithisch €/m²a	Hybrid €/m²a	Abweichung %
GK5-MW-EB	14,08	13,45	-4,68
GK5-LB-EB	15,76	14,42	-9,28
GK5-HM-EB	17,11	14,77	-15,81

Als Ergebnis des Vergleichs der Optimierungsvarianten mit den Basisvarianten kann für die im Projekt Einfach Bauen angenommenen Rahmenbedingungen festgehalten werden:

- Eine Verringerung des Materialverbrauchs von Bauteilen hat einen Einfluss auf die Reduzierung von Herstellemissionen und -kosten.
- Die wärmetechnischen Eigenschaften der Gebäudehülle sind wesentlich für die Emissionen aus dem Betrieb, sie müssen den Betrieb ausreichend ökologisch und wirtschaftlich machen.
- Dabei muss gewährleistet sein, dass die Leistungsfähigkeit des jeweiligen Bauteils bezüglich seiner physikalischer Eigenschaften erhalten bleibt oder sogar verbessert wird (U-Wert, Schalldämmmaß, usw.).
- Die technische Gebäudeausstattung und die Art der Heizenergiegewinnung ist in gleichem Maße bedeutend für die Betriebsemissionen und sollte erneuerbare Energien nutzen.

Vergleich mit anderen Studien

Abschließend wird kursorisch ein kritischer Bezug zu anderen LCA-Studien hergestellt und ein Vergleich mit deren Ergebnissen vorgenommen. Dabei kommen folgende Studien jüngeren Datums in Betracht:

- THG Holzbau Studie: Ruhr-Universität Bochum; Institut für Holzforschung; Technische Universität München; Ascona Gesellschaft für Ökologische Projekte (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden - Umsetzung neuer Anfor-derungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Abschlussbericht: Berichtszeitraum: 01.01.2014-31.12.2016. Unter Mitarbeit von Annette Hafner, Sebastian Rüter, Stefan Diederichs, Samuel Ebert, Miriam Kleinhenz, Marco Krechel et al. München: Technische Universität München Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Online verfügbar unter https://doi.org/10.2314/GBV:1020155329.
  Mit folgender Berechnungsgrundlage: detaillierter LCA, Mehrgeschosser 2.7, ohne Keller, ohne TGA, ÖBD-2015, 50 Jahre, pro m² BGF, LEGEP-Software.
- LfU Bayern Studie: Leitschuh, Stefan (2018): Lebenszyklusanalyse von Wohn-gebäuden. Kurzfassung. Unter Mitarbeit von Holger König und Lisa de Cristofaro. München: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie.
  Mit folgender Berechnungsgrundlage: detaillierter LCA, Einfamilienhaus, ohne Keller, mit TGA, ÖBD-2016, 50 Jahre, pro m² NRF (Nettoraumfläche), LEGEP-Software.

Für einen direkten Vergleich müssen die Ergebnisse der genannten Studien teilweise umge-rechnet werden, da in der Regel ein 50-jähriger Lebenszyklen berechnet wird oder die Ergebnisse nicht pro Jahr der Nutzungsdauer ausgegeben werden. Zusätzlich ist beim direkten Vergleich noch zu beachten, dass die Ergebnisse nicht eins zu eins verglichen werden können, da jede Studie eigene Besonderheiten bezüglich der Systemgrenzen oder der untersuchten Gebäudetypologien sowie der Ökobilanzbasisdaten aufweist. Trotzdem vermittelt der Vergleich in der folgenden Tabelle einen Eindruck davon, dass die Ergebnisse der LCA-Analyse im Projekt Einfach Bauen zuverlässig und robust sind. Lediglich die Ergebnisse für Einfamilienhäuser weichen deutlicher ab, da für diesen Bautyp mehr Ressourcen pro Nutzfläche benötigt werden.

Tabelle 32: Vergleich EB mit anderen LCA-Studien je qm und Jahr

	EB (ZI/LB/HM) Bauteile + TGA			**THG (MFH_2.7) ohne TGA**			**LfU EFH (ZI/HR/HM)**		
	MW	**LB**	**HM**	**HM**	**M2**	**M3**	**ZI**	**HR**	**HM**
GWP [kgCO2äq/m²a]	3,45	3,23	1,7	1,81	2,22	2,06	7,5	5,5	4,5
PENRE [MJ/m²a]	36,49	29,73	33,30	20,43	17,24	17,68	-	-	-

PERE [MJ/m²a]	5,66	3,86	12,22	4,68	2,38	1,87	-	-	-

MW = ZI: Ziegelmauerwerk
LB: Leichtbeton
HM: Holzmassiv
M2: Ziegelmauerwerk und Dämmputz
M3: Ziegelmauerwerk und WDVS (Mineralwolle)
HR: Holzrahmen

5.4 Abschätzung der Robustheit auf Gebäudeebene

Die Untersuchung auf Gebäudeebene hat gezeigt, dass über einen längeren Zeitraum betrachtet der Energieeinsatz für die Heizung und Belüftung des Gebäudes den dominierenden Einfluss auf die Gesamtbilanz des Gebäudes hat. Wie in der Robustheitsuntersuchung auf Raumebene ermittelt wurde, gibt es hier gleichzeitig große Schwankungen anhängig vom Nutzerverhalten bei der Fensterlüftung.

Wie die Langzeit-Studie der GEWOFAG an Geschosswohnungsbauten in München-Riem in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) zeigte, produzieren aufwendigere Gebäudetechniksysteme nicht automatisch Einsparungen im Betrieb. (GEWOFAG, 2016)

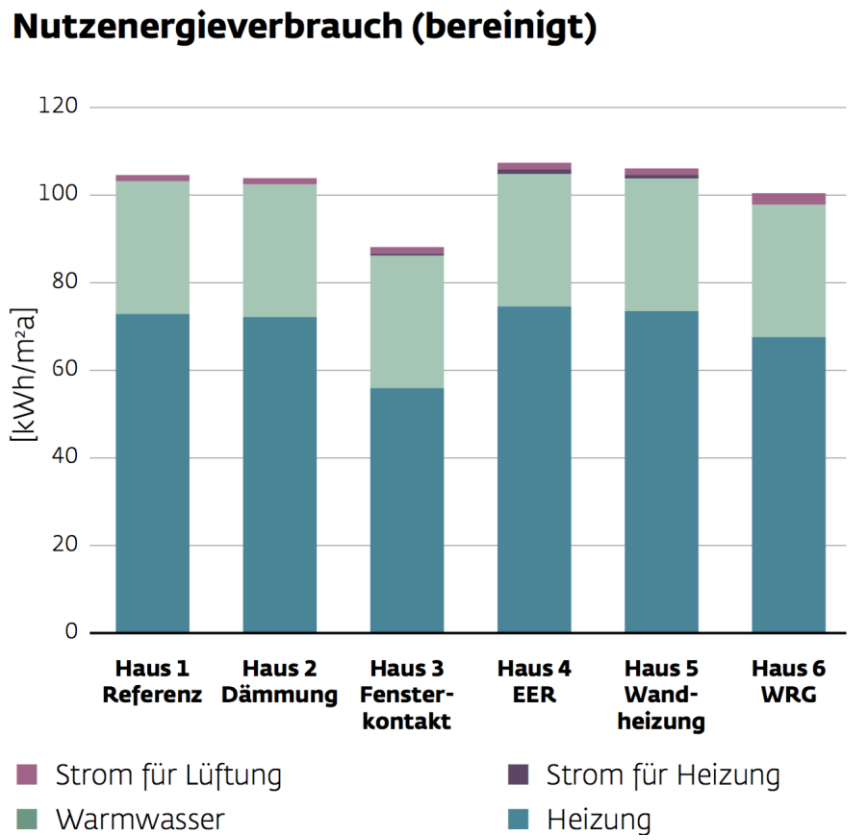


Abbildung 82: Nutzenergieverbrauch verschiedener Gebäudetechnikkonzepte im Vergleich, Quelle: (GEWOFAG, 2016)

Im Folgenden werden in einer ersten Abschätzung die Ergebnisse der Robustheits-untersuchung auf Raumebene auf die Gebäudeebene übertragen um aufzuzeigen, wie sich unterschiedliches Nutzerverhalten bei der Fensterlüftung auf Gebäudeeben auswirkt.

In einem ersten Schritt werden die Gebäudemodelle so vereinfacht und ausgerichtet, dass sie ausschließlich aus den Raummodulen bestehen, die auf Raumebene simuliert wurden.

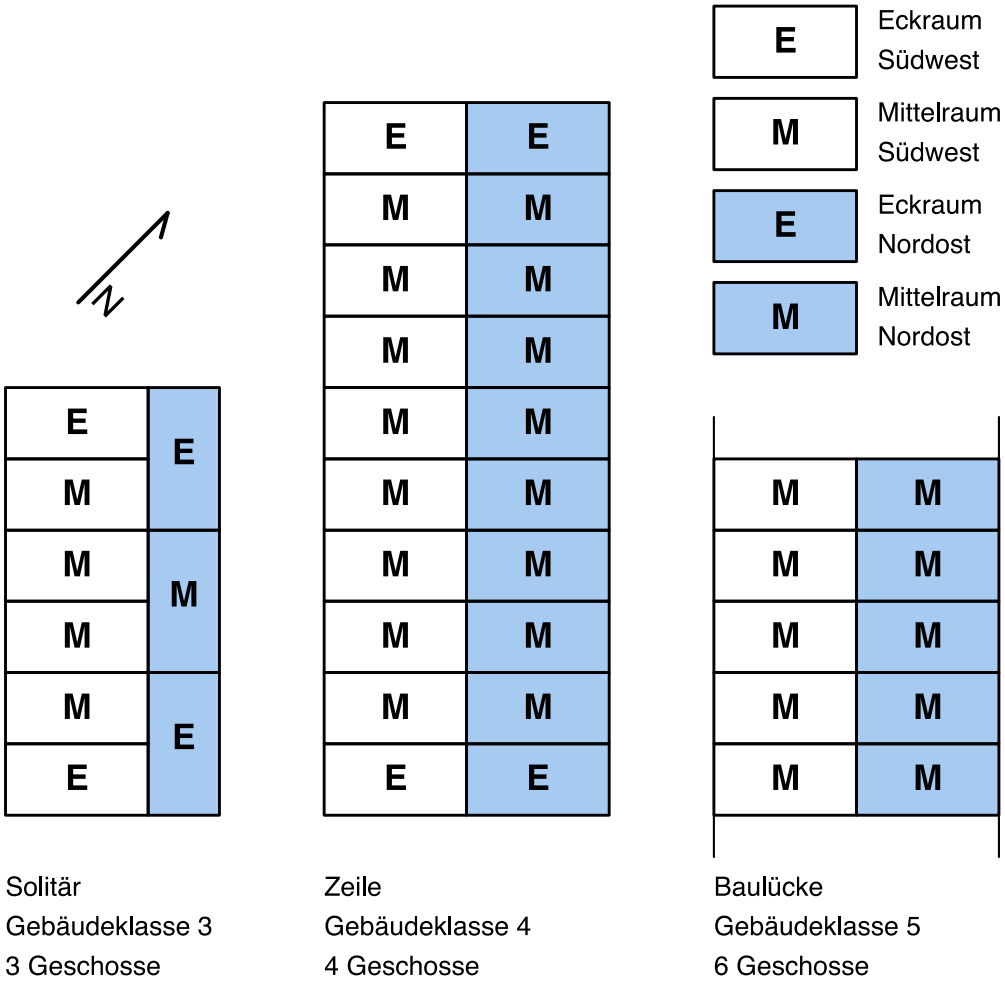


Abbildung 83: Schema der Aufgliederung der Grobentwürfe in Raummodule

Als zweites werden die minimale, maximale und der Heizwärmebedarf des base case für alle Bauweisen und Gebäude entsprechen der jeweiligen Anzahl der vorkommenden Räume hochgerechnet.

			HWB/m2*a min	HWB/m2*a base case	HWB/m2*a max	Anzahl der Raummodule in Solitär	Solitär min	Solitär base case	Solitär max	Anzahl der Raummodule in Zeile	Zeile min	Zeile base case	Zeile max	Anzahl der Raummodule in Baulücke	Baulücke min	Baulücke base case	Baulücke max
NO	Eckraum	MW	29	52	71	6				8				0			
SW	Eckraum	MW	24	48	67	6				8				0			
NO	Mittelraum	MW	5	28	51	3				32				30			
SW	Mittelraum	MW	2	24	47	12				32				30			
		Mauerwerk					13	36	57		8	31	53		4	26	49
NO	Eckraum	LB	30	53	72	6				8				0			
SW	Eckraum	LB	24	48	68	6				8				0			
NO	Mittelraum	LB	6	28	52	3				32				30			
SW	Mittelraum	LB	3	25	48	12				32				30			
		Leichtbeton					14	36	58		9	31	54		4	26	50
NO	Eckraum	MH Hybrid	30	53	71	6				8				0			
SW	Eckraum	MH Hybrid	24	48	66	6				8				0			
NO	Mittelraum	MH Hybrid	4	27	49	3				32				30			
SW	Mittelraum	MH Hybrid	1	23	45	12				32				30			
		Massivholz Hybrid					13	35	56		8	30	51		3	25	47
NO	Eckraum	MH SoSchu	29	53	69	6				8				0			
SW	Eckraum	MH SoSchu	23	48	65	6				8				0			
NO	Mittelraum	MH SoSchu	4	27	48	3				32				30			
SW	Mittelraum	MH SoSchu	2	23	44	12				32				30			
		Massivholz SoSchu					13	35	55		7	30	50		3	25	46
NO	Eckraum	ST	29	53	81	6				8				0			
SW	Eckraum	ST	23	47	74	6				8				0			
NO	Mittelraum	ST	3	25	50	3				32				30			
SW	Mittelraum	ST	1	21	45	12				32				30			
		Standard					12	34	60		7	28	53		2	23	47
NO	Eckraum	NE	3	22	84	6				8				0			
SW	Eckraum	NE	1	16	76	6				8				0			
NO	Mittelraum	NE	1	9	68	3				32				30			
SW	Mittelraum	NE	1	5	61	12				32				30			
		Niedrigenergie					2	12	70		2	9	68		1	7	64

Abbildung 84: Abschätzung des Heizwärmebedarfes bei Übertragung der Robustheitsuntersuchung auf die Gebäudemodelle

Wie in der Tabelle und im Diagramm zu erkennen ist, zeigen sich die verschiedenen Bauweisen und Gebäudetypologien unterschiedlich robust.

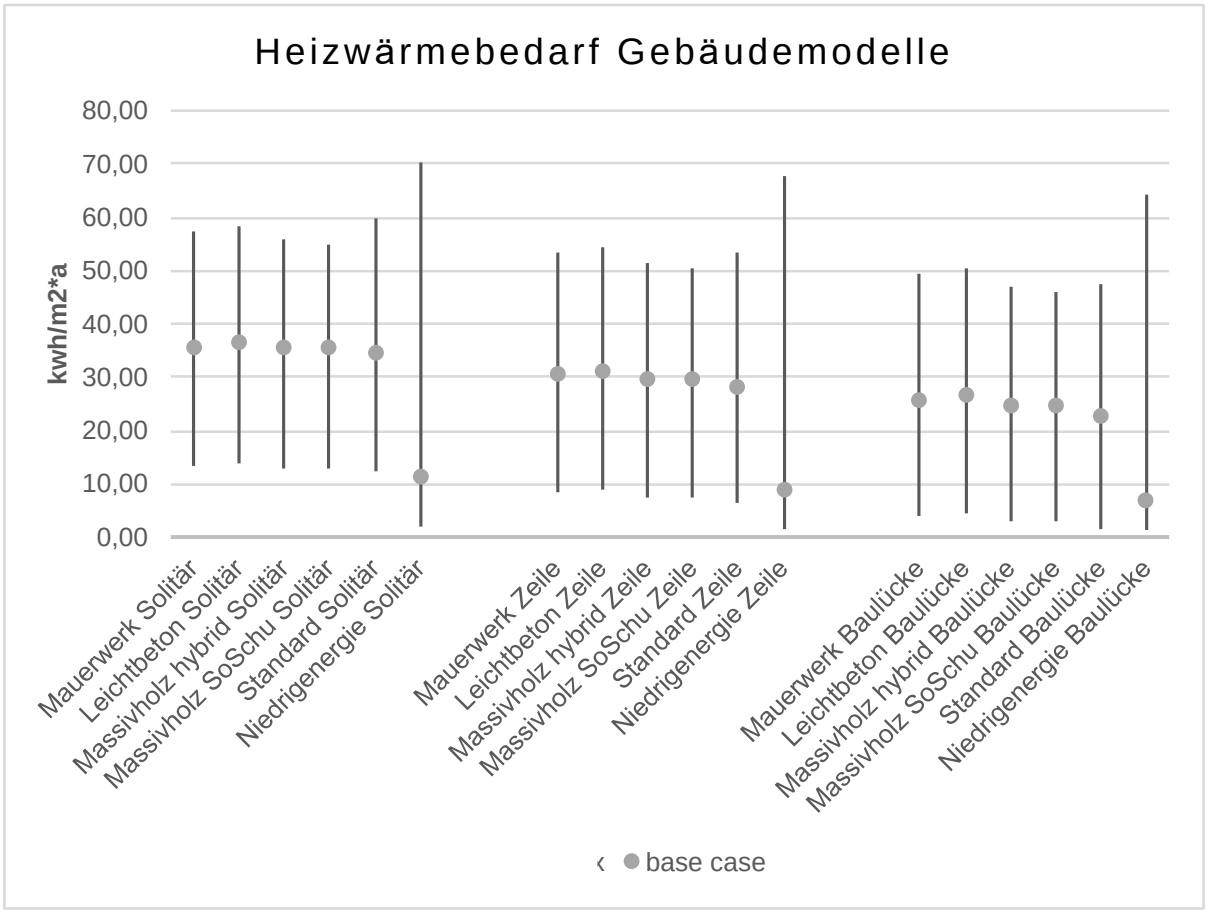


Abbildung 85: Abschätzung des Heizwärmebedarfes bei Übertragung der Robustheitsuntersuchung auf die Gebäudemodelle, Diagramm

Die hier dargestellten min/max-Werte zeigen jeweils die Auswirkungen von extremen Nutzerverhalten (kein Lüften/Dauerlüften). Dass dieses Verhalten jeweils von allen Nutzern in allen Räumen des Gebäudes gleichzeitig so gezeigt wird, ist natürlich sehr unwahrscheinlich. Es ist eher eine Kombination verschiedener Fensteröffnungszustände im Gebäude zu erwarten, sodass der Heizwärmebedarf sich eher zwischen den Extremen einstellen würde.

Im Diagramm ist aber auch zu sehen, dass sich das Niedrigenergiegebäude und das Standard-gebäude weniger robust gegenüber verstärkter Fensterlüftung durch den Nutzer zeigen.

Das mögliche Ergebnisfeld, das die Abschätzung aufzeigt, kann dabei helfen zu erklären, wie die in der GEWOFAG-Studie gemessenen Verbrauchwerte zustanden kommen können.

5.4.1 Abschätzung der Robustheit auf LCA und LCC auf Gebäudeebene

Die Robustheitsuntersuchung der Räume in Kapitel 4.5 hat ja nach Raumtyp und –konstruktion, Schwankungen sowohl des thermischen Komforts im Sommerfall als auch des Heizwärmebedarfs im Winterfall gezeigt. Diese Schwankungen des Heizwärmebedarfs sollen hiermit nochmals abschließend in die LCA und LCC Untersuchungen einfließen. Dabei werden neben den Kennwerten der Konstruktion für Konstruktion Gebäude mit Konstruktion TGA und dem Betrieb mit Warmwasser, Lüftung und Stromkosten, die zusätzlichen Extrema des Nutzerverhaltens dargestellt, die den stärksten Einfluss auf den Heizwärmebedarf haben. Hier noch einmal kurz zusammengefasst, der niedrigste Heizwärmebedarf tritt auf, wenn der Nutzer gar nicht lüftet bzw. wenn beim Niedrigenergiegebäude die internen Gewinne steigen. Der höchste Heizwärmebedarf tritt auf, wenn der Nutzer mit gekipptem Fenster dauerlüftet. Zusätzlichen zum Basisfall des „normalen Betriebs“ werden diese beiden Extremfälle für alle verschiedenen Gebäudetypen in Abbildung 86 und Abbildung 87 gezeigt.

In der Übersicht der LCA-Ergebnisse pro Quadratmeter Nutzfläche und Jahr ist die Spreizung im Heizwärmebedarf bei einfachen Bauten an der gestrichelten Linie, die die untere und obere Grenze dieser Spreizung markiert, zu erkennen. Damit wird auch noch einmal klarer, dass der Sockelbetrag aus Konstruktion und den konstanten Betriebsemissionen für die Einfachen Bauten niedriger ist. Außerdem schlägt er weniger stark nach oben aus als bei den Standardvarianten in der jeweils linken Säule in jeder Gruppe, und den Niedrigenergievarianten in der jeweils rechten Säule in jeder Gruppe. Die LCC-Ergebnisse pro Quadratmeter Nutzfläche und Jahr wiederholen dieses Bild.

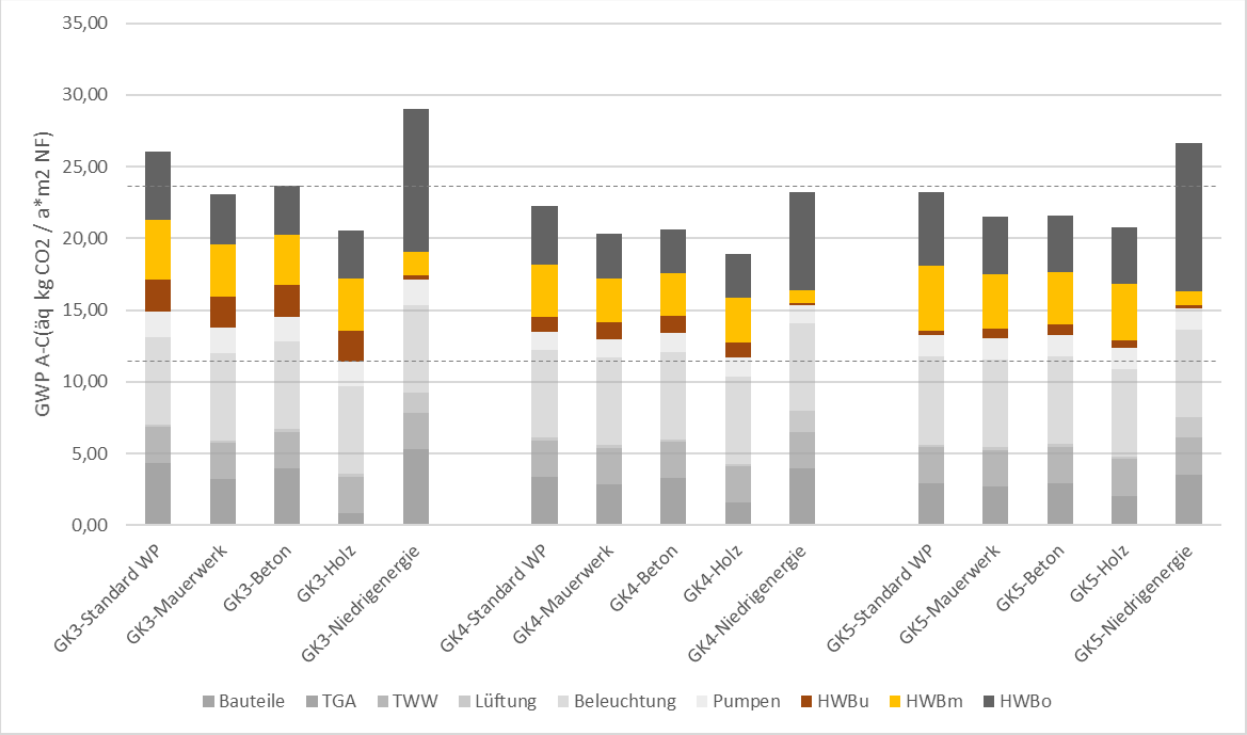


Abbildung 86: LCA zur Robustheit über den Lebenszyklus mit minimalen, normalen oder maximalen Heizwärmebedarf

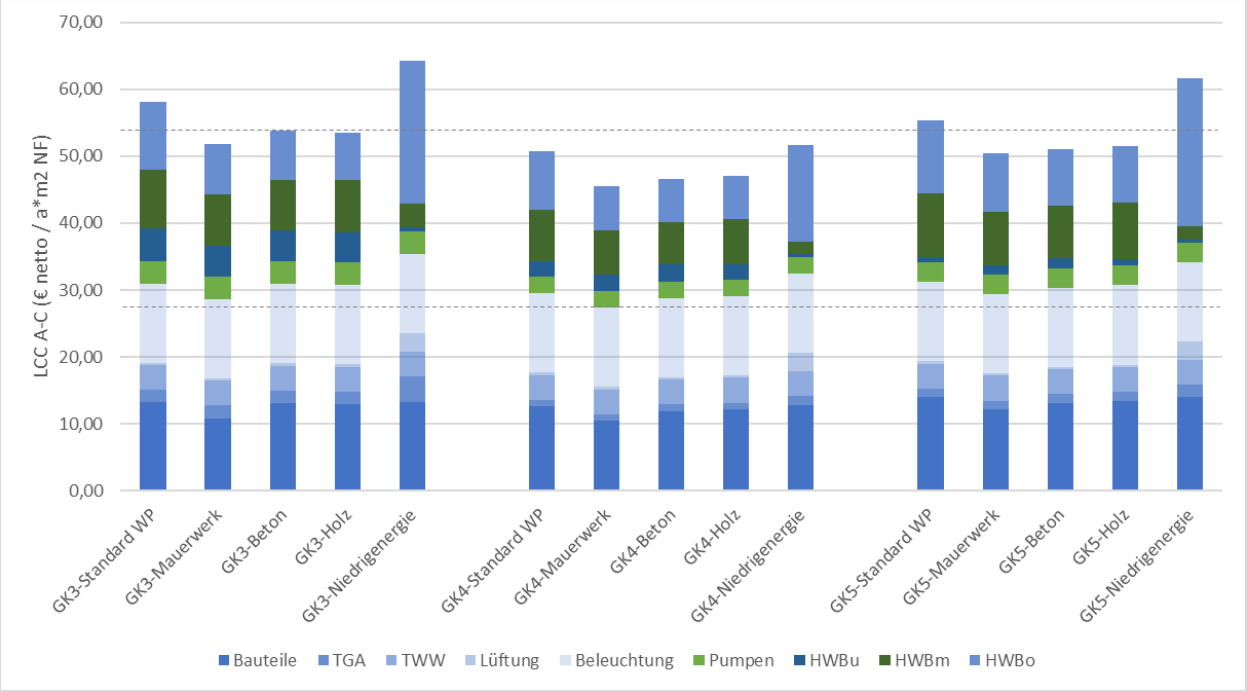


Abbildung 87: LCC zur Robustheit über den Lebenszyklus mit minimalen, normalen oder maximalen Heizwärmebedarf

Als Fazit kann festgehalten werden, wenn man ergänzend zu den statischen LCA- und LCC-Kennwerten die Unsicherheit in den Randbedingungen mitberücksichtigt, hat man bei Einfachen Bauten eine deutlich geringere Spreizung des Heizwärmebedarfs und damit ein robusteres System als bei den konstruktiv komplexeren und im Betrieb sensibleren Standard- und Niedrigenergiegebäuden. Das zeigt sich nicht nur speziell am Heizwärmebedarf, sondern auch in den Übertemperaturstunden, denn diese schwanken bei „Einfachen Bauten“ in einem schmaleren Band und zeigen auch damit eine höhere Robustheit sowohl gegen unvorhergesehenes Nutzerverhalten als auch gegen äußere Einflüsse (Klimaerwärmung), oder nicht funktionsfähige Teilsysteme (Verschattung, Lüftungsanlage), vgl. Kapitel 4.5.

6 Weitere Untersuchungen zu Fensterausbildung und konstruktiven Details

6.1 Fensterausbildung / 1:10 Modelle

6.1.1 Untersuchte Varianten

Insgesamt werden 13 Fenster-Varianten im Versuchsaufbau auf ihren Lichteinfall und die qualitative Raumwirkung getestet. Diese Varianten unterscheiden sich primär durch die Größe der verglasten Fläche, aber auch durch ihr Format und die Eigenschaften der Laibung. Der Ausgangsfall und Vergleichswert aller Fensterformate ist dabei der „Base Case“ (in der Grafik mittig) mit einem Fensterflächenanteil nach „Daylight Factor“ von 2,6 m² und einer Laibungstiefe von 40 cm. Ausgehend von diesem Base Case ergeben sich durch gezielte Eingriffe Veränderungen bezüglich der Fensterfläche, der Sturzausbildung, des Winkels der seitlichen Laibung, des Seitenverhältnisses, sowie der Laibungstiefe.

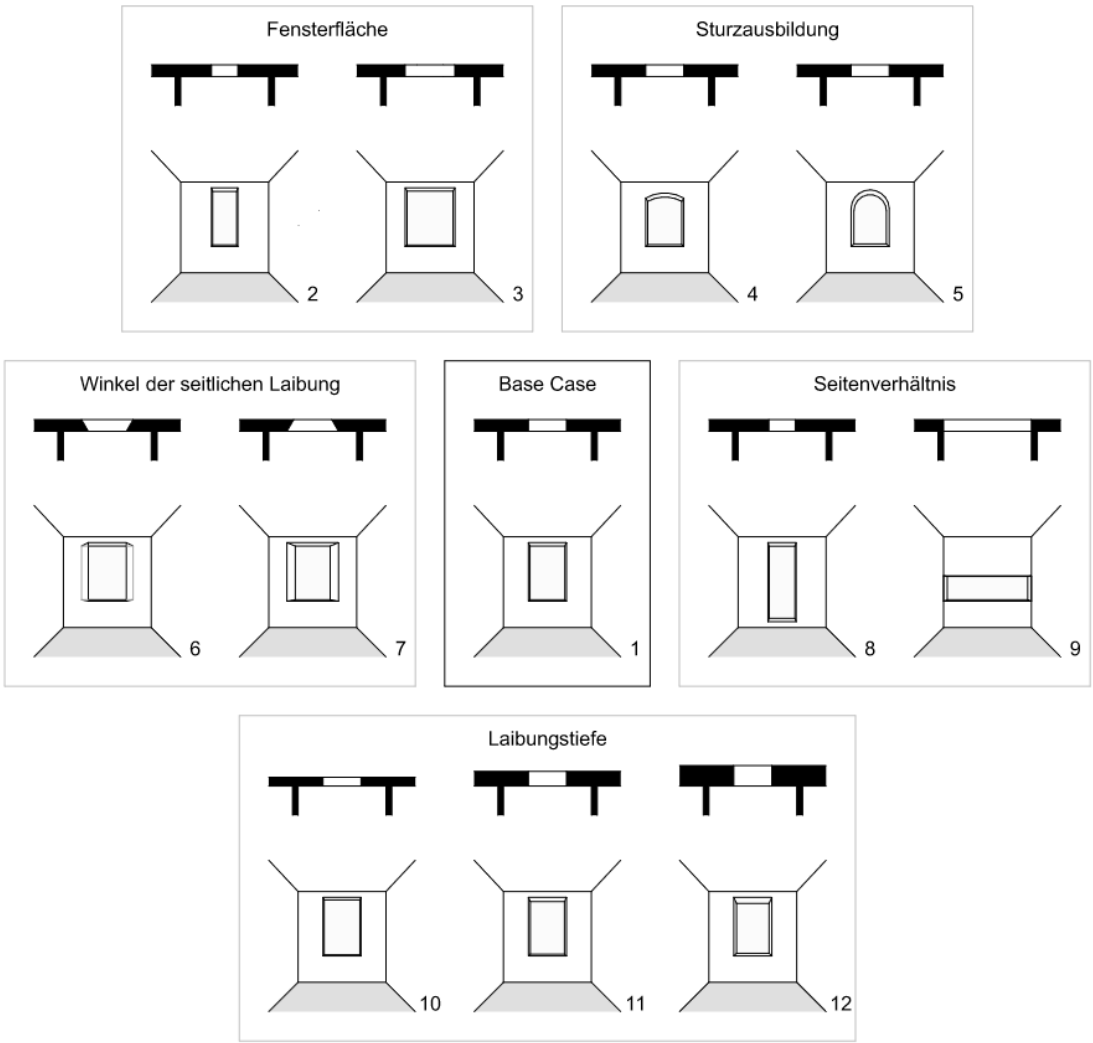


Abbildung 88: Fenstervarianten ausgehend vom Base Case

6.1.2 Versuchsaufbau

Um die unterschiedliche räumliche Wirkung des Lichteinfalls zu testen, wird ein Innenraum-Modell aus weiß gestrichenen MDF-Platten im Maßstab 1:10 angefertigt. Der Quader besitzt eine Länge von 60 cm, eine Breite und Höhe von je 30 cm. Die Stirnflächen werden beim Bau ausgespart, um auf der einen Seite die Position einer Kamera zu ermöglichen und auf der gegenüberliegenden Seite den Austausch und das Platzieren der unterschiedlichen Fensterformate. Als Boden wird eine geölte Graupappe verwendet, welche einen Bodenbelag im Modell simulieren soll. Für ein besseres Verständnis des Maßstabes wird ein maßstabsgetreuer Stuhl im Raum platziert.

Zur Messung der Lichtstärke wird auf beiden offenen Seiten im Abstand von je 1m (10cm im Modell) mittig ein Luxmeter platziert. M1 misst die Lichtstärke im hinteren Drittel des Raumes, M2 stellt die typische Position für einen Schreibtisch dar.

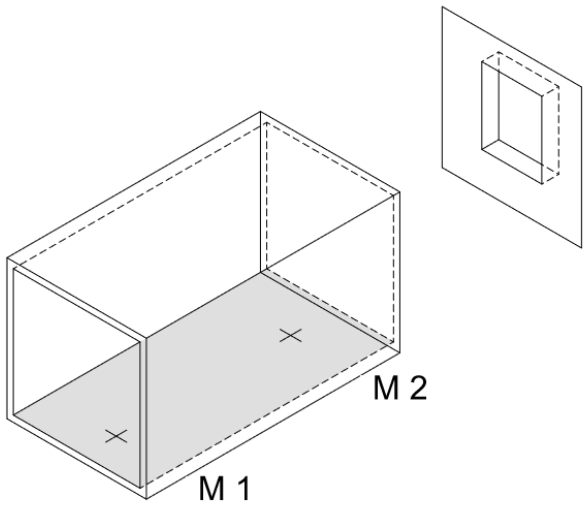


Abbildung 89: Erklärungsgrafik zum Aufbau des Innenraummodells mit Position des Messpunktes 1 (M 1) und Messpunktes 2 (M 2)

Dieser Aufbau wird anschließend in dem sogenannten „Lichthimmel“ unter konstanten Lichtbedingungen fotografiert:

„Die Anlage LH1 wird zur Tageslichtsimulation an Gebäudemodellen verwendet und dient als Werkzeug im Planungs- und Entwurfsprozess. Die Einrichtung besteht aus einer Halbkugel aus diffusem Plexiglas mit ca. 4 m Durchmesser, die von außen mit Licht beaufschlagt wird. Dadurch entsteht im Inneren der Halbkugel eine Nachbildung des natürlichen Himmels mit diffusem Licht. Die gerichtete Sonnenstrahlung wird durch eine künstliche Sonne, in Form eines Parabolspiegels, erzeugt. Zur Ausleuchtung der diffusen Halbkugel sind über die gesamte Oberfläche stufenlos dimmbare Leuchtstofflampen angeordnet. Die künstliche Sonne ist im Höhenwinkel verstellbar. Für den Horizontalwinkel des Azimuts, werden die Modelle auf einem drehbaren Tisch platziert, der entsprechend ausgerichtet wird.“ (Lehrstuhl für Raumkunst und Lichtgestaltung)

Für die qualitative Beurteilung der Lichtverhältnisse im Versuchsaufbau eignete sich der diffuse Himmel ohne direkte Sonneneinstrahlung am besten.

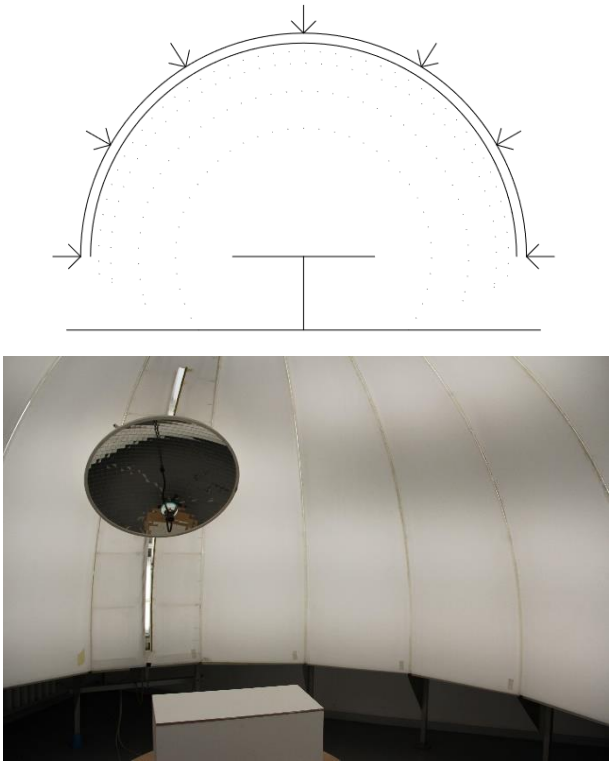


Abbildung 90: links: Erklärungsgrafik zur Funktionsweise des Lichthimmels, rechts: Fotografie des Kuppelinneren des Lichthimmels

Die Kamera wird auf einem Stativ platziert und mit gleichbleibender Kameraeinstellung werden nacheinander die Fenstervarianten fotografiert. Dabei wird eine für die Modellfotografie optimale Belichtung mit großer Tiefenschärfe des Bildes durch die folgenden Einstellungen gewählt: eine Belichtungszeit von 4 Sekunden, eine kleine Blende von f/22, sowie eine kleine ISO von 160.

6.1.3 Ergebnisse

Die Fotos sind im Anhang VI zusammengestellt. Um den Vergleich zum Base Case zu vereinfachen, wird jede fotografierte Variante dem Base Case gegenübergestellt. Als objektive Ergänzung zur subjektiven Wirkung der Bilder auf den Betrachter dient der angegebene Luxwert, welcher Abweichungen in der Helligkeit numerisch nachvollziehbar macht (siehe Anhang VI).

Die folgende Tabelle ermöglicht eine Übersicht über die im Versuchsaufbau gemessenen Werte. Dabei werden die gemessenen Luxwerte und die Größe der Fensteröffnung ins Verhältnis zueinander gebracht.

	Laibung von 40 cm	„Kleines Fenster" mit 1,8m²	„Großes Fenster" mit 3,4 m²	Segmentbogen	Rundbogen	Laibung von 30° nach Außen geöffnet	Laibung von 30° nach Innen geöffnet	Stehendes Fensterformat	Liegendes Fensterformat	Laibung von 30 cm	Laibung von 50 cm	Laibung von 70 cm	Vollverglasung
Messpunkt M1, Helligkeit in lx am Boden 1 m vom Fenster entfernt	496	380	632	434	435	560	507	540	438	540	449	378	1950
Messpunkt M2, Helligkeit in lx am Boden 5,5 m vom Fenster entfernt	140	105	183	123	123	153	150	121	116	166	140	123	438
Af Fläche Fensteröffnung in m2	2,60	1,96	3,40	2,30	2,33	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	9,30
T Laibungtiefe in m	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,7	0
M1 / Af in lx/m2 gemessene Helligkeit pro Fensteröffnungsfläche	191	194	186	189	187	215	195	208	168	208	173	145	210
M2 / Af in lx/m2 gemessene Helligkeit pro Fensteröffnungsfläche	54	54	54	53	53	59	58	47	45	64	54	47	47

Abbildung 91: Vergleich der im Versuchsaufbau gemessenen Luxwerte

In den unteren beiden Zeilen von Abbildung 88 wird die Fensterfläche (Af) jeweils zu den an den beiden Messpunkten M1 und M2 gemessenen Lux Werte ins Verhältnis gesetzt. Dadurch kann die tatsächliche Lichtausbeute der unterschiedlichen Fenstervarianten verglichen werden.

6.2 Konstruktive Details / 1:1 Modelle

Ziel der 1:1 Modelle war es über die Simulationen und Berechnungen hinaus einfache Konstruktionen in der Fügung der Bauteile und der konstruktiven Ausbildung im Detail zu testen. Auf dem Gelände des Kooperationspartners B & O in Bad Aibling wurden je ein Versuchsmodell der drei untersuchten Bauweisen im Maßstab 1:1 gebaut. Es wurden Wandstücke von 3,40 m Breite mit Übergang zum Fundament und dem oberen Dachanschluss erstellt. Ziel war es, die Fügungen der Bauteile und neuentwickelte Materialien wie zum Beispiel den Infraleichtbeton oder die Starkholzwände mit schmalen Luftkammern zu testen.

Zeichnungen und Fotos vom Baufortschritt finden sich im Anhang VII und VIII.

In Folgenden werden die Überlegungen dargestellt, die zu konstruktiven Ausbildung der gebauten 1:1 Modellen geführt haben.

6.2.1. Fundament / Sockeldetail

Die heute übliche Praxis, die Dämmebene unter die Bodenplatte zu legen, hat mehrere Nachteile:

- Es entstehen Kältebrücken im Bereich von Streifen- oder Punktfundamenten.
- Es sind nur wenige Dämmmaterialien ausreichend druckfest und feuchtebeständig.
- Die Dämmebene ist sofort überbaut und nicht revisionierbar.
- Die Dämmung muss im Bereich des Sockels außen über der Spritzwasserbereich nach unten bis ins Erdreich geführt werden, was mehrere baukonstruktive Herausforderungen erzeugt.

Durch eine einschichtige Wandkonstruktion bei der das tragende Bauteil auch gleichzeitig die Dämmung darstellt, kann die Dämmebene zum Erdreich hin auch auf der Bodenplatte verlegt und an die Innenseite der Wand anschließen. Auch ist es möglich, außen einen massiven Sockel auszubilden, um hier das Thema Spritzwasser und Bodenfeuchte unabhängig von der Dämmebene zu lösen (siehe Anhang VII).

6.2.2. Außenwände

Die Außenwände werden mit einer Schicht in einem Material gebildet. In den drei untersuchten Bauweisen kommen hier Luftkammerziegel, Infraleichtbeton und Starkholzwände mit schmalen Luftkammern zum Einsatz.

Um eine hohe Langlebigkeit für die Massivholzwand zu erreichen, wird diese zusätzlich mit einer hinterlüfteten Schalung aus gefalzten, vertikalen, sägerauen Brettern versehen. Das gesamte Holzwandelement wurde durch unseren Kooperationspartner Gumpp & Maier GmbH in dessen Betrieb vorgefertigt und an einem Tag in Bad Aibling aufgerichtet.

Der Infraleichtbeton wird unbewehrt ausgeführt. Einerseits, um einen Wärmetransport zu vermeiden und die Dämmwirkung weiter zu erhöhen und andererseits, weil die Konstruktion statisch aufgrund der notwendigen Wanddicke auch ohne Bewehrung funktioniert.

Die Mauerwerkswand wird außen mit Kalkzement verputzt, um auch hier die Langlebigkeit der Konstruktion zu erhöhen.

6.2.3. Fensteröffnungen

Die Fensteröffnungen sind so ausgebildet, dass im Sturzbereich keine Sonderbauteile aus anderen Materialen verwendet werden müssen. Der Sturz ist beim Mauerwerk als Segmentbogen, beim Infraleichtbeton als Rundbogen ausgebildet. Dadurch kann auf die üblichen Mischkonstruktionen mit Stahlbeton und Dämmstoff zum Ausgleich der entstehenden Kältebrücken verzichtet werden.

Das Fenster wird auf der Innenseite mit einem Anschlag bzw. beim Holzbau mit einer Überlappung eingebaut. Dies verringert die Kältebrücke am Anschluss von der Wand zum Fenster und schafft eine konstruktiv eindeutige Einbausituation. (siehe Anhang VII)

Die Position des Fensters auf der Innenseite macht es möglich, im Sommer die Verschattung durch die Laibungstiefe optimal zu nutzen. Eine Position des Fensters mittig oder außenseitig der Wand würde den Wärmeverlust über die Kältebrücke geringfügig verringern aber die Oberflächentemperaturen an den kritischen Stellen verringern und auch zu einer geringeren Verschattung durch die Laibungstiefe führen.

Die Fenster selbst sind Schwing- bzw. Wendefenster. Die Öffnung erfolgt über eine mittige horizontale bzw. vertikale Drehachse. Dadurch entsteht in der Öffnungsstellung eine Öffnung ganz oben und ganz unten im Fenster. Dies ermöglicht eine effektivere Nachtlüftung als die konventionelle Kippstellung.

6.2.4. Deckenauflager

Die Decken werden auf die Mauerwerks- und Infraleichtbeton-Wand 20 cm weit aufgelegt. Vor der Stirnseite der Decke wird das Wandmaterial nach oben weitergeführt. Diese Konstruktion reduziert die Kältebrücke auf ein bauphysikalisch unproblematisches Maß, ohne Fremd-materialien einsetzten zu müssen. Beim Holzbau wird die Decke vollständig auf die Wand aufgelegt. Dies ist aufgrund der Dämmeigenschaften von Holz unproblematisch und erhöht die Schalldämmwirkung über die Geschosse hinweg, da Nebenwege der Schallweiterleitung über die Außenwand vermieden werden.

6.2.5. Dachkonstruktion

Flachdächern fehlt ein Gefälle, ausgebauten Schrägdächer im Sommer ausreichende Speichermassen um Aufheizung zu verhindern. Die gewählte Konstruktion entgeht diesen Problemen durch Ausbildung eines flach geneigten Daches auf einer massiven Decke.

Die Dachhaut bildet eine Bitumenschweißbahn. Als Tragschicht fungiert eine Holzschalung, an dessen Stelle bei Traufe und Giebel eine Brettsperrholzplatte tritt, um den Dachüberstand herzustellen, welcher die Fassade vor Regen schützt. Das Tragwerk aus Holzsparren liegt auf Trauf- und Firstpfetten, diese sind wiederum auf der Geschossdecke aufgelegt bzw. aufgeständert. Die Dämmebene liegt oberhalb der Stahlbetondecke bzw. der Brettsperrholzdecke beim Holzbau (siehe Anhang VII).

6.2.6. Innenwände

Die Innenwände werden als tragende Mauerwerkwände ausgeführt. Beim Ziegelmauerwerk werden Ziegelvollsteine verwendet. Beim 1:1-Modell aus Leichtbeton kommt für die Innenwände ein Kalkstein unseres Kooperationspartner Meier Betonwerk zum Einsatz. Um guten Schallschutz bei geringer Wanddicke zu erreichen, haben beide Mauersteinarten eine Rohdichte von 2,0 t/m^3. Beim Holzbau bestehen die tragenden Wände aus Brettsperrholz, dass im Treppenhaus und bei den Wohnungstrennwänden zweischalig ausgeführt werden muss, um ausreichenden Schallschutz zu bieten.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

7.1 Motivation und Projektziele

Die Komplexität der Konstruktionen und Gebäudetechnik steigt seit Jahrzehnten stetig. Dies hat die folgenden Effekte:

- Fast unüberblickbare Zahl von Normen und Baugesetzen
- Hohe Fehlerquote bei Planung und Ausführung
- Einschränkung der Nutzungsoptionen im Betrieb
- Gebäudetechnik oft aufwendig und fehleranfällig im Betrieb

Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, inwiefern Gebäude mit einfacher und robuster Konstruktion als auch Gebäudetechnik gebaut werden können und wie diese im Vergleich – auch unter Betrachtung des Nutzerverhaltens – zu üblichen Wohngebäuden und Wohngebäuden in Passivhausbauweise abschneiden.

Das Projekt ist in Arbeitspakete gegliedert, die insgesamt über einen Zeitraum von zwei Jahren bearbeitet wurden. Dabei wurde die Arbeit über einen Ablaufplan mit folgenden Meilensteinen organisiert:

MS 1 / MS 2 Grundlagenermittlung und Entwurfsstrategie

- Definition des Begriffs des Einfachen Bauens
- Untersuchung der Lebensdauer von Gebäuden
- Zusammenstellung von möglichen Konstruktionsmethoden
- Übersicht zur Gebäudetechnik des Einfachen Bauens
- Zusammenstellung ausgewählter Projekte zum Einfachen Bauen
- Voruntersuchung der Parameterintegrale für die Einzelraumsimulation

MS 3 – MS 7 Simulation und Untersuchung auf Raumebene

- Wahl der Inputparameter Raummodell
- Tageslichtsimulation
- Dynamische Simulation Parametrisches Raumodell, Nutzer und Umwelt konstant
- Vergleich Raummodelle Lebenszyklusanalyse (LCA) und Lebenszykluskosten (LCC)
- Dynamische Simulation Parametrisches Raumodell, Nutzer variabel zur Bestimmung der Robustheit

MS 8 – MS 9 Simulation und Untersuchung auf Gebäudeebene

- Typenentwürfe der Gebäudeklasse 3, 4 und 5
- Technische Konzepte / Verbrauchswerte

- Vergleich Gebäudemodelle Lebenszyklusanalyse (LCA) und Lebenszykluskosten (LCC)

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsprojektes entlang der Meilensteine (MS) zusammengefasst.

7.2 Grundlagenermittlung und Entwurfsstrategie (MS 1 / MS 2)

7.2.1 Definition des Begriffs des Einfachen Bauens

Die Strategie Einfach Bauen verfolgt folgende Ziele:

- Reduzierte Anzahl von Bauteilschichten
- Handwerkliche Fügung der Bauteile
- Klimagerechte Bauweise
- Robuste Gebäudetechnik
- Flexible Nutzung möglich

7.2.2 Untersuchung der Lebensdauer von Gebäuden

Eine Verknüpfung der Abbruchstatistiken mit der Anzahl bestehender Gebäude am Beispiel Bayern und München hat ergeben, dass die Abbruchrate in den letzten 30 Jahren nie über 0,10 % (gesamt Bayern) bzw. 0,5 % (München) lag. Gebäude haben hier im Mittel eine Lebensdauer von weit über 100 Jahren.

Deshalb ist es im Sinne der Nachhaltigkeit, zu empfehlen, die Lebenszyklen der unterschiedlichen Teile im Auge zu behalten und die Fügung dieser zu einem Gebäude entsprechend zu organisieren.

7.2.3 Zusammenstellung von möglichen Konstruktionsmethoden

Die drei untersuchten einschichtigen, massiven Bauweisen Mauerwerk, Leichtbeton und Massivholz haben unterschiedliche Profile in der Art wie die Konstruktionen Anforderungen meistern, die an ein Gebäude gestellt werden. Im Folgenden sind die Besonderheiten der jeweiligen Bauweisen zusammengefasst.

Mauerwerk

Die Dämmwirkung von Ziegelmauerwerkswänden wurde in den letzten Jahren durch Innovationen der Hersteller z. B. Luftkammern in den Steinen und teilweise auch Porenbildner im Brennprozess über die Zeit immer weiter optimiert, allerdings mit negativen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit und die Schalldämmung. Diese wurde mit Füllungen der Kammern aus porösen Materialien bekämpft, was allerdings wieder Technologieeinsatz zur Trennung bei der Entsorgung und dem Recycling erzeugt.

Als Strategie für Einfaches Bauen wird auf Luftkammerziegel ohne Füllung in den Außen-wänden und massive Ziegel in den Trennwänden zurückgegriffen. Als Deckenkonstruktion wird in der Untersuchung eine Ziegelelementdecke angesetzt.

Leichtbeton

Betonrezepturen, die eine ausreichende Dämmwirkung als einschichtige Außenwand zur Einhaltung der ENEV mit normalen Wandstärken ermöglichen, wurden aktuell nur in wenigen Projekten mit Zulassung im Einzelfall verwendet. Von den drei untersuchten Bauweisen besteht hier noch der größte Entwicklungsbedarf im Bau.

Besondere Themen beim Leichtbeton sind vor allem

- Die Entmischung des Betons durch Aufschwimmen der leichten Bestandteile beim Verdichten
- Die Entstehung hoher Temperaturen im Kern des Bauteils während des Abbindevorgangs (Hydrationswärmeentwicklung)
- Das Eindringen von Feuchte von außen durch die Porosität des Materials und dadurch notwendige Nachbehandlung z. B. durch Hydrophobierung und
- Die Notwendigkeit einer Zulassung im Einzelfall

Als Strategie für Einfaches Bauen wird bei den Außenwänden auf Infraleichtbeton zurück-gegriffen. Die Deckenkonstruktion erfolgt aus Stahlbeton.

Massivholz

Als gewachsenes Baumaterial hat Holz spezifische, relativ konstante Eigenschaften. Ökologie, und Tragverhalten sind sehr gut, die Schalldämmung und die Wirkung als thermische Speichermasse sind aufgrund dieser spezifischen Eigenschaften schlechter im Vergleich aller drei untersuchten Bauweisen.

Die notwendigen Maßnahmen wie Massenerhöhung mittels mineralischer Schüttungen und schwimmendem Estrich und Trennung von Bauteilen zur Reduktion der Schallübertragung führen zu komplizierteren Konstruktionen.

Als Strategie für Einfach Bauen wird Massivholz in den Außenwänden angesetzt.

Beim 1:1-Modell wurden Massivholzelemente mit eingefrästen Luftkammern verwendet, um die Dämmwirkung zu erhöhen, die Wandstärke zu reduzieren und somit den Materialverbrauch zu senken.

7.2.4 Übersicht Gebäudetechnik des Einfachen Bauens

Als Ergebnis der Literaturrecherche lässt sich folgendes ableiten:

- Die immer komplexere Anlagentechnik ist nach Kenntnis der Baukostensenkungskommission der Bundesregierung mittlerweile hauptverantwortlich für die Kostensteigerung am Bau (Neitzel et al., 2015).
- In der Praxis hat sich des Öfteren gezeigt, dass komplexe Haustechniksysteme fehleranfällig, mangels Monitoring ineffizient gesteuert, sowie aufwendig in der Unterhaltung sind (GEWOFAG, 2016; Jazizadeh, 2013).
- Nutzer empfinden statisch geregelte Innenraumtemperaturen und komplexe Lüftungstechnik häufig als unkomfortabel (Schneider, 2015).
- Ein dynamisches, nutzergeregeltes Raumklima in Kombination mit natürlicher Lüftung wird von den Nutzern präferiert (Rupp, F. R. et al., 2015).
- Bei typischen Heizsystemen ist, betrachtet über einen Zeitraum von 100 Jahren, der Energieaufwand für den Betrieb dominierend über die Herstellung, den Einbau und die Wartung (Stöberl, 2018).

Aus diesen Beobachtungen haben wir für das vorliegende Forschungsprojekt die These aufgestellt, dass sich gute Aufenthaltsqualität bei einem gleichzeitig minimierten Energiebedarf durch passive, nutzergeregelte Systeme herstellen lässt. Der Energiebedarf ist durch erneuerbare Energien zu decken.

7.3 Simulation und Untersuchung auf Raumebene (MS 3 - MS 7)

Wie wirken sich die Form und die Bauweise von Gebäuden auf das Raumklima aus? Ist es möglich, Gebäude so zu konstruieren, dass das Raumklima ganzjährig mit einem Minimum an Energiezufuhr angenehm bleibt?

Die Untersuchung dieser Fragen ist ein Kernstück dieser Forschungsarbeit. Dazu wurden an einem variablen Raummodell je Variante eine thermisch dynamische Simulation durchgeführt, die das Raumklima über die Zeitspanne eines Jahres im Stundentakt simuliert.

Es konnte vergleichend bewertet werden, wie sich Veränderungen am Raummodell auf das Raumklima auswirken.

7.3.1 Inputparameter Raummodell

Die variierten Parameter sind:

- Raumhöhe
- Raumtiefe
- Fenstergröße
- Glasart
- Dicke der Außenwand
- Himmelsrichtung
- Bauweise

Die Kombinationsmöglichkeiten der Parameter führen zu mehreren hundert Raumvarianten.

7.3.2 Tageslichtsimulation

In einem ersten Untersuchungsschritt, einer Tageslichtsimulation nach DIN 5034-1, wurden alle Raumvarianten aussortiert, bei der der Tageslichtquotient DF (Daylight Factor) von wenigstens 2% (DIN 5034-1:2011) unterschritten war, ergo die Tageslichtversorgung nicht ausreichte.

7.3.3 Dynamische Simulation Parametrisches Raumodell, Nutzer und Umwelt konstant

Die Rahmenbedingungen wie Nutzerverhalten, Technik und Wetter wurden für den ersten Simulationsdurchlauf konstant gehalten, um die Effekte der variierten konstruktiven Parameter sichtbar zu machen.

Vereinfacht lässt sich als Ergebnis dieser Untersuchung zusammenfassen, dass Raumvarianten mit geringem Außenwandanteil und 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung den geringsten Heizwärmebedarf im Winter haben.

Ein geringer Fensterflächenanteil und thermische wirksame Speichermasse der Bauteile vermeidet die Überhitzung des Raumes im Sommer.

7.3.4 Vergleich Raummodelle Lebenszyklusanalyse (LCA) und Lebenszykluskosten (LCC)

Auch die Umweltauswirkung und die Lebenszykluskosten der verschiedenen Raumvarianten wurden miteinander verglichen. Dazu wurde für jede Variante eine LCA/LCC-Analyse durchgeführt. Dabei wurden untersucht:

- Rohstoffgewinnung / Herstellung
- Betriebsphase
- Entsorgung

Für die Betrachtung der Umwelteinwirkung fokussiert auf das Treibhauspotenzial GWP (Global Warming Potential) hat die Untersuchung gezeigt, dass über den betrachteten Zeitraum von 100 Jahren von den untersuchten bzw. variierten Raumparametern die folgenden Faktoren den größten Einfluss haben:

- Art der Heizwärmeerzeugung
- Transmissionswärmeverluste (indirekt der Heizwärmebedarf)

Das bedeutet, Raumvarianten mit geringem Heizwärmebedarf haben entsprechend das geringere Treibhauspotential.

Bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten kann zusammenfassend folgendes festgestellt werden:

- Die Art der Heizwärmeerzeugung und Transmissionswärmeverluste (indirekt der Heizwärmebedarf) haben hier den größten Einfluss.
- Die Decke als Bauteil hat einen größeren Anteil an den Herstellungskosten als Innen- und Außenwände
- Heizwärmebedarf, Außenwandstärke und Flächenverbrauch beeinflussen sich gegenseitig, je nach Grundstücksausnutzung, Bodenrichtwert und Mietspiegel verdient diese Wechselwirkung eine eingehendere Betrachtung

7.3.5 Dynamische Simulation Parametrisches Raumodell, Nutzer variabel zur Bestimmung der Robustheit

Raumvarianten mit reduziertem Hüllfächenanteil und optimiertem Fensterflächen mit einem Tageslichtquotienten von 2 % haben sich als optimal bezüglich geringem Heizwärmebedarf und reduzierter Überhitzung im Sommer erwiesen.

An diesen erfolgreichen Raumkonfigurationen werden nun die Auswirkungen sich ändernder Umgebungsparameter untersucht.

Zum Vergleich werden zusätzlich zu den drei untersuchten einfachen Bauweisen noch ein Raummodell in Standardbauweise (Stahlbetonaußenwand mit Außendämmung) und in Passivhausbauweise (wie Standard, aber mit verstärkter Dämmung und mit Lüftungsanlage) eingeführt.

Um die Robustheit gegenüber unsicheren Randbedingungen untersuchen zu können, werden die folgenden, im ersten Simulationsdurchlauf konstant gehaltenen Umgebungsparameter variiert:

- Wetter
- Lüftungsverhalten des Nutzers
- Interne Gewinne / Anwesenheit
- Speichermasse (beim Holzbau)
- Außenliegender Sonnenschutz (beim Holzbau und Passivhaus)
- Ausfall des Sonnenschutzes (beim Holzbau und Passivhaus)

In der Untersuchung hat sich gezeigt, dass das Lüftungsverhalten des Nutzers den größten Einfluss auf den Heizwärmebedarf im negativen wie im positiven hat. Im Sommer wirkt sind das Wetter und die internen Gewinne die Faktoren, die den größten Einfluss auf die Überhitzung im Sommer haben.

Insgesamt zeigen sich die einfachen Bauweisen ähnlich robust wie die parallel untersuchten Raummodelle mit Standard- und Niedrigenergiekonzept.

7.4 Simulation und Untersuchung auf Gebäudeebene (MS 8 - MS 9)

Nachdem die Untersuchung auf Raumebene für einen guten Vergleich untereinander und damit Erkenntnisse über sinnvolle Raumkonfigurationen gewonnen werden konnten, werden in einem zweiten Schritt weitere vergleichende Untersuchung an grob entwickelten Gebäudeentwürfen durchgeführt. Diese Ergebnisse eignen sich gut, um die ermittelten Werte anderen Projekten gegenüberzustellen.

7.4.1 Typenentwürfe der Gebäudeklasse 3, 4 und 5

Drei typische Bauformen im Geschosswohnungsbau wurden schematisch als Basis für eine Mengenermittlung und Abschätzung der Verbrauchwerte erstellt:

- Solitär, 3 Geschosse, 704 m^2 Nutzfläche
- Zeile, 4 Geschosse, 2.820 m^2 Nutzfläche
- Blockrand, 6 Geschosse, 1.614 m^2 Nutzfläche

So wie auch schon bei der Untersuchung der Robustheit auf Raumebene wurden pro Bauform neben den drei einfachen Bauweisen noch ein Standardwohnungsbau und ein Wohnungsbau mit Passivhauskonzept untersucht.

7.4.2 Technische Konzepte / Verbrauchswerte

Passend zu den unterschiedlichen Gebäudekonzepten wurden typische Gebäudetechnik-konfigurationen angesetzt:

Einfach Bauen (Mauerwerk / Leichtbeton / Massivholz):

- Heizsystem: Wärmepumpe + Erdsonden
- Verteilersystem: Fußbodenheizung (Niedertemperatursystem)
- Lüftungssystem: Abluft im Bad, Zuluft Fensterfalzlüfter
- Luftwechsel: Winter: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + hygienischer Mindestluftwechsel (30 m^3/(h*Pers)) über Fensterlüftung, wenn Nutzer anwesend, Sommer: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + Ablüftung durch Nutzer 2,0/h + Nachtlüftung 2,0/h

Passivhaus (Stahlbeton mit WDVS)

- Heizsystem: Wärmepumpe + Erdsonden
- Verteilersystem: Fußbodenheizung (Niedertemperatursystem)
- Lüftungssystem: Erdwärmetauscher (passive Luftvorerwärmung) + Mechanische Lüftung - Abluft im Bad, Zuluft über Lüftungsanlage, WRG 75%
- Luftwechsel: 0,35/h ganzjährig

Standardgebäude (Stahlbeton mit WDVS) Variante 1 mit Gasbrennwert-Therme + Solarthermie

- Heizsystem: Gasbrennwert-Therme + Solarthermie (für ENEV)
- Verteilersystem: Heizkörper
- Lüftungssystem: Abluft im Bad, Zuluft über Fensterfalzlüfter
- Luftwechsel: Winter: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + hygienischer Mindestluftwechsel (30 m³/(h*Pers)) über Fensterlüftung, wenn Nutzer anwesend, Sommer: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + Ablüftung durch Nutzer 2,0/h + Nachtlüftung 2,0/h

Standardgebäude (Stahlbeton mit WDVS) Variante 2 mit Wärmepumpe + Erdsonde

- Heizsystem: Wärmepumpe + Erdsonden
- Verteilersystem: Fußbodenheizung (Niedertemperatursystem)
- Lüftungssystem: Abluft im Bad, Zuluft über Fensterfalzlüfter
- Luftwechsel: Winter: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + hygienischer Mindestluftwechsel (30 m³/(h*Pers)) über Fensterlüftung, wenn Nutzer anwesend, Sommer: Infiltration 0,2/h (Feuchteschutz) + Ablüftung durch Nutzer 2,0/h + Nachtlüftung 2,0/h

Werte für den Heizwärmebedarf werden über eine Berechnung angelehnt an das Monatsbilanz-Verfahren nach DIN V 4108-6 abgeschätzt.

7.4.3 Vergleich Gebäudemodelle Lebenszyklusanalyse (LCA) und Lebenszykluskosten (LCC)

Die Untersuchung von LCA und LCC erfolgt in der gleichen Systematik wie bei der Betrachtung auf Raumebene. Die dort ermittelten Zusammenhänge und Ergebnisse treten auch bei der Untersuchung auf Gebäudeebene auf:

- Der Betrieb dominiert bei allen Varianten weit über die Herstellung sowohl bei GWP als auch Betriebskosten. Je kompakter die Bauweise, desto geringer werden diese.
- EB-Holz hat sehr gute LCA GWP bei Bauteilen, ist allerdings teuer in Herstellung.
- EB-MW ist am kostengünstigsten herstellbar, aber schlechter im GWP Herstellung.
- EB-LB sind im Mittelfeld bzgl. Kosten und GWP Herstellung.
- Alle EB- Gebäude (außer GK 5 / Baulücke) schneiden bei Herstellung GWP generell leicht besser ab als Standard- und NE-Gebäude.
- Das NE-Gebäude hat das niedrigste Betriebs-GWP (außer bei GK 5 / Baulücke).
- Das Standard-Gebäude mit Gasbrennwert-Therme und Solarthermie schneidet am günstigsten im Betrieb ab und am schlechtesten bei GWP in allen Größen; das liegt am Energieträger Gas bzw. am Gaspreis; eine Verdopplung des Gaspreises würde Betriebskosten in die Nähe der Wärmepumpen rücken; CO2-Steuer auf fossile Brennstoffe wäre notwendig.

7.5 Einfach Bauen: Potentiale und Hemmnisse

7.5.1 Optimales Umfeld für Einfaches Bauen

Dichte

Hohe Dichte führt zu Effizienz und Synergie bei:

- Flächenverbrauch
- Erschließungsaufwand
- Verkehrsaufkommen durch Nutzung
- Materialeinsatz beim Bau
- Energieverbrauch im Betrieb

Die Dichte wird durch die Länder und Kommunen z. B. durch Gesetze, Bauordnungen, Flächennutzungspläne und Bebauungspläne vorgegeben. Der Bauherr kann sich nachfolgend entscheiden, wie er die gegebenen Spielräume ausnutzt.

Die seit der EnEV 2009 auch für Wohngebäude anzuwendende Berechnungsmethode über das Referenzgebäude führt dazu, dass Gebäude unabhängig von ihrer Bauweise (kompakt oder nicht kompakt) bewertet werden. Die Vorteile einer dichten Bauweise z. B. von Geschoss-wohnungsbauten gegenüber z. B. Einfamilienhäusern werden dadurch nicht in die Bewertung des EnEV 2009 mit einbezogen. Hier liegt ein Verbesserungspotential, um Dichte und damit geringen Hüllflächenanteil stärker mit Anforderungen an die Dämmmaßnahmen zu verrechnen, so wie diese bereits sinnvollerweise zwischen der Art der Wärmeerzeugungsanlage und des Dämmstandards erfolgt.

Energieinfrastruktur

Wenn die Energie für die Herstellung und die Nutzungsphase von Gebäuden ohne negative Auswirkungen für die Umwelt gewonnen werden kann, können sogar Bestandgebäude mit noch intakter baulicher Struktur umweltfreundlich betrieben werden, ohne diese verändern zu müssen.

Beispielhaft sei hier das Vorhaben der Stadtwerke München genannt, die Energie für die Strom-versorgung bis 2025 und die Wärmeversorgung bis 2040 aus regenerativen Quellen, vor allem Geothermie, zu gewinnen (SWM).

