

Angèle Tersluisen, Kamyar Nasrollahi, Klara Bauer  
Mehrddad Khalatbari, Nadine Lebong, Mozhgan Shirani  
Björn-Martin Kurzrock, Tillman Gauer, Conrad Völker  
Thomas Lichtenheld

**Untersuchung zeitgemäßer,  
monolithischer Wandaufbauten  
hinsichtlich bauphysikalischer,  
ökologischer und ökonomischer  
Eigenschaften**

**F 3064**

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0182-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

Abschlussbericht

Untersuchung zeitgemäßer, monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Eigenschaften.

Prof. Dr.-Ing. Angèle Tersluisen, Dr.-Ing. Kamyar Nasrollahi, Dipl.-Ing. Klara Bauer,  
M.Sc. Mehrdad Khalatbari, Dipl.-Ing. Nadine Leborg, B.Sc. Mozhgan Shirani  
TU Kaiserslautern, Fachbereich Architektur, Fachgebiet Hauskybernetik

Prof. Dr. Björn-Martin Kurzrock, Dipl.-Ing. Tillman Gauer  
TU Kaiserslautern, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Immobilienökonomie

Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker, M.Sc. Thomas Lichtenheld  
Bauhaus-Universität Weimar, Fakultäten Bauingenieurwesen & Architektur und Urbanistik,  
Professur Bauphysik

Kaiserslautern / Weimar, Oktober 2017



Die Forschungsarbeit wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: 10.08.18.07-15.34)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

# Symbolverzeichnis

$\Lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/m.K]
$d$	Dicke	[m]
$\rho$	Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_p$	Spez. Wärmekapazität	[kJ/kg.K]
$d_s$	Schichtdicke	[m]
$\phi$	relative Luftfeuchte	[-]
$w$	Materialvolumenbezogene Masse	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\psi$	volumenbezogene Wassergehalte	[-]; [Vol.-%]
$u$	massebezogene Wassergehalte	[-]; [M.-%]
$s_d$	Äquivalente Schichtdicke	[m]
$f_{Rsi}$	Temperaturfaktor	
$\Psi$	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m.K]
$L^{2D}$	thermischer Leitwert	
$Q_h$	Heizwärmebedarf	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$Q_{Source}$	Wärmequellen	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$Q_{sink}$	Wärmesenke	[kWh/m <sup>2</sup> ]
$\eta$	Ausnutzungsgrad	[-]
$\gamma$	Verhältnis zwischen Wärmequellen zu Wärmesenken	[-]
$C$	Speicherkapazität	[Wh/m <sup>2</sup> .K]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	[K]

# Abkürzungsverzeichnis

A	Fläche
AP	Versauerungspotential, Arbeitspaket
AW	Außenwände
BGF	Bruttogrundfläche
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude
Bu	Büro
cm	Zentimeter
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Datensätze vom Deutschen Wetterdienst
EFH	Einfamilienhaus
EN	Europäische Norm
EnEV	Energieeinsparverordnung
EOL	Ende des Lebenszyklus (engl. <i>End of Lifecycle</i> )
FBH	Fussbodenheizung
GEFMA	German Facility Management Association
GFZ	Geschossflächenzahl
GRZ	Grundflächenzahl
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
GWP	Treibhauspotenzial (engl. <i>Global Warming Potential</i> )
h	Stunde
HWB	Heizwärmebedarf
Inf_Beton	Infraleichtbeton
ISO	International Standard Organisation
IW	Innenwand
J	Joule

K	Kelvin
kg	Kilogramm
KG	Kostengruppe
KGF	Konstruktions-Grundfläche
kJ	Kilo-Joule
KVH	Konstruktionsvollhölzer
LCA	Lebenszyklusanalyse (engl. <i>Life Cycle Assessment</i> )
LCC	Lebenszykluskostenkalkulation (eng. <i>Life Cycle Costing</i> )
LF	Luftfeuchtigkeit
LZK	Lebenszykluskosten
m	Meter
MFH	Mehrfamilienhaus
mm	Millimeter
mon	monolithisch
NGF	Netto-Grundfläche
NuF	Nutzungsfläche
ODP	Ozonschichtabbaupotential
PCM	Phase Change Material
PENRT	Primärenergiebedarf
POCP	Emissionen Troposphärisches Ozon
Ref	Referenz
T	Temperatur
TRY	Testreferenzjahre
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
W	Watt
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WTA	Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege
°C	Grad Celsius

# Inhalt

<b>Symbolverzeichnis</b> .....	2
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	3
<b>Inhalt</b>	5
1 Forschungsziel .....	1
2 AP 1 Recherche.....	4
2.1 Begriffsdefinition „Monolith“ in Publikationen.....	4
2.2 Verständnis des Begriffes “Monolith” im Sinne der vorliegenden Forschungsarbeit .....	5
2.3 Gebaute Architekturen seit EnEV 2009.....	5
2.3.1 Grundlagenermittlung .....	5
2.3.2 Ausgewählte Referenzen.....	6
2.3.3 Untersuchte, nicht-monolithische Architekturbeispiele.....	11
2.3.4 Zusammenfassung der Teilergebnisse .....	16
2.4 Produkte mit Produktspezifikationen.....	16
2.5 Stand der Forschung.....	18
2.6 Schlussfolgerungen aus AP 1:.....	20
3 AP 2 Kategorisierung .....	22
3.1 Modellbildung.....	23
3.1.1 Systemgrenzen gemäß DIN V 18599-1:2011 [63].....	23
3.1.2 Materialien, Bauteilkatalog und Systemschnitt.....	23
3.1.3 Modellbildung Bauteilbetrachtung.....	28
3.1.4 Modellbildung Systembetrachtung.....	35
3.2 Schlussfolgerungen aus AP 2 .....	37
4 AP 3 Bauphysikalische Betrachtung: Energetisch-dynamische Simulation .....	38
4.1 Allgemeines .....	38
4.2 Bauteilbetrachtung .....	38
4.2.1 Bewertung des Feuchtetransports .....	39
4.2.2 Bewertung des Wärmetransports .....	44
4.3 Systembetrachtung .....	44
4.3.1 Ausnutzungsgrad, Wärmeleitung, Wärmespeicherung .....	44

4.3.2	Bewertungsmethode .....	46
4.3.3	Bewertungskriterien .....	54
4.4	Ergebnisse / Zusammenfassung AP 3 .....	54
4.4.1	Bauteilbetrachtung - Hygrothermische Bewertung .....	54
4.4.2	Bauteilbetrachtung - Thermische Bewertung .....	67
4.4.3	Bauteilbetrachtung - Temperaturamplitudenverhältnis (TAV) .....	72
4.4.4	Systembetrachtung – Ausnutzungsgrad .....	73
4.4.1	Systembetrachtung – Ausnutzungsgrad, Deckungsgrad .....	76
4.4.2	Systembetrachtung - Ausnutzungsgrad, Heizwärmebedarf, Überhitzungsstundenzahl, Speicherzyklen .....	77
4.4.3	Systembetrachtung - Oberflächentemperaturen .....	81
4.4.4	Systembetrachtung - Operative Temperaturen .....	84
4.4.5	Systembetrachtung - Speicherzyklen .....	86
4.4.6	Schlussfolgerungen .....	88
5	AP 4 Ökologisch-ökonomische Betrachtung .....	90
5.1	Allgemeines Vorgehen .....	90
5.1.1	Nutzungsdauern und Betrachtungszeitraum .....	91
5.1.2	Relevanz beschreibender Datensätze und Indikatoren der Ökobilanzierung .....	92
5.1.3	Ökonomische Bilanz: Lebenszykluskostenbilanz (LCC) .....	96
5.1.4	Ökologische Bilanz: Life Cycle Assessment (LCA) .....	98
5.1.5	Flächenverbrauch .....	99
5.2	Ergebnisse AP 4 .....	99
5.2.1	Ungestörte Wandquerschnitte .....	100
5.2.2	Gebäudemodell Wohnen / Büro .....	106
5.3	Flächenverbrauch .....	118
5.4	Recyclingfähigkeit .....	121
5.5	„Weiche Kriterien“ .....	122
5.6	Sensitivität .....	123
5.7	Fazit .....	124
6	Bewertung und Vergleich: Ökonomie, Ökologie und Bauphysik AP 5 .....	126
7	Fazit und weiterer Forschungsbedarf .....	134
8	Abbildungsverzeichnis .....	136

9	Tabellenverzeichnis .....	142
10	Anhang   Anlagen.....	144
10.1	Konstruktionsaufbauten hygrothermische Untersuchung .....	144
10.2	Konstruktionsaufbauten thermische Untersuchung .....	150
10.3	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit.....	155
10.4	Sorptionsisotherme.....	160
10.5	Klimadaten.....	165
10.6	Systembetrachtung : Simulationsergebnisse.....	168
10.7	Sensitivität Diskontierungszinssatz .....	186
10.8	Ökologie: Daten und Bauprodukte .....	187
10.9	Ökologie: Lebensdauern.....	188
10.10	Ökologie: Ökobilanz Wärmedämmung .....	190
11	Literaturverzeichnis.....	194

## 1 Forschungsziel

In den vergangenen Jahren haben die Publikationen zu monolithisch realisierten Projekten zugenommen, die Bauweise wird im Bereich der Architektur-Publikationen als Alternative zu mehrschichtigen Konstruktionen platziert. Der in 2013 errichtete Bürobau „2226“ der Architekten „Baumschlager Eberle“ mit seinen 81,8 cm starken Ziegelaußenwänden entfachte eine hitzige Architekturdebatte, da hier die Massivität mit der Möglichkeit, entscheidende Anteile an Gebäudetechnik einzusparen, verknüpft wurden. [1]. Nicht nur im Bereich des Ziegelbaus, auch im Beton-, Holz- und Lehm- und Lehmbau finden sich so genannte zeitgemäße Monolithen. „Zanderroth Architekten“ präsentierten das in 2014 errichtete „ch39“ aus Konstruktions-Leichtbeton, die „architekturagentur“ den in 2013 errichteten „Woodcube“ aus Vollholz und „Herzog de Meuron“ das „Ricola Kräuterzentrum“ aus Stampflehm [2–4]. Im Bereich des Strohbaus findet man, je nach Definition und in der Regel fern ab jeder Architekturdebatte, ebenso monolithische Konstruktionen. Den Architekturen monolithischer Außenwandkonstruktionen ist gemein, dass die Material- bzw. Konstruktionswahl nicht allein mit dem ästhetischen Nutzen, sondern vielmehr mit angenommenen positiven bauphysikalischen Einflüssen auf die thermische Behaglichkeit, auf den Energiebedarf sowie positiven Einflüssen auf Ökobilanz und Kosten bezogen auf den Immobilien-Lebenszyklus begründet werden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen diese Aussagen wissenschaftlich untersucht werden. Untersucht wird, in wie weit verschiedene monolithische Außenwandkonstruktionen (Ziegel, Leicht-Beton, Porenbeton, Lehm, Vollholz ...) positive Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit sowie, eingebunden in ein Energiekonzept, auf die Energiebilanz von Gebäuden haben können. Die Konstruktionen werden auf Bauteil- und auf Gebäudeebene mit Hilfe der instationären Bauteil- und Gebäudesimulation untersucht. Wärmebrücken werden detailliert betrachtet, Optimierungsvorschläge erarbeitet. Eine Nachhaltigkeitsbewertung (Ökobilanz, Kosten, Erlöse) der verschiedenen Konstruktionsgruppen über den typischen Lebenszyklus von Gebäuden bildet die Basis für eine abschließende Bewertung.

Der Vergleich der monolithischen Konstruktionen untereinander und zu Wärmedämmverbundsystem-Referenzwänden wird hergestellt.

Die Forschungsarbeit gliedert sich entsprechend der formulierten Ziele in sechs Arbeitspakete.

AP 1 Recherche

AP 1.1 Gebaute Architekturen seit EnEV 2009 [5]

AP 1.2 Produkte mit Produktspezifikationen

AP 1.3 Forschungsarbeiten, Industrieaufträge

AP 2 Kategorisierung

Material, Nutzung, Lasten

Bauphysikalische Eigenschaften

Modellbildung Bauteilbetrachtung

Modellbildung Systembetrachtung

AP 3 Bauphysikalische Betrachtung: Energetisch-dynamische Simulation

Bauteilbetrachtung (Wärmestrom, Amplitudenverhältnis, Speicherzyklen,  
Wärmebrücken)

Systembetrachtung (Behaglichkeit, Energiebedarf, Speicherzyklen)

AP 4 Ökologisch – ökonomische Betrachtung

Ökobilanzierung (LCA: GWP, ODP, POCP, AP), Recyclingfähigkeit

Lebenszykluskosten

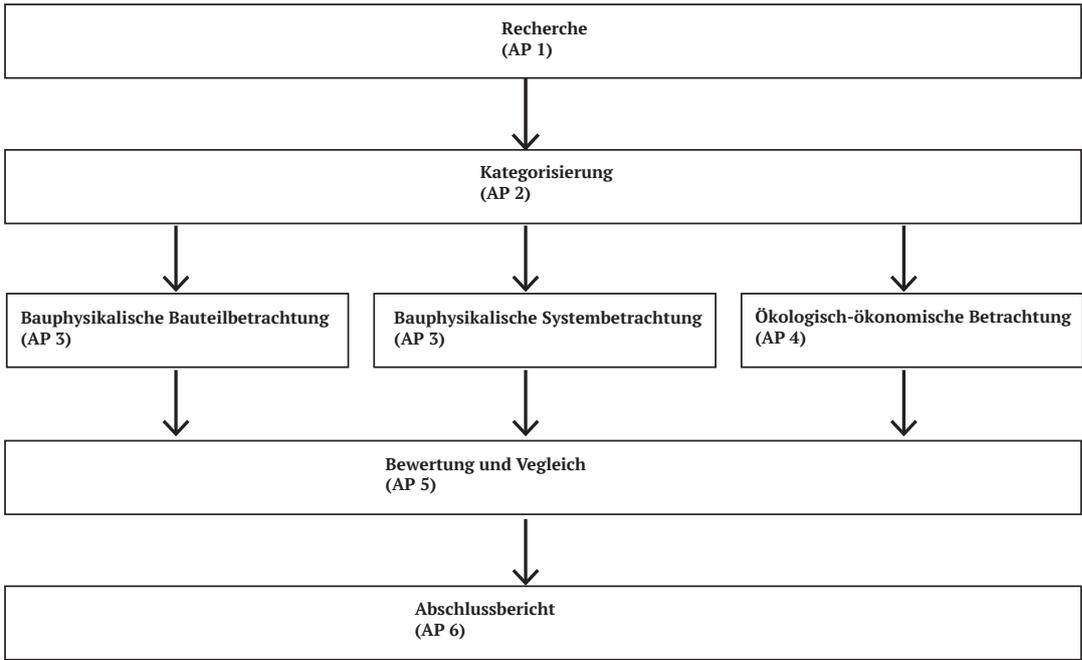
AP 5 Bewertung und Vergleich

Bauphysik, Ökologie, Ökonomie

Leitfaden zur Verwendung monolithischer Außenwandbauteile

AP 6 Abschlussbericht

Basis der Untersuchungen bildet die Recherche, in der realisierte monolithische Konstruktionen sowie verfügbare Produkte betrachtet werden. In einem nächsten Schritt werden die Informationen gebündelt und kategorisiert, so dass Untersuchungsmodelle auf Bauteil- und Raumebene definiert werden können. Die bauphysikalische Betrachtung auf Bauteil- und Raumebene sowie die ökologisch-ökonomische Betrachtung stellen den Hauptteil der Arbeit dar. In einem abschließenden Arbeitsschritt werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengeführt.



## 2 AP 1 Recherche

### 2.1 Begriffsdefinition „Monolith“ in Publikationen

Der Begriff ‚Monolith‘ wird im Architekturbereich häufig verwendet und ist in vielfältiger Weise inhaltlich belegt. Die folgenden Zitate zeigen exemplarisch, was in der Praxis mit dem Begriff verbunden wird.

*www.baupraxis.de*

„Monolith - monolithisches Mauerwerk

Monolith, lateinisch: Ein aus einem Stein gefertigtes Denkmal

Monolithisches Mauerwerk: Gemeint ist damit ein einschaliges Mauerwerk, so wie es traditionell früher üblich war und auch heute noch eine der besten Bauweisen darstellt.

Der Vorteil einer monolithischen Bauweise: Sie ist unkomplizierter und auf Dauer viel weniger schadensanfälliger als kombinierte Mauerwerks-Verbundsysteme. Die monolithische Mauer ist aus Sicht der Baubiologie auch die umweltverträglichste Art, da sie später bei Abriss des Gebäudes am leichtesten zu entsorgen ist. (Keine Verbundmaterialien, die aufwendig getrennt oder als Sondermüll behandelt werden müssen.) Außerdem ist sie für die Bewohner vom Raumklima her und in Bezug auf Wohngesundheit ideal.“ [6]

*www.detail.de*

„Der Begriff »monolithisch« wird in Architekturkreisen gerne verwendet, da er dem Gestalter eine konsequente Haltung unterstellt. Die Beweggründe für diese Wertschätzung liegen jedoch verborgener, als der Begriff vermuten lässt. Letztlich interessant ist nicht das Material selbst oder seine umfassende Verwendung, sondern die Tatsache, dass es für einen umfassenden Sachverstand des Architekten spricht, wenn dieser in der Lage ist, die elementaren Teile einer Bauaufgabe in einem einzigen Material zu fügen.“ [7]

*Passauer Neue Presse*

„Bestehen alle Mauern und auch das Dach aus dem gleichen Material, wird diese Bauweise als monolithisch bezeichnet. Der Begriff stammt aus dem Griechischen und bedeutet "einheitlicher Stein". Die monolithische oder homogene Bauweise von Wänden ist einschichtig – dämmende und tragende Bauteile sind nicht getrennt. Das Verfahren gilt allgemein als weniger anfällig für Baufehler, braucht aber ein Material, das sowohl durch seine Tragfähigkeit als auch durch Wärmedämmung überzeugt.

Heute wird die monolithische Bauweise vielfach mit Porenbeton umgesetzt, einem bewährten MassivMaterial, der umweltschonend aus natürlichen Rohstoffen hergestellt wird. Mit dem mineralischen MassivMaterial lassen sich monolithische Gebäudehüllen aus einem Guss realisieren. Unnötige Wärmebrücken und Heizenergieverluste gehören der Vergangenheit an. Das Material lässt sich leicht verarbeiten und trägt ganzjährig zu einem angenehmen Wohnklima bei. Dank der feinporigen Struktur ist die Wärmedämmleistung so hoch, dass beispielsweise auf ein Wärmedämmverbundsystem verzichtet werden kann.“ [8]

## 2.2 Verständnis des Begriffes "Monolith" im Sinne der vorliegenden Forschungsarbeit

Mit dem Begriff „Monolith“ bzw. monolithische Bauweise ist in Folge nicht die Anmutung eines Gebäudes, welches als Einzelgebäude wie ein Monolith aus der Landschaft hervorsticht, gemeint, vielmehr geht es rein um die Betrachtung der Wandkonstruktionen. In dem vorliegenden Forschungsprojekt beschreibt der Begriff „monolithisch“ den Aufbau der Wand als homogene Konstruktion. Die Wand wird unter Verwendung nur eines Materials gefügt, notwendige Schichten zum Wetterschutz sowie zur Glättung der Oberfläche wie durch Putzschichten bspw. sind hiervon ausgenommen. Ziegel, die in den Hochlöchern mit Dämmstoffen gefüllt sind, gelten im Sinne des Projektes nicht als monolithisch. Die tragende und dämmende Funktion muss durch ein Material sichergestellt sein. Entgegen der ursprünglichen Wortbedeutung (griechisch: aus dem Stein), werden zudem nicht nur Steine wie bspw. Ziegelsteine, Porenbetonsteine, Lehmsteine u. ä. untersucht, auch fugenlos gewachsene, gegossene, gerüttelte, gestampfte Materialien wie Lehm, Stroh, Holz, Beton etc. werden betrachtet. Beton bildet insofern eine Ausnahme von der Definition, als dieser immer ein Gemenge verschiedener Rohstoffe darstellt. Betone dienen in der Architektur auf Grund der Verarbeitung und des Erscheinungsbildes als Inbegriff des monolithischen Bauens und werden daher mitbetrachtet.

## 2.3 Gebaute Architekturen seit EnEV 2009

### 2.3.1 Grundlagenermittlung

Für die weiteren Betrachtungen werden Architekturbeispiele in monolithischer Ausführung sowie solche, die als Monolithen bezeichnet werden, zusammengetragen und analysiert. Gebäude mit einem Errichtungsjahr ab 2009 sowie alle Gebäude, die die Anforderungen an die EnEV 2009 [5] erfüllen, finden Berücksichtigung.

Alle untersuchten Gebäude werden anhand nachstehender Aspekte katalogisiert und den Materialien Beton, Ziegel, Holz, Stroh und Lehm zugeordnet:

- Standort
- Baujahr
- Architekt
- Nutzungsart: Wohnhaus, Gewerbebau, Sonderbau (Museum, Hotel...)
- Energiekonzept / Haustechnik
- Konstruktion
- U-Wert
- Vorhandenes Planmaterial

Die gebauten Architekturbeispiele werden dargestellt und den relevanten Materialgruppen zugeordnet. Diese Datenblätter geben einen ersten Eindruck über das Gebäude, Architekt sowie Nutzung und enthalten alle recherchierten bauphysikalischen und technischen Kennwerte sowie Detailzeichnungen. Zudem erleichtern sie den direkten Vergleich der Gebäude untereinander.

### 2.3.2 Ausgewählte Referenzen

Folgend werden exemplarisch für die Materialgruppen Beton, Ziegel und Holz Referenzprojekte im Kontext der Forschungsfrage detaillierter dargestellt.

#### 2.3.2.1 Architekturbeispiel | Beton

Villa H36 | Stuttgart, MBA/S Matthias Bauer Associates

Die Villa H36 ist ein Beispiel für die architektonische sowie konstruktive Umsetzung des Begriffes Monolith in nahezu der ursprünglichen Bedeutung. Bei dem dreigeschossigen Einfamilienhaus, das 2014 fertiggestellt wurde, wurde die gesamte außenluftzugewandte Gebäudehülle, also 45 cm starken Wände und die 50 cm starke polygonale Dachkonstruktion, aus konstruktivem Dämmbeton ausgeführt. Das Gebäude erscheint bereits durch seine Formgebung, wie die Süd-Ost-Ansicht eindrücklich zeigt, monolithisch, wie aus einem Guss. Die Gebäudehülle wird durch verschiedene Glasflächen durchbrochen, die den Eindruck der Massivität des Dämmbetons eher verstärken, statt ihn zu reduzieren: die Masse der Wand wird durch die Positionierung der Öffnungen spürbar.

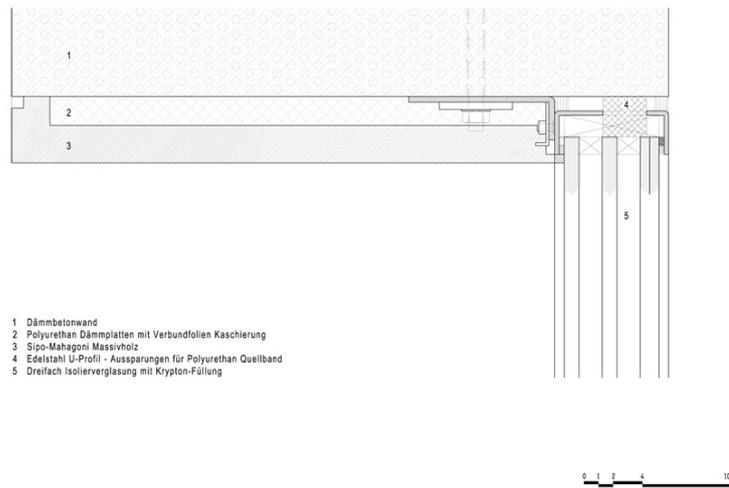


Abbildung 1: Süd-Ost-Ansicht Villa H 36 [9]. (li.); Detail Fensteranschluss Villa H 36 [10]. (re.)

Das Anschlussdetail Außenwand-Fenster verdeutlicht die durch und durch monolithische Konstruktion der Hülle, gleichzeitig verschweigt es die Problematik der Wärmebrücken durch Sichtbarmachen der tiefen Laibung durch das innenbündige Platzieren des Fensters nicht.

Der verwendete Dämmbeton enthält statt des üblichen Kieszuschlages Glasschaumgranulat. Glasschaumgranulat ist unter dem Namen Schaumglasschotter (recyceltes Altglas) in der Baupraxis besser bekannt und wird in der Regel als Dämmstoff vor allem im Bereich der Bauwerksgründung verwendet. „Beim Wohnhaus H36 wurde außerdem eine Zementmatrix mit einem Luftporenanteil von 20 % verwendet. Bei dieser Wandstärke sorgt der diffusionsoffene Baustoff für ein hervorragendes Raumklima mit optimalem Feuchtigkeitsausgleich – wie in einem alten Steinhaus bleibt es im Winter angenehm warm und im Sommer angenehm kühl.“ [11] – so die Aussage der Architekten.

Als Wärmeleitfähigkeit des Betons geben die Architekten 0,22 W/(mK) an [12], was für eine 45cm dicke Außenwandkonstruktion zu einem U-Wert von 0,45 W/(m<sup>2</sup>K) führt. Dies liegt entscheidend über dem U-Wert von 0,28 W/(m<sup>2</sup>K) des Referenzgebäudes nach EnEV 2009. Für den U-Wert der 50cm starken Dachkonstruktion mit bis zu 0,41 W/(m<sup>2</sup>K) (Referenzwert 0,20 W/(m<sup>2</sup>K)) gilt selbiges. Um die Anforderungen an den spezifischen Transmissionswärmeverlust gemäß EnEV 2009 [5] erfüllen zu können, müssten demnach Bodenplatte und Fenster die höheren Werte in Wand- und Dachkonstruktion kompensieren. „Mittels 3-fach-Verglasungen teilweise mit Kryptonfüllung [...] erfüllt das Gebäude die EnEV 2009.“, so die Info eines Artikels der DBZ aus dem Jahr 2016. Diese Aussage erstaunt, zumal die Gebäudehülle stellenweise in der Tiefe minimiert wurde, um Gebäudetechnik zu integrieren. „Des Weiteren bedienen sich die Planer der Massivität der Wände, um den Innenraum frei von Haustechnik zu halten. „Wir nutzen die Möglichkeit des Massivbaus, um die Technik in die Wände zu integrieren“, erklärt Architekt Bauer.“ [13]

Die Villa H36 wird durch eine Sole-Wasserwärmepumpe unter Einsatz von Strom mit Geothermie versorgt, die Wärmeübertragung erfolgt über Bauteilaktivierung per Fußbodenheizung, die direkt in den Stahlbetondecken verlegt wurde. In der massiven Dachkonstruktion aus Dämmbeton wurde zur Absenkung der Bauteiltemperatur während der Kühlperiode eine Bauteilaktivierung verlegt, die an den thermischen Speicher im Keller angebunden ist. Die Kühlung erfordert zusätzlichen Stromeinsatz für das Betreiben der Pumpen, jedoch nur geringen Energieeinsatz für die zusätzliche Kühlung als solche durch Geothermie (passive Erdkühle). Notwendig wird die zusätzliche Kühlung auf Grund des großen Glasanteils in der Gebäudehülle sowie den durchgehenden Luftraum, der dazu führt, dass sich die erwärmte Luft im Dachraum sammelt. Die Verglasung weist nur einen Innensonnenschutz auf, ein zusätzliches außenliegendes Sonnensegel wird an der Westfassade angeboten. Eine Entlüftung des Dachraums ist nicht vorgesehen, was zu den komplexen aktiven Maßnahmen zur Bauteilkühlung führte. [14] Durch einfache planerische Maßnahmen, die jedoch die Gestalt beeinflusst hätten, hätte auf zusätzliche technische Kühlung verzichtet werden können.

### 2.3.2.2 Architekturbeispiel | Ziegel

Büro 2226 | Lustenau, baumschlagereberle architekten

Das 2013 fertiggestellte, sechsgeschossige Gebäude von baumschlagereberle Architekten wird auf Architekturkongressen und in Architekturpublikationen vielseitig diskutiert und war schlussendlich Grundstein für die Forschungsfragen dieses Forschungsprojektes. Der Ansatz, ein Gebäude zu errichten, das ohne zusätzliche Heizungstechnik und gleichzeitig ohne die bspw. für Passivhäuser übliche Belüftungstechnik auskommt, ist neu und gleichermaßen richtungsweisend. Die Gebäudeplanung soll es ermöglichen, alle bauphysikalisch realisierbaren Potentiale auszuschöpfen und so auf Technik weitestgehend zu verzichten. Der Architekt sagt in einem Interview im Februar 2016, es werde zu wenig beachtet, „dass die Gebäudetechnik im Verhältnis zur Tragkonstruktion eine verschwindend kurze Lebensdauer hat [...]“ [15]. Diese Feststellung ist

der Grundgedanke des neuartigen und gleichermaßen baukulturell altbekannten Gebäudekonzepts.

Durch die Gebäudehülle mit monolithischen Außenwänden, die Raumgeometrie, die zusammen mit Lüftungsclappen eine abgestimmte Thermik erzeugt, gekoppelt mit einer temperatur- und CO<sub>2</sub>-geführten Steuerung und Regelung der Lüftungsclappen, sollen laut dem betreuenden Energieplaner Junghans ausreichen, um die internen Gewinne des Bürogebäudes so zu regulieren, dass sich die Oberflächentemperatur der Außenwand stets zwischen 22 und 26°C bewegt. Der Gebäudeautomations-Planer Widerin hingegen spricht in derselben Publikation von der Temperaturspanne der Innenluft. Der Gebäude-Name 2226 beschreibt jedenfalls diese anvisierte Temperaturspanne, wenn auch nicht deutlich wird, worauf sich die Spanne bezieht. [16] Das Gebäude hat mit den Außenmaßen von ca. 24 m x 24 m x 24 m wenig Außenfläche bezogen auf das Volumen, die volumenbezogenen Wärmeverluste sind durch das gute A-V-Verhältnis minimiert. Das Haus weist gleichzeitig erhöhte lichte Geschosshöhen von 4,21 m im Erdgeschoss und 3,36 m in den Obergeschossen auf, was mit der für eine natürliche Lüftung notwendigen Thermik begründet wird [16]. Das erhöhte Raumvolumen pro Person führt zu geringeren CO<sub>2</sub>-Gehalten pro Zeiteinheit, die Taktung der notwendigen Lüftung reduziert sich folglich. Die Lüftungswärmeverluste bleiben durch den Austausch des erhöhten Luftvolumens die gleichen.



Abbildung 2: Ansicht Gebäudekubus [17].

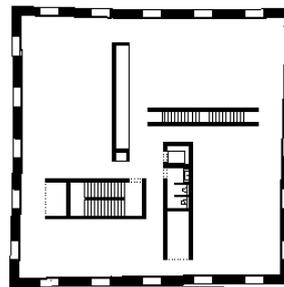


Abbildung 3: Grundriss [16]

Auch diesem Gebäude spürt man die Bauweise an: die in den tiefen Außenwandquerschnitten innenbündig platzierten Fensterkonstruktionen machen die enorme Tiefe der Außenwände sichtbar. Die 425 m<sup>2</sup> Nutzfläche des Gebäudes teilt sich in drei Nutzungsarten mit sehr unterschiedlichen nutzungsimmanenten internen Gewinnen: in eine Kunstgalerie mit Café im Erdgeschoss, in Büronutzung sowie in Wohnnutzung in den obersten zwei Geschossen.

Die 81,6 cm starken monolithischen Außenwände bestehen aus zwei 38 cm starken Hochlochziegeln und den notwendigen Putz- bzw. Mörtelschichten: der der Raumluft zugewandte Ziegel hat einen U-Wert von 0,34 W/(m<sup>2</sup>K) und eine höhere Speichermasse, der der Außenluft zugewandte einen U-Wert von 0,24 W/(m<sup>2</sup>K). Die gesamte Wandkonstruktion kommt inklusive der Putz- und Mörtelschichten auf einen U-Wert im Bereich des Passivhausstandards von ca.

0,14 W/(m<sup>2</sup>K). Der Öffnungsanteil der Fassade beträgt unabhängig der Himmelsrichtung ca. 25 %, die Öffnungen bestehen aus Rahmen, opakem Lüftungsflügel und Glasfläche. Der Glasanteil beträgt ca. 16 % der Fassadenfläche. Die Gesamt-Öffnungen messen in den Obergeschossen 1,63 m x 2,76 m, im EG 1,63 m x 3,97 m pro Fensterachse. Gleichzeitig sind die Fensterkonstruktionen innenbündig in der 81,6 cm tiefen Wand eingebaut. Die solaren Gewinne werden so reduziert, die Belichtung der Räume durch die sturzf freien Fenster wird gleichzeitig gewährleistet. Der U-Wert des Verglasungsanteils der Fenster wird mit  $U_g = 0,50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  angegeben [18].

Das Gebäudekonzept sieht vor, dass die Temperierung der Räume während der Heizperiode lediglich durch Steuerung der internen Gewinne, die im Bürobau während der Nutzungszeiten hoch sind, geregelt wird. Da die Gewinne im Wohnbau während der Nutzungszeiten gering sind, stellt sich resultierend die Frage, in wie fern das Konzept gleichermaßen für Büro- wie Wohnnutzung funktionieren kann.