Berücksichtigung des Nutzerverhaltens

Niedrigenergiekonzepte, wie z. B. das Passivhauskonzept, setzen meist auf Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, um die Wärmeverluste, die durch die notwendige Frischluftversorgung der Wohnräume entstehen, zu verringern. Sofern diese Systeme von den Bewohnern verstanden und akzeptiert werden, ist auch eine höhere Wahrscheinlichkeit gegeben, dass der Nutzer z. B. bei der Fensterlüftung entsprechend verhält, sprich diese nur in Ausnahmesituationen einsetzt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, wie negativ sich ein davon abweichendes Nutzverhalten auf die Energiebilanz während der Nutzung auswirken kann (siehe Kapitel 4.4).

Es erscheint sinnvoll, Anstrengungen in die Aufklärung des Nutzers zu investieren und gleichzeitig nur technische Systeme zu verwenden, die auch bei einem abweichenden Verhalten des Nutzers noch ausreichend robust sind, um die angestrebten Ergebnisse zu erzielen.

Vereinfachung der Konstruktion

Einfaches Bauen verfolgt auf der Ebene der Baukonstruktion folgende Ziele:

- Geringe Anzahl von Schichten
- Langlebige, alterungsfähige Oberflächen
- Einfache, durch handwerkliche Methoden wieder lösbare Fügung der Bauteile
- Nutzungsoffene Grundrissstrukturen
- Trennung von haustechnischen Systemen und Baukonstruktion
- Vorteile von Vorfertigung nutzen

Um diese Ziele zu erreichen, ist es sinnvoll bereits bewährte, materialgerechte Konstruktionsmethoden anzuwenden. Gleichzeig sind aber auch die Anforderung an z. B. den Schallschutz in der Vergangenheit weiter und weiter gestiegen.

Konkrete Projekte können Lösung produzieren, die einfach sind und trotzdem den projektspezifischen Anforderungen genügen. Die in den 1:1-Versuchsmodellen getesteten Konstruktionen könnten sich dadurch weiterentwickeln und optimiert werden.

7.6 Weiterer Forschungsbedarf

Die Erkenntnisse dieses Forschungsprojektes sollen, über die Dokumentation im Endbericht hinaus, für Planer anwenderorientiert in einem **Leitfaden** aufbereitet werden. Weiterhin sollen die Grundlagen der Strategie Einfach Bauen in Planung und Bau von Forschungshäusern einfließen.

7.6.1 Forschungshäuser

Garching

Das Studentenwerk München betreibt eine Vielzahl von Einrichtungen des studentischen Wohnens. Robustheit und geringe Betriebskosten stehen bei Neubauprojekten deshalb im Fokus. Das Studentenwerk interessiert sich entsprechend für die Strategien des einfachen Bauens und möchte diese in einem Neubauprojekt ausprobieren.

In Garching, im Bereich des westlichen Erweiterungsgebietes ist die Errichtung von drei Gebäuden für studentisches Wohnen mit ca. 140 Plätzen geplant.

Verhandlung über das Baugrundstück zwischen dem Freistaat Bayern und dem Studentenwerk finden aktuell statt. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, soll ein Projektstart erfolgen.

Bad Aibling

Die B&O Gruppe erstellt auf dem firmeneigenen Null-Emissions-Quartier im oberbayerischen Bad Aibling seit Jahren innovative und nachhaltige Versuchsbauten, z. B. ein 8-geschossiges Holzhochhaus.

Als Kooperationspartner von Einfach Bauen 1 hat B&O inzwischen ein Projekt zum Bau von Forschungshäusern gestartet. Dort sollen die Bauweisen hochdämmendes Ziegelmauerwerk, Holz-Hybrid und Leichtbeton an drei gleichartigen Gebäuden erprobt und getestet werden. Der Hauptfokus liegt dabei auf kurzer Bauzeit, geringen Baukosten und reduzierter Ge-bäudetechnik.

Die Erkenntnisse aus Einfach Bauen 1 hat B&O als Kooperationspartner mit erarbeitet und wendet diese nun an. Es besteht seitens B&O das Vorhaben, die genannten Bauweisen in ein Bausystem zu überführen und in weiteren Projekte anzuwenden.

Der Bauantrag für die Forschungshäuser wurde im Juli eingereicht. Die Baugenehmigung wird in Kürze erwartet. Ein Baustart erfolgt voraussichtlich noch in diesem Jahr.

7.6.2 Nachfolgeprojekte 2 & 3

Der Bau der Forschungshäuser soll über ein Nachfolgeprojekt „Einfach Bauen 2, Planen, Bauen, Messen“ begleitet werden. Für die Auswertung der Langzeitmessungen ist ein Abschlussprojekt „Einfach Bauen 3“ geplant

Die Messung dieser Gebäude in der Nutzungsphase würde weitere Erkenntnisse liefern über:

- Verbrauch und Betriebszustände der technischen Systeme
- Nutzerverhalten (Anwesenheit, Bedienung Fensterlüftung)
- Raumklima (Temperatur, Feuchte, Schall)
- Feuchtemonitoring der Bauteile

Die Auswertung der gemessenen Daten kann Rückschlüsse liefern, inwiefern die Annahmen aus der Simulation auch in der tatsächlichen Nutzung eintreten. Eine Rückkopplung auf das Konzept des Einfachen Bauens wäre ein Ergebnis daraus.

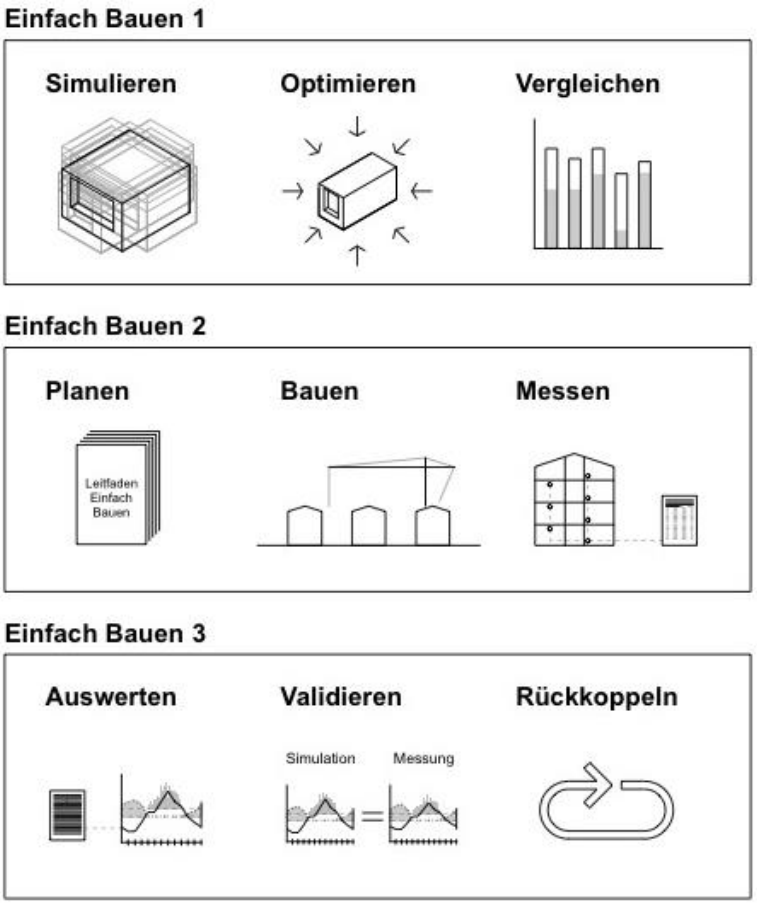


Abbildung 92: Gesamtprojekt „Einfach Bauen“ mit Teilschritten 1-3

Glossar

Begriff	Definition
Cradle to gate	Wiege bis Werkstor
Cradle to grave	Wiege bis Lebensende
Cradle to gate with options	Wiege bis Werkstor mit weiteren optionalen Lebenszyklusabschnitten
Direkte Horizontalstrahlung [W/m²]	Anteil der Solarstrahlung, der ohne auf ein Hindernis zu treffen von der Sonne auf eine horizontale Fläche trifft
Diffuse Horizontalstrahlung [W/m²]	Nicht direkte Solarstrahlung (reflektiert, gestreut, etc.) auf horizontaler Fläche
Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert	Teil der Solarstrahlung, der direkt durchgelassen wird und dem Teil der Strahlung, der im Glas absorbiert wurde und zeitversetzt über Wärmestrahlen, Wärmeleitung und Konvektion in den Raum gelangt
Grasshopper 3D	Grafischer Algorithmus Editor als Plug-In der Modellierungssoftware Rhinoceros 3D
Hx-Diagramm	Mollier-h-x-Diagramm = Enthalpie-Wasserbeladungs-Diagramm: zeigt Zustandsänderung feuchter Luft durch Erwärmung/Kühlung, Be-/Entfeuchtung und Mischung verschiedener Luftmengen
Indoor Air Category IDA 2	Klassifizierung der Raumluftqualität nach DIN EN 13779:2007-09; IDA 2 ist die mittlere Raumluftqualität mit einer absoluten CO_2-Konzentration der Innenraumluft von 800 bis 1000 ppm; dies entspricht einer Lüftungsrate von 36-54 m³/(h*Person)
Leichtbeton, haufwerksporig	Offene Porosität, die durch kaum abgestufte Sieblinien erreicht wird
Leichtbeton, gefügedicht	Geschlossene Oberfläche die u.a. durch eine optimale Packungsdichte von Zement und Gesteinskörnung erreicht wird
Lichttransmissionsgrad Tvis	Anteil des durch eine Verglasung transmittierten sichtbaren Sonnenlichts
Modul	Phase im Lebenszyklus
Operative Temperatur T_{op} [°C]	Operative Temperatur: gemittelte Temperatur aus Strahlungs- und Lufttemperatur im Innenraum

Strahlungstransmissionsgrad Tsol	Anteil der durch eine Verglasung transmittierten Gesamtsolarstrahlung (UV + Licht + IR)
Testreferenzjahr TRY	Klimadatensatz, der einen typischen Witterungsverlauf über das Jahr repräsentiert
TRNSYS18	TRaNsient SYstems Simulation (Universität Wisconsin, TESS, Transsolar); Softwareprogramm zur thermisch dynamischen Simulation von Anlagen und Gebäuden, basierend auf der Programmiersprache Fortran
Übertemperaturgradstunde [Kh]	Entsteht, wenn die operative Raumtemperatur für die Dauer von einer Stunde 1 K über der zulässigen Raumgrenztemperatur liegt. Diese beträgt in Abhängigkeit der Klimaregion 25, 26, bzw. 27°C nach DIN 4108-2:2013. Der dabei akzeptierte Grenzwert für Wohngebäude liegt bei 1200 Kh/Jahr
„Urban Heat Island Effect“ UHI	höhere Oberflächen- und Lufttemperaturen in urbanen Gebieten gegenüber den umgebenden ländlichen Gebieten, hervorgerufen durch versiegelte Flächen und städtische Infrastruktur
Wärmekapazität c [kJ/(kg*K)]	Stoffeigenschaft; spezifische Wärmemenge, die benötigt wird, um das Temperaturniveau im Baustoff um 1 K zu erhöhen; steht in Zusammenhang mit der Rohdichte des Baustoffs ρ [kg/m³]
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Stoffeigenschaft, die den Wärmestrom angibt, der bei einem Temperaturunterschied von 1 K durch eine 1 m² große und 1 m dicke Schicht des Stoffs durchgeht. Je kleiner λ, desto besser das Dämmvermögen des Stoffs.

Abkürzungsverzeichnis

Begriff	Definition
EoL	End-of-Life (Lebensende)
EoW	End of waste (Ende der Abfallbehandlung, entweder Stoff wird deponiert oder verlässt System zur Weiterverwendung in Sekundärmarkt)
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
ILC	Infraleichtbeton
LC	Leichtbeton
LCI	Life cycle inventory (Lebenszyklusinventar)
LNB	Leitfaden Nachhaltiges Bauen (BBSR)
PENRE	Primärenergie Nicht Erneuerbar (Herstellungs-) Energie
PERE	Primärenergie Erneuerbar (Herstellungs-) Energie
WP	Wärmepumpe

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeitplan zum 01.10.2018 8

Abbildung 2: Simple House, SS 2017, Modellfoto, Entwurf Massimo Falconi 10

Abbildung 3: Scenario Buffered Design, WS 2017 / 2018, Szenario für 2017 und 2027, Entwurf Marion Montiel 11

Abbildung 4: Vergleich Anteil des jährlichen Abgangs (Abbruch und Umnutzung zu Nichtwohngebäuden) am Gesamtbestand an Wohngebäuden in Bayern jeweils nur innerhalb einer bestimmten nach Bauzeit 12

Abbildung 5: Vergleich Anteil des jährlichen Abgangs (Abbruch und Umnutzung zu Nichtwohngebäuden) am Gesamtbestand an Wohngebäuden in Bayern und München ... 12

Abbildung 6: Schallschutztechnisch ideale Einbindung der Wohnungstrennwand in wärmedämmende Außenwand (Pröll 2017) 19

Abbildung 7: Links: Übersicht LC und ILC; Rechts: Druckfestigkeiten und Rohdichten verschiedener ILC-Zusammensetzungen aus (Schlaich und Hückler 2017)..... 23

Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Wanddicke und dem bewerteten Luftschalldämmmaß für Betone unterschiedlicher Rohdichten; Rechts: Berechnetes Schalldämmmaß für ILC für eine Wanddicke von 55 cm, entnommen aus (Leibinger et al. 2017) 25

Abbildung 9: Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen (Cooperative Leichtbeton)..... 26

Abbildung 10: Parameterstudie zum Einfluss von Rohdichte und Wärmekapazität auf Übertemperatur-gradstunden (Ertl 2017) 32

Abbildung 11: Messwerte für das Flankendämmmaße $R_{Ff,w}$ $R_{Fd,w}$ und $R_{Df,w}$ einer flankierenden Sperrholzdecke (Rabold 2017)..... 36

Abbildung 12: Anschlusssituationen und Ausführungshinweise für flankierende Massivbauteile (Rabold 2017) 36

Abbildung 13: Positionierung des entkoppelnden Schalldämmelements (rot) in der Montagefolge (Borsch-Laaks et al. 2018)..... 37

Abbildung 14: Isoplethenkurven zur Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Bauteiloberfläche im Gebäudeinneren auf unterschiedlichem Substrat I und II (Sedlbauer 2001). 40

Abbildung 15: Gegenüberstellung der Umhüllenden der Holzfeuchte (links) und Holzfeuchtegradiente (rechts) über den Querschnitt des Tragwerks in NKL 2 im Süd-Westen und Nord-Osten des Gebäudes (Knorz et al. 2016). 42

Abbildung 16: Vollholzelemente aus Blockständern mit Luftkammern (Reßle 2018). 45

Abbildung 17: Einfluss der Holzfeuchte auf ausgewählte Eigenschaften des Holze (Kollmann 1951). 47

Abbildung 18: Konstruktionshilfen für Holz-Beton-Verbund Decken (Bartlome 2011)..... 50

Abbildung 19: Low-Tech Komponenten des interreg Projekts "Low-Tech Gebäude" (Erber und Mair 2018) 55

Abbildung 20: Ergebnistabelle aus dem GEWOFAG Forschungsprojektbericht Riem (GEWOFAG 2016)..... 56

Abbildung 21: Familienhaus in Berlin (2007), (El Zareef 2010); rechts: Einfamilienhaus in Aiterbach (2016),(Massiv und doch ganz leicht 2016)..... 58

Abbildung 22: woodcube in Hamburg (2012) (Hausegger)..... 59

Abbildung 23: 2226 in Lustenau (2013) (Eberle et al., 2016)..... 60

Abbildung 24: Lebenszyklusphasen für Bauprodukte nach DIN EN 15804 und für Gebäude nach DIN EN 15978, hervorgehoben die quantitativ und qualitativ untersuchten Phasen . 63

Abbildung 25: Übersicht zu den untersuchten Bauteilaufbauten..... 66

Abbildung 26: Vergleich des Treibhauspotentials der Außenwandbauteile nur Herstellung (A1-A3) und gesamter Lebenszyklus (A1-C4)..... 67

Abbildung 27: Variable Parameter der Voruntersuchung...... 69

Abbildung 28: Energiebilanz der einzelnen Himmelsrichtungen für den Base case..... 70

Abbildung 29: Energiebilanz der Himmelrichtungen die Mindestwerte bei Fensteranteil und g-Wert..... 71

Abbildung 30: Energiebilanz der Himmelrichtungen die Maximalwerte bei Fensteranteil und g-Wert..... 71

Abbildung 31: Auswirkungen der Parameterveränderungen auf den Heizwärmebedarf gemittelt über alle Haupthimmelsrichtungen..... 72

Abbildung 32: Auswirkungen der Parameterveränderungen auf den Heizwärmebedarf einzeln für die Haupthimmelsrichtungen 73

Abbildung 33: Schema der Untersuchungen auf Raumebene 76

Abbildung 34: Verlauf der Außenlufttemperatur über Jahr (X-Achse) und Tag (Y-Achse) 78

Abbildung 35: hx-Diagramm mit absoluter Feuchte (Y-Achse) über die Außenlufttemperatur (X-Achse) 79

Abbildung 36: Verlauf der diffusen Horizontalstrahlung über Jahr (X-Achse) und Tag (Y-Achse) 79

Abbildung 37: Verlauf der direkten Horizontalstrahlung über Jahr (X-Achse) und Tag (Y-Achse) 80

Abbildung 38: Windrose mit Angabe der Windgeschwindigkeit (Farbskala) 80

Abbildung 39: Raumgeometrie Parameter 82

Abbildung 40: Sonnenstandsdiagramm für den Standort München (Landeshauptstadt Stuttgart 2018) 85

Abbildung 41: Anordnung der Fensterfläche im Tageslicht-Simulationsmodell - Normalfall (oben) und Studie (unten) 90

Abbildung 42: Extrembeispiele für den DF der vorliegenden Studie 92

Abbildung 43: Verteilung der DF Ergebnisse je Varianten-Gruppe mit Angabe des 2%-Kriterium 93

Abbildung 44: Abhängigkeiten der Parameter 96

Abbildung 45: Gegenüberstellung der Auswirkungen von Änderungen der Raumparameter auf den jährlichen Heizwärmebedarf HWB [kWh/(m2*a)] und die jährlichen Übertemperaturgradstunden ÜTGS [Kh/a] für die Bauweise Mauerwerk 98

Abbildung 46: Unterschied zwischen einem globalen und einem robusten Optimum; eigene Darstellung nach Rhein (Rhein, 2014). 104

Abbildung 47: Untersuchte Raumvarianten der Robustheitsanalyse 106

Abbildung 48: Unsichere Randbedingungen als Kriterien der Robustheitsanalyse 107

Abbildung 49 Testreferenzjahr 2010 und 2045 im Vergleich nach Außenlufttemperatur (eigene Grafik) 108

Abbildung 50: Robustheit der Varianten bezüglich ihres Heizwärmebedarfes (Beispiel Mittelraum Südwest) 110

Abbildung 51: Robustheit der Varianten bezüglich ihres Heizwärmebedarfes (Beispiel Mittelraum Nordost) 110

Abbildung 52: Robustheit der Varianten bezüglich ihres Sommerlichen Wärmeschutzes (Beispiel Mittelraum Südwest) 112

Abbildung 53: Robustheit der Varianten bezüglich ihres Sommerlichen Wärmeschutzes (Beispiel Mittelraum Nordost) 112

Abbildung 54: Balkendiagramm der beiden Bauweisen und Entsorgungsszenarien bezogen auf das Recyclingpotenzial 116

Abbildung 55: Vergleich des GWP pro m² der jeweiligen Bauteile 120

Abbildung 56: Vergleich des GWP pro Referenzraum 121

Abbildung 57: Vergleich des PERE pro Referenzraum 122

Abbildung 58: Vergleich des PENRE pro Referenzraum 123

Abbildung 59: Treibhausgasausstoß des Raumes für verschiedenen Außenwandaufbauten über 100 a und mit verschiedenen Energieträgern 124

Abbildung 60: Übersicht Herstellung und Betrieb über 100 a des Referenzraums aus Mauerwerk 125

Abbildung 61: LCC der Bauteile für best-case Ziegel über 100 a 126

Abbildung 62: LCC best-case Ziegel inklusive Heizwärme über 100a 127

Abbildung 63: Exemplarischer Mittelraum, westorientiert, mit Darstellung des Gesamt-GWP gegenüber spezifischem Heizwärmebedarf 129

Abbildung 64: Exemplarischer Mittelraum, westorientiert, mit Darstellung des Gesamt-LCC gegenüber spezifischem Heizwärmebedarf 130

Abbildung 65: Schema Untersuchung auf Gebäudeebene 132

Abbildung 66: Einordnung der Dichte der Gebäudemodelle im Bezug zu den Dichtekategorien der Stadt München, eigene Darstellung, (Eberle/ Tröger 2017) 133

Abbildung 67: Grundrisse Grobentwurf Solitär Gebäudeklasse 3 (GK 3) 134

Abbildung 68: Grundrisse Grobentwurf Zeile Gebäudeklasse 4 (GK 4).....135

Abbildung 69: Grundrisse Grobentwurf Baulücke Gebäudeklasse 4 (GK 5).....136

Abbildung 70: Energiekonzept EnEV-Standard.....140

Abbildung 71: Energiekonzept Niedrigenergiestandard.....142

Abbildung 72: Energiekonzept Einfach Bauen 144

Abbildung 73: Monostoffliche „Einfache Bauten“ GK3 (Solitär) pro m² NF und a 150

Abbildung 74: Monostoffliche „Einfache Bauten“ GK4 (Zeile) pro m² NF und a 151

Abbildung 75: Monostoffliche „Einfache Bauten“ GK5 (Blockrand/Baulücke) pro m² NF und a 151

Abbildung 76: Gesamtbetrachtung LCC (links) und LCA (rechts) auf Gebäudeebene GK3 (Solitär) pro m² NF und a 154

Abbildung 77 Gesamtbetrachtung LCC (links) und LCA (rechts) auf Gebäudeebene GK4 (Zeile) pro m² NF und a.....155

Abbildung 78: Gesamtbetrachtung LCC (links) und LCA (rechts) auf Gebäudeebene GK5 (Blockrand/Baulücke) pro m² NF und a 156

Abbildung 79: Gebäudeklasse 3 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a.....157

Abbildung 80: Gebäudeklasse 4 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a.....158

Abbildung 81: Gebäudeklasse 5 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a.....159

Abbildung 82: Nutzenergieverbrauch verschiedener Gebäudetechnikkonzepte im Vergleich, Quelle: (GEWOFAG, 2016).....162

Abbildung 83: Schema der Aufgliederung der Grobentwürfe in Raummodule 163

Abbildung 84: Abschätzung des Heizwärmebedarfes bei Übertragung der Robustheitsuntersuchung auf die Gebäudemodelle 164

Abbildung 85: Abschätzung des Heizwärmebedarfes bei Übertragung der Robustheitsuntersuchung auf die Gebäudemodelle, Diagramm.....165

Abbildung 86: LCA zur Robustheit über den Lebenszyklus mit minimalen, normalen oder maximalen Heizwärmebedarf.....167

Abbildung 87: LCC zur Robustheit über den Lebenszyklus mit minimalen, normalen oder maximalen Heizwärmebedarf.....168

Abbildung 88: Fenstervarianten ausgehend vom Base Case 170

Abbildung 89: Erklärungsgrafik zum Aufbau des Innenraummodells mit Position des Messpunktes 1 (M 1) und Messpunktes 2 (M 2) 171

Abbildung 90: links: Erklärungsgrafik zur Funktionsweise des Lichthimmels, rechts: Fotografie des Kuppelinneren des Lichthimmels 172

Abbildung 91: Vergleich der im Versuchsaufbau gemessenen Luxwerte 173

Abbildung 92: Gesamtprojekt „Einfach Bauen“ mit Teilschritten 1-3.....188

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kriterien für den Regenschutz und Beschichtungen nach DIN 4108-3 bei Prüfung nach DIN EN ISO 15148 15

Tabelle 2: Wassereinwirkungsklasse nach Tab. 1, DIN 18533-1 16

Tabelle 3: Brandschutztechnische Einstufung von tragenden, raumabschließenden Wänden aus Zulassungsziegeln 1 18

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Materialgrundlagen von drei wichtigen Schimmelmodellen (Tietze et al., 2017). 40

Tabelle 5: Bewertung des Schimmelwachstums und deren Kriterien (Tietze et al., 2017). 41

Tabelle 6: Einwirkung Druck in Richtung der Decklagen bei unterschiedlichen Deckenkonstruktionen. Widerstandwerte von Brettsperrholz RD= 9692 kN/m², Luftkammer-Holz RD= 7846 kN/m² 43

Tabelle 7: Kennwerte für Vollholzwandelemente (geklebtes BSP, genageltes BSP) nach Zulassungen der diversen Hersteller 44

Tabelle 8: Kennwerte für Vollholzwandelemente mit Luftkammern zur Verbesserung der Dämm-eigenschaften nach Zulassung und Prüfzeugnissen des Herstellers (Reßle, 2018). 45

Tabelle 9: Nutzungsklassen nach Eurocode 5 / DIN EN 1995-1-1 Abschn. 2.3.1.3 45

Tabelle 10: Dauerhaftigkeitsklassen von Hölzern nach DIN EN 350-2 48

Tabelle 11: Zuordnung der Dauerhaftigkeitsklasse DIN EN 350-2 zur Gebrauchsklasse nach DIN 68800-1 48

Tabelle 12: Beispiel Abbrandtiefe von sichtbaren Brettsperrholzbauteilen 52

Tabelle 13: Variable Parameter der Voruntersuchung 70

Tabelle 14: Auswirkung der Raumparameter auf den Heizwärmebedarf 74

Tabelle 15: Parameter der in der Simulation verwendeten Sonnen- und Wärmeschutzgläser .. 83

Tabelle 16: Bauteile des Raummodells für die thermisch dynamische Simulation 84

Tabelle 17: Überblick der Inputparameter für das Raummodell 87

Tabelle 18: Variierte Parameter der Tageslichtsimulation 90

Tabelle 19: Bezeichnung der gruppierten Varianten der Tageslichtsimulation..... 91

Tabelle 20: Anzahl der Varianten nach Tageslichtkriterium DF kleiner bzw. größer gleich 2%. 93

Tabelle 21: Anzahl der thermisch dynamisch simulierten Varianten nach Parametergruppierung 94

Tabelle 22: Prozentuale Anteile potenzieller Recyclingquoten der konventionellen und der einfachen Bauweise.....116

Tabelle 23: Eingangsparameter für die Berechnung des Raummodells in Mauerwerk 118

Tabelle 24: Grundlagen für die thermische Simulation der Ergebnisse in der Betriebsphase B6 118

Tabelle 25: Baukörperkennwerte der drei Gebäudemodelle den Bauweisen Einfamilienhaus und Reihenhaus gegenübergestellt.....137

Tabelle 26: Bauteilaufbauten für die Untersuchung auf Gebäudeebene.....138

Tabelle 27: Übersicht Methodik der Sachbilanz auf Gebäudeebene und Festlegung der notwendigen Inputparameter 147

Tabelle 28: Übersicht der Sachbilanzzwischenergebnisse für alle Gebäudeklassen.....149

Tabelle 29: Gebäudeklasse 3 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a.....157

Tabelle 30: Gebäudeklasse 4 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a.....158

Tabelle 31: Gebäudeklasse 5 LCA & LCC Bauteile + TGA pro m² NF und a.....159

Tabelle 32: Vergleich EB mit anderen LCA-Studien je qm und Jahr.....160

Literaturverzeichnis

Andreas Thaler, “Lebenszykluskosten von Wohnraumlüftungsanlagen im mehrgeschossigen Wohnbau”, available at: http://www.komfortlüftung.at/fileadmin/komfortlueftung/MFH/08_Thaler_Andreas_DA_ano.pdf (accessed 28 September 2018).

Bartlome, O. (2011), *Bauakustische Eigenschaften einer HBV-Decke: unter Berücksichtigung der Frequenzen unter 100 Hz*, Zürich.

BauNetz Media GmbH (2018), “Mauermörtel | Mauerwerk | Mörtel/Putze | Baunetz_Wissen”, available at: https://www.baunetzwissen.de/mauerwerk/fachwissen/moertel-putze/mauermoertel-162672 (accessed 3 April 2018).

Baunetz_Wissen, “Dämmbeton”, available at: https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/daemmbeton-3996865 (accessed 28 September 2018).

Bayerisches Landesamt für Statistik (2009), *Abriss von Gebäuden in Bayern 2008: Abgang insbesondere von Gebäuden aus der Nachkriegs-Aufbauphase*.

Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (2015), *Richtlinie für die Förderung von Wohnraum für Studierende* No. IIC1-4741.0-015/02.

BBSR (2001), *Leitfaden Nachhaltiges Bauen: Anlage 6. Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Liegenschaften.*

BKI-Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, B.-B.D. (2017), *BKI Baupreise kompakt 2018 - Neu- und Altbau: Statistische Baupreise für Positionen mit Kurztexten*, BKI, Stuttgart.

BMUB (2017), “ÖKOBAUDAT. Version 2017-I”, available at: http://www.oekobaudat.de/.

Borsch-Laaks, R., Schopbach, H., Teibinger, M., Wagner, G. and Zeitter, H. (2018), “Der schalltechnische Knoten”, *Holzbau DNQ*, No. 1, pp. 31–35.

Bosse, A. (2016), “Analyse konventioneller Außenwandkonstruktionen hinsichtlich ihrer Eignung als anthropogene Lagerstätten im Urban Mining durch die Identifizierung der relevanten Materialien und die exemplarische Optimierung ihrer Rückflussquoten”, Diplomarbeit, Mathematik/Naturwissenschaften, Universität Koblenz-Landau, Koblenz-Landau, 2016.

Brischke, C. and Meyer-Veltrup, L. (2016), “Modelling timber decay caused by brown rot fungi”, *Materials and Structures*, Vol. 49 No. 8, pp. 3281–3291.

Bund / Bauministerkonferenz vom 21.09.2012 (2012), *Musterbauordnung* (accessed 28 September 2018).

Bundesverband Leichtbeton e.V., “Brandschutz - Ist doch ganz leicht”, available at: http://www.leichtbeton.de/fileadmin/leichtbeton-de/media/bilder/Broschueren/Leichtb_Brandschutz.pdf.

Bundesverband Leichtbeton e.V., “Schallschutz deutlich besser als bei den Anderen - ist doch ganz leicht”, available at: http://www.leichtbeton.de/fileadmin/leichtbeton-de/media/bilder/Broschueren/leichtbeton_Schall.pdf.

Callsen, B. (2017), *Heidelberger Cement*, E-Mail, München (accessed 19 April 2018).

Cooperative Leichtbeton, “Wärmeleitfähigkeit (Leichtbeton)”, available at: http://www.leichtbeton.at/leichtbeton/waermeleitfaehigkeit/.

DeepGreen (2018), “Woodcube Hamburg”, available at: https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiAsYjP9YXaAhULGewKHS1yC8QQFggoMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.deepgreen-development.com%2Fwoodcube-hamburg&usg=AOvVaw36-1uiblfLHE5tnPahKZty.

Deutscher Wetterdienst (2018), “Testreferenzjahre (TRY)”, available at: https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html (accessed 23 April 2018).

Deutsches Institut für Normung (2003), *Putzmörtel DIN EN 998-1: DIN EN 998-1, Deutsche Norm*, DIN EN 998-1, September 2003, Beuth, Berlin.

DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206 (2014), Beuth Verlag, Berlin, available at: https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-1045-2/208946527 (accessed 19 April 2018).

DIN 18533-1 (2017), *Abdichtung von erdberührten Bauteilen - Teil 1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-18533-1/272716073 (accessed 23 April 2018).

DIN 20000-401 (2017), *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 401: Regeln für die Verwendung von Mauerziegeln nach DIN EN 771-1:2015-11*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-20000-401/264641377 (accessed 23 April 2018).

DIN 4102-1 (1998), *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen* No. DIN 4102-1, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-4102-1/5241696 (accessed 23 April 2018).

DIN 4102-4 (2016), *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-4102-4/249682876 (accessed 23 April 2018).

DIN 4108-2:2013, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, Vol. 91.120.10.

DIN 4109 Beiblatt 2 (1989), *Schallschutz im Hochbau; Hinweise für Planung und Ausführung; Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz; Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- oder Arbeitsbereich*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-4109-beiblatt-2/1496097 (accessed 23 April 2018).

DIN 4109-1 (2018), *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-4109-1/280079001 (accessed 23 April 2018).

DIN 4109-2 (2018), *Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-4109-2/280079769 (accessed 23 April 2018).

DIN 5034-1:2011, *Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Vol. 91.160.10.

DIN 68800-1 (2011), *Holzschutz - Teil 1: Allgemeines: Wood preservation - Part 1: General = Préservation du bois - Partie 1: Généralités, Deutsche Norm - DIN*, DIN 68800-1 No. 68800-1, Beuth, Berlin.

DIN 68800-2:2012-02 (2012), *Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Massnahmen im Hochbau: Wood preservation - Part 2: Preventive constructional measures in buildings = Préservation du bois - Partie 2: Mesures de construction présentives [sic] en bâtiments, Deutsche Norm - DIN*, DIN 68800-2 No. DIN 68800-2, Beuth, Berlin.

DIN EN 13501-1 (2010), *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauproduktendukten*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-13501-1/117205992 (accessed 23 April 2018).

DIN EN 13501-2 (2016), *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den*

Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-13501-2/255476962 (accessed 23 April 2018).

DIN EN 13779 (2007), *Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme*, Vol. 91.140.30.

DIN EN 13829 (2001), *Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996, modifiziert) Deutsche Fassung EN 13829:2000*, available at: http://www.ibburkhardt.de/dokumente/EN_13829_zur_Verbreitung_BD.pdf (accessed 23 April 2018).

DIN EN 1996-1-2/NA (2013), *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-1996-1-2-na/181143332 (accessed 23 April 2018).

DIN EN 771-1 (2015), *Festlegungen für Mauersteine - Teil 1: Mauerziegel*, available at: https://www.beuth.de/de/norm/din-en-771-1/232406026 (accessed 23 April 2018).

Dr.-Ing. Bosold, D. and Dr.-Ing. Beck, M., “Zement-Merkblatt Betontechnik B13. Leichtbeton”, available at: https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkbl%C3%A4tter/B13.pdf.

Eaton, R.A. and Hale, M.D.C. (1993), *Wood: Decay, pests and protection*, Chapman and Hall Ltd.

Eberle et al. (Ed.) (2016), *Die Temperatur der Architektur: Be 2226 ; Portrait eines energieoptimierten Hauses = The temperature of architecture*, Birkhäuser, Basel.

Eberle/ Tröger (2017), *Dichte Atmosphäre: Über die bauliche Dichte und ihre Bedingungen in der mitteleuropäischen Stadt. Studienausgabe,* 2. Auflage, Birkhäuser Verlag GmbH, Basel.

Ecoinvent Association (2018), *Ecoinvent*, ecoinvent Association, Zürich.

El Zareef, M. (2010), “Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infralightweight concrete”, Dissertation, Bauingenieurwesen, Technische Universität Berlin, Berlin, 2010.

EN 12524 (2000), *Baustoffe und -produkte Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften*, available at: https://shop.austrian-standards.at/Preview.action?preview=&dokkey=81689&selectedLocale=de (accessed 11 April 2018).

EN 12667 (2001), *Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten* No. 12667, available at: https://shop.austrian-standards.at/Preview.action?preview=&dokkey=90732&selectedLocale=de (accessed 11 April 2018).

Erber, S. and Mair, R. (2018), *Low-Tech Gebäude: Konzepte für klimaverträgliche, energieeffiziente Low-Tech Gebäude im Bodenseeraum*.

Ertl, D. (2017), “Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit unterschiedlicher Bauweisen auf die thermische Behaglichkeit und den Heizwärmebedarf von Gebäuden”, Master Thesis, Fak. BGU, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München, München, 30 September.

EU-BauPVO (2011), *VERORDNUNG (EU) Nr. 305/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates: EU-BauPVO*.

Faust, T. (2003), *Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau, Bauingenieur-Praxis*, Ernst & Sohn, Berlin.

Filipaj, P. (2010), *Architektonisches Potenzial von Dämmbeton,* 2nd ed., vdf Hochsch.-Verl., Zürich.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, *WUFI® Plus: WUFI® Passive*, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (2017), *WUFI® Pro: 1D, Materialdatenbank DB 26.0*, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.

Frenzel, C. and Hiller, M. (2014), “TRNSYSLIZARD - Open Source Tool für Rhinoceros - Grasshopper zur einfachen, schnellen und sicheren Simulation einer Gebäudezone unter Ankopplung von TRNSYS und DAYSIM”, *BauSIM*.

Gamper, A., Dietsch, P. and Merk, M. (2015), *Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen: [Schlussbericht], Forschungsinitiative Zukunft Bau F*, Vol. 2962, Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.

Gespräch Dipl.-Ing. (FH) M. Pröll (2018), *Schallschutz im Mauerwerk*, Persönliches Gespräch, Ziegelzentrum Süd.

GEWOFAG (2016), *Forschungsprojekt Riem*.

Graubner, A., Rast, R. and Schneider, K.-J. (Eds.) (2014), *Mauerwerksbau aktuell 2015: Praxishandbuch für Architekten und Ingenieure*, Bauwerk Beuth, Berlin, Wien, Zürich.

Gruss, J. (2017), “Monolithische Bauweisen mit Infraleichtbeton: Stand der Technik.”, Seminararbeit, TU München, München, 2017.

Hausegger, G., “Mehrfamilienhaus "Woodcube"”, available at: http://www.proholz.at/haeuser/mehrfamilienhaus-woodcube-hamburgd/ (accessed 29 August 2016).

Hausladen et al. (2017), *e%-Energieeffizienter Wohnungsbau: Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung des Modellvorhabens*.

HEIDELBERGCEMENT Group, “Heidelberger Leichtbeton. Der Leichtbaustoff für Wärmedämmung und anspruchsvolle Konstruktionen”, available at: http://www.ap88.de/fileadmin/user_upload/dokumente_veroeffentlichungen/2009/2009_Maerz_Wohnhaus_T_Heidelberger_Beton.pdf (accessed 7 April 2017).

Holzcluster Salzburg (2014), “Salzburger Holzbau 2020+. holzAUFbau”, Innovationsnetzwerk, available at: www.holzcluster.at (accessed 28 September 2018).

Hörenbaum, W. (2005), *Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk*, Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2004, *Massivbau, Baustofftechnologie Karlsruhe*, H. 54, Inst. für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe.

Hückler, A., Reyher, B., “www.infraleichtbeton.de” (accessed 28 September 2018).

IINAS (2013), *GEMIS: Globales Emissions-Modell integrierter Systeme*, IINAS, Darmstadt.

Illuminating Engineering Society of North America (2012), *Approved Method: IES Spatial Daylight Autononmy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*, IES LM-83-12, New York.

Institut für Bauforschung e.V. (2015), *Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenkosten: Forschungsbericht 19.02.2015, IFB – 14553 / 2015*, Hannover.

Isaksson, T., Brischke, C. and Thelandersson, S. (2013), “Development of decay performance models for outdoor timber structures”, *Materials and Structures*, Vol. 46 No. 7, pp. 1209–1225.

Jäger, W. (2015), *Mauerwerk Kalender 2015: Bemessung, Bauen im Bestand, Mauerwerk-Kalender (VCH)* *, Wiley.

Jazizadeh, F. (2013), “Personalized Thermal Comfort Driven Control in HVAC Operated Office Buildings”, *Computing in Civil Engineering - Proceedings of the 2013 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering*, pp. 218–225.

Jehl, W. and Benitz-Wildenberg, J. (2014), *Fachgerechte Fenstermontage: Praktische Tipps zur Planung und Dimensionierung der notwendigen Befestigungen*, Rosenheim.

Kapfinger, O. (2009), *Hermann Kaufmann WOOD WORKS: ökorationale Baukunst*, Springer-Verlag Wien.

Keller Systeme AG (2018), “ROBMADE FASSADEN”, available at: www.keller-systeme.ch.

Knorz, M., Richter, K., Gamper, A. and Jiang, Y. (2016), *Brettschichtholz aus Buche: Langzeitmessungen zur Bestimmung von Feuchtegradienten in Hozbauten der Nutzungsklasse 1 und 2*, Abschlussbericht, Förder BayStmELF, München.

Kollmann, F. (1951), *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe,* 2., neubearb. u. erw. Aufl., Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg.

Komzet Bau Bühl Kompetenzzentrum der Bauwirtschaft (2011), “Elementiertes Bauen aus Leichtbeton”, available at: http://vh.bauwirtschaft-bw.de/files/2/4/20/Baustoff_LeichtbetonII.pdf.

Krauß, O. and Werner, T. (2014), “Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich”, Kurzanalyse Nr.8.

Lam, J. and Hiller, M. (Eds.) (2014), *Schwierigkeiten bei der Verwendung der TRY Daten 2011 für Deutschland in der thermischen Simulation: SES-2-Fo6*.

Landesamt für Statistik Niedersachsen (2015), *Zensus 2011: Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland*, Hannover.

Landeshauptstadt Stuttgart (2018), “Sonnenstandsdiagramm”, available at: https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_sonnenstand (accessed 25 April 2018).

Lehrstuhl für Raumkunst und Lichtgestaltung, “Lichthimmel LH1”, available at: http://www.ar.tum.de/lrl/labor/lichthimmel-lh1/ (accessed 14 July 2018).

Leibinger, R., Schlaich, M., Lösch, C., Rieseberg, P. and Ballestrem, M. (2017), *Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG): Abschlussbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau*, F 3018, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Maderspacher, J. (2017), “Robuste Optimierung in der Gebäudesimulation. Entwicklung einer Methode zur robusten Optimierung für die energetische Sanierung von Gebäuden unter unsicheren Randbedingungen. Dissertation. Technische Universität München.”, Vol. 2017.

Mähner, D., Lengers, J. and Brand, C., “Energieklinker”, Wissenschaftler der FH Münster entwickeln mit dem Klinkerwerk Hagemeister Energieklinker und melden Patent an, *Bauwelt Praxis 28-29,16*, Vol. 2016, p. 46.

“Massiv und doch ganz leicht. Minimalistischer Monolith aus Beton” (2016), available at: https://www.beton.org/service/presse/details/massiv-und-doch-ganz-leicht/ (accessed 19 April 2018).

Maxit (2017), “Dünnbettmörtel. Maxit Mörtelpad”, available at: www.moertelpad.de (accessed 28 April 2018).

Mayr, J. and Battran, L. (2011), *Handbuch Brandschutzatlas: Baulicher Brandschutzatlas ; mit 100 Tabellen und Diagrammen ; [Grundlagen - Planung - Ausführung],* 2. Aufl., FeuerTrutz, Köln.

Messari-Becker, L. (2012), “Bauen mit Stein - Eine moderne monolithische Bauweise: nachhaltig und effizient”, *Bauingenieur*, No. 07-08 (87), pp. 354–361.

MFHHolzR (2004), *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise: MFHHolzR*.

Neitzel et al. (2015), *Bündnis für bezahlbares Wohnen und Bauen: Bericht der Baukostensenkungskommission*.

Neufert, E. and Kister, J. (2012), *Bauentwurfslehre: Grundlagen, Normen, Vorschriften über Anlage, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen, Geräte mit dem Menschen als Maß und Ziel ; Handbuch für den Baufachmann, Bauherrn, Lehrenden und Lernenden ; mit Tabellen,* 40., überarb. und aktualisierte Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden.

Nguyen, A.-T., Reiter, S. and Rigo, P. (2014), “A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis”, *Applied Energy*, Vol. 113, pp. 1043–1058.

Niemz, P. (2005), *Physik des Holzes*, Vol. 3, ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustoffe IfB.

Pröll, M. (2017), *Ziegel-Lexikon Mauerwerk: 2018*, Ziegel-Zentrum Süd, München.

Rabold, A. (2017), “Mehrgeschosser in Massivholzbauweise. Teil 1: Möglichkeiten und Grenzen der schalltechnischen Planung für Decken nach DIN 4109”, *Holzbau DNQ*, No. 6, pp. 46–51.

RAL (2016), *Fenster, Fassaden und Haustüren - Gütesicherung* No. RAL-GZ 695:2016-07, Beuth Verlag, Berlin.

Redaktion BaunetzWissen (2018), “3-D-Wände vom Mauer-Roboter. Automatisierte Vorfertigung von Mauerwerk nach digitalem Entwurf”, available at: https://www.baunetzwissen.de/mauerwerk/tipps/news-produkte/3-d-waende-vom-mauer-roboter-3384005 (accessed 17 April 2018).

Reinhard (2018), “sDA for residential buildings”.

Reßle, A. (2018), “Natürlich Bauen - Gesung Wohnen! Unser Vollholzwandsystem”, available at: http://www.hrw-vollholzwandsystem.de/.

Rhein, B. (2014), “Robuste Optimierung. Robuste Optimierung mit Quantilmaßen auf globalen Metamodellen. Dissertation. Universität Köln.”, Vol. 2014.

Rupp, F. R. et al. (2015), “A review of human thermal comfort in the built environment”, *Energy and Buildings*, No. 105, pp. 178–205.

Schlaich, M. and Hückler, A. (2012), “Infraleichtbeton 2.0”, *Beton- und Stahlbetonbau 107*, No. 11, pp. 757–766.

Schlaich, M. and Hückler, A. (2017), “Infraleichtbeton: Reif für die Praxis”, *Beton- und Stahlbetonbau*, No. 12, pp. 772–783.

Schlaich, M. and Leibinger, R. (2018), *Infraleichtbeton: Handbuch für Entwurf, Konstruktion und Bau*, Fraunhofer IRB Verlag, Berlin.

Schlaich, M., Lösch, C., Hückler, A. (2015), *Infraleichtbeton Stand 2015: Betonbauwerke für die Zukunft*, Beuth Verlag, Berlin.

Schneider, B. (2015), “Nutzerverhalten bei Sanierungen berücksichtigen”, *Bine-Projektinfo*, No. 02.

Sedlbauer, K. (2001), “Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. Englische Übersetzung der Dissertation, Universität Stuttgart”, Fraunhofer Institute for Building Physics, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2001.

Stephan, D. (2018), *MultiLC Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften*, Berlin.

Stöberl, O. (2018), “Einfach Bauen: Bewertung von Heizsystemen über den Lebenszyklus”, Masterarbeit, Technische Universität München, München, 2018.

Studhalter, J. (2013), “Innenraumbekleidung und Brandrisiko”, in Rossel, K. and Burri, S. (Eds.), *Forum Holz- Bau- Spezial Akustik und Brand*, Vol. 4.

SWM, “Stadtwerke München: Gestalter der Wärmewende”, available at: https://www.swm.de/dam/swm/dokumente/m-fernwaerme/broschuere-gestalter-waermewende.pdf (accessed 14 August 2018).

Taguchi, G.e.a. (2000), *review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, Applied Energy*, Volume 113.

Tersluisen, A., Kurzrock, B.-M. and Völker, C. (2017), *Untersuchung zeitgemäßer, monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Eigenschaften: Abschlussbericht*, BBSR AZ 10.08.18.07-15.34, *Forschungsinitative ZukunftBAU*, Kaiserslautern.

Thelandersson, S. and Isaksson, T. (2013), “Mould resistance design (MRD) model for evaluation of risk for microbial growth under varying climate conditions”, *Building and Environment*, Vol. 65, pp. 18–25.

Thinkstep AG (2018), *GaBi: Database*, thinkstep AG, Leinfelden-Echterdingen.

Tietze, A., Ott, S., Boulet, S., Gradeci, K., Labonnote, N., Grynning, S., Noreen, J. and Pousette, A. (2017), *TallFacades: Identification of Cost-effective and Resilient Envelopes for Wood Constructions*, München.

Trendelenburg, R. (1955), *Das Holz als Rohstoff: Neubearb. u. hrsg. v. Hans Mayer-Wegelin,* 2. Aufl., Carl Hanser, München.

TRI-Gnbr (Ed.) (2018), *Einfach!Smart!: Wie heizen und kühlen wir in Zukunft ohne Öl, Gas und Atomstrom?*

Univ.-Prof. Dr. Max J. Setzer, “Feuchteschutz nach DIN 4108. Wärmeschutz im Hochbau”, available at: https://www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Feuchte/Formelsammlung/Formels.unterteilt/8Feuchteschutz_nach_DIN_4108.htm (accessed 28 September 2018).

VDI 4100 (2012), *Schallschutz im Hochbau - Wohnungen - Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz* No. 4100, Beuth, Berlin.

VDI 6020 (2017), *Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation*, 35.240.99,91.140.01, Düsseldorf.

Viitanen, H. and Ritschkoff, A.-C. (1991), *Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature, Rapport / Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för virkeslära*, Vol. 221, Uppsala.

Weimann, K., Matyschik, J., Adam, C., Schulz, T., Linß, E. and Müller, A. (2013), “Optimierung des Rückbaus / Abbruchs von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung”, Vol. 2013.

WEKA Media GmbH & Co. KG (2017), *SIRADOS Baudaten: Kostenplanung*, Datenbank, WEKA Media GmbH & Co. KG, Kissing.

Wohnungsbaugesellschaft Berlin-Mitte WBM (2018), “Wohnturm aus Infraleichtbeton. Entwurfskonzept eines Punkthochhauses”, available at: https://www.wbm.de/de/bauprojekte/friedrichshain-kreuzberg/wohnturm-aus-infraleichtbeton/ (accessed 28 September 2018).

Anhang

I. Referenzangabe zu den Parameterwerten des Base Case, sowie der Min- und Max-Werte

II. Gegenüberstellung verschiedener Raumvarianten, betrachtete Bauweise: Mauerwerk, Leichtbeton und Massivholz

III. Bauphysikalische Eigenschaften der Varianten der Robustheitsanalyse

IV. Basisvarianten – Ergebnisse LCA und LCC auf Gebäudeebene

V. Hybridvarianten – Ergebnisse LCA und LCC auf Gebäudeebene

VI. Fotos 1:10 Modelle

VII. Zeichnungen 1:1 Versuchsmodelle

VIII. Fotos Bauprozess 1:1 Versuchsmodelle

I. Referenzangabe zu den Parameterwerten des Base Case, sowie der Min- und Max-Werte

Parameter	**Quellen**		
	Min-Wert	**Base**	**Max-Wert**
Raumtiefe		Wohnfläche nach Bayr. Richtlinie für die Förderung von Wohnraum für Studierende (2015): A_min = 13 m² , A_max = 25 m² -> 18 m² als durchschnittlicher Wert (MW = 19 m²)	Raumtiefe_min nach Neufert (37. Aufl.), S. 258, Abb. 4: Kleines Schlafzimmer
Raumhöhe	MBO: 2.40 m		
U-Wert Außenwand	PH: < 0.15	EnEV 2014/16	Verdoppelter Base-Wert
Fensterflächenanteil	DIN 5034-4, S. 4 ff.	DIN 5034-4, S. 4 ff.	DIN 5034-4, S. 4 ff.
g-Wert	Base-Wert erhöht um 0.2 typischer Wert bis 1995 (3. WSchV) Quelle: BMVBS 2011, Typologie	EnEV 2014/16	Base-Wert verringert um 0.2
U-Wert Fenster	PH: < 0.8	EnEV 2014/16	Typischer Wert bis 1995 (3. WSchV)
			Quelle: BMVBS 2011, Typologie
Luftwechselrate	DIN V 18599-10, S. 17: bedarfsgeführter Mindestaußenluftwechsel; DIN 1946-6, S. 17 (2): 0.25 h-1 für Feuchteschutz	EnEV 2014/16, entspricht hygienischem Luftwechsel	entspricht hygienischem LW bei 2 Personen; Verdoppelter Base-Wert
Wärmebrücke ΔU(WB)	PH	EnEV 2014/16	Verdoppelter Base-Wert
Wärmegewinne intern	Verdoppelter Base-Wert	DIN V 18599-10, S. 17	Halbierter Base-Wert

II. Gegenüberstellung verschiedener Raumvarianten, betrachtete Bauweise: Mauerwerk, Leichtbeton und Massivholz.

Gegenüberstellung verschiedener Raumvariaten, betrachtete Bauweise: Mauerwerk

		best case HWB					base case								worst case HWB
Geometrie	**Raumtiefe in m**	6,00	6,00	4,25	4,25	4,05	4,25	4,25	4,39	4,25	4,25	4,25	3,00	4,25	3,14
	Raumbreite in m	3,00	3,00	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	6,00	4,25	6,00
	Raumhöhe in m	2,40	2,90	2,40	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	3,40	2,90	2,90	2,90	3,40
Außenwand	**Wanddicke/ Laibungstiefe in m**	0,40	0,40	0,40	0,40	0,62	0,40	0,40	0,28	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,28
	U-Wert Außenwand in W/m2*K	0,28	0,28	0,28	0,28	0,19	0,28	0,28	0,42	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,42
	Fläche Außenwand im m	6,39	7,05	8,75	11,60	9,63	9,63	7,79	9,63	9,63	10,59	9,63	13,32	9,63	11,16
Typ Verglasung	**Typ Verglasung**	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-SS	3-WS	2-WS	3-WS	2-SS	2-SS
	g-Wert = Energie-durchlassgrad	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,20	0,49	0,74	0,49	0,23	0,23
	U-Wert Glas in W/m2*K	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,63	1,18	0,63	1,12	1,12
	T-Vis Lichtdurchlässigkeit	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,36	0,71	0,81	0,71	0,37	0,37
Fenstergröße	**Fensterflächenanteil in %**	35%	40%	35%	24%	40%	40%	55%	40%	40%	43%	40%	40%	40%	60%
	Fensterfläche in m2	2,52	3,48	3,56	2,95	4,91	4,91	6,76	4,91	4,91	6,19	4,91	6,96	4,91	12,24

Dynamische Simulation

HWB [kWh/(m²*a)]	Nord	25,78	29,67	32,05	33,88	35,19	37,30	40,12	40,89	39,33	42,22	43,11	47,94	46,86	101,33
	Abweichung vom base case	-31%	-20%	-14%	-9%	-6%	0%	8%	10%	5%	13%	16%	29%	26%	172%
	Süd	20,76	22,61	24,59	27,32	26,09	26,97	26,73	29,56	34,13	29,27	28,48	33,13	40,45	76,98
	Abweichung vom base case	-23%	-16%	-9%	1%	-3%	0%	-1%	10%	27%	9%	6%	23%	50%	185%
	Ost	24,80	28,30	30,52	32,62	33,47	35,15	37,20	38,41	38,23	39,49	39,93	44,68	49,07	96,99
	Abweichung vom base case	-29%	-19%	-13%	-7%	-5%	0%	6%	9%	9%	12%	14%	27%	40%	176%
	West	24,44	27,76	29,96	32,15	32,77	34,35	36,18	37,52	37,85	38,46	38,83	43,53	45,02	91,10
	Abweichung vom base case	-29%	-19%	-13%	-6%	-5%	0%	5%	9%	10%	12%	13%	27%	31%	165%
	Mittelwert	23,95	27,08	29,28	31,49	31,88	33,44	35,06	36,59	37,39	37,36	37,59	42,32	45,35	91,60
	Abweichung vom base case	-28%	-19%	-12%	-6%	-5%	0%	5%	9%	12%	12%	12%	27%	36%	174%

ÜTGS [Kh/a]	Nord	943	864	1.089	842	970	1.041	1.239	1.088	764	999	1.321	1.256	797	1.000
	Abweichung vom base case	-9%	-17%	5%	-19%	-7%	0%	19%	5%	-27%	-4%	27%	21%	-23%	-4%
	Süd	1.059	1.042	1.263	1.008	1.112	1.315	1.623	1.459	889	1.343	1.790	1.670	949	1.450
	Abweichung vom base case	-20%	-21%	-4%	-23%	-15%	0%	23%	11%	-32%	2%	36%	27%	-28%	10%
	Ost	1.229	1.215	1.522	1.153	1.408	1.576	2.001	1.687	980	1.598	2.202	2.051	1.117	1.602
	Abweichung vom base case	-22%	-23%	-3%	-27%	-11%	0%	27%	7%	-38%	1%	40%	30%	-29%	2%
	West	1.255	1.251	1.561	1.185	1.453	1.631	2.082	1.749	1.005	1.668	2.285	2.133	1.087	1.694
	Abweichung vom base case	-23%	-23%	-4%	-27%	-11%	0%	28%	7%	-38%	2%	40%	31%	-33%	4%
	Mittelwert	1.121	1.093	1.359	1.047	1.236	1.391	1.736	1.496	909	1.402	1.900	1.778	987	1.437
	Abweichung vom base case	-19%	-21%	-2%	-25%	-11%	0%	25%	8%	-35%	1%	37%	28%	-29%	3%

gezielte Parameterveränderung abweichend vom base case

bedinge Parameterveränderung abweichend vom base case durch geometrische oder technische Abhängigkeiten

Gegenüberstellung verschiedener Raumvariaten, betrachtete Bauweise: Leichtbeton

		best case HWB					base case								worst case HWB
Geometrie	**Raumtiefe in m**	6,00	6,00	4,25	4,25	3,94	4,25	4,25	4,46	4,25	4,25	4,25	3,00	4,25	3,21
	Raumbreite in m	3,00	3,00	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,46	4,25	4,25	4,25	6,00	4,25	6,00
	Raumhöhe in m	2,40	2,90	2,40	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	3,40	2,90	2,90	2,90	3,40
Außenwand	**Wanddicke/ Laibungstiefe in m**	0,60	0,60	0,60	0,60	0,94	0,60	0,60	0,40	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,40
	U-Wert Außenwand in W/m2*K	0,28	0,28	0,28	0,28	0,19	0,28	0,28	0,41	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,41
	Fläche Außenwand im m	5,45	7,05	8,75	11,60	9,63	9,63	7,79	9,63	9,63	10,59	9,63	13,32	9,63	11,16
Typ Verglasung	**Typ Verglasung**	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-SS	3-WS	2-WS	3-WS	2-SS	2-SS
	g-Wert = Energie-durchlassgrad	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,20	0,49	0,74	0,49	0,23	0,23
	U-Wert Glas in W/m2*K	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,63	1,18	0,63	1,12	1,12
	T-Vis Lichtdurchlässigkeit	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,36	0,71	0,81	0,71	0,37	0,37
Fenstergröße	**Fensterflächenanteil in %**	48%	40%	35%	24%	40%	40%	55%	40%	40%	43%	40%	40%	55%	60%
	Fensterfläche in m2	3,46	3,48	3,56	2,95	4,91	4,91	6,76	4,91	4,91	6,19	4,91	6,96	6,76	12,24

Dynamische Simulation

HWB [kWh/(m²*a)]	Nord	27,59	29,74	32,08	33,90	35,40	37,62	40,67	41,14	39,32	42,68	43,77	48,51	54,13	99,67
	Abweichung vom base case	-27%	-21%	-15%	-10%	-6%	0%	8%	9%	5%	13%	16%	29%	44%	165%
	Süd	21,51	23,30	25,34	27,96	27,52	27,93	27,87	30,07	34,54	30,34	29,88	34,41	46,22	76,72
	Abweichung vom base case	-23%	-17%	-9%	0%	-1%	0%	0%	8%	24%	9%	7%	23%	65%	175%
	Ost	26,43	28,58	30,78	32,82	34,03	35,74	38,07	38,84	38,35	40,28	40,99	45,61	52,44	95,45
	Abweichung vom base case	-26%	-20%	-14%	-8%	-5%	0%	7%	9%	7%	13%	15%	28%	47%	167%
	West	25,97	28,12	30,27	32,41	33,46	34,99	37,04	37,95	38,02	39,31	39,91	44,50	51,90	92,13
	Abweichung vom base case	-26%	-20%	-13%	-7%	-4%	0%	6%	8%	9%	12%	14%	27%	48%	163%
	Mittelwert	25,38	27,43	29,62	31,77	32,60	34,07	35,91	37,00	37,56	38,15	38,64	43,26	51,17	90,99
	Abweichung vom base case	-26%	-19%	-13%	-7%	-4%	0%	5%	9%	10%	12%	13%	27%	50%	167%

ÜTGS [Kh/a]	Nord	941	775	975	753	852	932	1.112	993	689	898	1.179	1.123	789	923
	Abweichung vom base case	1%	-17%	5%	-19%	-9%	0%	19%	7%	-26%	-4%	27%	21%	-15%	-1%
	Süd	994	878	1.043	855	891	1.091	1.327	1.279	767	1.131	1.443	1.362	903	1.293
	Abweichung vom base case	-9%	-20%	-4%	-22%	-18%	0%	22%	17%	-30%	4%	32%	25%	-17%	18%
	Ost	1.263	1.072	1.326	1.016	1.189	1.388	1.765	1.540	873	1.425	1.927	1.806	1.080	1.483
	Abweichung vom base case	-9%	-23%	-4%	-27%	-14%	0%	27%	11%	-37%	3%	39%	30%	-22%	7%
	West	1.289	1.099	1.352	1.040	1.219	1.431	1.827	1.593	893	1.481	1.991	1.870	1.116	1.563
	Abweichung vom base case	-10%	-23%	-6%	-27%	-15%	0%	28%	11%	-38%	3%	39%	31%	-22%	9%
	Mittelwert	1.122	956	1.174	916	1.038	1.211	1.508	1.352	805	1.234	1.635	1.540	972	1.315
	Abweichung vom base case	-7%	-21%	-3%	-24%	-14%	0%	25%	12%	-33%	2%	35%	27%	-20%	9%

gezielte Parameterveränderung abweichend vom base case

bedinge Parameterveränderung abweichend vom base case durch geometrische oder technische Abhängigkeiten

Gegenüberstellung verschiedener Raumvariaten, betrachtete Bauweise: Massiv Holz

		best case HWB					base case								worst case HWB
Geometrie	**Raumtiefe in m**	6,00	6,00	4,25	4,25	4,05	4,25	4,25	4,39	4,25	4,25	4,25	3,00	4,25	3,14
	Raumbreite in m	3,00	6,00	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,39	4,25	4,25	4,25	6,00	4,25	6,00
	Raumhöhe in m	2,40	2,90	2,40	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	2,90	3,40	2,90	2,90	2,90	3,40
Außenwand	**Wanddicke/ Laibungstiefe in m**	0,40	0,40	0,40	0,40	0,62	0,40	0,40	0,28	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,28
	U-Wert Außenwand in W/m2*K	0,28	0,28	0,28	0,28	0,19	0,28	0,28	0,41	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,41
	Fläche Außenwand im m	6,39	7,05	8,75	11,60	9,63	9,63	7,79	9,63	9,63	10,59	9,63	13,32	9,63	11,16
Typ Verglasung	**Typ Verglasung**	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-WS	3-SS	3-WS	2-WS	3-WS	2-SS	2-SS
	g-Wert = Energie-durchlassgrad	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,20	0,49	0,74	0,49	0,23	0,23
	U-Wert Glas in W/m2*K	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,63	1,18	0,63	1,12	1,12
	T-Vis Lichtdurchlässigkeit	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,36	0,71	0,81	0,71	0,37	0,37
Fenstergröße	**Fensterflächenanteil in %**	35%	40%	35%	24%	40%	40%	55%	40%	40%	43%	40%	40%	40%	60%
	Fensterfläche in m2	2,52	3,48	3,56	2,95	4,91	4,91	6,76	4,91	4,91	6,19	4,91	6,96	4,91	12,24

Dynamische Simulation

HWB [kWh/(m²*a)]	Nord	24,94	29,13	31,78	33,78	35,25	37,52	40,69	41,58	39,93	42,97	43,88	49,18	48,32	119,95
	Abweichung vom base case	-34%	-22%	-15%	-10%	-6%	0%	8%	11%	6%	15%	17%	31%	29%	220%
	Süd	19,50	21,49	23,82	26,52	25,67	26,94	28,62	29,84	34,04	30,61	30,42	35,46	41,07	84,40
	Abweichung vom base case	-28%	-20%	-12%	-2%	-5%	0%	6%	11%	26%	14%	13%	32%	52%	213%
	Ost	23,85	27,58	30,09	32,33	33,33	35,14	37,54	38,83	38,63	39,93	40,44	45,61	46,67	115,03
	Abweichung vom base case	-32%	-22%	-14%	-8%	-5%	0%	7%	11%	10%	14%	15%	30%	33%	227%
	West	23,53	27,12	29,57	31,85	32,71	34,42	36,67	38,00	38,24	39,09	39,47	44,58	46,22	105,09
	Abweichung vom base case	-32%	-21%	-14%	-7%	-5%	0%	7%	10%	11%	14%	15%	30%	34%	205%
	Mittelwert	22,96	26,33	28,82	31,12	31,74	33,51	35,88	37,06	37,71	38,15	38,55	43,71	45,57	106,12
	Abweichung vom base case	-31%	-21%	-14%	-7%	-5%	0%	7%	11%	13%	14%	15%	30%	36%	217%

ÜTGS [Kh/a]	Nord	1.342	1.269	1.495	1.199	1.384	1.463	1.728	1.517	1.096	1.437	1.842	1.717	1.139	1.404
	Abweichung vom base case	-8%	-13%	2%	-18%	-5%	0%	18%	4%	-25%	-2%	26%	17%	-22%	-4%
	Süd	1.494	1.505	1.718	1.412	1.572	1.824	2.244	2.006	1.255	1.897	2.478	2.257	1.333	1.988
	Abweichung vom base case	-18%	-17%	-6%	-23%	-14%	0%	23%	10%	-31%	4%	36%	24%	-27%	9%
	Ost	1.706	1.717	2.025	1.585	1.933	2.128	2.664	2.257	1.360	2.188	2.923	2.678	1.449	2.117
	Abweichung vom base case	-20%	-19%	-5%	-26%	-9%	0%	25%	6%	-36%	3%	37%	26%	-32%	-1%
	West	1.766	1.805	2.116	1.659	2.044	2.266	2.879	2.410	1.418	2.367	3.154	2.897	1.522	2.340
	Abweichung vom base case	-22%	-20%	-7%	-27%	-10%	0%	27%	6%	-37%	4%	39%	28%	-33%	3%
	Mittelwert	1.577	1.574	1.839	1.464	1.733	1.921	2.379	2.048	1.282	1.972	2.599	2.387	1.361	1.962
	Abweichung vom base case	-18%	-18%	-4%	-24%	-10%	0%	24%	7%	-33%	3%	35%	24%	-29%	2%

gezielte Parameterveränderung abweichend vom base case

bedinge Parameterveränderung abweichend vom base case durch geometrische oder technische Abhängigkeiten