Die Lüftung erfolgt über temperatur- und CO<sub>2</sub>-geführte Lüftungsklappen, die Lüftungswärmeverluste sollen so minimiert werden. Das Gebäude wurde als Massivbau mit hohem Anteil an Speichermassen konzipiert, um verfügbare, überschüssige Wärmegewinne temporär einspeichern zu können. Die Decken sind aus Normalbeton, die Innenwände aus Ziegel erstellt worden. „Dahinter steckt ganz einfache Physik: die Wärmespeicherfähigkeit von Beton ist 2000-mal höher als die von Luft. Wenn Sie also die Luft im Raum austauschen, geht im Verhältnis zur in der Decke gespeicherten Energie nur ein unbedeutender Bruchteil verloren. Die massiven Wände und Decken gleichen das sofort wieder aus. Wir haben uns damit an traditionellen Bauweisen orientiert. Denken Sie beispielsweise an Kirchen. Im glühenden Sommer scheinen sie die beste Klimaanlage zu haben: massiven Stein.“ [18] In frühen Publikationen findet man folgende Beschreibung der Funktion der monolithischen Außenwände: „Das wichtigste »elementare Mittel der Architektur« von 2226 sind sicherlich die Außenwände. [...] Die massive Hülle nimmt bei Tag Wärme langsam auf, speichert sie und gibt sie bei Nacht nach und nach an den Innenraum wieder ab.“ [19]

„Bei der Entwicklung des Gebäudes 2226 wurde ein Schwerpunkt auf das dynamische Verhalten der Wärmeströme in der Gebäudehülle und auf das Reagieren des Gebäudes auf alltägliche Nutzungsschwankungen gelegt. Es ist bekannt, dass z.B. in alten traditionellen Gebäuden mit dicken Wänden die Außentemperaturschwankung kaum wahrgenommen wird. Dieser Effekt wurde bei der Planung des Gebäudes 2226 aufgenommen. Man untersuchte, ob es möglich sei, durch die Speicherkapazitäten in der Gebäudehülle extreme Kalt- und Warmperioden zu überbrücken.“ [19] Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes ist dies einer der Hauptaspekte, den es zu untersuchen gilt.

Während der Kühlperiode werden die Räume passiv per Nachtauskühlung klimatisiert, ein nachträglich installierter innenliegender Sonnenschutz verschattet temporär die Südseite des Hauses. [18] Die Geschosse werden durch windmühlenartige Ziegel-Einbauten gegliedert, die eine offene, eine geschlossene Treppe, einen Nebenfunktionskern mit Sanitärräumen und

vertikaler Gebäudeinfrastruktur sowie eine Raumtrennung als dicke Wand beinhalten. Die verbleibenden Öffnungen werden, wo nötig, durch Glastelemente getrennt. Die Lüftung ist als Über-Eck-Querlüftung für die jeweiligen Grundriss-Quadranten konzipiert, die Höhe der Räume sowie folgend der Lüftungselemente führt, so die Planung, zur effektiven Thermik.

Eberle sagt in einem Interview: „Wir sind [...] dabei, die Umsetzbarkeit in anderen Klimazonen zu testen. Derzeit verhandeln wir mit Interessenten aus dem extremen Norden Europas und mit anderen aus einer Wüstengegend.“ [15] Ob das in Lichtenau gebaute Konzept, die internen Gewinne durch die Steuerung und Regelung der natürlichen Lüftung zu nutzen, übertragen werden soll, wird nicht deutlich.

### 2.3.2.3 Architekturbeispiel | Holz

2shelter | Münster, MSA Münster School of Architecture

Das Projekt 2shelter steht exemplarisch für realisierte, monolithische Holzbauten. Studierende der MSA | Münster School of Architecture entwarfen und planten einen Prototyp als nachhaltigen Wohnungsbau, der in 2014 in studentischer Eigenleistung realisiert wurde. Im Vordergrund stand die Entwicklung von Konstruktionen mit hohem Anteil von Holz als nachwachsendem Rohstoff. Das Gebäude wurde im Kontext des gesamten Lebenszyklus entwickelt. Neben den Umweltwirkungen der Erstellungs- und Betriebsphase wurde die Recyclingfähigkeit der Baukonstruktionen in die Entwicklung mit einbezogen. Die Rückbaubarkeit und sortenreine Trennbarkeit der einzelnen Komponenten war obligatorisch.

„Die Studierenden [...] entschieden sich für Konstruktionsvollhölzer (KVH) aus Fichte [...], die von beiden Seiten versetzt zueinander eingeschnitten wurden, sodass eine Mäanderform entsteht, die schallabsorbierend wirkt. Aufgrund der integrierten Luftkammern wird die Dämmleistung erhöht. So erhielten die Studierenden ein wärmebrückenfreies Modul mit einem U-Wert von  $0,206 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$  [...]. An den äußeren Rändern bleibt noch ein Vollholzquerschnitt stehen, mit dem die anderen Module verbunden werden können und die Lastabtragung möglich ist.“ [20]

Die realisierten Außenwandkonstruktionen des 1-Raum-Holzbaus ergeben eine Wandstärke von 46 cm, konstruiert aus 28 übereinander gestapelten Vollhölzern, die durch Zusatzelemente wie Gewindestangen gefügt sind. Die Fassade besteht aus einer doppelten, hinterlüfteten Stülp Schalung aus Lärchenholzbrettern mit dahinter liegender Feuchteschutzfolie.



Abbildung 4: Ansicht 2shelter [20].

Das Haus wird durch eine Luftwärmepumpe versorgt, die Wärmeübergabe erfolgt durch Bauteilaktivierung.

Allen recherchierten Holzbauten, ebenso das 2shelter, haben gemein, dass durch die zum Wetterschutz notwendige zusätzliche Fassade die monolithische Bauweise nicht mehr ablesbar ist. Hinter der jeweiligen hinterlüfteten Fassade, meist aus kleinteiliger Holzlattung, könnte sich bspw. ebenso eine Holzständer-Konstruktion verbergen.

### 2.3.3 Untersuchte, nicht-monolithische Architekturbeispiele

Recherchiert wurden Architekturbeispiele, die in Veröffentlichungen als „monolithisch“ bezeichnet werden. Bei einer genaueren Betrachtung der jeweiligen Konstruktion des Baukörpers stellen sich die relevanten Teile der Gebäudehülle, in der Regel die Außenwände, häufig als mehrschalige oder Misch-Konstruktionen heraus. In manchen Projekten wurde das Haus zunächst mit monolithischen Konstruktionen geplant und während der Bauphase mehrschichtig ausgeführt, um den Anforderungen der jeweils geltenden Gesetze zu genügen. Eine Anpassung für spätere Publikationen in Projektbeschreibung und in den Detailzeichnungen erfolgt meist nicht. So entsteht bei zahlreichen Gebäuden der Eindruck eines monolithischen Baukörpers, der jedoch nicht den für unser Forschungsprojekt definierten Anforderungen an eine monolithische Bauweise entspricht. Die Vieldeutigkeit des Begriffes Monolith, auf die bereits in [Abschnitt 2.1](#) eingegangen wurde, zeigt sich auch und vor allem in der Projektrecherche. Die nicht-monolithischen Projekte weisen jedoch relevante Aspekte auf, die folgend beschrieben werden.

#### 2.3.3.1 Nicht-monolithische Architekturbeispiele | Lehm

Im Bereich des Lehmbaus konnten trotz der detaillierten Recherche von mehr als 50 Lehmbauprojekten keine im Sinne der Forschungsarbeit monolithischen Projekte gefunden werden, nur wenige werden als monolithisch publiziert. Die meisten Lehmbauten weisen eine Innendämmung, manche eine Kerndämmung auf. Die Verringerung der Wärmeleitfähigkeit von Lehm wird primär durch Zuschlag von Stroh erreicht, was aber auch eine Reduktion der Druckfestigkeit bedeutet. Aktuell wird Lehm nicht als monolithische Konstruktion genutzt, auch wenn Lehmarchitekturen im architektonischen Sinne als monolithisch gelten können (vgl.

Wohnhaus Rauch | Schlins (AU), Martin Rauch & Roger Bolthausen – Lehm-bau mit Innendämmung). Der Baustoff Lehm scheidet damit aus der weiteren Betrachtung aus.



Abbildung 5: Ansicht EFH Rauch. [21]

### 2.3.3.2 Nicht-monolithische Architekturbeispiele | Beton

#### MFH B35 – Low Exergy Building | Zürich, agps Architekten

Das Haus B35 von agps Architekten, das im Züricher Stadtteil Oberstrass 2011 als Mehrfamilienhaus mit vier Wohneinheiten errichtet wurde, ist eines der Architekturbeispiele, das im Bereich des monolithischen Betonbaus publiziert wird, jedoch im Sinne der vorliegenden Arbeit keine monolithische Konstruktion aufweist. Charakteristisches Merkmal des Gebäudes ist die dunkle, roh anmutende Außenwandkonstruktion aus Dämmbeton sowie die monolithisch anmutende, kantig-klare Gebäudeform. Angedacht als monolithische Gebäudekonstruktion mit einschichtigen Außenwänden entstand während der Realisierung ein Gebäude mit dreischichtigen Dämmbetonaußenwänden, die sich aus 16 cm Dämmbeton-Innenschale, 12 cm Polystyrol-Kerndämmung und 9 cm Dämmbeton-Außenschale zusammensetzen. Trotz der Kerndämmung wirkt das Gebäude zwar äußerlich weiterhin als monolithisch und wird dementsprechend als Monolith, im Sinne des griechischen Ursprungs „einheitlicher Stein“ bezeichnet, scheidet jedoch für unsere Untersuchungen aufgrund der Mehrschichtigkeit der Außenwand von den weiteren Betrachtungen aus.

Das publizierte, bauphysikalische wie technische Gebäudekonzept weist hinsichtlich der Forschungsfrage jedoch relevante Aspekte auf.

Die dunkle Färbung des Dämmbetons wird nicht architektonisch, sondern energetisch begründet: „Durch die dunkle Farbe erwärmt sich die Fassade im Winter stärker, was die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum reduziert und folglich den Heizwärmebedarf verringert.“ [22] Dieser Effekt wird alleinig bezogen auf die Heizperiode betrachtet. Zwei Typen von Fensterkonstruktionen wurden spezifisch gewählt bzw. entwickelt, die Wahl hat schlussendlich Auswirkung auf die intern nutzbaren volatilen Gewinne [22]. Ziel ist die Reduktion solarer Gewinne durch die Fenster, jedoch das Maximieren solarer Gewinne zur Verlustreduktion durch die opaken Bauteile.



Abbildung 6: MFH B35 Straßenansicht. [23]

Das Haus entstand in Zusammenarbeit der Architekten mit Prof. Dr. Leibundgut, zur Bauzeit Professor für Gebäudetechnik am Institut für Technologie in der Architektur der ETH Zürich. Prof. Leibundgut entwickelte und prägt das *low-exergy*-Prinzip „2SOL“, das hier realisiert wurde [24]. Über einen auf dem Dach installierten ca. 30 m<sup>2</sup> großen solaren Hybrid-Kollektor werden solare Gewinne als Strom zur Deckung von Teilen des Strombedarfs, zur Einspeisung ins Netz oder als thermische Energie zur Versorgung von drei Wärmepumpen genutzt. Überschüssige thermische Energien werden in einem unter dem Gebäude platzierten saisonalen Erdspeicher, der durch zwei Erdwärmesonden mit verschiedenen Bohrtiefen be- bzw. entladen wird, eingespeichert. Die beiden Bohrtiefen ermöglichen die Nutzung verschiedener Temperaturniveaus (12°C/18°C). Saisonal im Erdreich gespeicherte Wärme und Kälte ist nutzbar, da die thermoaktiven Übergabesysteme des Gebäudes niedrige Vorlauftemperaturen aufweisen. Die Wärmeübertragung im Gebäude erfolgt daher über Bauteilaktivierung im Fußboden und eine zusätzliche Aktivierung der Dachkonstruktion [25].

Durch die Eigennutzung des Gebäudes durch Prof. Leibundgut konnte die Gebäudetechnik auf Basis der vorliegenden Monitoringdaten in den Betriebsjahren nach Fertigstellung lt. Eigenaussage präzise eingestellt werden.(vgl. [26])

### 2.3.3.3 Nicht-monolithische Architekturbeispiele | Ziegel

Mittelpunktbibliothek | Berlin-Köpenick, Bruno Fioretti Marquez

Die in 2009 errichtete Mittelpunktbibliothek der Architekten Bruno Fioretti Marquez ist ein besonderes Beispiel für die ausgeschlossenen Ziegel-Projekte. Sie weist an drei Seiten 64 cm starke, monolithische Außenwände aus klassischen Voll-Ziegelsteinen auf. Die erhöhten Dämmstärken der restlichen Teile der Gebäudehülle, inklusive der Dämmstärke der Nordwand und des Einbaus von Fensterkonstruktionen mit stark reduziertem U-Wert, kompensierten die Auswirkungen der drei monolithischen Außenwände auf die nach EnEV nachzuweisenden Werte [27, 28].



Abbildung 7: Ansicht Längsseite [17].

Die monolithische Konstruktion ist beeindruckend architekturprägend. Die Massivität der drei Außenwände wird durch die Fügungen der kleinen, massiv anmutenden Ziegel im alten Reichsformat von 25 cm x 12 cm x 6,5 cm als tragende Wandschicht spürbar. Die Sichtbarkeit des Ziegels als Fassade prägt die Anmutung des gesamten Gebäudes. Die innenbündig eingesetzten Fensterkonstruktionen geben den Blick frei auf den Verbund, verweisen auf die monolithische Konstruktion der drei Außenwände.

Im Rahmen des Forschungsprojektes ist es notwendig, die Vergleichbarkeit monolithischer und mehrschichtiger Konstruktionen herzustellen. Der Ansatz, eine monolithische Konstruktion mit stark erhöhten U-Werten in Teilen der Gebäudehülle durch erhöhte Dämmstandards an anderen Bauteilen zu ermöglichen, erscheint derart projektspezifisch, dass das Konzept im Rahmen der Forschungsarbeit nicht weiter betrachtet wurde.

#### 2.3.3.4 Nicht-monolithische Architekturbeispiele | Holz

Woodcube | Hamburg, roedig . schop architekten | Architekturagentur

Der 2013 fertiggestellte Hamburger Woodcube wird als Beispiel für einen massiven Holzbau publiziert. Als „Cube“ erscheint der Holzbau trotz der vorgehängten Holz-Schalung als Fassade rein durch seine Kubatur monolithisch, es handelt sich bei den Außenwänden jedoch um eine mehrschichtige, gedämmte Konstruktion.

Beim dem fünfgeschossigen Wohnhaus besteht, abgesehen vom Treppen- und Erschließungskern und dem Kellergeschoss, die aus Beton gegossen sind, die gesamte Primärtragkonstruktion aus sichtbar belassenem Massivholz [29]. „Die 23 cm starken Massivholzdecken spannen stützenfrei zwischen Kern und Außenwänden und kragen an den Balkonen ohne thermische Unterbrechung nach außen aus. Die stützenfreie Bauweise ermöglicht eine flexible Raumaufteilung nach dem Wunsch der Wohnungskäufer. Hierzu dienen nichttragende Innenwände in Holzständerbauweise mit Gipskartonverkleidung. [...] Berechnungen zufolge spart der „Woodcube“ schon in der Bauphase gegenüber einem herkömmlichen Massivbau rund 8.500 Tonnen CO<sub>2</sub> ein.“ [30]



Abbildung 8: Ansicht Woodcube [17].

Verwendet wurde das Massivholzsystem Holz100 (Thoma), das frei von Leim, Lack und Lösemitteln vorgefertigt angeliefert wird. Einzelbretter werden kreuzlagig durch Holzdübel miteinander verbunden, durch Einfräsen von Nuten in die Bretter der Sperrholzlagen und dem daraus resultierenden Ausbilden von Luftkammern zwischen den Lagen, können die massiven Teile der Außenwände sowie die Deckenkonstruktionen mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit von  $0,079 \text{ W/(mK)}$  wärmebrückenarm agieren. Die Auskragungen der Geschosdecken als Balkonplatten sind so ohne thermische Entkopplung möglich [31].



Abbildung 9: Wandaufbau Massivholzwand [32].

Abbildung 10: Detailaufnahme Wandaufbau Woodcube [3].

Im Bauteilkatalog des Produktes Holz100 werden Standard-Außenwandkonstruktionen mit zusätzlichen Holzfaserdämmplatten dargestellt, die die Winddichtigkeit generieren [33]. Nach Rücksprache mit dem Hersteller sind zusätzliche Holzfaserdämmplatten nicht obligatorisch, Papierschichten zwischen den Holzlagen bspw. wären für die Herstellung der Winddichtigkeit ausreichend. Die Nutzung der Konstruktion für einen monolithischen Außenwandaufbau ohne zusätzliche dämmende Schichten ist somit möglich. Bei der Ausführung des Woodcube wurden neben den massiven Holzelementen zwei Dämmschichten von insgesamt 76mm verbaut, welche Einfluss nicht nur auf die Winddichtigkeit, sondern auch auf den Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand haben. In der Detailaufnahme, die die Laibung der Fensteröffnung zeigt, ist die Dämmung neben der Massivholzwand zu erkennen. Auch wenn es sich bei dem Dämmmaterial (Holzfaserplatten) um Holzfasern handelt, muss dieser Außenwandaufbau als nicht monolithisch bewertet werden.

### 2.3.4 Zusammenfassung der Teilergebnisse

Trotz zahlreicher gebauter Architekturbeispiele in monolithischer Ausführung, mussten von den annähernd 100 recherchierten Bauwerken mehr als die Hälfte nach genauerer Untersuchung als im Sinne der Forschungsarbeit nicht monolithisch deklariert werden. Zum einen entfallen die Projekte, die die Anforderungen der EnEV 2009 [5] auf Grund eines früheren Realisierungsdatums nicht erfüllen. Zum anderen stellte sich bei detaillierter Betrachtung der Außenwandkonstruktion häufig ein mehrschaliger Wandaufbau heraus.

Die Recherche ergab, dass besonders für die Herstellung in Beton und Holz zahlreiche gebaute Beispiele für eine monolithische Bauweise existieren. Im Bereich des Ziegelbaus findet man vor allem im Bereich des (Standard-)Wohnungsbaus gebaute Beispiele. Im Bereich des Strohbaus ist die monolithische Bauweise die Ausnahme. Aus statischen Gründen ergeben sich für Monolithen üppige Wandstärken. Für die Errichtung einer monolithischen Außenwand mit einem U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  würde aber eine nur ca. 20 cm dicke Stroh-Wand benötigt, was zur Folge hat, dass im Bereich des Strohbaus in der Regel Mischkonstruktionen aus Holz und Stroh vorzufinden sind. Auf Grund der großen statisch notwendigen Wandstärken in monolithischer Bauweise wurde Stroh nicht weiter betrachtet.

Für den Baustoff Lehm konnte kein monolithisches Bauwerk gefunden werden, bei genauerer Betrachtung besitzen alle gebauten Beispiele eine Kern- oder eine Innendämmung. Die Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes ist um ein vielfaches höher als bei den übrigen untersuchten Materialien. Bei einem durchschnittlichen  $\lambda$ -Wert von  $0,8 \text{ W}/(\text{mK})$  [34, 35] würde es eine Außenwanddicke von ca. 2,9 m benötigen um einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  zu erzielen. Bei einer solchen Dicke stellt sich die Frage der Wirtschaftlichkeit sowie der Materialgerechtigkeit, was ein Grund für den Ausschluss des Materials Lehm von den weiteren Untersuchungen darstellt. Eine Vergleichbarkeit mit den weiter untersuchten Baustoffen wäre nicht herzustellen.

Die energetischen Systeme konnten nur bei fünf Projekten recherchiert werden. Es handelt sich bei allen fünf Projekten um Niedertemperatursysteme mit Wärmeübertragung durch Bauteilaktivierung, unter Verwendung von Wärmepumpen. In zwei Projekten mit Büro- und Wohnnutzung werden die Fensterkonstruktionen bewusst so ausgeformt, dass die solaren Gewinne minimiert werden (B35 – Prof. Leibundgut / 2226 – Prof. Eberle). In einem Projekt mit Wohnnutzung führt die aus gestalterischen Gründen vergrößerte Verglasungsfläche sowie der Verzicht auf Entlüftungsmöglichkeiten dazu, dass die nicht nutzbaren Wärmegewinne technisch abgeführt werden müssen (H36).

### 2.4 Produkte mit Produktspezifikationen

Produktrecherchen, bei denen die Materialeigenschaften analysiert und katalogisiert wurden, bestätigten die im vorherigen Abschnitt getroffenen Aussagen zu Lehm und Stroh. Die folgende Tabelle stellt die im Sinne des Forschungsprojektes bestmöglichen bauphysikalischen Eigenschaften der recherchierten, als Monolith realisierbaren Produkte, inklusive der Eigenschaften möglicher Referenzmaterialien sowie die von ruhendem Wasser und ruhender Luft im Vergleich dar:

Tabelle 1: Bauphysikalische Kenndaten der betrachteten Materialien sowie von Vergleichsmaterialien, Quellen: DIN 10456 [1], DIN 4108-4 [36], Produktkataloge [29, 37–39], eigene Berechnungen

	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität $c_p$ [kJ/kg·K]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Speicherzahl $s$ [kJ/(m <sup>3</sup> ·K)]	Temperaturleitfähigkeit $a$ [m <sup>2</sup> / s]	Wärmeeindringkoeffizient $b$ [J / (m <sup>2</sup> ·K·s <sup>0,5</sup> )]																																								
Beton	2,300	1,0	2300	2300	0,00100	72,73																																								
Porenbeton	0,090	1,0	350	350	0,00026	5,61																																								
Infralichtbeton	0,180	1,0	800	800	0,00023	12,00																																								
Vollziegel	0,810	1,0	1800	1800	0,00045	38,18																																								
Hochlochziegel	0,075	1,0	600	600 </tr <tr> <td>Holz</td> <td>0,079</td> <td>1,6</td> <td>450</td> <td>720</td> <td>0,00011</td> <td>7,54</td> </tr> <tr> <td>Mineralwolle</td> <td>0,035</td> <td>1,0</td> <td>80</td> <td>80</td> <td>0,00044</td> <td>1,67</td> </tr> <tr> <td>Polystrol</td> <td>0,035</td> <td>1,4</td> <td>30</td> <td>42</td> <td>0,00083</td> <td>1,21</td> </tr> <tr> <td>Kalkzementputz</td> <td>1,000</td> <td>1,0</td> <td>1800</td> <td>1800</td> <td>0,00056</td> <td>42,43</td> </tr> <tr> <td>Luft</td> <td>0,030</td> <td>1,01</td> <td>1,23</td> <td>1,24</td> <td>0,02415</td> <td>0,19</td> </tr> <tr> <td>Wasser bei 10°C</td> <td>0,600</td> <td>4,2</td> <td>1000</td> <td>4190</td> <td>0,00014</td> <td>50,14</td> </tr>	Holz	0,079	1,6	450	720	0,00011	7,54	Mineralwolle	0,035	1,0	80	80	0,00044	1,67	Polystrol	0,035	1,4	30	42	0,00083	1,21	Kalkzementputz	1,000	1,0	1800	1800	0,00056	42,43	Luft	0,030	1,01	1,23	1,24	0,02415	0,19	Wasser bei 10°C	0,600	4,2	1000	4190	0,00014	50,14
Holz	0,079	1,6	450	720	0,00011	7,54																																								
Mineralwolle	0,035	1,0	80	80	0,00044	1,67																																								
Polystrol	0,035	1,4	30	42	0,00083	1,21																																								
Kalkzementputz	1,000	1,0	1800	1800	0,00056	42,43																																								
Luft	0,030	1,01	1,23	1,24	0,02415	0,19																																								
Wasser bei 10°C	0,600	4,2	1000	4190	0,00014	50,14																																								

Materialien, die sich für den Bau monolithischer Konstruktionen eignen, weisen eine im Vergleich geringe Wärmeleit- und geringe Speicherfähigkeit auf. Gleichmaßen wird ersichtlich, warum Luft als Bestandteil von Dämmstoffen und Wasser hingegen als Speichermedium genutzt werden.

Verallgemeinernd gilt für Stoffe im nicht-latenten Bereich, dass mit steigender Rohdichte die Wärmeleitfähigkeit steigt. Gleichmaßen steigt mit steigender Rohdichte die Speicherfähigkeit des Stoffes. Ausnahme bilden Stoffe mit Phase Change Material, das im latenten Bereich rohddichte-unabhängig agiert.

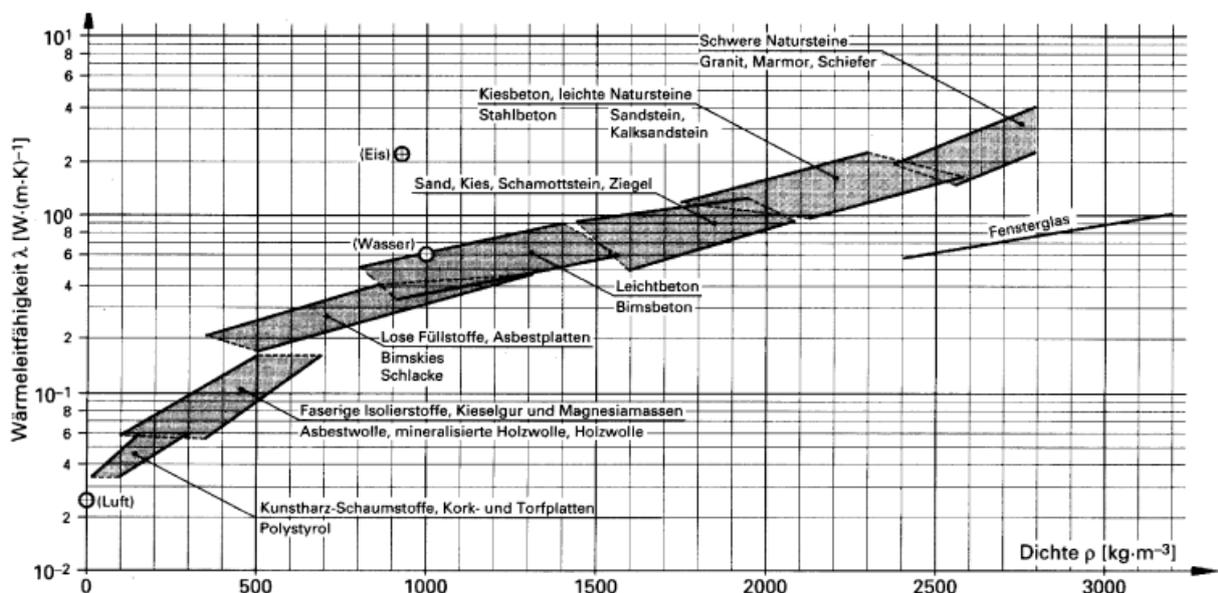


Abbildung 11: Wärmeleitfähigkeit in abhängig zur Rohdichte [40]

Je größer die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes und umso höher die Rohdichte und resultierend die Speicherfähigkeit, desto größer ist die resultierende Wärmeeindringtiefe in Folge periodischer Schwankungen einwirkender Wärmequellen. (vgl. [41])

„Einen genaueren Eindruck vom dynamischen Wärmeaufnahme- und -speichervorgang vermitteln die Temperaturleitfähigkeit  $a$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] und der Wärmeeindringkoeffizient  $b$  [ $\text{m}$ ]. Die Temperaturleitfähigkeit beziffert die Geschwindigkeit, in der sich Temperaturänderungen in einem Material fortpflanzen. [...] Je größer die Temperaturleitfähigkeit  $a$  ist, umso schneller vollziehen sich Temperaturänderungen in Folge eines Temperaturunterschiedes. Der Wärmeeindringkoeffizient  $b$  [ $\text{m}$ ] beschreibt das kurzzeitige Wärmetransportverhalten eines Materials, beziffert den Einfluss der thermischen Materialeigenschaften  $\lambda$ ,  $\rho$  und  $c_p$  auf den Wärmestrom, d.h. drückt die Überlagerung von Transmission und Speicherverhalten aus. [...] Je größer der Wärmeeindringkoeffizient, desto größer ist der resultierende Wärmestrom im Bauteil und umgekehrt.“ [41] Beton bspw. weist im Vergleich zu Porenbeton eine große Temperaturleitfähigkeit und einen großen Wärmeeindringkoeffizienten auf. Beton kann demnach schneller und tiefer beladen werden als Porenbeton.

## 2.5 Stand der Forschung

Die hygrothermische Simulation ist ein Werkzeug zur gekoppelten Bewertung von Wärme- und Feuchtetransportvorgängen. Der methodische Ansatz wird in [42, 43] beschrieben und ist Gegenstand der Softwareprogramme DELPHIN und WUFI. Mit [44] steht ein umfassender Planungsleitfaden für Innendämmsysteme zur Verfügung. Dieser findet vorrangig in der Bestandsanierung Anwendung.

Zahlreiche Untersuchungen beschäftigen sich mit Holzkonstruktionen und deren feuchtetechnischen Verhalten. [45, 46] beschreibt die Bemessung von Holzkonstruktionen nach WTA. Ein weiterer Schwerpunkt liegt bei der Bewertung von flachgeneigten Dächern aus Holz [47–50].

[47] Es werden die Regeln der Holzschutznorm DIN 68800-2 [51] erläutert und Wege aufgezeigt, wie bei der Bemessung von anspruchsvollen Holzbauquerschnitten, insbesondere ungelüftete Flachdächer mit Begrünung, umgegangen werden kann.

[48] vergleicht 2 verschiedene Messverfahren mit einem Simulationsverfahren zur Bestimmung der Materialfeuchte in einer Dreischichtplatte im Flachdachaufbau. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der Verfahren und weisen auf tiefgreifende Kenntnisse bei der Anwendung von numerischen Simulationen hin.

[49, 50] beschäftigen sich ebenfalls mit Flachdächern und untermauern die Erkenntnisse der zuvor erläuterten Literaturquellen.

[52] untersuchten WDVS im Holzbau und verglichen Simulationen mit Messungen an einem Wandprüfstand.

Die genannten Untersuchungen beziehen sich vorrangig auf Flachdächer mit Holzunterkonstruktionen und den Holzrahmenbau. Das hygrothermische Verhalten von Massivholzwänden wird in der Literatur nicht untersucht.

Mineralische monolithische Baustoffe haben ein geringeres Schädigungspotenzial gegenüber Feuchteansammlungen und werden in der Literatur nicht betrachtet.

[53] hat, eingebettet in das vorliegende Projekt, in einer umfassenden Studie zeitgemäße, monolithische Wandaufbauten hygrothermisch untersucht und festgestellt, dass massive diffusionsoffene Materialien die Feuchte am besten aufnehmen, speichern und wieder abgeben.

Die Bewertung von Wärmebrücken bei monolithischer Bauweise ist in zahlreichen Wärmebrückenkatalogen von Herstellern zu finden. In der Forschungsarbeit von [54] wird in einem Teilkapitel der Anschluss von Geschossdecken an eine monolithische Außenwand (Porenbeton) für verschiedene Ausführungsvarianten hinsichtlich des Wärmebrückeneinflusses untersucht. Ein Ergebnis war die deutliche Beeinflussung der Auflagertiefe auf die Temperaturverteilung und den Wärmebrückenverlustkoeffizienten.

Das Forschungsvorhaben von [55] beschäftigte sich mit der Erarbeitung eines Wärmebrückenkatalogs für Fensteranschlüsse. Ziel war es einen praxistauglichen Wärmebrückenkatalog für Fenster-, Fenstertür- und Rollladenanschlüsse bereitzustellen, der unterschiedliche Rahmenmaterialien berücksichtigt.

[56] untersucht die Ausbildung des Außenwand-Decken-Knotens von monolithischem Ziegelmauerwerk unter Wärme-, Schallschutz- und Standsicherheitsaspekten. Für eine wärmebrückenminimierende Ausführung ist die Auflagertiefe so gering wie möglich zu halten und die Stirnseite der Decke mit Dämmstoff aufzufüllen.

[57] beleuchtet den Einfluss der Gebäudeart und der Außenwandkonstruktion auf den detaillierten Wärmebrückenzuschlag. Die Studie greift verschiedene Typen Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser auf. Es werden U-Werte für Außenwände in Abhängigkeit von KfW-Standards definiert und in herkömmlicher WDVS-Bauweise oder mit einem Vormauerziegel ausgeführt. Weiterhin wird die Lage der Fensterebene untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass mit steigendem Dämmniveau der Zuschlag  $\Delta U_{WB}$  ansteigt. Der Anstieg ist bei Ein- und Reihenhäusern größer als bei Mehrfamilienhäusern. Ebenso wird festgestellt, dass ab einem U-Wert der Außenwand von  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für ein WDVS geringere  $\Delta U_{WB}$  zu erwarten sind als bei der Variante mit einem Vormauerziegel. Die Lage der Fenster kann je nach Fensterflächenanteil einen Einfluss von 50 % auf den Wärmebrückenzuschlag ausmachen. Dabei wirkt die Anordnung der Fenster in der Dämmebene günstig.

[58] zeigt mit ihren Simulationen den Einfluss von Wärmebrücken für verschiedene Anschlussdetails von monolithischen Konstruktionen und Konstruktionen mit einem Wärmedämmverbundsystem. Eine monolithische Bauweise führt in der Summe zu geringfügig höheren Wärmebrückenzuschlägen.

Lebenszykluskosten (LZK) sind heute ein wichtiges Kriterium bei der Konzeption, Planung, Errichtung und dem Betrieb von Gebäuden (GEFMA 220, ISO 15686-5, DIN 18960, BNB/DGNB). Kausale Zusammenhänge zwischen den Erst- und Folgekosten während der verschiedenen Lebenszyklusphasen und Maßnahmen werden bisher kaum berücksichtigt (vgl. z.B. BMUB 2014, S. 28). Unsicherheiten werden in der Regel durch Aufschlagfaktoren berücksichtigt (vgl. z.B. Beckers et al. 2014, S. 212-214). Baumaterial- und anlagentypenbezogene Kennwerte können schon in der Planungsphase Rückschlüsse auf die im Lebenszyklus zu erwartenden Folgekosten von Gebäuden, Bauteilen und Anlagen ermöglichen (vgl. z.B. Balck&Lützkendorf 2015). Hierdurch kann eine Entscheidung für Bauteile/Anlagen mit relativ günstigen Lebenszyklus- bzw. Folgekosten getroffen werden.

Einhergehend mit der Etablierung von Ökobilanzierungen als planungsbegleitendes Werkzeug wächst der Forschungsbedarf stetig an. Im Rahmen von Forschungsprojekten wird einerseits die Datengrundlage präzisiert, andererseits werden Werkzeuge entwickelt, die die Verknüpfung der zu bewertenden Produkte im Bauteil bzw. Gebäude verknüpft. Verifizierbarkeit der Grundlagendaten steht ebenso im Fokus.