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	MW	N	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.20	943.04	25.78	11.72
Mittelraum	MW	N	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.52	987.19	26.47	11.43
Mittelraum	MW	N	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.04	1,048.38	27.53	11.01
Mittelraum	MW	N	5.80	2.40	0.62	0.19	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.04	1,021.69	27.60	11.92
Mittelraum	MW	N	6.14	2.40	0.28	0.42	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.55	978.18	28.09	11.40
Mittelraum	MW	N	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.54	810.84	28.13	11.41
Mittelraum	MW	N	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.59	1,095.79	28.98	11.35
Mittelraum	MW	N	6.14	2.40	0.28	0.42	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.51	1,092.19	29.35	10.69
Mittelraum	MW	N	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.00	864.18	29.67	11.04
Mittelraum	MW	N	6.00	2.90	0.40	0.28	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	831.72	29.74	11.91
Mittelraum	MW	N	4.05	2.40	0.62	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,024.06	29.91	11.23
Mittelraum	MW	N	6.00	3.40	0.40	0.28	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.10	677.24	30.41	11.82
Mittelraum	MW	N	4.05	2.90	0.62	0.19	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.24	790.17	30.80	11.69
Mittelraum	MW	N	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.91	1,175.65	30.93	11.12
Mittelraum	MW	N	5.80	2.90	0.62	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.61	927.70	30.99	10.64
Mittelraum	MW	N	6.14	2.40	0.28	0.42	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.96	1,145.70	31.15	11.08
Mittelraum	MW	N	5.80	3.40	0.62	0.19	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.02	726.42	31.64	11.95
Mittelraum	MW	N	5.80	3.40	0.62	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.21	751.24	31.71	10.91
Mittelraum	MW	N	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,272.60	31.85	10.62
Mittelraum	MW	N	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.17	994.56	31.91	10.39
Mittelraum	MW	N	4.25	2.40	0.40	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.36	1,089.47	32.05	10.77
Mittelraum	MW	N	4.25	2.40	0.40	0.28	10.17	2S-WSV	0.74	1.18	81%	21%	2.13	2.30	1,053.71	32.05	11.61
Mittelraum	MW	N	6.14	2.90	0.28	0.42	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.41	902.20	32.28	10.74
Mittelraum	MW	N	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.94	963.68	32.58	11.10
Mittelraum	MW	N	4.05	2.40	0.62	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.89	1,169.53	32.91	10.52
Mittelraum	MW	N	6.14	2.90	0.28	0.42	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.32	871.16	33.00	11.61
Mittelraum	MW	N	2.80	2.40	0.62	0.19	14.14	3S-WSV	0.49	0.63	71%	21%	3.02	2.35	960.83	33.30	11.58
Mittelraum	MW	N	6.00	3.40	0.40	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.67	807.08	33.35	10.60
Mittelraum	MW	N	4.39	2.40	0.28	0.42	10.17	3S-WSV	0.49	0.63	71%	21%	2.13	2.29	960.49	33.41	11.63
Mittelraum	MW	N	6.14	2.40	0.28	0.42	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	4.07	1,340.44	33.41	10.44
Bottom 10																		
Mittelraum	MW	N	3.00	2.90	0.40	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	994.63	72.23	10.32
Mittelraum	MW	N	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	11.50	2,061.36	72.78	9.59
Mittelraum	MW	N	3.00	3.40	0.40	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	834.27	73.44	10.49
Mittelraum	MW	N	3.14	2.90	0.28	0.42	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.77	1,031.09	76.32	10.24
Mittelraum	MW	N	3.14	3.40	0.28	0.42	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	4.18	866.70	79.54	10.40
Mittelraum	MW	N	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.00	2,253.68	79.81	9.50
Mittelraum	MW	N	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.90	2,363.18	85.90	9.50
Mittelraum	MW	N	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.76	905.12	89.71	10.24
Mittelraum	MW	N	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.34	963.68	94.69	10.09
Mittelraum	MW	N	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.68	1,000.09	101.33	10.05

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	MW	O	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.20	1,229.38	24.80	11.72
Mittelraum	MW	O	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.52	1,296.77	25.41	11.43
Mittelraum	MW	O	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.04	1,449.13	26.18	11.01
Mittelraum	MW	O	5.80	2.40	0.62	0.19	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.04	1,372.33	26.52	11.92
Mittelraum	MW	O	6.14	2.40	0.28	0.42	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.55	1,312.46	26.91	11.40
Mittelraum	MW	O	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.54	1,097.50	27.09	11.41
Mittelraum	MW	O	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.59	1,555.04	27.53	11.35
Mittelraum	MW	O	6.14	2.40	0.28	0.42	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.51	1,555.38	27.78	10.69
Mittelraum	MW	O	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.00	1,214.59	28.30	11.04
Mittelraum	MW	O	6.00	2.90	0.40	0.28	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	1,150.59	28.63	11.91
Mittelraum	MW	O	4.05	2.40	0.62	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,358.47	28.72	11.23
Mittelraum	MW	O	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.91	1,678.10	29.34	11.12
Mittelraum	MW	O	6.00	3.40	0.40	0.28	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.10	911.00	29.38	11.82
Mittelraum	MW	O	6.14	2.40	0.28	0.42	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.96	1,680.91	29.42	11.08
Mittelraum	MW	O	5.80	2.90	0.62	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.61	1,336.31	29.44	10.64
Mittelraum	MW	O	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,924.49	29.83	10.62
Mittelraum	MW	O	4.05	2.90	0.62	0.19	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.24	1,040.27	29.86	11.69
Mittelraum	MW	O	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.17	1,493.46	29.98	10.39
Mittelraum	MW	O	5.80	3.40	0.62	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.21	1,077.73	30.37	10.91
Mittelraum	MW	O	4.25	2.40	0.40	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.36	1,522.18	30.52	10.77
Mittelraum	MW	O	5.80	3.40	0.62	0.19	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.02	1,025.40	30.64	11.95
Mittelraum	MW	O	6.14	2.90	0.28	0.42	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.41	1,297.46	30.66	10.74
Mittelraum	MW	O	4.25	2.40	0.40	0.28	10.17	2S-WSV	0.74	1.18	81%	21%	2.13	2.30	1,454.45	30.73	11.61
Mittelraum	MW	O	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.94	1,424.82	31.02	11.10
Mittelraum	MW	O	6.14	2.40	0.28	0.42	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	4.07	2,093.93	31.09	10.44
Mittelraum	MW	O	4.05	2.40	0.62	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.89	1,641.25	31.24	10.52
Mittelraum	MW	O	6.14	2.90	0.28	0.42	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.70	1,597.80	31.50	10.25
Mittelraum	MW	O	6.14	2.90	0.28	0.42	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.32	1,238.95	31.57	11.61
Mittelraum	MW	O	6.00	3.40	0.40	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.67	1,196.81	31.60	10.60
Mittelraum	MW	O	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	3.56	1,616.06	31.92	10.65
Bottom 10																		
Mittelraum	MW	O	2.80	2.90	0.62	0.19	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.84	1,338.46	67.32	10.54
Mittelraum	MW	O	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	3S-SSV	0.20	0.62	36%	60%	12.24	5.49	1,434.96	67.92	10.08
Mittelraum	MW	O	3.00	2.90	0.40	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,483.32	69.27	10.32
Mittelraum	MW	O	3.00	3.40	0.40	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,236.53	70.55	10.49
Mittelraum	MW	O	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.90	4,650.99	70.66	9.50
Mittelraum	MW	O	3.14	2.90	0.28	0.42	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.77	1,577.14	72.96	10.24
Mittelraum	MW	O	3.14	3.40	0.28	0.42	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	4.18	1,314.24	76.24	10.40
Mittelraum	MW	O	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.76	1,378.26	83.40	10.24
Mittelraum	MW	O	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.34	1,515.05	90.74	10.09
Mittelraum	MW	O	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.68	1,602.08	96.99	10.05

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	MW	S	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.52	1,031.64	20.73	11.43
Mittelraum	MW	S	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.20	1,058.53	20.76	11.72
Mittelraum	MW	S	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.04	1,201.20	20.83	11.01
Mittelraum	MW	S	5.80	2.40	0.62	0.19	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.04	1,077.67	21.52	11.92
Mittelraum	MW	S	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.59	1,281.48	21.69	11.35
Mittelraum	MW	S	6.14	2.40	0.28	0.42	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.51	1,337.47	21.97	10.69
Mittelraum	MW	S	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.54	903.54	22.12	11.41
Mittelraum	MW	S	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,530.62	22.17	10.62
Mittelraum	MW	S	6.14	2.40	0.28	0.42	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.55	1,161.26	22.38	11.40
Mittelraum	MW	S	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.91	1,244.23	22.50	11.12
Mittelraum	MW	S	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.17	1,241.85	22.58	10.39
Mittelraum	MW	S	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.00	1,041.82	22.61	11.04
Mittelraum	MW	S	5.80	2.90	0.62	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.61	1,055.93	22.67	10.64
Mittelraum	MW	S	6.14	2.40	0.28	0.42	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	4.07	1,754.36	22.87	10.44
Mittelraum	MW	S	6.14	2.40	0.28	0.42	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.96	1,445.02	23.01	11.08
Mittelraum	MW	S	6.00	2.90	0.40	0.28	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	996.73	23.53	11.91
Mittelraum	MW	S	6.14	2.90	0.28	0.42	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.70	1,376.47	23.61	10.25
Mittelraum	MW	S	4.05	2.40	0.62	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,078.69	23.61	11.23
Mittelraum	MW	S	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.94	1,112.66	23.77	11.10
Mittelraum	MW	S	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	3.56	1,339.82	23.86	10.65
Mittelraum	MW	S	5.80	3.40	0.62	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.21	886.03	23.96	10.91
Mittelraum	MW	S	6.00	3.40	0.40	0.28	6.03	3S-WSV	0.49	0.63	71%	60%	6.12	5.09	1,274.42	24.14	10.14
Mittelraum	MW	S	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	2S-WSV	0.74	1.18	81%	55%	4.79	4.96	1,692.61	24.16	10.17
Mittelraum	MW	S	4.05	2.40	0.62	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.89	1,231.87	24.40	10.52
Mittelraum	MW	S	5.80	3.40	0.62	0.19	6.03	3S-WSV	0.49	0.63	71%	60%	6.12	4.54	1,089.23	24.41	10.30
Mittelraum	MW	S	6.14	2.90	0.28	0.42	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.41	1,144.29	24.46	10.74
Mittelraum	MW	S	6.00	3.40	0.40	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.67	1,024.89	24.48	10.60
Mittelraum	MW	S	4.25	2.40	0.40	0.28	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	4.64	1,485.11	24.58	10.26
Mittelraum	MW	S	4.25	2.40	0.40	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.36	1,262.65	24.59	10.77
Mittelraum	MW	S	6.00	3.40	0.40	0.28	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.10	806.06	24.71	11.82
Bottom 10																		
Mittelraum	MW	S	2.80	2.90	0.62	0.19	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.84	1,081.57	58.74	10.54
Mittelraum	MW	S	2.80	3.40	0.62	0.19	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.45	952.55	58.91	10.72
Mittelraum	MW	S	3.14	3.40	0.28	0.42	17.89	2S-SSV	0.23	1.12	37%	27%	5.51	2.54	976.55	59.78	11.41
Mittelraum	MW	S	3.00	2.90	0.40	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,280.22	59.82	10.32
Mittelraum	MW	S	3.00	3.40	0.40	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,102.25	61.43	10.49
Mittelraum	MW	S	3.14	2.90	0.28	0.42	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.77	1,413.20	62.88	10.24
Mittelraum	MW	S	3.14	3.40	0.28	0.42	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	4.18	1,204.07	66.38	10.40
Mittelraum	MW	S	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.76	1,136.95	69.18	10.24
Mittelraum	MW	S	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.34	1,327.05	71.36	10.09
Mittelraum	MW	S	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.68	1,450.41	76.98	10.05

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	MW	W	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.20	1,254.91	24.44	11.72
Mittelraum	MW	W	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.52	1,322.99	24.98	11.43
Mittelraum	MW	W	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.04	1,484.69	25.67	11.01
Mittelraum	MW	W	5.80	2.40	0.62	0.19	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.04	1,399.03	26.09	11.92
Mittelraum	MW	W	6.14	2.40	0.28	0.42	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.55	1,342.01	26.48	11.40
Mittelraum	MW	W	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.54	1,124.68	26.67	11.41
Mittelraum	MW	W	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.59	1,590.26	26.99	11.35
Mittelraum	MW	W	6.14	2.40	0.28	0.42	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.51	1,595.67	27.20	10.69
Mittelraum	MW	W	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.00	1,251.27	27.76	11.04
Mittelraum	MW	W	6.00	2.90	0.40	0.28	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	1,179.84	28.20	11.91
Mittelraum	MW	W	4.05	2.40	0.62	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,387.17	28.26	11.23
Mittelraum	MW	W	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.91	1,714.33	28.71	11.12
Mittelraum	MW	W	6.14	2.40	0.28	0.42	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.96	1,722.35	28.79	11.08
Mittelraum	MW	W	5.80	2.90	0.62	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.61	1,377.82	28.82	10.64
Mittelraum	MW	W	6.00	3.40	0.40	0.28	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.10	936.93	29.00	11.82
Mittelraum	MW	W	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,976.56	29.11	10.62
Mittelraum	MW	W	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.17	1,543.64	29.26	10.39
Mittelraum	MW	W	4.05	2.90	0.62	0.19	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.24	1,064.98	29.51	11.69
Mittelraum	MW	W	5.80	3.40	0.62	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.21	1,113.68	29.84	10.91
Mittelraum	MW	W	4.25	2.40	0.40	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.36	1,561.15	29.96	10.77
Mittelraum	MW	W	6.14	2.90	0.28	0.42	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.41	1,339.20	30.04	10.74
Mittelraum	MW	W	5.80	3.40	0.62	0.19	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.02	1,055.26	30.23	11.95
Mittelraum	MW	W	4.25	2.40	0.40	0.28	10.17	2S-WSV	0.74	1.18	81%	21%	2.13	2.30	1,487.02	30.24	11.61
Mittelraum	MW	W	6.14	2.40	0.28	0.42	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	4.07	2,157.32	30.29	10.44
Mittelraum	MW	W	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.94	1,466.13	30.39	11.10
Mittelraum	MW	W	4.05	2.40	0.62	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.89	1,680.84	30.58	10.52
Mittelraum	MW	W	6.14	2.90	0.28	0.42	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.70	1,655.43	30.69	10.25
Mittelraum	MW	W	6.00	3.40	0.40	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.67	1,241.91	30.92	10.60
Mittelraum	MW	W	6.14	2.90	0.28	0.42	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.32	1,272.53	31.04	11.61
Mittelraum	MW	W	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	3.56	1,669.03	31.14	10.65
Bottom 10																	
Mittelraum	MW	W	2.80	2.90	0.62	0.19	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.84	1,393.59	66.60	10.54
Mittelraum	MW	W	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	3S-SSV	0.20	0.62	36%	60%	12.24	5.49	1,506.09	66.92	10.08
Mittelraum	MW	W	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.90	5,026.10	68.03	9.50
Mittelraum	MW	W	3.00	2.90	0.40	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,550.43	68.41	10.32
Mittelraum	MW	W	3.00	3.40	0.40	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,296.50	69.74	10.49
Mittelraum	MW	W	3.14	2.90	0.28	0.42	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.77	1,651.16	72.05	10.24
Mittelraum	MW	W	3.14	3.40	0.28	0.42	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	4.18	1,378.04	75.29	10.40
Mittelraum	MW	W	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.76	1,449.79	81.21	10.24
Mittelraum	MW	W	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.34	1,599.27	87.40	10.09
Mittelraum	MW	W	3.14	3.40	0.28	0.42	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.68	1,694.48	91.10	10.05

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	LB	N	6.00	2.40	0.60	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.51	940.55	27.59	11.42
Mittelraum	LB	N	6.21	2.40	0.40	0.41	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.25	887.38	28.06	11.67
Mittelraum	LB	N	6.00	2.40	0.60	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.09	977.65	29.07	11.83
Mittelraum	LB	N	6.21	2.40	0.40	0.41	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.13	991.77	29.36	10.96
Mittelraum	LB	N	6.00	2.90	0.60	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.52	774.94	29.74	11.41
Mittelraum	LB	N	3.94	2.40	0.94	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.01	905.55	29.85	11.97
Mittelraum	LB	N	5.69	2.40	0.94	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.13	1,035.70	31.17	11.82
Mittelraum	LB	N	5.69	2.90	0.94	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	2.82	819.63	31.18	11.18
Mittelraum	LB	N	6.21	2.40	0.40	0.41	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.60	1,040.27	31.24	11.36
Mittelraum	LB	N	5.69	3.40	0.94	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	2.53	665.85	31.90	11.42
Mittelraum	LB	N	4.25	2.40	0.60	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	974.71	32.08	11.21
Mittelraum	LB	N	6.00	2.40	0.60	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.96	1,134.78	32.09	11.06
Mittelraum	LB	N	6.00	2.90	0.60	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.59	892.19	32.17	10.63
Mittelraum	LB	N	6.21	2.90	0.40	0.41	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.07	820.35	32.29	11.00
Mittelraum	LB	N	5.69	2.90	0.94	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.22	848.25	32.86	11.71
Mittelraum	LB	N	6.21	2.90	0.40	0.41	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	788.44	33.01	11.93
Mittelraum	LB	N	3.94	2.40	0.94	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	2.91	1,030.31	33.09	11.12
Mittelraum	LB	N	4.46	2.40	0.40	0.41	10.17	3S-WSV	0.49	0.63	71%	21%	2.13	2.00	870.81	33.29	11.97
Mittelraum	LB	N	6.00	3.40	0.60	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.16	723.47	33.50	10.92
Mittelraum	LB	N	6.21	2.40	0.40	0.41	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,218.92	33.67	10.64
Mittelraum	LB	N	4.25	2.90	0.60	0.28	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.22	753.10	33.90	11.69
Mittelraum	LB	N	6.21	2.90	0.40	0.41	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.27	950.48	33.90	10.37
Mittelraum	LB	N	6.00	3.40	0.60	0.28	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.06	700.10	34.01	11.88
Mittelraum	LB	N	6.21	3.40	0.40	0.41	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.16	642.11	34.10	11.78
Mittelraum	LB	N	6.00	2.90	0.60	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.99	930.78	34.23	11.04
Mittelraum	LB	N	4.25	2.40	0.60	0.28	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.87	1,119.67	34.64	10.51
Mittelraum	LB	N	3.94	2.40	0.94	0.19	8.75	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	3.56	2.31	1,073.98	34.82	11.62
Mittelraum	LB	N	3.94	3.40	0.94	0.19	12.89	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	3.89	2.17	655.36	35.21	11.77
Mittelraum	LB	N	3.94	2.90	0.94	0.19	9.63	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	4.91	3.07	852.09	35.40	11.00
Mittelraum	LB	N	4.46	2.40	0.40	0.41	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.41	1,030.48	35.42	10.74
Bottom 10																		
Mittelraum	LB	N	3.00	2.90	0.60	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.90	895.51	72.88	10.49
Mittelraum	LB	N	3.00	3.40	0.60	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.49	750.78	73.99	10.68
Mittelraum	LB	N	2.69	3.40	0.94	0.19	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	9.60	1,818.19	74.97	9.66
Mittelraum	LB	N	3.00	3.40	0.60	0.28	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	11.60	2,054.67	75.61	9.57
Mittelraum	LB	N	3.21	2.90	0.40	0.41	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	945.86	76.82	10.33
Mittelraum	LB	N	3.21	3.40	0.40	0.41	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	796.84	80.01	10.51
Mittelraum	LB	N	2.69	3.40	0.94	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.02	804.05	84.94	10.46
Mittelraum	LB	N	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.00	2,217.66	87.06	9.52
Mittelraum	LB	N	3.00	3.40	0.60	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.82	874.19	92.95	10.21
Mittelraum	LB	N	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.35	923.31	99.67	10.11

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	LB	O	6.00	2.40	0.60	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.51	1,263.33	26.43	11.42
Mittelraum	LB	O	6.21	2.40	0.40	0.41	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.25	1,181.71	26.98	11.67
Mittelraum	LB	O	6.00	2.40	0.60	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.09	1,345.63	27.88	11.83
Mittelraum	LB	O	6.21	2.40	0.40	0.41	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.13	1,400.65	27.92	10.96
Mittelraum	LB	O	6.00	2.90	0.60	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.52	1,072.12	28.58	11.41
Mittelraum	LB	O	3.94	2.40	0.94	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.01	1,143.21	28.95	11.97
Mittelraum	LB	O	6.21	2.40	0.40	0.41	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.60	1,508.87	29.67	11.36
Mittelraum	LB	O	5.69	2.40	0.94	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.13	1,387.67	29.96	11.82
Mittelraum	LB	O	5.69	2.90	0.94	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	2.82	1,134.12	29.96	11.18
Mittelraum	LB	O	6.00	2.40	0.60	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.96	1,657.19	30.37	11.06
Mittelraum	LB	O	6.00	2.90	0.60	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.59	1,316.83	30.50	10.63
Mittelraum	LB	O	4.25	2.40	0.60	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,325.55	30.78	11.21
Mittelraum	LB	O	6.21	2.90	0.40	0.41	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.07	1,177.85	30.80	11.00
Mittelraum	LB	O	5.69	3.40	0.94	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	2.53	923.75	30.88	11.42
Mittelraum	LB	O	6.21	2.40	0.40	0.41	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,880.49	31.52	10.64
Mittelraum	LB	O	5.69	2.90	0.94	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.22	1,195.07	31.72	11.71
Mittelraum	LB	O	6.21	2.90	0.40	0.41	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	1,116.84	31.77	11.93
Mittelraum	LB	O	3.94	2.40	0.94	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	2.91	1,362.70	31.77	11.12
Mittelraum	LB	O	6.21	2.90	0.40	0.41	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.27	1,457.79	31.86	10.37
Mittelraum	LB	O	6.00	3.40	0.60	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.16	1,062.09	32.02	10.92
Mittelraum	LB	O	4.46	2.40	0.40	0.41	10.17	3S-WSV	0.49	0.63	71%	21%	2.13	2.00	1,141.43	32.25	11.97
Mittelraum	LB	O	6.00	2.90	0.60	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.99	1,412.48	32.51	11.04
Mittelraum	LB	O	4.25	2.90	0.60	0.28	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.22	1,016.37	32.82	11.69
Mittelraum	LB	O	4.25	2.40	0.60	0.28	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.87	1,609.05	32.85	10.51
Mittelraum	LB	O	6.00	3.40	0.60	0.28	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.06	1,013.24	32.86	11.88
Mittelraum	LB	O	6.21	3.40	0.40	0.41	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.16	885.18	32.93	11.78
Mittelraum	LB	O	3.94	2.40	0.94	0.19	8.75	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	3.56	2.31	1,450.40	33.48	11.62
Mittelraum	LB	O	4.46	2.40	0.40	0.41	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.41	1,474.23	33.76	10.74
Mittelraum	LB	O	3.94	2.90	0.94	0.19	9.63	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	4.91	3.07	1,189.08	34.03	11.00
Mittelraum	LB	O	5.69	3.40	0.94	0.19	6.03	3S-WSV	0.49	0.63	71%	60%	6.12	3.68	1,173.81	34.10	10.61
Bottom 10																		
Mittelraum	LB	O	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	3S-SSV	0.20	0.62	36%	60%	12.24	5.18	1,325.57	68.51	10.14
Mittelraum	LB	O	2.69	3.40	0.94	0.19	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	9.60	3,313.92	68.60	9.66
Mittelraum	LB	O	3.00	2.90	0.60	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.90	1,311.20	70.14	10.49
Mittelraum	LB	O	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.00	4,365.91	71.26	9.52
Mittelraum	LB	O	3.00	3.40	0.60	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.49	1,103.91	71.32	10.68
Mittelraum	LB	O	3.21	2.90	0.40	0.41	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,442.82	73.63	10.33
Mittelraum	LB	O	3.21	3.40	0.40	0.41	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,209.59	76.85	10.51
Mittelraum	LB	O	2.69	3.40	0.94	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.02	1,186.49	81.90	10.46
Mittelraum	LB	O	3.00	3.40	0.60	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.82	1,358.59	86.43	10.21
Mittelraum	LB	O	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.35	1,482.64	95.45	10.11

Simulationsergebnisse Sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	LB	S	6.00	2.40	0.60	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.51	994.32	21.51	11.42
Mittelraum	LB	S	6.21	2.40	0.40	0.41	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.13	1,152.65	22.26	10.96
Mittelraum	LB	S	6.00	2.40	0.60	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.09	1,045.93	22.56	11.83
Mittelraum	LB	S	6.21	2.40	0.40	0.41	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.25	1,011.63	22.67	11.67
Mittelraum	LB	S	6.00	2.40	0.60	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.96	1,217.67	23.19	11.06
Mittelraum	LB	S	6.00	2.90	0.60	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.52	878.39	23.30	11.41
Mittelraum	LB	S	6.00	2.90	0.60	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.59	1,033.24	23.40	10.63
Mittelraum	LB	S	6.21	2.40	0.40	0.41	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.60	1,235.12	23.47	11.36
Mittelraum	LB	S	6.21	2.40	0.40	0.41	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,481.81	23.48	10.64
Mittelraum	LB	S	5.69	2.90	0.94	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	2.82	850.85	23.98	11.18
Mittelraum	LB	S	6.21	2.90	0.40	0.41	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.27	1,205.16	24.06	10.37
Mittelraum	LB	S	5.69	2.40	0.94	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.13	1,059.18	24.28	11.82
Mittelraum	LB	S	6.21	2.90	0.40	0.41	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.07	1,005.57	24.76	11.00
Mittelraum	LB	S	3.94	2.40	0.94	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.01	930.61	24.78	11.97
Mittelraum	LB	S	6.00	2.90	0.60	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.99	1,097.60	24.84	11.04
Mittelraum	LB	S	6.00	3.40	0.60	0.28	6.03	3S-WSV	0.49	0.63	71%	60%	6.12	4.47	1,075.70	25.10	10.30
Mittelraum	LB	S	6.00	3.40	0.60	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.16	869.93	25.24	10.92
Mittelraum	LB	S	5.69	3.40	0.94	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	2.53	722.94	25.24	11.42
Mittelraum	LB	S	4.25	2.40	0.60	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,042.81	25.34	11.21
Mittelraum	LB	S	6.00	2.90	0.60	0.28	5.75	2S-WSV	0.74	1.18	81%	55%	4.79	4.24	1,366.55	25.44	10.36
Mittelraum	LB	S	5.69	2.90	0.94	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.22	886.69	25.46	11.71
Mittelraum	LB	S	6.21	2.90	0.40	0.41	5.75	2S-WSV	0.74	1.18	81%	55%	4.79	4.96	1,660.00	25.49	10.18
Mittelraum	LB	S	6.21	3.40	0.40	0.41	6.03	3S-WSV	0.49	0.63	71%	60%	6.12	5.23	1,247.32	25.62	10.13
Mittelraum	LB	S	4.25	2.40	0.60	0.28	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.87	1,197.28	25.65	10.51
Mittelraum	LB	S	6.21	2.90	0.40	0.41	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	3.56	1,307.28	25.84	10.67
Mittelraum	LB	S	5.69	3.40	0.94	0.19	6.03	3S-WSV	0.49	0.63	71%	60%	6.12	3.68	868.37	26.02	10.61
Mittelraum	LB	S	3.94	2.40	0.94	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	2.91	1,051.50	26.03	11.12
Mittelraum	LB	S	6.21	2.90	0.40	0.41	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	963.02	26.27	11.93
Mittelraum	LB	S	6.00	3.40	0.60	0.28	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.06	835.49	26.67	11.88
Mittelraum	LB	S	4.46	2.40	0.40	0.41	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	4.76	1,435.53	26.71	10.24
Bottom 10																	
Mittelraum	LB	S	3.21	3.40	0.40	0.41	17.89	2S-SSV	0.23	1.12	37%	27%	5.51	2.35	873.67	60.25	11.58
Mittelraum	LB	S	2.69	3.40	0.94	0.19	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	2.87	765.83	60.56	11.14
Mittelraum	LB	S	2.69	2.90	0.94	0.19	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.11	860.27	60.67	10.97
Mittelraum	LB	S	3.00	2.90	0.60	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.90	1,057.92	61.17	10.49
Mittelraum	LB	S	3.00	3.40	0.60	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.49	938.61	62.57	10.68
Mittelraum	LB	S	3.21	2.90	0.40	0.41	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,238.20	63.72	10.33
Mittelraum	LB	S	3.21	3.40	0.40	0.41	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,075.75	67.15	10.51
Mittelraum	LB	S	2.69	3.40	0.94	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.02	897.09	71.52	10.46
Mittelraum	LB	S	3.00	3.40	0.60	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.82	1,121.01	71.70	10.21
Mittelraum	LB	S	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.35	1,292.60	76.72	10.11

Simulationsergebnisse Sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster						Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	LB	W	6.00	2.40	0.60	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.51	1,288.76	25.97	11.42
Mittelraum	LB	W	6.21	2.40	0.40	0.41	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.25	1,206.18	26.58	11.67
Mittelraum	LB	W	6.21	2.40	0.40	0.41	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.13	1,433.09	27.36	10.96
Mittelraum	LB	W	6.00	2.40	0.60	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.09	1,370.72	27.40	11.83
Mittelraum	LB	W	6.00	2.90	0.60	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.52	1,099.35	28.12	11.41
Mittelraum	LB	W	3.94	2.40	0.94	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.01	1,160.01	28.58	11.97
Mittelraum	LB	W	6.21	2.40	0.40	0.41	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.60	1,541.49	29.08	11.36
Mittelraum	LB	W	5.69	2.90	0.94	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	2.82	1,161.54	29.45	11.18
Mittelraum	LB	W	5.69	2.40	0.94	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.13	1,407.92	29.46	11.82
Mittelraum	LB	W	6.00	2.40	0.60	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.96	1,692.23	29.67	11.06
Mittelraum	LB	W	6.00	2.90	0.60	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.59	1,355.84	29.82	10.63
Mittelraum	LB	W	6.21	2.90	0.40	0.41	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.07	1,212.08	30.22	11.00
Mittelraum	LB	W	4.25	2.40	0.60	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,352.30	30.27	11.21
Mittelraum	LB	W	5.69	3.40	0.94	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	2.53	950.12	30.47	11.42
Mittelraum	LB	W	6.21	2.40	0.40	0.41	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,930.45	30.73	10.64
Mittelraum	LB	W	6.21	2.90	0.40	0.41	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.27	1,506.58	31.07	10.37
Mittelraum	LB	W	3.94	2.40	0.94	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	2.91	1,385.24	31.22	11.12
Mittelraum	LB	W	5.69	2.90	0.94	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.22	1,223.67	31.24	11.71
Mittelraum	LB	W	6.21	2.90	0.40	0.41	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	1,144.53	31.29	11.93
Mittelraum	LB	W	6.00	3.40	0.60	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.16	1,096.51	31.43	10.92
Mittelraum	LB	W	6.00	2.90	0.60	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.99	1,452.88	31.81	11.04
Mittelraum	LB	W	4.46	2.40	0.40	0.41	10.17	3S-WSV	0.49	0.63	71%	21%	2.13	2.00	1,162.27	31.87	11.97
Mittelraum	LB	W	4.25	2.40	0.60	0.28	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.87	1,647.25	32.13	10.51
Mittelraum	LB	W	6.00	3.40	0.60	0.28	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.06	1,043.35	32.41	11.88
Mittelraum	LB	W	4.25	2.90	0.60	0.28	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.22	1,040.32	32.41	11.69
Mittelraum	LB	W	6.21	3.40	0.40	0.41	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.16	909.43	32.51	11.78
Mittelraum	LB	W	3.94	2.40	0.94	0.19	8.75	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	3.56	2.31	1,473.93	32.93	11.62
Mittelraum	LB	W	4.46	2.40	0.40	0.41	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.41	1,510.42	33.14	10.74
Mittelraum	LB	W	6.00	3.40	0.60	0.28	6.03	3S-WSV	0.49	0.63	71%	60%	6.12	4.47	1,415.19	33.36	10.30
Mittelraum	LB	W	5.69	3.40	0.94	0.19	6.03	3S-WSV	0.49	0.63	71%	60%	6.12	3.68	1,213.93	33.41	10.61
Bottom 10																	
Mittelraum	LB	W	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	3S-SSV	0.20	0.62	36%	60%	12.24	5.18	1,389.19	67.54	10.14
Mittelraum	LB	W	2.69	2.90	0.94	0.19	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.11	1,175.35	67.64	10.97
Mittelraum	LB	W	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.00	4,679.49	69.26	9.52
Mittelraum	LB	W	3.00	2.90	0.60	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.90	1,364.23	69.39	10.49
Mittelraum	LB	W	3.00	3.40	0.60	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.49	1,153.03	70.55	10.68
Mittelraum	LB	W	3.21	2.90	0.40	0.41	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,505.72	72.75	10.33
Mittelraum	LB	W	3.21	3.40	0.40	0.41	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,266.08	75.94	10.51
Mittelraum	LB	W	2.69	3.40	0.94	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.02	1,241.17	80.99	10.46
Mittelraum	LB	W	3.00	3.40	0.60	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.82	1,429.45	84.23	10.21
Mittelraum	LB	W	3.21	3.40	0.40	0.41	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.35	1,562.61	92.13	10.11

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	HM	N	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.20	1,342.06	24.94	11.72
Mittelraum	HM	N	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.52	1,416.32	25.72	11.43
Mittelraum	HM	N	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.04	1,485.20	26.85	11.01
Mittelraum	HM	N	5.80	2.40	0.62	0.19	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.04	1,465.76	26.92	11.92
Mittelraum	HM	N	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.54	1,209.18	27.49	11.41
Mittelraum	HM	N	6.14	2.40	0.28	0.41	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.55	1,380.66	27.53	11.40
Mittelraum	HM	N	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.59	1,551.74	28.40	11.35
Mittelraum	HM	N	6.14	2.40	0.28	0.41	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.51	1,535.22	28.90	10.69
Mittelraum	HM	N	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.00	1,268.69	29.13	11.04
Mittelraum	HM	N	6.00	2.90	0.40	0.28	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	1,226.50	29.21	11.91
Mittelraum	HM	N	4.05	2.40	0.62	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,423.94	29.49	11.23
Mittelraum	HM	N	6.00	3.40	0.40	0.28	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.10	1,036.47	29.95	11.82
Mittelraum	HM	N	4.05	2.90	0.62	0.19	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.24	1,145.36	30.44	11.69
Mittelraum	HM	N	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.91	1,675.03	30.57	11.12
Mittelraum	HM	N	5.80	2.90	0.62	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.61	1,369.75	30.65	10.64
Mittelraum	HM	N	6.14	2.40	0.28	0.41	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.96	1,609.10	30.82	11.08
Mittelraum	HM	N	5.80	3.40	0.62	0.19	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.02	1,121.15	31.31	11.95
Mittelraum	HM	N	5.80	3.40	0.62	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.21	1,153.91	31.42	10.91
Mittelraum	HM	N	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	1,790.33	31.58	10.62
Mittelraum	HM	N	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.17	1,446.71	31.62	10.39
Mittelraum	HM	N	4.25	2.40	0.40	0.28	10.17	2S-WSV	0.74	1.18	81%	21%	2.13	2.30	1,451.02	31.75	11.61
Mittelraum	HM	N	4.25	2.40	0.40	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.36	1,495.42	31.78	10.77
Mittelraum	HM	N	6.14	2.90	0.28	0.41	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.41	1,311.51	32.09	10.74
Mittelraum	HM	N	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.94	1,421.83	32.34	11.10
Mittelraum	HM	N	4.05	2.40	0.62	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.89	1,614.97	32.80	10.52
Mittelraum	HM	N	6.14	2.90	0.28	0.41	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.32	1,269.46	32.85	11.61
Mittelraum	HM	N	2.80	2.40	0.62	0.19	14.14	3S-WSV	0.49	0.63	71%	21%	3.02	2.35	1,320.53	33.17	11.58
Mittelraum	HM	N	6.00	3.40	0.40	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.67	1,217.96	33.20	10.60
Mittelraum	HM	N	6.14	2.40	0.28	0.41	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	4.07	1,868.74	33.34	10.44
Mittelraum	HM	N	4.39	2.40	0.28	0.41	10.17	3S-WSV	0.49	0.63	71%	21%	2.13	2.29	1,315.32	33.39	11.63
Bottom 10																		
Mittelraum	HM	N	3.14	3.40	0.28	0.41	14.63	2S-WSV	0.74	1.18	81%	43%	8.77	10.20	2,439.90	81.34	9.63
Mittelraum	HM	N	3.00	2.90	0.40	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,376.24	85.73	10.32
Mittelraum	HM	N	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	11.50	2,846.37	86.93	9.59
Mittelraum	HM	N	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.00	3,087.43	88.21	9.50
Mittelraum	HM	N	3.14	2.90	0.28	0.41	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.77	1,415.05	92.56	10.24
Mittelraum	HM	N	3.14	3.40	0.28	0.41	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	4.18	1,226.15	93.28	10.40
Mittelraum	HM	N	3.14	3.40	0.28	0.41	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.90	3,219.56	99.44	9.50
Mittelraum	HM	N	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.76	1,298.82	103.34	10.24
Mittelraum	HM	N	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.34	1,364.70	105.78	10.09
Mittelraum	HM	N	3.14	3.40	0.28	0.41	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.68	1,404.05	119.95	10.05

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	HM	O	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.20	1,706.43	23.85	11.72
Mittelraum	HM	O	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.52	1,811.01	24.55	11.43
Mittelraum	HM	O	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.04	1,989.60	25.37	11.01
Mittelraum	HM	O	5.80	2.40	0.62	0.19	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.04	1,912.49	25.73	11.92
Mittelraum	HM	O	6.14	2.40	0.28	0.41	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.55	1,802.43	26.21	11.40
Mittelraum	HM	O	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.54	1,576.30	26.30	11.41
Mittelraum	HM	O	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.59	2,128.27	26.81	11.35
Mittelraum	HM	O	6.14	2.40	0.28	0.41	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.51	2,112.94	27.18	10.69
Mittelraum	HM	O	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.00	1,716.73	27.58	11.04
Mittelraum	HM	O	6.00	2.90	0.40	0.28	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	1,635.08	27.95	11.91
Mittelraum	HM	O	4.05	2.40	0.62	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,838.73	28.17	11.23
Mittelraum	HM	O	6.00	3.40	0.40	0.28	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.10	1,334.50	28.77	11.82
Mittelraum	HM	O	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.91	2,305.60	28.82	11.12
Mittelraum	HM	O	6.14	2.40	0.28	0.41	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.96	2,276.12	28.91	11.08
Mittelraum	HM	O	5.80	2.90	0.62	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.61	1,897.62	28.92	10.64
Mittelraum	HM	O	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	2,601.34	29.37	10.62
Mittelraum	HM	O	4.05	2.90	0.62	0.19	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.24	1,455.78	29.38	11.69
Mittelraum	HM	O	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.17	2,083.89	29.50	10.39
Mittelraum	HM	O	5.80	3.40	0.62	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.21	1,575.17	29.88	10.91
Mittelraum	HM	O	4.25	2.40	0.40	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.36	2,024.95	30.09	10.77
Mittelraum	HM	O	5.80	3.40	0.62	0.19	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.02	1,510.02	30.15	11.95
Mittelraum	HM	O	4.25	2.40	0.40	0.28	10.17	2S-WSV	0.74	1.18	81%	21%	2.13	2.30	1,945.06	30.27	11.61
Mittelraum	HM	O	6.14	2.90	0.28	0.41	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.41	1,815.44	30.27	10.74
Mittelraum	HM	O	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.94	2,019.64	30.60	11.10
Mittelraum	HM	O	6.14	2.40	0.28	0.41	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	4.07	2,801.62	30.79	10.44
Mittelraum	HM	O	4.05	2.40	0.62	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.89	2,190.96	30.96	10.52
Mittelraum	HM	O	6.14	2.90	0.28	0.41	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.32	1,740.01	31.23	11.61
Mittelraum	HM	O	6.00	3.40	0.40	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.67	1,718.87	31.23	10.60
Mittelraum	HM	O	6.14	2.90	0.28	0.41	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.70	2,209.51	31.25	10.25
Mittelraum	HM	O	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	3.56	2,250.88	31.58	10.65
Bottom 10																		
Mittelraum	HM	O	3.00	3.40	0.40	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,671.32	74.58	10.49
Mittelraum	HM	O	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.00	5,772.50	74.99	9.50
Mittelraum	HM	O	2.80	2.90	0.62	0.19	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.84	1,790.59	75.96	10.54
Mittelraum	HM	O	3.14	3.40	0.28	0.41	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.90	6,138.65	81.75	9.50
Mittelraum	HM	O	3.00	2.90	0.40	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,954.83	82.34	10.32
Mittelraum	HM	O	3.14	2.90	0.28	0.41	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.77	2,061.49	86.53	10.24
Mittelraum	HM	O	3.14	3.40	0.28	0.41	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	4.18	1,759.27	89.52	10.40
Mittelraum	HM	O	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.76	1,861.56	99.39	10.24
Mittelraum	HM	O	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.34	2,017.33	101.32	10.09
Mittelraum	HM	O	3.14	3.40	0.28	0.41	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.68	2,116.83	115.03	10.05

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	HM	S	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.52	1,474.89	19.50	11.43
Mittelraum	HM	S	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.20	1,494.15	19.50	11.72
Mittelraum	HM	S	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.04	1,688.61	19.69	11.01
Mittelraum	HM	S	5.80	2.40	0.62	0.19	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.04	1,539.99	20.34	11.92
Mittelraum	HM	S	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.59	1,798.68	20.61	11.35
Mittelraum	HM	S	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.54	1,333.26	20.86	11.41
Mittelraum	HM	S	6.14	2.40	0.28	0.41	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.51	1,859.97	21.01	10.69
Mittelraum	HM	S	6.14	2.40	0.28	0.41	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.55	1,621.94	21.34	11.40
Mittelraum	HM	S	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.00	1,505.21	21.49	11.04
Mittelraum	HM	S	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	2,132.13	21.80	10.62
Mittelraum	HM	S	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.91	1,766.98	21.82	11.12
Mittelraum	HM	S	5.80	2.90	0.62	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.61	1,543.80	21.88	10.64
Mittelraum	HM	S	6.14	2.40	0.28	0.41	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.96	2,002.50	22.12	11.08
Mittelraum	HM	S	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.17	1,784.50	22.16	10.39
Mittelraum	HM	S	6.00	2.90	0.40	0.28	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	1,446.64	22.37	11.91
Mittelraum	HM	S	4.05	2.40	0.62	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,493.34	22.69	11.23
Mittelraum	HM	S	6.14	2.40	0.28	0.41	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	4.07	2,420.12	22.83	10.44
Mittelraum	HM	S	5.80	3.40	0.62	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.21	1,337.17	22.91	10.91
Mittelraum	HM	S	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.94	1,626.08	23.05	11.10
Mittelraum	HM	S	6.14	2.90	0.28	0.41	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.70	1,960.10	23.39	10.25
Mittelraum	HM	S	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	3.56	1,926.08	23.51	10.65
Mittelraum	HM	S	6.00	3.40	0.40	0.28	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.10	1,208.53	23.54	11.82
Mittelraum	HM	S	6.14	2.90	0.28	0.41	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.41	1,635.63	23.58	10.74
Mittelraum	HM	S	6.00	3.40	0.40	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.67	1,512.59	23.69	10.60
Mittelraum	HM	S	5.80	3.40	0.62	0.19	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.02	1,286.80	23.78	11.95
Mittelraum	HM	S	4.25	2.40	0.40	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.36	1,718.16	23.82	10.77
Mittelraum	HM	S	4.05	2.40	0.62	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.89	1,695.67	23.94	10.52
Mittelraum	HM	S	4.25	2.40	0.40	0.28	10.17	2S-WSV	0.74	1.18	81%	21%	2.13	2.30	1,674.21	24.43	11.61
Mittelraum	HM	S	4.05	2.90	0.62	0.19	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.24	1,258.25	24.43	11.69
Mittelraum	HM	S	4.25	2.40	0.40	0.28	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	4.64	2,007.06	24.53	10.26
Bottom 10																		
Mittelraum	HM	S	2.80	3.40	0.62	0.19	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.45	1,353.12	61.70	10.72
Mittelraum	HM	S	3.14	3.40	0.28	0.41	17.89	2S-SSV	0.23	1.12	37%	27%	5.51	2.54	1,353.52	62.57	11.41
Mittelraum	HM	S	2.80	2.90	0.62	0.19	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	3.84	1,495.76	62.63	10.54
Mittelraum	HM	S	3.00	3.40	0.40	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,534.12	64.52	10.49
Mittelraum	HM	S	3.00	2.90	0.40	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	1,738.50	65.82	10.32
Mittelraum	HM	S	3.14	2.90	0.28	0.41	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.77	1,898.69	70.44	10.24
Mittelraum	HM	S	3.14	3.40	0.28	0.41	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	4.18	1,655.43	72.48	10.40
Mittelraum	HM	S	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.76	1,600.03	78.68	10.24
Mittelraum	HM	S	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.34	1,836.94	80.73	10.09
Mittelraum	HM	S	3.14	3.40	0.28	0.41	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.68	1,988.01	84.40	10.05

Simulationsergebnisse sortiert nach Heizwärmebedarf

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	HM	W	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.20	1,765.80	23.53	11.72
Mittelraum	HM	W	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	2.52	1,877.22	24.17	11.43
Mittelraum	HM	W	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.04	2,076.74	24.92	11.01
Mittelraum	HM	W	5.80	2.40	0.62	0.19	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.04	1,980.65	25.37	11.92
Mittelraum	HM	W	6.14	2.40	0.28	0.41	6.39	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	2.52	2.55	1,870.61	25.81	11.40
Mittelraum	HM	W	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	2.54	1,647.66	25.92	11.41
Mittelraum	HM	W	6.00	2.40	0.40	0.28	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.59	2,220.67	26.33	11.35
Mittelraum	HM	W	6.14	2.40	0.28	0.41	5.45	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	3.46	3.51	2,213.93	26.67	10.69
Mittelraum	HM	W	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.00	1,804.96	27.12	11.04
Mittelraum	HM	W	6.00	2.90	0.40	0.28	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.03	1,708.98	27.55	11.91
Mittelraum	HM	W	4.05	2.40	0.62	0.19	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	2.75	1,908.41	27.75	11.23
Mittelraum	HM	W	5.80	2.40	0.62	0.19	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	2.91	2,409.23	28.28	11.12
Mittelraum	HM	W	6.14	2.40	0.28	0.41	6.39	2S-WSV	0.74	1.18	81%	35%	2.52	2.96	2,382.30	28.34	11.08
Mittelraum	HM	W	5.80	2.90	0.62	0.19	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	3.61	2,002.86	28.37	10.64
Mittelraum	HM	W	6.00	3.40	0.40	0.28	9.40	3S-WSV	0.49	0.63	71%	27%	2.75	2.10	1,397.81	28.38	11.82
Mittelraum	HM	W	6.00	2.40	0.40	0.28	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	3.62	2,741.82	28.74	10.62
Mittelraum	HM	W	6.00	2.90	0.40	0.28	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.17	2,214.99	28.88	10.39
Mittelraum	HM	W	4.05	2.90	0.62	0.19	11.60	3S-WSV	0.49	0.63	71%	24%	2.95	2.24	1,516.87	29.03	11.69
Mittelraum	HM	W	5.80	3.40	0.62	0.19	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.21	1,669.54	29.40	10.91
Mittelraum	HM	W	4.25	2.40	0.40	0.28	8.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	35%	3.56	3.36	2,116.41	29.57	10.77
Mittelraum	HM	W	6.14	2.90	0.28	0.41	7.05	3S-WSV	0.49	0.63	71%	40%	3.48	3.41	1,913.58	29.69	10.74
Mittelraum	HM	W	5.80	3.40	0.62	0.19	9.40	2S-WSV	0.74	1.18	81%	27%	2.75	2.02	1,588.62	29.76	11.95
Mittelraum	HM	W	4.25	2.40	0.40	0.28	10.17	2S-WSV	0.74	1.18	81%	21%	2.13	2.30	2,022.12	29.81	11.61
Mittelraum	HM	W	5.80	2.90	0.62	0.19	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	2.94	2,127.81	30.04	11.10
Mittelraum	HM	W	6.14	2.40	0.28	0.41	5.45	2S-WSV	0.74	1.18	81%	48%	3.46	4.07	2,966.38	30.08	10.44
Mittelraum	HM	W	4.05	2.40	0.62	0.19	7.43	3S-WSV	0.49	0.63	71%	48%	4.88	3.89	2,294.00	30.37	10.52
Mittelraum	HM	W	6.14	2.90	0.28	0.41	5.75	3S-WSV	0.49	0.63	71%	55%	4.79	4.70	2,356.74	30.53	10.25
Mittelraum	HM	W	6.00	3.40	0.40	0.28	7.76	3S-WSV	0.49	0.63	71%	43%	4.39	3.67	1,830.60	30.62	10.60
Mittelraum	HM	W	6.14	2.90	0.28	0.41	8.44	2S-WSV	0.74	1.18	81%	24%	2.09	2.32	1,821.37	30.72	11.61
Mittelraum	HM	W	6.00	2.90	0.40	0.28	7.05	2S-WSV	0.74	1.18	81%	40%	3.48	3.56	2,389.17	30.90	10.65
Bottom 10																		
Mittelraum	HM	W	3.00	3.40	0.40	0.28	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	3.92	1,807.17	73.74	10.49
Mittelraum	HM	W	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	11.50	5,981.24	74.18	9.59
Mittelraum	HM	W	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.00	6,784.47	76.17	9.50
Mittelraum	HM	W	3.00	2.90	0.40	0.28	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.43	2,111.88	76.58	10.32
Mittelraum	HM	W	3.14	3.40	0.28	0.41	11.16	2S-WSV	0.74	1.18	81%	60%	12.24	13.90	7,239.89	79.39	9.50
Mittelraum	HM	W	3.14	2.90	0.28	0.41	10.71	2S-SSV	0.23	1.12	37%	55%	9.57	4.77	2,232.69	82.76	10.24
Mittelraum	HM	W	3.14	3.40	0.28	0.41	14.63	2S-SSV	0.23	1.12	37%	43%	8.77	4.18	1,901.86	86.33	10.40
Mittelraum	HM	W	2.80	3.40	0.62	0.19	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	4.76	2,037.64	93.98	10.24
Mittelraum	HM	W	3.00	3.40	0.40	0.28	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.34	2,224.52	95.76	10.09
Mittelraum	HM	W	3.14	3.40	0.28	0.41	11.16	2S-SSV	0.23	1.12	37%	60%	12.24	5.68	2,339.51	105.09	10.05

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	MW	N	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,13	638,04	37,35	11,82
Mittelraum	MW	N	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,33	662,88	42,29	11,60
Mittelraum	MW	N	2,80	3,40	0,62	0,19	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,02	665,75	55,79	11,95
Mittelraum	MW	N	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,19	666,74	46,69	11,75
Mittelraum	MW	N	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,71	669,61	38,73	11,23
Mittelraum	MW	N	6,00	3,40	0,40	0,28	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,10	677,24	30,41	11,82
Mittelraum	MW	N	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,54	679,90	52,54	11,39
Mittelraum	MW	N	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,41	692,50	51,91	11,53
Mittelraum	MW	N	6,14	3,40	0,28	0,42	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,62	694,35	40,64	11,33
Mittelraum	MW	N	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,99	698,75	45,17	11,04
Mittelraum	MW	N	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,51	705,32	47,89	11,42
Mittelraum	MW	N	6,14	3,40	0,28	0,42	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,41	707,12	34,11	11,53
Mittelraum	MW	N	3,14	3,40	0,28	0,42	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,46	709,21	60,34	11,48
Mittelraum	MW	N	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,34	711,43	61,02	11,57
Mittelraum	MW	N	4,39	3,40	0,28	0,42	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,88	726,17	49,30	11,13
Mittelraum	MW	N	5,80	3,40	0,62	0,19	9,40	2S-WSV	0,74	1,18	81%	27%	2,75	2,02	726,42	31,64	11,95
Mittelraum	MW	N	6,14	3,40	0,28	0,42	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,70	731,69	49,93	11,26
Mittelraum	MW	N	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,23	733,57	33,76	11,68
Mittelraum	MW	N	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	735,40	54,60	11,20
Mittelraum	MW	N	2,80	3,40	0,62	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,35	736,89	55,79	10,80
Mittelraum	MW	N	4,05	3,40	0,62	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,27	737,10	48,59	10,88
Mittelraum	MW	N	3,00	2,90	0,40	0,28	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,09	739,18	45,21	11,83
Mittelraum	MW	N	4,05	3,40	0,62	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,82	740,54	35,16	11,18
Mittelraum	MW	N	3,14	3,40	0,28	0,42	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,54	742,13	69,00	11,41
Mittelraum	MW	N	5,80	3,40	0,62	0,19	7,76	3S-WSV	0,49	0,63	71%	43%	4,39	3,21	751,24	31,71	10,91
Mittelraum	MW	N	6,14	2,90	0,28	0,42	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,17	758,58	35,63	11,77
Mittelraum	MW	N	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,45	763,91	39,33	11,47
Mittelraum	MW	N	4,39	3,40	0,28	0,42	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,97	763,91	58,86	11,07
Mittelraum	MW	N	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,07	765,17	40,92	11,85
Mittelraum	MW	N	3,14	2,90	0,28	0,42	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,06	768,12	52,15	11,90
Bottom 10																		
Mittelraum	MW	N	3,14	3,40	0,28	0,42	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	10,20	1.785,46	70,26	9,63
Mittelraum	MW	N	2,80	2,40	0,62	0,19	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	6,45	1.834,65	50,60	9,93
Mittelraum	MW	N	2,80	2,90	0,62	0,19	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,24	1.964,43	61,78	9,69
Mittelraum	MW	N	3,00	2,40	0,40	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,89	2.012,22	52,13	9,78
Mittelraum	MW	N	2,80	3,40	0,62	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,50	2.061,36	72,78	9,59
Mittelraum	MW	N	3,14	2,40	0,28	0,42	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	8,75	2.121,94	55,36	9,72
Mittelraum	MW	N	3,00	2,90	0,40	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	2.154,51	63,08	9,59
Mittelraum	MW	N	3,00	3,40	0,40	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	2.253,68	79,81	9,50
Mittelraum	MW	N	3,14	2,90	0,28	0,42	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	11,60	2.262,60	66,41	9,58
Mittelraum	MW	N	3,14	3,40	0,28	0,42	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,90	2.363,18	85,90	9,50

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster						Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	MW	O	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,13	821,79	36,34	11,82
Mittelraum	MW	O	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,33	860,93	41,17	11,60
Mittelraum	MW	O	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,71	885,35	37,49	11,23
Mittelraum	MW	O	2,80	3,40	0,62	0,19	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,02	885,61	54,33	11,95
Mittelraum	MW	O	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,19	887,75	45,40	11,75
Mittelraum	MW	O	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,54	905,09	51,05	11,39
Mittelraum	MW	O	6,00	3,40	0,40	0,28	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,10	911,00	29,38	11,82
Mittelraum	MW	O	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,23	928,42	32,79	11,68
Mittelraum	MW	O	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,41	929,50	50,46	11,53
Mittelraum	MW	O	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,99	933,29	43,75	11,04
Mittelraum	MW	O	6,14	3,40	0,28	0,42	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,62	933,64	39,22	11,33
Mittelraum	MW	O	3,00	2,90	0,40	0,28	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,09	941,72	44,09	11,83
Mittelraum	MW	O	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,51	966,04	46,27	11,42
Mittelraum	MW	O	3,14	3,40	0,28	0,42	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,46	971,03	58,47	11,48
Mittelraum	MW	O	6,14	3,40	0,28	0,42	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,41	974,49	32,80	11,53
Mittelraum	MW	O	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,34	976,88	59,16	11,57
Mittelraum	MW	O	6,14	2,90	0,28	0,42	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,17	979,40	34,51	11,77
Mittelraum	MW	O	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,45	980,18	38,23	11,47
Mittelraum	MW	O	4,39	3,40	0,28	0,42	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,88	990,62	47,63	11,13
Mittelraum	MW	O	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,07	999,32	39,70	11,85
Mittelraum	MW	O	3,14	2,90	0,28	0,42	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,06	1.008,20	50,74	11,90
Mittelraum	MW	O	4,05	3,40	0,62	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,27	1.011,45	46,94	10,88
Mittelraum	MW	O	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	1.015,71	52,81	11,20
Mittelraum	MW	O	6,14	3,40	0,28	0,42	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,70	1.019,27	48,08	11,26
Mittelraum	MW	O	2,80	3,40	0,62	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,35	1.023,69	53,94	10,80
Mittelraum	MW	O	5,80	3,40	0,62	0,19	9,40	2S-WSV	0,74	1,18	81%	27%	2,75	2,02	1.025,40	30,64	11,95
Mittelraum	MW	O	4,05	2,90	0,62	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,61	1.028,72	40,31	11,35
Mittelraum	MW	O	4,05	3,40	0,62	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,82	1.037,78	33,91	11,18
Mittelraum	MW	O	4,39	2,90	0,28	0,42	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,40	1.038,79	41,76	11,54
Mittelraum	MW	O	4,05	2,90	0,62	0,19	11,60	3S-WSV	0,49	0,63	71%	24%	2,95	2,24	1.040,27	29,86	11,69
Bottom 10																	
Mittelraum	MW	O	4,39	3,40	0,28	0,42	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,89	3.361,52	52,02	9,65
Mittelraum	MW	O	3,14	3,40	0,28	0,42	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	10,20	3.382,25	63,53	9,63
Mittelraum	MW	O	3,00	2,40	0,40	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,89	3.444,01	47,62	9,78
Mittelraum	MW	O	2,80	2,90	0,62	0,19	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,24	3.487,08	56,26	9,69
Mittelraum	MW	O	3,14	2,40	0,28	0,42	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	8,75	3.754,15	50,29	9,72
Mittelraum	MW	O	2,80	3,40	0,62	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,50	3.890,87	65,68	9,59
Mittelraum	MW	O	3,00	2,90	0,40	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	3.983,57	56,83	9,59
Mittelraum	MW	O	3,14	2,90	0,28	0,42	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	11,60	4.275,03	59,63	9,58
Mittelraum	MW	O	3,00	3,40	0,40	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	4.372,07	67,04	9,50
Mittelraum	MW	O	3,14	3,40	0,28	0,42	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,90	4.650,99	70,66	9,50

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	MW	S	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,13	722,26	32,07	11,82
Mittelraum	MW	S	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,33	758,73	36,58	11,60
Mittelraum	MW	S	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,19	771,32	40,09	11,75
Mittelraum	MW	S	2,80	3,40	0,62	0,19	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,02	780,13	49,00	11,95
Mittelraum	MW	S	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,71	801,05	32,71	11,23
Mittelraum	MW	S	6,00	3,40	0,40	0,28	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,10	806,06	24,71	11,82
Mittelraum	MW	S	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,41	809,58	44,81	11,53
Mittelraum	MW	S	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,54	830,22	45,92	11,39
Mittelraum	MW	S	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,23	840,87	29,08	11,68
Mittelraum	MW	S	5,80	3,40	0,62	0,19	9,40	2S-WSV	0,74	1,18	81%	27%	2,75	2,02	847,96	24,89	11,95
Mittelraum	MW	S	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,99	848,04	38,56	11,04
Mittelraum	MW	S	6,14	3,40	0,28	0,42	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,62	861,41	34,10	11,33
Mittelraum	MW	S	3,00	2,90	0,40	0,28	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,09	865,01	40,15	11,83
Mittelraum	MW	S	4,05	3,40	0,62	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,27	866,25	40,63	10,88
Mittelraum	MW	S	4,05	3,40	0,62	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,82	868,92	27,86	11,18
Mittelraum	MW	S	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,51	870,72	40,40	11,42
Mittelraum	MW	S	4,05	2,90	0,62	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,61	875,73	35,50	11,35
Mittelraum	MW	S	4,05	2,90	0,62	0,19	11,60	3S-WSV	0,49	0,63	71%	24%	2,95	2,24	878,29	25,40	11,69
Mittelraum	MW	S	2,80	3,40	0,62	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,35	878,58	47,19	10,80
Mittelraum	MW	S	6,14	3,40	0,28	0,42	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,41	880,82	27,53	11,53
Mittelraum	MW	S	5,80	3,40	0,62	0,19	7,76	3S-WSV	0,49	0,63	71%	43%	4,39	3,21	886,03	23,96	10,91
Mittelraum	MW	S	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,45	888,58	34,13	11,47
Mittelraum	MW	S	2,80	2,90	0,62	0,19	13,32	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	6,96	2,70	890,57	41,22	11,26
Mittelraum	MW	S	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,34	892,57	53,04	11,57
Mittelraum	MW	S	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,07	898,39	35,13	11,85
Mittelraum	MW	S	5,80	2,90	0,62	0,19	7,05	3S-WSV	0,49	0,63	71%	40%	3,48	2,54	903,54	22,12	11,41
Mittelraum	MW	S	6,14	2,90	0,28	0,42	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,17	904,36	30,46	11,77
Mittelraum	MW	S	3,14	3,40	0,28	0,42	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,46	907,11	52,66	11,48
Mittelraum	MW	S	4,39	3,40	0,28	0,42	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,88	917,52	41,95	11,13
Mittelraum	MW	S	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	919,21	46,48	11,20
Bottom 10																		
Mittelraum	MW	S	4,39	2,90	0,28	0,42	7,79	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	6,76	8,22	2.642,23	31,40	9,77
Mittelraum	MW	S	3,14	2,90	0,28	0,42	13,32	2S-WSV	0,74	1,18	81%	40%	6,96	8,54	2.715,19	39,55	9,74
Mittelraum	MW	S	4,39	3,40	0,28	0,42	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,89	2.890,67	35,87	9,65
Mittelraum	MW	S	2,80	3,40	0,62	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,50	2.923,95	45,80	9,59
Mittelraum	MW	S	3,14	3,40	0,28	0,42	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	10,20	2.933,52	44,99	9,63
Mittelraum	MW	S	3,14	2,40	0,28	0,42	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	8,75	3.057,25	35,49	9,72
Mittelraum	MW	S	3,00	2,90	0,40	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	3.181,87	39,69	9,59
Mittelraum	MW	S	3,14	2,90	0,28	0,42	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	11,60	3.648,92	41,88	9,58
Mittelraum	MW	S	3,00	3,40	0,40	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	3.650,18	46,12	9,50
Mittelraum	MW	S	3,14	3,40	0,28	0,42	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,90	4.106,12	48,23	9,50

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster						Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	MW	W	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,13	845,01	35,98	11,82
Mittelraum	MW	W	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,33	886,43	40,77	11,60
Mittelraum	MW	W	2,80	3,40	0,62	0,19	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,02	912,18	53,91	11,95
Mittelraum	MW	W	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,71	913,62	37,06	11,23
Mittelraum	MW	W	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,19	917,09	44,97	11,75
Mittelraum	MW	W	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,54	932,17	50,58	11,39
Mittelraum	MW	W	6,00	3,40	0,40	0,28	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,10	936,93	29,00	11,82
Mittelraum	MW	W	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,23	951,49	32,46	11,68
Mittelraum	MW	W	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,41	960,99	50,00	11,53
Mittelraum	MW	W	3,00	2,90	0,40	0,28	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,09	962,11	43,72	11,83
Mittelraum	MW	W	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,99	964,48	43,28	11,04
Mittelraum	MW	W	6,14	3,40	0,28	0,42	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,62	965,33	38,74	11,33
Mittelraum	MW	W	3,14	3,40	0,28	0,42	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,46	999,01	57,90	11,48
Mittelraum	MW	W	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,51	1.002,46	45,77	11,42
Mittelraum	MW	W	6,14	3,40	0,28	0,42	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,41	1.002,85	32,33	11,53
Mittelraum	MW	W	6,14	2,90	0,28	0,42	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,17	1.004,94	34,13	11,77
Mittelraum	MW	W	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,45	1.004,96	37,85	11,47
Mittelraum	MW	W	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,34	1.010,63	58,65	11,57
Mittelraum	MW	W	4,39	3,40	0,28	0,42	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,88	1.023,92	47,09	11,13
Mittelraum	MW	W	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,07	1.028,24	39,30	11,85
Mittelraum	MW	W	3,14	2,90	0,28	0,42	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,06	1.029,48	50,30	11,90
Mittelraum	MW	W	4,05	3,40	0,62	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,27	1.049,34	46,39	10,88
Mittelraum	MW	W	5,80	3,40	0,62	0,19	9,40	2S-WSV	0,74	1,18	81%	27%	2,75	2,02	1.055,26	30,23	11,95
Mittelraum	MW	W	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	1.055,93	52,26	11,20
Mittelraum	MW	W	4,05	2,90	0,62	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,61	1.057,52	39,87	11,35
Mittelraum	MW	W	6,14	3,40	0,28	0,42	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,70	1.060,54	47,52	11,26
Mittelraum	MW	W	2,80	3,40	0,62	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,35	1.061,66	53,33	10,80
Mittelraum	MW	W	4,05	2,90	0,62	0,19	11,60	3S-WSV	0,49	0,63	71%	24%	2,95	2,24	1.064,98	29,51	11,69
Mittelraum	MW	W	4,39	2,90	0,28	0,42	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,40	1.066,00	41,33	11,54
Mittelraum	MW	W	4,05	3,40	0,62	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,82	1.071,69	33,42	11,18
Bottom 10																	
Mittelraum	MW	W	4,39	3,40	0,28	0,42	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,89	3.567,55	50,20	9,65
Mittelraum	MW	W	3,14	3,40	0,28	0,42	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	10,20	3.588,33	61,43	9,63
Mittelraum	MW	W	3,00	2,40	0,40	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,89	3.597,25	46,13	9,78
Mittelraum	MW	W	2,80	2,90	0,62	0,19	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,24	3.667,52	54,46	9,69
Mittelraum	MW	W	3,14	2,40	0,28	0,42	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	8,75	3.938,14	48,67	9,72
Mittelraum	MW	W	2,80	3,40	0,62	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,50	4.148,88	63,44	9,59
Mittelraum	MW	W	3,00	2,90	0,40	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	4.225,17	54,89	9,59
Mittelraum	MW	W	3,14	2,90	0,28	0,42	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	11,60	4.554,50	57,50	9,58
Mittelraum	MW	W	3,00	3,40	0,40	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	4.701,86	65,35	9,50
Mittelraum	MW	W	3,14	3,40	0,28	0,42	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,90	5.026,10	68,03	9,50

Simulationsergebnisse Sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	LB	N	6,00	3,40	0,60	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,40	605,64	38,86	11,52
Mittelraum	LB	N	3,00	3,40	0,60	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,21	610,19	52,56	11,71
Mittelraum	LB	N	4,25	3,40	0,60	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,63	631,01	45,28	11,31
Mittelraum	LB	N	6,21	3,40	0,40	0,41	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,44	634,99	40,76	11,50
Mittelraum	LB	N	6,00	3,40	0,60	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,23	637,51	48,19	11,68
Mittelraum	LB	N	3,00	3,40	0,60	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,05	638,42	61,18	11,89
Mittelraum	LB	N	6,21	3,40	0,40	0,41	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,16	642,11	34,10	11,78
Mittelraum	LB	N	3,21	3,40	0,40	0,41	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,27	647,96	60,37	11,66
Mittelraum	LB	N	2,69	3,40	0,94	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	2,78	652,88	56,03	11,21
Mittelraum	LB	N	3,94	3,40	0,94	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,17	655,36	35,21	11,77
Mittelraum	LB	N	3,94	3,40	0,94	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	2,72	658,60	48,86	11,25
Mittelraum	LB	N	4,25	3,40	0,60	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,45	663,29	54,88	11,47
Mittelraum	LB	N	4,46	3,40	0,40	0,41	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,68	664,09	49,36	11,28
Mittelraum	LB	N	5,69	3,40	0,94	0,19	7,76	3S-WSV	0,49	0,63	71%	43%	4,39	2,53	665,85	31,90	11,42
Mittelraum	LB	N	6,21	3,40	0,40	0,41	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,52	669,66	50,17	11,43
Mittelraum	LB	N	3,21	3,40	0,40	0,41	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,35	677,68	69,18	11,58
Mittelraum	LB	N	4,25	2,90	0,60	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,11	688,85	39,32	11,81
Mittelraum	LB	N	2,69	3,40	0,94	0,19	14,63	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	8,77	2,87	689,43	70,16	11,14
Mittelraum	LB	N	6,21	2,90	0,40	0,41	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,00	691,19	35,64	11,97
Mittelraum	LB	N	3,94	3,40	0,94	0,19	8,14	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	8,64	2,81	694,67	62,57	11,19
Mittelraum	LB	N	4,46	3,40	0,40	0,41	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	699,31	59,11	11,22
Mittelraum	LB	N	6,00	3,40	0,60	0,28	9,40	2S-WSV	0,74	1,18	81%	27%	2,75	2,06	700,10	34,01	11,88
Mittelraum	LB	N	2,69	2,90	0,94	0,19	13,32	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	6,96	2,16	703,17	47,89	11,79
Mittelraum	LB	N	4,25	3,40	0,60	0,28	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,67	704,48	50,78	10,60
Mittelraum	LB	N	3,00	3,40	0,60	0,28	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,77	705,30	60,09	10,55
Mittelraum	LB	N	3,94	2,90	0,94	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,10	706,23	41,64	11,84
Mittelraum	LB	N	4,25	3,40	0,60	0,28	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,81	712,34	38,67	11,17
Mittelraum	LB	N	6,21	2,90	0,40	0,41	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,06	721,21	43,04	11,90
Mittelraum	LB	N	4,46	2,90	0,40	0,41	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,19	721,63	43,06	11,75
Mittelraum	LB	N	6,00	3,40	0,60	0,28	7,76	3S-WSV	0,49	0,63	71%	43%	4,39	3,16	723,47	33,50	10,92
Bottom 10																		
Mittelraum	LB	N	4,46	3,40	0,40	0,41	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,24	1.656,57	58,83	9,69
Mittelraum	LB	N	3,21	3,40	0,40	0,41	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	9,54	1.659,11	71,11	9,66
Mittelraum	LB	N	2,69	2,90	0,94	0,19	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	7,40	1.718,32	63,51	9,83
Mittelraum	LB	N	3,00	2,40	0,60	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	6,57	1.793,29	53,18	9,90
Mittelraum	LB	N	2,69	3,40	0,94	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	9,60	1.818,19	74,97	9,66
Mittelraum	LB	N	3,00	2,90	0,60	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,37	1.941,63	64,48	9,66
Mittelraum	LB	N	3,21	2,40	0,40	0,41	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,88	1.947,53	56,10	9,80
Mittelraum	LB	N	3,00	3,40	0,60	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,60	2.054,67	75,61	9,57
Mittelraum	LB	N	3,21	2,90	0,40	0,41	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	2.103,30	67,39	9,60
Mittelraum	LB	N	3,21	3,40	0,40	0,41	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	2.217,66	87,06	9,52

Simulationsergebnisse Sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster						Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	LB	O	6,00	3,40	0,60	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,40	794,08	37,77	11,52
Mittelraum	LB	O	3,00	3,40	0,60	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,21	808,19	51,21	11,71
Mittelraum	LB	O	4,25	3,40	0,60	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,63	837,11	44,03	11,31
Mittelraum	LB	O	6,21	3,40	0,40	0,41	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,44	854,93	39,44	11,50
Mittelraum	LB	O	6,00	3,40	0,60	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,23	864,04	46,79	11,68
Mittelraum	LB	O	3,00	3,40	0,60	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,05	871,08	59,52	11,89
Mittelraum	LB	O	4,25	2,90	0,60	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,11	873,16	38,35	11,81
Mittelraum	LB	O	3,94	3,40	0,94	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	2,72	881,17	47,51	11,25
Mittelraum	LB	O	6,21	3,40	0,40	0,41	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,16	885,18	32,93	11,78
Mittelraum	LB	O	2,69	3,40	0,94	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	2,78	886,65	54,43	11,21
Mittelraum	LB	O	3,21	3,40	0,40	0,41	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,27	888,85	58,62	11,66
Mittelraum	LB	O	3,94	3,40	0,94	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,17	889,15	34,27	11,77
Mittelraum	LB	O	3,94	2,90	0,94	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,10	890,21	40,66	11,84
Mittelraum	LB	O	6,21	2,90	0,40	0,41	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,00	890,65	34,60	11,97
Mittelraum	LB	O	2,69	2,90	0,94	0,19	13,32	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	6,96	2,16	899,93	46,76	11,79
Mittelraum	LB	O	4,46	3,40	0,40	0,41	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,68	907,32	47,83	11,28
Mittelraum	LB	O	4,25	3,40	0,60	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,45	908,06	53,29	11,47
Mittelraum	LB	O	5,69	3,40	0,94	0,19	7,76	3S-WSV	0,49	0,63	71%	43%	4,39	2,53	923,75	30,88	11,42
Mittelraum	LB	O	6,21	3,40	0,40	0,41	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,52	934,41	48,48	11,43
Mittelraum	LB	O	4,46	2,90	0,40	0,41	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,19	946,40	41,85	11,75
Mittelraum	LB	O	3,94	2,90	0,94	0,19	7,79	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	6,76	2,16	955,31	51,10	11,79
Mittelraum	LB	O	3,21	3,40	0,40	0,41	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,35	957,71	66,95	11,58
Mittelraum	LB	O	6,21	2,90	0,40	0,41	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,06	959,96	41,74	11,90
Mittelraum	LB	O	3,94	3,40	0,94	0,19	8,14	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	8,64	2,81	960,84	60,77	11,19
Mittelraum	LB	O	2,69	3,40	0,94	0,19	14,63	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	8,77	2,87	966,32	68,05	11,14
Mittelraum	LB	O	2,69	2,90	0,94	0,19	13,32	2S-SSV	0,23	1,12	37%	40%	6,96	2,22	966,40	57,62	11,71
Mittelraum	LB	O	4,25	3,40	0,60	0,28	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,67	985,82	49,04	10,60
Mittelraum	LB	O	4,46	3,40	0,40	0,41	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	987,70	57,13	11,22
Mittelraum	LB	O	4,25	2,90	0,60	0,28	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,94	994,00	42,28	11,08
Mittelraum	LB	O	3,00	3,40	0,60	0,28	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,77	1.003,59	58,07	10,55
Bottom 10																	
Mittelraum	LB	O	3,21	2,90	0,40	0,41	13,32	2S-WSV	0,74	1,18	81%	40%	6,96	7,82	2.943,55	56,53	9,80
Mittelraum	LB	O	3,00	2,40	0,60	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	6,57	2.955,64	49,13	9,90
Mittelraum	LB	O	4,46	3,40	0,40	0,41	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,24	3.137,74	53,02	9,69
Mittelraum	LB	O	3,21	3,40	0,40	0,41	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	9,54	3.154,05	64,60	9,66
Mittelraum	LB	O	2,69	3,40	0,94	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	9,60	3.313,92	68,60	9,66
Mittelraum	LB	O	3,21	2,40	0,40	0,41	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,88	3.400,54	51,27	9,80
Mittelraum	LB	O	3,00	2,90	0,60	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,37	3.516,72	58,63	9,66
Mittelraum	LB	O	3,00	3,40	0,60	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,60	3.940,04	68,11	9,57
Mittelraum	LB	O	3,21	2,90	0,40	0,41	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	3.959,15	60,72	9,60
Mittelraum	LB	O	3,21	3,40	0,40	0,41	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	4.365,91	71,26	9,52

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	LB	S	6,00	3,40	0,60	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,40	696,32	33,26	11,52
Mittelraum	LB	S	3,94	3,40	0,94	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	2,72	713,17	41,83	11,25
Mittelraum	LB	S	3,94	3,40	0,94	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,17	713,87	29,09	11,77
Mittelraum	LB	S	2,69	3,40	0,94	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	2,78	717,83	48,36	11,21
Mittelraum	LB	S	3,00	3,40	0,60	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,21	721,10	46,38	11,71
Mittelraum	LB	S	5,69	3,40	0,94	0,19	7,76	3S-WSV	0,49	0,63	71%	43%	4,39	2,53	722,94	25,24	11,42
Mittelraum	LB	S	3,94	2,90	0,94	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,10	729,19	36,44	11,84
Mittelraum	LB	S	2,69	2,90	0,94	0,19	13,32	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	6,96	2,16	735,44	42,17	11,79
Mittelraum	LB	S	4,25	3,40	0,60	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,63	736,15	39,13	11,31
Mittelraum	LB	S	6,00	3,40	0,60	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,23	749,97	41,23	11,68
Mittelraum	LB	S	3,94	3,40	0,94	0,19	8,14	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	8,64	2,81	761,58	53,72	11,19
Mittelraum	LB	S	3,94	2,90	0,94	0,19	7,79	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	6,76	2,16	762,61	45,88	11,79
Mittelraum	LB	S	2,69	3,40	0,94	0,19	14,63	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	8,77	2,87	765,83	60,56	11,14
Mittelraum	LB	S	4,25	2,90	0,60	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,11	766,61	34,54	11,81
Mittelraum	LB	S	3,00	3,40	0,60	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,05	769,08	53,70	11,89
Mittelraum	LB	S	2,69	2,90	0,94	0,19	13,32	2S-SSV	0,23	1,12	37%	40%	6,96	2,22	769,15	52,01	11,71
Mittelraum	LB	S	6,21	3,40	0,40	0,41	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,44	771,44	34,43	11,50
Mittelraum	LB	S	6,21	3,40	0,40	0,41	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,16	780,76	27,89	11,78
Mittelraum	LB	S	4,25	3,40	0,60	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,45	791,06	47,31	11,47
Mittelraum	LB	S	6,21	2,90	0,40	0,41	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,00	803,60	30,69	11,97
Mittelraum	LB	S	2,69	2,90	0,94	0,19	10,71	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	9,57	3,02	813,78	47,19	11,03
Mittelraum	LB	S	3,21	3,40	0,40	0,41	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,27	814,96	52,93	11,66
Mittelraum	LB	S	4,46	3,40	0,40	0,41	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,68	821,92	42,30	11,28
Mittelraum	LB	S	2,69	2,90	0,94	0,19	16,10	3S-WSV	0,49	0,63	71%	24%	4,18	2,57	829,40	32,27	11,39
Mittelraum	LB	S	2,69	3,40	0,94	0,19	11,16	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	12,24	3,89	830,77	54,60	10,52
Mittelraum	LB	S	6,00	3,40	0,60	0,28	9,40	2S-WSV	0,74	1,18	81%	27%	2,75	2,06	835,49	26,67	11,88
Mittelraum	LB	S	6,21	3,40	0,40	0,41	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,52	839,07	42,34	11,43
Mittelraum	LB	S	4,25	3,40	0,60	0,28	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,67	842,07	42,44	10,60
Mittelraum	LB	S	4,25	2,90	0,60	0,28	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,94	843,44	37,21	11,08
Mittelraum	LB	S	2,69	3,40	0,94	0,19	17,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	5,51	3,33	847,66	35,83	10,81
Bottom 10																		
Mittelraum	LB	S	4,46	2,90	0,40	0,41	7,79	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	6,76	7,54	2.285,85	31,86	9,81
Mittelraum	LB	S	3,21	3,40	0,40	0,41	11,16	3S-WSV	0,49	0,63	71%	60%	12,24	11,20	2.308,42	41,04	9,59
Mittelraum	LB	S	3,21	2,90	0,40	0,41	13,32	2S-WSV	0,74	1,18	81%	40%	6,96	7,82	2.348,21	40,15	9,80
Mittelraum	LB	S	3,00	2,90	0,60	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,37	2.485,97	40,79	9,66
Mittelraum	LB	S	3,21	2,40	0,40	0,41	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,88	2.529,19	36,20	9,80
Mittelraum	LB	S	4,46	3,40	0,40	0,41	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,24	2.553,95	36,03	9,69
Mittelraum	LB	S	3,21	3,40	0,40	0,41	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	9,54	2.589,82	45,43	9,66
Mittelraum	LB	S	3,00	3,40	0,60	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,60	2.968,10	47,25	9,57
Mittelraum	LB	S	3,21	2,90	0,40	0,41	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	3.137,83	42,22	9,60
Mittelraum	LB	S	3,21	3,40	0,40	0,41	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	3.621,27	48,68	9,52

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster						Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	LB	W	6,00	3,40	0,60	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,40	817,18	37,38	11,52
Mittelraum	LB	W	3,00	3,40	0,60	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,21	829,73	50,80	11,71
Mittelraum	LB	W	4,25	3,40	0,60	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,63	862,12	43,60	11,31
Mittelraum	LB	W	6,21	3,40	0,40	0,41	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,44	882,23	38,97	11,50
Mittelraum	LB	W	4,25	2,90	0,60	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,11	892,55	38,02	11,81
Mittelraum	LB	W	6,00	3,40	0,60	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,23	893,61	46,32	11,68
Mittelraum	LB	W	3,00	3,40	0,60	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,05	897,98	59,02	11,89
Mittelraum	LB	W	3,94	3,40	0,94	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	2,72	908,45	47,03	11,25
Mittelraum	LB	W	3,94	2,90	0,94	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,10	909,21	40,27	11,84
Mittelraum	LB	W	6,21	3,40	0,40	0,41	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,16	909,43	32,51	11,78
Mittelraum	LB	W	6,21	2,90	0,40	0,41	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,00	912,66	34,24	11,97
Mittelraum	LB	W	3,94	3,40	0,94	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,17	913,58	33,90	11,77
Mittelraum	LB	W	3,21	3,40	0,40	0,41	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,27	913,83	58,06	11,66
Mittelraum	LB	W	2,69	3,40	0,94	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	2,78	914,42	53,92	11,21
Mittelraum	LB	W	2,69	2,90	0,94	0,19	13,32	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	6,96	2,16	919,29	46,35	11,79
Mittelraum	LB	W	4,46	3,40	0,40	0,41	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,68	936,45	47,32	11,28
Mittelraum	LB	W	4,25	3,40	0,60	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,45	940,24	52,79	11,47
Mittelraum	LB	W	5,69	3,40	0,94	0,19	7,76	3S-WSV	0,49	0,63	71%	43%	4,39	2,53	950,12	30,47	11,42
Mittelraum	LB	W	6,21	3,40	0,40	0,41	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,52	969,04	47,93	11,43
Mittelraum	LB	W	4,46	2,90	0,40	0,41	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,19	969,73	41,44	11,75
Mittelraum	LB	W	3,94	2,90	0,94	0,19	7,79	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	6,76	2,16	979,14	50,68	11,79
Mittelraum	LB	W	6,21	2,90	0,40	0,41	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,06	987,28	41,32	11,90
Mittelraum	LB	W	3,21	3,40	0,40	0,41	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,35	989,95	66,37	11,58
Mittelraum	LB	W	2,69	2,90	0,94	0,19	13,32	2S-SSV	0,23	1,12	37%	40%	6,96	2,22	990,72	57,17	11,71
Mittelraum	LB	W	3,94	3,40	0,94	0,19	8,14	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	8,64	2,81	996,04	60,23	11,19
Mittelraum	LB	W	2,69	3,40	0,94	0,19	14,63	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	8,77	2,87	1.002,60	67,42	11,14
Mittelraum	LB	W	4,25	2,90	0,60	0,28	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,94	1.021,70	41,81	11,08
Mittelraum	LB	W	4,25	3,40	0,60	0,28	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,67	1.022,51	48,45	10,60
Mittelraum	LB	W	4,46	3,40	0,40	0,41	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	1.025,22	56,54	11,22
Mittelraum	LB	W	4,25	2,40	0,60	0,28	7,43	3S-SSV	0,20	0,62	36%	48%	4,88	2,08	1.030,85	35,03	11,84
Bottom 10																	
Mittelraum	LB	W	3,00	2,40	0,60	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	6,57	3.059,08	47,71	9,90
Mittelraum	LB	W	3,21	2,90	0,40	0,41	13,32	2S-WSV	0,74	1,18	81%	40%	6,96	7,82	3.078,88	54,82	9,80
Mittelraum	LB	W	4,46	3,40	0,40	0,41	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,24	3.312,92	51,19	9,69
Mittelraum	LB	W	3,21	3,40	0,40	0,41	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	9,54	3.330,51	62,54	9,66
Mittelraum	LB	W	2,69	3,40	0,94	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	9,60	3.494,17	66,47	9,66
Mittelraum	LB	W	3,21	2,40	0,40	0,41	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,88	3.542,76	49,71	9,80
Mittelraum	LB	W	3,00	2,90	0,60	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,37	3.695,59	56,73	9,66
Mittelraum	LB	W	3,21	2,90	0,40	0,41	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	4.186,35	58,65	9,60
Mittelraum	LB	W	3,00	3,40	0,60	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,60	4.195,89	65,74	9,57
Mittelraum	LB	W	3,21	3,40	0,40	0,41	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	4.679,49	69,26	9,52

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster						Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	HM	N	2,80	3,40	0,62	0,19	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,02	983,16	58,31	11,95
Mittelraum	HM	N	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,54	989,41	54,56	11,39
Mittelraum	HM	N	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,13	994,88	37,92	11,82
Mittelraum	HM	N	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,33	998,85	43,37	11,60
Mittelraum	HM	N	3,14	3,40	0,28	0,41	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,46	1.021,01	63,41	11,48
Mittelraum	HM	N	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,71	1.028,23	39,41	11,23
Mittelraum	HM	N	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,34	1.030,63	64,03	11,57
Mittelraum	HM	N	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,19	1.032,87	48,55	11,75
Mittelraum	HM	N	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,99	1.034,90	46,51	11,04
Mittelraum	HM	N	6,00	3,40	0,40	0,28	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,10	1.036,47	29,95	11,82
Mittelraum	HM	N	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,41	1.036,77	54,19	11,53
Mittelraum	HM	N	3,00	2,90	0,40	0,28	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,09	1.044,69	46,35	11,83
Mittelraum	HM	N	6,14	3,40	0,28	0,41	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,62	1.056,69	41,62	11,33
Mittelraum	HM	N	3,14	3,40	0,28	0,41	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,54	1.061,69	73,00	11,41
Mittelraum	HM	N	4,39	3,40	0,28	0,41	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,88	1.065,79	51,23	11,13
Mittelraum	HM	N	6,14	3,40	0,28	0,41	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,41	1.069,58	34,18	11,53
Mittelraum	HM	N	3,14	2,90	0,28	0,41	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,06	1.073,69	54,20	11,90
Mittelraum	HM	N	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,51	1.075,47	49,82	11,42
Mittelraum	HM	N	2,80	3,40	0,62	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,35	1.079,64	58,33	10,80
Mittelraum	HM	N	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	1.082,88	57,12	11,20
Mittelraum	HM	N	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,23	1.089,60	33,78	11,68
Mittelraum	HM	N	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,45	1.096,45	39,93	11,47
Mittelraum	HM	N	4,05	3,40	0,62	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,27	1.099,73	50,48	10,88
Mittelraum	HM	N	4,05	3,40	0,62	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,82	1.103,27	35,24	11,18
Mittelraum	HM	N	6,14	3,40	0,28	0,41	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,70	1.105,13	52,13	11,26
Mittelraum	HM	N	3,14	2,90	0,28	0,41	16,10	2S-SSV	0,23	1,12	37%	24%	4,18	2,12	1.107,90	61,47	11,82
Mittelraum	HM	N	4,39	3,40	0,28	0,41	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,97	1.113,07	61,91	11,07
Mittelraum	HM	N	6,14	2,90	0,28	0,41	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,17	1.117,24	35,92	11,77
Mittelraum	HM	N	5,80	3,40	0,62	0,19	9,40	2S-WSV	0,74	1,18	81%	27%	2,75	2,02	1.121,15	31,31	11,95
Mittelraum	HM	N	4,39	2,90	0,28	0,41	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,40	1.125,71	44,19	11,54
Bottom 10																	
Mittelraum	HM	N	3,14	3,40	0,28	0,41	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	10,20	2.439,90	81,34	9,63
Mittelraum	HM	N	4,39	3,40	0,28	0,41	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,89	2.492,29	60,71	9,65
Mittelraum	HM	N	3,00	2,40	0,40	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,89	2.645,03	53,73	9,78
Mittelraum	HM	N	2,80	2,90	0,62	0,19	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,24	2.659,62	68,46	9,69
Mittelraum	HM	N	3,14	2,40	0,28	0,41	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	8,75	2.769,56	57,33	9,72
Mittelraum	HM	N	2,80	3,40	0,62	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,50	2.846,37	86,93	9,59
Mittelraum	HM	N	3,00	2,90	0,40	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	2.893,21	71,05	9,59
Mittelraum	HM	N	3,14	2,90	0,28	0,41	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	11,60	3.021,10	75,97	9,58
Mittelraum	HM	N	3,00	3,40	0,40	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	3.087,43	88,21	9,50
Mittelraum	HM	N	3,14	3,40	0,28	0,41	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,90	3.219,56	99,44	9,50

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster						Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	HM	O	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,13	1.229,00	36,69	11,82
Mittelraum	HM	O	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,33	1.242,49	42,02	11,60
Mittelraum	HM	O	2,80	3,40	0,62	0,19	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,02	1.246,74	56,62	11,95
Mittelraum	HM	O	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,54	1.260,38	52,83	11,39
Mittelraum	HM	O	3,00	2,90	0,40	0,28	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,09	1.287,48	45,05	11,83
Mittelraum	HM	O	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,71	1.301,19	37,92	11,23
Mittelraum	HM	O	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,19	1.311,31	46,95	11,75
Mittelraum	HM	O	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,99	1.322,35	44,82	11,04
Mittelraum	HM	O	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,41	1.324,96	52,45	11,53
Mittelraum	HM	O	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,23	1.334,08	32,65	11,68
Mittelraum	HM	O	3,14	3,40	0,28	0,41	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,46	1.334,43	61,28	11,48
Mittelraum	HM	O	6,00	3,40	0,40	0,28	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,10	1.334,50	28,77	11,82
Mittelraum	HM	O	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,34	1.346,43	61,89	11,57
Mittelraum	HM	O	6,14	3,40	0,28	0,41	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,62	1.357,89	39,92	11,33
Mittelraum	HM	O	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,45	1.359,89	38,63	11,47
Mittelraum	HM	O	3,14	2,90	0,28	0,41	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,06	1.362,45	52,56	11,90
Mittelraum	HM	O	4,39	3,40	0,28	0,41	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,88	1.387,87	49,26	11,13
Mittelraum	HM	O	6,14	2,90	0,28	0,41	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,17	1.393,30	34,62	11,77
Mittelraum	HM	O	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,51	1.402,15	47,87	11,42
Mittelraum	HM	O	6,14	3,40	0,28	0,41	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,41	1.410,26	32,66	11,53
Mittelraum	HM	O	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,07	1.422,56	40,40	11,85
Mittelraum	HM	O	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	1.423,05	54,97	11,20
Mittelraum	HM	O	3,14	3,40	0,28	0,41	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,54	1.424,59	70,38	11,41
Mittelraum	HM	O	2,80	3,40	0,62	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,35	1.426,23	56,16	10,80
Mittelraum	HM	O	4,39	2,90	0,28	0,41	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,40	1.426,84	42,65	11,54
Mittelraum	HM	O	2,80	2,90	0,62	0,19	13,32	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	6,96	2,70	1.433,68	47,75	11,26
Mittelraum	HM	O	4,05	2,90	0,62	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,61	1.435,82	41,03	11,35
Mittelraum	HM	O	4,05	3,40	0,62	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,27	1.436,36	48,52	10,88
Mittelraum	HM	O	3,14	2,90	0,28	0,41	16,10	2S-SSV	0,23	1,12	37%	24%	4,18	2,12	1.438,54	59,49	11,82
Mittelraum	HM	O	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	2S-SSV	0,23	1,12	37%	40%	4,91	2,27	1.449,25	46,67	11,64
Bottom 10																	
Mittelraum	HM	O	3,00	2,40	0,40	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,89	4.350,70	49,02	9,78
Mittelraum	HM	O	3,14	3,40	0,28	0,41	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	10,20	4.399,00	68,61	9,63
Mittelraum	HM	O	4,39	3,40	0,28	0,41	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,89	4.472,58	54,54	9,65
Mittelraum	HM	O	2,80	2,90	0,62	0,19	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,24	4.519,83	60,21	9,69
Mittelraum	HM	O	3,14	2,40	0,28	0,41	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	8,75	4.721,54	52,09	9,72
Mittelraum	HM	O	2,80	3,40	0,62	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,50	5.138,47	74,40	9,59
Mittelraum	HM	O	3,00	2,90	0,40	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	5.143,75	61,65	9,59
Mittelraum	HM	O	3,14	2,90	0,28	0,41	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	11,60	5.512,46	65,87	9,58
Mittelraum	HM	O	3,00	3,40	0,40	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	5.772,50	74,99	9,50
Mittelraum	HM	O	3,14	3,40	0,28	0,41	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,90	6.138,65	81,75	9,50

Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

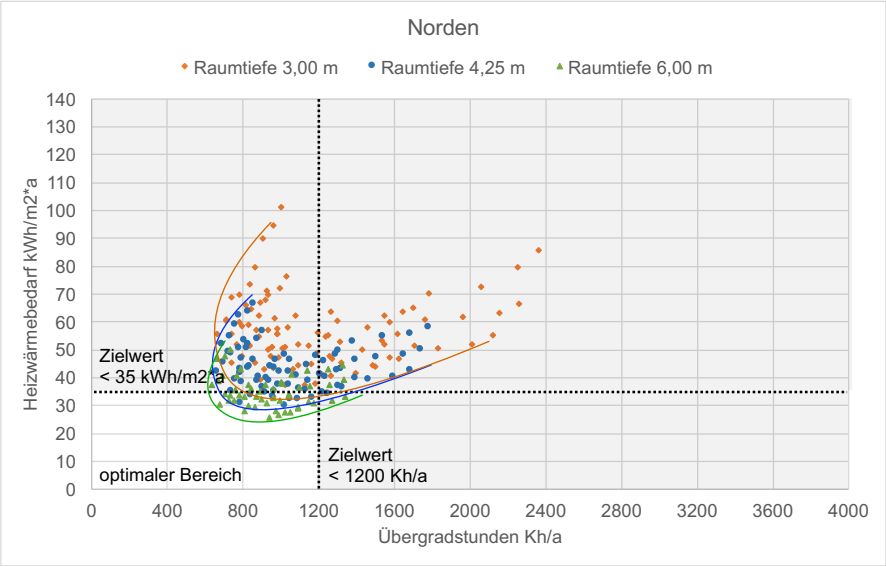
Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster							Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																		
Mittelraum	HM	S	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,13	1.108,42	31,80	11,82
Mittelraum	HM	S	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,33	1.122,34	36,77	11,60
Mittelraum	HM	S	2,80	3,40	0,62	0,19	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,02	1.127,33	50,49	11,95
Mittelraum	HM	S	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,19	1.172,46	40,87	11,75
Mittelraum	HM	S	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,54	1.177,47	46,95	11,39
Mittelraum	HM	S	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,41	1.187,24	46,00	11,53
Mittelraum	HM	S	3,00	2,90	0,40	0,28	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,09	1.200,48	40,59	11,83
Mittelraum	HM	S	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,71	1.204,43	32,50	11,23
Mittelraum	HM	S	6,00	3,40	0,40	0,28	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,10	1.208,53	23,54	11,82
Mittelraum	HM	S	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,99	1.226,57	38,94	11,04
Mittelraum	HM	S	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,23	1.231,76	28,47	11,68
Mittelraum	HM	S	2,80	2,90	0,62	0,19	13,32	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	6,96	2,70	1.250,65	41,86	11,26
Mittelraum	HM	S	4,05	2,90	0,62	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,61	1.253,98	35,64	11,35
Mittelraum	HM	S	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,45	1.255,21	34,04	11,47
Mittelraum	HM	S	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,34	1.256,40	54,88	11,57
Mittelraum	HM	S	4,05	2,90	0,62	0,19	11,60	3S-WSV	0,49	0,63	71%	24%	2,95	2,24	1.258,25	24,43	11,69
Mittelraum	HM	S	2,80	3,40	0,62	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,35	1.259,67	48,55	10,80
Mittelraum	HM	S	3,14	3,40	0,28	0,41	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,46	1.266,56	54,62	11,48
Mittelraum	HM	S	4,05	3,40	0,62	0,19	8,14	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	8,64	3,27	1.268,50	41,43	10,88
Mittelraum	HM	S	4,05	3,40	0,62	0,19	12,89	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	3,89	2,82	1.270,58	27,13	11,18
Mittelraum	HM	S	6,14	3,40	0,28	0,41	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,62	1.280,05	34,14	11,33
Mittelraum	HM	S	5,80	3,40	0,62	0,19	9,40	2S-WSV	0,74	1,18	81%	27%	2,75	2,02	1.286,80	23,78	11,95
Mittelraum	HM	S	3,14	2,90	0,28	0,41	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,06	1.290,21	47,41	11,90
Mittelraum	HM	S	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,51	1.297,00	41,23	11,42
Mittelraum	HM	S	6,14	3,40	0,28	0,41	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,41	1.301,16	26,74	11,53
Mittelraum	HM	S	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,07	1.306,73	35,27	11,85
Mittelraum	HM	S	6,14	2,90	0,28	0,41	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,17	1.309,27	30,08	11,77
Mittelraum	HM	S	4,39	3,40	0,28	0,41	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,88	1.310,71	42,83	11,13
Mittelraum	HM	S	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	1.319,77	47,85	11,20
Mittelraum	HM	S	2,80	2,90	0,62	0,19	13,32	2S-SSV	0,23	1,12	37%	40%	6,96	2,78	1.320,38	52,30	11,21
Bottom 10																		
Mittelraum	HM	S	3,14	2,90	0,28	0,41	13,32	2S-WSV	0,74	1,18	81%	40%	6,96	8,54	3.711,52	44,55	9,74
Mittelraum	HM	S	4,25	3,40	0,40	0,28	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,23	3.746,42	39,88	9,67
Mittelraum	HM	S	3,14	2,40	0,28	0,41	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	8,75	4.113,70	39,46	9,72
Mittelraum	HM	S	3,14	3,40	0,28	0,41	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	10,20	4.144,54	51,86	9,63
Mittelraum	HM	S	4,39	3,40	0,28	0,41	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,89	4.208,11	41,41	9,65
Mittelraum	HM	S	2,80	3,40	0,62	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,50	4.278,78	54,48	9,59
Mittelraum	HM	S	3,00	2,90	0,40	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	4.491,81	45,93	9,59
Mittelraum	HM	S	3,14	2,90	0,28	0,41	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	11,60	5.155,46	48,46	9,58
Mittelraum	HM	S	3,00	3,40	0,40	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	5.374,75	55,63	9,50
Mittelraum	HM	S	3,14	3,40	0,28	0,41	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,90	6.047,09	59,02	9,50

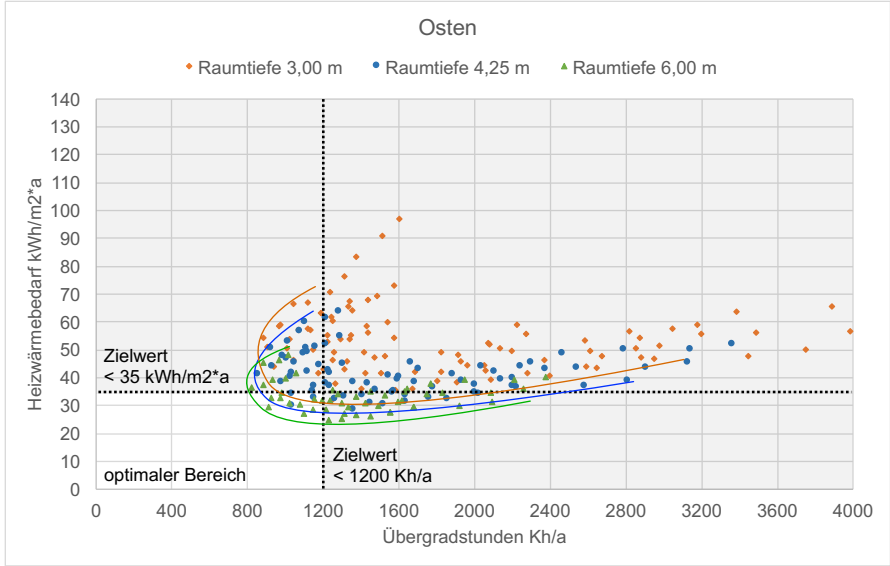
Simulationsergebnisse sortiert nach Übergradstunden

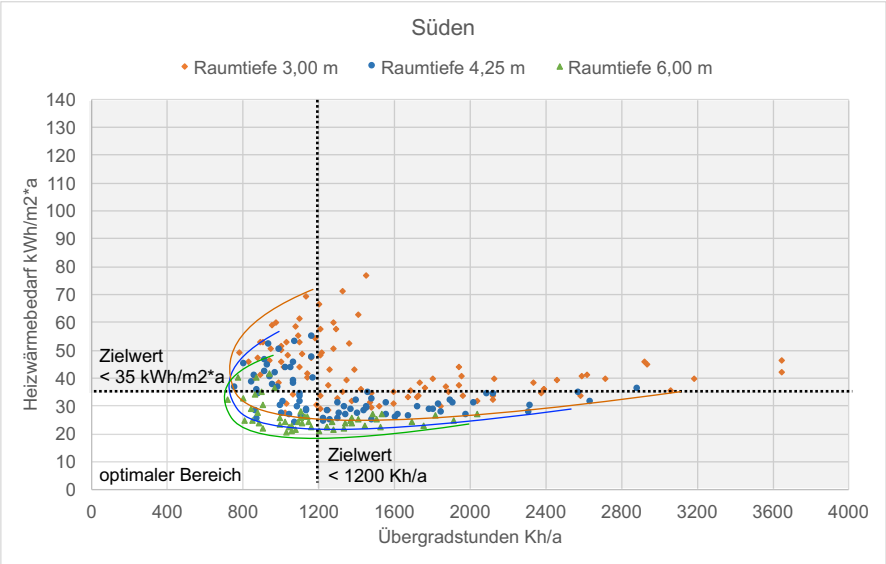
Raum / Material / Ausrich			Geometrie		Außenwand			Fenster						Simulation			
Raum	Bauweise	Himmelsrichtung	Raumtiefe in m	Raumhöhe in m	Wanddicke/ Laibungstiefe in m	U-Wert Außenwand in W/m2*K	Fläche Außenwand im m	Typ Verglasung	g-Wert = Energiedurchlassgrad (Licht+Wärme)	U-Wert Glas in W/m2*K	T-Vis Lichtdurch-lässigkeit	Fensterflächenanteil in %	Fensterfläche in m2	Daylightfaktor	Überhitzung in Kh Grenzwert 1.200	Heizwärmebedarf in kWh/M2*a	Bedarf elektrisches Licht in kWh/m2*a
Top 30																	
Mittelraum	HM	W	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,13	1.287,17	36,34	11,82
Mittelraum	HM	W	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,33	1.303,69	41,60	11,60
Mittelraum	HM	W	2,80	3,40	0,62	0,19	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,02	1.313,57	56,15	11,95
Mittelraum	HM	W	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,54	1.322,97	52,31	11,39
Mittelraum	HM	W	3,00	2,90	0,40	0,28	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,09	1.335,15	44,66	11,83
Mittelraum	HM	W	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,71	1.370,23	37,49	11,23
Mittelraum	HM	W	5,80	3,40	0,62	0,19	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,19	1.385,57	46,52	11,75
Mittelraum	HM	W	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,23	1.388,50	32,32	11,68
Mittelraum	HM	W	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,99	1.394,40	44,32	11,04
Mittelraum	HM	W	3,14	3,40	0,28	0,41	17,89	3S-SSV	0,20	0,62	36%	27%	5,51	2,46	1.397,28	60,65	11,48
Mittelraum	HM	W	6,00	3,40	0,40	0,28	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,10	1.397,81	28,38	11,82
Mittelraum	HM	W	4,05	3,40	0,62	0,19	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,41	1.402,74	51,96	11,53
Mittelraum	HM	W	3,14	2,90	0,28	0,41	16,10	3S-SSV	0,20	0,62	36%	24%	4,18	2,06	1.409,82	52,08	11,90
Mittelraum	HM	W	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,45	1.417,65	38,24	11,47
Mittelraum	HM	W	3,00	3,40	0,40	0,28	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,34	1.425,83	61,31	11,57
Mittelraum	HM	W	6,14	3,40	0,28	0,41	6,03	3S-SSV	0,20	0,62	36%	60%	6,12	2,62	1.432,98	39,44	11,33
Mittelraum	HM	W	6,14	2,90	0,28	0,41	5,75	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	4,79	2,17	1.452,17	34,24	11,77
Mittelraum	HM	W	4,39	3,40	0,28	0,41	10,59	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	6,19	2,88	1.464,08	48,69	11,13
Mittelraum	HM	W	6,14	3,40	0,28	0,41	9,40	3S-WSV	0,49	0,63	71%	27%	2,75	2,41	1.477,85	32,17	11,53
Mittelraum	HM	W	4,39	2,90	0,28	0,41	9,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	4,91	2,40	1.487,38	42,19	11,54
Mittelraum	HM	W	6,00	3,40	0,40	0,28	6,03	2S-SSV	0,23	1,12	37%	60%	6,12	2,51	1.491,09	47,35	11,42
Mittelraum	HM	W	6,00	2,90	0,40	0,28	5,75	2S-SSV	0,23	1,12	37%	55%	4,79	2,07	1.491,25	40,02	11,85
Mittelraum	HM	W	3,14	2,90	0,28	0,41	16,10	2S-SSV	0,23	1,12	37%	24%	4,18	2,12	1.498,97	58,94	11,82
Mittelraum	HM	W	2,80	2,90	0,62	0,19	13,32	3S-SSV	0,20	0,62	36%	40%	6,96	2,70	1.504,46	47,25	11,26
Mittelraum	HM	W	4,05	2,90	0,62	0,19	7,79	3S-SSV	0,20	0,62	36%	55%	6,76	2,61	1.504,49	40,62	11,35
Mittelraum	HM	W	3,14	3,40	0,28	0,41	17,89	2S-SSV	0,23	1,12	37%	27%	5,51	2,54	1.505,71	69,68	11,41
Mittelraum	HM	W	4,25	3,40	0,40	0,28	10,59	2S-SSV	0,23	1,12	37%	43%	6,19	2,77	1.514,45	54,39	11,20
Mittelraum	HM	W	4,05	2,90	0,62	0,19	11,60	3S-WSV	0,49	0,63	71%	24%	2,95	2,24	1.516,87	29,03	11,69
Mittelraum	HM	W	2,80	3,40	0,62	0,19	14,63	3S-SSV	0,20	0,62	36%	43%	8,77	3,35	1.519,68	55,51	10,80
Mittelraum	HM	W	4,25	2,90	0,40	0,28	9,63	2S-SSV	0,23	1,12	37%	40%	4,91	2,27	1.521,80	46,22	11,64
Bottom 10																	
Mittelraum	HM	W	3,00	2,40	0,40	0,28	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	7,89	4.792,66	47,72	9,78
Mittelraum	HM	W	3,14	3,40	0,28	0,41	14,63	2S-WSV	0,74	1,18	81%	43%	8,77	10,20	5.035,03	66,96	9,63
Mittelraum	HM	W	2,80	2,90	0,62	0,19	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	9,24	5.098,78	58,89	9,69
Mittelraum	HM	W	4,39	3,40	0,28	0,41	8,14	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	8,64	9,89	5.117,07	53,12	9,65
Mittelraum	HM	W	3,14	2,40	0,28	0,41	10,25	2S-WSV	0,74	1,18	81%	48%	6,91	8,75	5.246,42	50,64	9,72
Mittelraum	HM	W	3,00	2,90	0,40	0,28	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	10,70	5.887,70	60,76	9,59
Mittelraum	HM	W	2,80	3,40	0,62	0,19	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	11,50	5.981,24	74,18	9,59
Mittelraum	HM	W	3,14	2,90	0,28	0,41	10,71	2S-WSV	0,74	1,18	81%	55%	9,57	11,60	6.344,75	65,08	9,58
Mittelraum	HM	W	3,00	3,40	0,40	0,28	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,00	6.784,47	76,17	9,50
Mittelraum	HM	W	3,14	3,40	0,28	0,41	11,16	2S-WSV	0,74	1,18	81%	60%	12,24	13,90	7.239,89	79,39	9,50

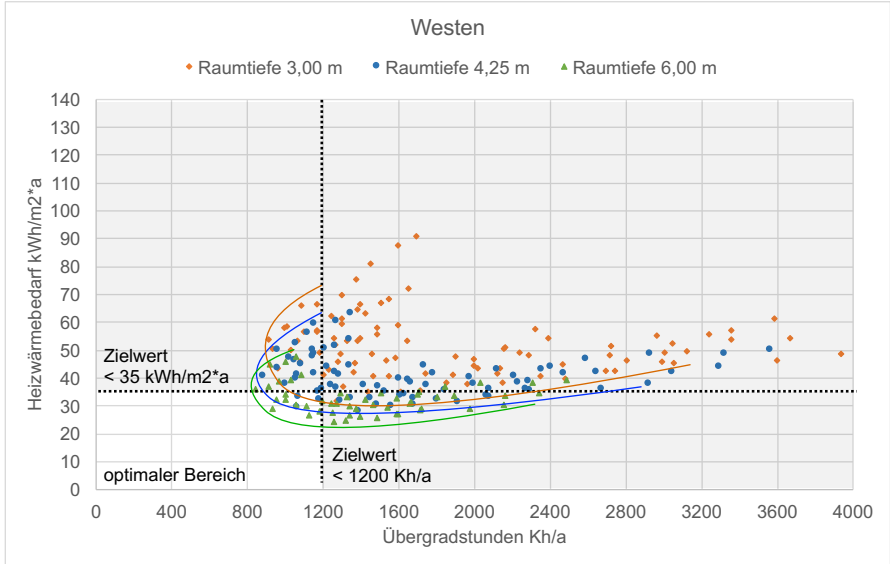
Mauerwerk, Mittelraum

Raumtiefe



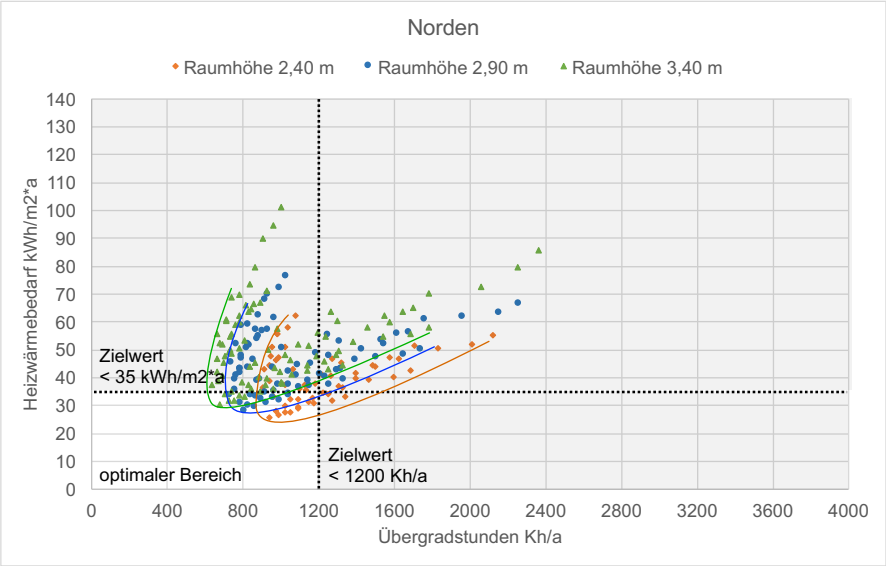


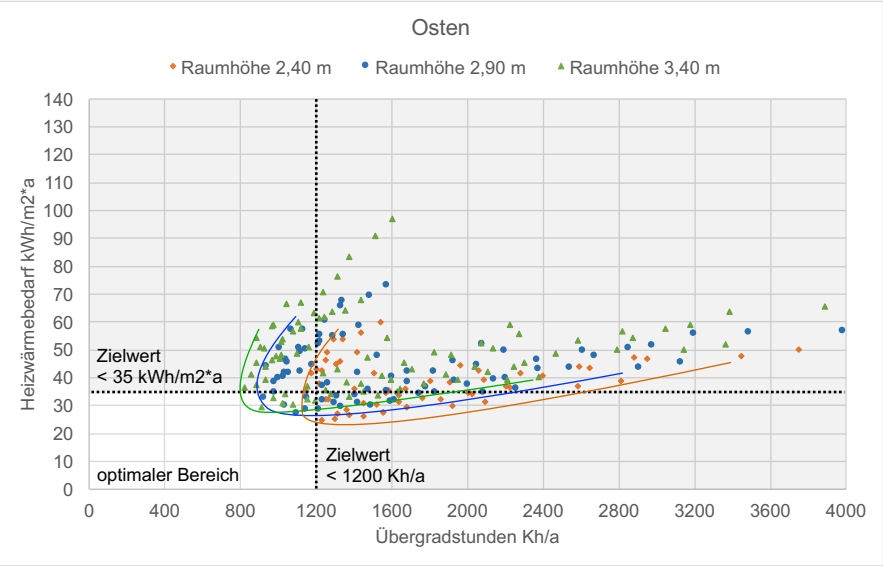


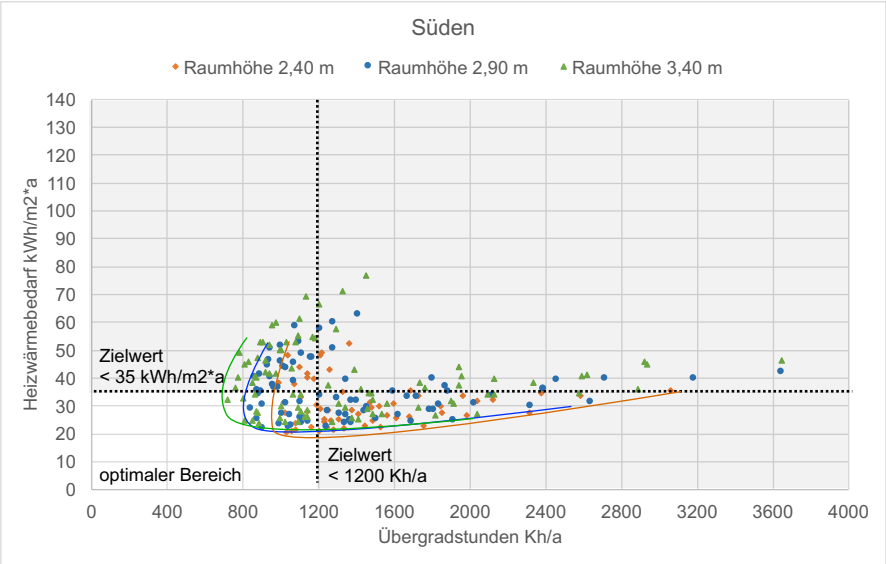


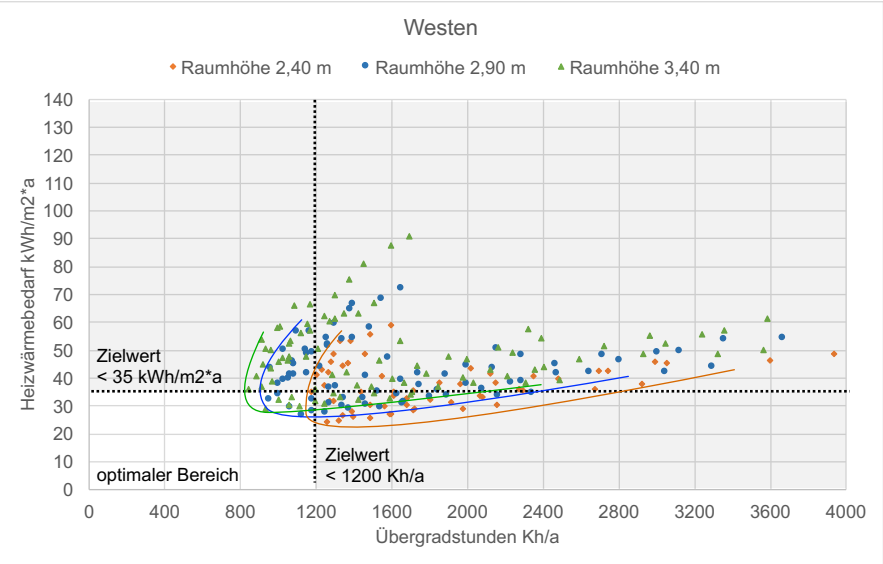
Mauerwerk, Mittelraum

Raumhöhe



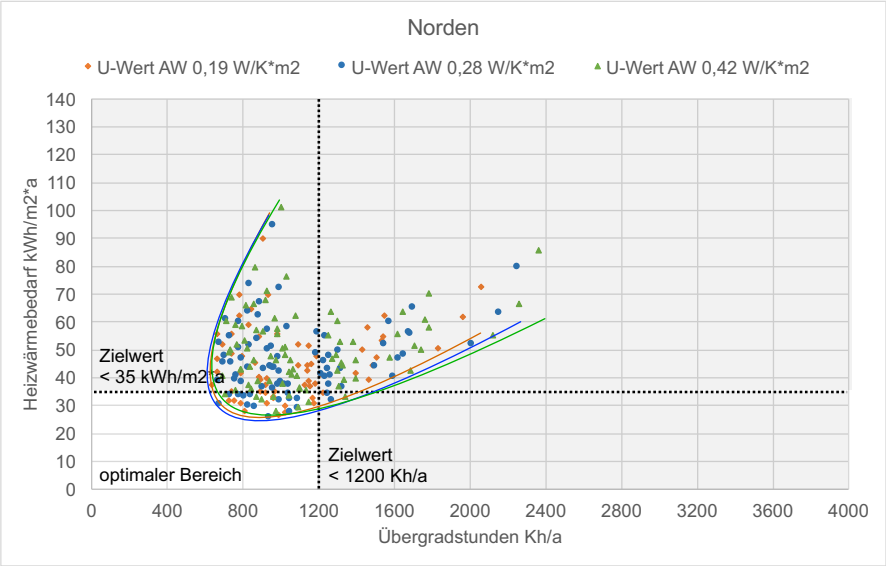


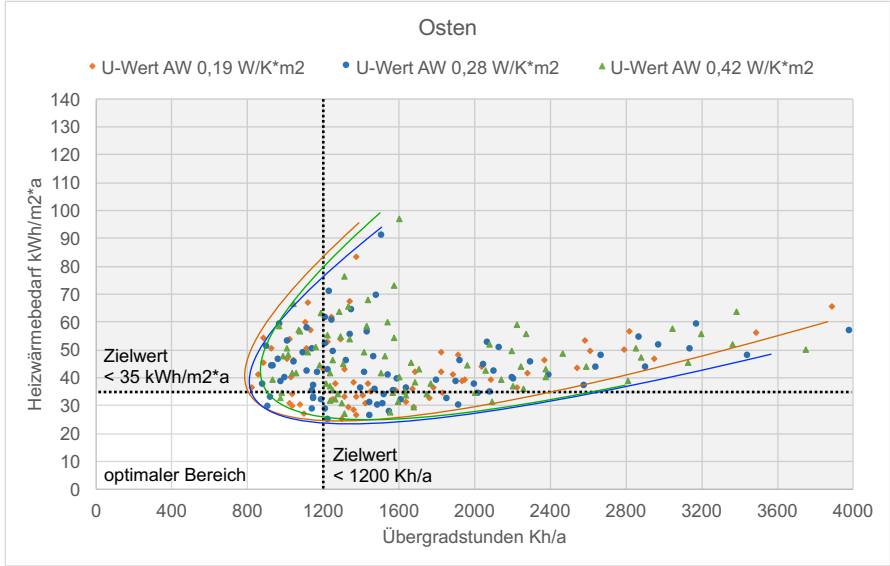


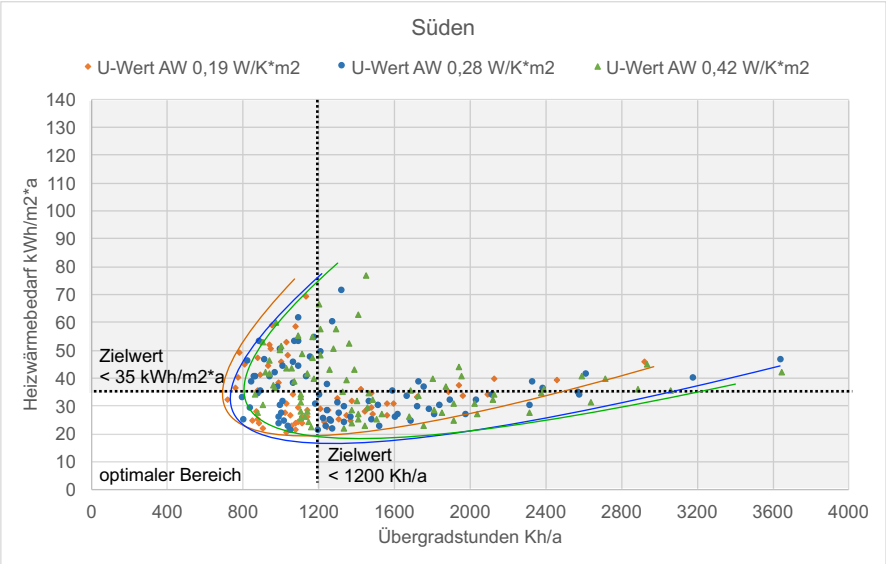


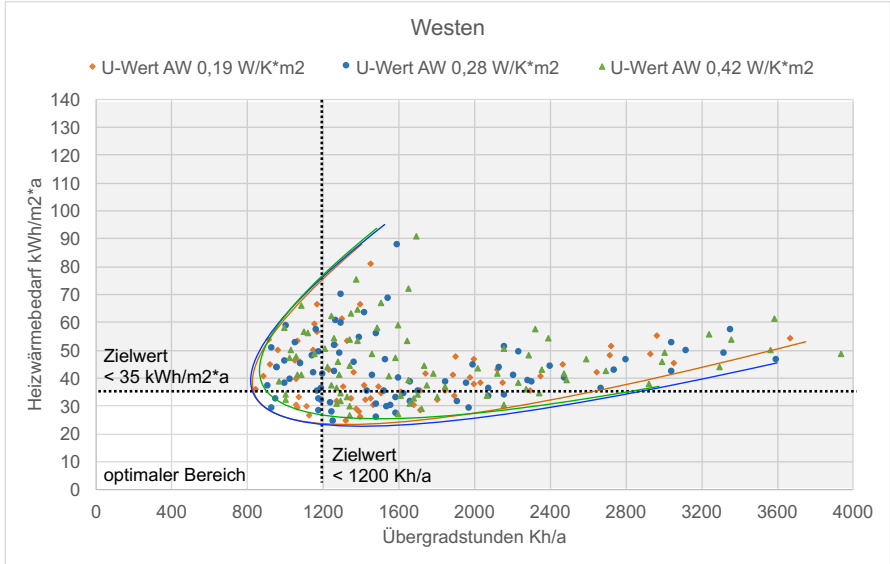
Mauerwerk, Mittelraum

U-Wert Außenwand (AW)



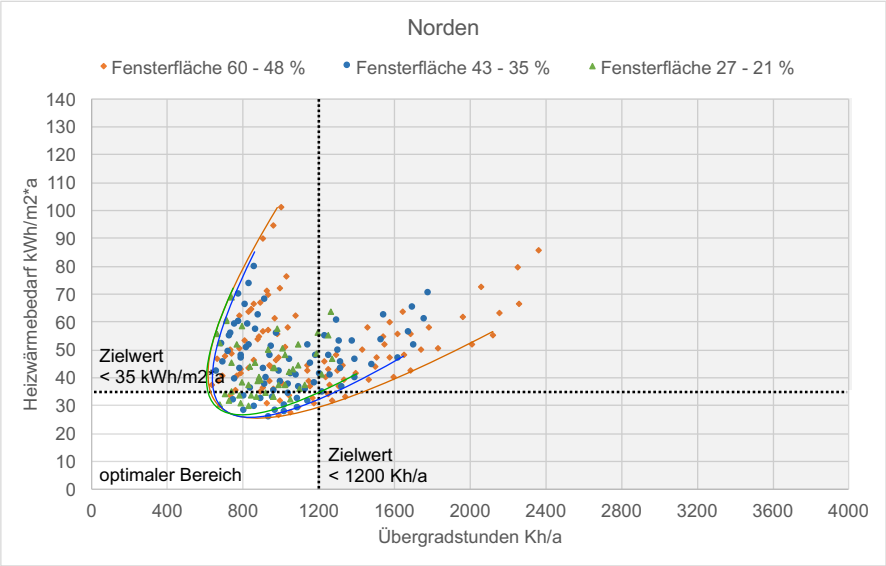


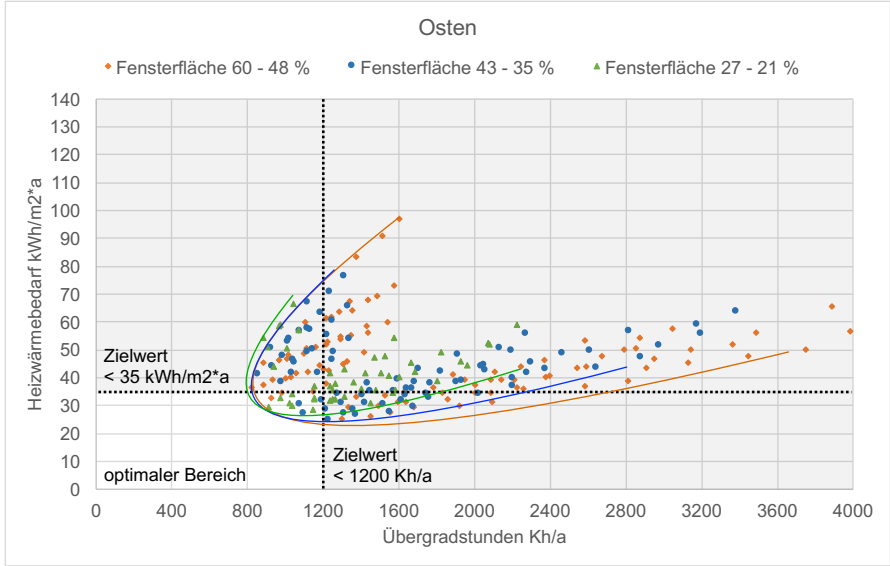


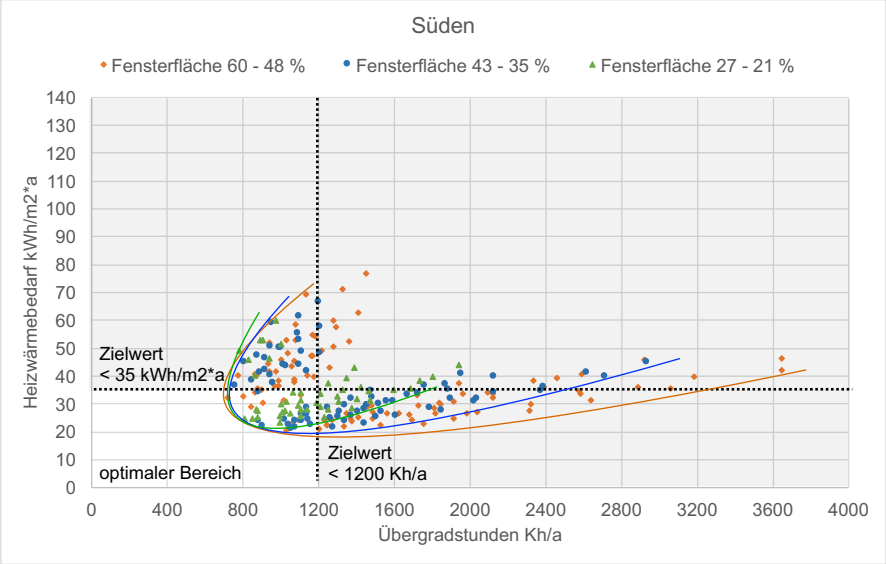


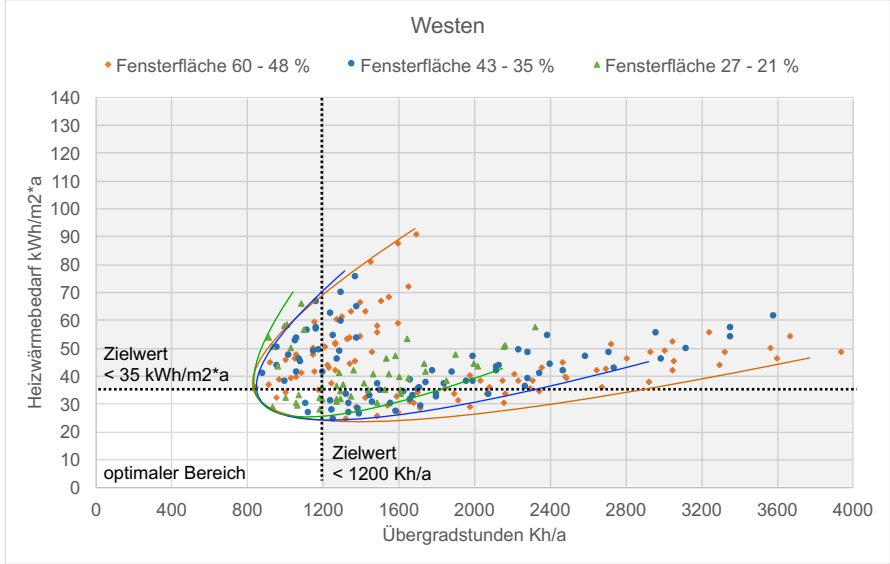
Mauerwerk, Mittelraum

Fensterflächenanteil



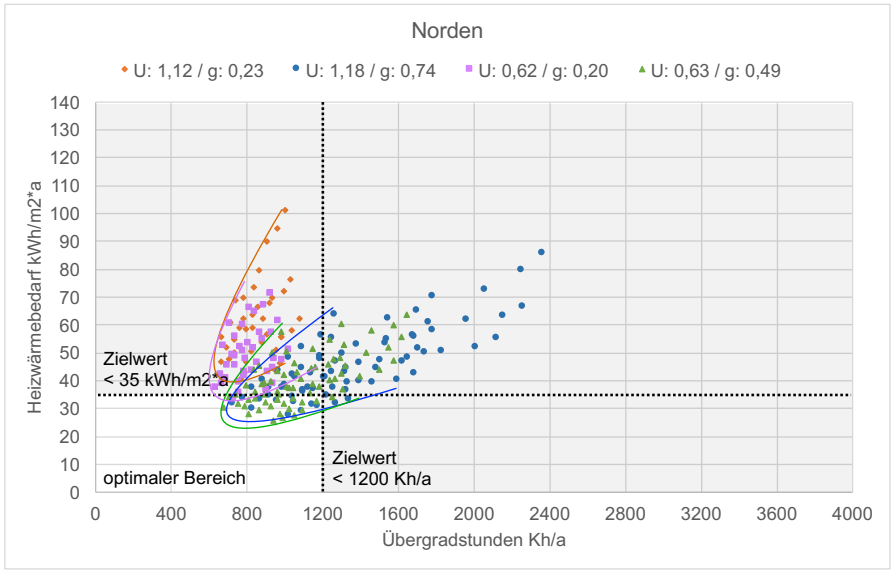


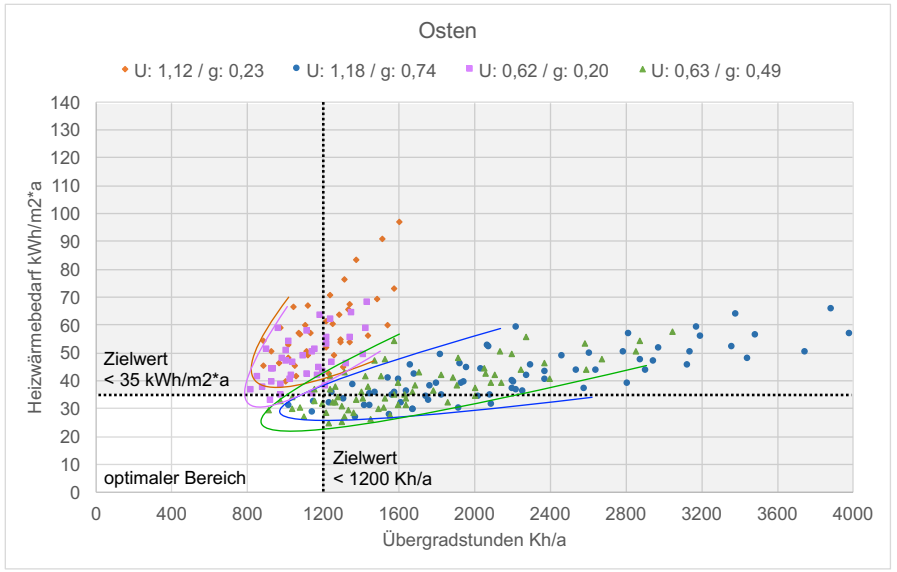


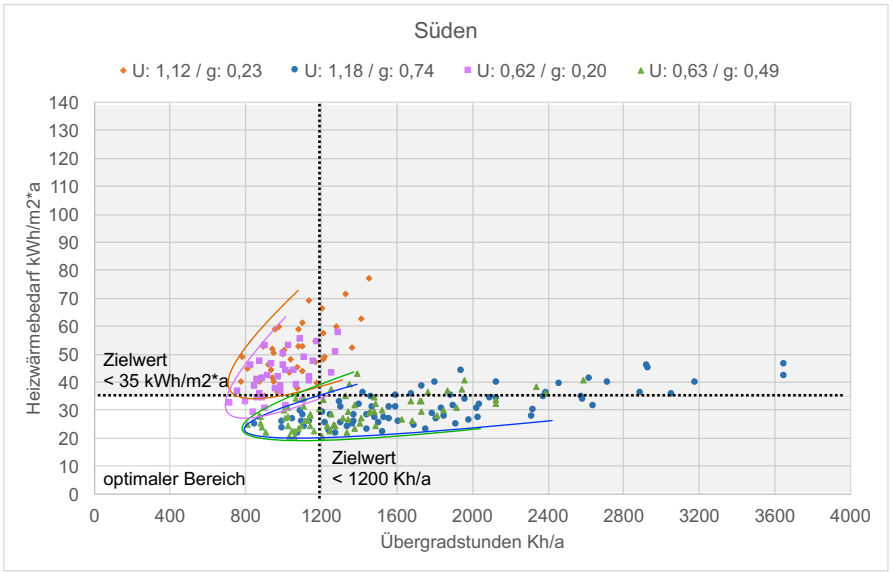


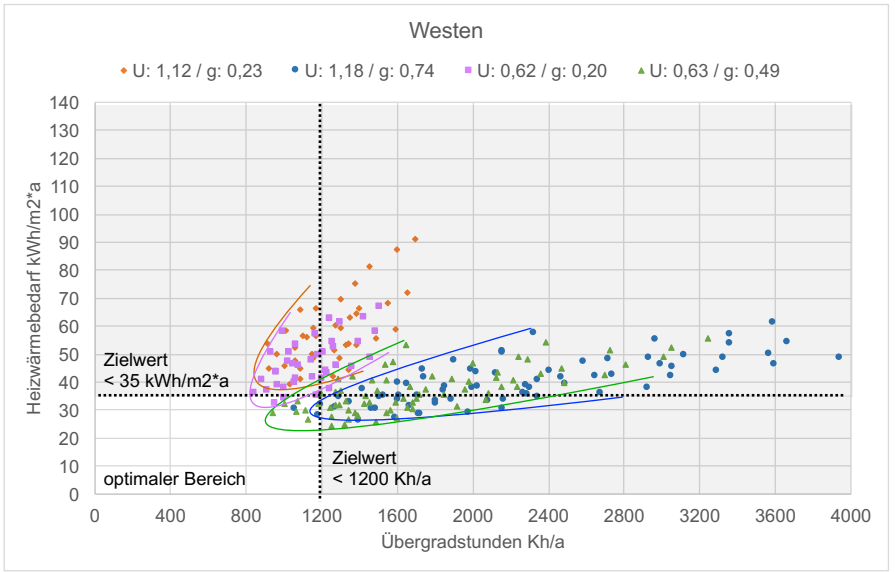
Mauerwerk, Mittelraum

Glasart (U-Wert in W/K*m2 / g-Wert in Faktor ohne Einheit)