Durch die Anpassung der in der Ökobau.dat verfügbaren Umwelt-Produktdeklarationen (Environmental Product Declaration, EPD) an die Vorgaben der EN 15804 wurde bereits die Grundlage für die Vergleichbarkeit und fehlerarme Anwendung der EPDs geschaffen. [59, 60] Im Rahmen von Forschungsarbeiten wird zudem die Datenbasis für die „Baustoffdatenbank Ökobau.dat“ stetig weiterentwickelt. [61] Die Vergleichbarkeit der Datensätze, die Präzisierung der Bewertungsmethoden, die Modellbildung zur Erstellung weiterer EPDs sowie deren Verifizierung stehen im Vordergrund der Arbeiten. Die Vernetzung der Ökobau.dat mit weiterer Software wie bspw. dem Ausschreibungstextsystem STL-Bau stellt einen weiteren Forschungsbereich dar. [62]

Im wirtschaftlichen Bereich stehen primär bewertende Vergleiche von Konstruktionen oder Gebäude im Vordergrund. Es steht mittlerweile eine Vielzahl kostenpflichtiger Ökobilanzierungs- Onlinetools zur Verfügung, die nicht auf wissenschaftlicher Basis entstanden sind. Es stellt sich hier die Frage der Verifizierung der Ergebnisse.

## 2.6 Schlussfolgerungen aus AP 1:

Aus den in der Projektrecherche aufgenommenen Aussagen ergeben sich im Kontext der oben dargestellten Parameter folgende Untersuchungsaspekte und -fragen:

1. Wärmeleit- und Speicherfähigkeit im Kontext des Außenklimas: Führen monolithische Außenwandkonstruktionen zu einem geringeren Heizwärmebedarf und zu höherer Behaglichkeit auf Grund eines im Vergleich zur mehrschichtigen Wandkonstruktion besseren Wärmeleit- und -speicherverhaltens und resultierend einer besseren Amplitudendämpfung?

2. Absorptionsgrad: Führen monolithische Außenwandkonstruktionen mit hohem Absorptionsgrad zu geringeren Heizwärmebedarfen und erhöhter Behaglichkeit auf Grund eines im Vergleich zur mehrschichtigen Wandkonstruktion besseren Nutzbarkeit der solaren Gewinne?

3. Wärmeleit- und Speicherfähigkeit im Kontext des Innenklimas: Führen monolithische Außenwandkonstruktionen zu geringerem Heizwärmebedarf und zu höherer Behaglichkeit auf Grund eines im Vergleich zur mehrschichtigen Wandkonstruktion besseren Wärmeleit- und -speicherverhaltens und resultierend besserer Nutzbarkeit der auf der raumzugewandten Seite verfügbaren Wärmegewinne?

4. Feuchteleit- und Feuchtespeicherfähigkeit: Kompensieren monolithische Außenwandkonstruktionen auf Grund ihres immanenten Feuchteverhaltens Feuchtepeaks auf der raumzugewandten Seite im Vergleich zur mehrschichtigen Wandkonstruktion besser, was zur erhöhten Behaglichkeit durch eine ausgeglichene relative Luftfeuchte führt.

Die Recherche zeigte, dass Baustoffe, aus denen Monolithen konstruiert werden können, im Vergleich zum jeweiligen Vergleichsbaustoff, der nur mehrschichtig verbaut werden kann, eine geringere Wärmeleitfähigkeit, jedoch auch eine geringere Speicherzahl, eine geringere Temperaturleitfähigkeit sowie eine geringere Wärmeeindringtiefe aufweisen. Eine klare Zuordnung der grundlegenden Wirkungsweisen (Energie speichern und halten) (vgl. [41], S. 120) auf die raumbegrenzenden Bauteile scheint daher zielführend.

Im Weiteren betrachtet werden Ziegel, Beton und Holz. In der Baustoffgruppe Ziegel werden ungefüllte Hochlochziegel, in der Baustoffgruppe Beton werden Porenbeton und Dämmbeton (Infraleichtbeton), in der Gruppe Holz wird „Vollholz“ mit eingeschlossenen Luftkammern (Holz 100) betrachtet.

### 3 AP 2 Kategorisierung

In der folgenden Abbildung sind die auf die Gebäudehülle wirkenden Parameter dargestellt, die schlussendlich Auswirkungen auf die Energiebilanz und die Behaglichkeit des angrenzenden Raumes haben.

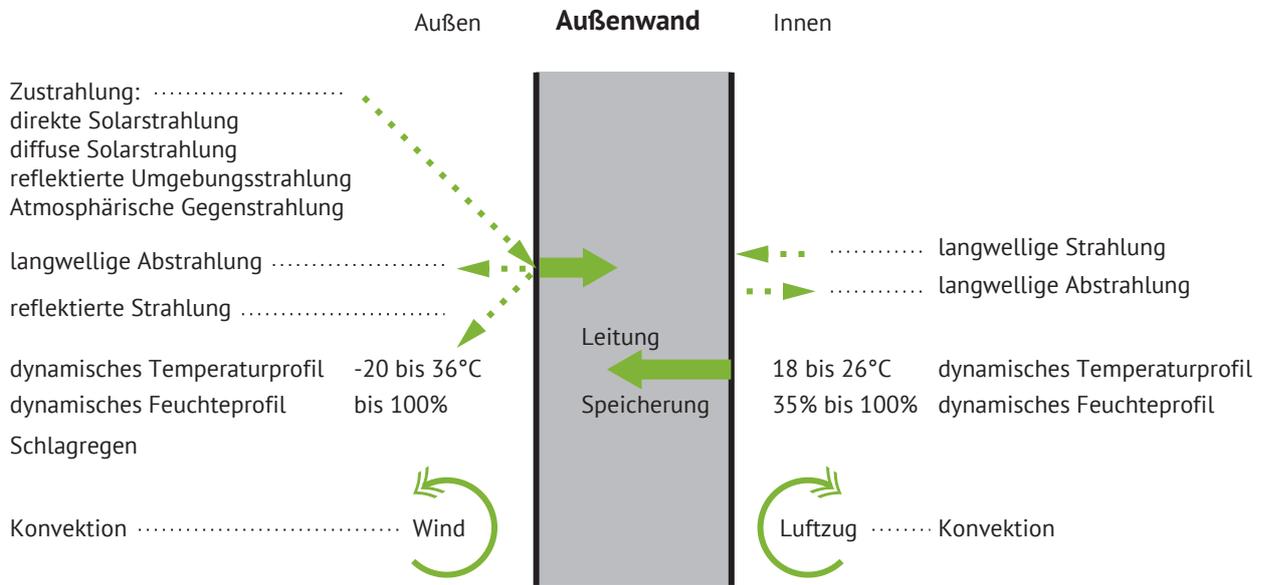


Abbildung 12: Dynamische, auf Außenwandbauteile einwirkende Parameter

Eine Kategorisierung erfolgt einerseits über die Konstruktionsart der Außenwand (monolithisch, mehrschichtig), deren Materialität (Ziegel, Beton, Holz) bzw. deren immanente Proportion von Wärmeleit- zur Speicherfähigkeit und andererseits über die jeweiligen einwirkenden Lasten. Als interne Lasten werden im Rahmen der Arbeit dynamisch-variable Lasten verstanden, die auf der innenraumzugewandten Seite des Bauteils wirken. Hierzu gehören alle internen Lasten gemäß DIN V 18599[63] sowie die solaren Gewinne ( $Q_S$  Solare Wärmeeinträge), die sich in der dynamischen Raumtemperatur widerspiegeln. Als externe Last werden im Rahmen der Arbeit alle auf der außenluftzugewandten Seite wirkenden, aus den dynamischen Wetterdaten resultierenden Lasten verstanden. Die internen Lasten sind dynamisch-variabel, da sich die Innenraumkondition je nach Konstruktionsart der Gebäudehülle von Modell zu Modell ändert. Die externen Lasten sind dynamisch-konstant, da sie bei allen Modellen identisch sind.

### 3.1 Modellbildung

#### 3.1.1 Systemgrenzen gemäß DIN V 18599-1:2011 [63]

Die Festlegung der äußeren Systemgrenze ist notwendig, um eine ökonomische Kalkulation sowie die ökologische Bewertung zu ermöglichen. Sie erfolgt gemäß der Bestimmung der DIN V 18599-1:2011: „Maße in vertikaler Richtung:

- Bezugsmaß ist die Oberkante der Rohdecke in allen Ebenen eines Gebäudes (alle Geschosse), unabhängig von der Lage der eventuell vorhandenen Dämmschicht; dies gilt auch für den unteren Gebäudeabschluss
- die einzige Ausnahme bildet der obere Gebäudeabschluss: Hier wird die Oberkante der obersten wärmetechnisch wirksamen Schicht als Außenmaß verwendet.“ [DIN V 18599-1, S. 56, Abschn. 8.1]

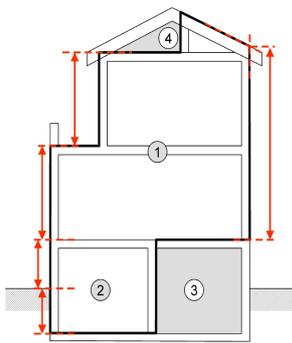


Abbildung 13: Simulationsgrenze gem. DIN V 18599 [63]

Die U-Werte werden entsprechend der Tabelle 1, Anlage 1 der EnEV 2014 [64] definiert:

- Dach, oberste Geschossdecke:  $U=0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- Außenwand:  $U=0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

#### 3.1.2 Materialien, Bauteilkatalog und Systemschnitt

Als Grundlage für die bauphysikalische, ökologische und ökonomische Betrachtung wurden auf Basis der Recherche die zu betrachtenden Materialien und Anschlüsse definiert. Die Konstruktionsaufbauten werden dargestellt und durch notwendige Regelbauteile ergänzt. Die Materialstärken werden auf den zu erzielenden U-Wert abgestimmt, um die Vergleichbarkeit der Konstruktionen zu erreichen.

Werkstoff	Wandaufbau	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	R-Wert [m <sup>2</sup> K/W]	d <sub>s</sub> [m]	U <sub>s</sub> -Wert [W/m <sup>2</sup> K]
<b>Beton</b>		<b>0.65</b>				<b>0.28</b>
<b>Infraleichtbeton</b>	(Oberfl.hydrophobiert, möglw. Mörtel mit Blähglaszuschlägen)		0.18		<b>0.65</b>	
<b>Porenbeton</b>		<b>0.35</b>				<b>0.28</b>
<i>aussen</i>	Putz	0.02	1.00			
	Porenbeton - Planstein		0.09		<b>0.32</b>	
<i>innen</i>	Putz	0.02	0.60			
<b>Ziegel</b>		<b>0.28</b>				<b>0.28</b>
<i>aussen</i>	Putz	0.02	1.00			
	ThermoPlan S75		0.08		<b>0.25</b>	
<i>innen</i>	Gipsputz	0.02	0.51			
<b>Holz</b>		<b>0.33</b>				<b>0.28</b>
<i>aussen</i>	Außenschalung	0.02	0.13			
	Hinterlüftung	0.05		0.09		
	Holzweichfaser mit Nut und Feder (NICHT NOTWENDIG)	0.00	0.07			
<i>innen</i>	<b>tragende Holzwand</b>		0.08		<b>0.26</b>	
	(Brettlagen 20-80mm dick, eingefräste Rillen als integrierte Strukturdämmung)					
	Windpapier unverletzbar zwischen zwei Brettlagen					
<b>Stroh</b>		<b>0.21</b>				<b>0.28</b>
<i>aussen</i>	wetterfester Kalkputz	0.02	1.00			
	<b>Stroh</b>		0.05		<b>0.18</b>	
<i>innen</i>	Lehmputz	0.01	0.91			
	(8mm - mindestwert für Brandschutz)					
<b>Beton + WDVS</b>	REFERENZWAND	<b>0.35</b>				<b>0.28</b>
<i>aussen</i>	Putz (Kalkputz) auf Trägerschicht	0.02	1.00			
	<b>Wärmedämmung WLG035</b>		0.04		<b>0.12</b>	
	<b>Beton</b>	<b>0.25</b>	2.30			
<i>innen</i>	Gipsputz	0.01	0.51			
<b>Ziegel + WDVS</b>	REFERENZWAND	<b>0.38</b>				<b>0.28</b>
<i>aussen</i>	Leichtmörtelputz auf Trägerschicht	0.02	0.40			
	<b>Wärmedämmung WLG035</b>		0.04		<b>0.10</b>	
	<b>Ziegel - HLz-Plan 24,0-0,9 Dryfix</b>	<b>0.24</b>	<b>0.42</b>			
<i>innen</i>	<b>Kalk-Gipsputz</b>	<b>0.02</b>	0.60			
<b>Holz + WDVS</b>	REFERENZWAND	<b>0.24</b>				<b>0.28</b>
<i>aussen</i>	Putz (Kalkputz) auf Trägerschicht	0.02	1.00			
	<b>Wärmedämmung WLG035</b>		0.04		<b>0.05</b>	
	<b>Holz</b>	<b>0.17</b>	0.08			
<i>innen</i>	Gipsputz	0.01	0.51			
<b>KLH (Holz) + WDVS</b>	REFERENZWAND	<b>0.20</b>				<b>0.28</b>
<i>aussen</i>	Putz (Kalkputz) mit Gewebe	0.01	1.00			
	<b>Wärmedämmung WLG035</b>		0.04		<b>0.09</b>	
	<b>KLH-Platte</b>	<b>0.10</b>	0.09			
<i>innen</i>	Gipsfaserplatte	0.01	0.25			

Abbildung 14: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für Außenwände

Werkstoff	Werkstoff- Untergruppe/ Produkt	Wandaufbau	d [m]
<b>Beton</b>	<i>Fa Schlamann</i>	Porenbeton PPW4	<b>0.115</b>
<b>Ziegel</b>	<i>ZWP-Plan-T 11,5</i>	Abm. 49,8x11,5x24,9	<b>0.115</b>
		ρ-klasse = 0,8 λ = 0,39 [W/mK]	
<b>Holz</b>	<i>H100-W12 [Thoma]</i>	Decklage horizontal	0.026
		Kernlage	0.040
		Decklage doppelt	0.054
			<b>0.120</b>

Abbildung 15: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für Innenwände

Werkstoff	Werkstoff- Untergruppe/ Produkt	Bodenaufbau	d [m]	
<b>Beton</b>	<i>innen</i>	<b>Fußbodenaufbau</b>	<b>0.180</b>	
		Bodenbelag	0.020	
		Estrich	0.050	
		FBH	0.030	
		(Trittschall-)Dämmung	0.080	
		(Abdichtung)	0.001	
		Ortbeton	0.300	
		Magerbeton	0.040	
		<i>aussen</i>	Schaumglasschotter	

Abbildung 16: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für Bodenplatte

Werkstoff	Werkstoff- Untergruppe/ Produkt	Bodenaufbau	d [m]
<b>Beton</b>	<i>oben</i>	Bodenbelag	0.020
		Estrich	0.050
		FBH	0.030
		(Trittschall-)Dämmung	0.060
		Abdichtung	-
	<i>unten</i>	Beton-(Halb-)Fertigteildecke	0.220
<b>Holz</b>	Holz 100 - DE02		<b>0.387</b>
	<i>oben</i>	Bodenbelag	0.020
		Estrich	0.060
		Trittschalldämmung	0.035
		Schüttung	0.060
		Rieselpapier	-
	Obergurt	0.077	
	4 Lagen	0.058	
<i>unten</i>	Untergurt	0.077	

Abbildung 17: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für Geschossdecke

Werkstoff	Werkstoff- Untergruppe/ Produkt	Bodenaufbau	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	$d_s$ [m]	$U_s$ -Wert [W/m <sup>2</sup> K]	
<b>Beton</b>	<i>aussen</i>	Dämmung WLG035	<b>0.36</b>	0.035	<b>0.165</b>	0.200	
		gem. WU Daten					
	<i>innen</i>	Beton-(Halb-)Fertigteildecke	0.20	2.3			
<b>Holz</b>	<i>aussen</i>	Dämmung WLG035	<b>0.29</b>	0.035	<b>0.074</b>	0.200	
		Obergurt					0.1
		4 Lagen					0.1
		Untergurt					0.1
			0.21	0.079			

Abbildung 18: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für oberste Geschossdecke

Für die detaillierte Abbildung von Wärmebrücken und Bauteilanschlüssen wird zudem ein Bauteilkatalog für jedes Material entwickelt. Bei den Definitionen der einzelnen Bauteilaufbauten wird von Herstellerangaben der Produkte sowie den anerkannten Regeln der Technik ausgegangen. Jedes Material und dessen spezifischen Anschlüsse werden in dem jeweiligen Bauteilkatalog definiert. Die betrachteten Anschlüsse umfassen:

- Boden gegen Erdreich
- Anschluss: Außenwand an Bodenplatte
- Anschluss: Geschossdecke an Außenwand
- Anschluss: Fenster
- Ausbildung Fenstersturz

- Oberste Geschossdecke | Gebäudeabschluss nach oben

**Aufbau | Oberste Geschossdecke**

Dämmung WLG 035  
 Stb-Geschossdecke  
 Gipsputz

**Aufbau | Geschossdecke**

Bodenaufbau  
 Stb-Geschossdecke  
 Gipsputz

**Aufbau | Fenstersturz**

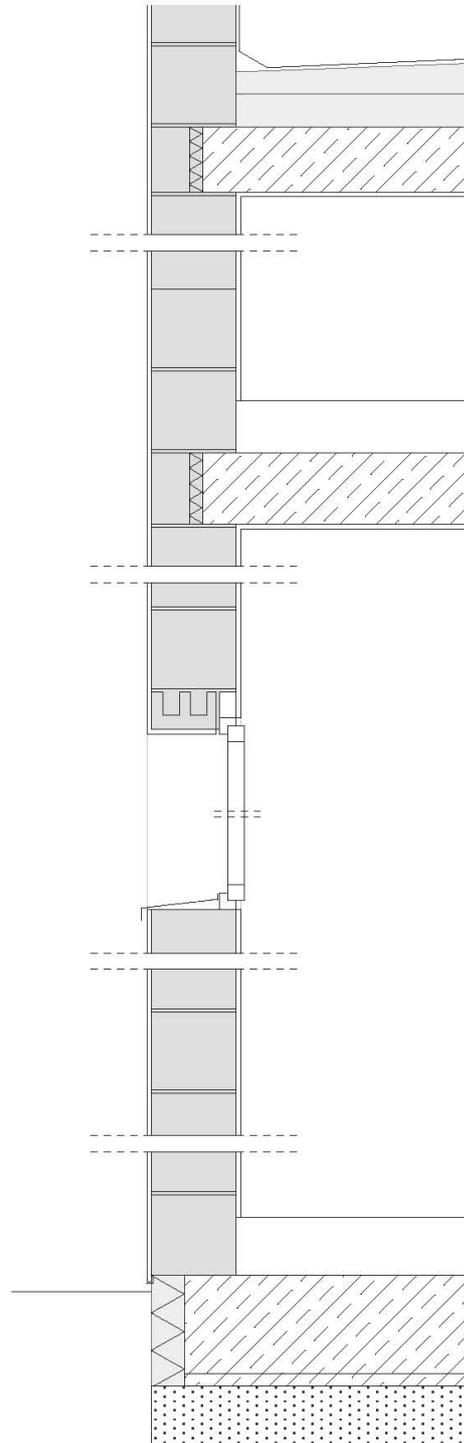
Putz  
 tragender Ziegelsturz  
 Gipsputz

**Aufbau | Außenwand**

Putz  
 Ziegel  
 Gipsputz

**Aufbau | Bodenplatte**

Bodenaufbau  
 Ortbeton  
 Magerbeton  
 Schaumglasschotter



Systemschnitt | ZIEGEL

Abbildung 19: Bsp. Systemschnitt für das Material Ziegel

### 3.1.3 Modellbildung Bauteilbetrachtung

#### 3.1.3.1 Hygrothermische Untersuchung

Das Modell für die hygrothermische Bewertung wird in Anlehnung an die DIN EN 15026 [65] entwickelt. Die Simulationen erfolgen im ungestörten Bauteilbereich und erfordern keine weiteren Schnittebenen für das geometrische Modell. Die auf das geometrische Modell aufgeprägten Randbedingungen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

In den hygrothermischen Simulationen wird das Außenklima von Potsdam verwendet (siehe Abschnitt 9.5). Die Orientierung der Wände ist nach Westen und an die Umgebungsbedingungen mit nachfolgenden Randbedingungen gekoppelt.

*Tabelle 2: Randbedingungen hygrothermische Simulation*

	konvektiver Wärmeübergangs- koeffizient [W/(m <sup>2</sup> K)]	Radiativer Wärmeübergangs- koeffizient [W/(m <sup>2</sup> K)]	Wasserdampf-übergangs- koeffizient [s/m]	sd [m]
Innen, horizontal	2,5	5,19	1,5e <sup>-8</sup>	0
Außen	20	5	1,22e <sup>-7</sup>	0

#### **Konstruktionsaufbauten**

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Konstruktionsaufbauten und Materialkennwerte beschrieben und anschließend hygrothermisch bewertet.

Alle Materialkennwerte wurden aus der Datenbank von DELPHIN entnommen. Nachteilig ist, dass die Datenbank vorrangig ältere Materialien beinhaltet. Eine einfache Anpassung der Kennwerte an die insbesondere bei monolithischen Bauweisen verwendeten Baustoffe war nicht möglich, da die entsprechenden Daten nicht vorlagen. Um diese Kennwerte zu erhalten, müssten die Materialien aufwendigen Labormessungen unterzogen werden. Folgende Materialien wurden verwendet:

Tabelle 3: Verwendete Materialkennwerte für die hygrothermischen Simulation

	Material	$\lambda_{dry}$ [W/(mK)]	c [J/(kgK)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [-]	AW [kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )]
<b>Putz</b>	Kalkzementputz	0,550	960	1.270	12,0	0,0093
	Zementputz	0,750	850	1.390	33,0	0,0300
<b>Dämmung</b>	Holzfaser	0,042	2.000	150	3,0	0,0700
	Polystyrol	0,036	1.500	23	96,0	0,0000
	Mineralwolle	0,040	840	195	1,0	0,0000
<b>Tragkonstruktion</b>	Holz	0,079	1.245	425	73,0	0,0024
	Hochlochziegel	0,350	1.000	1.400	18,8	0,1773
	Porenbeton	0,095	1.081	390	7,0	0,0430
	Lehm	0,136	894	483	8,8	0,0940
	Normalbeton	2,100	1.000	2.104	76,0	0,0125

Die einzelnen Materialien wurden zu verschiedenen Konstruktionsaufbauten zusammengesetzt (Grundkonstruktion). Dabei konzentrieren sich die Untersuchungen auf Holz, Hochlochziegel, Porenbeton und Lehmwände als tragende Elemente. Die Dicke der Tragkonstruktion ist wie folgt festgelegt: 36,5 cm, 45 cm, 55 cm und 76 cm. Zu jedem Konstruktionsaufbau existiert ein Referenzbauteil, was aus dem gleichen tragenden Material besteht, jedoch mit einer Wärmedämmung versehen ist, was zu geringeren Dicken führt. Die Dicke der Wärmedämmung ist so gewählt, dass ein identischer U-Wert zur Grundkonstruktion erreicht wird. Weiterhin wird ein weiteres Referenzbauteil aus Normalbeton mit einem WDVS zum Vergleich herangezogen. Die Dicke des Dämmstoffs wurde so gewählt, dass der U-Wert der Grundkonstruktion erzielt wurde. Anhand des Hochlochziegels wird der exemplarische Aufbau der Grundkonstruktion und der beiden Referenzkonstruktionen folgend erläutert (siehe Abbildung 16) Eine Komplettübersicht der Konstruktionsaufbauten ist im Anhang 9.1 dargestellt.

### Konstruktionsaufbau der Hochlochziegelkonstruktion (Grundkonstruktion)

Der Hochlochziegel wird in den Wandstärken 36,5 cm, 45 cm, 55 cm und 76 cm variiert.

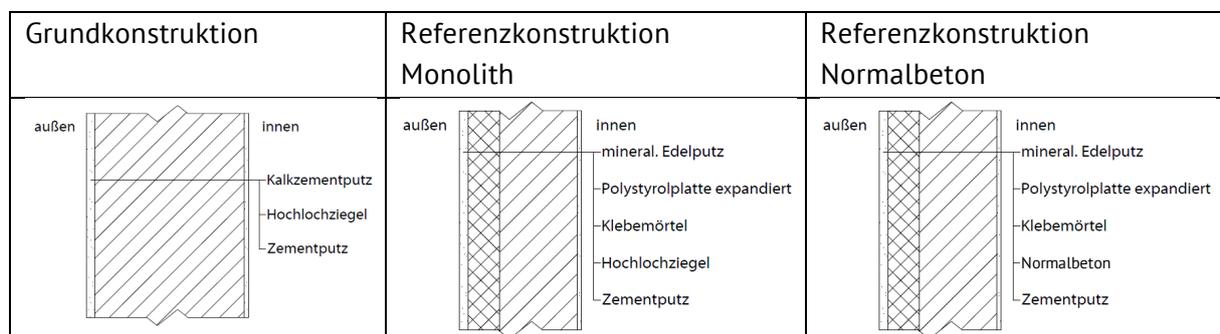


Abbildung 20: Exemplarischer Wandaufbau der Grund- und Referenzkonstruktionen [53]

Tabelle 4: Konstruktionsaufbau der Grund- und Referenzkonstruktionen für Hochlochziegelwände

Grundkonstruktion			Referenzkonstruktion Monolith			Referenzkonstruktion Normalbeton		
Nummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]	Nummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]	Nummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
145	Zementputz (innen)	0,01	145	Zementputz (innen)	0,01	145	Zementputz (innen)	0,01
508	Hochloch- ziegel	x	508	Hochloch- ziegel	0,175	569	Normalbeton	0,175
242	Kalkzement- putz (aussen)	0,02	187	Polystyrol	x	187	Polystyrol	x
			242	Kalkzement- putz (aussen)	0,02	242	Kalkzement- putz (aussen)	0,02

Tabelle 5: U-Werte, Dicke der Tragkonstruktion und Dämmschicht für die Grund- und Referenzkonstruktion aus Hochlochziegel

Grundkonstruktion		Referenzkonstruktion Monolith		Referenzkonstruktion Normalbeton		U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]
Kurzbezeichnung	d <sub>Tragkonstr.</sub> [m]	Kurzbezeichnung	d <sub>Dämmung.</sub> [m]	Kurzbezeichnung	d <sub>Dämmung.</sub> [m]	
Hlz-36,5	0,365	WDVS-Hlz-36,5	0,020	WDVS-Nb-Hlz-36,5	0,035	0,792
Hlz-45	0,45	WDVS-Hlz-45	0,028	WDVS-Nb-Hlz-45	0,043	0,664
Hlz-55	0,55	WDVS-Hlz-55	0,039	WDVS-Nb-Hlz-55	0,054	0,558
Hlz-76	0,76	WDVS-Hlz-76	0,060	WDVS-Nb-Hlz-76	0,075	0,418

### 3.1.3.2 Thermische Untersuchung

Die Grundlage der numerischen Bewertung von Wärmebrücken bildet die DIN EN ISO 10211. Bei der Wahl der Modellgeometrie müssen Schnittebenen berücksichtigt werden. Diese müssen vom zentralen Element mit einem Mindestabstand  $d_{\min}$  von 1 m oder das 3-fache der Dicke der flankierenden Bauteile gelegt werden. Wenn ein Modell mehr als eine geometrische Wärmebrücke enthält, dann ist der Mindestabstand  $d_{\min}$  von jeder Wärmebrücke einzuhalten oder die Symmetrie-Ebene zu verwenden (siehe Abbildung 17).

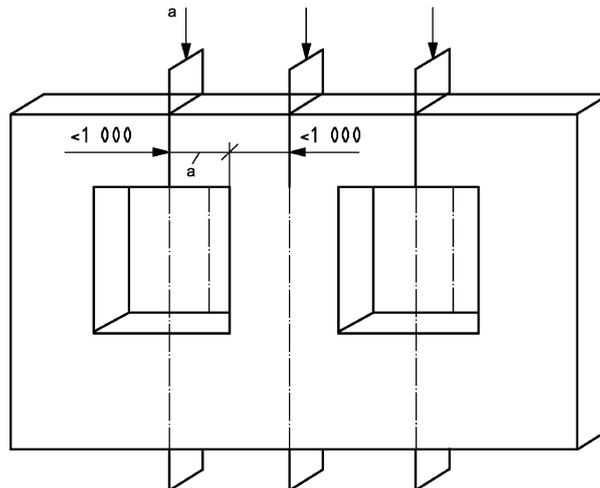


Abbildung 21: Symmetrieebene für das geometrische Modell

Die Randbedingungen für die thermische Simulation orientieren sich an der DIN 4108 Beiblatt 2.

Tabelle 6: Randbedingungen thermische Simulation

$\Psi$ -Wert Berechnung	innen		außen	
Temperatur [°C]	20		-5	
	horizontal	abwärts	aufwärts	
Wärmeübergangskoeffizient [W/(m <sup>2</sup> K)]	7,69	5,88	10	25

Eine Aufgabe der Modellbildung ist es Vereinfachungen zu treffen, die den Eingabeaufwand reduzieren, die Rechengeschwindigkeit erhöhen und dennoch keine signifikante Verschlechterung in der Genauigkeit zu erwarten haben.

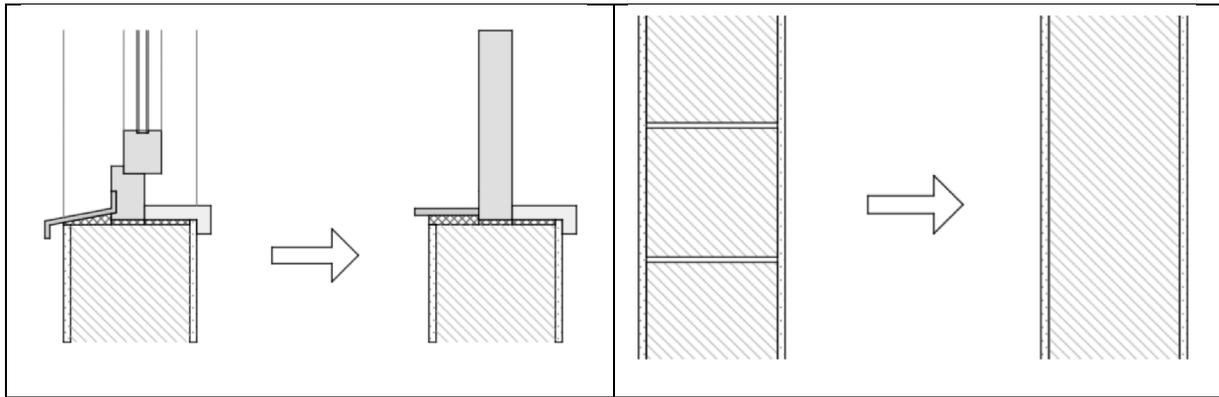


Abbildung 22: Vereinfachte Modellbildung Fensterbrüstung und Wandaufbau [58]

### Konstruktionsaufbauten

Im Vergleich zu den hygrothermischen Untersuchungen werden die Konstruktionsaufbauten an die ökologischen, ökonomischen und raumklimatischen Bewertungen angepasst (siehe Abbildung 33).

Mit den genannten Materialien werden Wandaufbauten generiert, die einen U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  besitzen. Dadurch kann es zu nicht praxisüblichen Dicken der tragenden Materialien kommen, jedoch ist die Vergleichbarkeit gewährleistet. Neben Wandelement werden noch Decken- und Fensterelemente definiert, um verschiedene Wärmebrückendetails abbilden zu können.

In der nachfolgenden Tabelle sind die untersuchten Wandaufbauten dargestellt.

Tabelle 7: Wandaufbauten  $U=0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  - thermisch

Material	Dicke [m]	$\lambda$ [W/(mK)]
<b>1. Hochlochziegel</b>		
Außenputz	0,015	1,0
Hochlochziegel <sup>1</sup>	0,252	0,075
Innenputz	0,015	0,51
<b>1. Porenbeton</b>		
Außenputz	0,015	1,0
Porenbeton	0,303	0,09
Innenputz	0,015	0,6
<b>2. Dämmbeton</b>		
Dämmbeton	0,616	0,181

<sup>1</sup> Hochlochziegel gibt es in vielen verschiedenen Ausführungen. Einige enthalten in ihren Hohlkammern Luft, andere sind wiederum mit Dämmstoff (MiWo, Perlite, ...) gefüllt. Die unterschiedlichen Baustoffe besitzen i.d.R. unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten. In den durchgeführten Untersuchungen wird der Hochlochziegel ausschließlich als homogener Körper mit einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit entsprechend den Herstellerangaben modelliert

<b>Holz</b>		
Außenschalung	0,024	1
Hinterlüftung	0,050	
Holz	0,247	0,079
<b>3. Normalbeton 25cm (Referenzkonstruktion)</b>		
Außenputz	0,015	1
WDVS	0,114	0,035
Normalbeton	0,250	2,3
Innenputz	0,015	0,510

Für alle Wandkonstruktionen gibt es eine Referenzkonstruktion aus Normalbeton mit einem WDV-System.

Die Untersuchung von Wärmebrückeneinflüssen verschiedener Anschlussdetails setzt neben den Außenwandaufbauten auch die Definition der angrenzenden Bauteile voraus. Im Projekt werden neben einbindenden Geschossdecken (siehe Abbildung 19) auch Fensteranschlüsse (siehe Abbildung 20) untersucht.

#### Deckenaufbau:

Je nach Material der tragenden Außenwand gibt es zwei unterschiedliche Deckenaufbauten für die Simulation der Geschossauflager.

Tabelle 8: Stahlbetondecke für Hochlochziegel, Porenbeton und Dämmbeton (thermisch)

Material	Dicke [m]	$\lambda$ [W/(mK)]	
Estrich	0,08	1,4	
Trittschalldämmung	0,08	0,04	
Stahlbeton	0,22	2,1	

Tabelle 9: Holzdecke für Holzkonstruktion (thermisch)

Material	Dicke [m]	$\lambda$ [W/(mK)]	
Estrich	0,06	1,4	
Trittschalldämmung	0,035	0,04	
Schüttung	0,06	0,09	
Deckensystem aus Holz	0,212	0,079	

## Fenster:

Bei allen Konstruktionen mit einem Fenster wird für dieses ein U-Wert von  $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angenommen. In der Simulation werden Fenster als ein einfacher Block ( $\lambda=0,13 \text{ W}/(\text{mK})$ ) abgebildet. Weitere Kennwerte werden nicht benötigt.

## Anschlussdetails

Für die Bewertung von Wärmebrücken wurden Anschlussdetails entwickelt. Nachfolgend ist exemplarisch das Detail für den Hochlochziegel dargestellt. Die Details für den Porenbeton, Dämmbeton, Holz und Normalbeton sind dem Anhang 9.2 zu entnehmen.

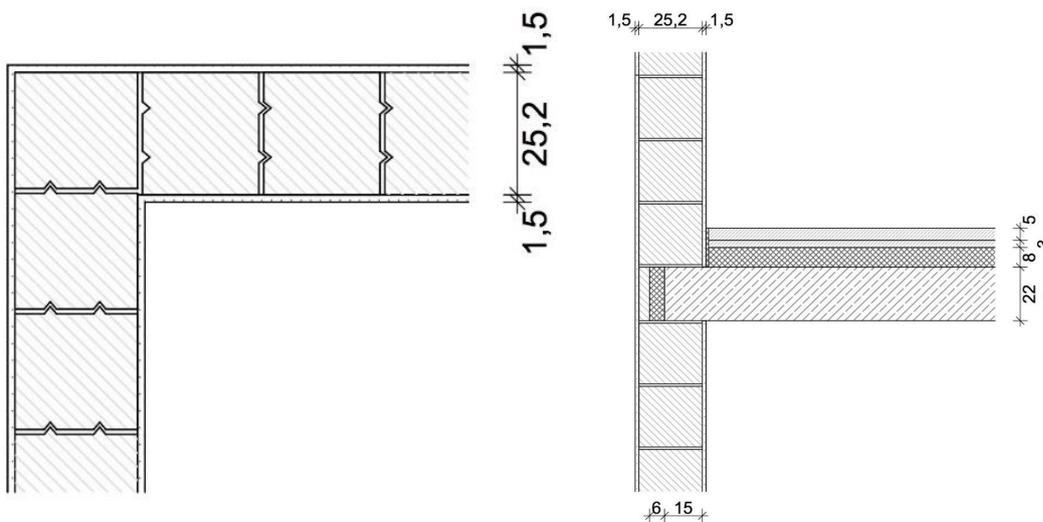


Abbildung 23: li.: Außenwanddecke Hochlochziegel; re.: Deckenaufleger Hochlochziegel [58]

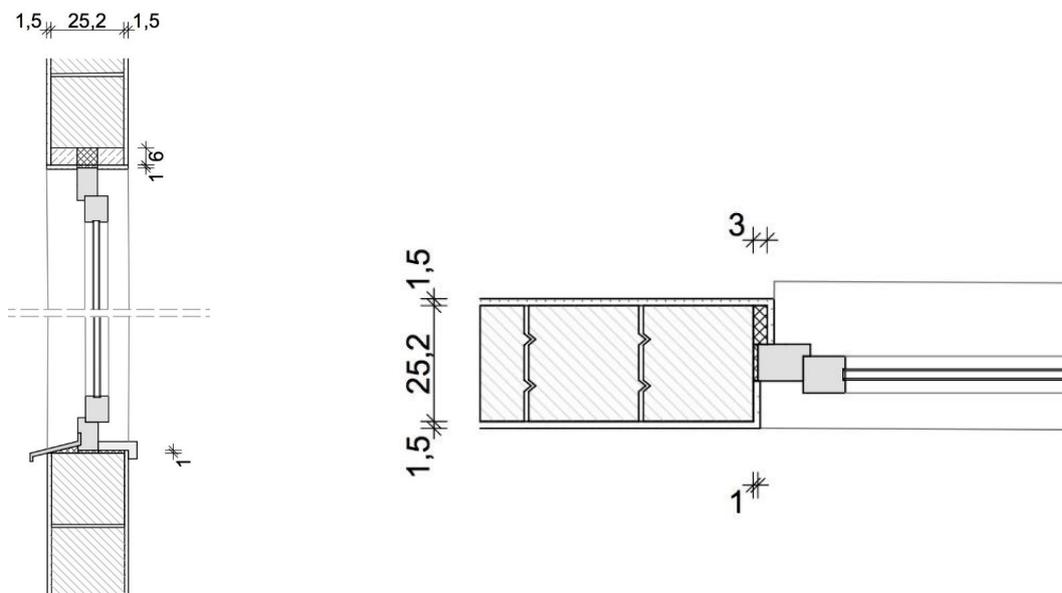


Abbildung 24: li.: Fenstersturz- und Brüstung Hochlochziegel; re.: Fensterlaibung Hochlochziegel [58]

### 3.1.4 Modellbildung Systembetrachtung

Für die Systembetrachtung wird der Prüfraum der DIN EN ISO 13791 [66] „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren“ abgebildet. Das Modell ist mit TRNSYS gemäß DIN 19791 verifizierbar, eine Validierung durch Transsolar liegt vor.

Der Prüfraum besteht aus einer Zone mit einer Außenfassade, der ein Fenster eingebracht ist. Zwei Fenstergrößen sind im Modell implementiert, im Rahmen der Systembetrachtung wird abweichend eine dritte zusätzliche Fenstergröße eingeführt. Es werden zudem Eck- und Mittelräume abgebildet, um den Anteil der Außenwandfläche erhöhen zu können und so deren Einfluss auf die zu untersuchenden Parameter abzubilden.

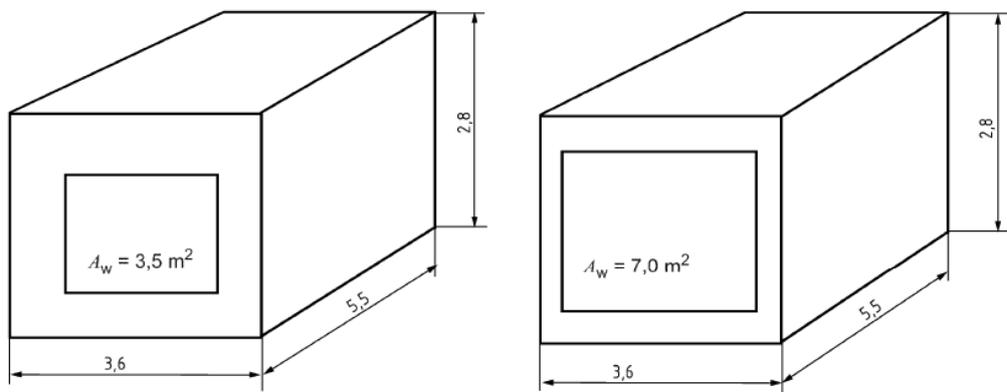


Abbildung 25 – DIN EN ISO 13791 [66]: 2012-08, Geometrie der Prüfräume

Am Prüfraum-Modell werden in einem ersten Untersuchungsteil Parameterstudien durchgeführt, die grundlegende Aussagen zum Materialverhalten hinsichtlich der Forschungsfragen ermöglichen und in einem zweiten Untersuchungsteil reale Konstruktionen und deren Zusammenspiel im Raumgefüge untersucht. Das 1 Zonen-Modell gemäß DIN 13791 [66] dient als Grundlagenmodell. Die Untersuchungen werden mittels Simulationssoftware (TRNSYS) durchgeführt. Vier Ein-Zonen-Modelle werden abgebildet:

1. Unteres Geschoss, Eckraum mit Bodenplattenanschluss (Ia)
2. Unteres Geschoss, Mittelraum mit Bodenplattenanschluss (Ib)
3. Mittleres Geschoss, Eckraum (IIa)
4. Mittleres Geschoss, Mittelraum (Modell IIb)

Die Ergebnisse werden in einem dritten Untersuchungsteil auf zwei Raummodelle (Wohnhaus und Bürogebäude) übertragen, deren Geometrie auf der Prüfraum-Geometrie aufbaut.

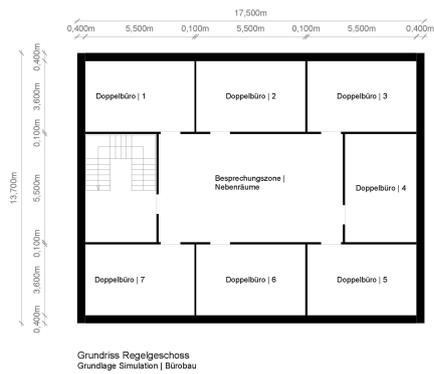


Abbildung 26: Grundriss Regelgeschoss | Bürogebäude

Der Referenzgrundriss für das Bürogebäude wurde mit einem zentralen Versorgungskern entwickelt. So erhalten die Räume an der Außenfassade die notwendige Belichtung gemäß Arbeitsstättenrichtlinie, die Nebenräume für Versorgung und Lagerung werden im weniger belichteten Innenraumkern angeordnet.

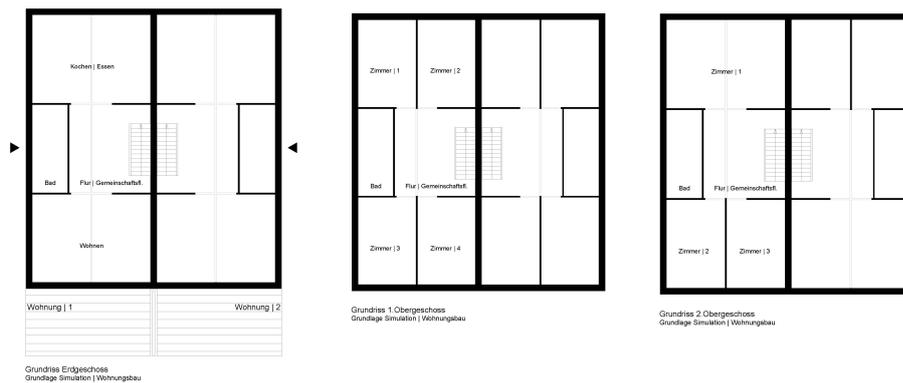


Abbildung 27: Grundriss Erdgeschoss | 1. | 2. Obergeschoss | Wohngebäude

Das Referenzgebäude für den Wohnungsbau besteht aus zwei Wohneinheiten, die sich jeweils über drei Geschossen erstrecken. Im Erdgeschoss wird der Baukörper von zwei Seiten erschlossen.

### 3.2 Schlussfolgerungen aus AP 2

Im Bereich der Bauteilbetrachtung werden Modelle für die hygrothermischen und die thermischen Untersuchungen definiert. Die hygrothermischen Modelle repräsentieren typische Wandstärken und definieren alle Materialkennwerte. Diese werden einer softwarespezifischen Datenbank entnommen, weil nicht alle feuchterelevanten Kennwerte normativ zur Verfügung stehen. Die Lehmkonstruktion wird ausschließlich für die hygrothermischen Untersuchungen als weiterer Referenzfall mit herangezogen. Die thermischen Modelle repräsentieren einen U-Wert der ungestörten Außenwand von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die entwickelten Anschlussdetails dienen der vergleichenden Bewertung von Wärmebrückeneinflüssen.

Im Bereich der Systembetrachtung dient ein verifizierbares Ein-Zonen-Prüfraummodell als Grundlagemodell für Parameterstudien, die alle zeitgemäßen monolithischen Wandaufbauten abstrakt abbilden und bewerten sollen. Übertragen werden die Ergebnisse auf ein konkretes Wohnbau- sowie ein Bürobaumodell, an dem gewählte konkrete monolithische Wandkonstruktionen, basierend auf der Projektrecherche, simuliert und bewertet werden.

## 4 AP 3 Bauphysikalische Betrachtung: Energetisch-dynamische Simulation

### 4.1 Allgemeines

Die Bauteilbetrachtung wird mit DELPHIN [67], die Systembetrachtung mit TRNSYS durchgeführt.

### 4.2 Bauteilbetrachtung

Auf der Ebene der Bauteilbetrachtung wird im Projekt zwischen hygrothermischer und rein thermischer Betrachtung unterschieden.

Grundsätzlich kann die Bewertung einer Konstruktion

- mit stationären oder
- instationären

Klimarandbedingungen erfolgen. Werden stationäre Bewertungsmethoden verwendet (z.B. DIN 4108-2, DIN 4108-3 Glaser-Verfahren) ist es z.B. nicht möglich den kapillaren Feuchtetransport und Wärmespeichereffekte zu berücksichtigen. In der Praxis kann es zu Planungsunsicherheiten kommen [44]. Ein instationäres Simulationsverfahren liefert bei hinreichend genauen Eingabedaten eine tendenziell höhere Genauigkeit, da wesentliche Transportmechanismen erst mit diesen Verfahren bewertet werden können. Eine Übersicht der wichtigsten Wärme- und Feuchtetransportmechanismen sind Tabelle 10 zu entnehmen. Für die hygrothermischen Bewertungen werden instationäre Simulationen angewandt.

*Tabelle 10: Wärme- und Feuchtetransportmechnismen, sowie deren Ursache nach [42]*

	Transportmechanismus	Transportursache, -potential
Wärmetransport	Wärmeleitung und Speichereffekte	Temperaturdifferenz
	Wärmestrahlung	Temperaturdifferenz in der 4.Potenz
	Luftströmung	Gasdruck, Dichteunterschiede
	Enthalpieströme durch Feuchtebewegung	Dampfdiffusion mit Phasenwechsel und Flüssigtransportströme im Temperaturfeld
Dampftransport	Gasdiffusion	Dampfdruck (Temperatur, Gesamtdruck)
	Molekulartransport (Effusion)	Dampfdruck
	Lösungsdiffusion	Dampfdruck
	Konvektion	Gesamtdruckgefälle
Flüssigtransport	Kapillarleitung	kapillarer Unterdruck
	Oberflächendiffusion	relative Luftfeuchte
	Sickerströmung	Gravitation
	Hydraulische Strömung	Gesamtdruckunterschiede
	Elektrokinese	Elektrische Felder
	Osmose	Ionenkonzentration

Werden Bauteile ausschließlich thermisch betrachtet, wird der Einfluss der (Luft-)Feuchtigkeit vernachlässigt. Diese Betrachtungsweise wird bei der Bewertung von Wärmebrücken genutzt. Ein Grund dafür ist die erhöhte Rechengeschwindigkeit, vor allem bei 2D-Wärmetransport. Weiterhin kommt es bei der Wärmebrückenberechnung auf die zusätzlichen Verluste des Anschlussdetails gegenüber der Regelkonstruktion an. Ein feuchteabhängiger Einfluss spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Alle thermischen Untersuchungen werden unter stationären Randbedingungen durchgeführt.

#### 4.2.1 Bewertung des Feuchtetransports

Der Feuchtetransport kann auf unterschiedliche Art und Weise bewertet werden. Dabei steht immer im Vordergrund das Bauteil gegenüber feuchteschädigenden Einflüssen zu bewerten.

#### **Konstruktives Verfahren**

Die einfachste Bewertungsmethode ist der Vergleich mit Konstruktionen nach DIN 4108-3, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist. Einige dieser Konstruktionsaufbauten können unter Umständen den rechnerischen Tauwassernachweis nicht einhalten. Jahrelange Praxiserfahrungen haben gezeigt, dass diese Konstruktionen durch ihre kapillaren Eigenschaften nicht anfällig sind. Häufig sind davon Mauerwerkskonstruktionen betroffen.

#### **Glaser-Verfahren**

Eine weitere Bewertungsmethode ist der Tauwassernachweis im stationären Zustand mit dem Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3[68]. Das Verfahren betrachtet ausschließlich Diffusionsvorgänge unter definierten stationären Randbedingungen. Die Feuchtespeicherung und der Feuchtetransport durch Kapillarleitung können nicht abgebildet werden. Der Bilanzierungszeitraum umfasst eine 90-tägige Tauperiode (Wintermonate) und eine 90-tägige Verdunstungsperiode (Sommermonate). Für die Tauperiode gelten folgende Randbedingungen:

*Tabelle 11: Randbedingungen Glaserverfahren - Tauperiode*

Klima	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Wasserdampf- teildruck [Pa]	Dauer [d]
Innen	20	50	1.168	90
Außen	-5	80	321	

Für die Verdunstungsperiode werden ausschließlich Wasserdampfpartialdrücke und die Dauer definiert.

Tabelle 12: Randbedingungen Glaserverfahren - Verdunstungsperioded

Verdunstungsperiode von Juni bis August		Dauer [d]
Wasserdampfpartialdruck Innen [Pa]	1.200	90
Wasserdampfpartialdruck Außen [Pa]	1.200	
Sättigungsdampfdruck im Tauwasserbereich		
• Wände, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen	1.700	
• Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen [Pa]		
• Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen [Pa]	2.000	

Die DIN 4108-3 definiert ebenfalls Konstruktionen, für die keine Nachweise erforderlich sind.

### Hygrothermische Simulation

Die komplexeste Bewertungsmethode ist die hygrothermische Simulation. Sie ermöglicht eine instationäre Bewertung des Feuchteverhaltens unter realen klimatischen Bedingungen. Die DIN EN 15026 [65] beschreibt die Anwendungen und Grenzen der eingesetzten numerischen Verfahren. Die Grundlage für die Erarbeitung der Norm ist die WTA-Richtlinie 6-2 [69]. Neben der Aufschlüsselung der notwendigen Transportmechanismen, die mit der Software abgebildet werden müssen, definiert die Norm die erforderlichen Rand- und Anfangsbedingungen.

Folgende Größen sollten als Stundenmittelwerte vorliegen:

- Außenlufttemperatur
- Strahlung
- Außenluftfeuchte
- (Niederschlag und Windgeschwindigkeit)

In vielen Fällen wird auf die meteorologischen Datensätze vom Deutschen Wetterdienst (DWD) zurückgegriffen. Dabei ist zu beachten, dass in der aktuellen Ausgabe der Datensätze von 2011 (Testreferenzjahre) keine Niederschlagsmengen erfasst sind. Als Alternative kann auf ältere Wetterdatensätze von [70] zurückgegriffen werden. Für die Bauteil- und Systembetrachtung wurden die Simulationen mit dem Klimastandort Potsdam (DWD) durchgeführt. Für den Standort liegen keine Niederschlagsdaten vor. Deshalb konnte kein Schlagregen simuliert werden. Weiterhin wurde auf Hydrophobierungen verzichtet.

Neben den außenklimatischen Bedingungen sind die raumklimatischen Bedingungen von entscheidender Bedeutung. Insbesondere wird das Innenraumklima durch das Nutzerverhalten und die raumluftechnischen Anlagen bestimmt. Die Wärme- und Feuchtespeicherfähigkeit im Innenraum wird durch Raumumschließungsflächen und Einrichtungsgegenständen relativ gleichmäßig gehalten [69]. Deshalb sind nur in einigen Extremfällen stündliche Messwerte/Randbedingungen des Raumklimas erforderlich. Nach dem WTA Merkblatt 6-2 [69] können folgende Bedingungen verwendet werden:

- Messwerte von Gebäude mit ähnlichen Innenklima oder durch Raumluftechnische Anlagen vorgegebenes Innenklima
- Ergebnisse aus hygrothermischen Gebäudesimulationen
- Ermittelte Kenngrößen aus Feuchteproduktions- und Luftwechselraten

Häufig stehen derartige Kennwerte nicht zur Verfügung oder sind nur durch erheblichen Zeit- und Kostenaufwand zu ermitteln. Eine Möglichkeit ist die Annahme von Raumlufttemperaturen und -feuchten nach Abbildung 23.

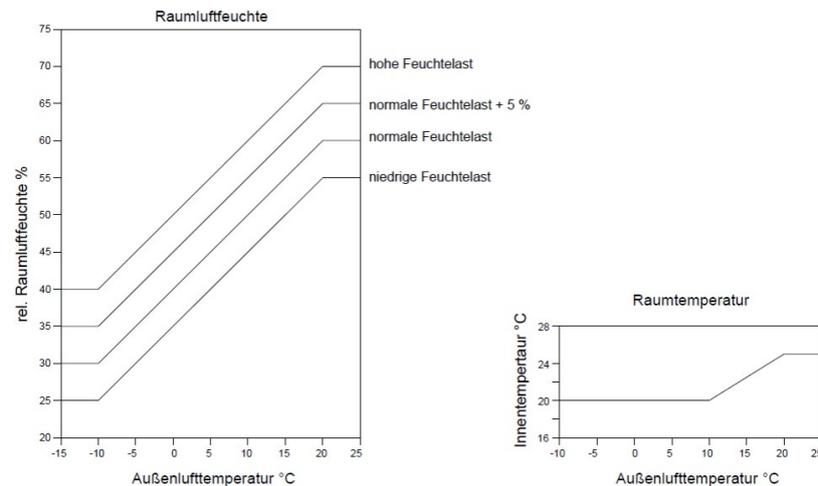


Abbildung 28: Tagesmittel der raumseitigen Lufttemperatur und -feuchte in Abhängigkeit vom Tagesmittel der Außenlufttemperatur nach WTA 6-2 [69]

Für den Regelfall genügt die „normale Feuchtelast“ aus. Wenn der Planer zusätzliche Sicherheiten wünscht, dann kann die „normale Feuchtelast +5%“ oder für Feuchträume die „hohe Feuchtelast“ gewählt werden (siehe Abbildung 23).

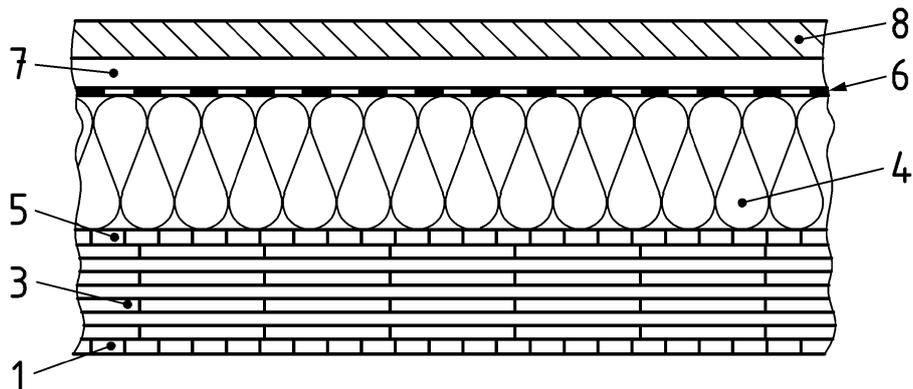
Je nach Anwendungsfall und Materialität sind verschiedene Nachweise erforderlich.

1. Überprüfung der Tauwasser- und Verdunstungsmassen nach DIN 4108-3
2. Vorbeugende Maßnahmen für Holz- und Holzwerkstoffe nach DIN 68800-2[71]
3. Hygrothermische Bewertungen mit den Kriterien nach [46] und [72]

Das Ergebnis der stationären Glaser-Berechnung nach DIN 4108-3 überprüft zwei Kriterien. Zum einen muss in der Verdunstungsperiode mehr Wasser verdunsten können als in der Tauperiode anfällt. Zum anderen darf eine maximale Tauwassermasse nicht überschritten werden. Grundsätzlich gilt eine Obergrenze von 1 kg/m<sup>2</sup> Tauwasser in der Kondensationsebene. Grenzt an die Kondensationsebene ein Material mit geringer kapillarer Wasseraufnahmefähigkeit ( $w < 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$ ), dann ist die Wassermasse auf 0,5 kg/m<sup>2</sup> begrenzt.

Wie die DIN 4108-3 gibt die DIN 68800-2 im Anhang A Konstruktionen vor, die nachweisfrei sind und in die Gebrauchsklasse 0 eingestuft werden (siehe Abbildung 24). Jedoch muss der vorhandene Konstruktionsaufbau identisch dem Konstruktionsaufbau im Anhang A sein.

Weiterhin ist zu beachten, dass die eingesetzten Dampfbremsen eine bauaufsichtliche Zulassung besitzen müssen.



1. ein- oder mehrlagige raumseitige Bekleidung oder Beplankung, soweit erforderlich
2. trockenes Massivholzprodukt, z. B. Brettspertholz
3. mineralischer Faserdämmstoff nach DIN EN 13162, Hartschaumplatten nach DIN EN 13163, Holz-faserdämmplatten nach DIN EN 13171 oder Dämmstoff, dessen Verwendbarkeit für diesen Anwendungsfall durch einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis nachgewiesen ist
4. äußere Beplankung soweit aus statischen Gründen erforderlich
5. wasserableitende Schicht mit  $s_d \leq 0,3 \text{ m}$
6. nicht belüfteter Hohlraum
7. dauerhaft wirksamer Wetterschutz durch kleinformatige Fassadenbauteile (z. B. Brettschalung, Schindeln, Schiefer) auf Lattung (Lattung kann GK 0 zugeordnet werden)

Abbildung 29: Nachweisfrei Konstruktion nach DIN 68800-2

Ist ein Bauteil auf beiden Seiten mit Dampfsperren versehen, dann ist eine zusätzliche rechnerische Trocknungsreserve von  $\geq 0,25 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  bei Dächern und  $\geq 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  bei Wänden und Decken nachzuweisen. Dadurch soll ein möglicher konvektiver Feuchtetransport sowie mögliche Anfangsfeuchten berücksichtigt werden. Wird der Nachweis nach DIN EN 15026 (hygrothermische Simulation) geführt, ist der konvektive Feuchteeintrag in Abhängigkeit von der geplanten Luftdurchlässigkeit  $q_{50}$ -Wert nach DIN 4108-7 [73] zu berücksichtigen. Eine rechnerische Berücksichtigung des konvektiven Feuchteeintrags und von Anfangsfeuchten ist nicht erforderlich für Konstruktionen nach Anhang A und für Bauteile mit  $s_d$ -Werten aus nachfolgender Tabelle 13.

Tabelle 13: Anforderung an  $s_d$ -Werte nach DIN 68800-2

$s_d$ -Wert außen	$s_d$ -Wert innen
$\leq 0,1 \text{ m}$	$\geq 1,0 \text{ m}$
$\leq 0,3 \text{ m}$	$\geq 2,0 \text{ m}$
$0,3 \text{ m}^a \leq s_d \leq 4,0 \text{ m}$	$6 \cdot s_d \text{ außen}^a$

Es dürfen auf der Raumseite zusätzliche Dämmschichten von max. 20 % des  $R_{\text{gesamt}}$  angeordnet werden

<sup>a</sup> Nur bei werksseitiger Vorfertigung nach Holztafelbaurichtlinie

Erfolgt eine Bewertung mittels hygrothermischer Simulation definiert die DIN 68800-2 [51] kritische Feuchtegehalte. Darüber hinaus existieren einige Angaben in der Fachliteratur [45, 74–77].

Die Bewertungskriterien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Literaturquelle	Kriterium
DIN 68800-2	Holzfeuchte von 20 M% und Materialfeuchte von Holzwerkstoffen 18 M% langfristig übersteigt (6 Monate)
WTA E-6-8	keine kontinuierliche Auffeuchtung (3-10 Jahre)

**holzerstörende Pilze:**

- Bewertung der Porenluftfeuchte einer kritischen 10 mm dicken Schicht (Tagesmittelwerte)
- gilt nur für Holz

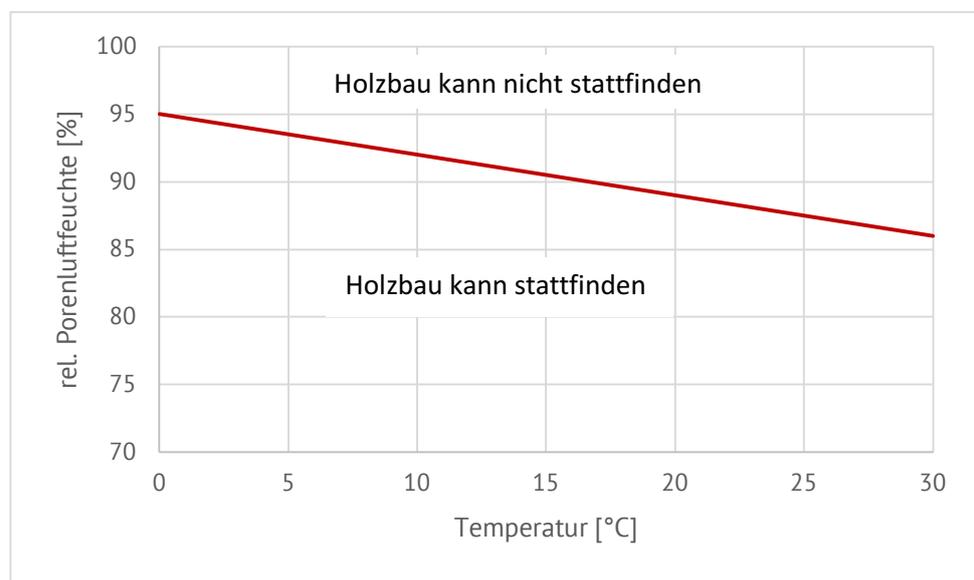


Abbildung 30: Grenzkurve der rel. Porenluftfeuchte für eine 1 cm dicke Holzschicht, nach [46]

**konstruktive Aspekte:**

- Bewertung der mittleren Holzfeuchte einer gesamten Materialschicht
- Holzfeuchte von 20 M% und Materialfeuchte von Holzwerkstoffen darf 18 M% nicht übersteigen
- kurzzeitige Auffeuchtung auf 20 M% wird toleriert, wenn die Rücktrocknung innerhalb von 3 Monaten erfolgt

WTA 6-5	<p><b>Nicht frostbeständige Materialien nach [78]:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Herstellerangaben verwenden</li> <li>• Sind keine Kennwerte vorhanden, dann gilt für nicht frostbeständige Materialien ein maximaler Sättigungsgrad von 30 %</li> <li>• Höhere Sättigungsgrade sind zulässig, wenn die relative Luftfeuchte innerhalb der Materialschicht 95 % nicht übersteigt.</li> </ul>
---------	---

#### 4.2.2 Bewertung des Wärmetransports

Es gibt verschiedene Ansätze, den Wärmestrom durch ein Bauteil zu bewerten. Für den herkömmlichen 1-dimensionalen Fall lässt sich der Wärmestrom mit einer einfachen Handrechnung bewerten. Betrachtet man Temperaturfelder an Bauteilanschlüssen, dann wird sich ein Wärmestrom in 2-dimensionaler bzw. 3-dimensionaler Richtung einstellen. Dafür ist es notwendig, den Wärmetransport mit numerischen Verfahren zu untersuchen.

Anschließend kann eine Bewertung der vorhandenen Wärmebrücke nach DIN EN ISO 10211 [79], DIN 4108 Beiblatt 2 [80] vorgenommen werden. Die DIN EN ISO 10211 stellt allgemeine Anforderungen an die geometrische Spezifikation von Wärmebrücken. Neben der Modellbildung stellt die Norm verschiedene Testfälle für die Validierung zur Verfügung.

Für eine bauphysikalische Bewertung der Wärmebrücken gibt es zwei relevante Größen. Zum einen ist die Anfälligkeit einer Konstruktion bzw. eines Bauteilanschlusses gegenüber Schimmelpilzbildung zu bewerten. Zum anderen ist das Wärmetransportverhalten der Wärmebrücke, bzw. des gestörten Bereichs gegenüber einer ungestörten Regelkonstruktion zu untersuchen.

Das Kriterium der Schimmelpilzbildung wird im vorliegenden Abschlussbericht nicht weiter behandelt.

Die erhöhten Wärmeverluste im Bereich von Wärmebrücken werden durch einen Wärmebrückenverlustkoeffizienten bestimmt. Für linienförmige Wärmebrücken wird ein längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient  $\Psi$  in W/(mK) berechnet.

$$\Psi = L^{2D} - \sum_{i=1}^n U_i * l_i$$

#### 4.3 Systembetrachtung

Auf Ebene der Systembetrachtung werden monolithische wie mehrschichtige Referenzkonstruktionen thermisch bewertet. Die Betrachtung erfolgt unter instationären Randbedingungen und Verwendung des TRY-Wetterdatensatzes 04 [70] für die Region Potsdam [70]. Im Rahmen der Systembetrachtung wird untersucht, in wie fern monolithische Bauweisen positiven Einfluss auf den Energiebedarf eines Raumes bzw. eines Gebäudes auf Grund eines etwaig besseren Wärmespeicherverhaltens haben können und in wie fern monolithische Konstruktionen eine verbesserte Behaglichkeit für den Nutzer bieten.

##### 4.3.1 Ausnutzungsgrad, Wärmeleitung, Wärmespeicherung

Zum besseren Verständnis werden eingangs grundlegende Begriffe erläutert, auf die folgend Bezug genommen wird.

Der Heizwärmebedarf nach DIN V 18599 [63] – „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen“ berechnet sich aus den Wärmesenken abzüglich des Produktes der Wärmequellen und deren Ausnutzungsgrades:

$$Q_h = Q_{\text{sink}} - \eta \cdot Q_{\text{Source}}$$

mit

$Q_h$  Heizwärmebedarf

$Q_{\text{sink}}$  Wärmesenke

$\eta$  Ausnutzungsgrad

$Q_{\text{Source}}$  Wärmequellen.

Die Wärmesenken summieren alle Verluste, die Wärmequellen alle Gewinne, die die betrachtete Zone bzw. das betrachtete Gebäude aufweist. Zu den Wärmequellen gehören alle internen und externen Gewinne, die auf die Zone bzw. das Gebäude einwirken. Zu den Wärmesenken gehören Transmissions- sowie Lüftungswärmeverluste.

Der Ausnutzungsgrad bildet hierbei einen näherungsweisen Faktor, der angibt, wie hoch der nutzbare Anteil der Wärmequellen ist. Wärmesenken und Wärmequellen schwanken über den Betrachtungszeitraum, so dass Wärmequellen in der Regel nicht in Gänze nutzbar sind. Bei der Bilanzierung gemäß DIN V 18599 [63] über den Ausnutzungsgrad handelt es sich um ein Näherungsverfahren. Mittels instationärer Simulation hingegen kann der Ausnutzungsgrad realitätsnah abgebildet werden, da hier instationär pro Zeitschritt Wärmequellen und Wärmesenken bestimmt werden. Der Ausnutzungsgrad berücksichtigt die Wärmespeicherfähigkeit, den jeweiligen Energiebedarf der Gebäudezone durch den Lüftungs- und Transmissionsverluste unter Berücksichtigung der Auskühlzeit. Relevant sind das Verhältnis von Wärmequellen zu Wärmesenken innerhalb des Berechnungszeitraumes, der jeweilige Berechnungszeitraum sowie die vom Nutzer tolerierte Schwankung der Innentemperatur. Dies bedeutet hinsichtlich der Forschungsfrage, dass der Bestimmung des Ausnutzungsgrades eine besondere Bedeutung zukommt.