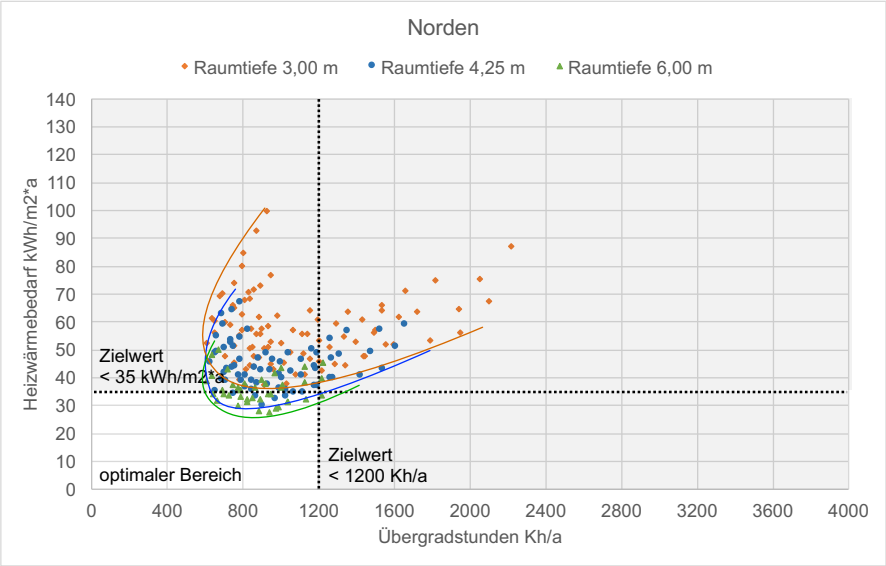


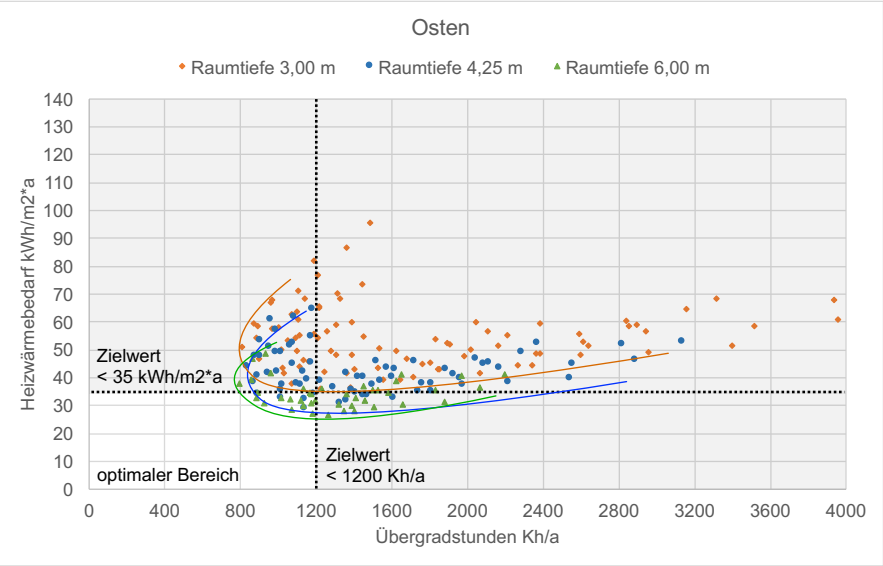


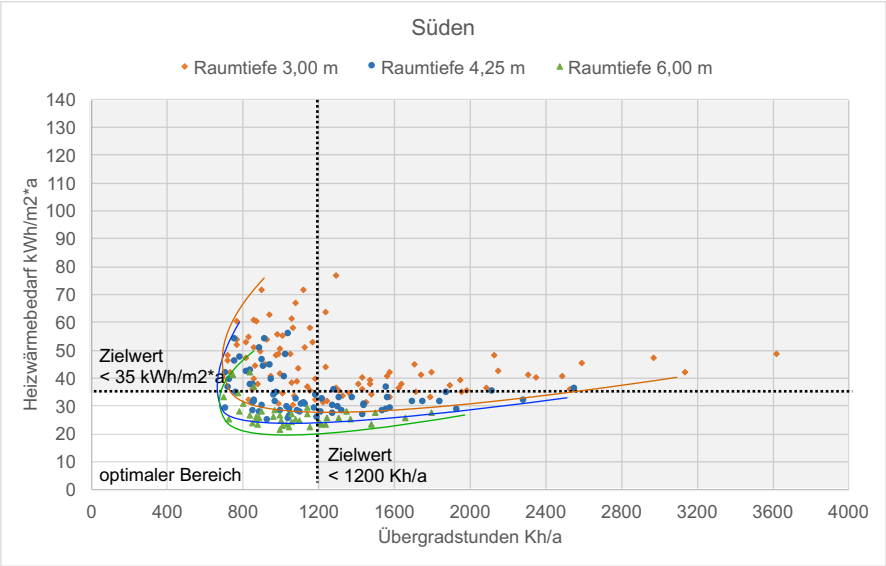


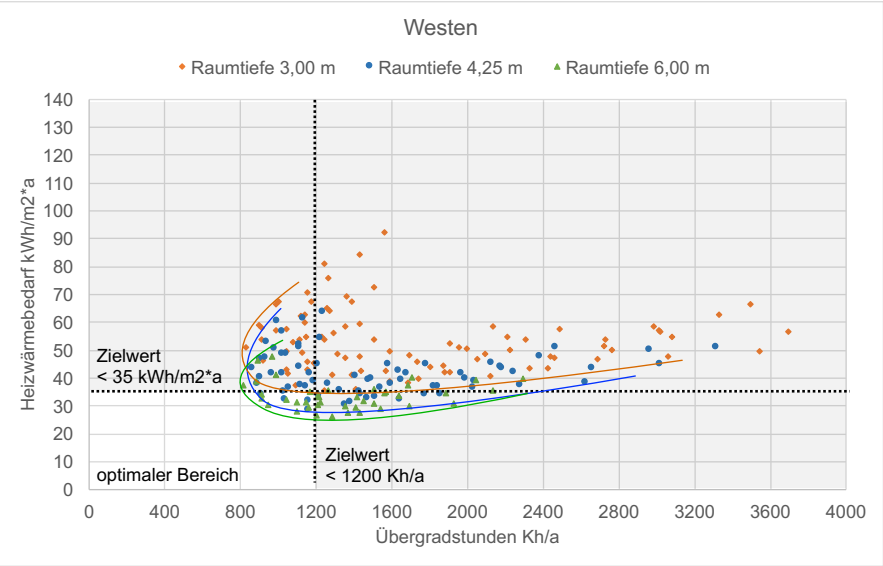
Leichtbeton, Mittelraum

Raumtiefe



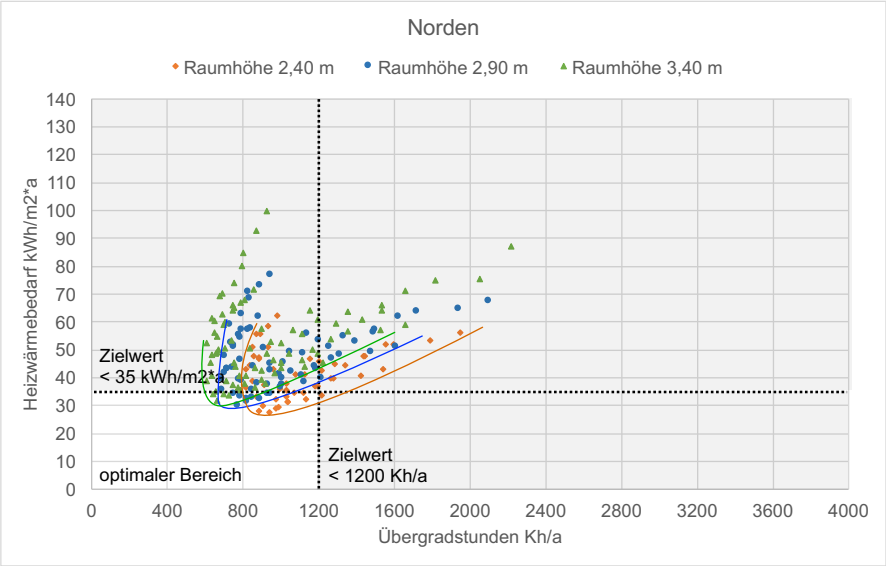


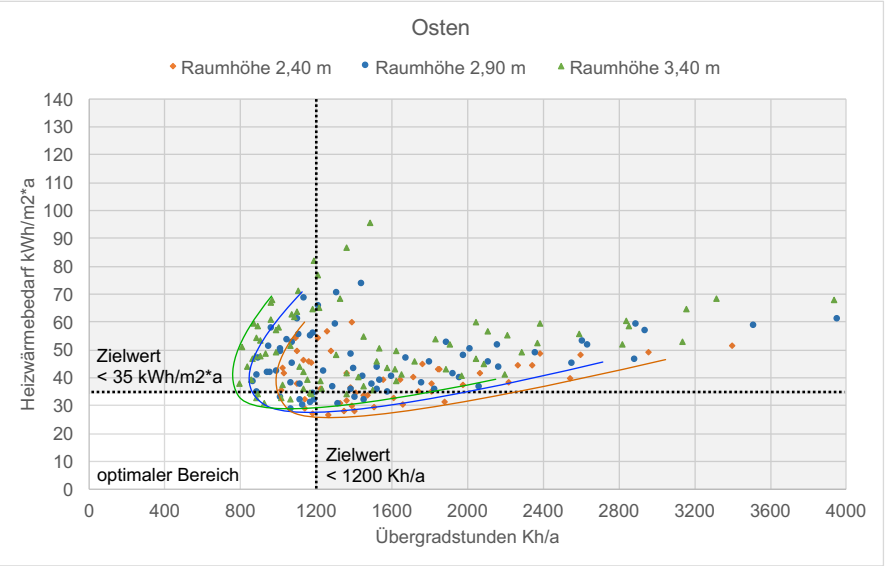


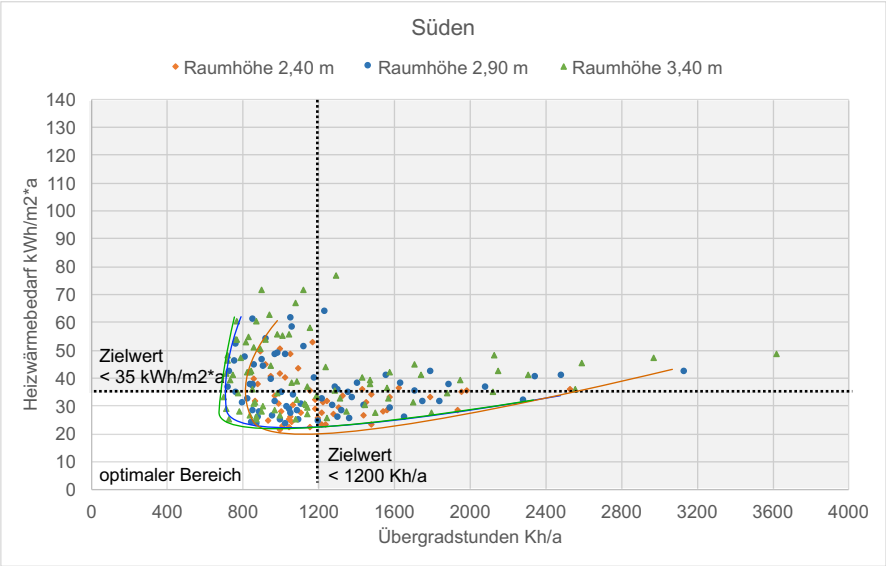


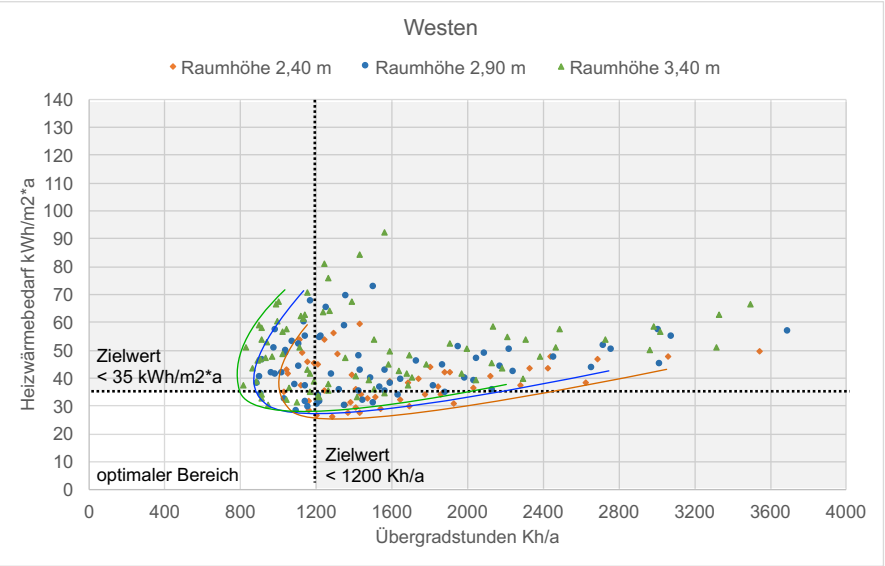
Leichtbeton, Mittelraum

Raumhöhe



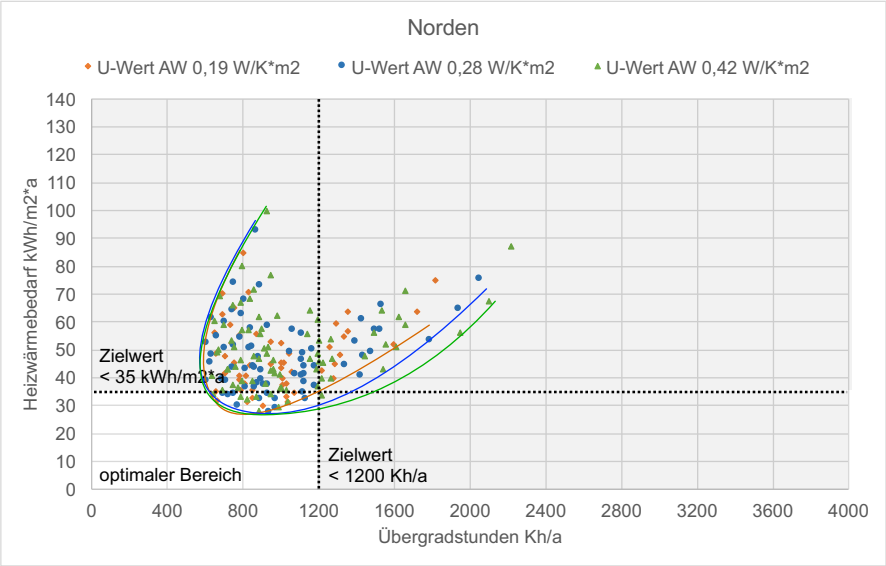


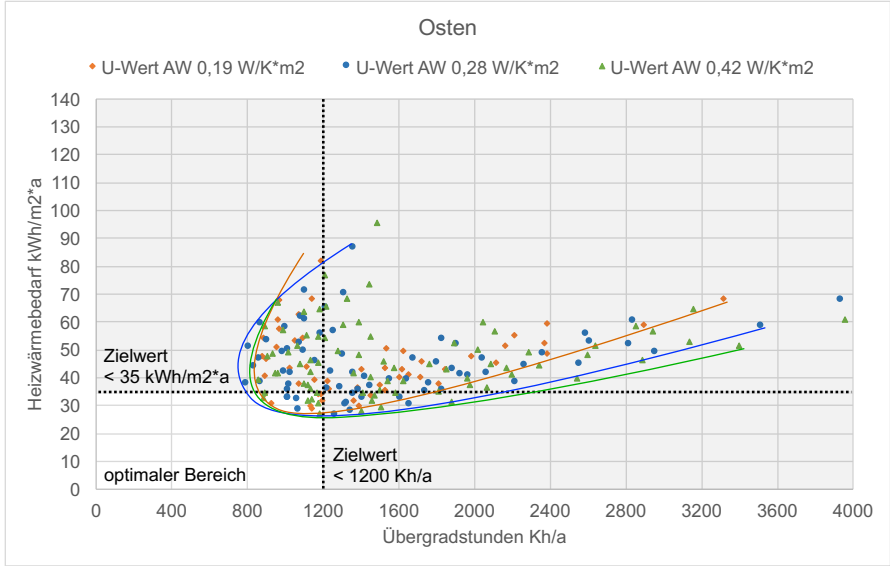


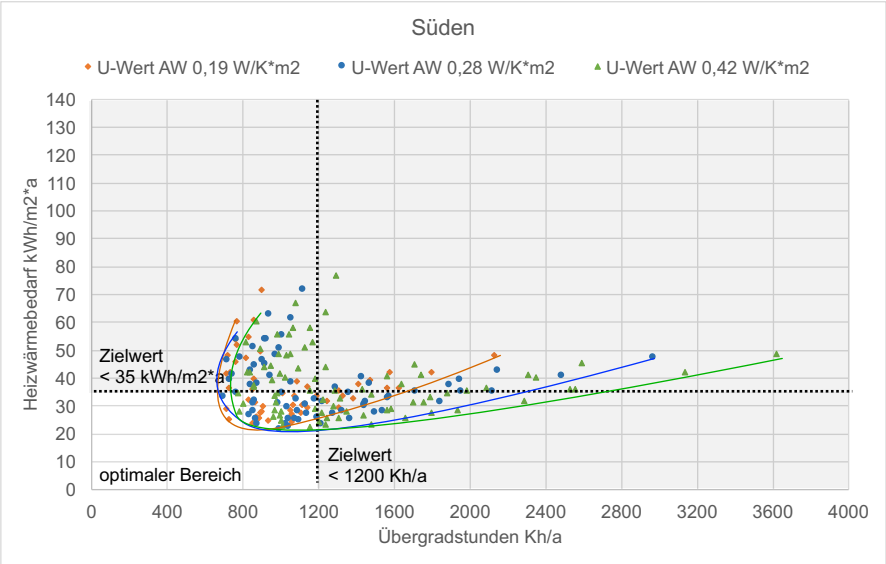


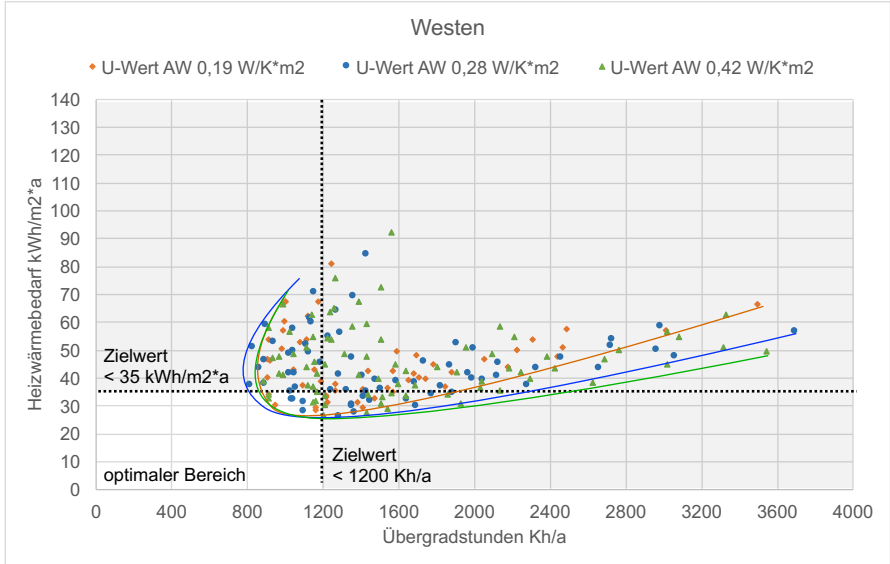
Leichtbeton, Mittelraum

U-Wert Außenwand (AW)



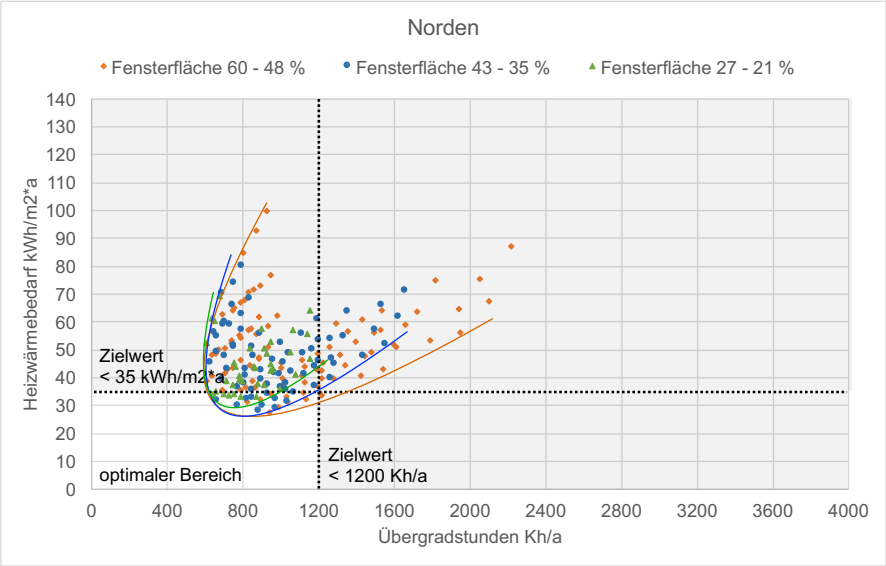


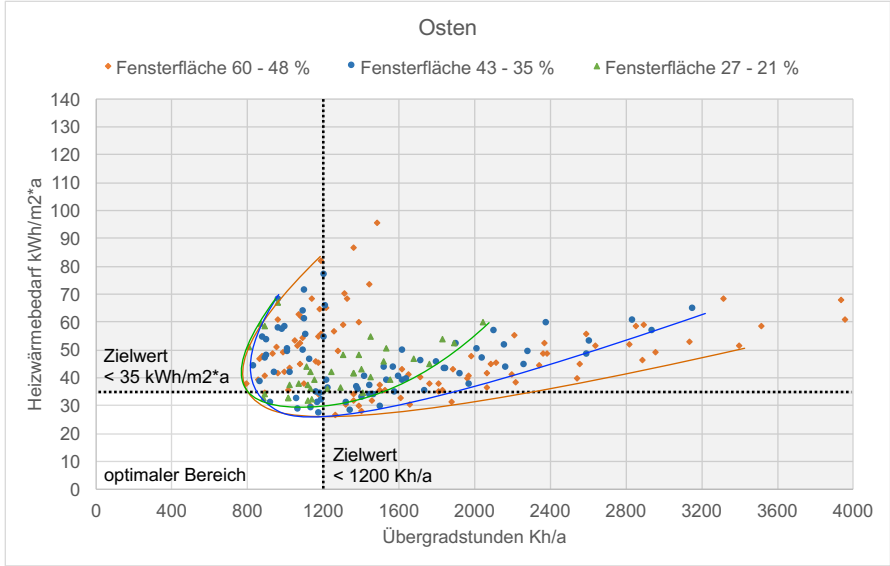


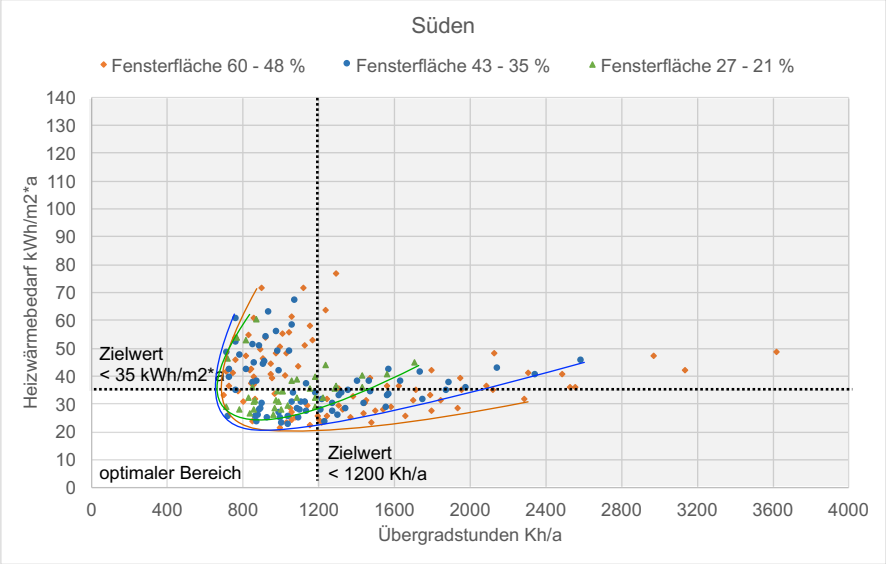


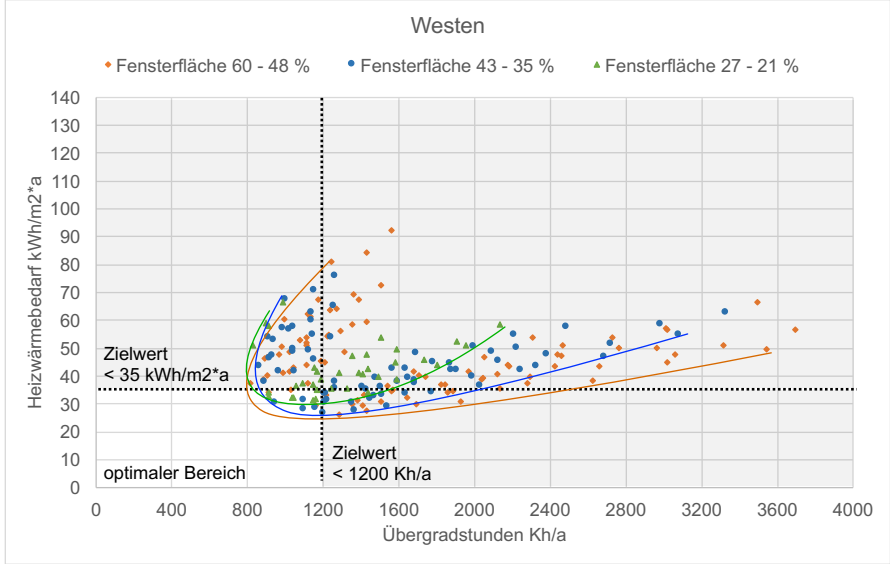
Leichtbeton, Mittelraum

Fensterflächenanteil



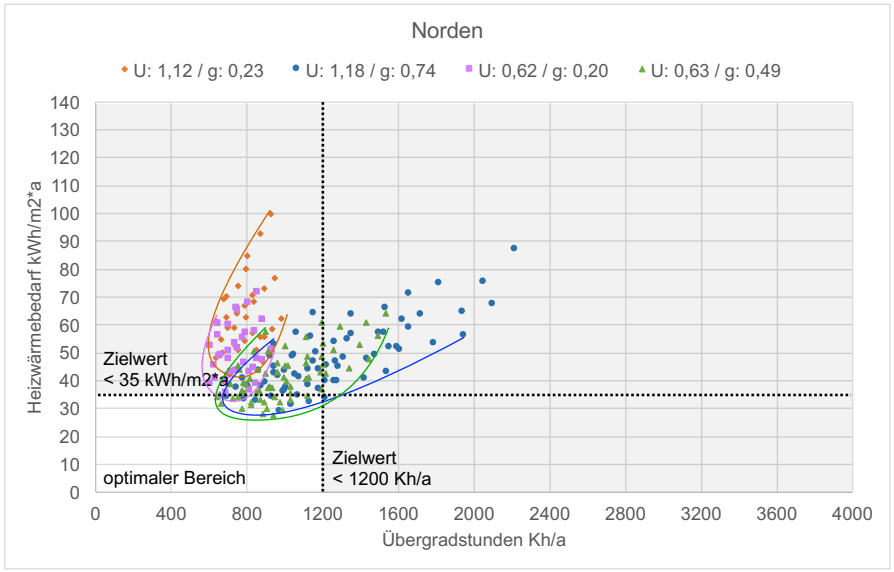


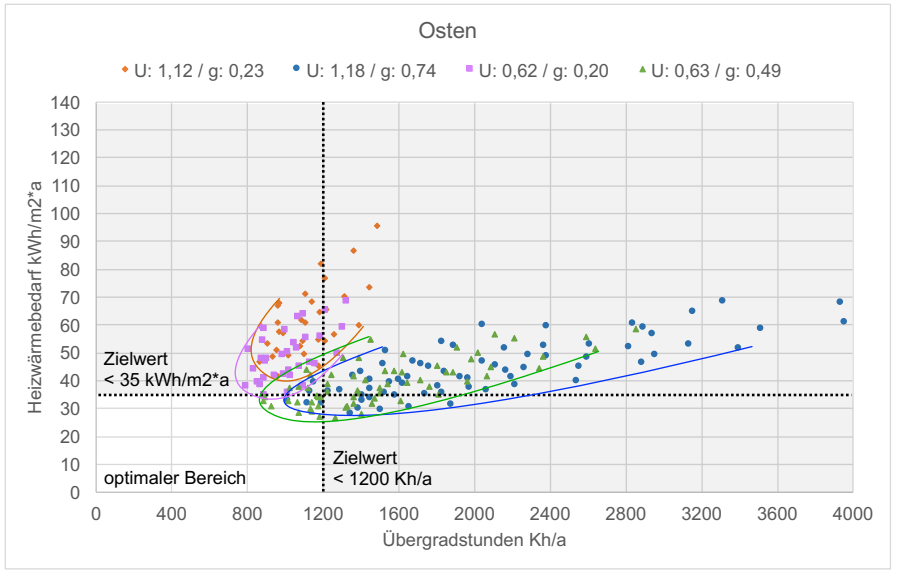


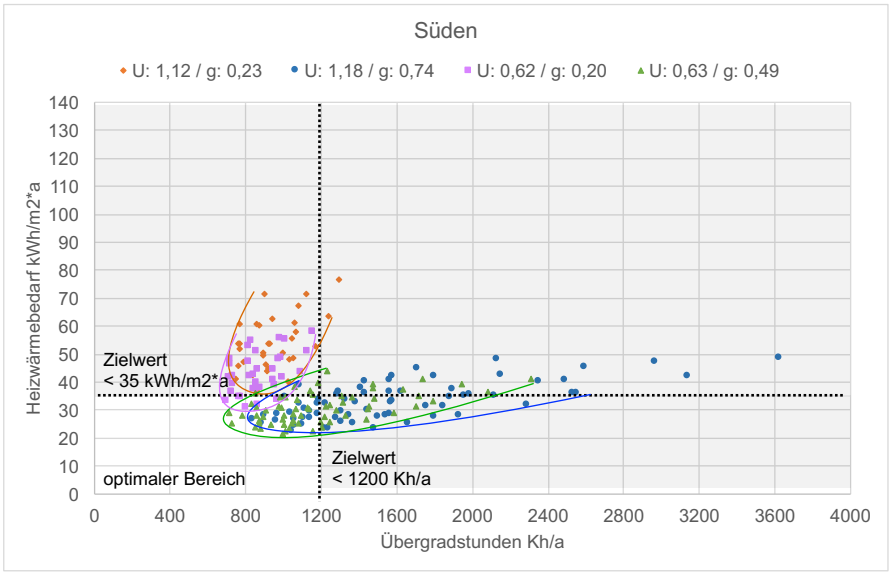


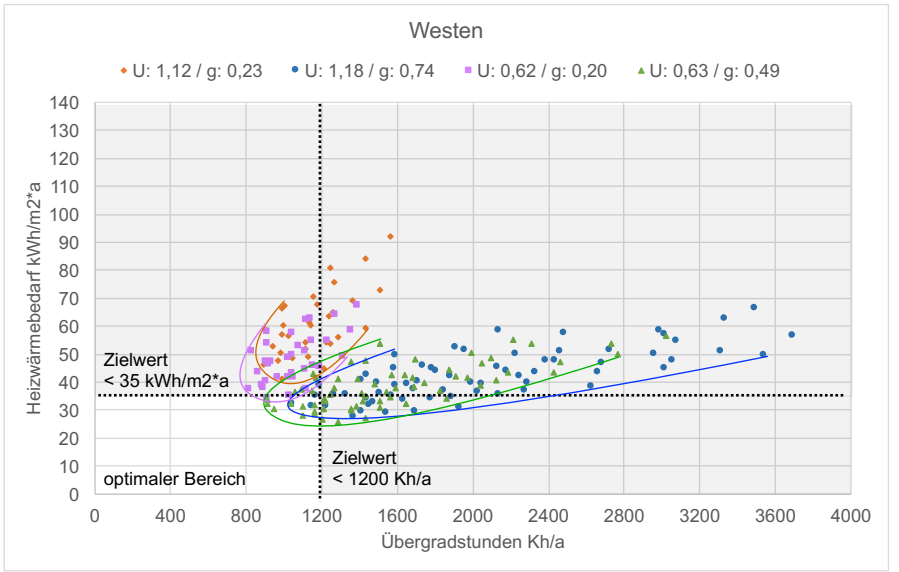
Leichtbeton, Mittelraum

Glasart (U-Wert in W/K*m2 / g-Wert in Faktor ohne Einheit)



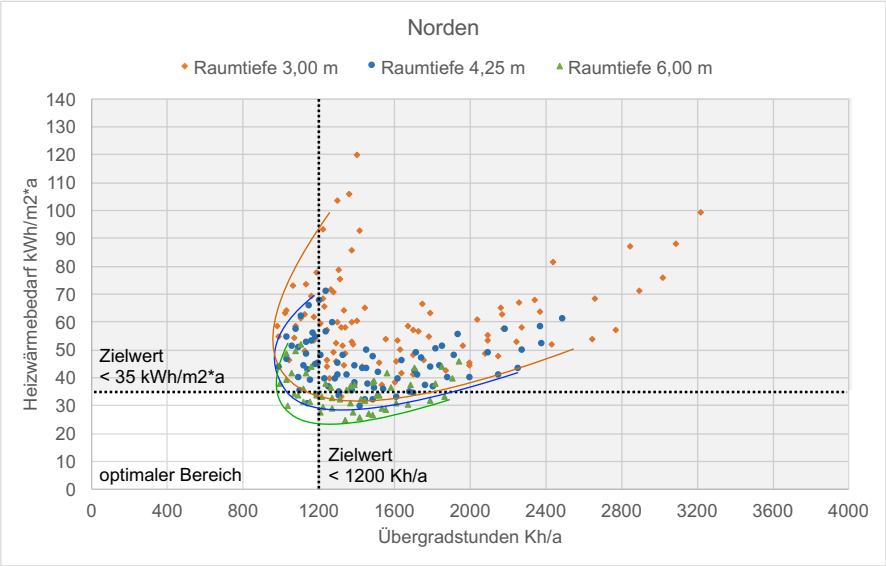


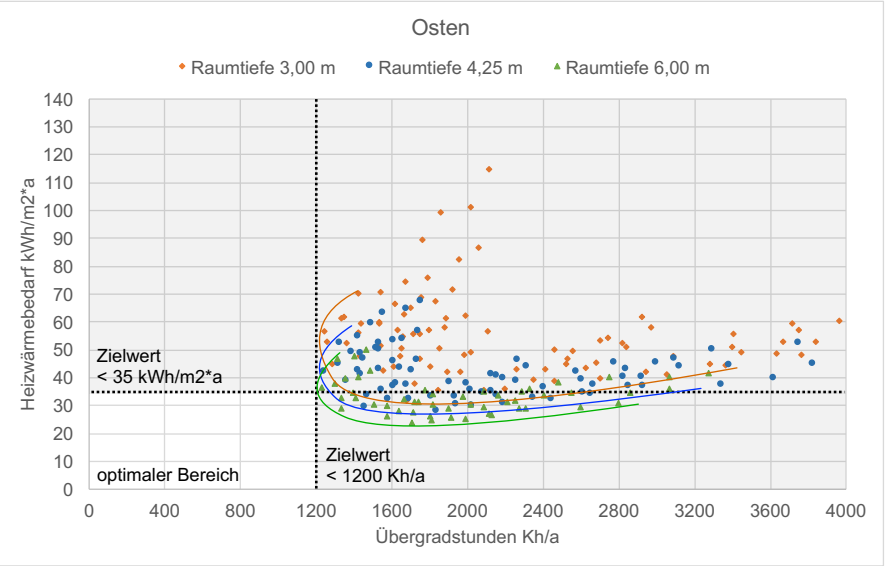


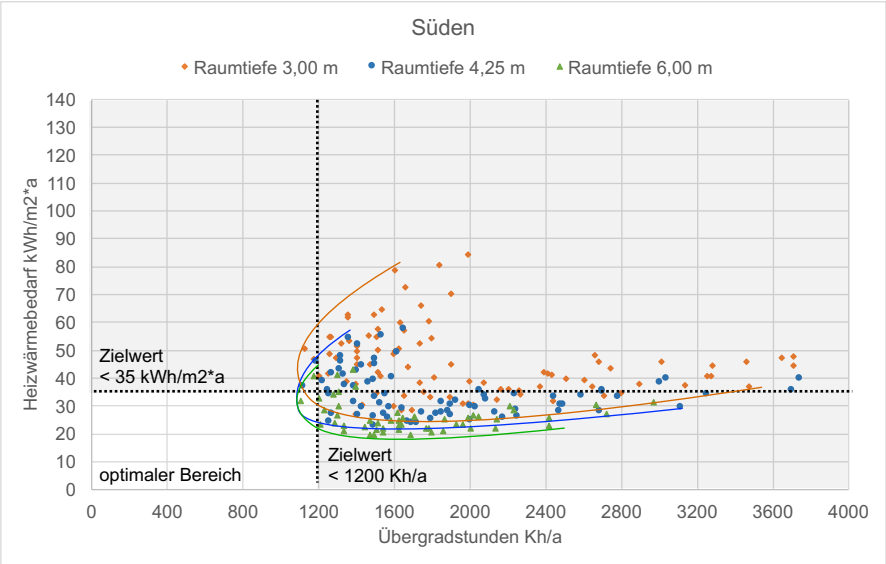


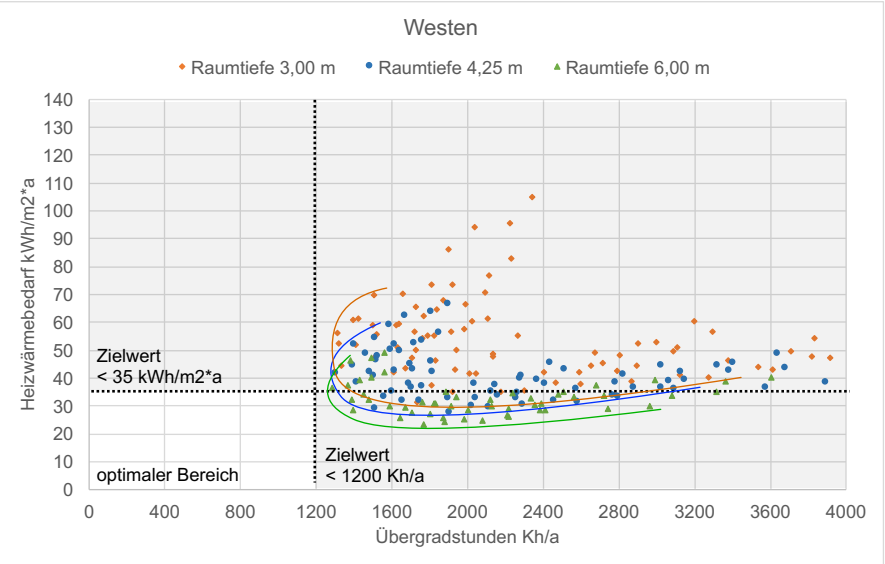
Holz massiv, Mittelraum

Raumtiefe



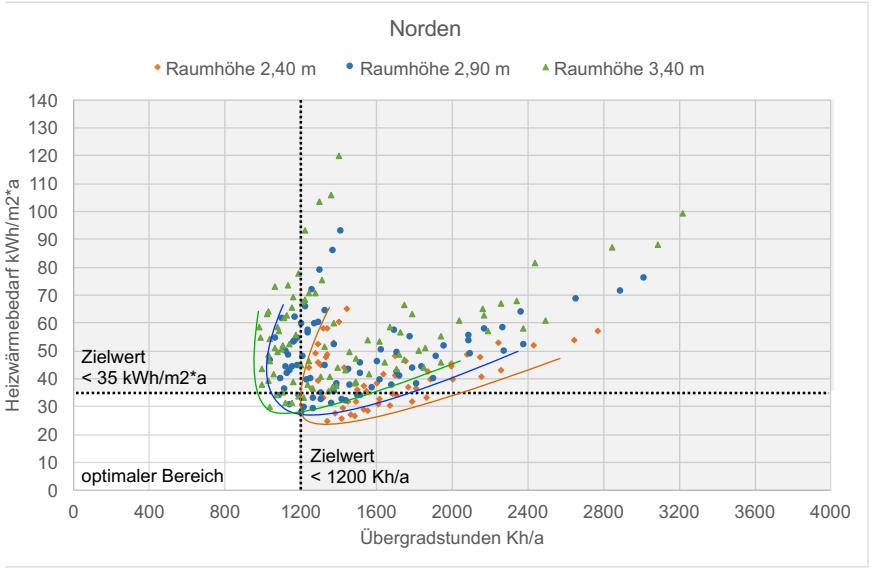


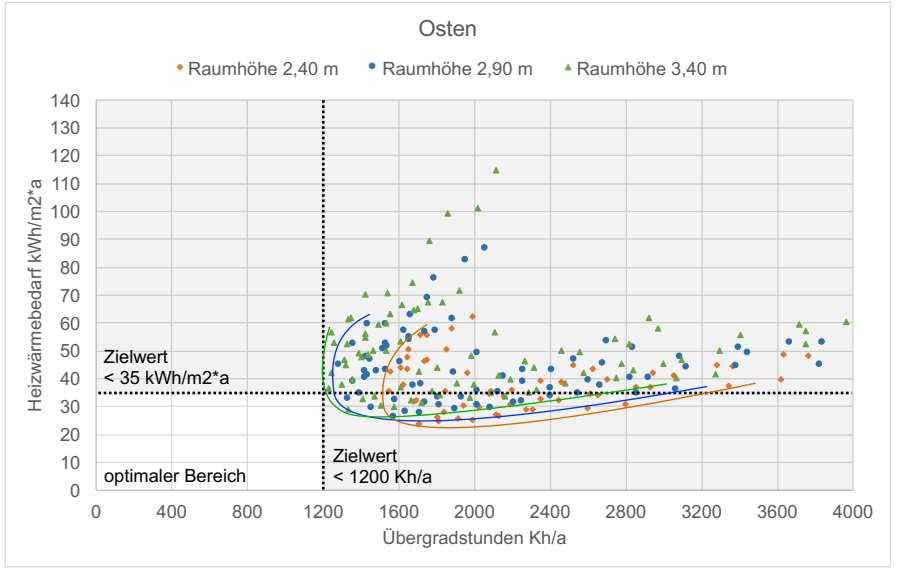


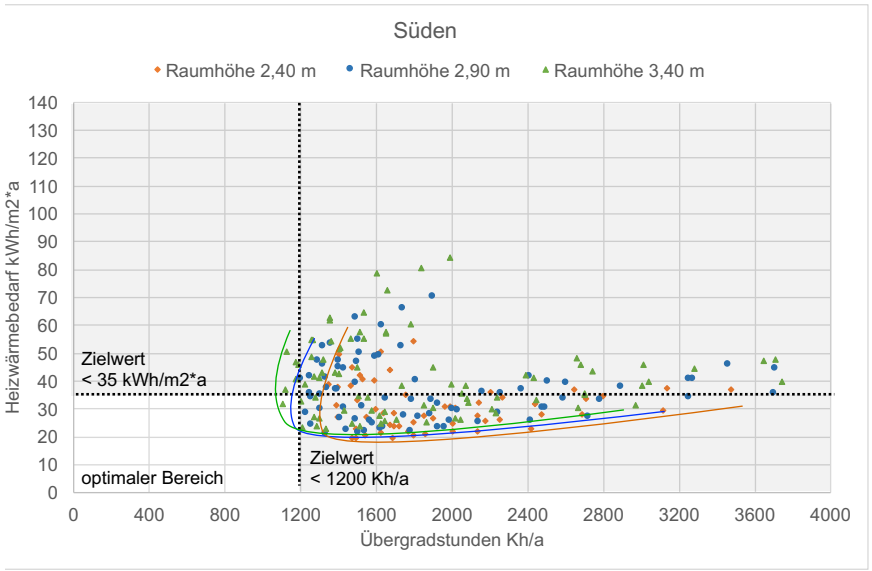


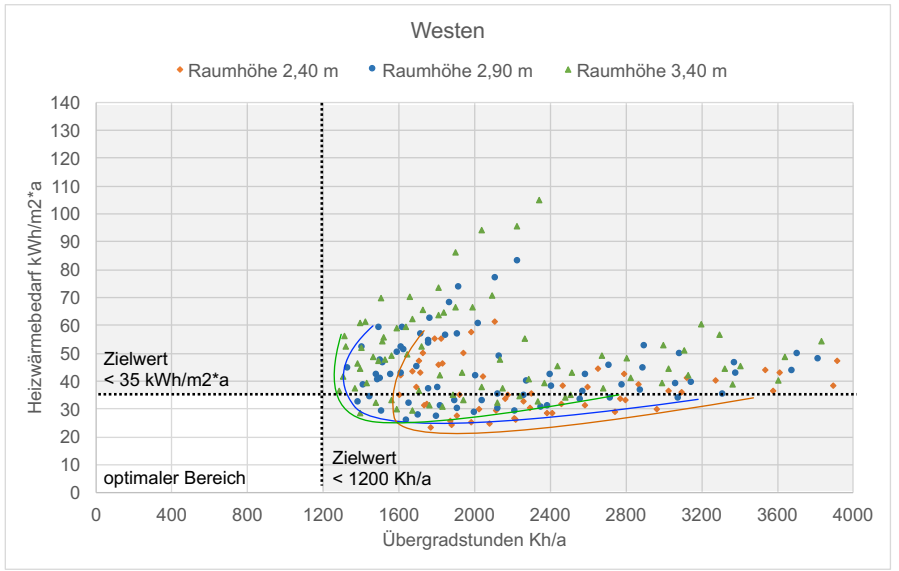
olz massiv, Mittelraum

aumhöhe



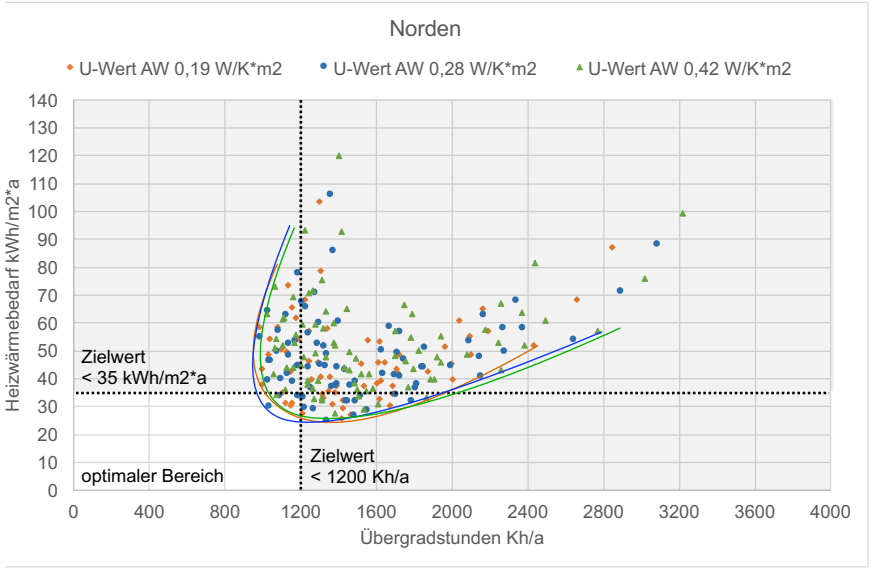


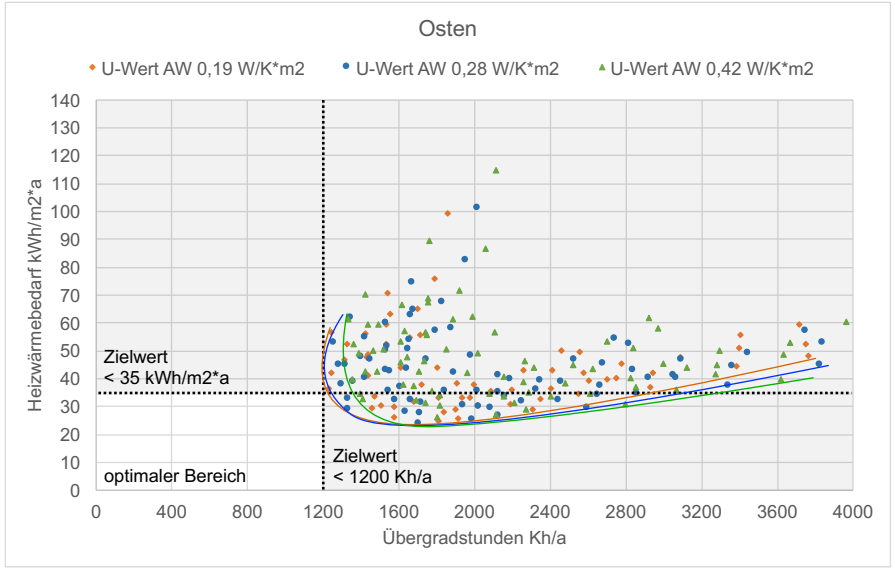


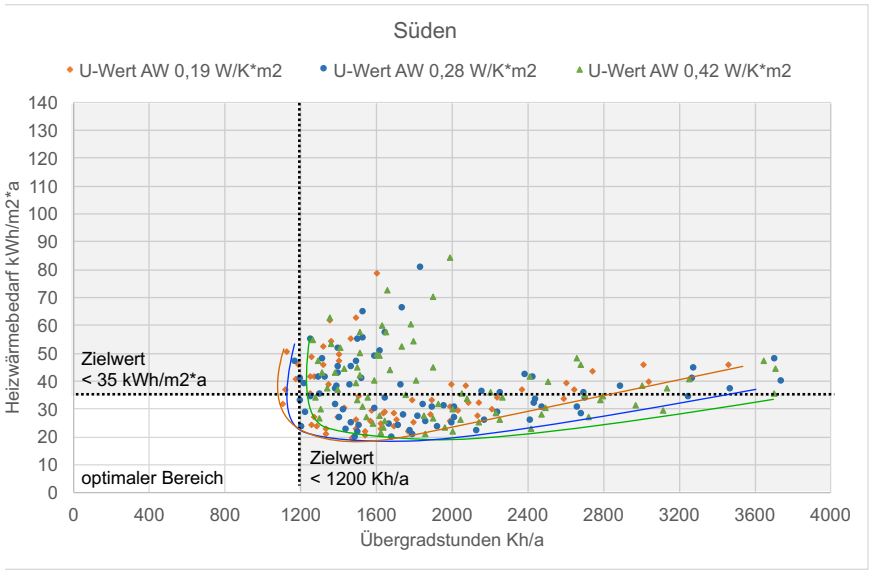


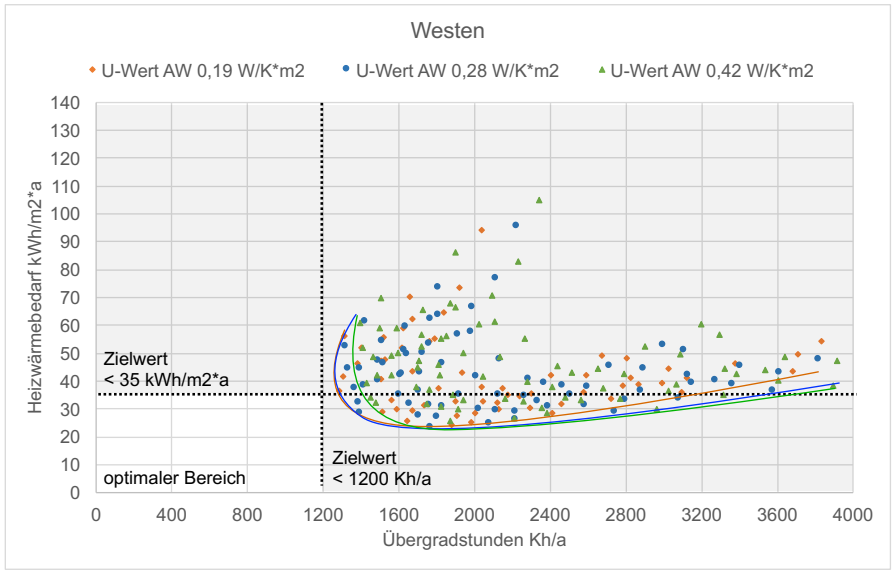
ɔlz massiv, Mittelraum

·Wert Außenwand (AW)



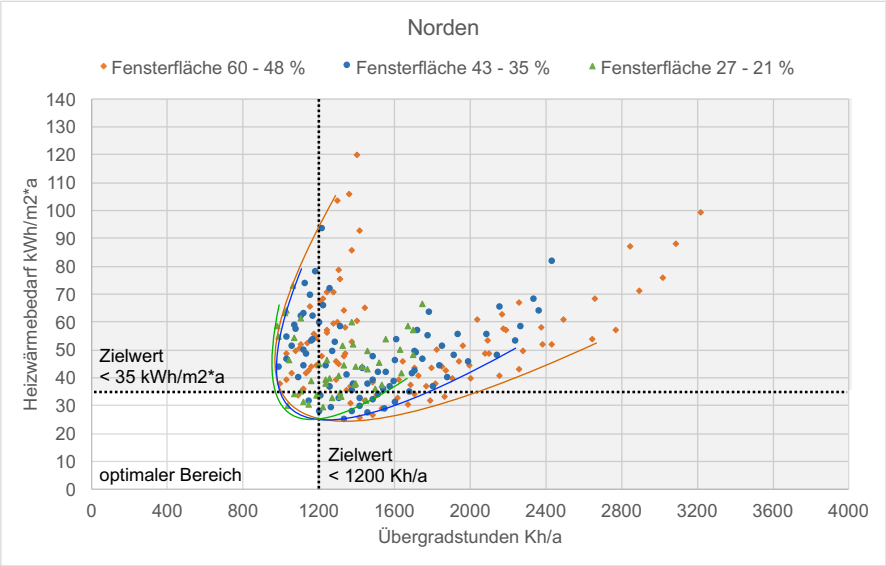


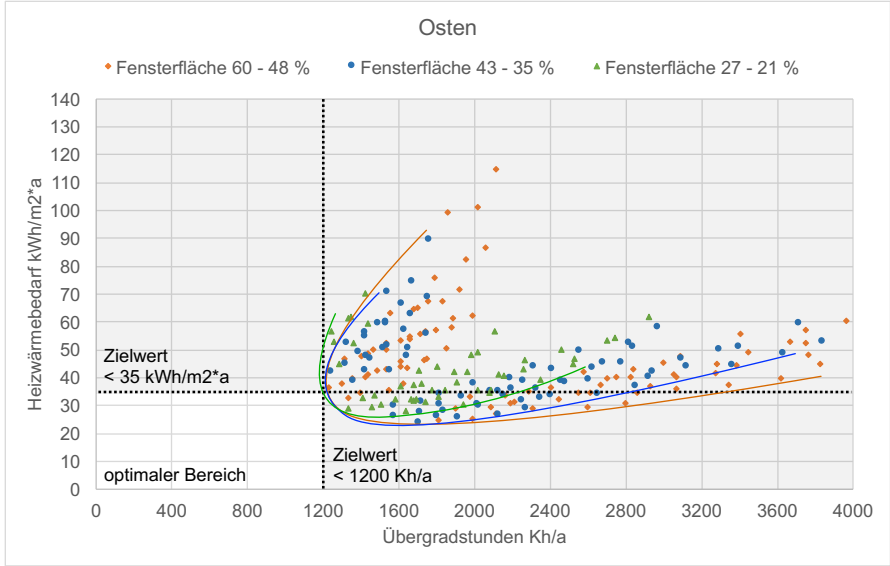


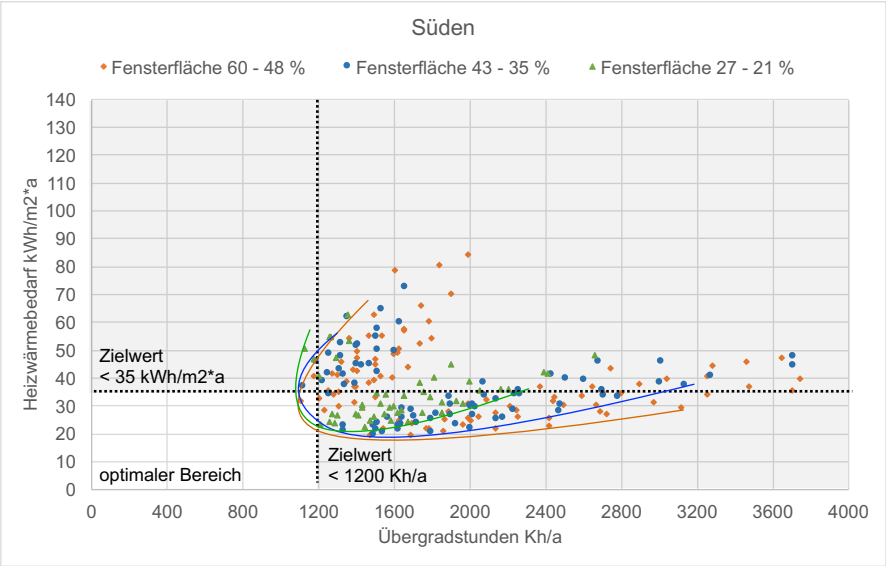


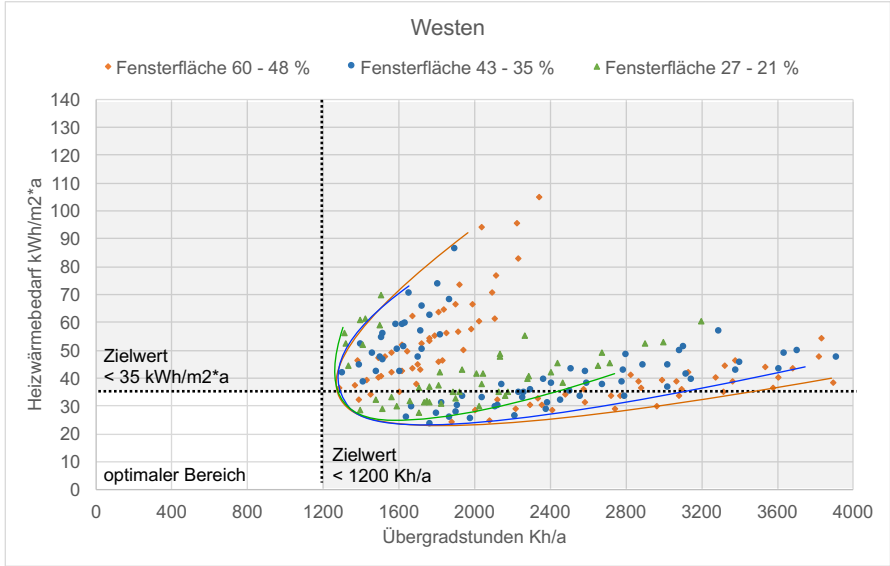
Holz massiv, Mittelraum

Fensterflächenanteil



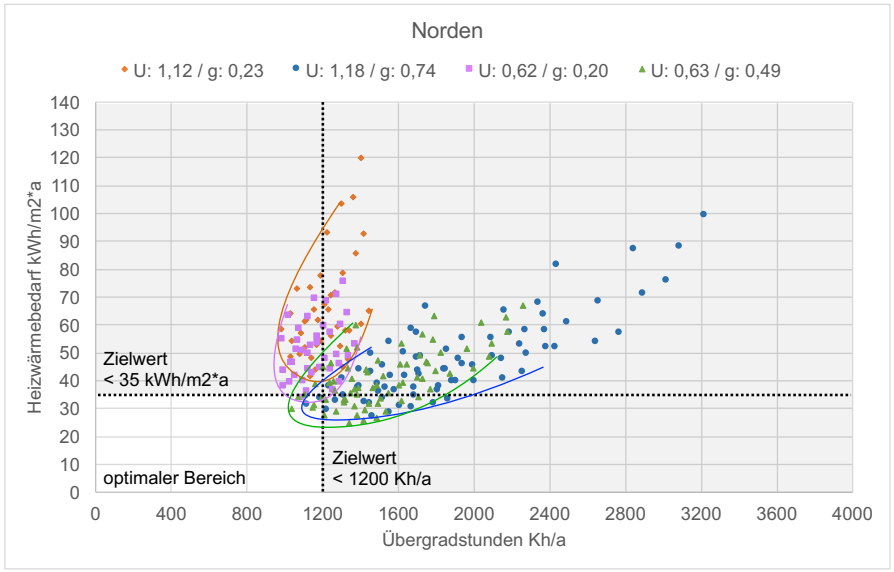


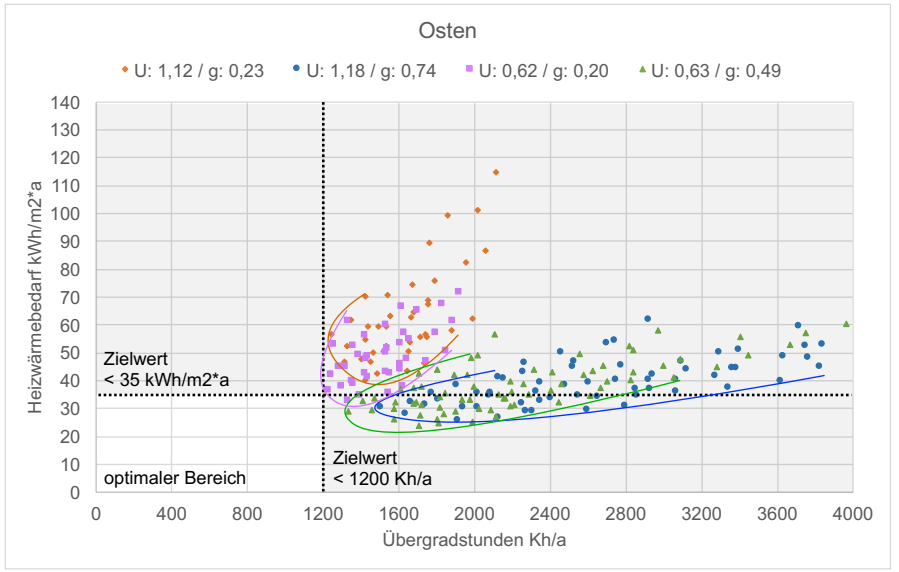


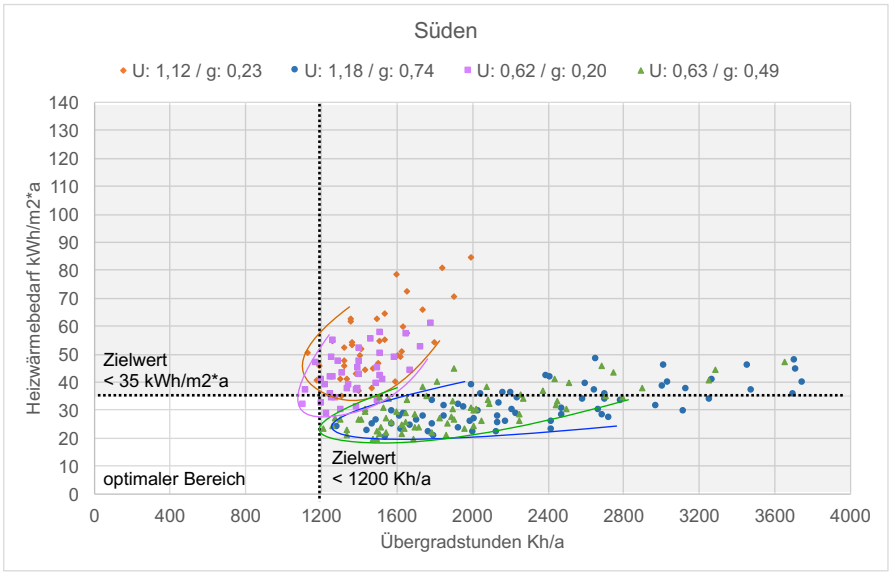


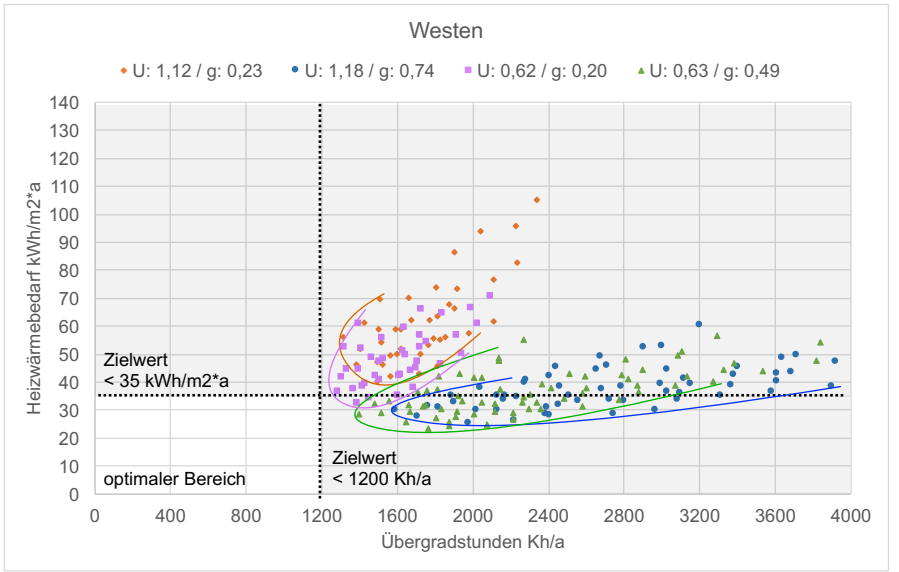
Holz massiv, Mittelraum

Glasart (U-Wert in W/K*m2 / g-Wert in Faktor ohne Einheit)