In der vorliegenden Arbeit sollen verschiedene Wandkonstruktionen verglichen werden. Dies fordert die Festlegung eines U-Wertes, in dem Fall gemäß Referenzgebäude EnEV 2014 [64].

Wärmeleitung und Wärmespeicherung sind sich gegenseitig bedingende Größen. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Baustoffe weisen Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,04 und 2,3 W/(m·K), Speicherzahlen  $s$  zwischen 2,3 und 0,42 [J/(m<sup>3</sup>·K)] sowie Wärmeeindringtiefen bei einer Periodendauer von 24 h für die massiven Materialien zwischen 3 und 9 cm, bei den Dämmstoffen zwischen 6 und 8 cm auf. Wärmeleit- und Speicherfähigkeit bedingen die Wärmeeindringtiefe, die die Materialtiefe beziffert, die für die Wärmespeicherung abhängig von der betrachteten Periodendauer der einwirkenden Wärmequelle wirksam ist. Die DIN V 18599 [63] definiert die wirksame Speicherschicht mit 10 cm, bei Innenbauteilen kann maximal die Hälfte der Bauteildicke als Speicherschicht herangezogen werden.

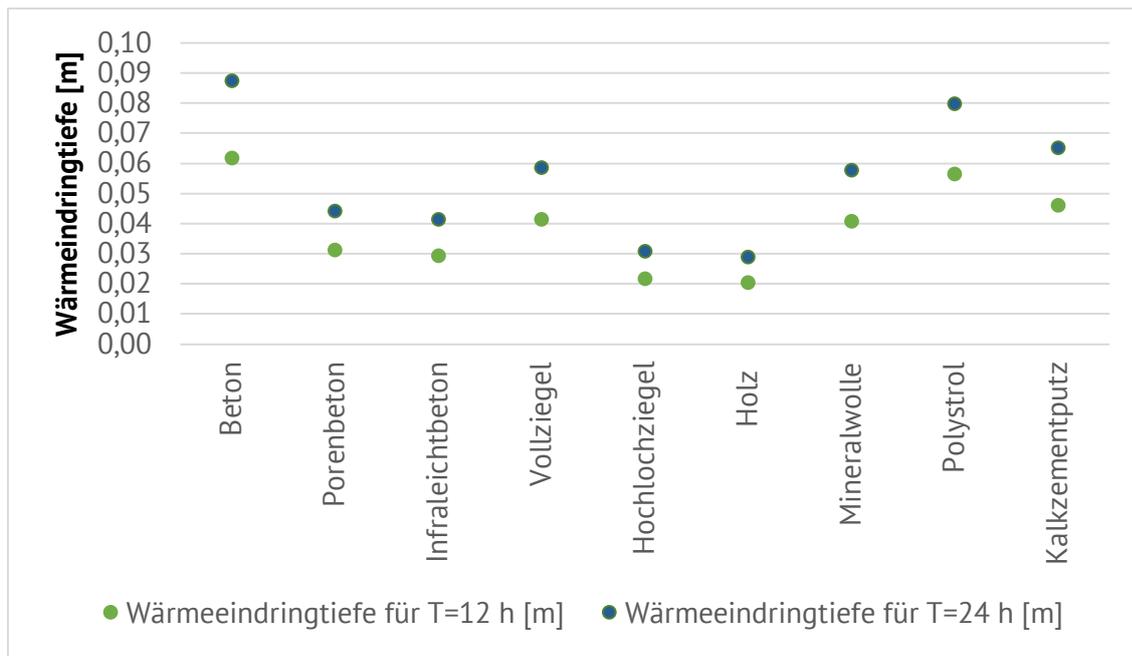


Abbildung 31: Wärmeeindringtiefe für 12- und 24-Stunden-Zyklen, Quellen der Grundlagenwerte: DIN 10456 [1], DIN 4108-4 [36], Produktkataloge [29, 37–39], Wärmeeindringtiefe: eigene Berechnungen

Die berechnete Wärmeeindringtiefe der betrachteten Baustoffe zeigt, dass 10 cm wirksame Speicherschicht bei 24-Stunden-Zyklen nicht überschritten wird, die 10 cm der DIN V 18599 demnach etwas mehr Speichermasse bezogen auf tagesgang-abhängige Lasten ansetzt.

Die Bewertung der inhomogenen Materialien wie bspw. des Hochlochziegels erfolgt im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit nicht detailliert, das heißt, dass die Struktur bspw. des Ziegels aus Kammern und Stegen nicht berücksichtigt wird. Die Materialangaben wurden bereits im Rahmen von realen Produktprüfungen messtechnisch erfasst und als Durchschnittswerte bezogen auf die jeweiligen Rahmenbedingungen der Messungen veröffentlicht, so dass die Betrachtung des Gesamtbauteils auf dieser Datenbasis generell möglich ist. Das Verhalten im Bauteil selber kann jedoch nicht abgebildet werden.

#### 4.3.2 Bewertungsmethode

Die Systembetrachtungen gliedern sich in drei Teile: in eine abstrakte Parameterstudie, eine konkrete Bauteil- sowie eine konkrete Raumstudie.

##### Abstrakte Parameterstudien

Die abstrakten Parameterstudien wurden am Einraum-Modell durchgeführt, um den Einfluss der einzelnen monolithischen Materialien auf das thermische Verhalten des dahinter liegenden Raumes zu untersuchen.

Grundlegend wurde angenommen, dass die Verluste im Modell nahezu identisch sind.  $T_{\text{außen}}$  ist in allen Modellen identisch. In den Modellen mit identischen solaren Gewinnen und identischen internen Lasten, identischen Luftwechseln ist  $T_{\text{innen}}$  nahezu gleich anzunehmen. Da der U-Wert

bei allen untersuchten Konstruktionen als konstant definiert ist, kann aus  $Q = U \cdot A \cdot \Delta T$  (Energienmenge Transmissionsverlust = U-Wert · Fläche · Temperaturdifferenz) geschlossen werden, dass die Verluste nahezu identisch sind. Abweichungen zwischen den Modellen können sich auf Grund des anzunehmenden unterschiedlichen Wärmespeicherverhaltens ergeben, das nicht in der oben genannten Formel, jedoch in der thermisch dynamischen Simulation berücksichtigt wird. In der abstrakten Parameterstudie stellt sich die Frage, welcher Anteil der verfügbaren Gewinne auf Grund der Wärmespeicherung nutzbar wird. Der Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne ist daher der Haupt-Ausgabeparameter.

Alle Parameter, die Einfluss auf den Ausnutzungsgrad haben können, wurden daher variiert, um den Einfluss abzubilden. Es ergaben sich 567 Varianten in drei Raummodellen, in denen die Bauteile, die nutzbaren Gewinne, ausgedrückt durch den Faktor  $Q_{\text{source}}/Q_{\text{sink}}$ , sowie unterschiedliche Speichermassen (Spanne von einer abstrakten 0 bis zu  $1.253 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) A_{\text{NGF}}$ ) abgebildet wurden. Die Modellvariablen sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Für die Durchführung der Simulationen wurden TRNSYS und Matlab verwendet.

Innere Lasten	+ äußere lasten	+ Bauteil	+ Material
Nutzungsprofil DIN V 18599-2 Einfamilienhaus (EFH)	Wetterdatensatz Potsdam, TRY 4, Standardfenster 1.75 m <sup>2</sup>	AW	abstraktes Vergleichsmaterial ohne Speicherkapazität
		IW	monolithischer Porenbeton, Speicherkapazität: 0.5* ρC <sub>p</sub>
		Boden	monolithischer Porenbeton, Speicherkapazität: 1* ρC <sub>p</sub>
		Decke	monolithischer Porenbeton, Speicherkapazität: 2* ρC <sub>p</sub>
Nutzungsprofil DIN V 18599-2 Mehrfamilienhaus (MFH)	Wetterdatensatz Potsdam, TRY 4, Standardfenster 3.5 m <sup>2</sup>	AW + IW	Beton + WDS,, Speicherkapazität: 0.5* ρC <sub>p</sub>
		Boden + Decke	Beton + WDV, Speicherkapazität: 1* ρC <sub>p</sub>
Nutzungsprofil DIN V 18599-2 Büro	Wetterdatensatz Potsdam, TRY 4, Standardfenster 7 m <sup>2</sup>	AW + Boden + Decke	Beton + WDV, Speicherkapazität: 2* ρC <sub>p</sub>
		IW + Boden + Decke	
		AW + IW + Boden + Decke	

Abbildung 32: Modellbildung Parameterstudie: 567 Varianten in 3 Raummodellen  
Reale Material-Raum-Studien

Die realen Modelle bestehen aus zwei Modelltypen:

- A. Einraum mit Materialvariation, Nutzung Einfamilienhaus, verschiedenen solaren Gewinnen
- B. Abbildung des Wohnhauses und Bürogebäudes mit Materialvariationen

Ziel der realen Modelle ist, alle konkreten Monolithen und Referenzkonstruktionen am konkreten Beispiel eines Wohnungsbaus und eines Bürobaus zu bewerten. Die abstrakte Parameterstudie basiert auf einer identischen Raumgeometrie. In der Simulationsreihe mit realen Raummodellen soll der Einfluss der Raumgeometrie in Abhängigkeit von der Nutzung bestimmt werden.

Innere Lasten	äußere lasten	Raummodell	Material
Nutzungsprofil DIN V 18599-2 Einfamilienhaus (EFH)	Wetterdatensatz Potsdam, TRY 4, Standardfenster 3.5 m <sup>2</sup>	Erdgeschoss, Eckraum	abstraktes Vergleichsmaterial o. Speicherkapazität
		Mittegeschoss, Eckraum	monolithischer Porenbeton
		Erdgeschoss, Mittelraum	monolithischer Infralichtbeton
		Mittelgeschoss, Mittelraum	monolithischer Hochlochziegel
			monolithisches Vollholz (Holz 100)
			Normalbeton + WDV
			Ziegel + WDV
			Vollholz + WDV

Abbildung 33: 28 Varianten in 4 Raummodellen mit [81]

Ziel ist die Bestimmung des Verhältnisses zwischen Wärmequellen zu Wärmesenken ( $\gamma$ ) in Abhängigkeit vom betrachteten Baustoff. Simuliert wurden auf Basis der DIN 13791 [66]:

1. Unteres Geschoss, Eckraum mit Bodenplattenanschluss (Ia)
2. Unteres Geschoss, Mittelraum mit Bodenplattenanschluss (Ib)
3. Mittleres Geschoss, Eckraum (IIa)
4. Mittleres Geschoss, Mittelraum (Modell IIb)

Zwei Arten von Wärmesenken definieren die Verluste einer Zone: Transmissionswärmeverluste und Lüftungswärmeverluste. Die Transmissionswärmeverluste eines Gebäudes sind abhängig von der Innentemperatur (Raumtemperatur), der Außentemperatur und dem U-Wert der Bauteile. Die Konvektionswärmeverluste sind abhängig von der Innentemperatur (Raumtemperatur), der Außentemperatur (Außenlufttemperatur oder Zuluft-Temperatur) und der Luftwechselrate. In allen Modellen weisen die Bauteile identische U-Werte auf. Da die Nutzerprofile, die Wetterdatensätze sowie die Fenstergrößen innerhalb der direkt zu vergleichenden Simulationsreihen identisch bleiben, können die Verluste durch die Bauteile als annähernd gleich angenommen werden. Das bedeutet, dass die verglichenen Modelle die annähernd gleichen Verluste aufweisen.

Jedes Gebäude weist zwei Typen von Wärmequellen auf. Die inneren Wärmequellen ergeben sich aus den gemäß DIN V 18599 nutzungsspezifisch angesetzten Nutzerwerten und den wetterdatenabhängigen, fenstergrößen- und konstruktionsbedingten Gewinnen. Mit gleichbleibenden Nutzerbedingungen, Fenstertypen und Fensterarten bleiben die internen Gewinne annähernd gleich. Die äußeren Wärmequellen resultieren aus den Wetterbedingungen und setzen sich aus Transmissions- und Konvektionsgewinnen zusammen. Bei gleichbleibenden Bedingungen bleiben die äußeren Lasten gleich. Da die Fenstergrößen und somit die solaren Gewinne, ergo die externen Lasten, im Rahmen der Simulationsreihen in drei Schritten erhöht wurden (1,75 m<sup>2</sup>, 3,5 m<sup>2</sup>, 7,0 m<sup>2</sup>), kann der Zusammenhang von verfügbarer Speichermasse und verfügbarer Energiemenge dargestellt werden. Der jeweilige Ausnutzungsgrad ist materialspezifisch variabel.

Der Einfluss der Speichermasse der einzelnen raumbegrenzenden Bauteile wird getrennt untersucht. Folgende Bauteile werden bewertet:

- Innenwand
- Außenwand
- Boden
- Decke
- Boden und Decke
- Außenwand und Innenwand
- Außenwand, Boden und Decke
- Innenwand, Boden und Decke
- Außenwand, Innenwand, Boden und Decke.

Die Randbedingungen der Nutzerprofile sowie die Materialkennwerte werden folgend dargestellt.

<b>Randbedingungen, EFH</b>			
<b>Gebäudesimulation u. hygrothermische Simulation</b>			
<b>1. konvektiver Wärmeübergangskoeffizient</b>			Bemerkung
	Innen	Außen	
	W/(m <sup>2</sup> K)		
horizontal	2.5	20.0	DIN EN ISO 6946
aufwärts	5.0	20.0	
abwärts	0.7	20.0	
<b>2. solarer Absorptionsgrad</b>			
Materialabhängig, je nach Konstruktionsaufbau zu wählen	0,4 bis 0,8		DIN V 18599-2
<b>3. langwelliger Emissionsgrad</b>			
Materialabhängig, je nach Konstruktionsaufbau zu wählen	0.8		EnEV 2016
<b>4. Luftwechsel (Infiltration)</b>			
n <sub>50</sub> ohne RLT (Infiltration)	2	1/h	DIN V 18599-2 vgl. Gleichung 59ff (S.51) Wohngebäude-DIN V 18599-10
n <sub>50</sub> mit RLT (Infiltration)	1	1/h	
Mindestluftwechsel (Fensterlüftung) n <sub>nutz</sub> nicht bedarfsgeführt	0.5	1/h	
<b>5. Nachtkühlung (Kühlperiode)</b>			
T <sub>ambient</sub> <T <sub>Raum</sub> & T <sub>Raum</sub> >23°C (6 bis 23 Uhr)	3	1/h	DIN 4108-2
T <sub>ambient</sub> <T <sub>Raum</sub> & T <sub>Raum</sub> >23°C (23 bis 6 Uhr)	2 bis 5	1/h	
<b>6. interne Wärmequellen</b>			
innere Wärmequellen (0 bis 24 Uhr)	1.88 W/(m <sup>2</sup> NGF)		DIN V 18599-10
<b>7. Innenklima / Nutzer</b>			
Raum-Solltemp	20 bis 24 °C		DIN V 18599-10
tägliche Betriebsstunden Heizung	6 bis 23	Uhr	
Temperaturabsenkung reduzierter Betr.	4 K		
<b>8. Heizlast (Heizleistung)</b>			
unbegrenzt			
<b>9. Überhitzung (Kühlperiode)</b>			
Raum-Solltemp_Max	26 °C		DIN V 18599-10
<b>10. Außenklima</b>			
	TRY Potsdam		DWD- TRY 4
<b>11. Wärmebrückenzuschlag (pauschal)</b>			
Wärmebrückenzuschlag	0.05	W/(m <sup>2</sup> K)	EnEV 2016
<b>12. Wärmedurchgangskoeffizient und Energiedurchlassgrad</b>			
Außenwand	0.28	W/(m <sup>2</sup> K)	EnEV 2016 Produktdatenblatt
Bodenplatte	0.35	W/(m <sup>2</sup> K)	
Decke	0.35	W/(m <sup>2</sup> K)	
Innenbauteil			
Fenster( Uw)	1.30	W/(m <sup>2</sup> K)	EnEV 2016
g-Wert von Fenster	0.60	-	
Rahmenanteil	0.00	%	
<b>13. Verschattungsfaktor</b>			
Heizperiode	0.1	-	EnEV 2016
Is > 300 W (Kühlperiode)	1	-	DIN 4108-2
<b>14. Temperatur</b>			
unbeheizter Dachraum	$\theta_u = \theta_i - 0.5 (\theta_i - \theta_e)$		DIN V 18599-2: vgl. Gleichung 37 (S.42)
Erdreich	Kasuda Modell		TRNSYS Typ 77

Abbildung 34: Input des Einfamilienhauses [64, 81–85, 85]

<b>Randbedingungen, MFH</b>			
<b>Gebäudesimulation u. hygrothermische Simulation</b>			
<b>1. konvektiver Wärmeübergangskoeffizient</b>			Bemerkung
	Innen	Außen	
	W/(m <sup>2</sup> K)		
horizontal	2.5	20.0	DIN EN ISO 6946
aufwärts	5.0	20.0	
abwärts	0.7	20.0	
<b>2. solarer Absorptionsgrad</b>			
Materialabhängig, je nach Konstruktionsaufbau zu wählen	0,4 bis 0,8		DIN V 18599-2
<b>3. langwelliger Emissionsgrad</b>			
Materialabhängig, je nach Konstruktionsaufbau zu wählen	0.8		EnEV 2016
<b>4. Luftwechsel (Infiltration)</b>			
n <sub>50</sub> ohne RLT (Infiltration)	2		DIN V 18599-2 vgl. Gleichung 59ff (S.51)
n <sub>50</sub> mit RLT (Infiltration)	1		
Mindestluftwechsel (Fensterlüftung) n <sub>nutz</sub> nicht bedarfsgeführt	0.5		
			Wohngebäude-DIN V 18599-10
<b>5. Nachtkühlung (Kühlperiode)</b>			
T <sub>ambient</sub> <T <sub>Raum</sub> & T <sub>Raum</sub> >23°C (6 bis 23 Uhr)	3		DIN 4108-2
T <sub>ambient</sub> <T <sub>Raum</sub> & T <sub>Raum</sub> >23°C (23 bis 6 Uhr)	2 bis 5		
<b>6. interne Wärmequellen</b>			
innere Wärmequellen (0 bis 24 Uhr)	3.75		DIN V 18599-10
			W/(m <sup>2</sup> NGF)
<b>7. Innenklima / Nutzer</b>			
Raum-Solltemp	20 bis 24		DIN V 18599-10
tägliche Betriebsstunden Heizung	6 bis 23		
Temperaturabsenkung reduzierter Betr.	4		
			K
<b>8. Heizlast (Heizleistung)</b>			
unbegrenzt			
<b>9. Überhitzung (Kühlperiode)</b>			
Raum-Solltemp_Max	26		DIN V 18599-10
			°C
<b>10. Außenklima</b>			
	TRY Potsdam		DWD- TRY 4
<b>11. Wärmebrückenzuschlag (pauschal)</b>			
Wärmebrückenzuschlag	0.05		EnEV 2016
			W/(m <sup>2</sup> K)
<b>12. Wärmedurchgangskoeffizient und Energiedurchlassgrad</b>			
Außenwand	0.28	W/(m <sup>2</sup> K)	EnEV 2016
Bodenplatte	0.35	W/(m <sup>2</sup> K)	
Decke	0.35	W/(m <sup>2</sup> K)	
Innenbauteil			Produktdatenblatt
Fenster( Uw)	1.30	W/(m <sup>2</sup> K)	EnEV 2016
g-Wert von Fenster	0.60	-	
Rahmenanteil	0.00	%	
<b>13. Verschattungsfaktor</b>			
Heizperiode	0.1	-	EnEV 2016
I <sub>s</sub> > 300 W (Kühlperiode)	1	-	DIN 4108-2
<b>14. Temperatur</b>			
unbeheizter Dachraum	$\theta_u = \theta_i - 0.5 (\theta_i - \theta_e)$		DIN V 18599-2: vgl. Gleichung 37 (S.42)
Erdreich	Kasuda Modell		TRNSYS Typ 77

Abbildung 35: Input vom Mehrfamilienhaus [81–84]

<b>Randbedingungen, Büro</b>			
<b>Gebäudesimulation u. hygrothermische Simulation</b>			
<b>1. konvektiver Wärmeübergangskoeffizient</b>			Bemerkung
	Innen	Außen	
	W/(m²K)		
horizontal	2.5	20.0	DIN EN ISO 6946
aufwärts	5.0	20.0	
abwärts	0.7	20.0	
<b>2. solarer Absorptionsgrad</b>			
Materialabhängig, je nach Konstruktionsaufbau zu wählen	0,4 bis 0,8		DIN V 18599-2
<b>3. langwelliger Emissionsgrad</b>			
Materialabhängig, je nach Konstruktionsaufbau zu wählen	0.8		EnEV 2016
<b>4. Luftwechsel (Infiltration)</b>			
n <sub>50</sub> ohne RLT (Infiltration)	2	1/h	DIN V 18599-2 vgl. Gleichung 59ff (S.51) Wohngebäude-DIN V 18599-10
n <sub>50</sub> mit RLT (Infiltration)	1	1/h	
Mindestluftwechsel (Fensterlüftung) n <sub>nutz</sub> nicht bedarfsgeführt	2	1/h	
<b>5. Nachtkühlung (Kühlperiode)</b>			
T <sub>ambient</sub> <T <sub>Raum</sub> & T <sub>Raum</sub> >23°C (7 bis 18 Uhr)	3	1/h	DIN 4108-2
T <sub>ambient</sub> <T <sub>Raum</sub> & T <sub>Raum</sub> >23°C (18 bis 7 Uhr)	2 bis 5	1/h	
<b>6. interne Wärmequellen</b>			
innere Wärmequellen (07bis 18 Uhr während der Woche)	13.54	W/(m²NGF)	DIN V 18599-10
<b>7. Innenklima / Nutzer</b>			
Raum-Solltemp	21 bis 26	°C	DIN V 18599-10
tägliche Betriebsstunden Heizung	5 bis 18	Uhr	
Temperaturabsenkung reduzierter Betr.	4	K	
<b>8. Heizlast (Heizleistung)</b>			
unbegrenzt			
<b>9. Überhitzung (Kühlperiode)</b>			
Raum-Solltemp_Max	26	°C	DIN V 18599-10
<b>10. Außenklima</b>			
	TRY Potsdam		DWD- TRY 4
<b>11. Wärmebrückenzuschlag (pauschal)</b>			
Wärmebrückenzuschlag	0.05	W/(m²K)	EnEV 2016
<b>12. Wärmedurchgangskoeffizient und Energiedurchlassgrad</b>			
Außenwand	0.28	W/(m²K)	EnEV 2016 Produktdatenblatt
Bodenplatte	0.35	W/(m²K)	
Decke	0.35	W/(m²K)	
Innenbauteil			
Fenster( Uw)	1.30	W/(m²K)	EnEV 2016
g-Wert von Fenster	0.60	-	
Rahmenanteil	0.00	%	
<b>13. Verschattungsfaktor</b>			
Heizperiode	0.1	-	EnEV 2016
Is > 200 W (Kühlperiode)	1	-	DIN 4108-2
<b>14. Temperatur</b>			
unbeheizter Dachraum	$\theta_u = \theta_i - 0.5 (\theta_i - \theta_e)$		DIN V 18599-2: vgl. Gleichung 37 (S.42)
Erdreich	Kasuda Modell		TRNSYS Typ 77

Abbildung 36: Input Büro [81–84]

			Aufbau	Gesamtdicke [m]	Schicht	d [m]	λ [W/mK]	C <sub>p</sub> [kJ/kgK]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]			
Beton	Außenwand (AW)	Porenbeton	monolitisch	0.333	Putz_innen	0.015	0.6	1	1000	0.280			
					Porenbeton	0.303	0.09	1	350				
					Putz_aussen	0.015	1	1	1800				
		Infrabeton		0.639	Putz_innen	0.015	0.6	1	1000		0.280		
					Infraleichtbeton	0.609	0.181	1	800				
					Putz_aussen	0.015	1	1	1800				
	Normalbeton	Referenz	0.389	Gipsputz	0.01	0.51	1	1200	0.280				
				Beton	0.25	2.3	1	2300					
				Daemung_WLG035	0.114	0.035	1.25	25					
	Innenwand (IW)	Porenbeton	monolitisch	0.115	Porenbeton	0.115	0.09	1	350	0.691			
					Infraleichtbeton	0.115	Infraleichtbeton	0.115	0.181		1	800	1.242
							Normalbeton	Referenz	0.115		Beton	0.115	
	Boden (B)		monolitisch & Referenz	0.49	Bodenbelag	0.02				0.17	1	1000	0.362
					Estrich	0.05	1.4	1	2000				
					Daemung_WLG035	0.08	0.035	1.25	25				
					Beton	0.3	2.3	1	2300				
Magerbeton					0.04	1.6	1	2000					
Decke (D)		monolitisch & Referenz	0.35	Bodenbelag	0.02	0.17	1	1000	0.469				
				Estrich	0.05	1.4	1	2000					
				Daemung_WLG035	0.06	0.035	1.25	25					
				Beton	0.22	2.3	1	2300					
Holz	Außenwand (AW)	Vollholz	monolitisch	0.21	Holz_mono	0.186	0.079	1.6	450	0.280			
					Lüftschicht	R= 0.09 [m <sup>2</sup> K/W]							
					Schallung	0.024	0.13	1.4	600				
		Vollholz		Referenz	0.196	Gipsfaserplatte	0.013	0.25	1		1000	0.280	
						Holz_Referenz	0.095	0.09	2.1		500		
						Daemung_WLG035	0.08	0.035	1.25		25		
	Innenwand (IW)	Vollholz	monolitisch	0.12	Holz_mono	0.12	0.079	1.6	450	0.592			
					Holz_Referenz	0.12	0.09	2.1	500		0.665		
	Boden (B)		monolitisch & Referenz	0.49	Bodenbelag	0.02	0.17	1	1000	0.362			
					Estrich	0.05	1.4	1	2000				
					Daemung_WLG035	0.08	0.035	1.25	25				
					Beton	0.3	2.3	1	2300				
Magerbeton					0.04	1.6	1	2000					
Decke (D)		monolitisch & Referenz	0.387	Bodenbelag	0.02	0.17	1	1000	0.199				
				Estrich	0.06	1.4	1	2000					
				Daemung_WLG035	0.035	0.035	1.25	25					
				Schüttung	0.06	0.06	1.6	200					
				Holz_mono	0.212	0.079	1.6	450					
Ziegel	Außenwand (AW)	Hochlochziegel	monolitisch	0.282	Gipsputz	0.015	0.51	1	1200	0.280			
					Ziegel_mono	0.252	0.075	1	600				
					Putz_außen	0.015	1	1	1800				
		Hochlochziegel		Referenz	0.371	Putz_innen	0.015	0.6	1		1000	0.280	
						Ziegel_Referenz	0.24	0.42	1		1100		
						Daemung_WLG035	0.096	0.035	1.25		25		
	Innenwand (IW)	Hochlochziegel	monolitisch	0.115	Ziegel_mono	0.115	0.075	1	600	0.587			
					Hochlochziegel	Referenz	0.115	Ziegel_Referenz	0.115		0.42	1	1100
	Boden (B)		monolitisch & Referenz	0.49	Bodenbelag	0.02	0.17	1	1000	0.362			
					Estrich	0.05	1.4	1	2000				
					Daemung_WLG035	0.08	0.035	1.25	25				
					Beton	0.3	2.3	1	2300				
Magerbeton					0.04	1.6	1	2000					
Decke (D)		monolitisch & Referenz	0.35	Bodenbelag	0.02	0.17	1	1000	0.469				
				Estrich	0.05	1.4	1	2000					
				Daemung_WLG035	0.06	0.035	1.25	25					
				Beton	0.22	2.3	1	2300					

Abbildung 37: Input Materialkombinationen im Raum- und Gebäudemodell

### 4.3.3 Bewertungskriterien

In Modellvarianten werden verschiedene Outputs ausgegeben wie bspw. Raumlufttemperatur, Oberflächentemperaturen, operative Temperatur des Raumes, Heizwärmebedarf. Die Speicherzyklen, Überhitzungsstundenanzahl, Wärmesenken, Wärmequellen, Ausnutzungsgrad der Wärmequellen während der Heizperiode werden auf Basis der Outputs ermittelt. Ziel ist die Darstellung des Einflusses monolithischer Wandaufbauten auf die Behaglichkeit und den Ausnutzungsgrad der Wärmequelle, schlussendlich auf den Heizwärmebedarf.

## 4.4 Ergebnisse / Zusammenfassung AP 3

### 4.4.1 Bauteilbetrachtung - Hygrothermische Bewertung

#### 4.4.1.1 Einschwingverhalten

Langfristig muss sichergestellt werden, dass eine Konstruktion kein Wasser ansammelt und in einen eingeschwungenen (quasi-stationären) Zustand übergeht. Wie schnell eine Konstruktion den quasi-stationären Zustand erreicht, ist hauptsächlich von den äußeren Einflüssen und von den Materialeigenschaften (Masse und Diffusionseigenschaften) abhängig. Leichte Konstruktionen mit diffusionsoffenen Materialien reagieren im Allgemeinen schneller als massive, diffusionsdichte Konstruktionen. Ein eingeschwungener Zustand liegt vor, wenn der Gesamtwassergehalt bzw. die integrale Feuchtemasse sich unter jährlich wiederkehrenden Klimadaten, bezogen auf das Vorjahrsmittel weniger als 1 % ändert [69]. Als Startwerte werden für alle Materialien 20 °C und 80 % relative Luftfeuchte angenommen. Mit der integralen Feuchtemasse kann das Einschwingverhalten von Konstruktion bewertet werden. Sie ist die Integration des Wassergehaltes über alle Bauteilschichten und bildet damit die gesamte Feuchtemasse des Bauteils ab.

Das Einschwingverhalten einer 36 cm dicken Hochlochziegelkonstruktion (HLZ-36,5 cm) ist in Abbildung 29 dargestellt. Nach vier Jahren beträgt die Änderung des Jahresmittelwerts der Gesamtfuchte weniger als 1 %. Ab diesem Zeitpunkt kann von einem eingeschwungenen Zustand ausgegangen werden.

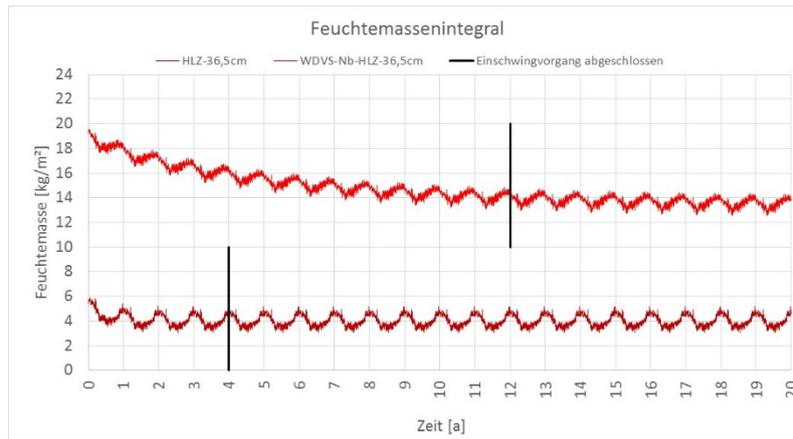


Abbildung 38: Vergleich Einschwingdauer HLZ und WDVS-Nb-HLZ 36,5 cm

Betrachtet man die Referenzwand aus Normalbeton mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS-Nb-HLZ-36,5 cm), dann wird eine deutlich längere Einschwingphase sichtbar (siehe Abbildung 30). Das liegt vor allem an der Speicherfähigkeit der Normalbetons und an dem Diffusionswiderstand der Dämmung. Die beiden Materialeigenschaften führen dazu, dass das Bauteil erst nach 12 Jahren als eingeschwungen bezeichnet werden kann.

Tabelle 14 zeigt die Einschwingdauern für die Hochlochziegelkonstruktionen. Für alle Konstruktionsaufbauten kann bezogen auf die Ausgangsfeuchte eine Entfeuchtung festgestellt werden. Der Unterschied zwischen der Grundkonstruktion (HLZ) und der Referenzkonstruktion (HLZ + WDVS) ist nur sehr gering. Die geringeren Einschwingdauern lassen sich mit der geringen Feuchtespeicherung des Hochlochziegels erklären. Da die Referenzkonstruktion dünner als die Grundkonstruktion ist, ist auch die gespeicherte Wassermenge geringer. Dies wird teilweise durch das relativ dampfdichte WDVS kompensiert. Eine Reduzierung der Materialdicke hat demzufolge einen größeren Einfluss auf das Austrocknungsverhalten als das Aufbringen eines WDVS. Dieses Verhalten ist jedoch stark von der Dicke und dem Diffusionswiderstand der Dämmung abhängig.

Vergleichend dazu ergeben sich für die Referenzkonstruktion aus Normalbeton in Tabelle 13 sehr große Einschwingdauern von 12 bis 13 Jahren. Der entscheidende Einfluss kommt vom Material Normalbeton. Die beiden Konstruktionsaufbauten HLZ + WDVS und Normalbeton + WDVS unterscheiden sich im Material und der Dicke des Dämmstoffs. Da der Unterschied in der Dicke des Dämmstoffs der beiden Varianten nur 1,5 cm beträgt, wird die Zunahme der Einschwingdauer nur vom unterschiedlichen Material (Hochlochziegel bzw. Normalbeton) und dessen Feuchtespeichervermögen bestimmt.

Tabelle 14: Einschwingdauern von Hochlochziegelkonstruktionen

Dicke [cm]	Einschwingdauer		
	Änderung der mittleren Feuchtemasse zum Vorjahr $\leq 1\%$		
	[a]		
	HLZ	HLZ + WDVS	Normalbeton + WDVS
36,5	4	3	12
45	5	3	12
55	6	3	13
76	8	3	13

In Abbildung 30 sind die Einschwingdauern aller untersuchten Konstruktionen für alle untersuchten Dicken dargestellt. Grundsätzlich lässt sich für alle Materialien feststellen, dass die Einschwingdauer der Referenzkonstruktion aus Normalbeton mit WDVS länger ist als bei den jeweiligen Grundkonstruktionen. Vergleichend zu Tabelle 13 stammt die längere Einschwingdauer vorrangig aus dem verwendeten Material.

Der Normalbeton besitzt für alle Konstruktionen die gleiche Dicke. Nur die Dicke des Dämmstoffs ist für die jeweiligen Konstruktionen (Normalbeton + WDVS (Holz), Normalbeton + WDVS (Porenbeton), Normalbeton + WDVS (Lehm)) unterschiedlich (siehe Tabelle 26, Tabelle 32, Tabelle 38). Damit kann ein signifikanter Einfluss der Dämmung auf die Einschwingdauer ausgeschlossen werden.

Besonders auffällig ist das Verhalten der monolithischen Porenbetonwände. Diese erfahren als einzige Konstruktion eine Auffeuchtung im Vergleich zur Ausgangssituation. Mit zunehmender Dicke erhöht sich die Einschwingdauer der Porenwand und des Hochlochziegels. Hingegen bleiben die Einschwingdauern der Holz- und Lehmkonstruktionen annähernd konstant.

Wird die Holzkonstruktion mit einem Wärmedämmverbundsystem (Referenzkonstruktion WDVS-Holz) ausgeführt, dann ergeben sich deutlich höhere Einschwingdauern als ohne Dämmstoff. Hauptsächlich liegt es am  $\mu$ -Wert ( $\mu = 96$ ) des Dämmstoffes und dem hohen  $\mu$ -Wert des Holzes ( $\mu = 73$ ). Dadurch wird nicht nur die Diffusion nach Außen sondern auch nach Innen behindert. Das Verhalten trifft ebenfalls für die Normalbetonkonstruktion (WDVS-Nb-Holz) mit einem  $\mu$ -Wert = 76 zu.

Wird ein Material mit geringem  $\mu$ -Wert, z.B. Hochlochziegel ( $\mu = 18,8$ ), Porenbeton ( $\mu = 7$ ) oder Lehm ( $\mu = 8,8$ ) gewählt, dann ist der Einfluss einer zusätzlichen Dämmschicht viel geringer.

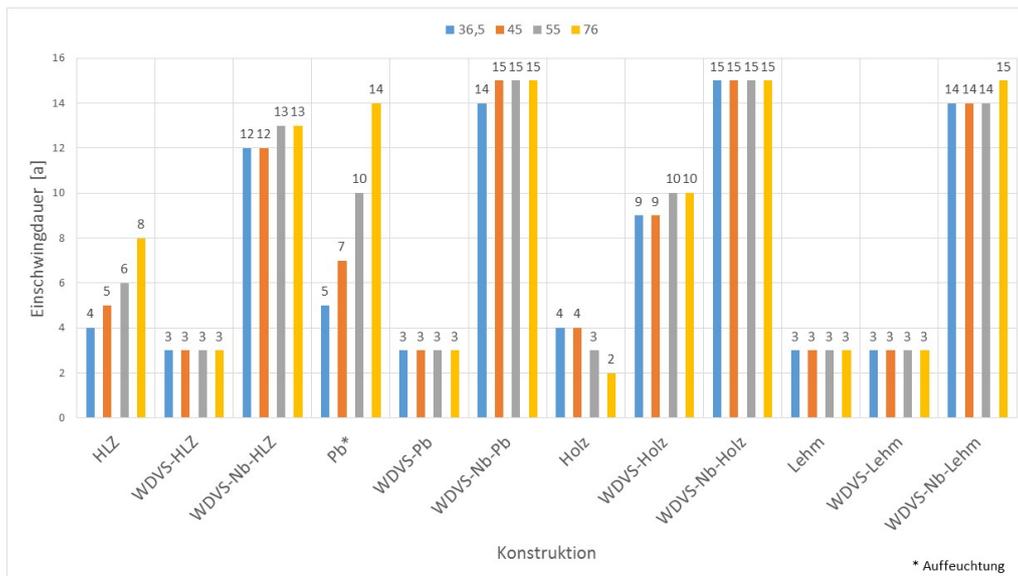


Abbildung 39: Einschwingdauern der Holz-, Porenbeton- und Lehmkonstruktionen für die Dicken von 36,5 cm, 45 cm, 55 cm und 76 cm; positiv Entfeuchtung

### Fazit:

Die Einschwingdauer ist vorrangig vom  $\mu$ -Wert des tragenden Baustoffs abhängig. Der Feuchtegehalt des Baustoffes bewegt sich während der Nutzung überwiegend im hygroskopischen Bereich. Dabei ist der Hauptfeuchtetransportmechanismus die Diffusion und die Diffusionsvorgänge sind wiederum von der Materialeigenschaft  $\mu$  abhängig.

Die Einschwingdauer einer monolithischen Konstruktion ist stark vom Feuchtespeichervermögen und -transportfähigkeiten abhängig. Die Grundkonstruktion aus Hochlochziegel und Porenbeton haben eine längere Einschwingdauer als die dazugehörige Referenzkonstruktion. Für die anderen Materialien ist die Einschwingdauer der Grundkonstruktionen geringer.

#### 4.4.1.2 Holzfeuchte

Nachdem im vorangegangenen Kapitel der Gesamtwassergehalt der Konstruktion über einen längeren Zeitraum bewertet und damit eine allgemeine Aussage über das Feuchteverhalten des gesamten Bauteils getroffen wurde, müssen weiterführend noch die einzelnen Materialschichten untersucht werden. Denn es kann materialbedingt zu lokalen Überschreitungen von Grenzwerten kommen. Besonderes Augenmerk liegt auf den feuchteempfindlichen Holzkonstruktionen.

Eine Holzkonstruktion ist auf zwei Kriterien zu überprüfen:

1. Beurteilung gegenüber holzerstörender Pilze
2. Beurteilung von konstruktiven Aspekten

Die Bewertung bezüglich holzerstörender Pilze ist nur für die kritischen 10 mm (gelber Bereich in Abbildung 32) von Konstruktionsvollholz, Vollholzprodukte, Dreischichtplatten, Brettschichtholz und Massivholzlatten zu führen (siehe 4.2.1).

Für alle anderen Holzbauteile müssen die konstruktiven Anforderungen erfüllt werden, wie z.B. die Holzweichfaserdämmplatte (siehe brauner Bereich in Abbildung 31). Das entscheidende Kriterium hierfür ist die massenbezogene Holzfeuchte (siehe 4.2.1).

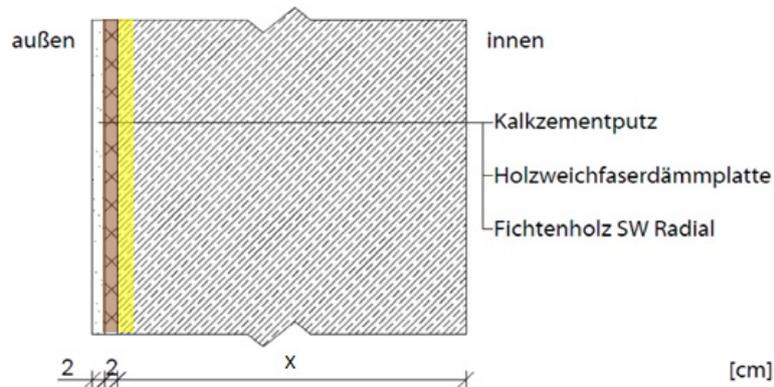


Abbildung 40: Untersucher Bereich für die Bewertung der Holzfeuchte

Eine Auswertung hinsichtlich der beschriebenen Kriterien ist den nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen.

Für eine 36,5 cm dicke Holzkonstruktion mit einer 2 cm Holzweichfaserplatte als Putzträger sind die Tagesmittelwerte der Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm im eingeschwungenen Jahr als unbedenklich einzustufen (vgl. Abbildung 32).

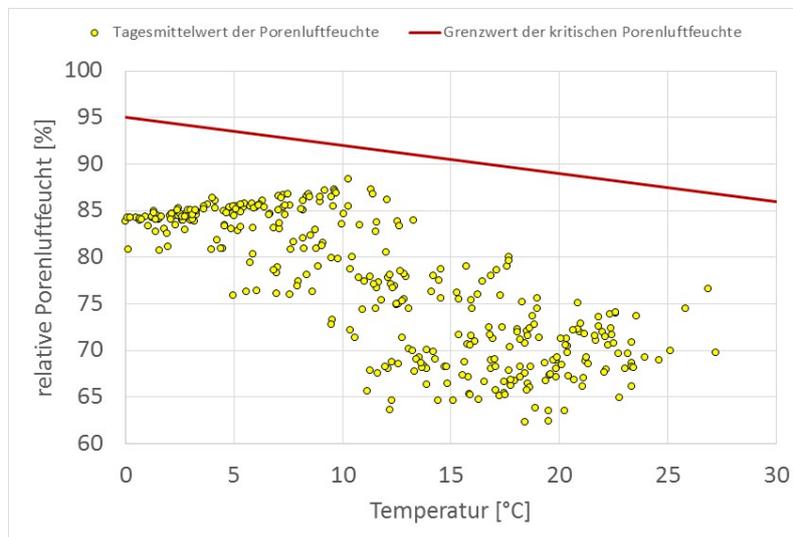


Abbildung 41: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 36,5 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion)

Für alle anderen Holzwerkstoffe, die nicht aus Holz, Brettschichtholz oder Dreischichtplatten bestehen, gilt als kritischer Feuchtegehalt 18 M-%. Nach WTA kann eine kurzzeitige Anfeuchtung bis 20 M-% im ersten Jahr toleriert werden, wenn es in den ersten drei Monaten des Betrachtungszeitraums wieder abtrocknet [46]. In Abbildung 34 ist der Feuchtegehalt im Tagesmittelwert über 20 Jahre für die 2 cm dicke Holzfaserdämmung dargestellt (brauner Bereich

in Abbildung 32). Die Konstruktion muss demnach als kritisch eingestuft werden. Jedoch sind in die Grenzwerte mit einigen Sicherheiten beaufschlagt, sodass die Konstruktion in den meisten Fällen ohne Schäden auskommen wird.

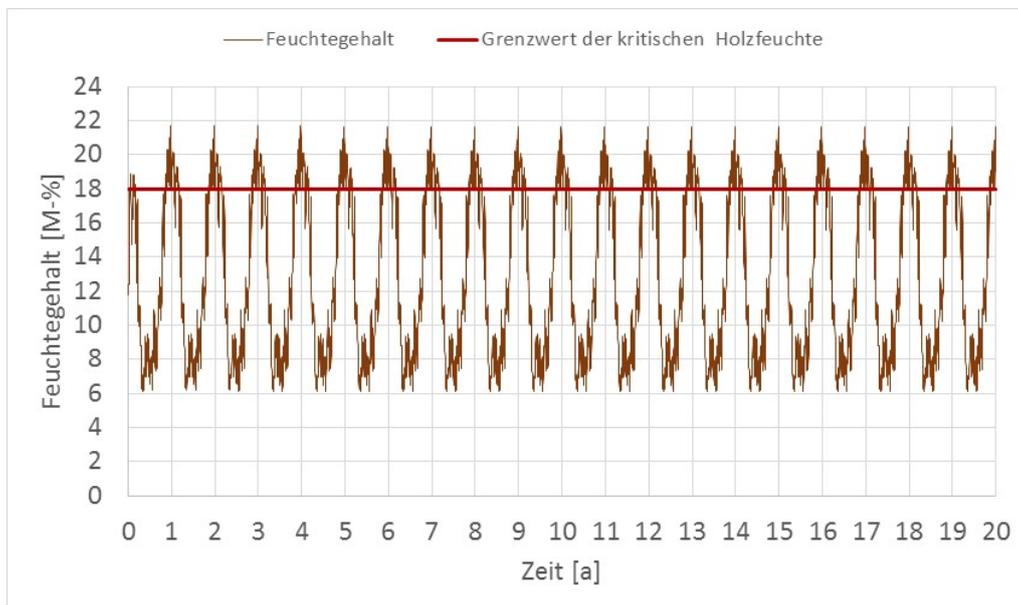


Abbildung 42: Feuchtegehalt der Holzfaserdämmung; 36,5 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion)

In weiterführenden Simulationen wurde die Außenwanddicke der Grundkonstruktion variiert. Dabei stellte sich heraus, dass mit zunehmender Dicke der monolithischen Grundkonstruktion die Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm und der Feuchtegehalt der Holzfaserdämmung ansteigt (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 33 mit Abbildung 34 und Abbildung 35).

In Abbildung 34 ist die Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm einer 76 cm dicken Holzkonstruktion dargestellt. Im Vergleich zur 36,5 cm Holzkonstruktion (Abbildung 16) ist ein Anstieg der Porenluftfeuchte festzustellen. Da die Grenzwerte nicht überschritten werden, sind keine Schäden am Bauteil zu erwarten.

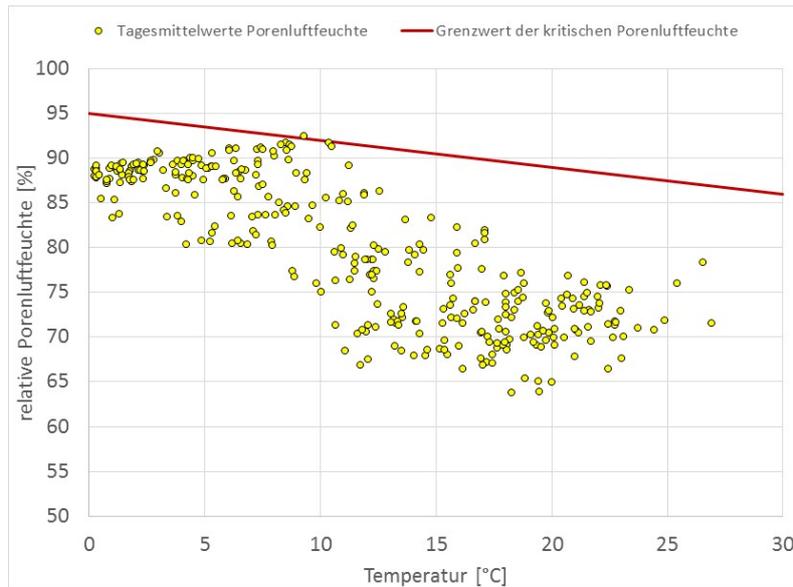


Abbildung 43: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 76 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion)

Betrachtet man den Feuchtegehalt der 2 cm dicken Holzfaserdämmung vor dem 76 cm dicken Holz (brauner Bereich in Abbildung 32), dann wird eine noch stärkere Überschreitung der 18 M-% Grenze deutlich, als es für die 36,5 cm dicke Holzwand der Fall ist (vgl. Abbildung 34 mit Abbildung 36). An dieser Stelle könnte mit Feuchteansammlungen zu rechnen sein, die das Bauteil auf Dauer schädigen könnten.

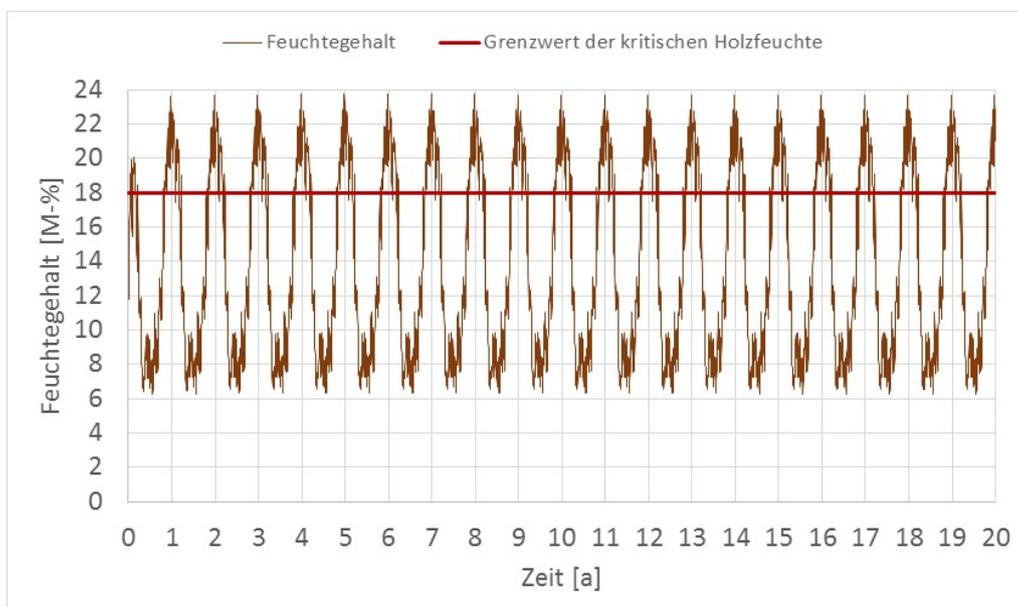


Abbildung 44: Feuchtegehalt der Holzfaserdämmung; 76 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion)

Zu jeder Grundkonstruktion wird die Referenzkonstruktion mit identischem Material der tragenden Schicht simuliert. Für die Holzkonstruktion entspricht das einer 20 cm dicken Schicht

aus Holz mit einem WDVS aus Polystyrol. Der U-Wert der Grund- und Referenzkonstruktion ist identisch. Die nachfolgende Abbildung 36 zeigt die Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm der Holzkonstruktion (Referenzkonstruktion Holz). Ein Vergleich mit der Grundkonstruktion zeigt deutlich niedrigere Porenluftfeuchten der kritischen 10 mm (vgl. Abbildung 32). Der Einfluss ist mit den höheren Temperaturen in den 10 mm des Holzes zu erklären. Während die Grundkonstruktion eine 2 cm dicke Putzträgerplatte aus Holzfasern besitzt, wird auf die Referenzkonstruktion eine Polystyrolämmung aufgebracht.

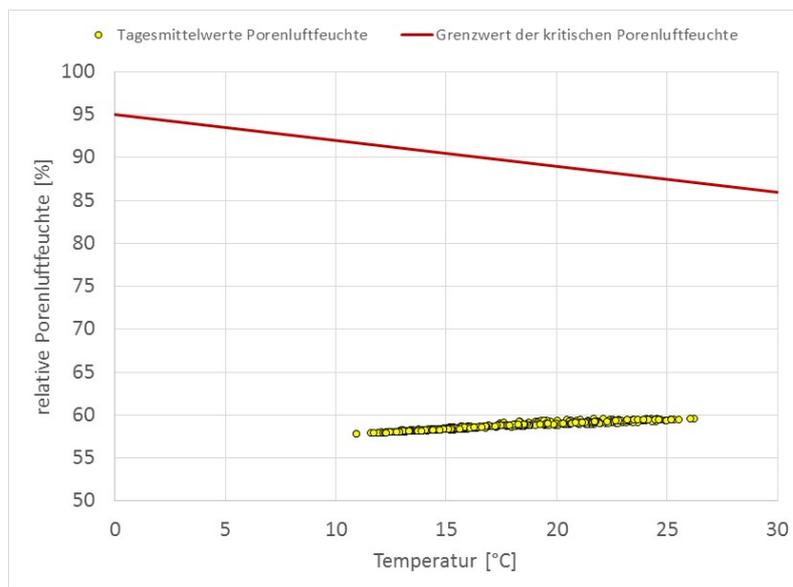


Abbildung 45: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 36,5 cm Referenzkonstruktion Holz + Polystyrolämmung

### Zwischenfazit:

Mit zunehmender Dicke der Holzkonstruktion steigt die Porenluftfeuchte in den kritischen 10 mm an. Der Grenzwert wird für die 76 cm Holzkonstruktion nur geringfügig überschritten und kann als tolerierbar eingestuft werden. Der Feuchtegehalt der Holzfaserdämmung nimmt ebenfalls mit zunehmender Dicke der Holzkonstruktion zu. Jedoch ist bereits für die 36,5 cm Holzwand die kritische Feuchte (18 M-%) überschritten. Besonders Konstruktionsdicken ab 55 cm Holz sind als bedenklich einzustufen.

Betrachtet man hingegen die Referenzkonstruktion aus Holz (20 cm Holz + WDVS aus Polystyrol) zeigen sich deutlich geringere Porenluftfeuchten in den kritischen 10 mm. Das Kriterium eines maximalen Feuchtegehaltes von 18 M-% gilt nicht für synthetische Dämmstoffe.

Mit zusätzlichen Simulationsrechnungen soll der Einfluss des Dämmstoffes auf den Feuchtegehalt untersucht werden. Die Grundkonstruktion aus Holz besitzt als Putzträgerplatte eine 2 cm Holzfaserdämmplatte. Wird diese Holzfaserdämmung durch Polystyrol ersetzt, führt es zu einer Entspannung im Bereich der kritischen 10 mm Konstruktion (vgl. Abbildung 37 und Abbildung 38).

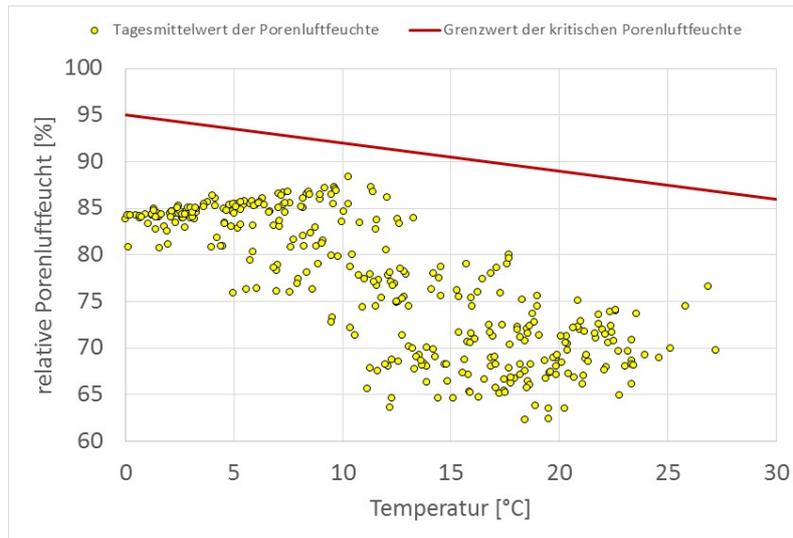


Abbildung 46: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 36,5 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion)

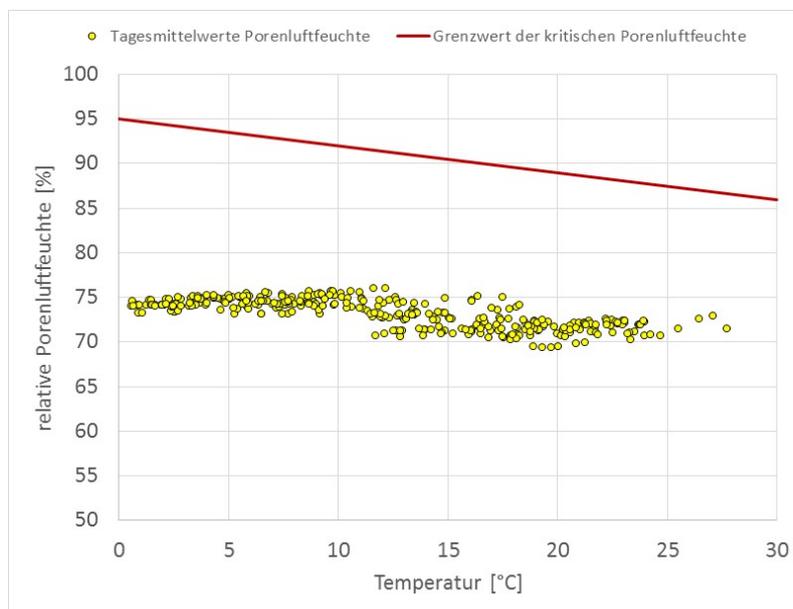


Abbildung 47: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 36,5 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion mit Polystyrol)

Eine Ursache ist die Sorptionsisotherme der Dämmstoffe (siehe Anhang 9.4). Die Holzfaserdämmung besitzt im hygroskopischen Bereich höhere Wassergehalte als Polystyrol bei gleicher relativer Luftfeuchte. Dadurch ist der absolute Wassergehalt der Holzfaserdämmung höher als bei der Polystyrolämmung (siehe Abbildung 39).

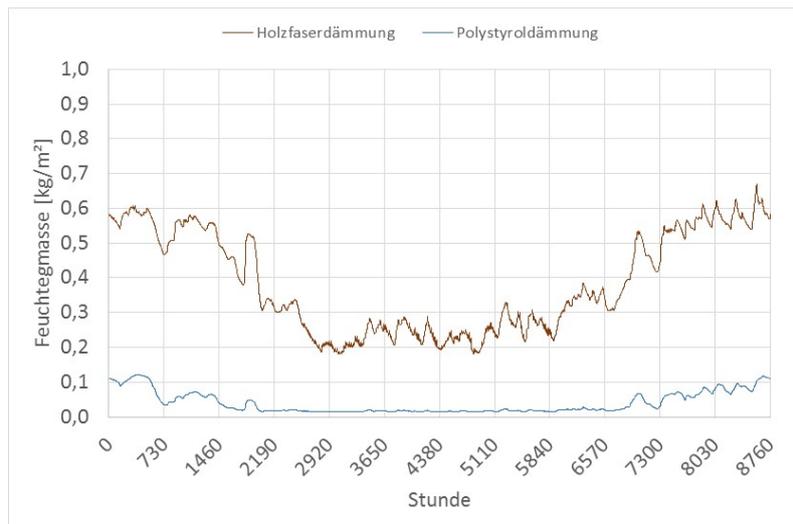


Abbildung 48: Vergleich der Feuchtemassenverläufe im eingeschwungenen Zustand von Holzfaser- und Polystyrolämmung

Durch den direkten Kontakt zwischen Dämmstoff und Holz findet ein Feuchtetransport (Ausgleich) zwischen den beiden Materialien statt. Was wiederum dazu führt, dass der Feuchtegehalt in Holz bei direktem Kontakt mit einer Holzfaserdämmung höher liegt als bei einer Polystyrolämmung.

#### Fazit:

Neben der Dicke der Holzkonstruktion hat die Wahl des Dämmstoffes einen entscheidenden Einfluss auf die Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm. Maßgeblich wird das Verhalten von der Feuchtespeicherfähigkeit des Dämmstoffes beeinflusst. Vergleicht man die Grundkonstruktion, welche die monolithische Variante abbildet, mit den Referenzkonstruktionen aus Holz, lässt sich feststellen, dass die Referenzkonstruktionen viel weniger anfällig gegenüber Feuchteproblemen sind als die monolithische Holzkonstruktion (Grundkonstruktion). Weitere Aspekte, wie die Leckageanfälligkeit der Holzkonstruktionen wurden nicht untersucht. Da kann unter Umständen die Wahl des Dämmstoffes als Putzträgerplatte einen anderen Einfluss liefern.

#### 4.4.1.3 Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit

Die Simulation des Wärmestroms durch ein Bauteil erfolgt mit feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten. Exemplarisch ist die Wärmeleitfähigkeit des Hochlochziegels und des Porenbetons dargestellt (siehe Abbildung 41). Die Wärmeleitfähigkeiten der beiden Stoffe besitzen den gleichen Anstieg. Sie unterscheiden sich nur durch die Wärmeleitfähigkeit im trockenen Zustand.

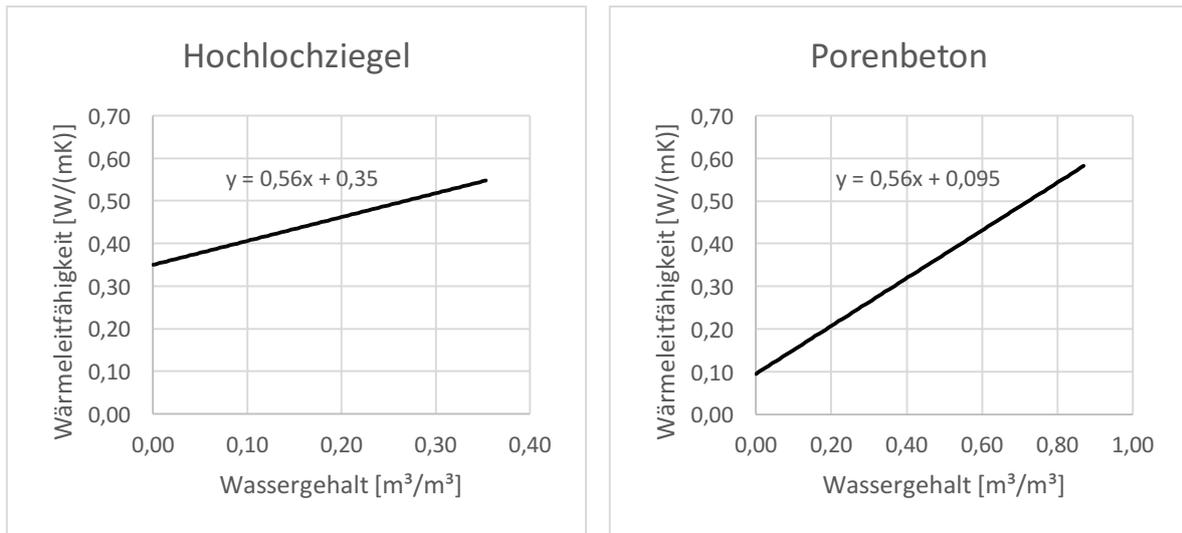


Abbildung 49: feuchtabhängige Wärmeleitfähigkeit; links Hochlochziegel, rechts Porenbeton

Alle weiteren feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten sind Anhang 9.3 zu entnehmen.

Anhand eines Beispiels wird die Änderung der Wärmeleitfähigkeit für die untersuchten monolithischen Konstruktionen gegenübergestellt.

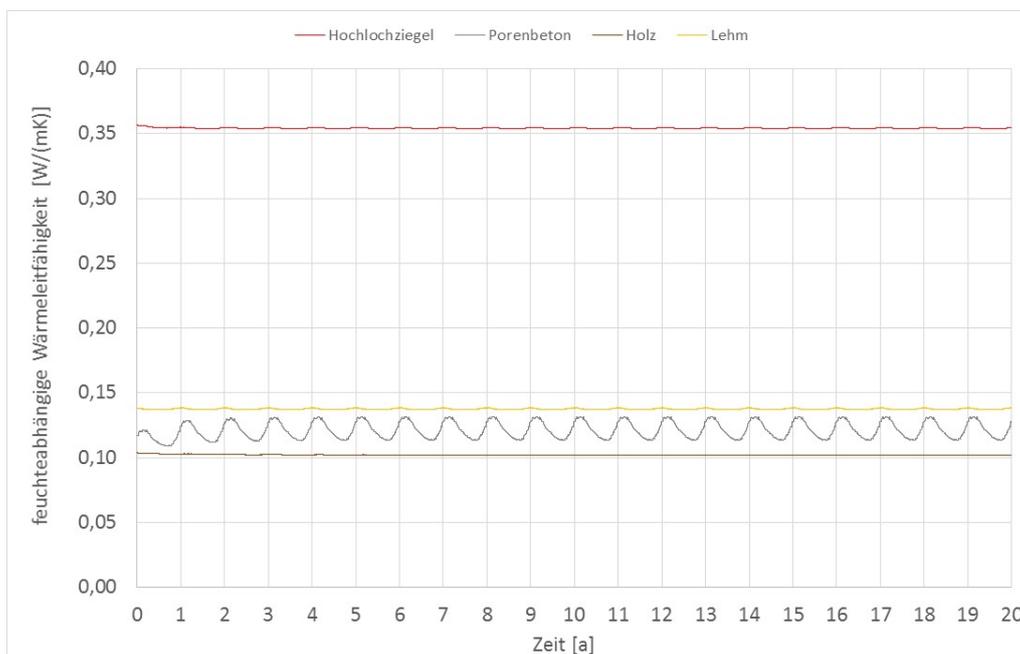


Abbildung 50: 20 jähriger Verlauf der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Grundkonstruktionen

Das Diagramm (siehe Abbildung 42) verdeutlicht die Schwankungsbereiche der Wärmeleitfähigkeit der Materialien. Die Schwankung bezieht sich auf den über die Dicke gemittelten Feuchtegehalt des monolithischen Baustoffs (Hochlochziegel, Porenbeton, Holz, Lehm). Wie deutlich zu erkennen ist, weist der Porenbeton die größte Amplitude auf.

Tabelle 15: feuchtabhängige Wärmeleitfähigkeit - Merkmale von 36,5 cm dicken monolithischen Wänden

Merkmal	Hochlochziegel	Porenbeton	Holz	Lehm
$\lambda_{\text{trocken}}$ [W/(mK)]	0,350	0,095	0,086	0,136
$\lambda_{\text{mittel}}$ [W/(mK)]	0,354	0,1211	0,102	0,1375
Amplitude	0,0028	0,023	0,0023	0,0018

Dieses Verhalten ist auf den Feuchtegehalt des Porenbetons zurückzuführen. Dieser ist höher und schwankt im Laufe eines Jahres stärker als der des Hochlochziegels (siehe Abbildung 42). Damit ergeben sich größere Schwankungen der Wärmeströme.

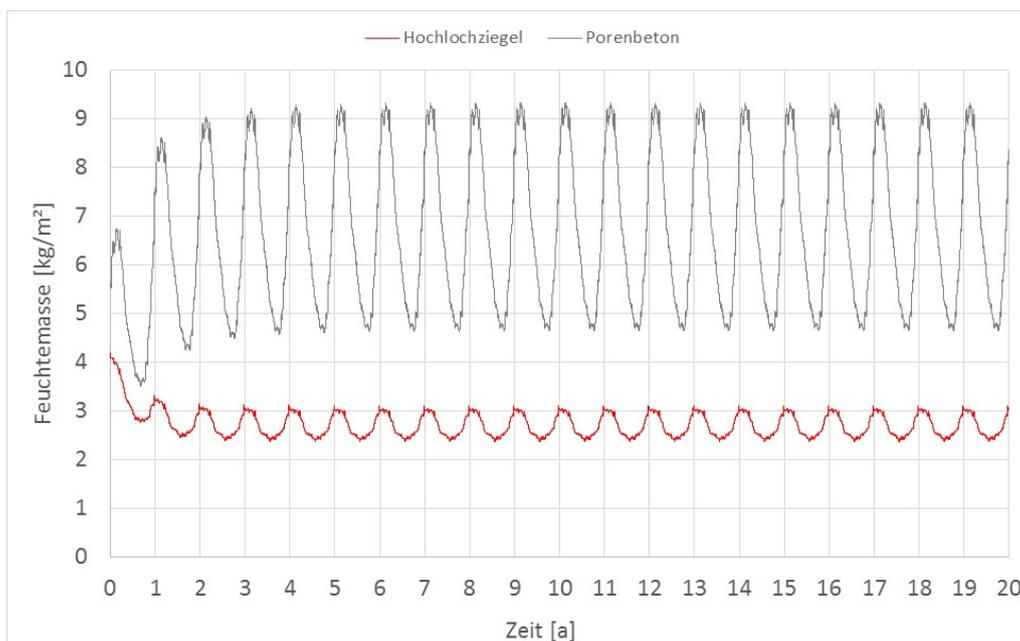


Abbildung 51: Feuchtemasse Hochlochziegel und Porenbeton 36,5 cm

In Abbildung 44 ist der Verlauf der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit für die tragende Schicht der Referenzkonstruktionen abgebildet. Durch das aufgebrauchte WDVS wird zum einen die Temperatur der tragenden Schicht erhöht und zum anderen findet eine Entkopplung der Tragkonstruktion vom Außenklima statt. Damit ist der Feuchtehaushalt der tragenden Schichten ausgeglichener.