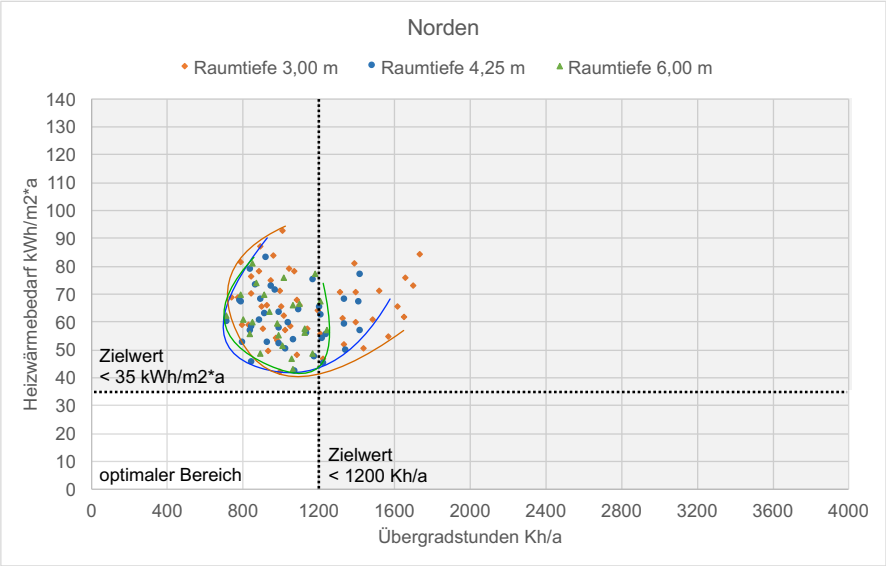


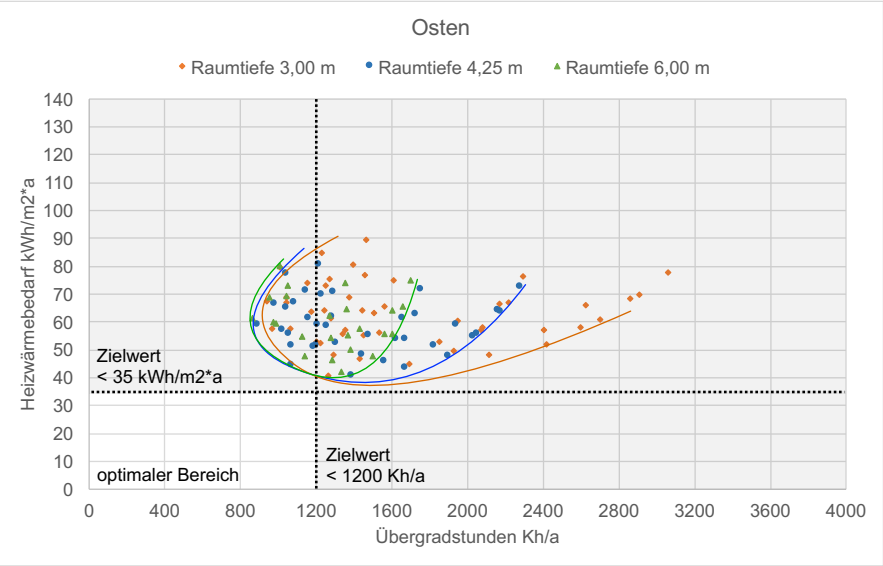


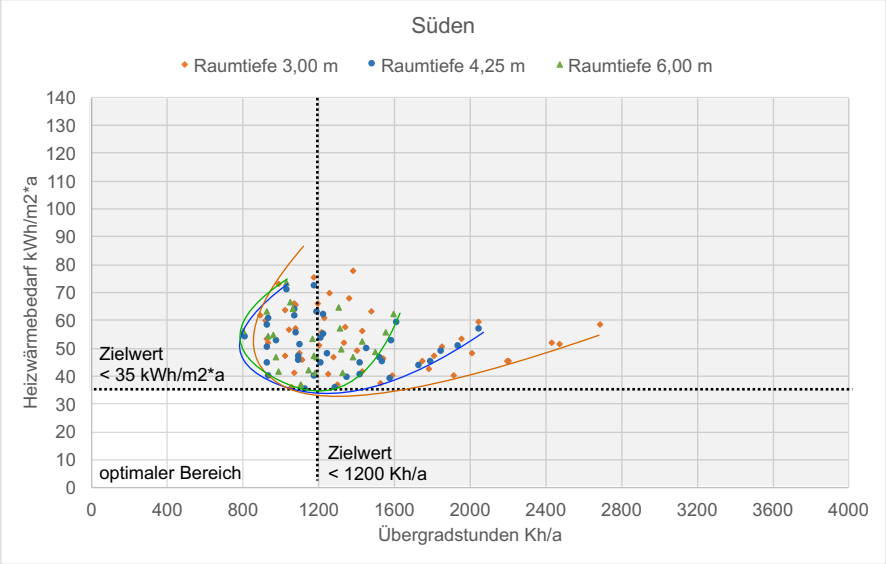


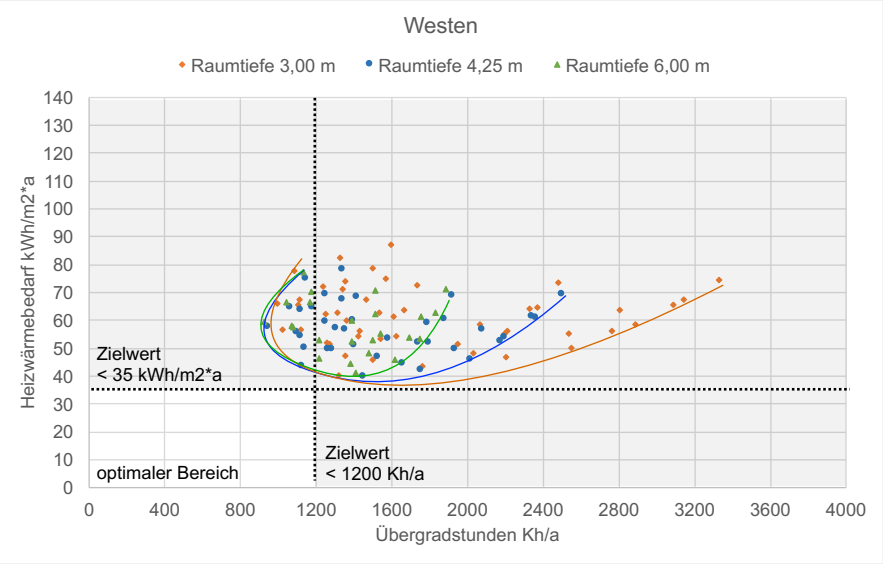
Mauerwerk, Eckraum

Raumtiefe



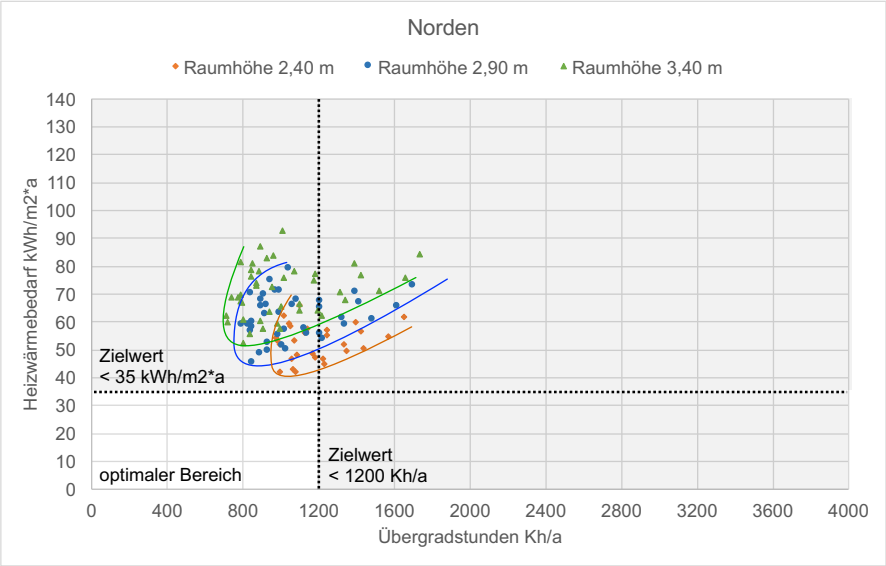


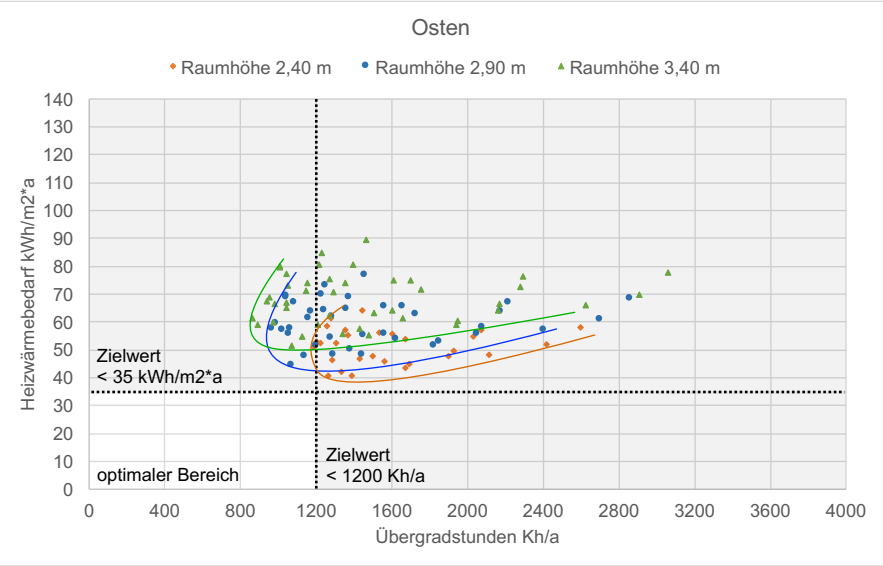


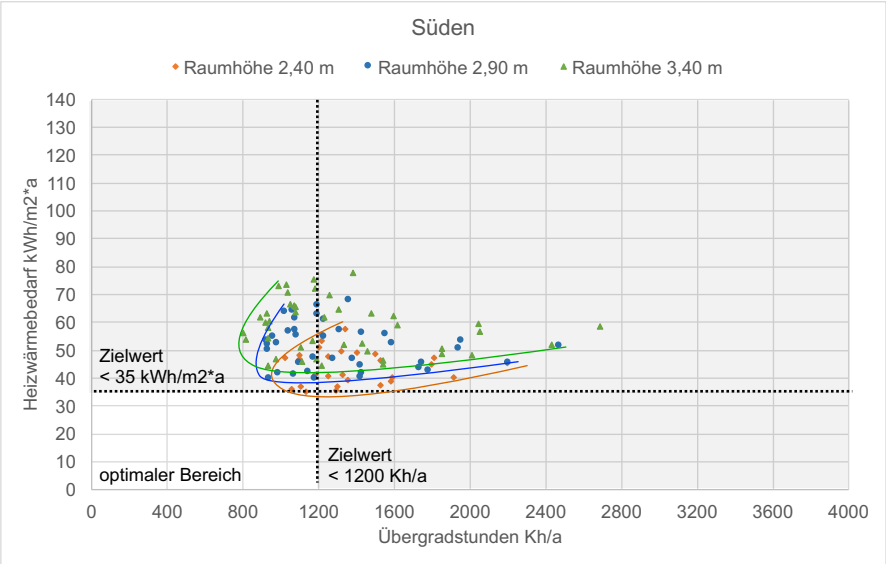


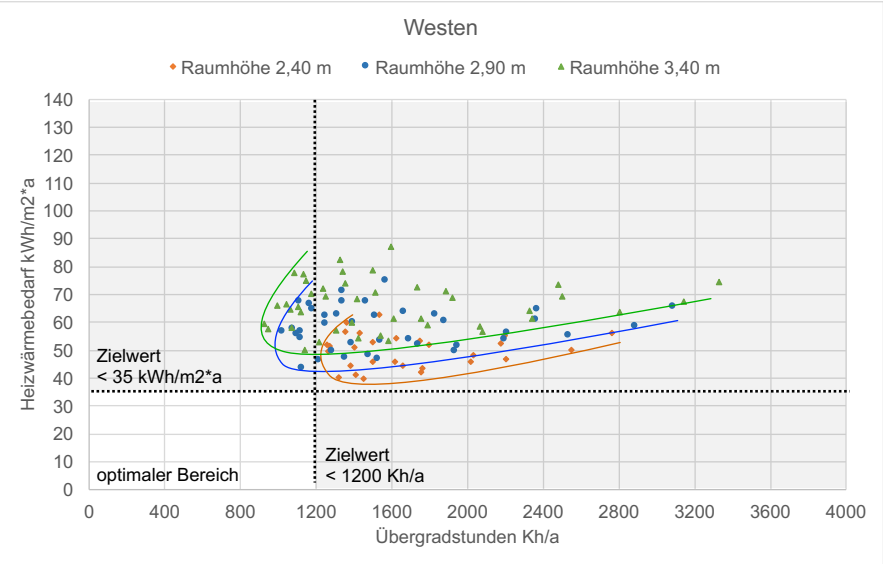
Mauerwerk, Eckraum

Raumhöhe



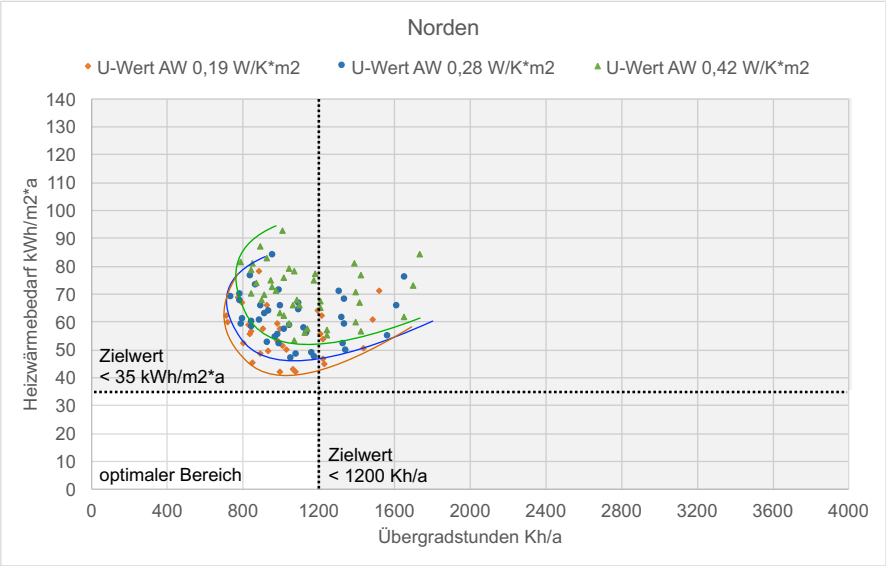


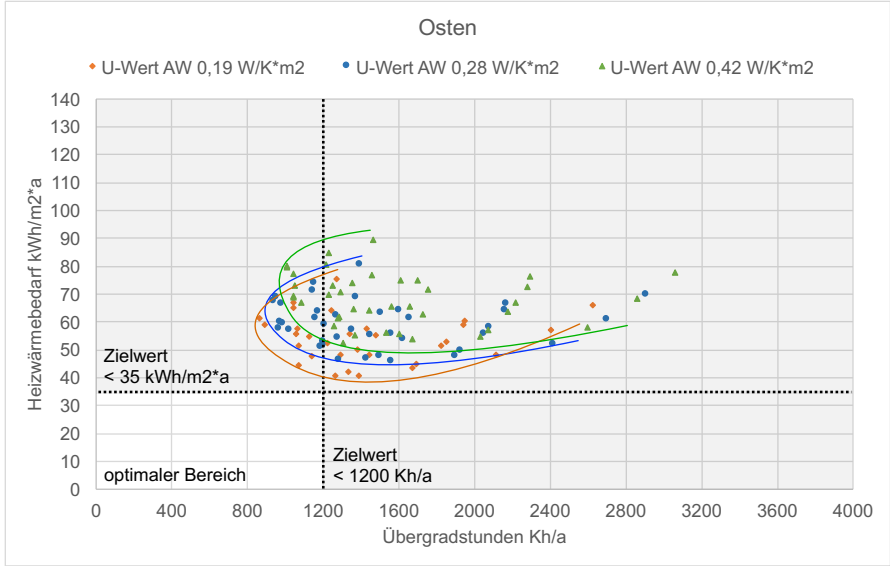


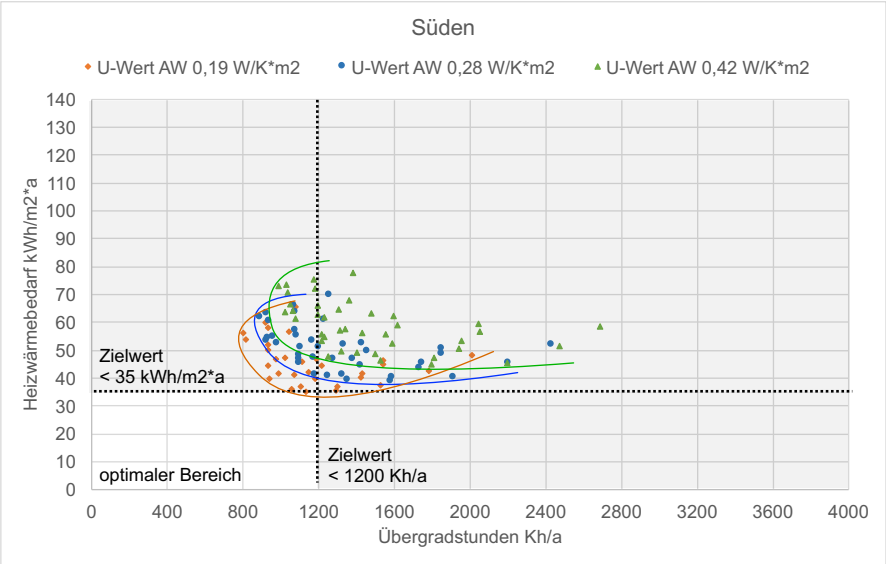


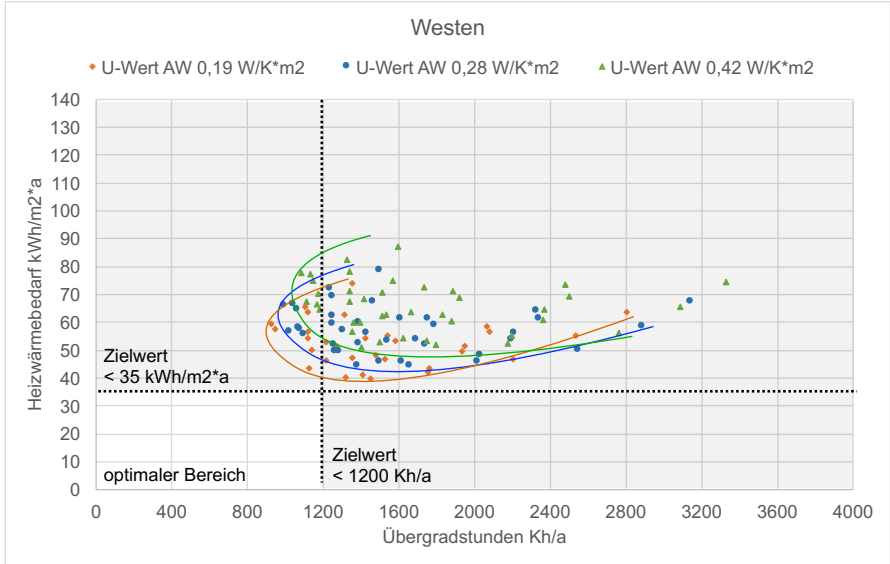
Mauerwerk, Eckraum

U-Wert Außenwand (AW)



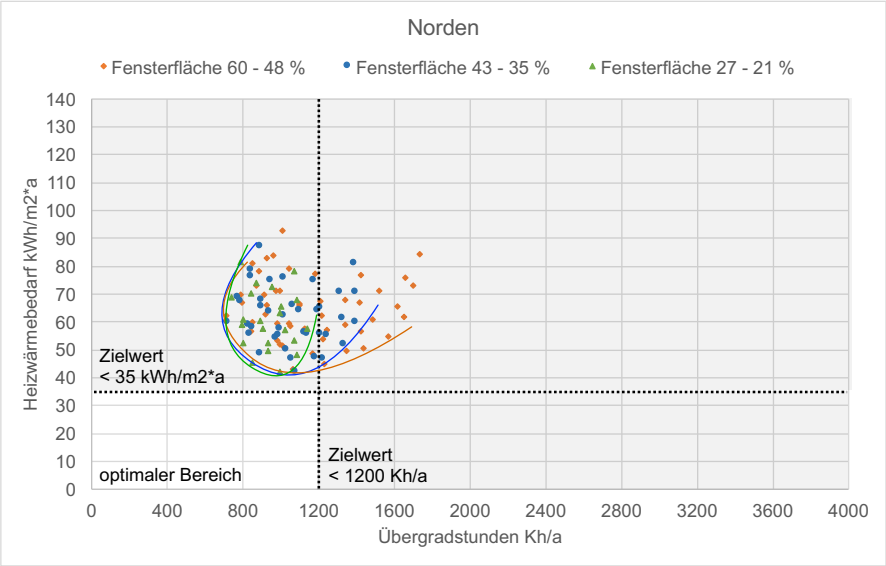


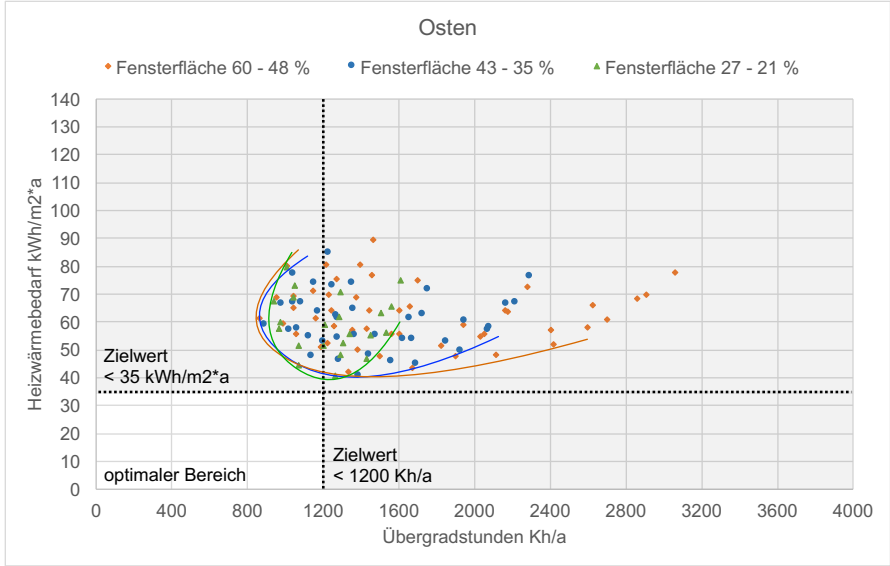


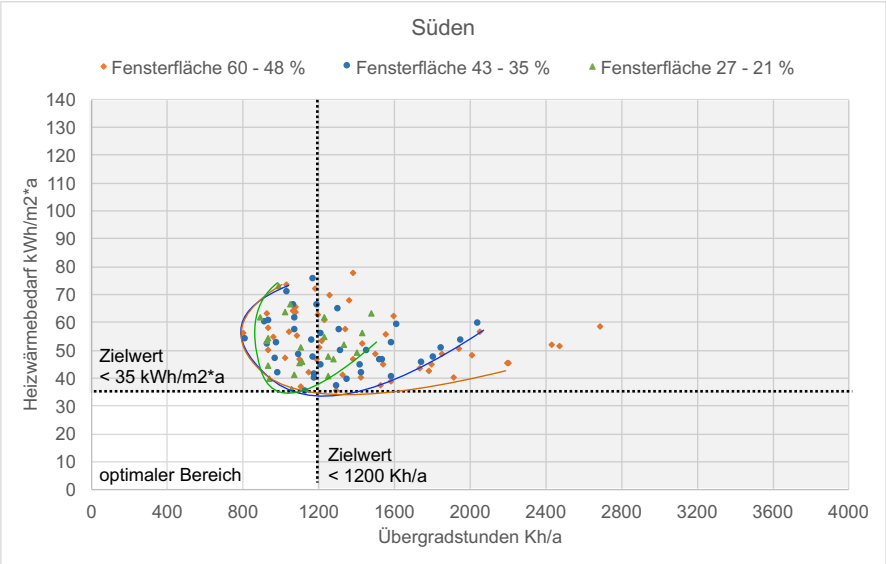


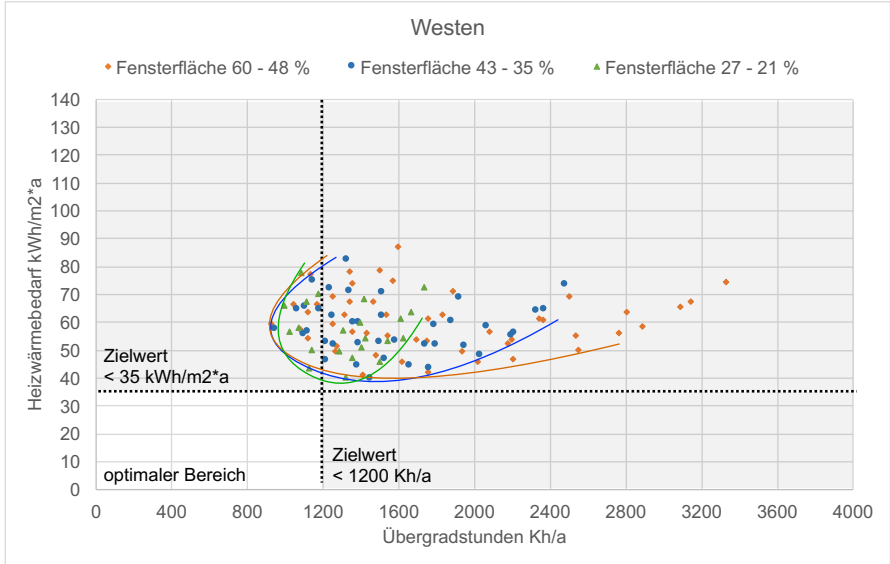
Mauerwerk, Eckraum

Fensterflächenanteil



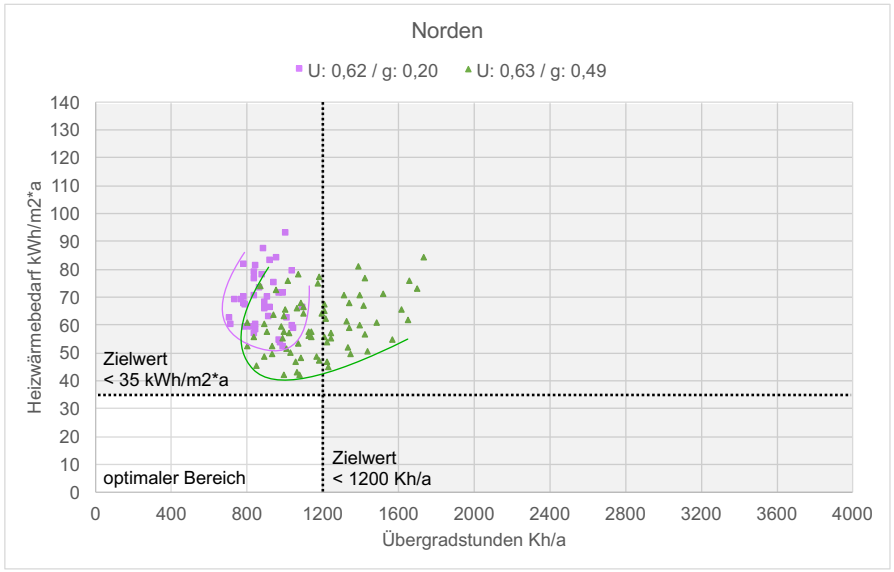


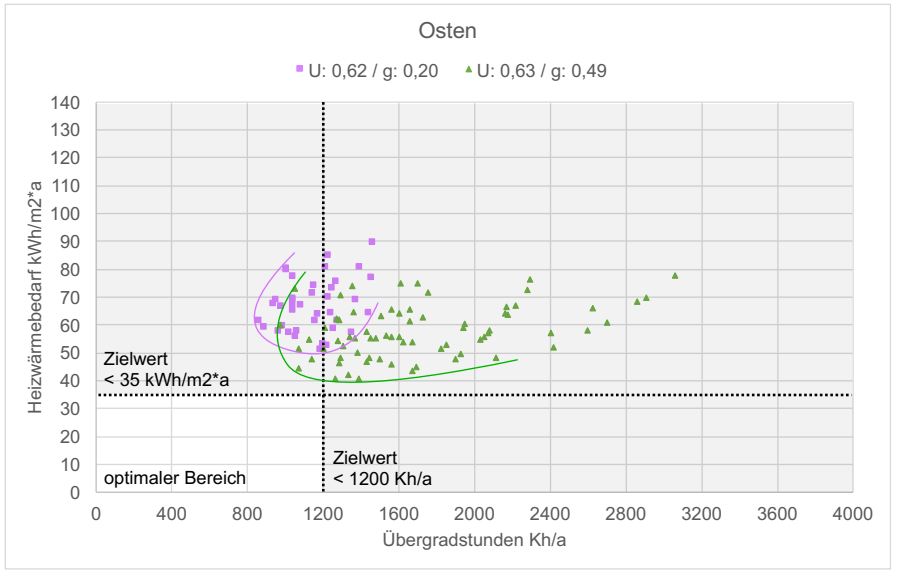


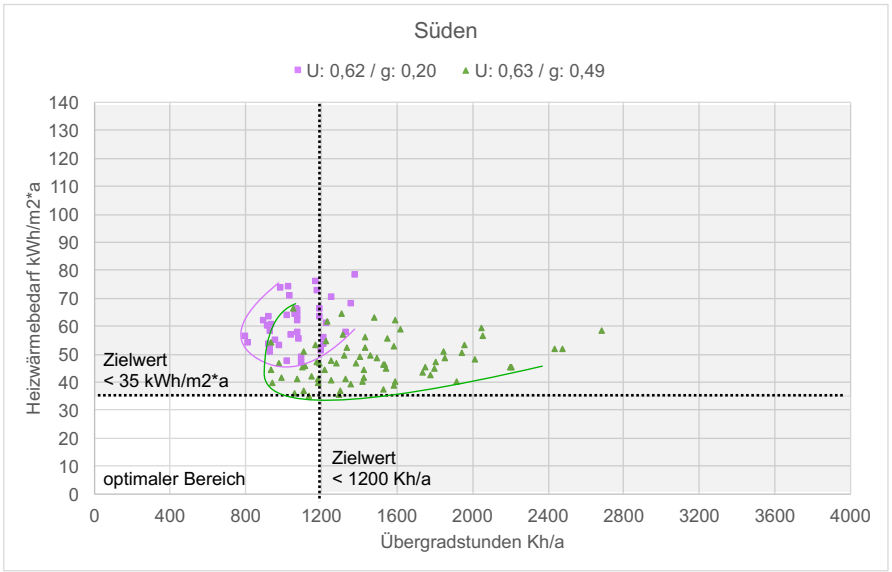


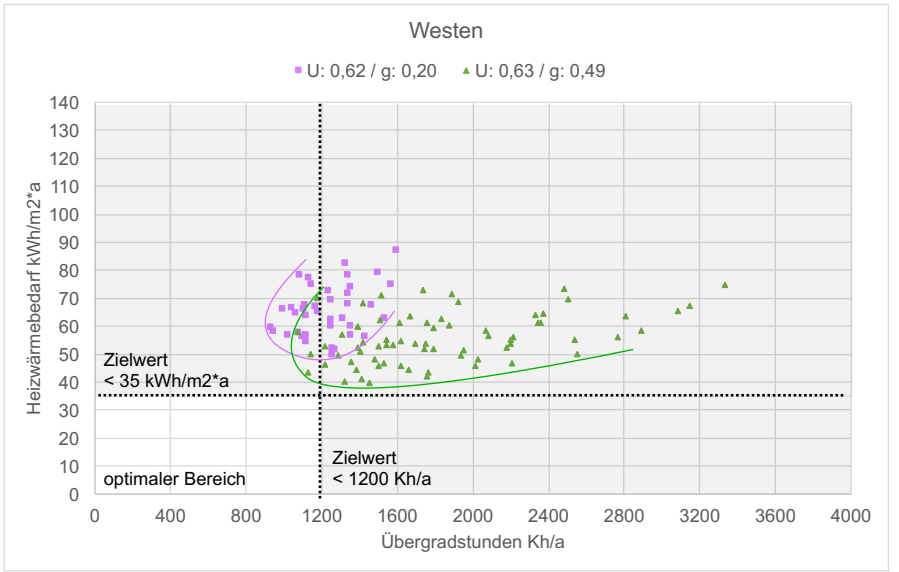
Mauerwerk, Eckraum

Glasart (U-Wert in W/K*m2 / g-Wert in Faktor ohne Einheit)



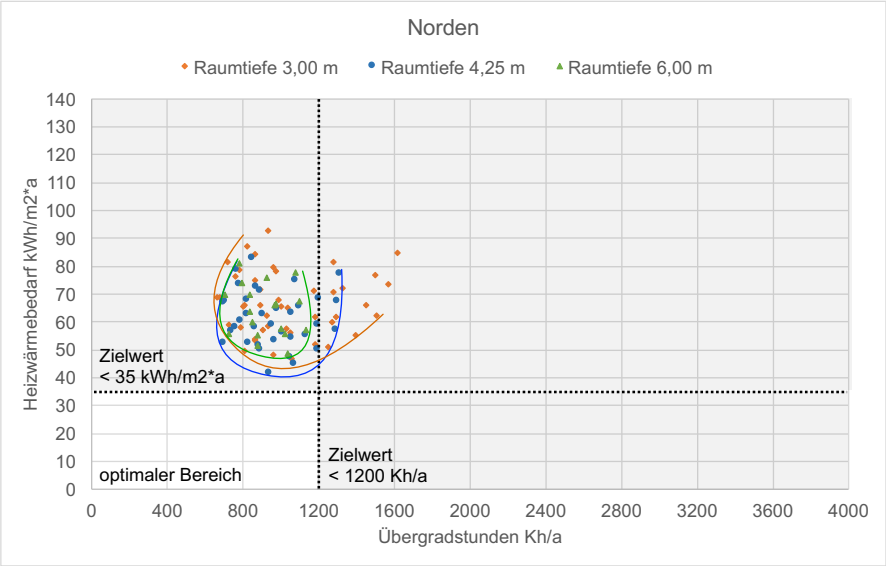


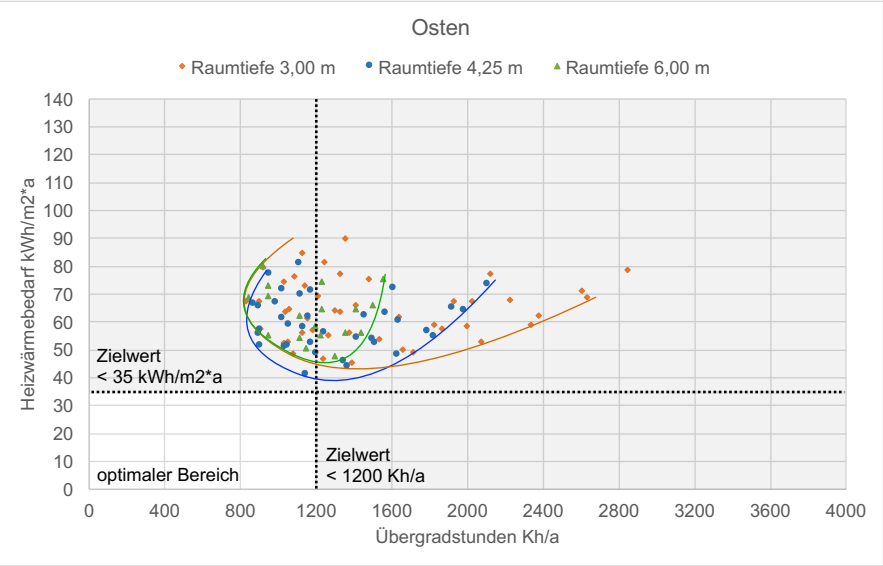


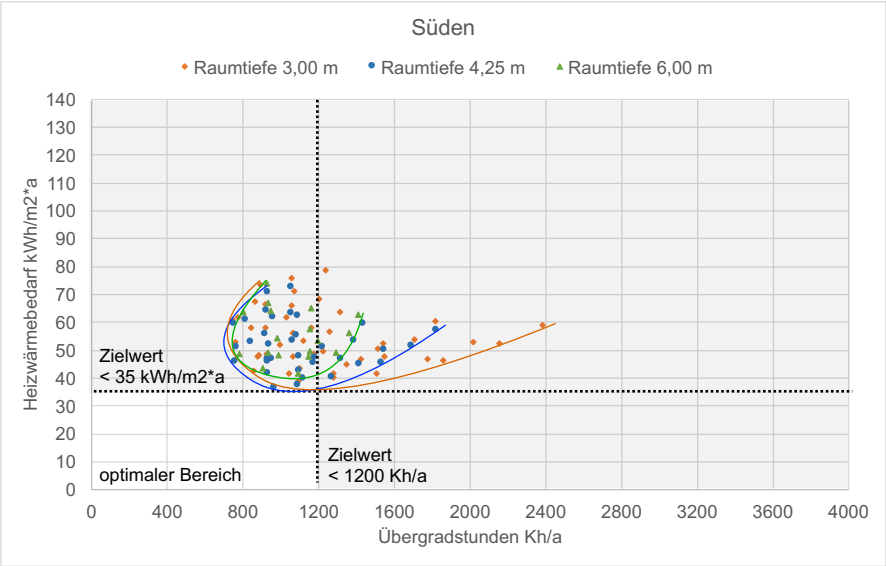


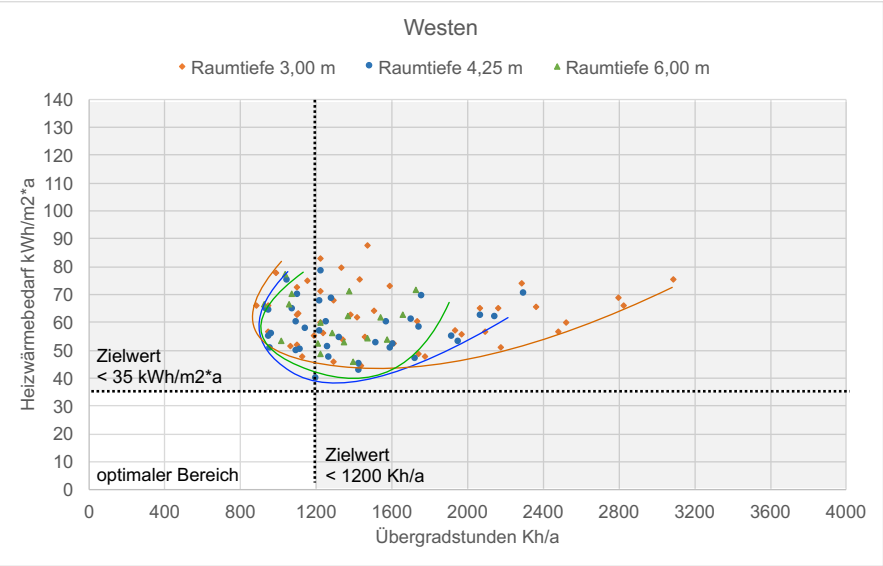
Leichtbeton, Eckraum

Raumtiefe



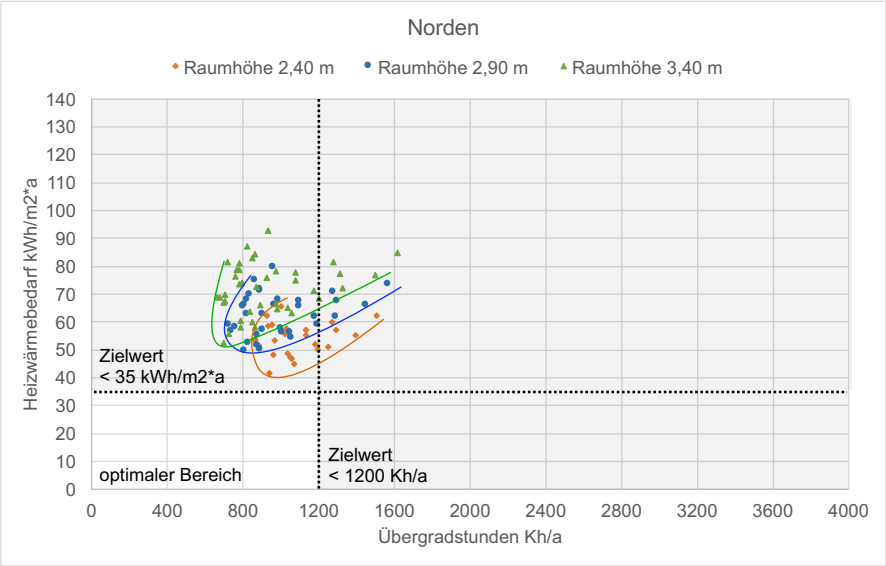


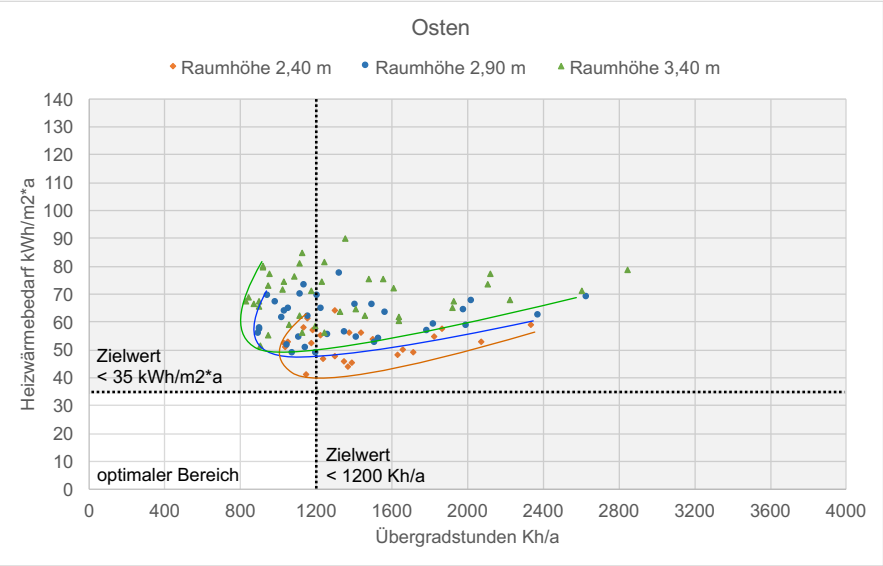


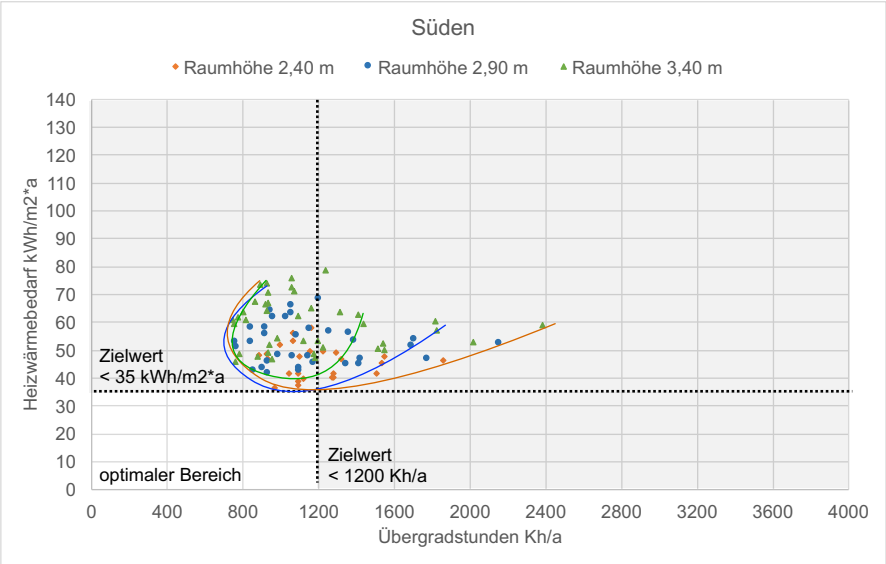


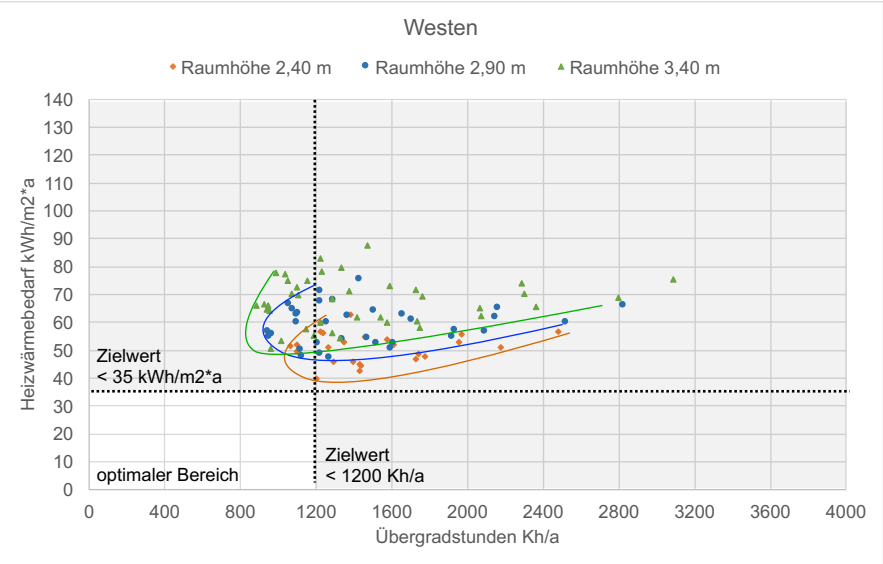
Leichtbeton, Eckraum

Raumhöhe



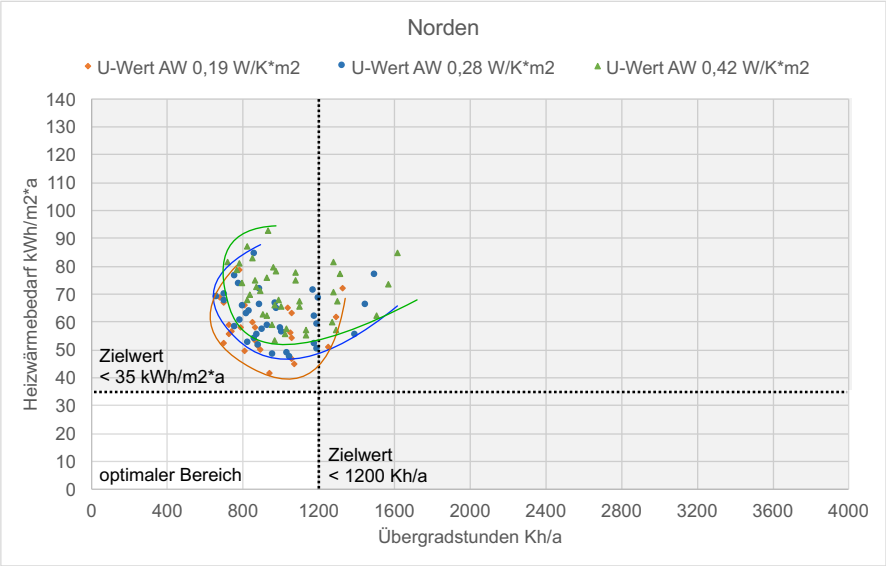


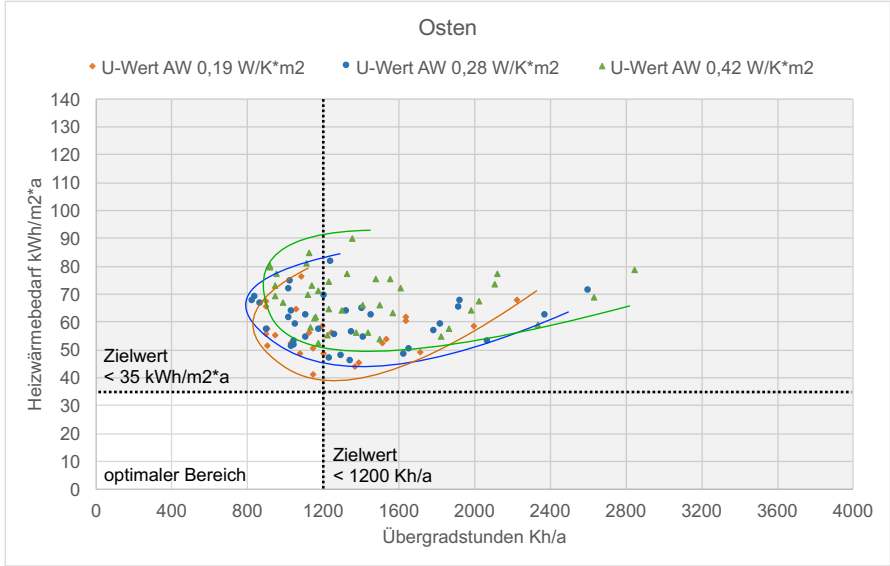


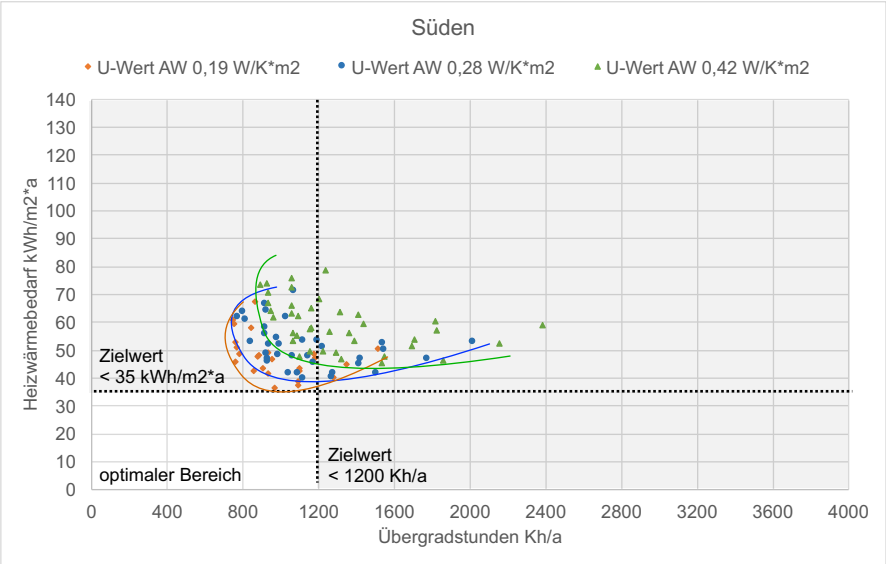


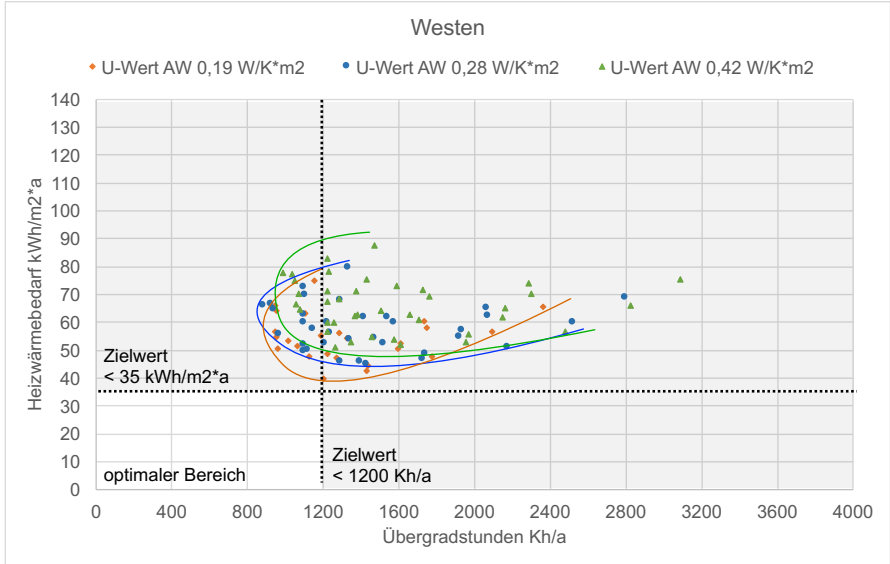
Leichtbeton, Eckraum

U-Wert Außenwand (AW)



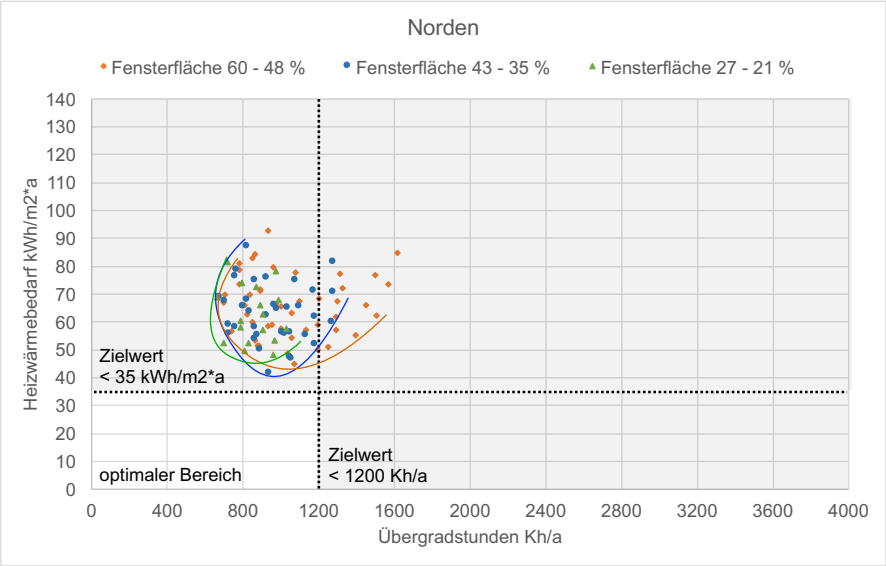


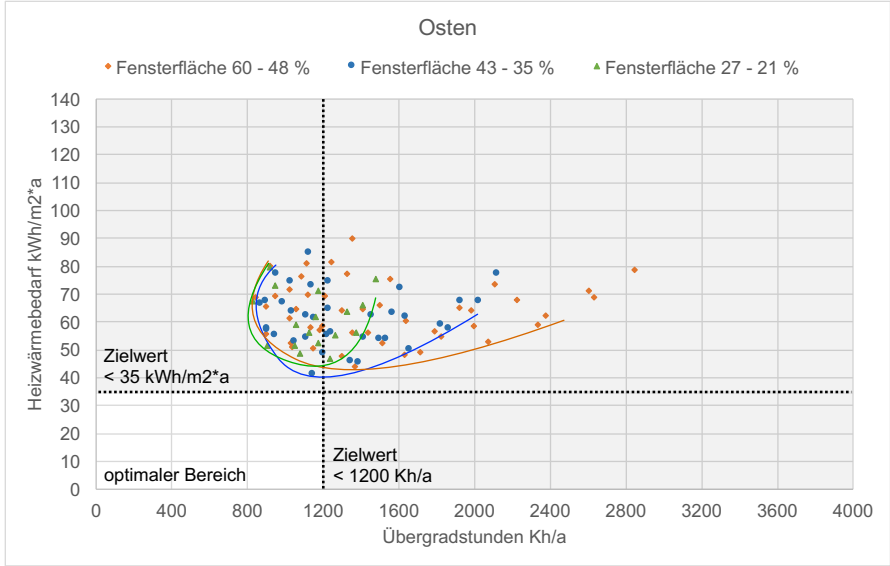


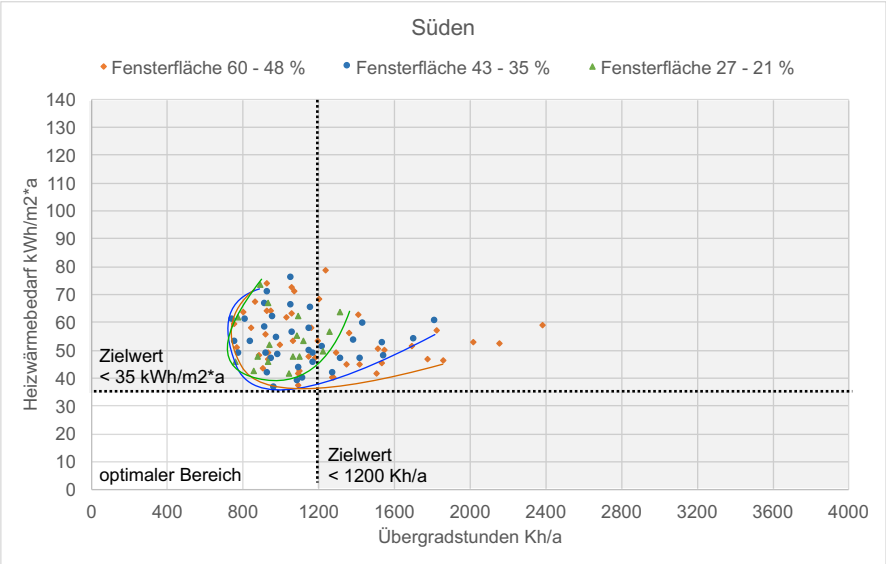


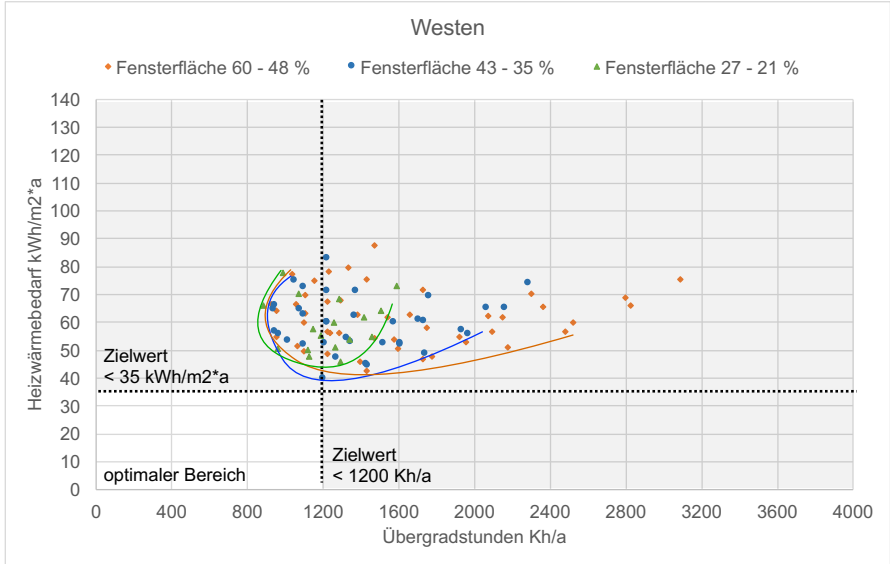
Leichtbeton, Eckraum

Fensterflächenanteil



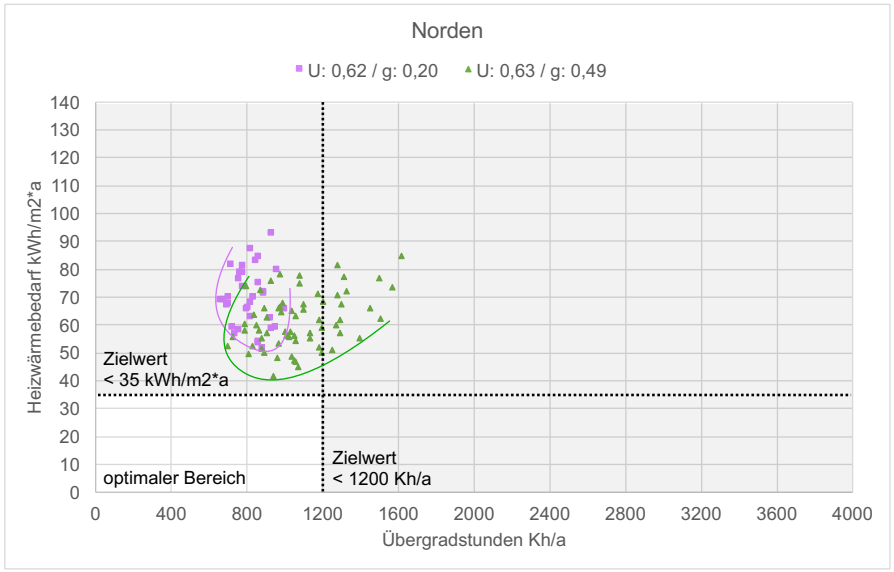


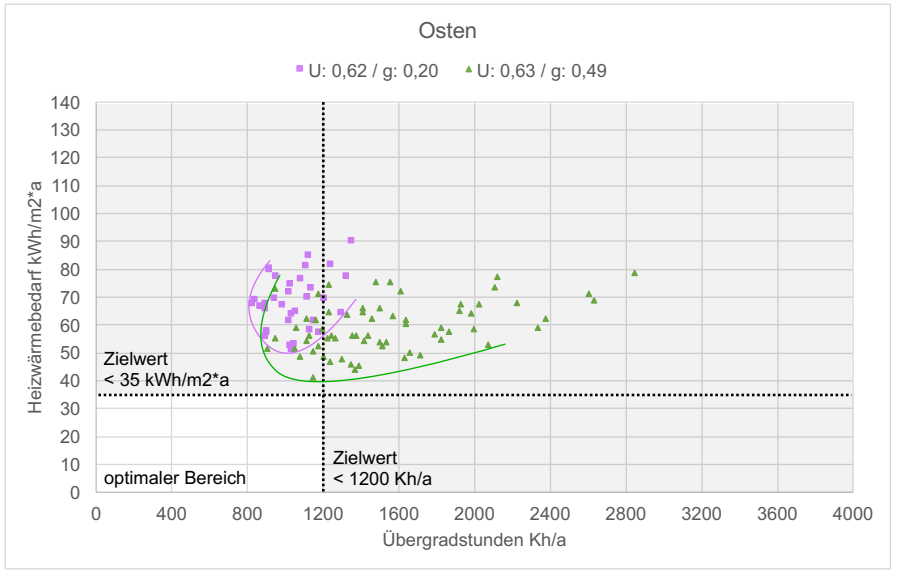


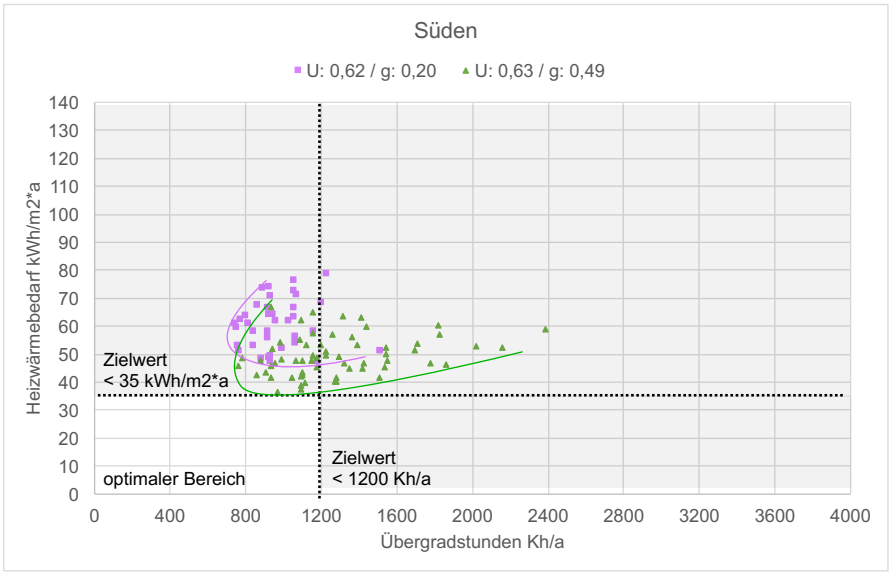


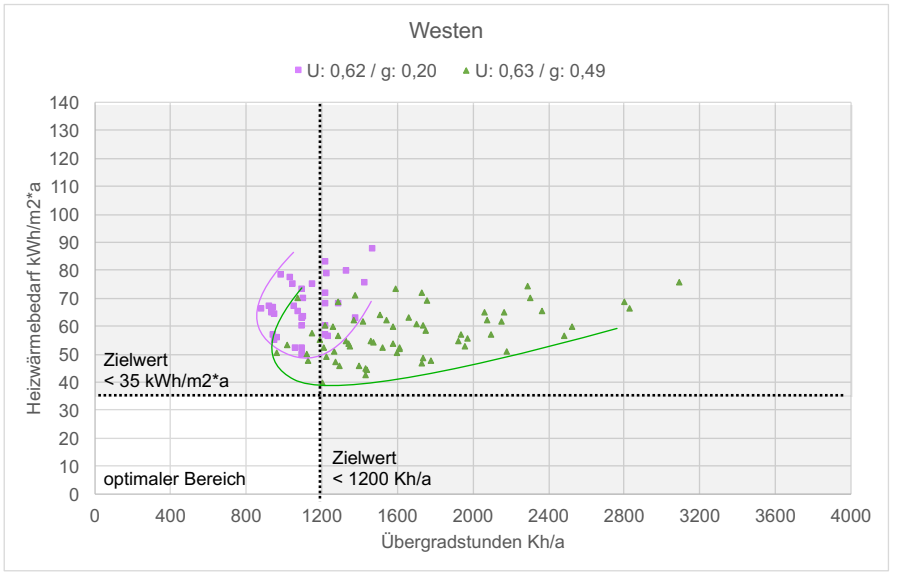
Leichtbeton, Eckraum

Glasart (U-Wert in W/K*m2 / g-Wert in Faktor ohne Einheit)