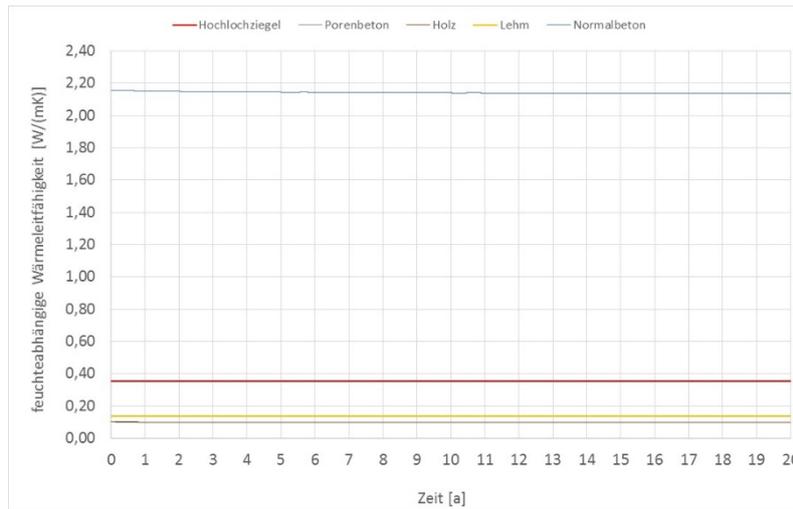


Abbildung 52: 20jähriger Verlauf der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Referenzkonstruktionen

Die deutliche Reduzierung der Amplitude des Porenbetons verdeutlicht nochmals den Einfluss des WDVS (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit - Merkmale der Referenzkonstruktionen

Merkmal	Hochlochziegel	Porenbeton	Holz	Lehm	Normalbeton
$\lambda_{\text{trocken}}$ [W/(mK)]	0,350	0,095	0,086	0,136	2,1
$\lambda_{\text{mittel}}$ [W/(mK)]	0,353	0,099	0,099	0,137	2,143
Amplitude	0,0034	0,0045	0,005	0,0010	0,019

**Fazit:**

Die feuchteabhängige Änderung der Wärmeleitfähigkeit spielt für die untersuchten Konstruktionen eher eine untergeordnete Rolle. Lediglich für die Grundkonstruktion des Porenbetons ist ein signifikanter Einfluss zu erkennen. Ein Vergleich mit der Referenzkonstruktion zeigt eine deutliche Reduzierung der Amplitude des Porenbetons. Für den Hochlochziegel und die Holzkonstruktion erhöht sich die Amplitude unwesentlich.

#### 4.4.2 Bauteilbetrachtung - Thermische Bewertung

Mit dem Fortschreiben der energetischen Anforderungen an Gebäude durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) nimmt die Bewertung von Wärmebrücken einen immer größeren Stellenwert ein. Der häufig verwendete pauschale Wärmebrückenzuschlag von  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  auf die gesamte Gebäudehüllfläche führt bei Neubauten oftmals zum Nichterreichen des gewünschten energetischen Standards. Daher rückt eine detaillierte Bewertung der Wärmebrücken immer mehr in den Mittelpunkt der energetischen Bewertung der Gebäudehülle.

Hinsichtlich der Wärmebrücken weisen der Monolith sowie Bauweisen mit einem Wärmedämmverbundsystem Unterschiede auf. Beide Konstruktionsaufbauten besitzen ein unterschiedliches thermisches Verhalten an 2d- und 3d-Anschlusspunkten. Welche Auswirkung verschiedene Konstruktionsarten und Materialien auf die Wärmebrücken haben, soll in diesem Kapitel untersucht werden. Dazu wurden verschiedene Anschlussdetails ausgewählt und numerisch bewertet.

##### 4.4.2.1 Außenwanddecke

Bei Außenwanddecken sind die  $\Psi$ -Werte in der Regel negativ. Der Einfluss ist auf das Bezugsmaß zurückzuführen. Nach heutigem Stand wird für die energetische Bewertung von Gebäuden Außenmaßbezug verwendet. Im Eckbereich wird die Gebäudehüllfläche zu großzügig bewertet. Mit der  $\Psi$ -Wertberechnung wird dieser Fehler wieder korrigiert.

In Abbildung 44 links ist der  $\Psi$ -Wert der Außenwanddecke für alle untersuchten Materialien dargestellt. Der Dämmbeton hat mit einem  $\Psi$ -Wert von  $-0,256 \text{ W}/(\text{mK})$  den größten negativen und Holz mit  $-0,052 \text{ W}/(\text{mK})$  den kleinsten negativen Wert. Dieser Zusammenhang liegt in der Dicke der Außenwand begründet. Je dicker die Außenwand, desto kleiner negativ ist der  $\Psi$ -Wert.

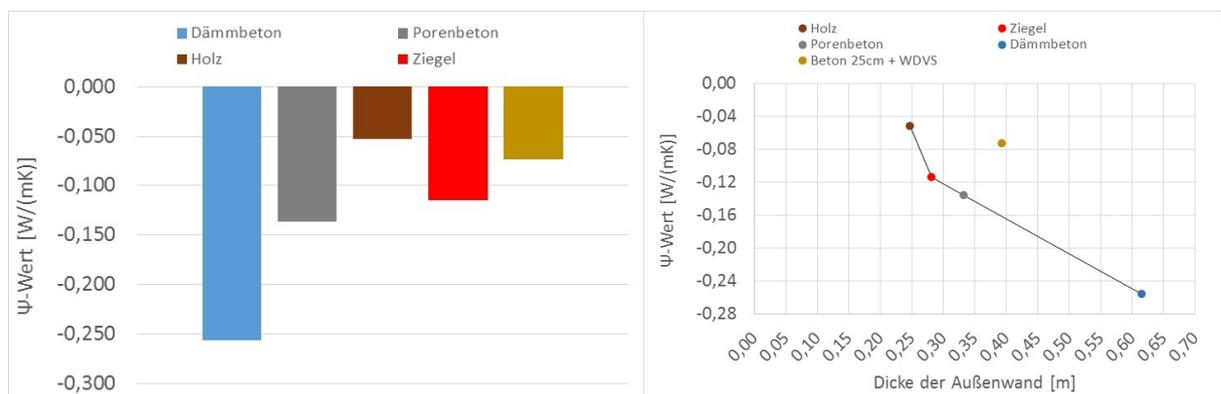


Abbildung 53: links:  $\Psi$ -Werte Außenwanddecken; rechts:  $\Psi$ -Wert in Abhängigkeit von der Dicke der Außenwand

Zum Vergleich ist in Abbildung 44 zusätzlich die Referenzkonstruktion (Beton 25cm + WDVS) dargestellt. Der  $\Psi$ -Wert ist größer als bei der Grundkonstruktionen, mit Ausnahme des Holzes. Ebenso wird deutlich, dass mit zunehmender Außenwanddicke der  $\Psi$ -Wert geringer wird. Eine Referenzkonstruktion gleicher Dicke hat einen größeren  $\Psi$ -Wert als die Grundkonstruktion.

Für die energetische Bewertung von monolithischen Gebäuden ist das ein Vorteil für die Monolithen, der allerdings vor allem aus dem dickeren Wandaufbau resultiert.

#### 4.4.2.2 Deckenaufleger

Das Deckenaufleger wird in Abhängigkeit verschiedener Auflagertiefen (12 cm, 15 cm, 20 cm, voll) untersucht. Einige Restriktionen sind dabei zu berücksichtigen. Zum einen ist für die Holzkonstruktion nur eine volle Auflagertiefe sinnvoll. Weiterhin entspricht für die monolithische Ziegelwand eine Auflagertiefe von 20 cm einer vollen Auflagertiefe, weil die Stirnseite der Deckenplatte gedämmt ist.

Mit zunehmender Auflagertiefe erhöht sich für die Grundkonstruktionen der Wärmebrückeneinfluss (siehe Abbildung 45). Nur für die Referenzkonstruktion kann der Anschluss als wärmebrückenfrei bezeichnet werden, da die Diskontinuität in der Außenwand durch das außenliegende WDVS thermisch neutralisiert wird. Der Einfluss einer variablen Dicke des Dämmstreifens an der Stirnseite wird nicht weiter untersucht.

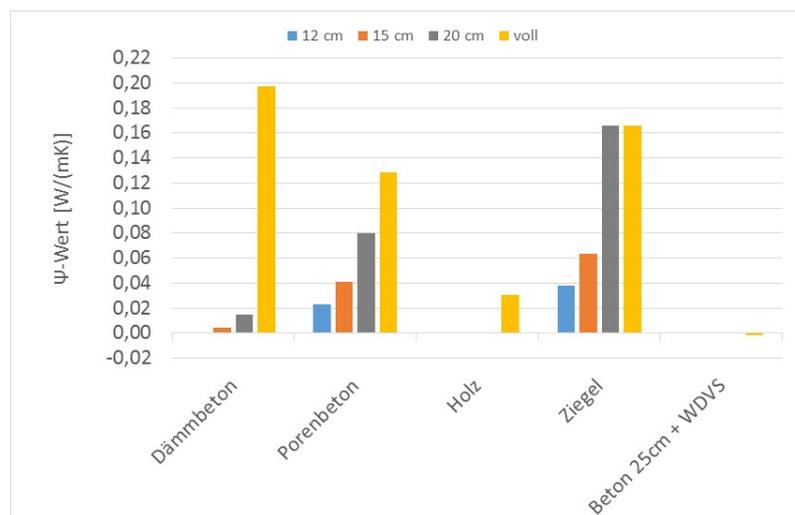


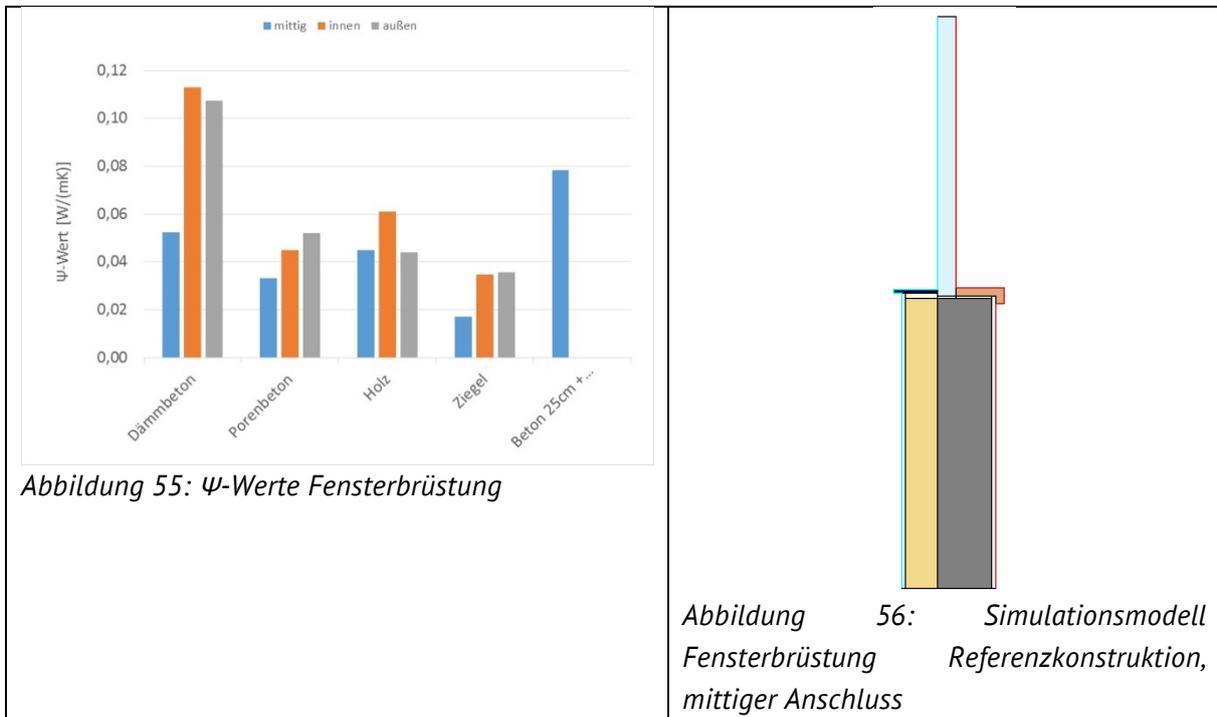
Abbildung 54:  $\Psi$ -Werte Deckenaufleger ( $\Psi$ -Wert Dämmbeton 12 cm Auflager und Beton 25 cm + WDVS sehr gering und nicht erkennbar)

#### 4.4.2.3 Fensterbrüstung

In Abbildung 39 ist der  $\Psi$ -Wert für die Fensterbrüstung dargestellt. Dabei zeigt sich erwartungsgemäß, dass eine mittige Anordnung der Fenster bei monolithischen Konstruktionen den geringsten Zuschlag liefert (siehe Abbildung 47). Nur bei der Holzwand kann der äußere Anschluss mithalten, wie auch in [55] dargelegt. Was daran liegt, weil im vorliegenden Fall (Holz) das außenliegende Fenster ohne Fensterbank simuliert wurde.

Fast alle Grundkonstruktionen besitzen einen kleineren  $\Psi$ -Wert als die Referenzkonstruktion. Lediglich die innere bzw. äußere Anordnung der Fenster der Dämmbetonkonstruktionen führen zu größeren Wärmebrückenzuschlägen.

Die Ergebnisse der Referenzkonstruktion sind stark von der Anordnung des Fensters im Wandquerschnitt abhängig. In den untersuchten Details schließt die Fensteraußenkante direkt an das WDVS an (siehe Abbildung 96 und Abbildung 47, Abbildung 97). Das entspricht einer mittigen Anordnung des Fensters im Simulationsmodell. Verschiebt man das Fenster in die Dämmebene, würde sich der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient verringern.



#### 4.4.2.4 Fensterlaibung

Im Fall der monolithischen Konstruktionen führt eine mittige Fensteranordnung gegenüber einer inneren bzw. äußeren Anordnung zu geringeren  $\Psi$ -Werten (Abbildung 49). Bei mittiger Anordnung der Fenster liegen die monolithischen Konstruktionen, mit Ausnahme des Dämmbetons, unter den Grundkonstruktionen.

Wie für die Fensterbrüstung gilt auch für die Fensterlaibung, dass eine Äußere bzw. Innere Anordnung sich nur geringfügig unterscheidet. Einzige Ausnahme stellt die Holzkonstruktion wegen ihrer unterschiedlichen Detailausbildung dar.

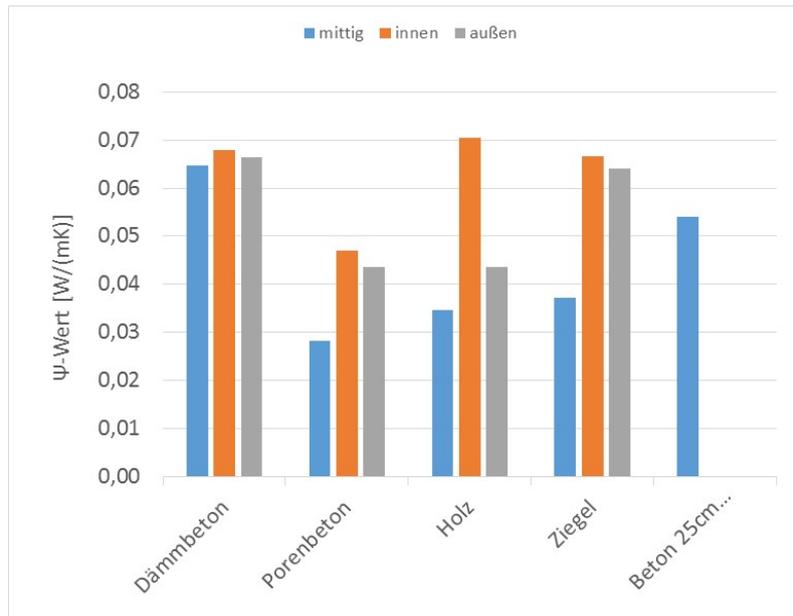


Abbildung 57:  $\psi$ -Werte Fensterlaibung

#### 4.4.2.5 Fenstersturz

Wie bei den zuvor bewerteten Anschlussdetails führt eine mittige Fensteranordnung gegenüber einer inneren bzw. äußeren Anordnung zu geringeren  $\psi$ -Werten. Im Fall des Fenstersturzes weist die Referenzkonstruktion den geringsten linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten auf.

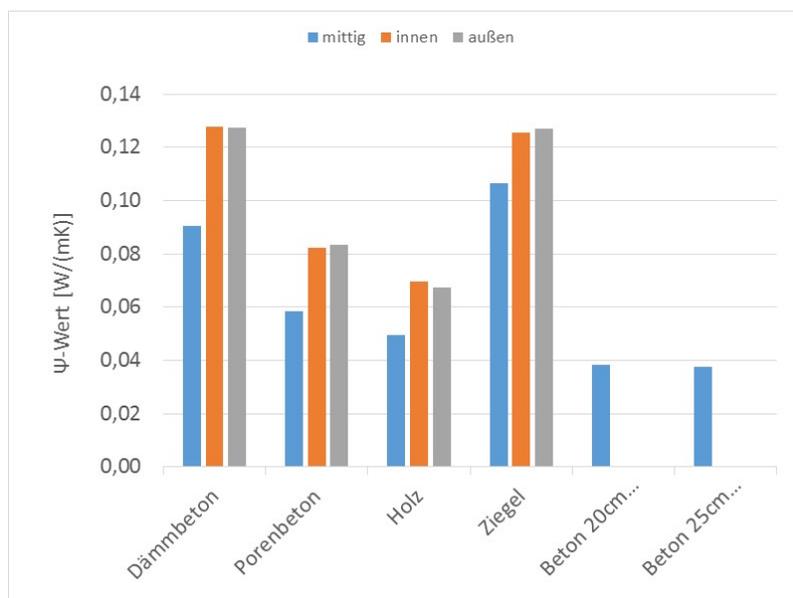


Abbildung 58:  $\psi$ -Werte Fenstersturz

Fazit:

Negative lineare Wärmebrückenverlustkoeffizienten sind bei Außenwandecken zu erwarten. Diese machen sich besonders bei den monolithischen Konstruktionen bemerkbar, da diese i.d.R. eine größere Wandstärke aufweisen als Wandaufbauten mit einem WDVS.

Die Referenzkonstruktion weist für die Außenwandecke in den überwiegenden Fällen einen geringeren  $\Psi$ -Werte auf. Jedoch werden die hohen negativen  $\Psi$ -Werte des Anschlussdetails bei monolithischen Konstruktionen durch die positiven  $\Psi$ -Werte der anderen Anschlussdetails wieder aufgewogen. Für die Referenzkonstruktion ist ein größerer  $\Psi$ -Werte bei der Fensterbrüstung erkennbar (siehe Abbildung 50). Jedoch ist der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient bei den Fensterstürzen und einbindenden Geschosdecken geringer. Tendenziell sind die größten positiven linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten für monolithische Konstruktionen bei Fensterstürzen (mittig) zu erwarten. Weiterhin ist durch eine Optimierung des Anschlussdetails Fensterbrüstung- und -laibung für die Referenzkonstruktion mit einer Reduktion der  $\Psi$ -Werte zu rechnen. Projiziert man diese Wärmebrückenverlustkoeffizienten auf eine energetische Gebäudebewertung, dann ist ein geringer Wärmebrückenzuschlag für WDVS-Konstruktionen zu erwarten.

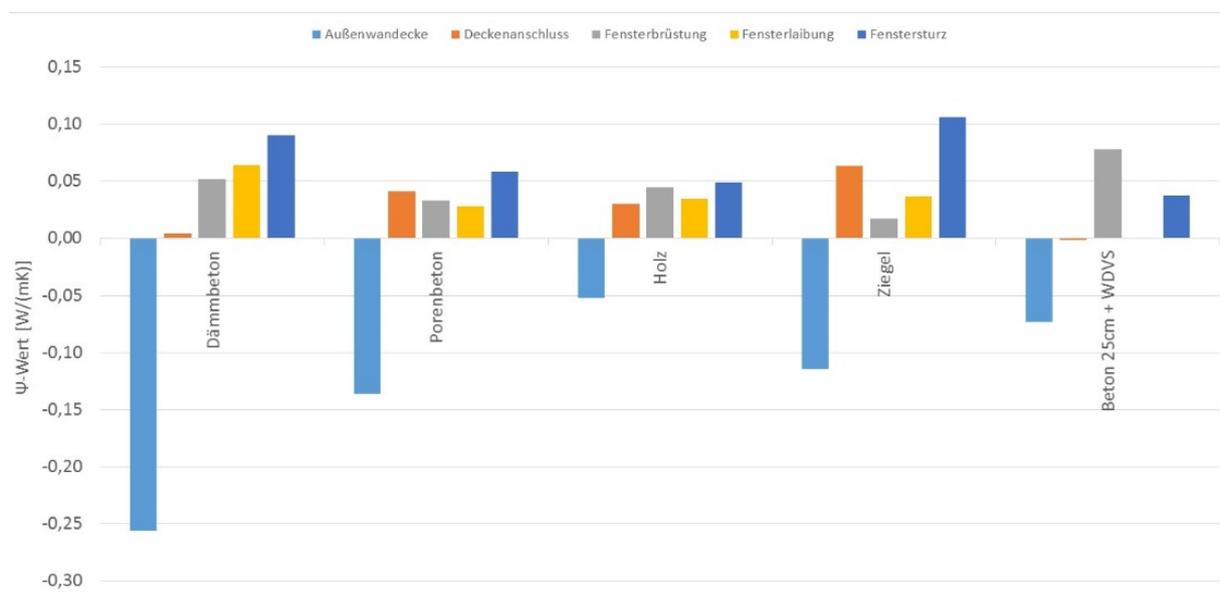


Abbildung 59: Übersicht  $\Psi$ -Werte verschiedener Anschlussdetails

#### 4.4.3 Bauteilbetrachtung - Temperaturamplitudenverhältnis (TAV)

Die tageszeitlichen Temperaturschwankungen werden häufig idealisiert als eine Sinusschwingung angenommen. Die Periodendauer beträgt demzufolge 24 h, die Abweichung des Maximal- bzw. Minimalwertes vom Mittelwert wird als Amplitude bezeichnet. Die sich im Tagesverlauf an der äußeren Bauteiloberfläche einstellende Sinusschwingung mit der Amplitude  $\theta_{se,Amp}$  kommt an der Innenoberfläche  $\theta_{si,Amp}$  des Bauteiles zeitverzögert und gedämpft an. Das Maß für die Dämpfung der Temperaturwelle wird als Temperaturamplitudenverhältnis (TAV) bezeichnet und ist wie folgt definiert:

$$TAV = \frac{\theta_{si,Amp}}{\theta_{se,Amp}}$$

Je kleiner das Temperaturamplitudenverhältnis ist, desto geringer ist die Schwankung der Innenoberflächentemperatur.

Das TAV galt in den 60er und 70er Jahren als maßgebliche Bewertungsgröße für Behaglichkeit im Innenraum [86]. Später wurde festgestellt, dass der Eintrag von Wärmeenergie durch transparente Bauteile weitaus relevanter als der durch opake Bauteile ist [87, 88]. Dennoch wird an dieser Stelle das TAV wieder aufgegriffen, um die Aussagen in Kapitel 2.2.2 zu bewerten. Im Rahmen der Systembetrachtung wird auf die Oberflächentemperaturschwankung in Folge solarer Gewinne durch transparente Bauteile eingegangen.

Nachfolgend wird mit der Methode nach Heindl [89] für eine sinusförmige Schwingung mit einer Periodendauer von  $T = 24h$  das TAV für verschiedene Konstruktionsaufbauten dargestellt.

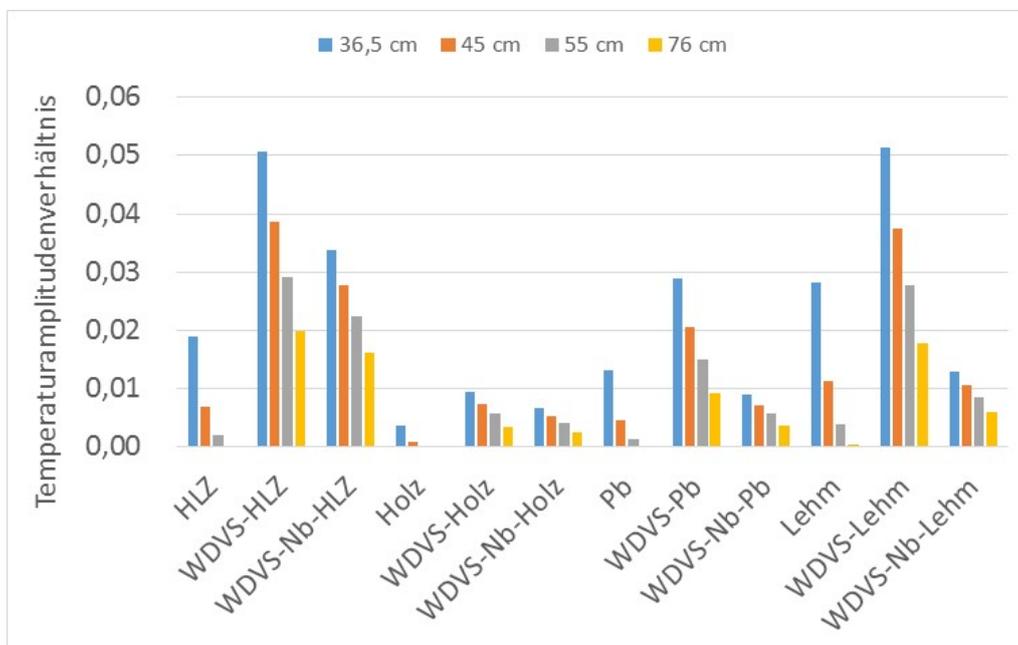


Abbildung 60: Temperaturamplitudenverhältnis

Mit zunehmender Dicke der Außenwandkonstruktion verringert sich das TAV. Die Referenzkonstruktionen mit WDV5 (z.B. WDV5-HLZ) und Normalbeton (z.B. WDV5-Nb-HLZ)

besitzen stets höhere Temperaturamplitudenverhältnisse als die Grundkonstruktionen (Monolithen). Ausnahmen bilden der Porenbeton (36,5 cm) und die Lehmkonstruktion (36,5 cm und 45 cm), diese haben geringere TAV als die Grundkonstruktionen.

Das TAV ist demnach vor allem von der Dicke der Wandkonstruktion abhängig. In den meisten Fällen verfügen monolithische Konstruktionen bei gleichem U-Wert über geringere TAV als die dazugehörigen Referenzkonstruktionen.

#### 4.4.4 Systembetrachtung – Ausnutzungsgrad

Die abstrakten Parameterstudien zeigen, dass mit steigender für den betrachteten Raum verfügbarer Speichermasse der Ausnutzungsgrad der verfügbaren Wärmegewinne steigt. Die folgend dargestellten Ergebnisse bilden exemplarisch den Zusammenhang von verfügbarer Speichermasse und Ausnutzungsgrad ab. Die Variation der Speichermasse der jeweiligen Außenwand in den Simulationsmodellen reicht von masselos ( $0 \cdot c_p$ , abstrakt) bis zur schweren Betonkonstruktion mit doppelter Speicherfähigkeit ( $2 \cdot c_p$ , abstrakt). Die Variation der Wärmesenken ergibt sich aus der Variation der Nutzerprofile (Einfamilienhaus EFH, Mehrfamilienhaus MFH, Bürobau), die Variation der Wärmequellen aus der Variation der Fenstergrößen ( $1,75 \text{ m}^2$ ;  $3,50 \text{ m}^2$ ;  $7,00 \text{ m}^2$ ) sowie der Nutzerprofile.

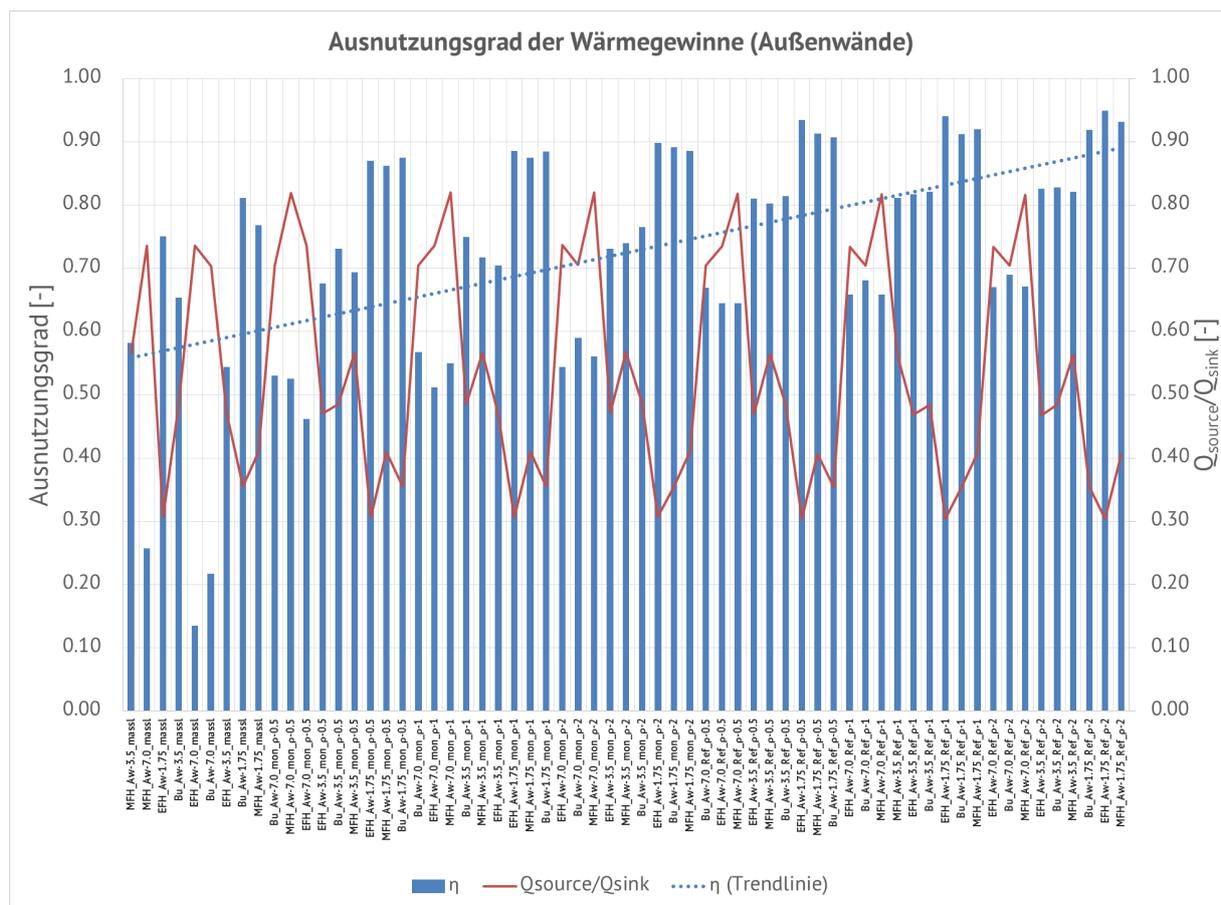


Abbildung 61: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände) abhängig von der Speicherkapazität des Gebäudes pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

Vergleicht man bspw. die Modelle mit der Fenstergröße 3,00 m<sup>2</sup>, so wird deutlich, dass mit steigender Speichermasse der Ausnutzungsgrad zwar steigt, gleichzeitig wird durch den Vergleich aller drei Fenstergrößen innerhalb einer Modellreihe ersichtlich, dass der Ausnutzungsgrad mit steigender Fenstergröße und gleichbleibender Speichermasse sinkt. Daraus folgt erstens, dass in Gebäuden, denen hohe solare und/oder interne Gewinne zur Verfügung stehen, eine große Speichermasse zielführend ist, und zweitens, dass die Erhöhung der verfügbaren Wärmegewinne nicht linear zur Erhöhung des Ausnutzungsgrades führt. Abhängig von den verfügbaren Wärmegewinnen und der verfügbaren Speichermasse müssen Maßnahmen gegen temporäre Übertemperaturen realisiert werden (temporäre Erhöhung der Luftwechselrate, temporäre Verschattungsmaßnahmen usw.).

Die folgend dargestellten Ergebnisse bilden exemplarisch den Zusammenhang von  $Q_{\text{source}} / Q_{\text{sink}}$  und dem Ausnutzungsgrad ab. Die Grafiken zeigen jeweils dieselben Inhalte, unterscheiden sich nur in der Beschriftung der x-Achse.

Es gilt, dass mit sinkendem Verhältnis von  $Q_{\text{source}}$  zu  $Q_{\text{sink}}$  der Ausnutzungsgrad der verfügbaren volatilen Wärmegewinne steigt.  $Q_{\text{source}}$  zu  $Q_{\text{sink}}$  gibt das Verhältnis der Gewinne zu den Verlusten an. Es folgt, dass in Gebäuden mit hohen Verlusten und demnach geringem  $Q_{\text{source}} / Q_{\text{sink}}$  der mögliche Ausnutzungsgrad hoch ist und andersherum.

Gleichermaßen steigt mit steigender verfügbarer Speichermasse der jeweilige Ausnutzungsgrad.