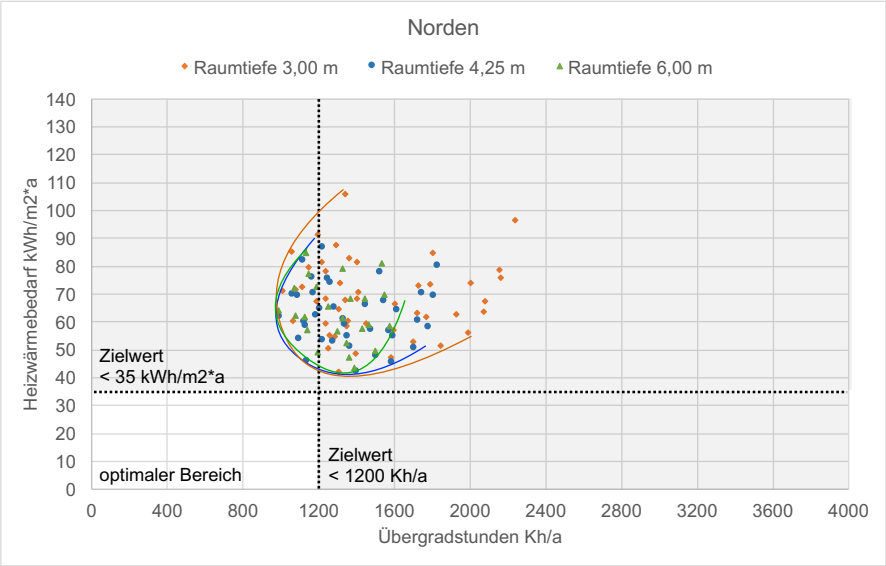


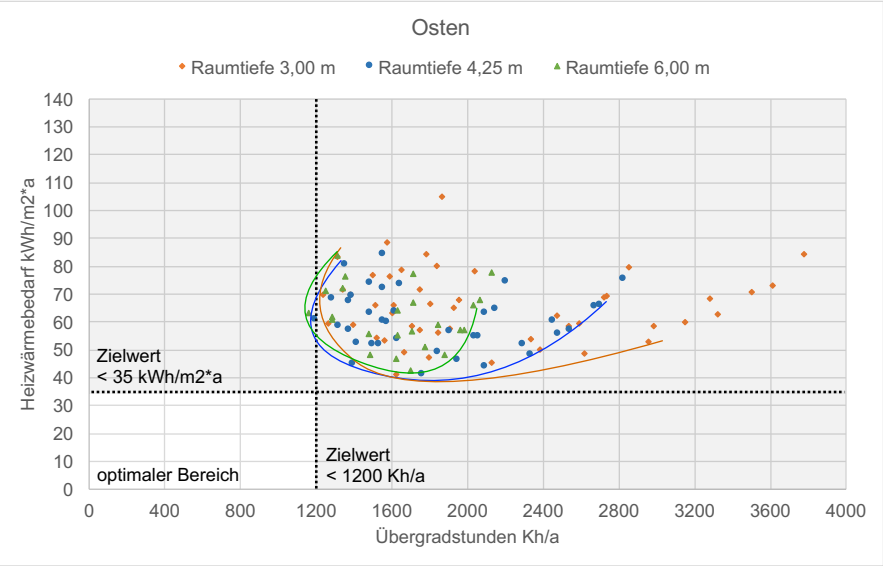


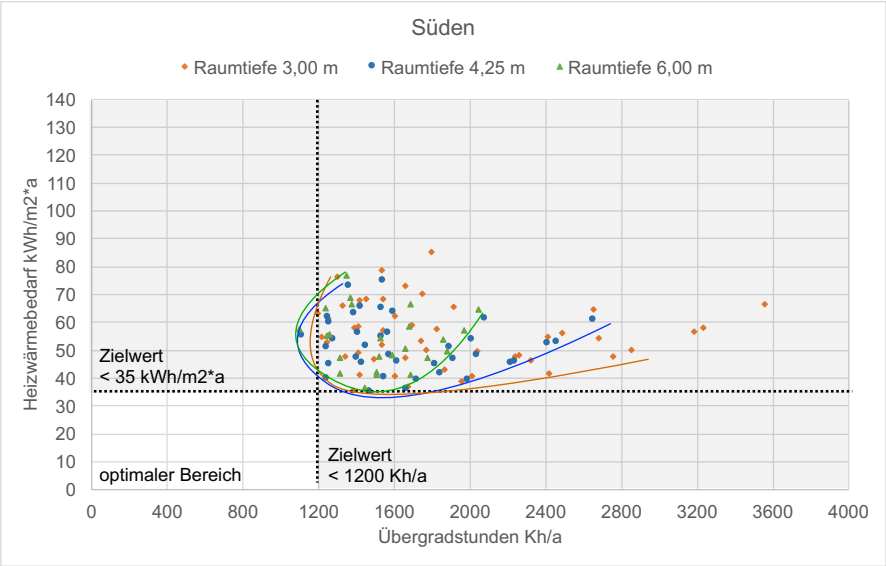


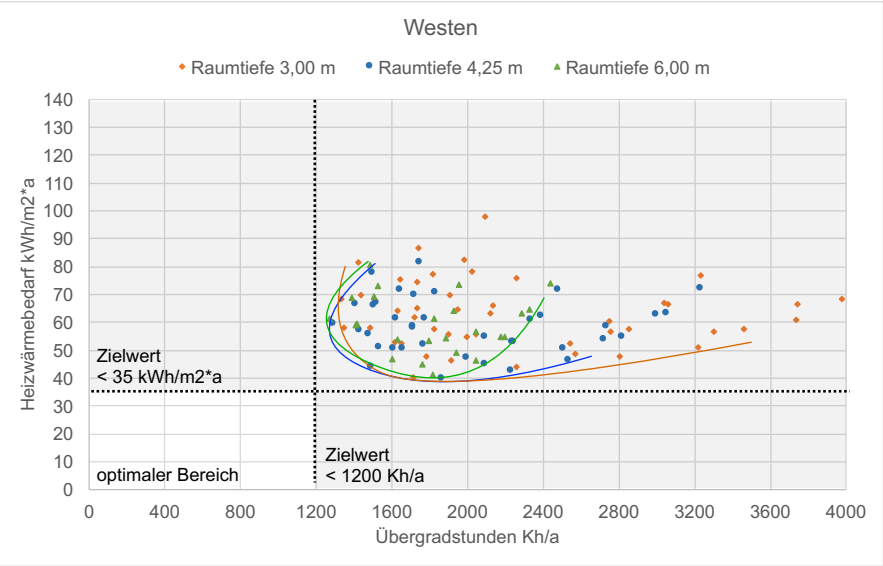
Holz massiv, Eckraum

Raumtiefe



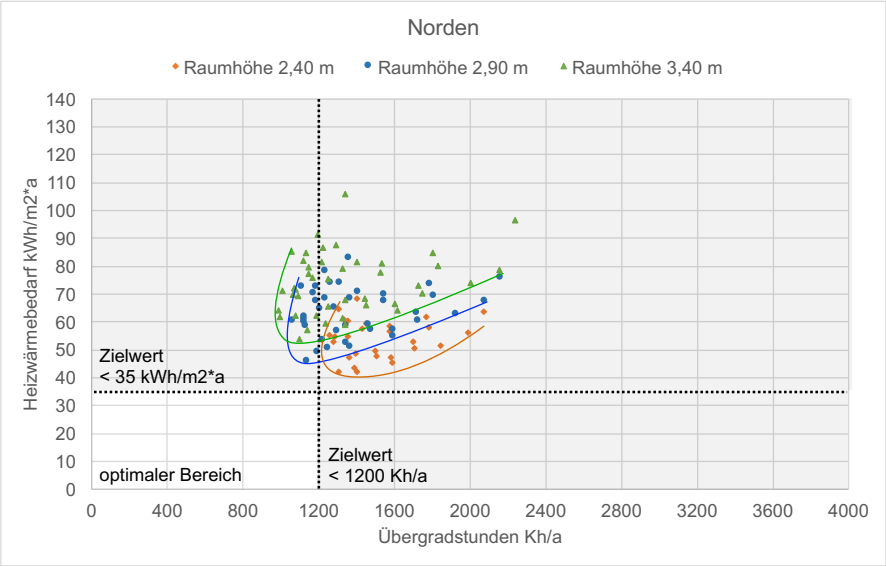


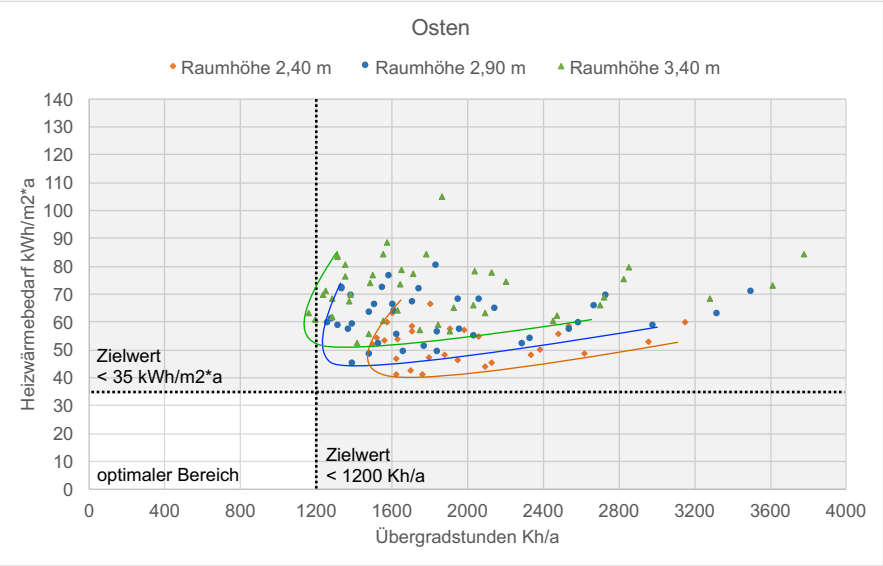


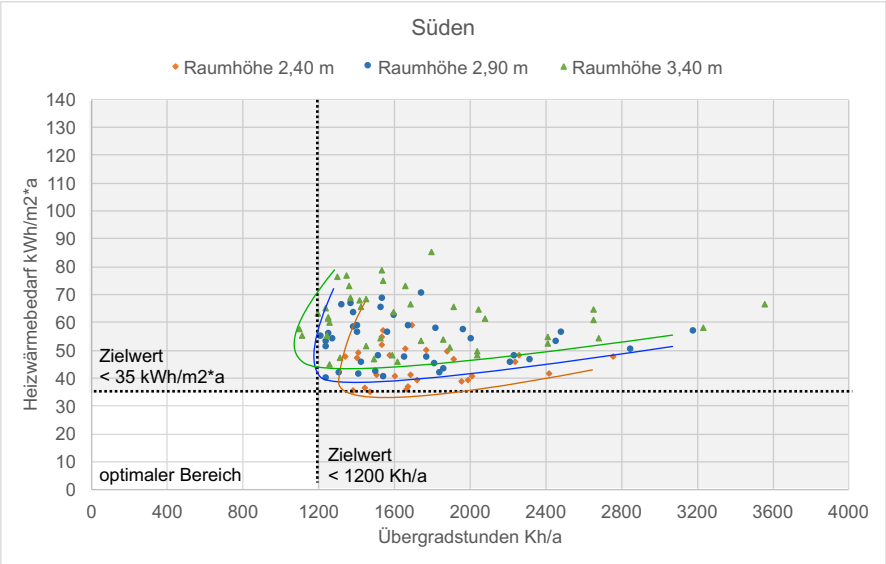


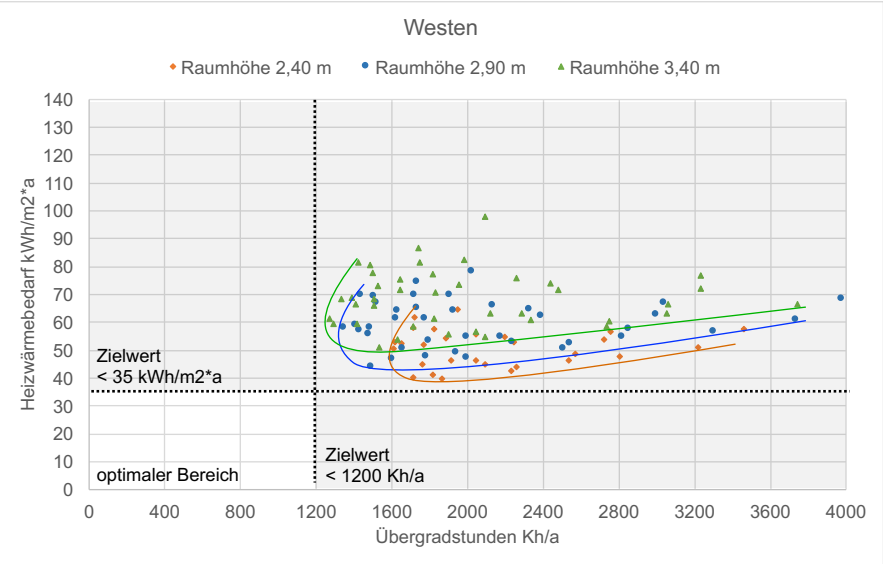
Holz massiv, Eckraum

Raumhöhe



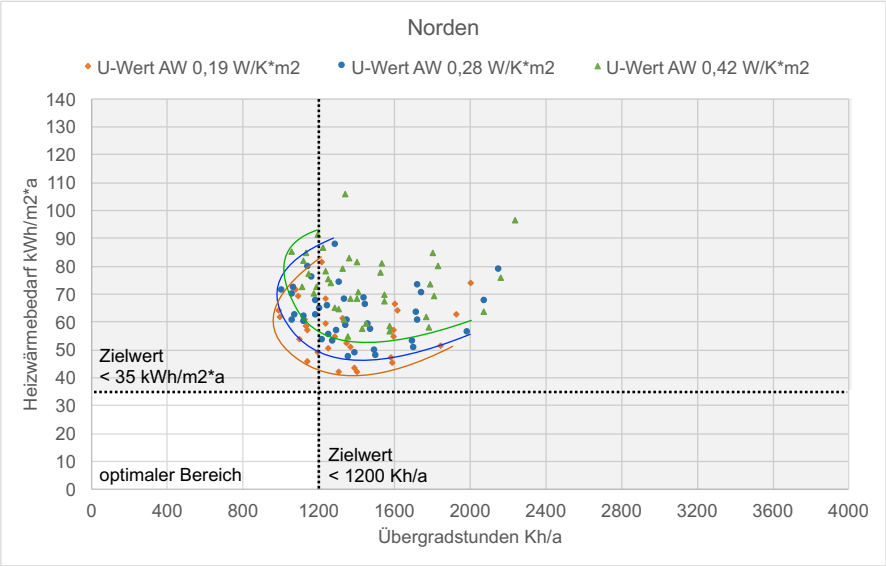


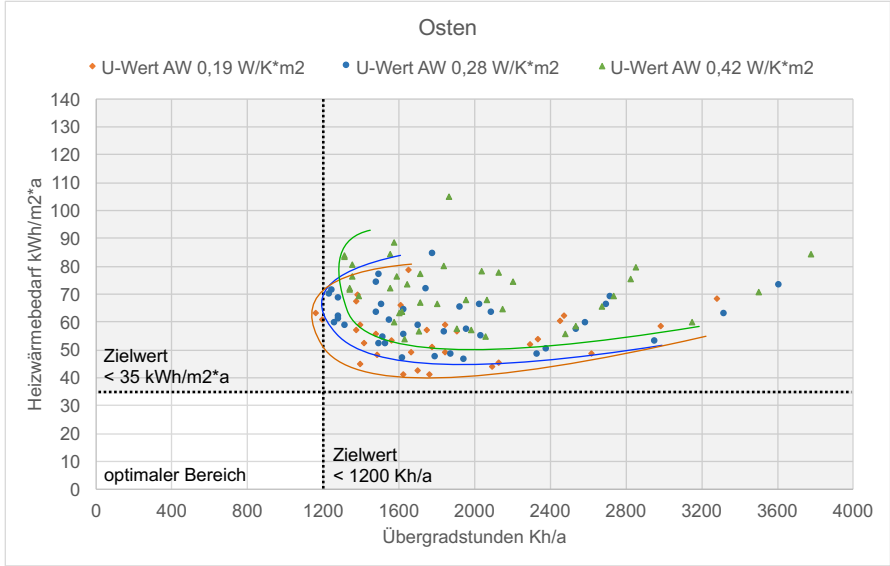


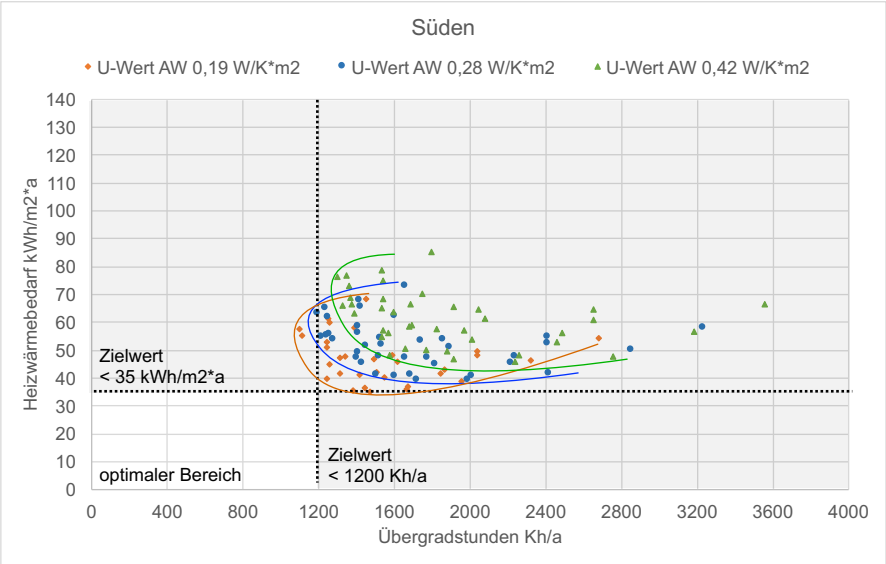


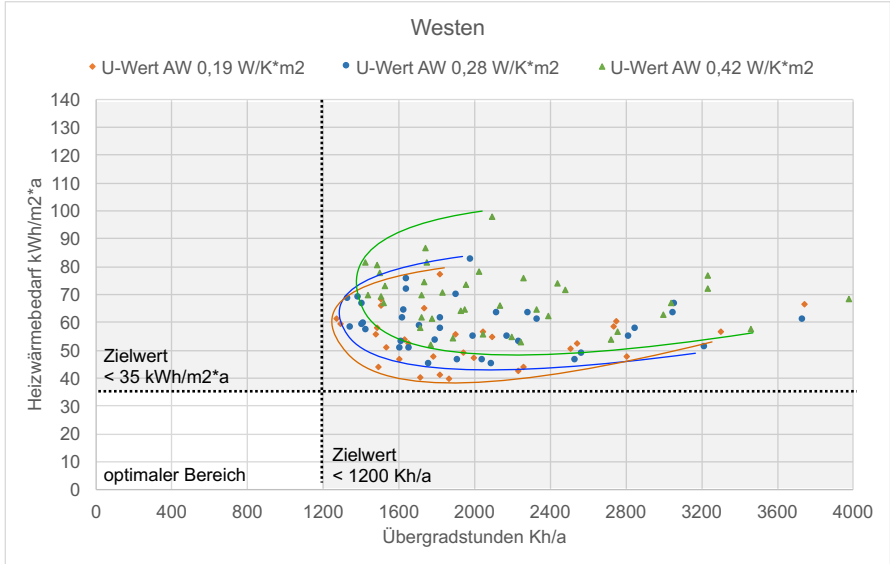
Holz massiv, Eckraum

U-Wert Außenwand (AW)



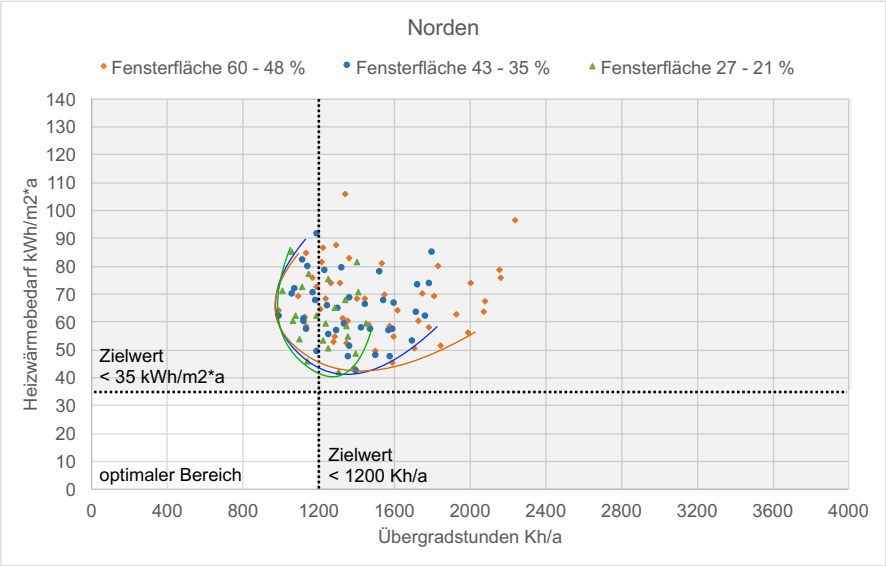


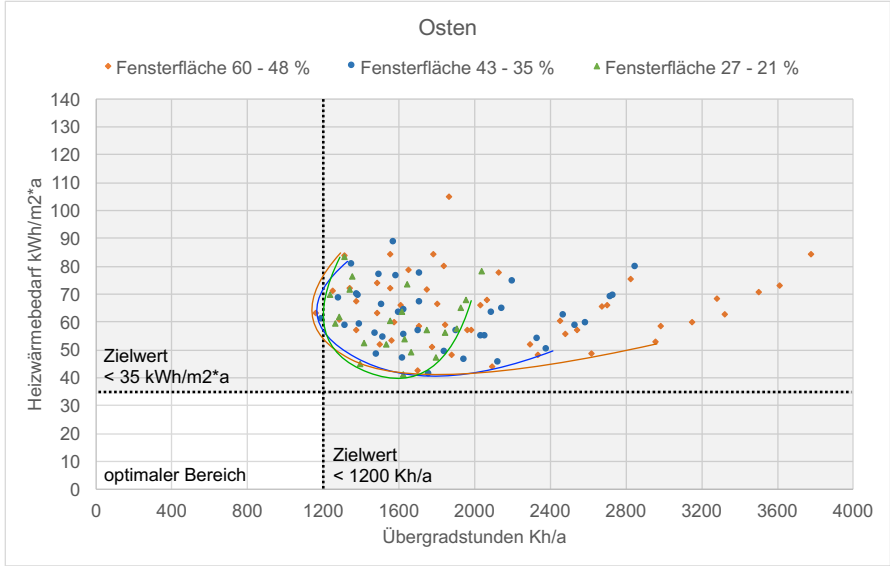


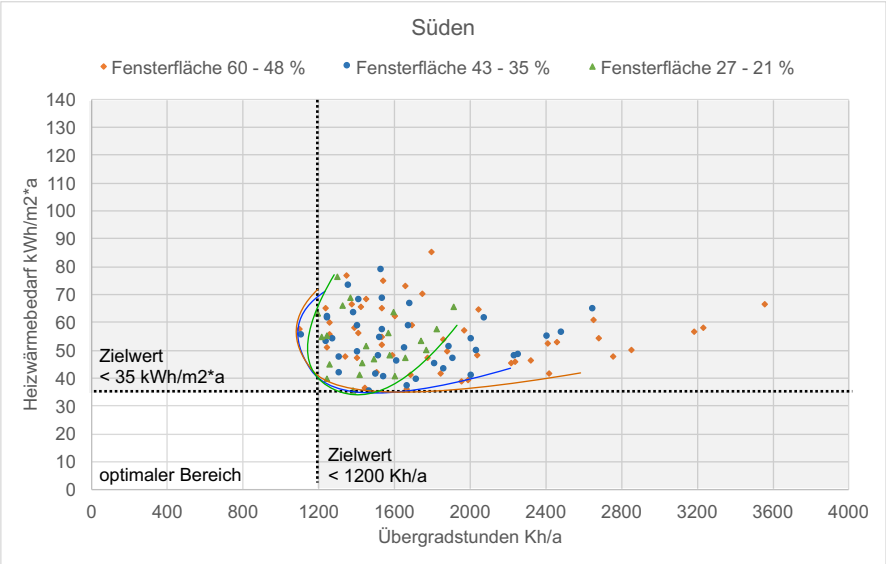


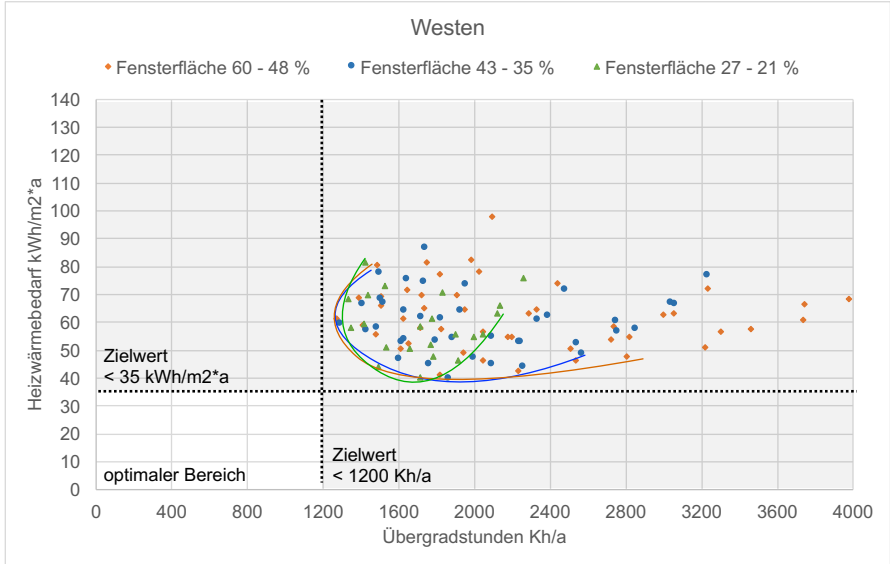
Holz massiv, Eckraum

Fensterflächenanteil



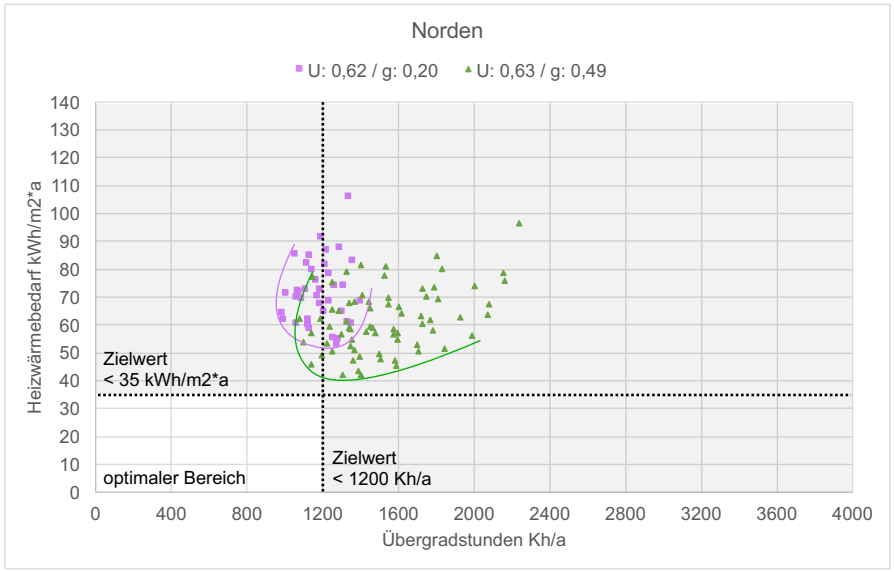


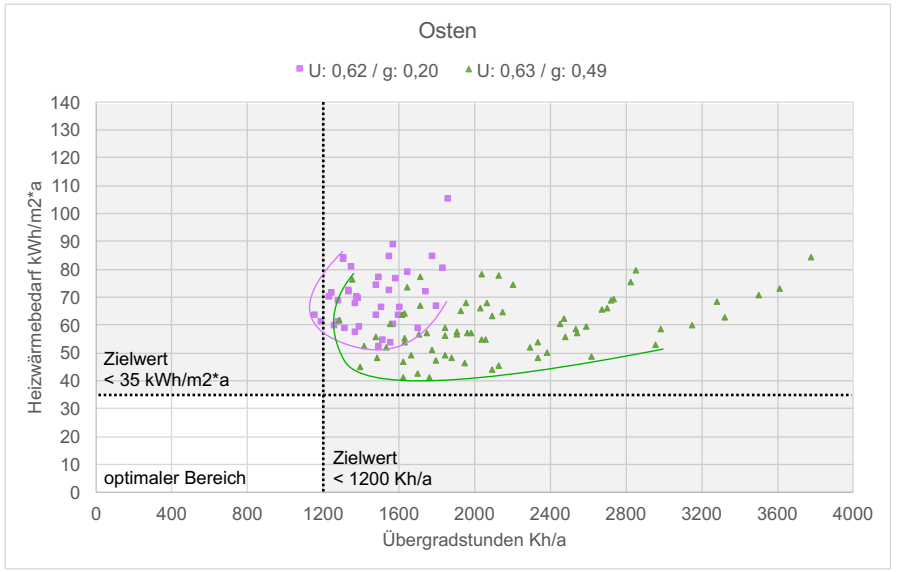


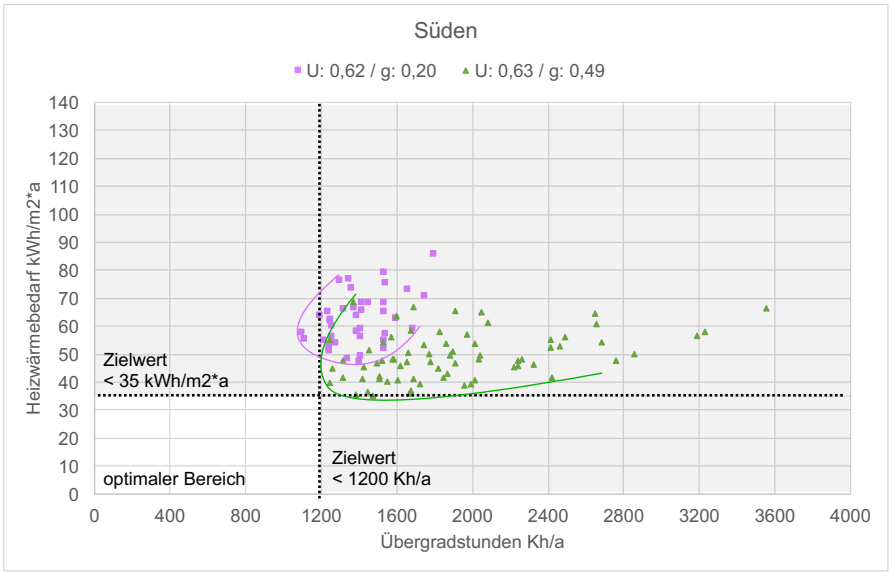


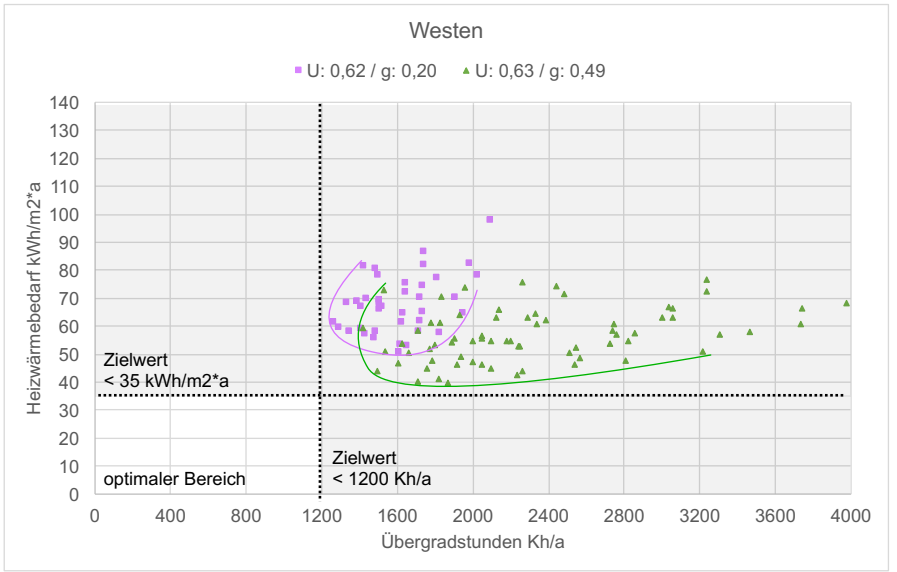
Holz massiv, Eckraum

Glasart (U-Wert in W/K*m2 / g-Wert in Faktor ohne Einheit)









III. Robustheitsanalyse

Tabelle 1 *Untersuchte Raumvarianten der Robustheitsanalyse*

Raum				TGA	
Raumtyp	Bauart	Außenwand	Fenster	Wärmeerzeuger +Wärmeverteiler	Lüftung
Mittelraum	Mauerwerk	einstofflich	3-Scheiben-WS	WP + FBH	Fenster + AbL Bad
	Leichtbeton	einstofflich	3-Scheiben-WS	WP + FBH	Fenster + AbL Bad
	Holz_Hybrid	hybrid	3-Scheiben-WS	WP + FBH	Fenster + AbL Bad
	Holz_Sonnenschutz	einstofflich	3-Scheiben-WS / Sonnenschutz	WP + FBH	Fenster + AbL Bad
	Standard	WDVS	3-Scheiben-WS	BWK + Radiator	Fenster + AbL Bad
	Niedrigenergie	WDVS	3-Scheiben-WS / Sonnenschutz	WP + FBH	LA + WRG
Eckraum	Mauerwerk	einstofflich	3-Scheiben-WS	WP + FBH	Fenster + AbL Bad
	Leichtbeton	einstofflich	3-Scheiben-WS	WP + FBH	Fenster + AbL Bad
	Holz_Hybrid	hybrid	3-Scheiben-WS	WP + FBH	Fenster + AbL Bad
	Holz_Sonnenschutz	einstofflich	3-Scheiben-WS / Sonnenschutz	WP + FBH	Fenster + AbL Bad
	Standard	WDVS	3-Scheiben-WS	BWK + Radiator	Fenster + AbL Bad
	Niedrigenergie	WDVS	3-Scheiben-WS / Sonnenschutz	WP + FBH	LA + WRG

Die ersten vier Spalten unterteilen die Varianten nach ihren räumlichen Eigenschaften: Raumtyp (Mittel- oder Eckraum), Baustandard (gegebenenfalls mit außenliegendem Sonnenschutz, oder aber mit zusätzlich integrierter Speichermasse (Hybrid)), Konstruktion der Außenwand (einstofflich, hybrid, oder als Wärmedämmverbundsystem (WDVS)), sowie die Qualität der Verglasung als Wärmeschutzverglasung (WS).

Die zwei hinteren Spalten (TGA) definieren die technische Gebäudeausrüstung bezüglich Heizen und Lüften. Das Heizsystem wird je Baustandard entweder angesetzt als Wärmepumpe mit Fußbodenheizung (WP+FBH) oder als Brennwertkessel mit Radiatoren (BWK + Radiator). Bei der Lüftung wird unterschieden zwischen natürlichem Lüften (Fenster + Abluft Badezimmer) und mechanischer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (LA+WRG).

Tabelle 2 *Kriterien der Robustheitsanalyse*

Name Variante	Unsichere Randbedingung	Klima	Luftwechsel	Interne Gewinne	Sonnenschutz	
					aktiv	defekt
Base Case	TRY2010x_Muenchen; ideale Lüftung; geringe interne Gewinne; kein Sonnenschutz	TRY2010x_Muenchen	Lüftung ideal	5 W/m² Geräte + 4 W/m² Kunstlicht	Nein	
Klima	TRY2045y_Muenchen	TRY2045y_Muenchen	Lüftung ideal	5 W/m² Geräte + 4 W/m² Kunstlicht	Nein	
Keine Lüftung	Nutzer / Anlage lüftet nicht: Infiltrations- (0.2) + Nachtlüftung (NL)	TRY2010x_Muenchen	n = 0.2 /h + 4 /h*NL	5 W/m² Geräte + 4 W/m² Kunstlicht	Nein	
Dauerlüftung	Nutzer / Anlage lüftet dauerhaft und erhöht: Infiltrations- (0.2) + Anwesenheits- (ANW) + Nachtlüftung (NL)	TRY2010x_Muenchen	n = 0.2 /h + 2 /h * ANW + 4 /h * NL	5 W/m² Geräte + 4 W/m² Kunstlicht	Nein	
Interne Gewinne erhöht	10 W/m² Geräte + 10 W/m² Kunstlicht	TRY2010x_Muenchen	Lüftung ideal	10 W/m² Geräte + 10 W/m² Kunstlicht	Nein	
Ausfall Sonnenschutz	nur bei Raummodell "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	TRY2010x_Muenchen	Lüftung ideal	5 W/m² Geräte + 4 W/m² Kunstlicht	Ja Fc = 0.2	Ja

Tabelle 3: *Bauphysikalische Eigenschaften der Raumvarianten*

Raum	Geometrie			Außenwand				Fenster								Sommerlicher Wärmeschutz		Anzahl Varianten		
Typraum + Bauart	Raumtiefe	Raumbreite	Raumhöhe	Wanddicke/ Laibungstiefe	U-Wert Außenwand	Fläche Außenwand	Wärmebrücken	Typ Verglasung	Laibungstiefe außen	g-Wert Energiedurchlassgrad	Ug-Wert	T-Vis Lichtdurchlässigkeit	Fensterflächenanteil	Fensterfläche	Daylightfactor	zusätzliche Speichermasse	Sonnenschutz	Orientierung: SW / NO	unsichere Randbedingungen	Orientierung * Randbedingung
	[m]	[m]	[m]	[m]	[W/(m²K)]	[m²]	[W/(m²K)]		[m]		[W/(m²K)]			[m²]	[%]					
Mittelraum Mauerwerk	6.00	3.00	2.90	0.40	0.28	6.38	0.10	3-WS	0.40	0.49	0.63	0.71	0.27	2.32	2.00	Nein	Nein	2	5	10
Mittelraum Leichtbeton	6.00	3.00	2.90	0.63	0.28	5.94	0.10	3-WS	**0.63**	0.49	0.63	0.71	0.32	**2.76**	2.00	Nein	Nein	2	5	10
Mittelraum Holz_Hybrid	6.00	3.00	2.90	0.40	0.28	6.38	0.10	3-WS	0.40	0.49	0.63	0.71	0.27	2.32	2.00	Ja	Nein	2	5	10
Mittelraum Holz_Sonnenschutz	6.00	3.00	2.90	0.40	0.28	6.38	0.10	3-WS	0.40	0.49	0.63	0.71	0.27	2.32	2.00	Nein	Ja	2	6	12
Mittelraum Standard	6.00	3.00	2.90	0.40	0.27	6.38	0.05	3-WS	0.40	0.49	0.63	0.71	0.27	2.32	2.00	Nein	Nein	2	5	10
Mittelraum Niedrigenergie	6.00	3.00	2.90	0.47	0.16	6.25	0.03	3-WS	**0.17**	0.49	0.63	0.71	0.28	**2.45**	2.00	Nein	Ja	2	6	12
Eckraum Mauerwerk	6.00	3.00	2.90	0.40	0.28	15.38	0.10	3-WS	0.40	0.49	0.63	0.71	0.27	2.32	2.00	Nein	Nein	2	5	10
Eckraum Leichtbeton	6.00	3.00	2.90	0.63	0.28	5.94	0.10	3-WS	**0.63**	0.49	0.63	0.71	0.32	**2.76**	2.00	Nein	Nein	2	5	10
Eckraum Holz_Hybrid	6.00	3.00	2.90	0.40	0.28	15.38	0.10	3-WS	0.40	0.49	0.63	0.71	0.27	2.32	2.00	Ja	Nein	2	5	10
Eckraum Holz_Sonnenschutz	6.00	3.00	2.90	0.40	0.28	15.38	0.10	3-WS	0.40	0.49	0.63	0.71	0.27	2.32	2.00	Nein	Ja	2	6	12
Eckraum Standard	6.00	3.00	2.90	0.40	0.27	15.38	0.05	3-WS	0.40	0.49	0.63	0.71	0.27	2.32	2.00	Nein	Nein	2	5	10
Eckraum Niedrigenergie	6.00	3.00	2.90	0.47	0.16	15.25	0.03	3-WS	**0.17**	0.49	0.63	0.71	0.28	**2.45**	2.00	Nein	Ja	2	6	12
																		Gesamt		**128**

Tabelle 4: *Ergebnisse der Robustheitsanalyse - Ausrichtung Nordost*

Robustheitsanalyse auf Raumebene - Ausrichtung Nordost

Unsichere Randbedingungen		Keine Lüftung	IntG erhöht	Klima	Base Case	Dauerlüftung	Ausfall SoSchu
	Wetterdaten	TRY 2010_extrem	TRY 2010_extrem	TRY 2045_normal	TRY 2010_extrem	TRY 2010_extrem	TRY 2010_extrem
	Lüftung	Infiltration (0.2/h) + Nacht (4.0/h)	Lüftung ideal	Lüftung ideal	Lüftung ideal	Infiltration (0.2/h) + Nutzer (2.0/h) + Nacht (4.0/h)	Lüftung ideal
	Interne Gewinne (IntG)	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 10 W/m² Licht: 10 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²
	Sonnenschutz (SoSchu)	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	defekt bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"
	Dynamische Simulation	↓	↓	↓	↓	↓	↓
HWB [kWh/(m²a)]	Mittelraum Mauerwerk	**5.2** -81%	**10.8** -61%	**16.7** -39%	**27.5** 0%	**51.3** 87%	
	Mittelraum Leichtbeton	**5.9** -79%	**11.3** -60%	**17.3** -39%	**28.4** 0%	**52.3** 84%	
	Mittelraum Holz_Hybrid	**4.2** -84%	**9.5** -65%	**15.7** -41%	**26.8** 0%	**49.4** 84%	
	Mittelraum Holz_Sonnenschutz	**3.9** -85%	**9.9** -63%	**15.8** -41%	**26.7** 0%	**48.2** 81%	**26.7** 0%
	Mittelraum Standard	**2.7** -89%	**6.7** -73%	**14.1** -43%	**24.9** 0%	**50.1** 101%	
	Mittelraum Niedrigenergie		**1.3** -85%	**3.2** -62%	**8.5** 0%	**67.6** 695%	**8.5** 0%
	Eckraum Mauerwerk	**29.3** -44%	**32** -39%	**37.5** -28%	**52.1** 0%	**70.7** 36%	
	Eckraum Leichtbeton	**30.3** -43%	**32.6** -38%	**38.2** -28%	**52.8** 0%	**71.5** 35%	
	Eckraum Holz_Hybrid	**29.8** -44%	**32** -40%	**37.9** -28%	**52.9** 0%	**70.5** 33%	
	Eckraum Holz_Sonnenschutz	**28.9** -45%	**32.2** -39%	**37.7** -29%	**52.9** 0%	**69.3** 31%	**52.9** 0%
	Eckraum Standard	**29** -45%	**28.4** -46%	**36.6** -31%	**53** 0%	**81** 53%	
	Eckraum Niedrigenergie		**3.3** -85%	**13.3** -40%	**22.1** 0%	**83.8** 279%	**22.1** 0%
ÜTGS [Kh/a]	Mittelraum Mauerwerk	**738** -12%	**1407** 68%	**83** -90%	**837** 0%	**1051** 26%	
	Mittelraum Leichtbeton	**670** -14%	**1348** 72%	**62** -92%	**783** 0%	**961** 23%	
	Mittelraum Holz_Hybrid	**1356** 30%	**1718** 65%	**188** -82%	**1042** 0%	**1500** 44%	
	Mittelraum Holz_Sonnenschutz	**1094** 8%	**1686** 66%	**297** -71%	**1013** 0%	**1319** 30%	**1226** 21%
	Mittelraum Standard	**1500** 40%	**1830** 71%	**221** -79%	**1070** 0%	**1560** 46%	
	Mittelraum Niedrigenergie		**2000** 235%	**13** -98%	**597** 0%	**1005** 68%	**1096** 84%
	Eckraum Mauerwerk	**928** 0%	**1494** 61%	**117** -87%	**927** 0%	**1183** 28%	
	Eckraum Leichtbeton	**820** -4%	**1414** 65%	**87** -90%	**856** 0%	**1058** 24%	
	Eckraum Holz_Hybrid	**1251** 21%	**1661** 60%	**182** -82%	**1037** 0%	**1406** 36%	
	Eckraum Holz_Sonnenschutz	**1072** 6%	**1641** 62%	**285** -72%	**1016** 0%	**1270** 25%	**1215** 20%
	Eckraum Standard	**978** 10%	**1560** 76%	**103** -88%	**888** 0%	**1150** 30%	
	Eckraum Niedrigenergie		**1604** 299%	**1** -100%	**402** 0%	**743** 85%	**778** 94%

Tabelle 5: *Ergebnisse der Robustheitsanalyse - Ausrichtung Südwest*

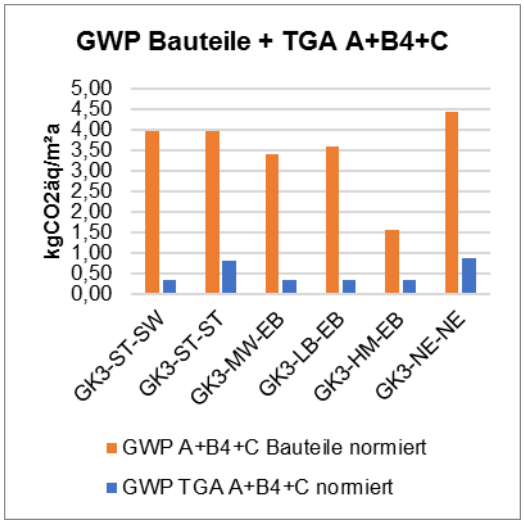
Robustheitsanalyse auf Raumebene - Ausrichtung Südwest

Unsichere Randbedingungen		Keine Lüftung	IntG erhöht	Klima	Base Case	Dauerlüftung	Ausfall SoSchu
	Wetterdaten	TRY 2010_extrem	TRY 2010_extrem	TRY 2045_normal	TRY 2010_extrem	TRY 2010_extrem	TRY 2010_extrem
	Lüftung	Infiltration (0.2/h) + Nacht (4.0/h)	Lüftung ideal	Lüftung ideal	Lüftung ideal	Infiltration (0.2/h) + Nutzer (2.0/h) + Nacht (4.0/h)	Lüftung ideal
	Interne Gewinne (IntG)	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 10 W/m² Licht: 10 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²	1 Person: 70 W Geräte: 5 W/m² Licht: 4 W/m²
	Sonnenschutz (SoSchu)	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	aktiv bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"	defekt bei "Massivholz SoSchu" und "Niedrigenergie"
	Dynamische Simulation	↓	↓	↓	↓	↓	↓
HWB [kWh/(m²a)]	Mittelraum Mauerwerk	**2.4** -90%	**8.3** -65%	**11.9** -50%	**23.9** 0%	**47.4** 98%	
	Mittelraum Leichtbeton	**2.7** -89%	**8.7** -64%	**12.3** -50%	**24.5** 0%	**48.3** 97%	
	Mittelraum Holz_Hybrid	**1.4** -94%	**6.9** -70%	**10.8** -52%	**22.7** 0%	**44.8** 97%	
	Mittelraum Holz_Sonnenschutz	**1.7** -93%	**7.6** -67%	**11** -52%	**22.7** 0%	**43.8** 93%	**22.7** 0%
	Mittelraum Standard	**0.6** -97%	**4.9** -77%	**9.5** -55%	**21** 0%	**44.7** 113%	
	Mittelraum Niedrigenergie		**1.4** -71%	**0.9** -82%	**4.9** 0%	**61.2** 1149%	**4.9** 0%
	Eckraum Mauerwerk	**23.6** -50%	**27.8** -41%	**29.1** -39%	**47.5** 0%	**66.9** 41%	
	Eckraum Leichtbeton	**24.4** -49%	**28.2** -41%	**29.4** -39%	**48** 0%	**67.5** 41%	
	Eckraum Holz_Hybrid	**23.7** -50%	**27.5** -42%	**29** -39%	**47.8** 0%	**66.4** 39%	
	Eckraum Holz_Sonnenschutz	**23.1** -52%	**27.8** -42%	**29.1** -39%	**47.8** 0%	**65.3** 37%	**47.8** 0%
	Eckraum Standard	**22.5** -52%	**24.1** -49%	**27.6** -42%	**47.3** 0%	**74.1** 57%	
	Eckraum Niedrigenergie		**1.4** -91%	**5.4** -66%	**15.7** 0%	**76.3** 386%	**15.7** 0%
ÜTGS [Kh/a]	Mittelraum Mauerwerk	**1145** 16%	**1578** 60%	**147** -85%	**986** 0%	**1359** 38%	
	Mittelraum Leichtbeton	**977** 8%	**1483** 65%	**112** -88%	**901** 0%	**1200** 33%	
	Mittelraum Holz_Hybrid	**2055** 67%	**1930** 57%	**304** -75%	**1228** 0%	**1893** 54%	
	Mittelraum Holz_Sonnenschutz	**1247** 18%	**1739** 65%	**297** -72%	**1055** 0%	**1415** 34%	**1435** 36%
	Mittelraum Standard	**2440** 94%	**2050** 63%	**362** -71%	**1260** 0%	**1980** 57%	
	Mittelraum Niedrigenergie		**2112** 210%	**14** -98%	**681** 0%	**1096** 61%	**1602** 135%
	Eckraum Mauerwerk	**1438** 28%	**1721** 53%	**212** -81%	**1125** 0%	**1575** 40%	
	Eckraum Leichtbeton	**1236** 21%	**1602** 57%	**164** -84%	**1018** 0%	**1380** 36%	
	Eckraum Holz_Hybrid	**1850** 47%	**1918** 52%	**317** -75%	**1261** 0%	**1853** 47%	
	Eckraum Holz_Sonnenschutz	**1306** 19%	**1744** 58%	**311** -72%	**1102** 0%	**1451** 32%	**1463** 33%
	Eckraum Standard	**1530** 39%	**1810** 65%	**216** -80%	**1100** 0%	**1580** 44%	
	Eckraum Niedrigenergie		**1779** 248%	**2** -100%	**511** 0%	**872** 71%	**1254** 145%

IV. Basisvarianten – Ergebnisse LCA und LCC auf Gebäudeebene

LCA Basiskonstruktion auf Gebäudeebene

Die Berechnungsergebnisse bei den Umweltwirkungen des GWP zeigen am Ende wieder ähnliche Konstellationen wie bei der Betrachtung auf Raumebene. Das heißt, dass der Betrieb über 100 Jahre die dominante Größe in Bezug auf die Emissionen darstellt. Weiterhin sind nachwachsende Baustoffe besser geeignet für die Reduzierung der aktuellen Klimawirkungen bei der Herstellung der Baustoffe. Erneuerbare Energiequellen leisten einen wesentlichen Anteil zur Reduzierung des GWP aus dem Betrieb.



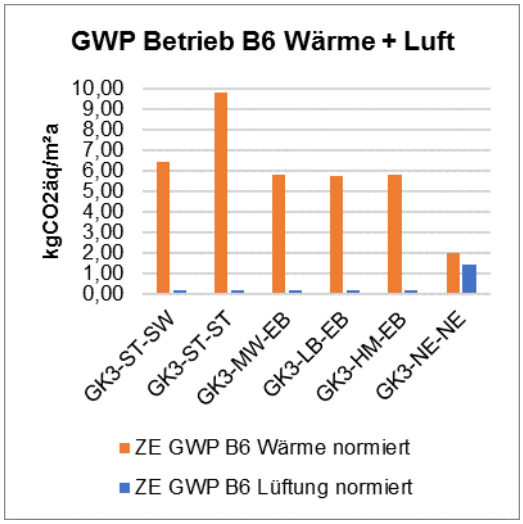
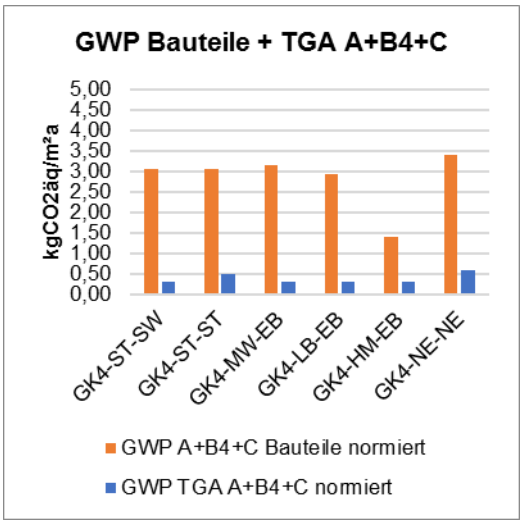


Abbildung 1: Gebäudeklasse 3 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

Tabelle 1: Gebäudeklasse 3 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

	LCA									
	Bauteile + TGA					Betrieb				
	ZE GWP A Bauteile normiert	ZE GWP B4 Bauteile normiert	ZE GWP C Bauteile normiert	**GWP A+B4+C Bauteile normiert**	**GWP TGA A+B4+C normiert**	ZE GWP B6 Wärme normiert	ZE GWP B6 Lüftung normiert	ZE GWP B6 Bet.strom normiert	ZE GWP B6 TWW normiert	**Summe GWP**
	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	**kg/CO2äq/m²a**	**kg/CO2äq/m²a**	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	**kgCO2äq /m²a**
GK3-ST-SW	1,75	1,48	0,74	**3,97**	**0,35**	6,42	0,18	7,82	2,55	**16,97**
GK3-ST-ST	1,75	1,48	0,74	**3,97**	**0,79**	9,78	0,18	7,82	0,00	**17,79**
GK3-MW-EB	1,92	0,69	0,77	**3,38**	**0,35**	5,81	0,18	7,82	2,55	**16,36**
GK3-LB-EB	2,33	0,42	0,83	**3,58**	**0,35**	5,74	0,18	7,82	2,55	**16,29**
GK3-HM-EB	-4,44	0,36	5,63	**1,55**	**0,35**	5,81	0,18	7,82	2,55	**16,36**
GK3-NE-NE	1,88	1,73	0,83	**4,44**	**0,87**	1,96	1,42	7,82	2,55	**13,74**



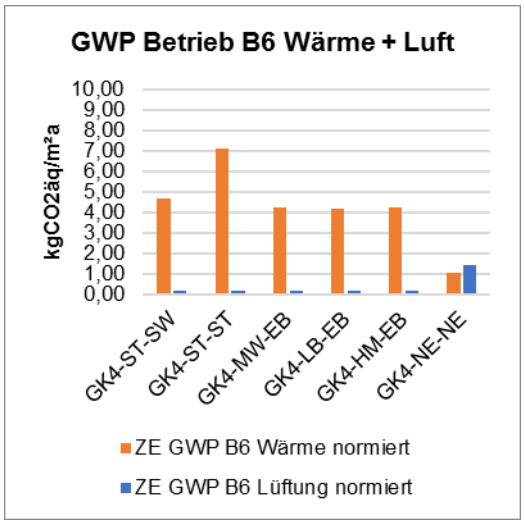
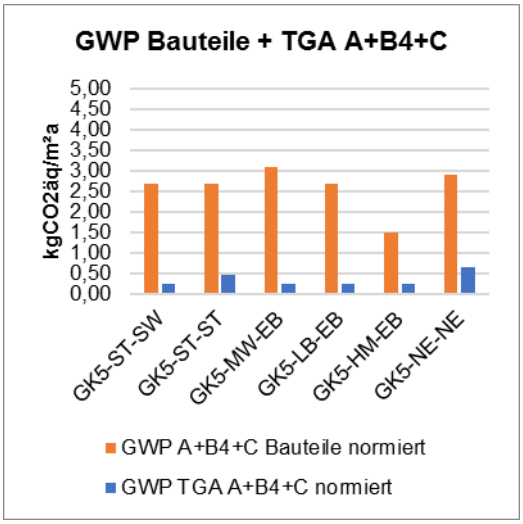


Abbildung 2: Gebäudeklasse 4 GWP Bauteile + TGA und Betrieb

Tabelle 2: Gebäudeklasse 4 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

	LCA									
	Bauteile + TGA					Betrieb				
	ZE GWP A Bauteile normiert	ZE GWP B4 Bauteile normiert	ZE GWP C Bauteile normiert	**GWP A+B4+C Bauteile normiert**	**GWP TGA A+B4+C normiert**	ZE GWP B6 Wärme normiert	ZE GWP B6 Lüftung normiert	ZE GWP B6 Bet.strom normiert	ZE GWP B6 TWW normiert	**Summe GWP**
	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	**kg/CO2äq/m²a**	**kg/CO2äq/m²a**	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	**kgCO2äq /m²a**
GK4-ST-SW	1,40	1,13	0,53	**3,06**	**0,31**	4,65	0,18	7,39	2,55	**14,77**
GK4-ST-ST	1,40	1,13	0,53	**3,06**	**0,49**	7,09	0,18	7,39	0,00	**14,66**
GK4-MW-EB	1,81	0,70	0,63	**3,14**	**0,31**	4,21	0,18	7,39	2,55	**14,33**
GK4-LB-EB	1,90	0,40	0,62	**2,92**	**0,31**	4,16	0,18	7,39	2,55	**14,28**
GK4-HM-EB	-3,21	0,36	4,23	**1,39**	**0,31**	4,21	0,18	7,39	2,55	**14,33**
GK4-NE-NE	1,49	1,31	0,61	**3,40**	**0,58**	1,06	1,42	7,39	2,55	**12,42**



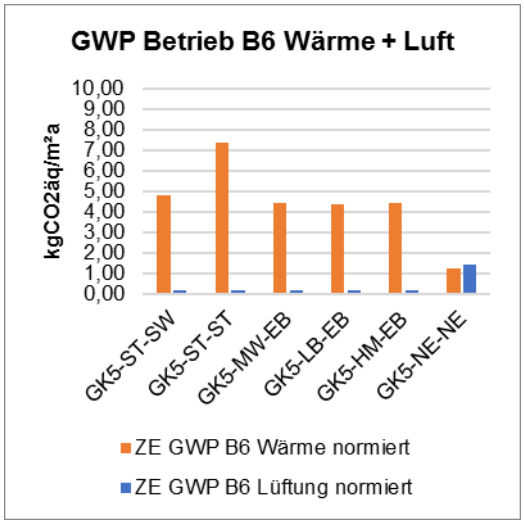


Abbildung 3: Gebäudeklasse 5 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

Tabelle 3 Gebäudeklasse 5 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

	LCA									
	Bauteile + TGA					Betrieb				
	ZE GWP A Bauteile normiert	ZE GWP B4 Bauteile normiert	ZE GWP C Bauteile normiert	**GWP A+B4+C Bauteile normiert**	**GWP TGA A+B4+C normiert**	ZE GWP B6 Wärme normiert	ZE GWP B6 Lüftung normiert	ZE GWP B6 Bet.strom normiert	ZE GWP B6 TWW normiert	**Summe GWP**
	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	**kg/CO2äq/m²a**	**kg/CO2äq/m²a**	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	**kgCO2äq /m²a**
GK5-ST-SW	1,17	0,94	0,56	**2,67**	**0,24**	4,82	0,19	7,60	2,55	**15,16**
GK5-ST-ST	1,17	0,94	0,56	**2,67**	**0,46**	7,35	0,19	7,60	0,00	**15,14**
GK5-MW-EB	1,65	0,77	0,67	**3,10**	**0,24**	4,42	0,19	7,60	2,55	**14,76**
GK5-LB-EB	1,57	0,48	0,62	**2,67**	**0,24**	4,38	0,19	7,60	2,55	**14,71**
GK5-HM-EB	-2,10	0,44	3,15	**1,49**	**0,24**	4,42	0,19	7,60	2,55	**14,76**
GK5-NE-NE	1,23	1,06	0,61	**2,89**	**0,65**	1,20	1,42	7,60	2,55	**12,77**

LCC Basiskonstruktion auf Gebäudeebene

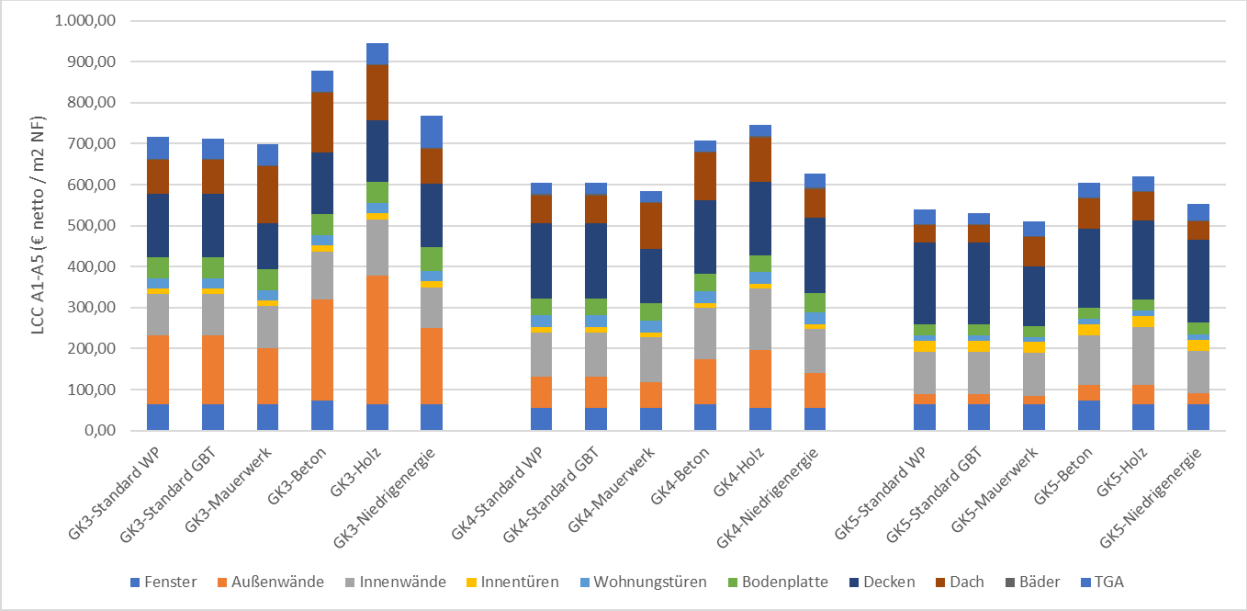


Abbildung 4: LCC Übersicht aller Gebäudeklassen nur Bauteile über 100 a und pro m² NF

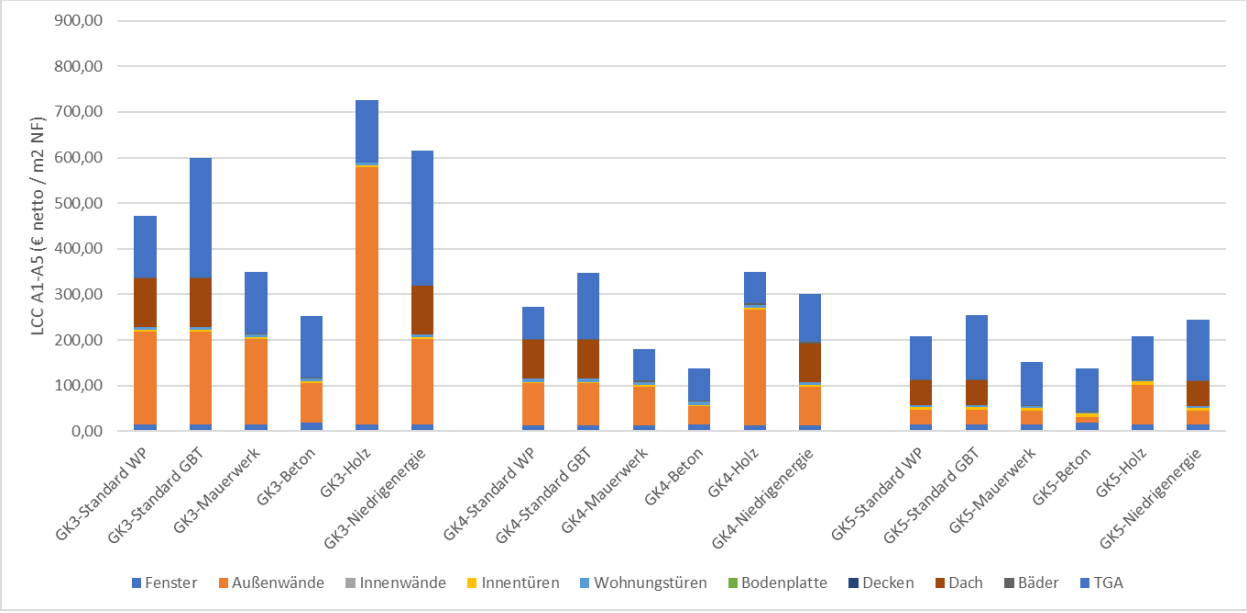


Abbildung 5: LCC Übersicht aller Gebäudeklassen nur Betrieb über 100 a und pro m² NF

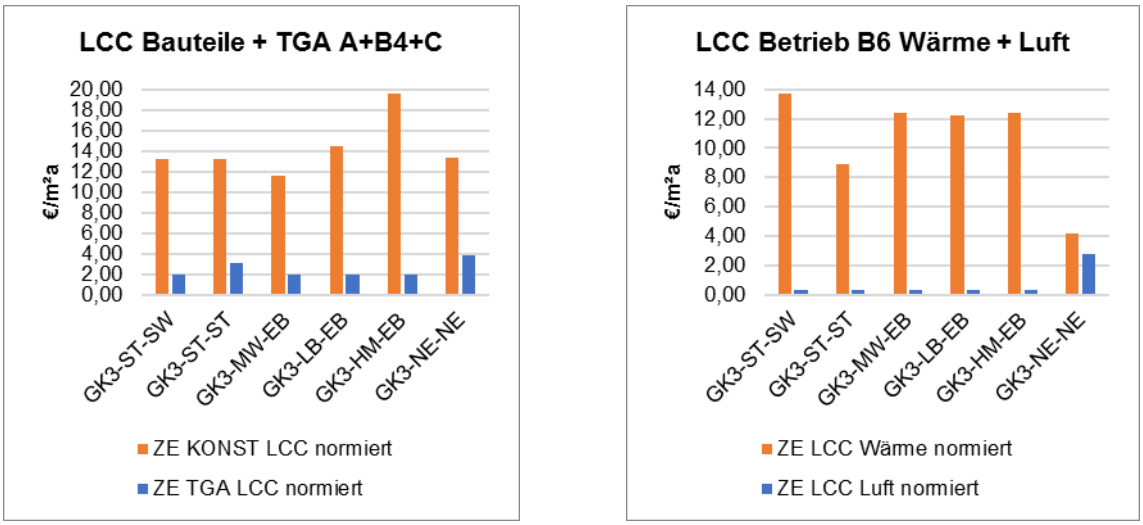
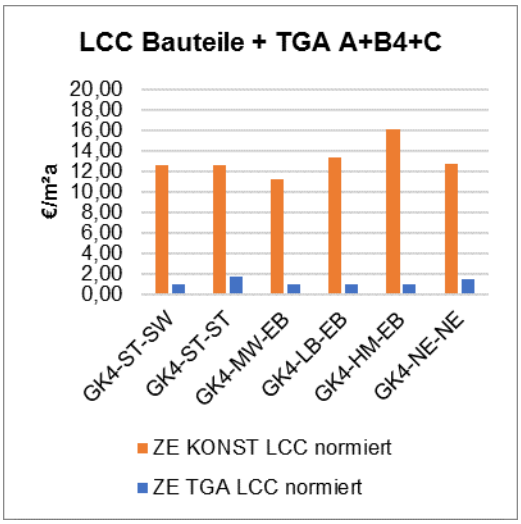


Abbildung 6: Gebäudeklasse 3 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

Tabelle 4: Gebäudeklasse 3 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

	LCC						
	Bauteile + TGA		Betrieb				
	ZE KONST LCC normiert	ZE TGA LCC normiert	ZE LCC Wärme normiert	ZE LCC Luft normiert	ZE LCC Pumpe + Licht normiert	ZE LCC TWW normiert	**Summe**
	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	**€/m²a**
GK3-ST-SW	13,18	1,91	13,69	0,35	15,20	3,70	**32,95**
GK3-ST-ST	13,18	3,14	8,89	0,35	15,20	0,00	**24,45**
GK3-MW-EB	11,63	1,91	12,40	0,35	15,20	3,70	**31,66**
GK3-LB-EB	14,46	1,91	12,25	0,35	15,20	3,70	**31,51**
GK3-HM-EB	19,57	1,91	12,40	0,35	15,20	3,70	**31,66**
GK3-NE-NE	13,29	3,79	4,17	2,75	15,20	3,70	**25,83**



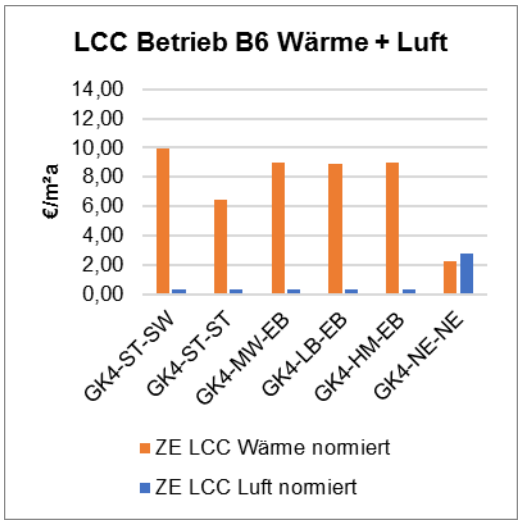
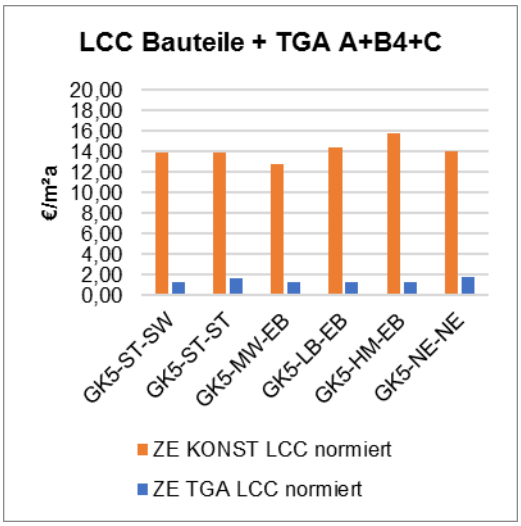


Abbildung 7: Gebäudeklasse 4 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

Tabelle 5: Gebäudeklasse 4 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

	LCC						
	Bauteile + TGA		Betrieb				
	ZE KONST LCC normiert	ZE TGA LCC normiert	ZE LCC Wärme normiert	ZE LCC Luft normiert	ZE LCC Pumpe + Licht normiert	ZE LCC TWW normiert	**Summe**
	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	**€/m²a**
GK4-ST-SW	12,63	0,97	9,92	0,35	14,36	3,70	**28,34**
GK4-ST-ST	12,63	1,72	6,44	0,35	14,36	0,00	**21,16**
GK4-MW-EB	11,24	0,97	8,99	0,35	14,36	3,70	**27,40**
GK4-LB-EB	13,32	0,97	8,87	0,35	14,36	3,70	**27,29**
GK4-HM-EB	16,07	0,97	8,99	0,35	14,36	3,70	**27,40**
GK4-NE-NE	12,72	1,42	2,27	2,75	14,36	3,70	**23,08**



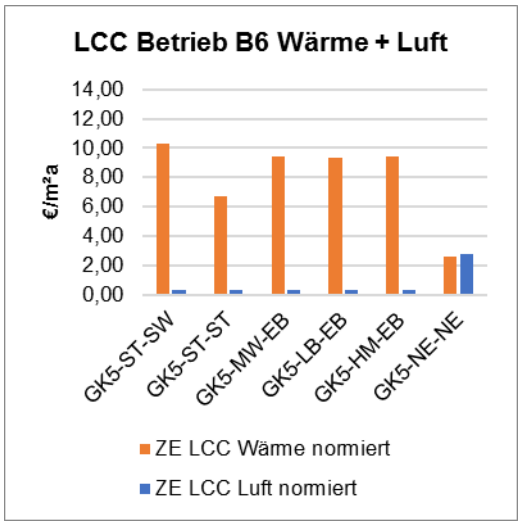


Abbildung 8: Gebäudeklasse 5 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

Tabelle 6: Gebäudeklasse 5 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

	LCC						
	Bauteile + TGA		Betrieb				
	ZE KONST LCC normiert	ZE TGA LCC normiert	ZE LCC Wärme normiert	ZE LCC Luft normiert	ZE LCC Pumpe + Licht normiert	ZE LCC TWW normiert	**Summe**
	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	**€/m²a**
GK5-ST-SW	14,72	1,31	141,91	9,78	40,14	40,23	**232,05**
GK5-ST-ST	14,72	1,68	25,34	9,78	40,14	0,00	**75,26**
GK5-MW-EB	12,77	1,31	102,47	9,78	40,14	40,23	**192,61**
GK5-LB-EB	14,45	1,31	101,42	9,78	40,14	40,23	**191,56**
GK5-HM-EB	15,80	1,31	102,47	9,78	40,14	40,23	**192,61**
GK5-NE-NE	14,03	1,77	27,89	44,86	40,14	40,23	**153,12**

V. Hybridvarianten – Ergebnisse LCA und LCC auf Gebäudeebene

LCA Hybridkonstruktion auf Gebäudeebene

Hier werden im weiteren Verlauf die Simulationsrechnungen der LCA und LCC Varianten angepasst und im Fall von Mauerwerksbauweise und Holzbauweise mit anderen Deckenaufbauten operiert aber auch die Dachaufbauten und die Wartungsintervalle Gebäudehülle angepasst.

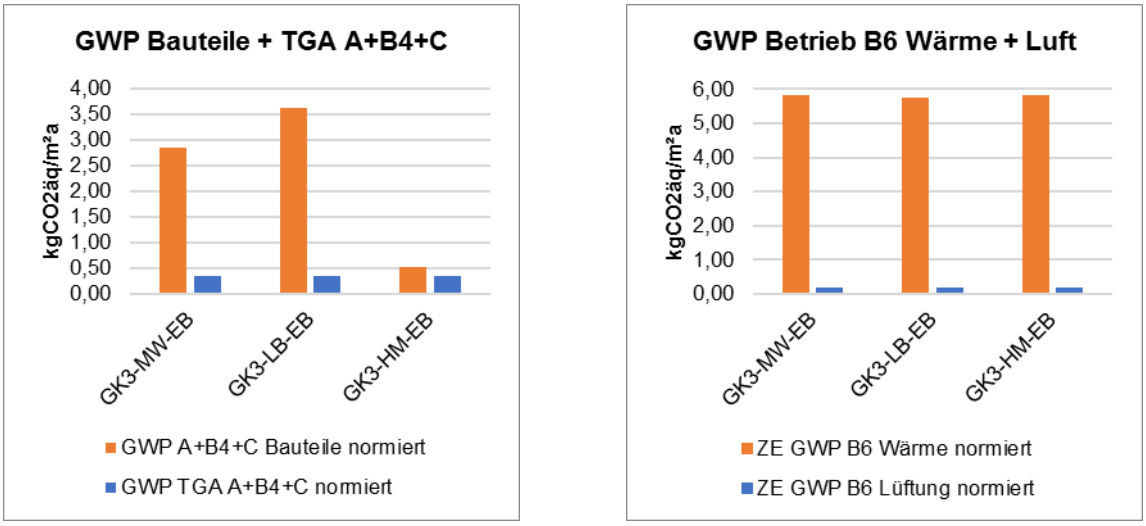


Abbildung 9: Gebäudeklasse 3 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

Tabelle 7: Gebäudeklasse 3 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

	LCA									
	Bauteile + TGA					Betrieb				
	ZE GWP A Bauteile normiert	ZE GWP B4 Bauteile normiert	ZE GWP C Bauteile normiert	**GWP A+B4+C Bauteile normiert**	**GWP TGA A+B4+C normiert**	ZE GWP B6 Wärme normiert	ZE GWP B6 Lüftung normiert	ZE GWP B6 Bet.strom normiert	ZE GWP B6 TWW normiert	**Summe GWP**
	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	**kg/CO2äq/m²a**	**kg/CO2äq/m²a**	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	**kgCO2äq /m²a**
GK3-MW-EB	1,60	0,54	0,72	**2,86**	**0,35**	5,81	0,18	7,82	2,55	**16,36**
GK3-LB-EB	2,38	0,42	0,83	**3,63**	**0,35**	5,74	0,18	7,82	2,55	**16,29**
GK3-HM-EB	-2,20	0,43	2,29	**0,52**	**0,35**	5,81	0,18	7,82	2,55	**16,36**

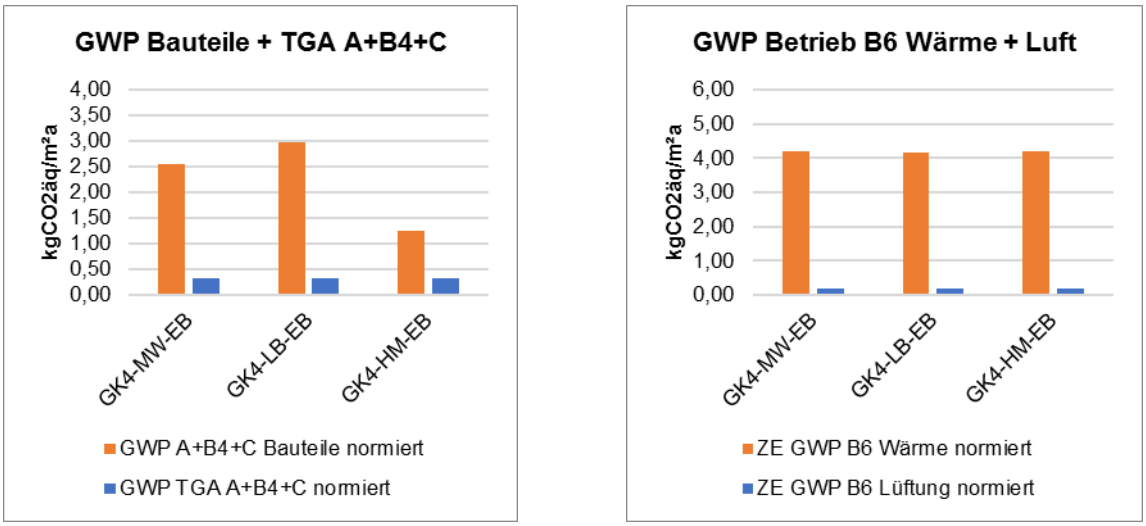


Abbildung 10: Gebäudeklasse 4 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

Tabelle 8: Gebäudeklasse 4 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

	LCA									
	Bauteile + TGA					Betrieb				
	ZE GWP A Bauteile normiert	ZE GWP B4 Bauteile normiert	ZE GWP C Bauteile normiert	**GWP A+B4+C Bauteile normiert**	**GWP TGA A+B4+C normiert**	ZE GWP B6 Wärme normiert	ZE GWP B6 Lüftung normiert	ZE GWP B6 Bet.strom normiert	ZE GWP B6 TWW normiert	**Summe GWP**
	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	**kg/CO2äq/m²a**	**kg/CO2äq/m²a**	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	**kgCO2äq /m²a**
GK4-MW-EB	1,46	0,51	0,57	**2,54**	**0,31**	4,21	0,18	7,39	2,55	**14,33**
GK4-LB-EB	1,94	0,40	0,62	**2,97**	**0,31**	4,16	0,18	7,39	2,55	**14,28**
GK4-HM-EB	-1,49	0,39	2,36	**1,26**	**0,31**	4,21	0,18	7,39	2,55	**14,33**

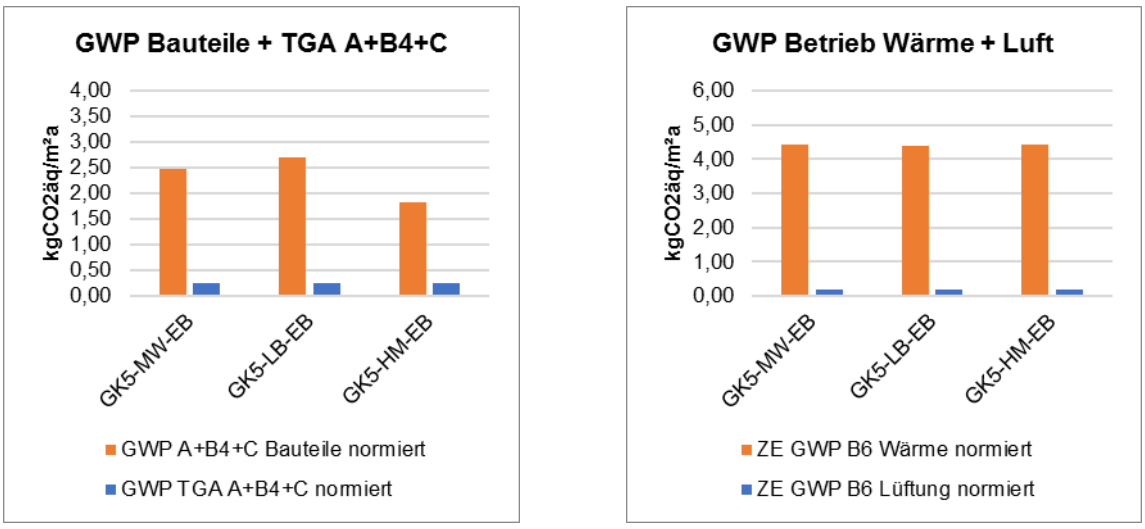


Abbildung 11: Gebäudeklasse 5 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

Tabelle 9: Gebäudeklasse 5 GWP Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF

	LCA									
	Bauteile + TGA					Betrieb				
	ZE GWP A Bauteile normiert	ZE GWP B4 Bauteile normiert	ZE GWP C Bauteile normiert	**GWP A+B4+C Bauteile normiert**	**GWP TGA A+B4+C normiert**	ZE GWP B6 Wärme normiert	ZE GWP B6 Lüftung normiert	ZE GWP B6 Bet.strom normiert	ZE GWP B6 TWW normiert	**Summe GWP**
	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	kg/CO2äq /m²a	**kg/CO2äq/m²a**	**kg/CO2äq/m²a**	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	kgCO2äq/ m²a	**kgCO2äq /m²a**
GK5-MW-EB	1,30	0,57	0,61	**2,48**	**0,24**	4,42	0,19	7,60	2,55	**14,76**
GK5-LB-EB	1,60	0,48	0,62	**2,70**	**0,24**	4,38	0,19	7,60	2,55	**14,71**
GK5-HM-EB	-0,76	0,46	2,12	**1,82**	**0,24**	4,42	0,19	7,60	2,55	**14,76**

LCC Hybridkonstruktion auf Gebäudeebene

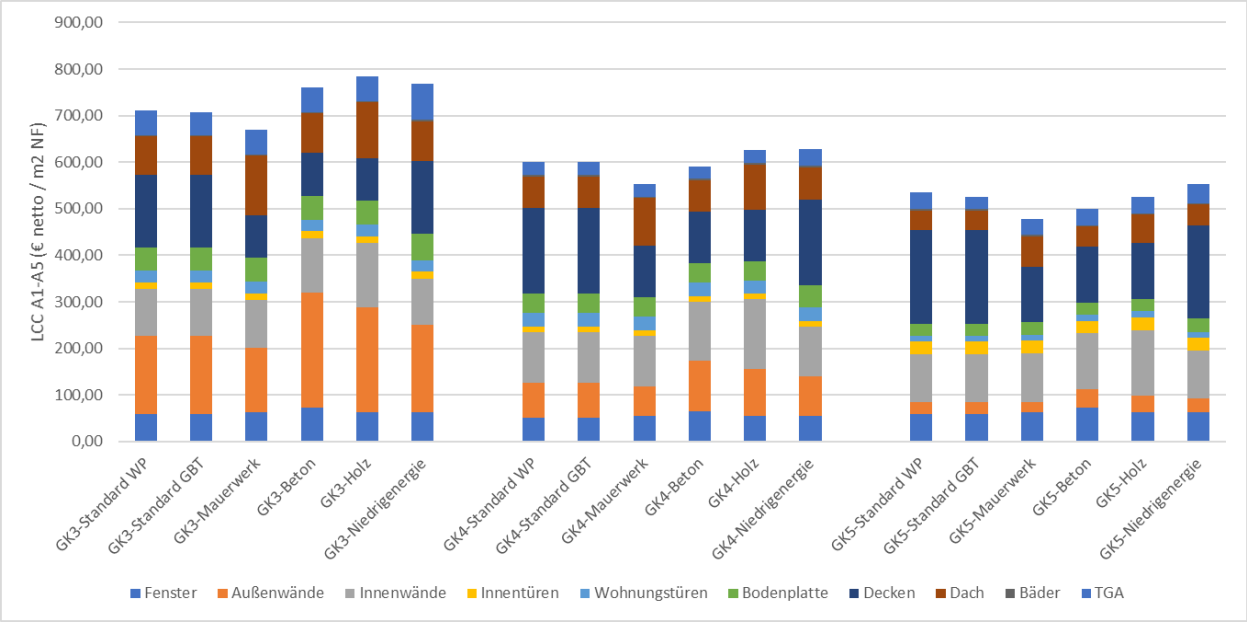


Abbildung 12: LCC Übersicht aller Gebäudeklassen nur Bauteile über 100 a und pro m² NF

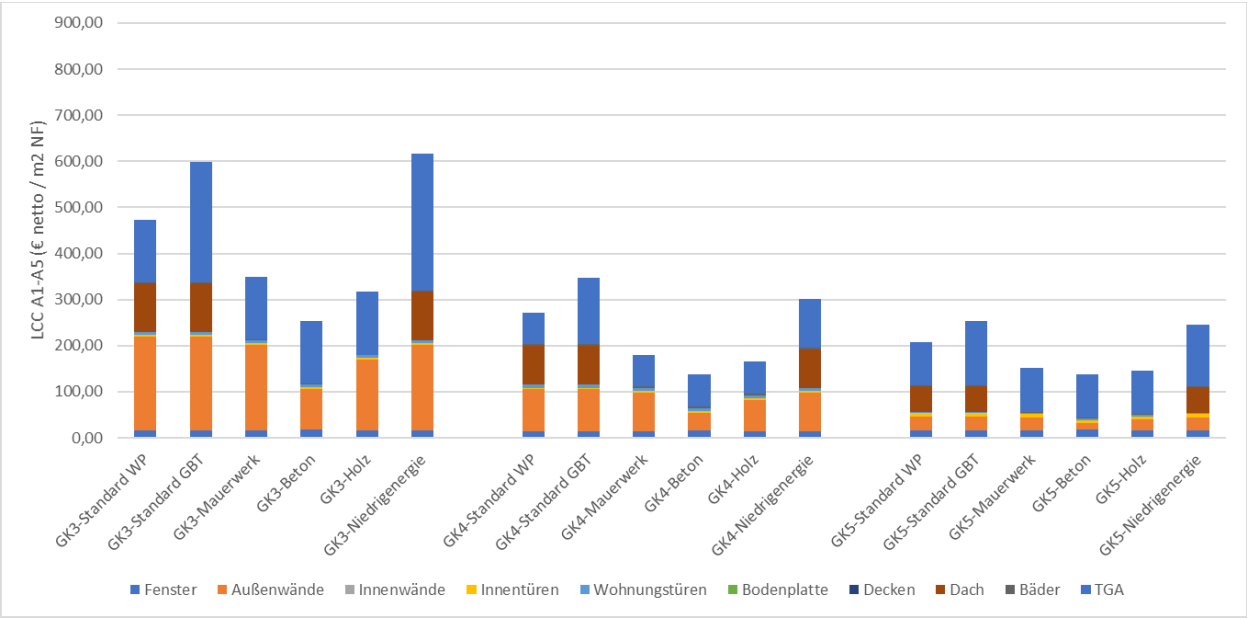


Abbildung 13: LCC Übersicht aller Gebäudeklassen nur Betrieb über 100 a und pro m² NF

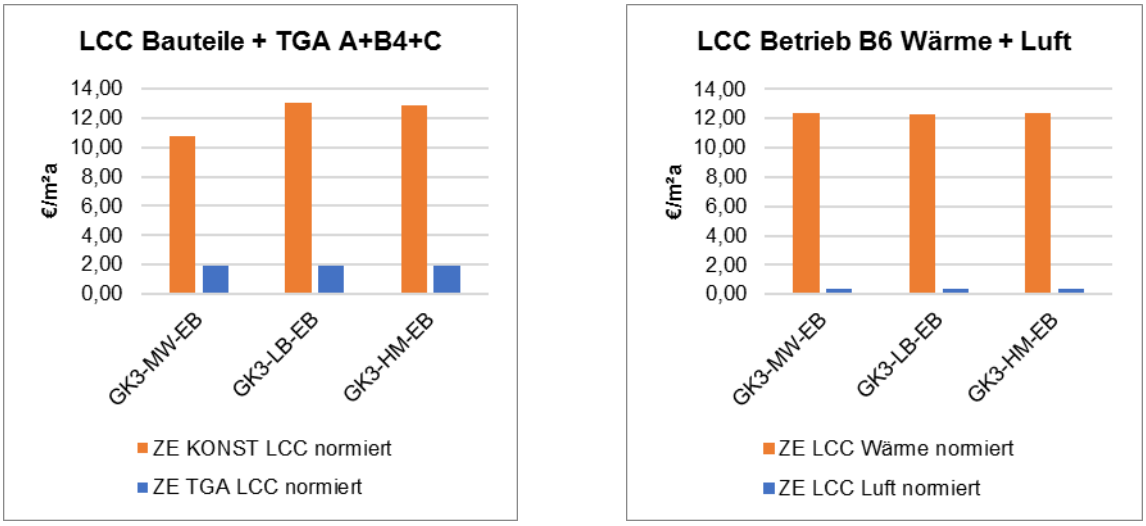


Abbildung 14: Gebäudeklasse 3 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

Tabelle 10: Gebäudeklasse 3 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

	LCC						
	Bauteile + TGA		Betrieb				
	ZE KONST LCC normiert	ZE TGA LCC normiert	ZE LCC Wärme normiert	ZE LCC Luft normiert	ZE LCC Pumpe + Licht normiert	ZE LCC TWW normiert	**Summe**
	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	**€/m²a**
GK3-MW-EB	10,79	1,91	12,40	0,35	15,20	3,70	**31,66**
GK3-LB-EB	13,06	1,91	12,25	0,35	15,20	3,70	**31,51**
GK3-HM-EB	12,90	1,91	12,40	0,35	15,20	3,70	**31,66**

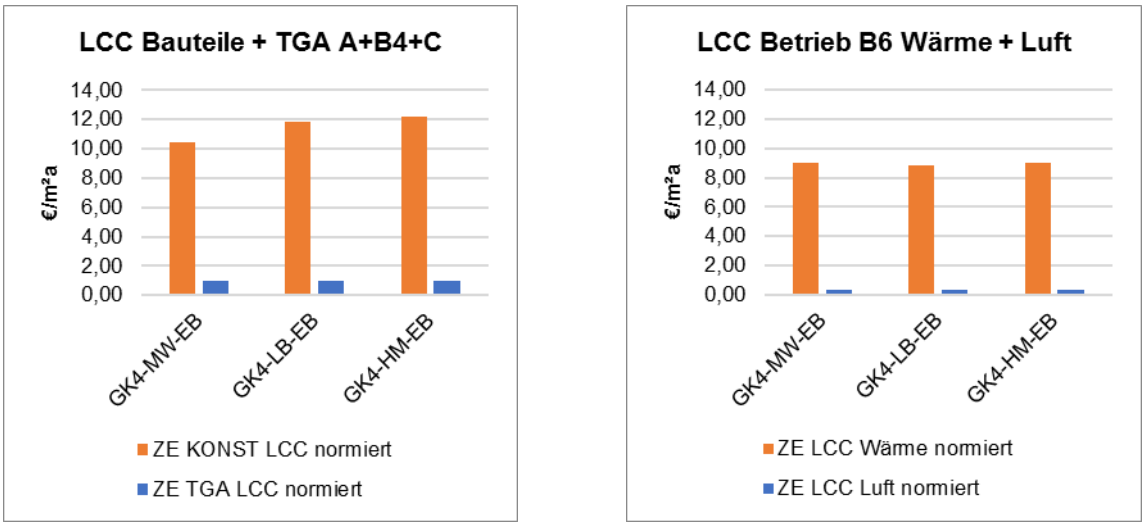


Abbildung 15: Gebäudeklasse 4 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

Tabelle 11: Gebäudeklasse 4 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

	LCC						
	Bauteile + TGA		Betrieb				
	ZE KONST LCC normiert	ZE TGA LCC normiert	ZE LCC Wärme normiert	ZE LCC Luft normiert	ZE LCC Pumpe + Licht normiert	ZE LCC TWW normiert	**Summe**
	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	**€/m²a**
GK4-MW-EB	10,47	0,97	8,99	0,35	14,36	3,70	**27,40**
GK4-LB-EB	11,88	0,97	8,87	0,35	14,36	3,70	**27,29**
GK4-HM-EB	12,18	0,97	8,99	0,35	14,36	3,70	**27,40**

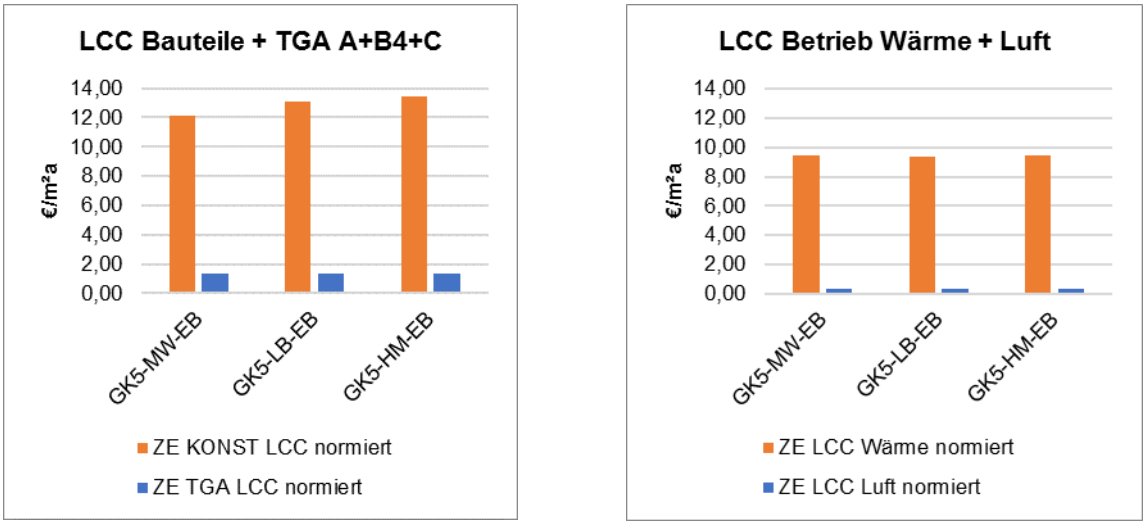


Abbildung 16: Gebäudeklasse 5 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

Tabelle 12: Gebäudeklasse 5 LCC Bauteile + TGA und Betrieb pro m² NF und a

	LCC						
	Bauteile + TGA		Betrieb				
	ZE KONST LCC normiert	ZE TGA LCC normiert	ZE LCC Wärme normiert	ZE LCC Luft normiert	ZE LCC Pumpe + Licht normiert	ZE LCC TWW normiert	**Summe**
	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	€/m²a	**€/m²a**
GK5-MW-EB	12,14	1,31	9,43	0,36	14,78	3,70	**28,27**
GK5-LB-EB	13,11	1,31	9,34	0,36	14,78	3,70	**28,18**
GK5-HM-EB	13,46	1,31	9,43	0,36	14,78	3,70	**28,27**

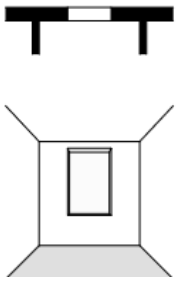
IV. Fotos 1:10-Modelle

Base Case



„Base Case“ mit einem Fensterflächenanteil nach „Daylight Factor“ von 2,6m² und einer Laibungstiefe von 40cm

M 1:140 Lux
M 2: 496 Lux



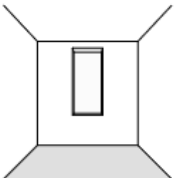
1

Fensterfläche



„Kleines Fenster“ mit Fensterflächenanteil nach „Bayerischer Bauordnung“ von 1,8m²





M 1:105 Lux
M 2: 380 Lux

2

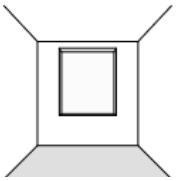


Fensterfläche



„Großes Fenster“ mit Fensterflächenanteil von 3,4 m²





M 1: 183 Lux
M 2: 632 Lux

3



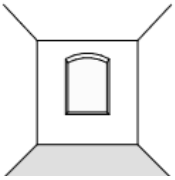
Sturzausbildung



Segmentbogen



M 1: 123 Lux
M 2: 434 Lux



4



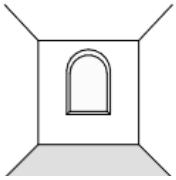
Sturzausbildung



Rundbogen



M 1: 123 Lux
M 2: 435 Lux



5

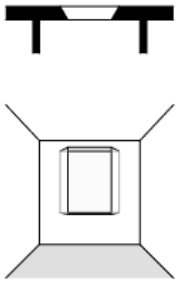


Winkel seitliche Laibung



Geneigte Laibung von 30° nach Außen
(Fensteröffnung außen größer als innen)

M 1: 153 Lux
M 2: 560 Lux



6

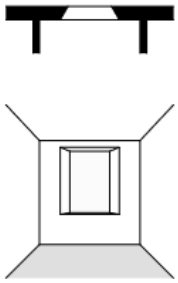


Winkel seitliche Laibung



Geneigte Laibung von 30° nach Außen
(Fensteröffnung innen größer als außen)

M 1: 150 Lux
M 2: 507 Lux



7



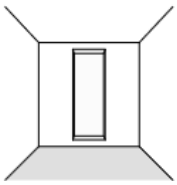
Seitenverhältnis





Stehendes Fensterformat

M 1: 121 Lux
M 2: 540 Lux



8



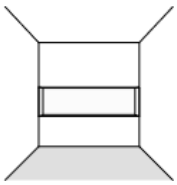
Seitenverhältnis





Liegendes Fensterformat

M 1: 116 Lux
M 2: 438 Lux



9



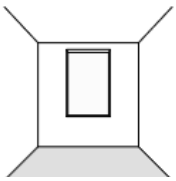
Laibungstiefe



Fensterlaibung mit 30 cm Tiefe



M 1: 166 Lux
M 2: 540 Lux



10



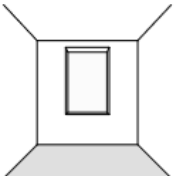
Laibungstiefe





Fensterlaibung mit 50 cm Tiefe

M 1: 140 Lux
M 2: 449 Lux



11



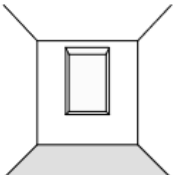
Laibungstiefe





Fensterlaibung mit 70 cm Tiefe

M 1: 123 Lux
M 2: 378 Lux

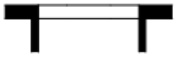


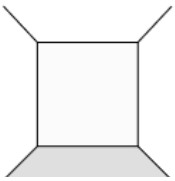
12



Vollverglasung







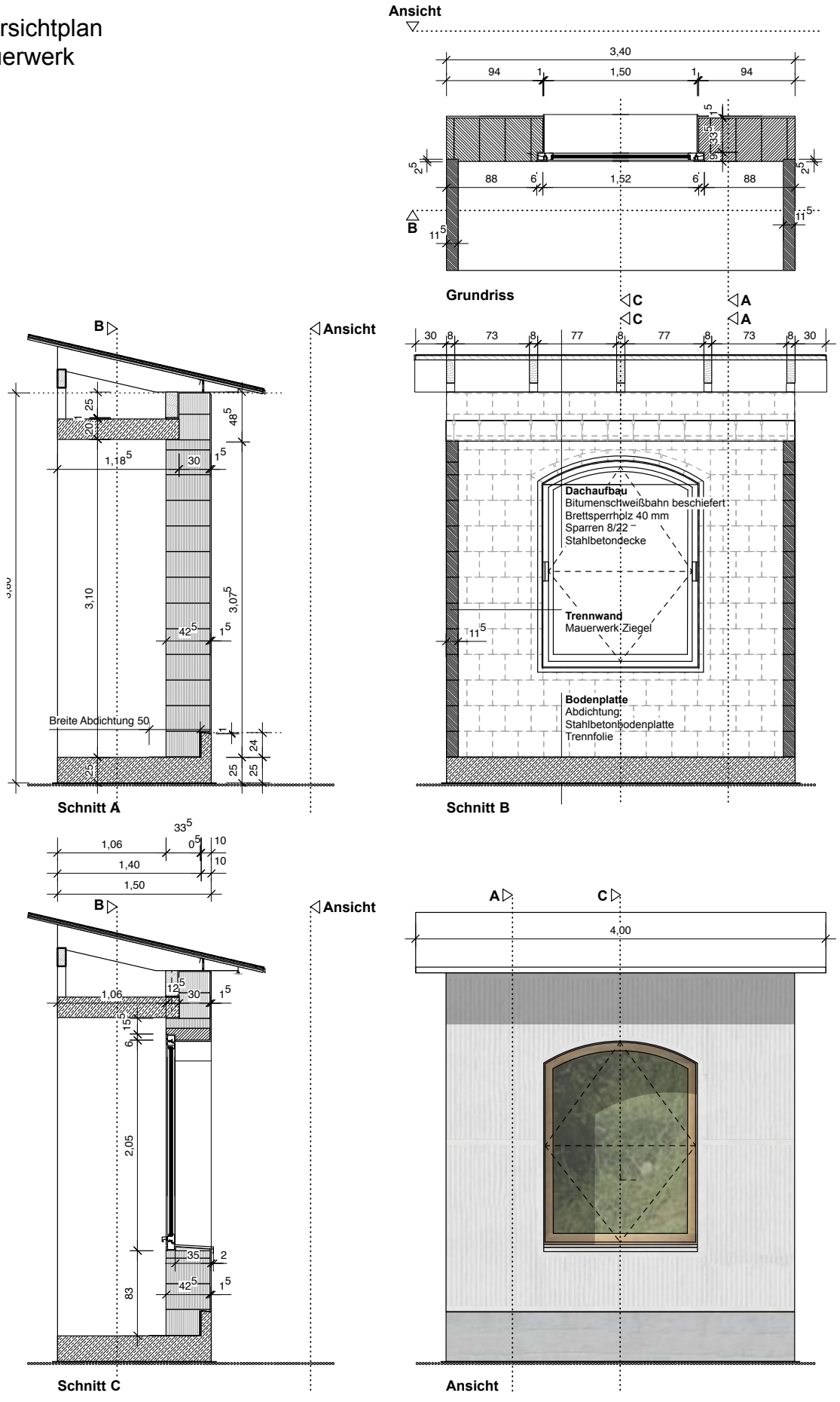
Vollverglasung
Diese Variante erscheint zwar nicht in der zu Beginn gezeigten Grafik „Fenstervarianten ausgehend vom Base Case“, wird aber der Vollständigkeit halber hier zum Vergleich gezeigt.

M 1: 438 Lux
M 2: 1950 Lux



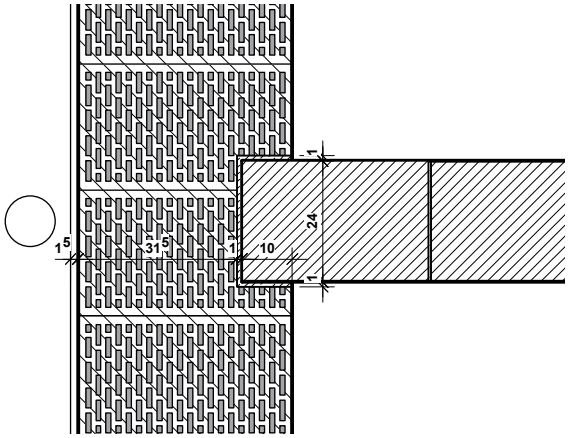
V. Zeichnungen 1:1 Versuchsmodelle

Übersichtplan Mauerwerk

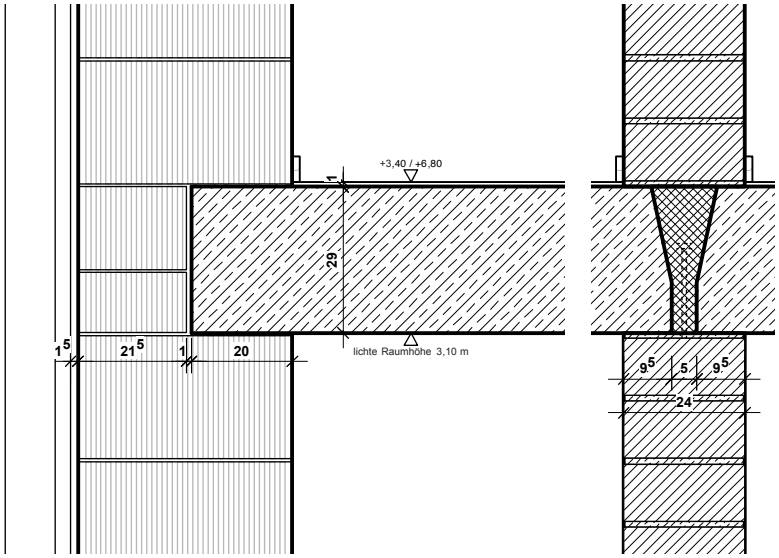


Details
Mauerwerk

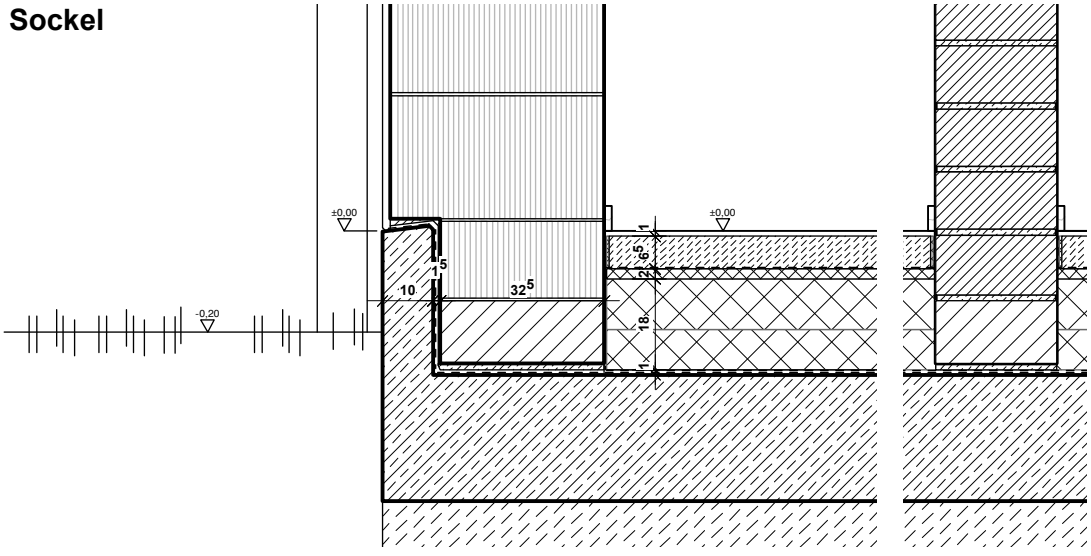
Anschluss Wohnungstrennwand



Deckenauflager

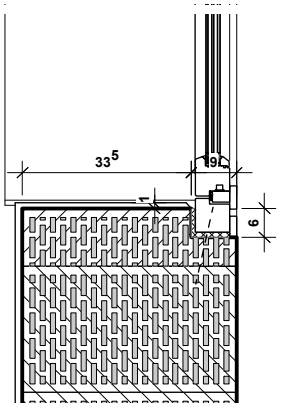


Sockel

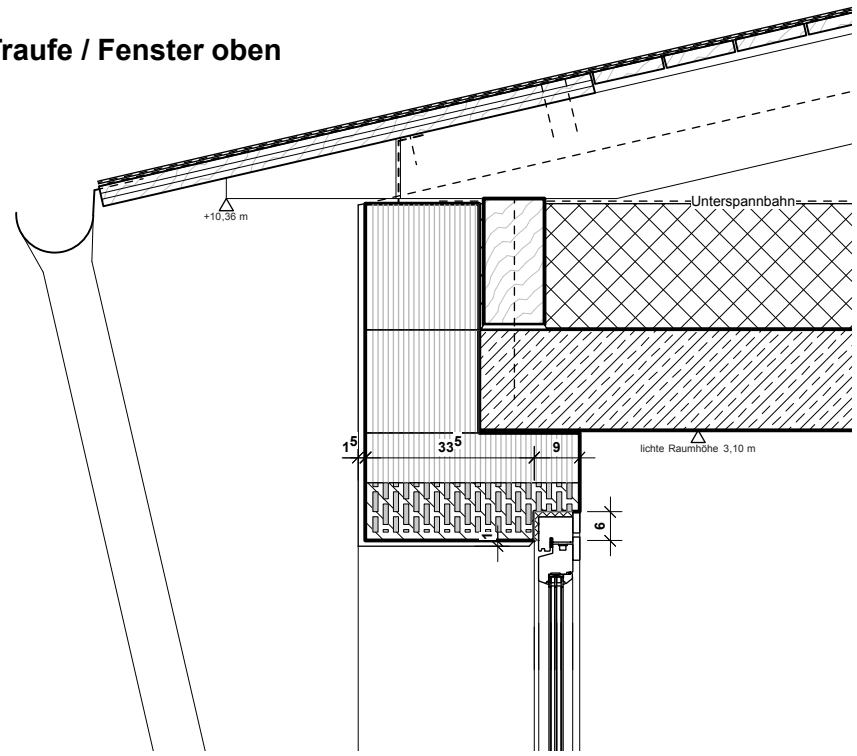


Details
Mauerwerk

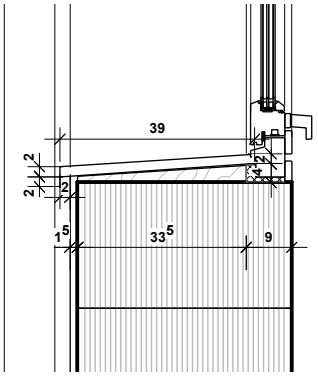
Fenster seitlich



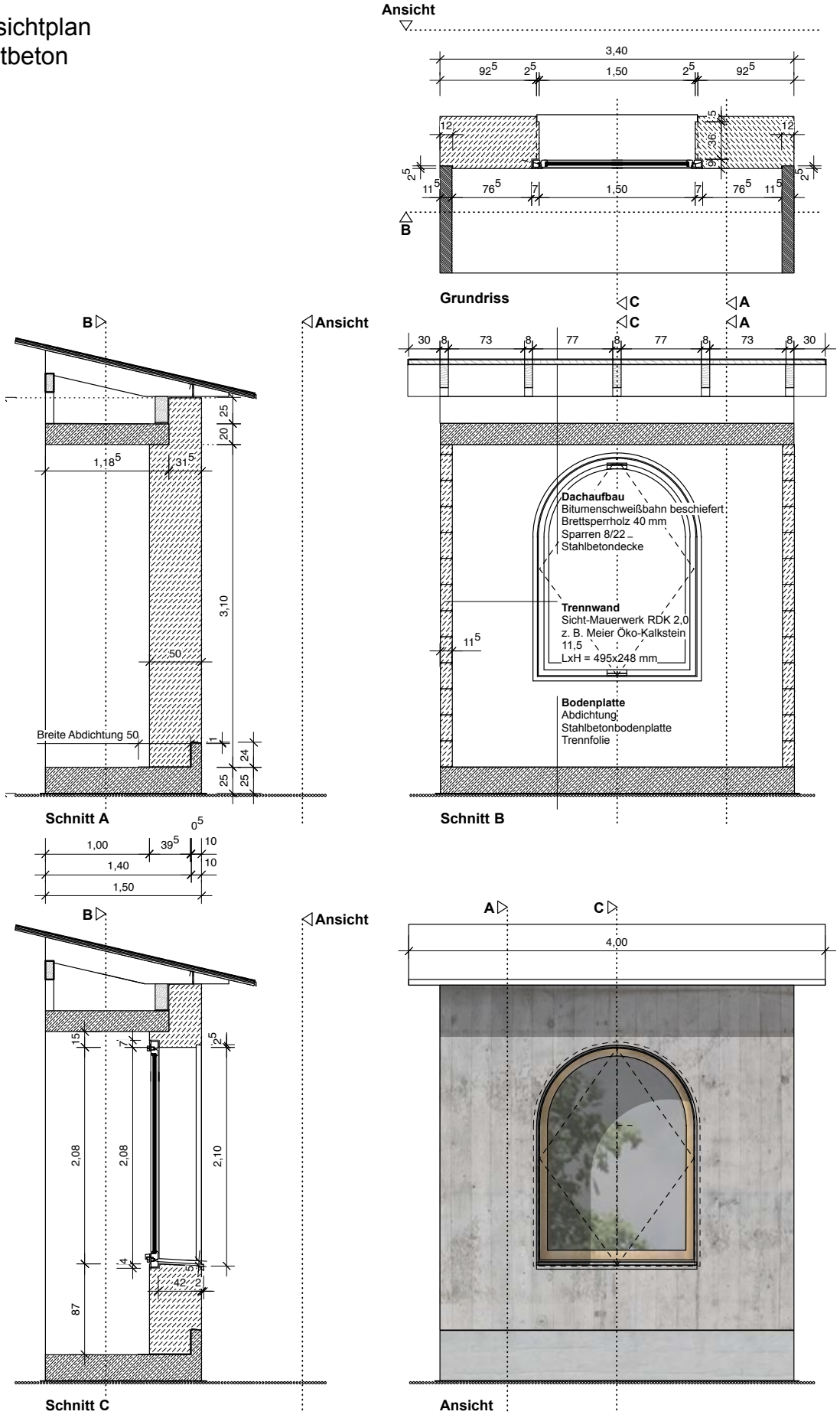
Traufe / Fenster oben



Fenster unten

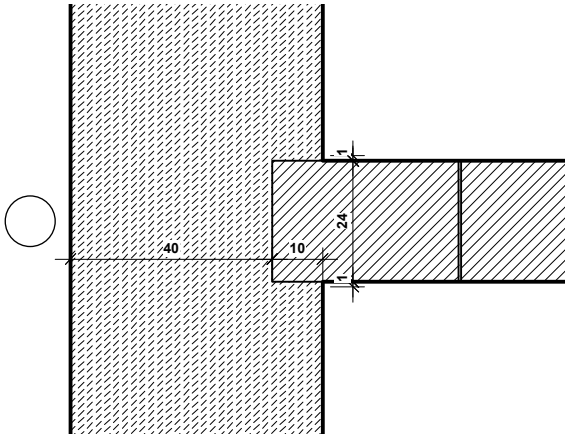


Übersichtplan Leichtbeton

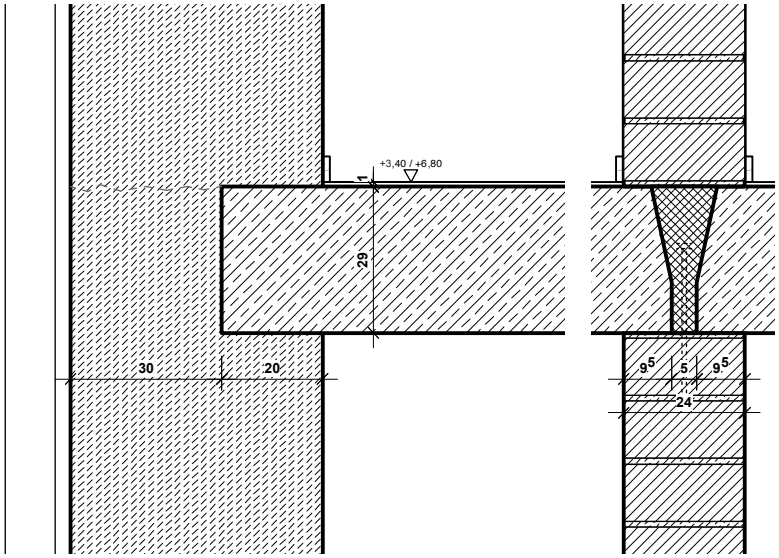


Details
Leichtbeton

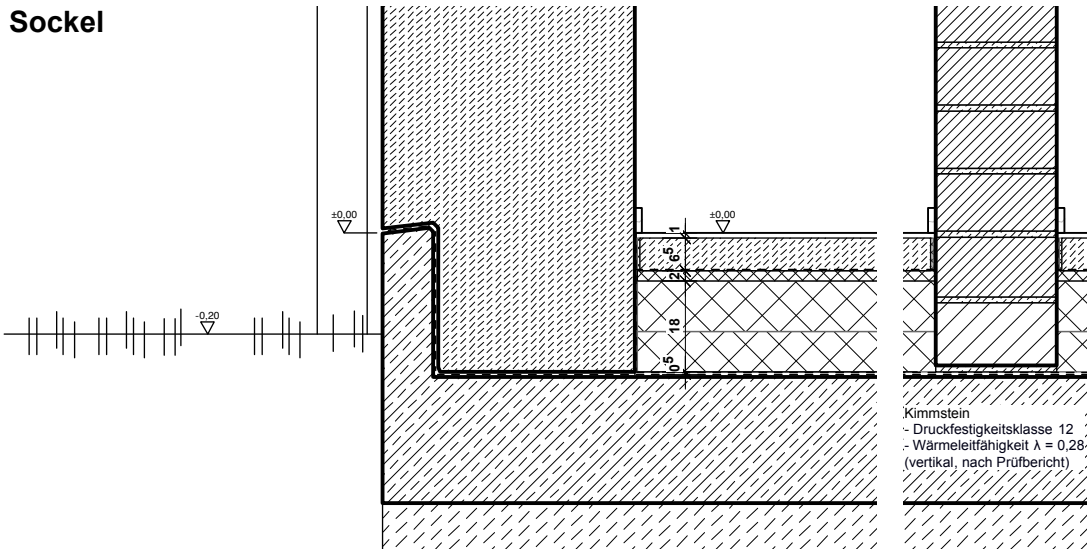
Anschluss Wohnungstrennwand



Deckenauflager

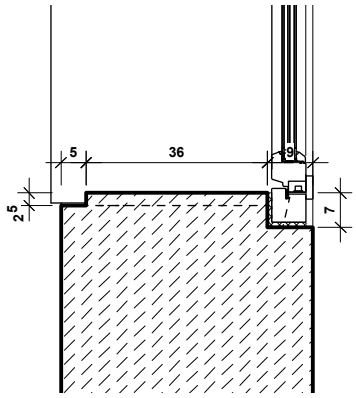


Sockel

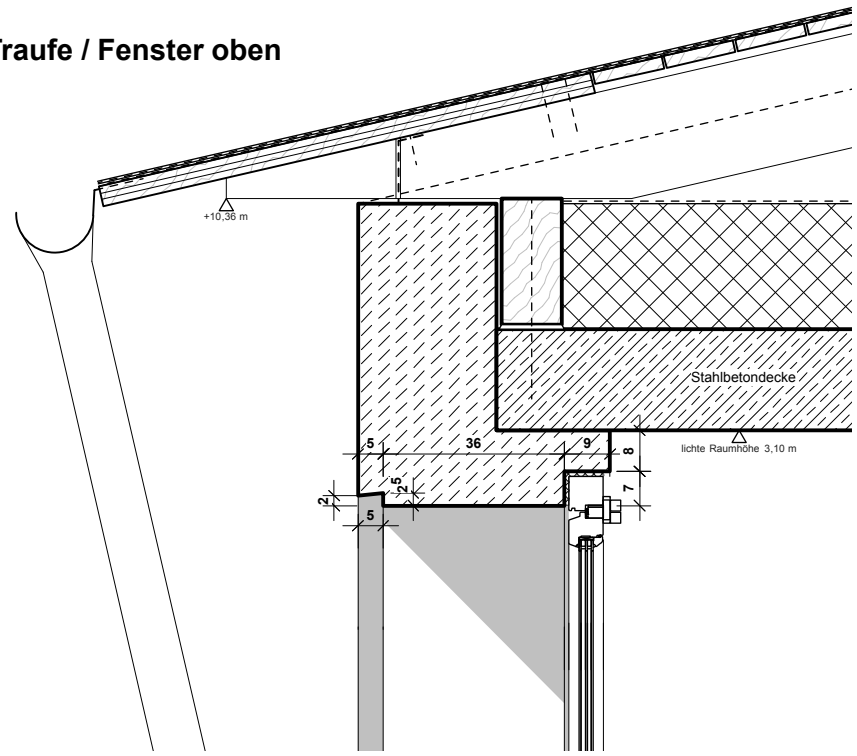


Details
Leichtbeton

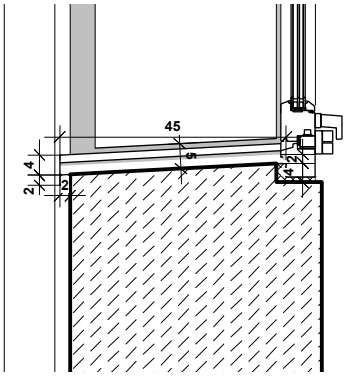
Fenster seitlich



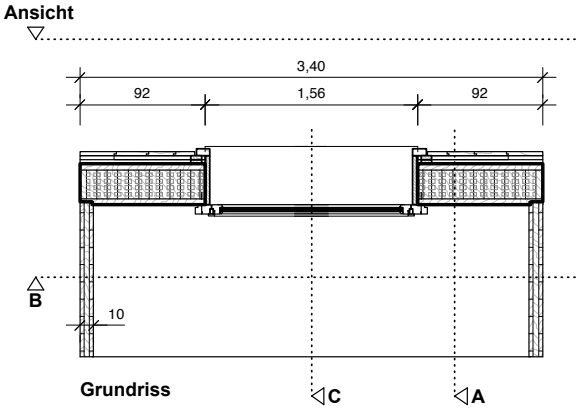
Traufe / Fenster oben

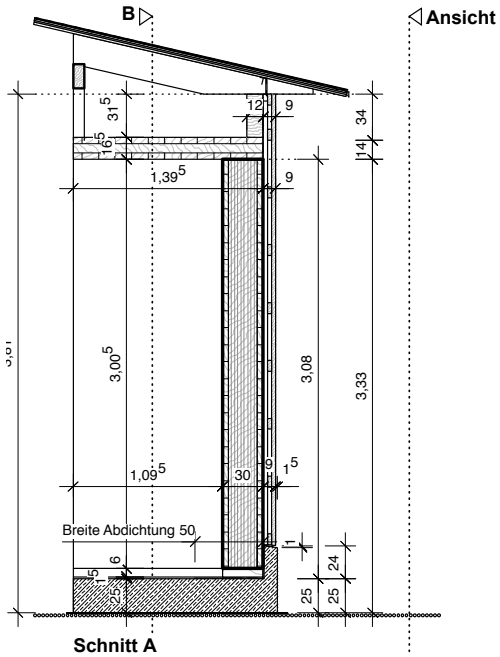


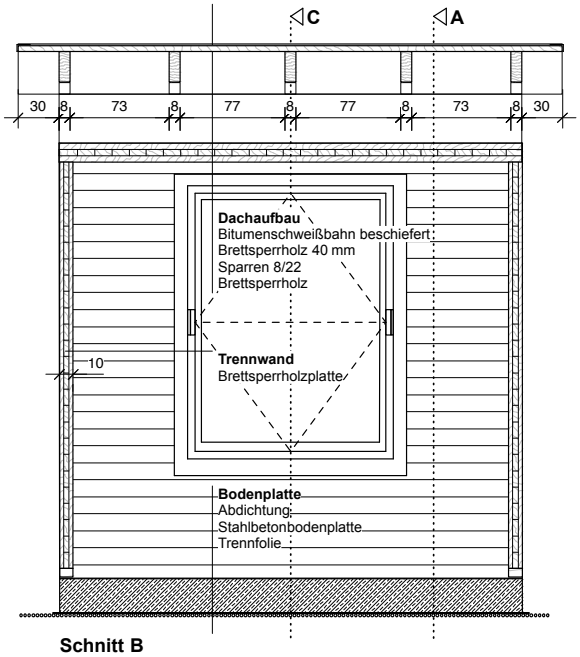
Fenster unten

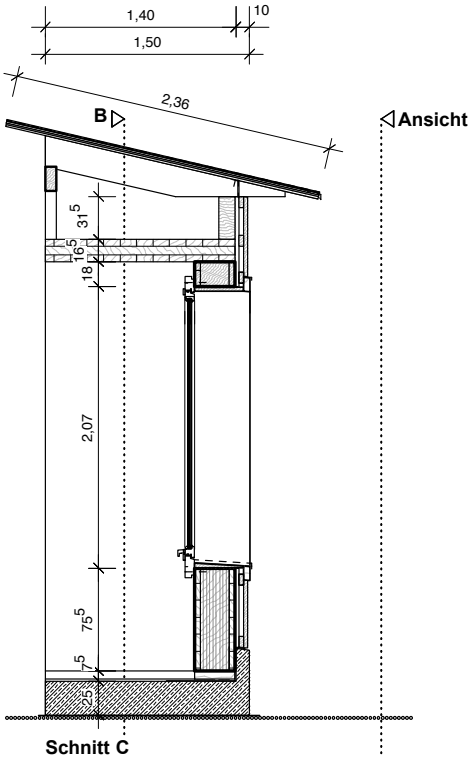


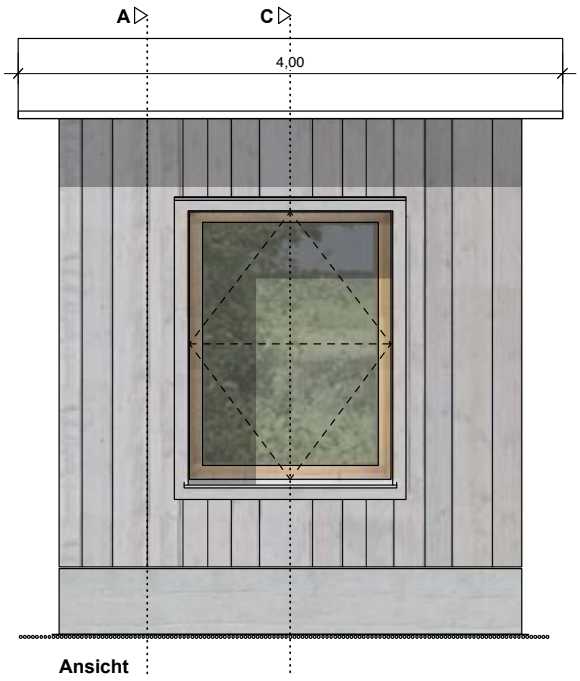
Übersichtplan Massivholz





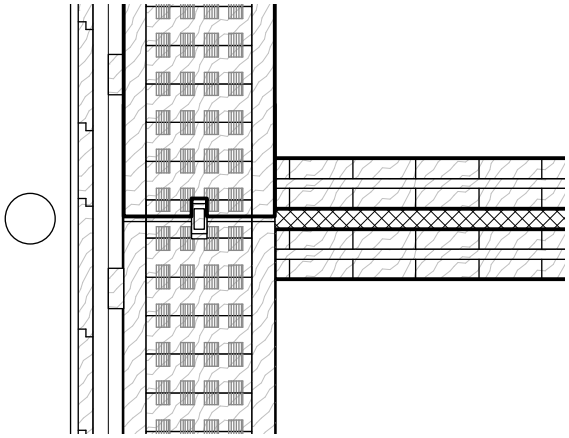




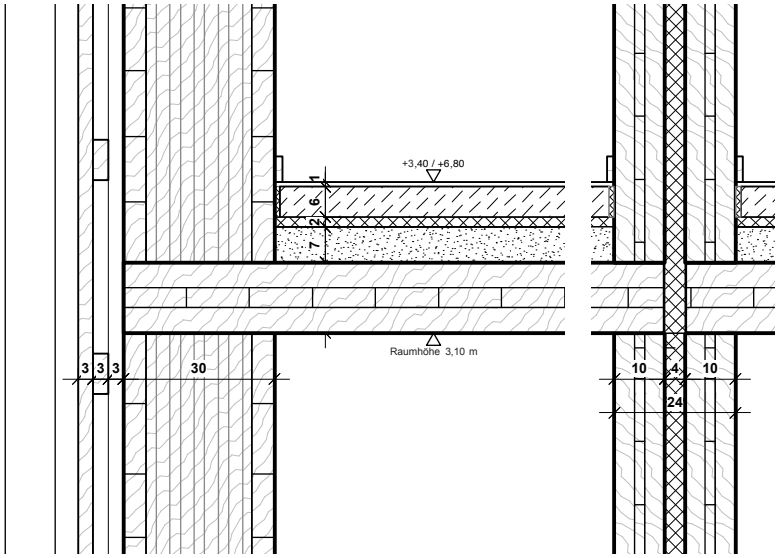


Details
Massivholz

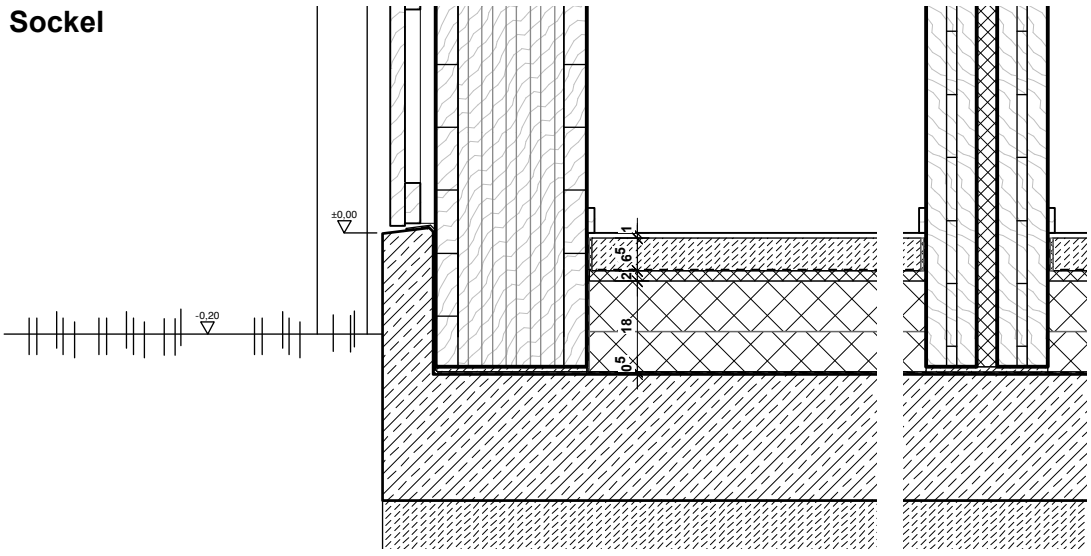
Anschluss Wohnungstrennwand



Deckenauflager

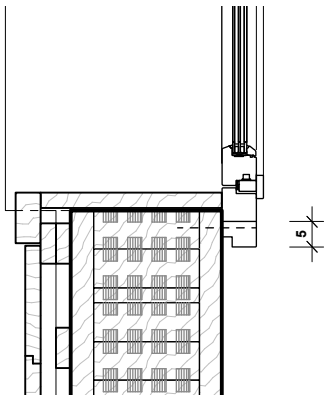


Sockel

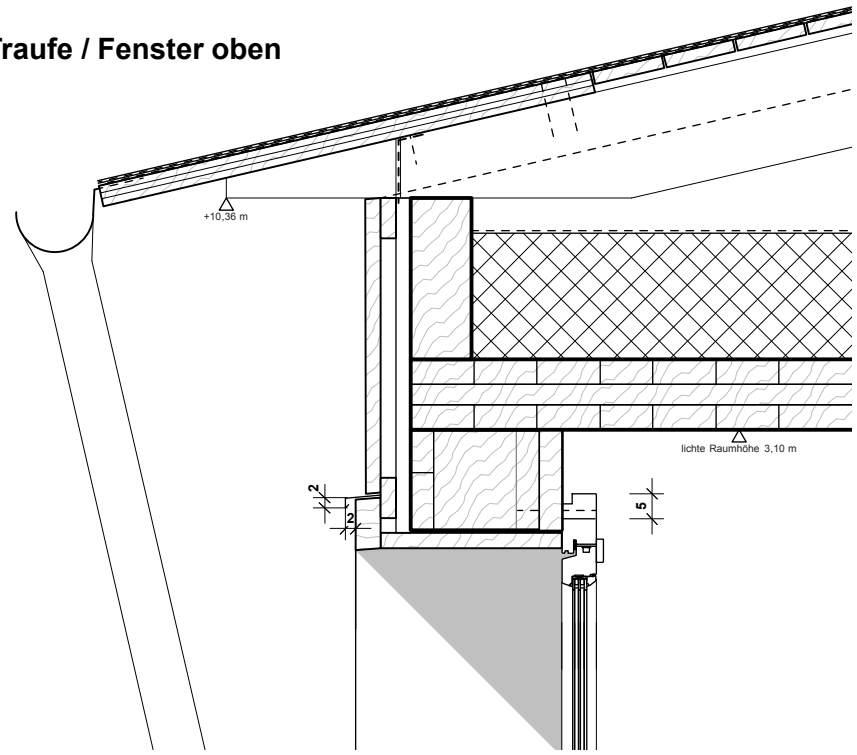


Details
Massivholz

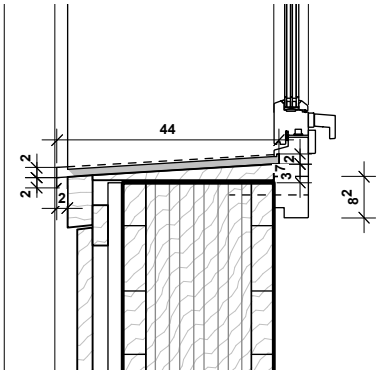
Fenster seitlich



Traufe / Fenster oben



Fenster unten



VI. Bilder Bauprozess 1:1 Versuchsmodelle



Fundemente für alle drei untersuchten Bauweisen



Fusspunkt Mauerwerk



Fensteröffnung mit Segmentboden aus geviertelten Außenwandsteinen



Innerer Anschlag für Fenster mit aufgebrachtem Putz-Glattstrich



Schalungselement für Fensteröffnung



Betoniervorgang Leichtbetonwand mit Kübel, da Infraleichtbeton nicht pumpfähig ist



Schalung vor dem Betonieren, sägerauhe Bretter mit Zementleim vorgestrichen



Oberkante der Wand zum Ende des Betoniervorgangs



Im Bereich der Schalungsfugen trat während des Betoniervorgangs eine größere Menge Betonmilch aus



Zuschlagsstoffe Blähton (groß) und Blähglas (klein)



Außenseite der Betonwand nach dem Ausschalen



Im Bereich der Aussparungen zur Überdeckung des Fensterblechs kam es beim Ausschalen zu Ausbrüchen, die ausgebessert werden mussten.



An Astlöchern in der sägerauhen Schalung kam es zu Ausbrüchen des Leichtbetons beim Ausschalen, vermutlich durch Verklebungen.



Die Zementschlämme auf den sägerauhen Bretterm ist beim Ausschalen teilweise an der Betonoberfläche haften geblieben.



Die Innenseite mit glatter Schalung zeigt die, für Infraleichtbeton typische Oberflächestruktur



Innenseite der Betonwand nach dem Ausschalen



Montage der Außenwand aus Massivholz mit Außenverschalung



Ausmörteln der Lagerfuge



Lüftungsgitter und sägeraue Außenverschalung mit Falzen



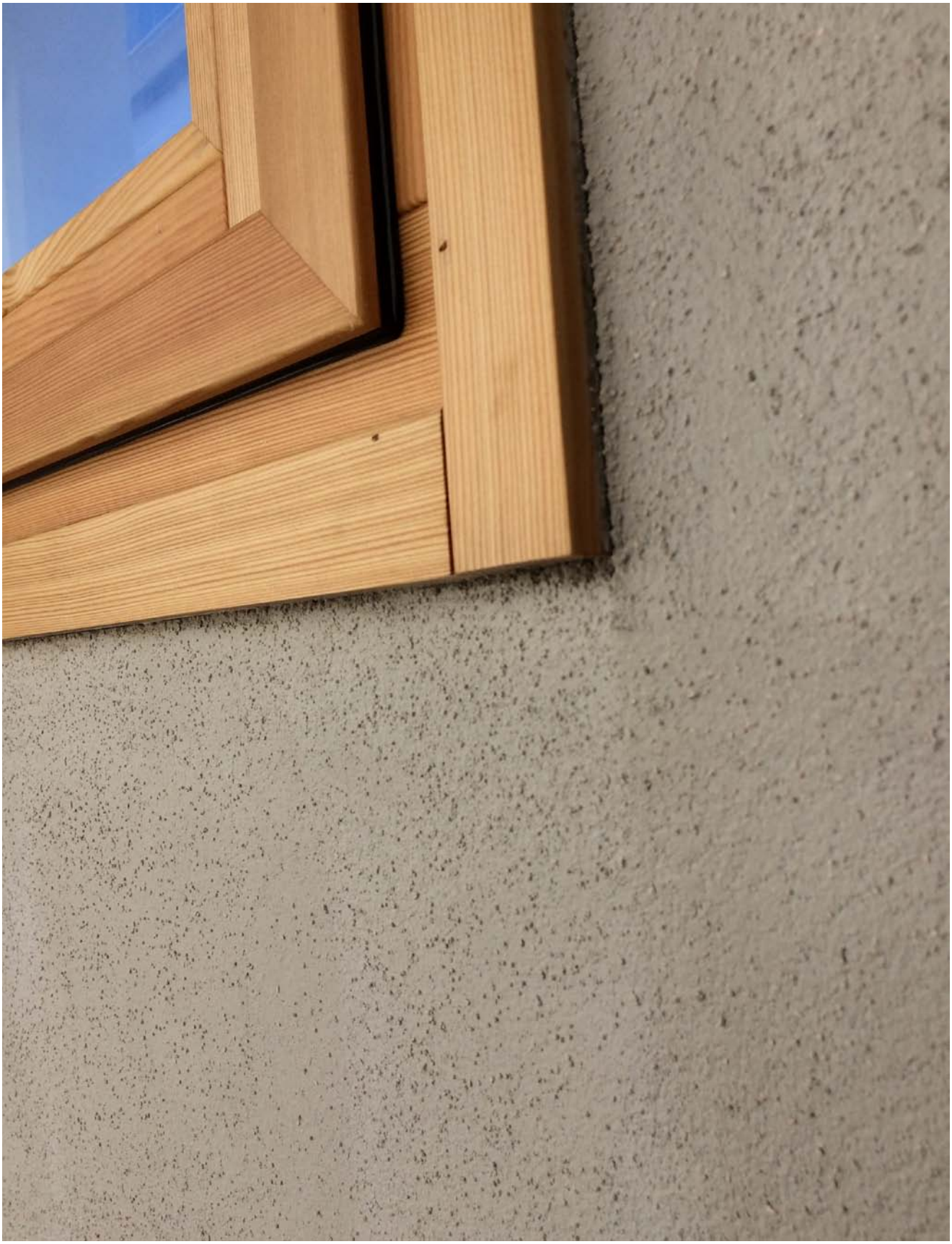
Außenwand, Trennwand, Decke und Dachstuhl



Fenster auf Innenseite der Holzmassivwand aufgesetzt und mit Quellbändern abgedichtet



Fenster im Mauerwerk mit seitlicher Verleistung welche die Montagefuge überdeckt



Gefitzte Wandschlämme auf der Innenseite der Mauerwerkswand



Außenwand Mauerwerk mit aufgebrachter Putzschicht



Außenansicht Massivholz, lasiert



Außenansicht Infraleichtbeton



Mauerwerk: Lüftungsstellung Schwingflügel



Massivholz: Lüftungsstellung Schwingflügel



Infraleichtbeton: Lüftungsstellung Wendeflügel



1:1 Modell Mauerwerk



1:1 Modell Massivholz



1:1 Modell Infraleichtbeton