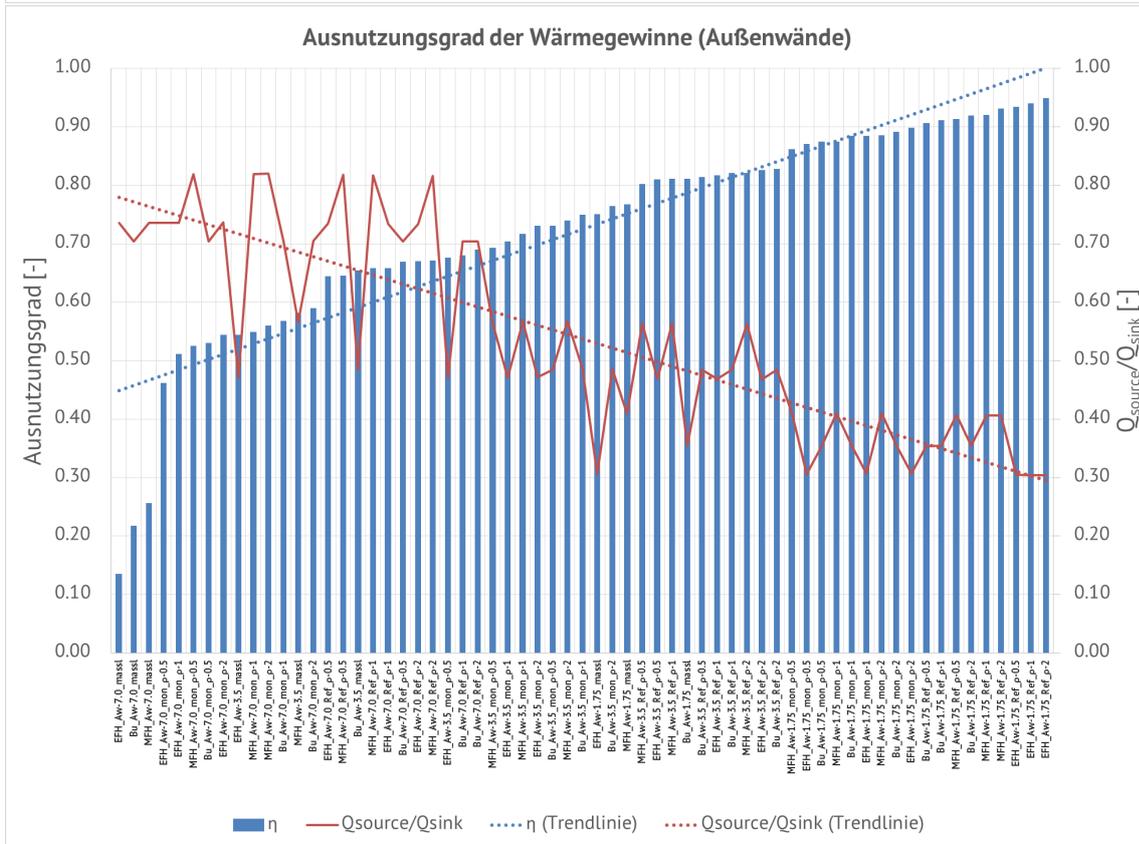
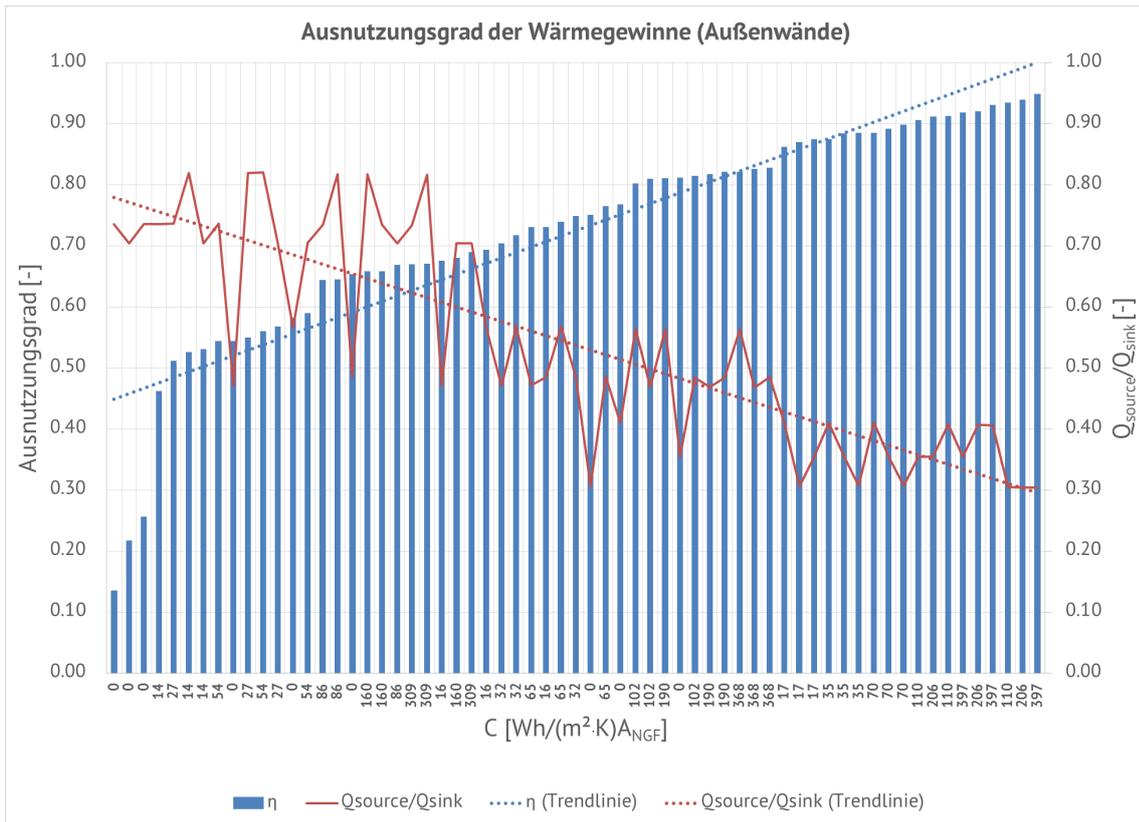


Abbildung 62: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände) abhängig von der Gesamt-Speicherkapazität des Raumes pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

Im Nutzungsprofil Mehrfamilienhaus erreicht die monolithische Bauweise höhere Ausnutzungsgrade als im Nutzungsprofil Verwaltungs-/ Bürobau.  $Q_{source}$ , explizit die internen Lasten, sind hier geringer als im Bürobau (gemäß DIN V 18599 [63] betragen die inneren Lasten eines Einfamilienhauses nur ca. 15 % der inneren Lasten eines Bürobaus, vgl. Tabelle 21 und 23). Gleichzeitig gilt, je größer die Fenstergröße im Wohnungsbau ist, desto geringer ist der Ausnutzungsgrad der verfügbaren Wärmegewinne unter ansonsten identischen Bedingungen. Die Belade- und Entladezyklen im Wohnungsbau sollten auf Grund der Nutzung der Räume (vorwiegend abends und am Wochenende) eher geringer sein. Bei großen anzunehmenden solaren Gewinnen sollte die Speichermasse hoch sein. Die verfügbare Speichermasse muss entsprechend der verfügbaren Wärmegewinne dimensioniert werden.

Es zeigt sich, dass die Nutzbarkeit der Speichermasse nahezu unabhängig von der Anordnung im Raum, also vom Bauteil ist (1kg Außenwand wirkt minimal schlechter als 1 kg Innenwand usw.). Da für die Transmissionsverluste der Außenwand, ohne Berücksichtigung der Speicherfähigkeit, vereinfachend  $q = U \cdot A \cdot \Delta T$  gilt, wobei U und A konstant sind, nur  $\Delta T$  durch die Speicherung im Bauteil minimal größer ist, sinkt der Ausnutzungsgrad bei Anordnung der notwendigen Speichermasse in der Außenwand nur um ca. 1 % im Vergleich zur Anordnung der Speichermasse in anderen Bauteilen (siehe Abbildung 53, sowie Anhang).

#### 4.4.1 Systembetrachtung – Ausnutzungsgrad, Deckungsgrad

Der Ausnutzungsgrad gibt an, wie viel der zur Verfügung stehenden volatilen Energie vom Raum oder Gebäude genutzt werden kann. Um die Effizienz des Raumes oder Gebäudes zu bewerten, ist der Deckungsgrad, der für die Bewertung gebäudetechnischer Anlagen genutzt wird, aussagekräftiger. Auf Gebäude bezogen beziffert er vereinfacht gesagt das Verhältnis der Menge nutzbarer volatiler Energie zum Bedarf. Er könnte wie folgt berechnet werden:

$$\text{Deckungsgrad} = \eta \cdot Q_{Source} / Q_{Sink}$$

mit

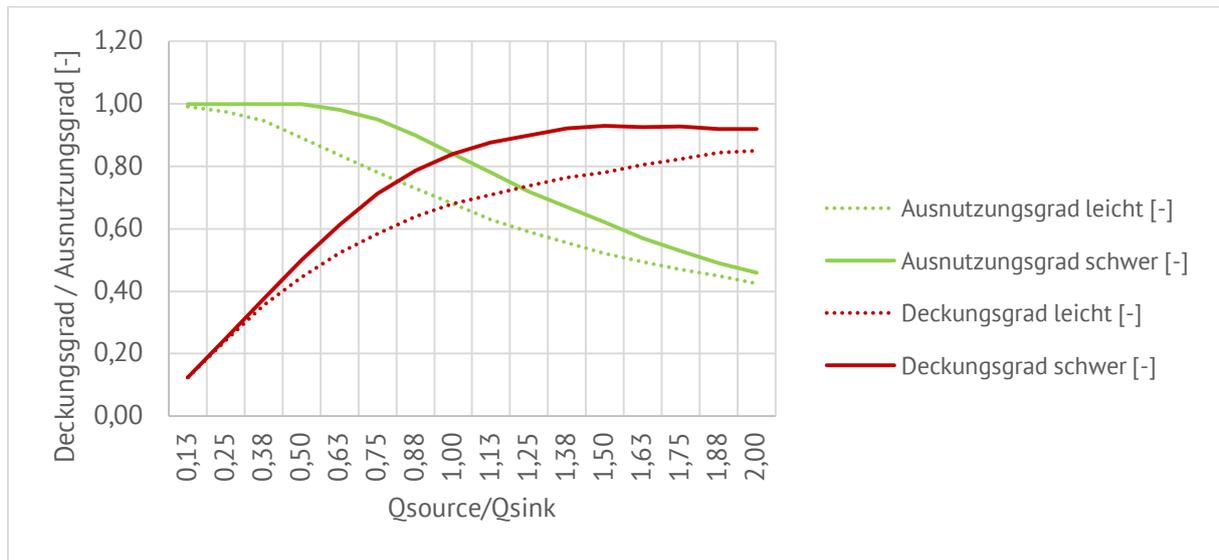
$\eta$  Ausnutzungsgrad

$Q_{Source}$  Wärmequellen

$Q_{Sink}$  Wärmesenken.

Je größer die Wärmesenken, sprich die Wärmeverluste eines Raumes oder Gebäudes sind, desto geringer ist der Deckungsgrad.

Der Ausnutzungsgrad gemäß DIN V 18599 [63] verhält sich bei konstanter  $Q_{\text{sink}}$  und steigender  $Q_{\text{source}}$  zum hier definierten Deckungsgrad wie folgt:



$Q_{\text{source}}$  steigert sich in 25 kWh/m<sup>2</sup> Schritten,  $Q_{\text{sink}}$  beträgt konstant 200 kWh/m<sup>2</sup>. Als leichte und schwere Bauweise wurden  $C_{\text{wirk}}$  gemäß DIN V 18599-2 angesetzt. Die Auswertung zeigt, dass der Deckungsgrad mit steigenden Gewinnen steigt, der Ausnutzungsgrad hingegen sinkt.

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn  $Q_{\text{source}}$  konstant mit 200 kWh/m<sup>2</sup> und  $Q_{\text{sink}}$  in 25 kWh/m<sup>2</sup>-Schritten sinkend ist. Der Deckungsgrad sinkt mit steigenden Verlusten, der Ausnutzungsgrad hingegen steigt.

Es ist ersichtlich, dass die Reduktion der Wärmeverluste einen entscheidenden Aspekt hinsichtlich der Effizienz des Raumes bzw. des Gebäudes darstellt.

#### 4.4.2 Systembetrachtung - Ausnutzungsgrad, Heizwärmebedarf, Überhitzungsstundenanzahl, Speicherzyklen

Der Heizwärmebedarf im Nutzungsprofil Einfamilienhaus ist bei gleichbleibendem U-Wert der Gebäudehülle unter gleichen inneren und äußeren Bedingungen nahezu unabhängig von der Konstruktion (monolithisch / WDVS) gleichbleibend. Der Ausnutzungsgrad liegt bei der monolithischen Bauweise um ca. 3 % niedriger als bei der Referenzkonstruktion (Material + WDVS). Der Monolith weist maximal einen um 1 % geringeren Heizwärmebedarf im Vergleich zur Referenzwand auf. Die Konstruktion der Außenwand ist aus bauphysikalisch-energetischer Sicht demnach nicht entscheidend, der U-Wert der Gebäudehülle hingegen hat einen großen Einfluss auf den Heizwärmebedarf und den Ausnutzungsgrad, da er das Verhältnis von  $Q_{\text{source}}$  zu  $Q_{\text{sink}}$  maßgeblich definiert. Folgend dargestellt sind die Heizwärmebedarfe für die vier Raummodelle:

Ia - Unteres Geschoss, Eckraum mit Bodenplattenanschluss

Ib - Unteres Geschoss, Mittelraum mit Bodenplattenanschluss

Ila - Mittleres Geschoss, Eckraum

Ilb - Mittleres Geschoss, Mittelraum.

Die Räume entsprechen den beschriebenen Prüfräumen und weisen jeweils ein 3m<sup>2</sup>-Fenster auf.

Es wird ersichtlich, dass die Lage des Raumes einen entscheidenden Einfluss auf den Heizwärmebedarf nimmt: die Mittelräume (Ib/Ilb) weisen einen geringeren Bedarf auf als die Eckräume des jeweils gleichen Geschosses (Ia/Ila), die Räume mit Bodenplattenanschluss (Ia/Ib) weisen einen höheren Bedarf auf als die im Geschoss darüberliegenden Räume (IIa/IIb).

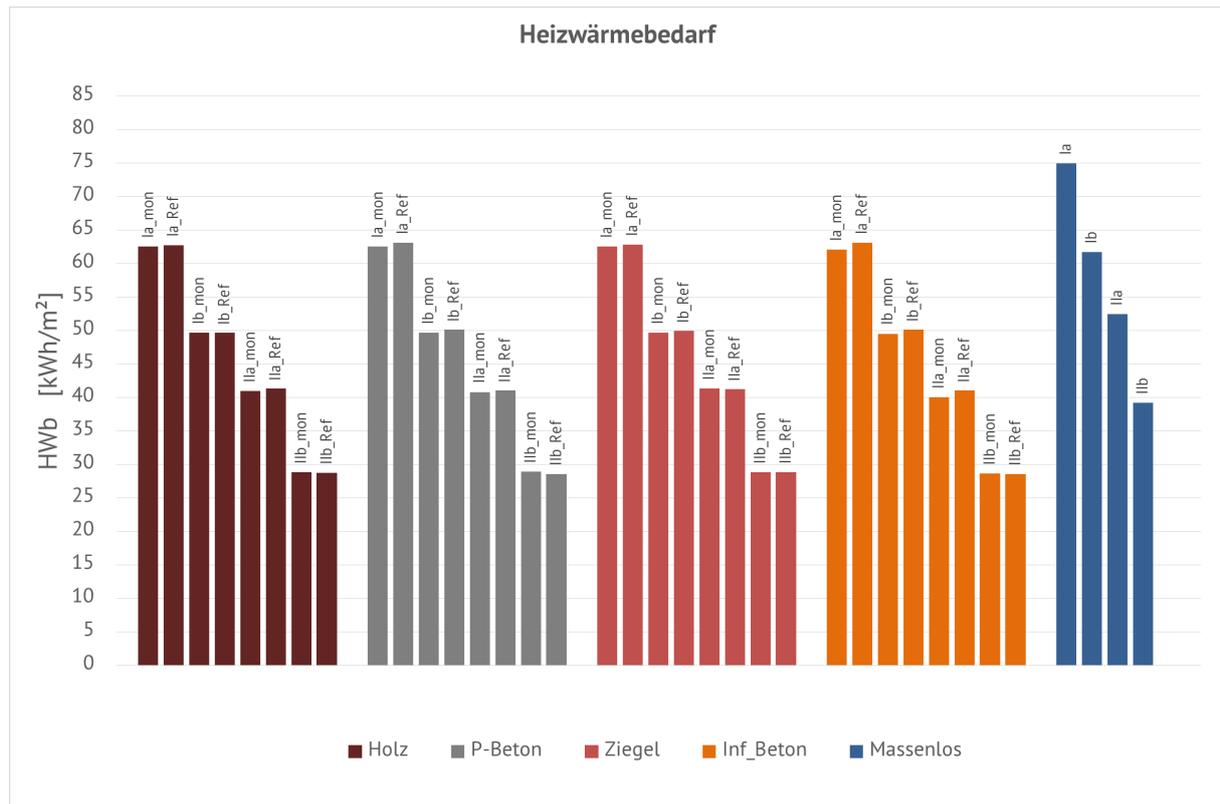


Abbildung 63: Heizwärmebedarf der realen Modelle abhängig von Materialien, sortiert nach Materialien

Die jeweils identischen Räume unterschiedlicher Konstruktionen weisen einen nahezu gleichen Heizwärmebedarf auf. Die maximale Abweichung beträgt 1 %. Dies bedeutet, dass im Nutzungsprofil Einfamilienhaus die Speichermassen nicht ausgeschöpft werden. Die Materialität der Konstruktionen ist auf Grund der Speicherfähigkeit der in den Modellen gleichbleibenden Beton-Deckenkonstruktionen für den Heizwärmebedarf nicht relevant. In den abstrakten Modellen wurde deutlich, dass bei hohen volatilen Wärmegewinnen (große solare Gewinne / hohe interne Lasten wie im Bürobau) die Speichermasse an Bedeutung gewinnt. Der Vergleich mit einem abstrakten, masselosen Material zeigt, dass die untersuchten Konstruktionen unter Modellbedingungen ausreichend viel Speichermasse bereitstellen, so dass die Unterschiede zwischen den Modellen gering sind.

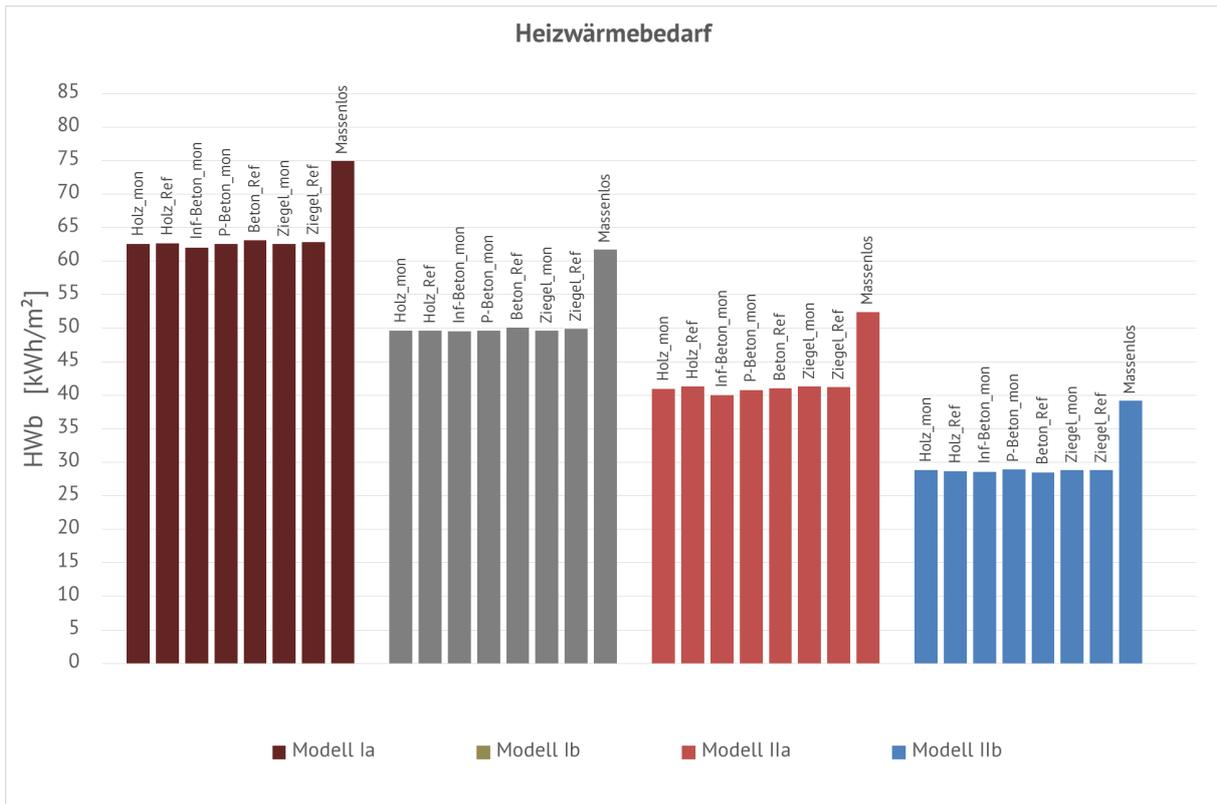


Abbildung 64: Heizwärmebedarf der realen Modelle abhängig von den Raum-Anordnungen, sortiert nach Raumtypen

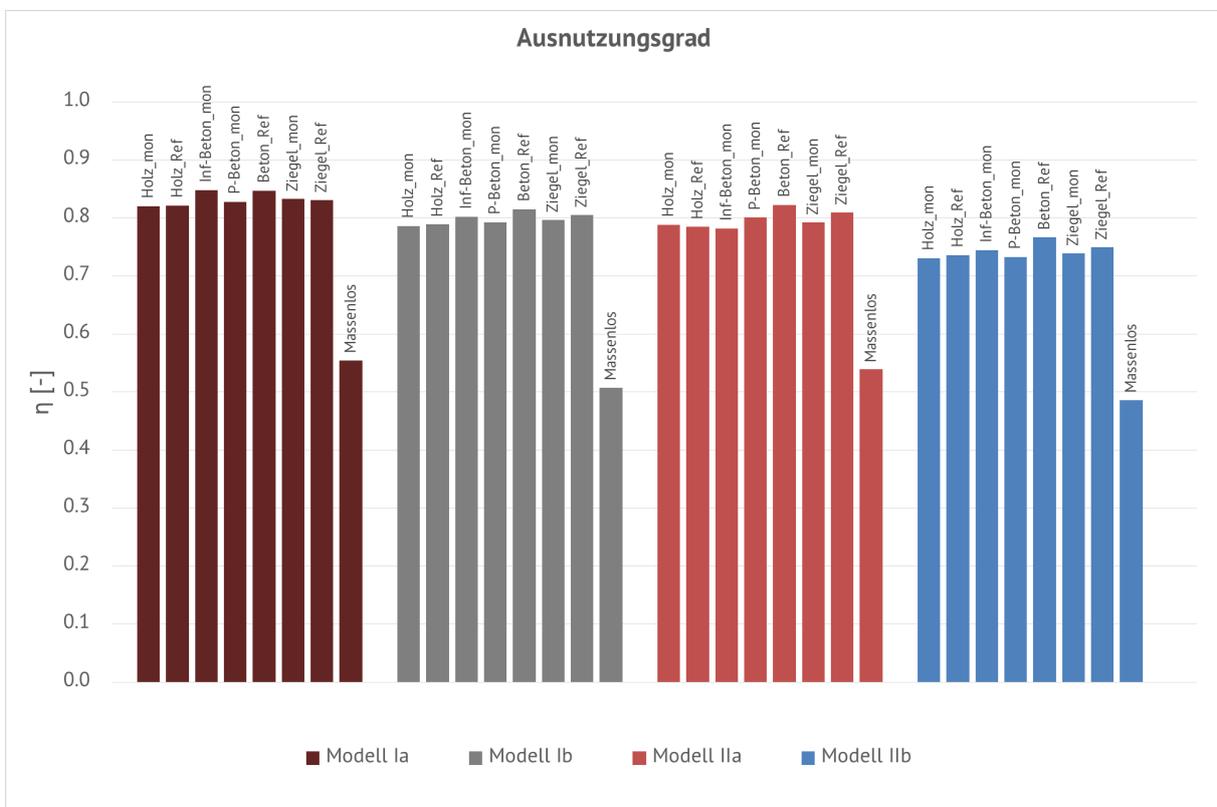


Abbildung 65: Ausnutzungsgrad der realen Modelle abhängig von den Raum-Anordnungen, sortiert nach Raumtypen

Der Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne ist bei monolithischer Bauweise geringfügig niedriger, da die verfügbare Speichermasse geringer ist. Der Heizwärmebedarf weicht nur um ca. 1 % ab. Die U-Werte der Innenbauteile der monolithischen Konstruktion sind im Vergleich zu den Referenzmodellen geringer, so dass der thermische Austausch verzögert wird (der konvektive Austausch wurde nicht simuliert).

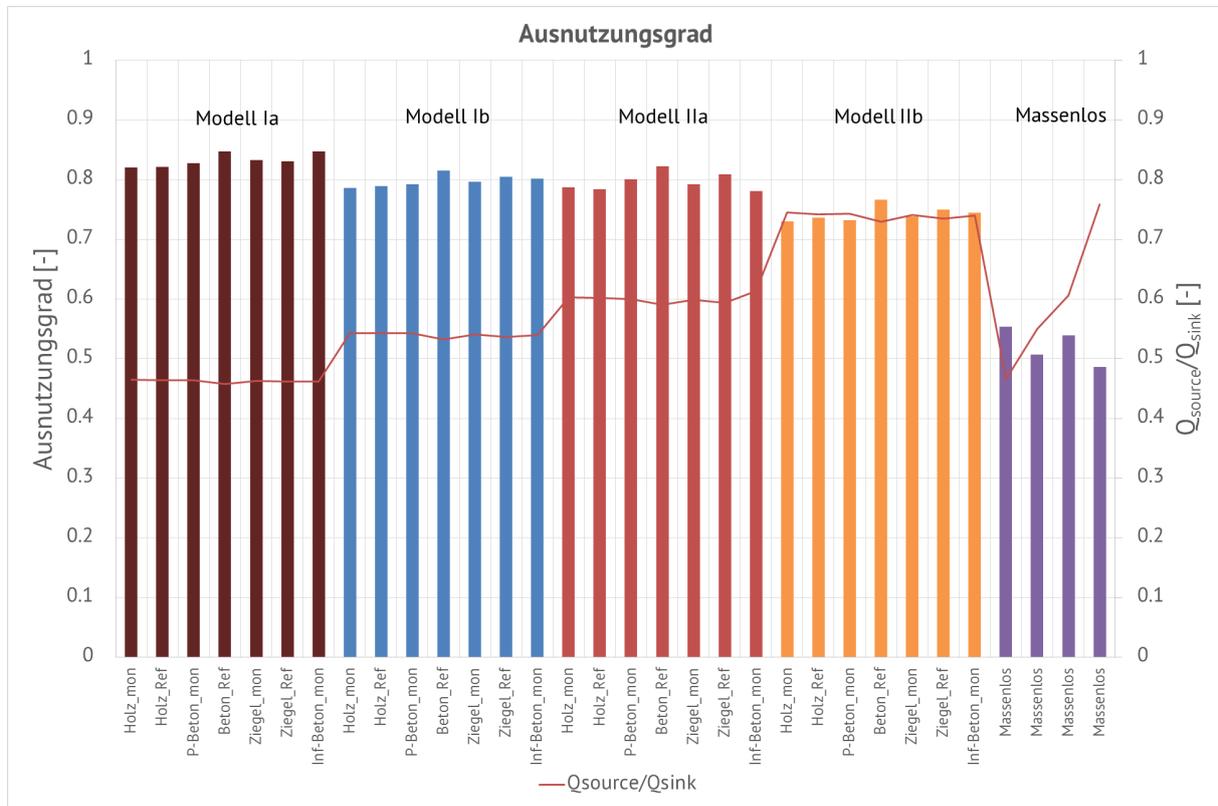


Abbildung 66: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne abhängig vom Verhältnis der Wärmequellen zu den Wärmesenken

Der Ausnutzungsgrad in Abhängigkeit zu  $Q_{source}/Q_{sink}$  ist bezogen auf den jeweiligen betrachteten Raum nahezu konstant, sprich annähernd materialunabhängig. Die Speichermöglichkeit aller untersuchten Materialien reicht für die vorhandenen Wärmegewinne zur temporären Speicherung aus. Der raumbezogene Ausnutzungsgrad ist auf Grund der höchsten Speichermöglichkeit und des positiven Wärmeaufnahmeverhaltens bei den Modellen „Beton + WDVS“ jeweils am höchsten. Die mehrschichtigen Betonkonstruktionen eignen sich für die temporäre Wärmespeicherung am besten.

Im Nutzungsprofil Einfamilienhaus steigt der Einfluss von  $Q_{\text{source}}/Q_{\text{sink}}$  auf den Ausnutzungsgrad im Vergleich zum Einfluss der verfügbaren Speichermasse. Es zeigt sich, dass die Speichermasse aller Modelle (außer des massenlosen Vergleichsmodells) für die verfügbaren Wärmegewinne ausreichen. Ausnutzungsgrad und Heizwärmebedarf sind bei allen Modellen annähernd gleich. Eine kritische Überhitzung ist unter Modellbedingungen nur bei den massenlosen Modellen zu verzeichnen.

	la	lb	IIa	IIb
$Q_{\text{source}}/Q_{\text{sink}}$ [-]	0,46	0,54	0,60	0,74
Überhitzungsstunden [h]	690	530	800	650

Abbildung 67: Verhältnis Gewinne zu Verlusten und Überhitzungsstunden, massenloses Modell

#### 4.4.3 Systembetrachtung - Oberflächentemperaturen

Die maximalen Oberflächentemperaturen entstehen während der Heizperiode, da hier nutzerprofilbedingt keine Nachtlüftung angesetzt wird. Sie treten beim Mittelraum, der allseitig von gleichtemperierten Zonen umschlossen ist (IIb), auf. Er weist eine maximale Abweichung von 5,3°C zwischen den Materialien auf. Das Maximum der maximalen Oberflächentemperaturen liegt beim monolithischen Holz, das Minimum bei der Beton-Referenzwand. Während der Kühlperiode sind die minimalen Oberflächentemperaturen beim Eckraum zu finden, da hier die Wärmeabgabe über zwei Außenwandflächen erfolgen kann. Die maximale Abweichung zwischen den Materialien liegt bei ca. 2,3°C. Das Minimum liegt beim monolithischen Holz, das Maximum bei der Beton-Referenzwand.

				Holz, monol.	Holz, Ref.	Poren- beton, monol.	Beton, Ref.	Ziegel, monol.	Ziegel, Ref.	Infra- leicht- Infral- Beton, mono.	max. Abweich- ung [°C]
IIa	HP	Oberflächen- temperatur Außenwand Süd [°C]	Max	27,73	29,51	28,22	24,49	28,58	26,37	26,54	5,02
			Mittel	19,60	19,63	19,64	19,52	19,70	19,63	19,60	0,18
			Min	15,95	15,95	15,89	17,47	16,04	16,76	16,51	1,58
	Operative Raumtemperatur [°C]	Max	28,30	30,20	28,88	25,69	29,19	27,32	27,27	4,52	
		Mittel	19,99	20,03	20,04	19,93	20,10	20,03	19,98	0,17	
		Min	16,26	16,19	16,21	17,08	16,27	16,56	16,42	0,89	
IIa	KP	Oberflächen- temperatur Außenwand Süd [°C]	Max	25,10	26,09	25,25	24,26	25,36	24,79	24,46	1,83
			Mittel	21,31	21,49	21,26	21,84	21,45	21,62	21,38	0,58
			Min	16,22	15,45	16,14	17,76	15,53	16,42	16,59	2,31
	Operative Raumtemperatur [°C]	Max	25,26	26,35	25,39	24,64	25,60	25,05	24,76	1,71	
		Mittel	21,27	21,44	21,22	21,78	21,40	21,57	21,34	0,56	
		Min	16,02	15,25	15,88	17,40	15,20	16,08	16,29	2,20	
IIb	HP	Oberflächen- temperatur Außenwand Süd [°C]	Max	32,39	31,39	31,24	27,13	30,68	28,66	29,62	5,26
			Mittel	20,98	20,45	20,58	20,33	20,55	20,48	20,51	0,65
			Min	17,03	16,31	16,26	17,93	16,53	17,34	16,99	1,67
	Operative Raumtemperatur [°C]	Max	32,96	32,15	31,96	28,40	31,35	29,77	30,48	4,56	
		Mittel	20,86	20,83	20,96	20,73	20,93	20,87	20,88	0,24	
		Min	16,38	16,44	16,44	17,73	16,65	17,22	16,94	1,35	
IIb	KP	Oberflächen- temperatur Außenwand Süd [°C]	Max	27,16	26,19	26,64	26,68	26,68	27,02	26,76	0,97
			Mittel	21,97	21,94	21,84	22,19	21,88	22,00	21,96	0,35
			Min	16,11	16,33	15,99	18,03	16,26	16,94	16,59	2,05
	Operative Raumtemperatur [°C]	Max	26,76	26,46	26,11	26,25	25,99	26,36	26,57	0,77	
		Mittel	21,86	21,90	21,80	22,11	21,84	21,95	21,91	0,32	
		Min	15,84	16,15	15,71	17,64	15,94	16,60	16,27	1,93	

Beton weist im Vergleich zum Holz eine höhere Wärmeleitfähigkeit bei höherer Speicherfähigkeit auf. Dies führt zur größeren Wärmeeindringtiefe, was bedeutet, dass die maximalen Oberflächentemperaturen während der Heizperiode geringer, und die minimalen Oberflächentemperaturen während der Kühlperiode höher sind als beim Holz. Beton weist demnach eine geringere Oberflächentemperatur-Amplitude auf, die Schwankungen sind über den Tages- und Jahreszyklus im Vergleich zu denen beim Holz geringer.

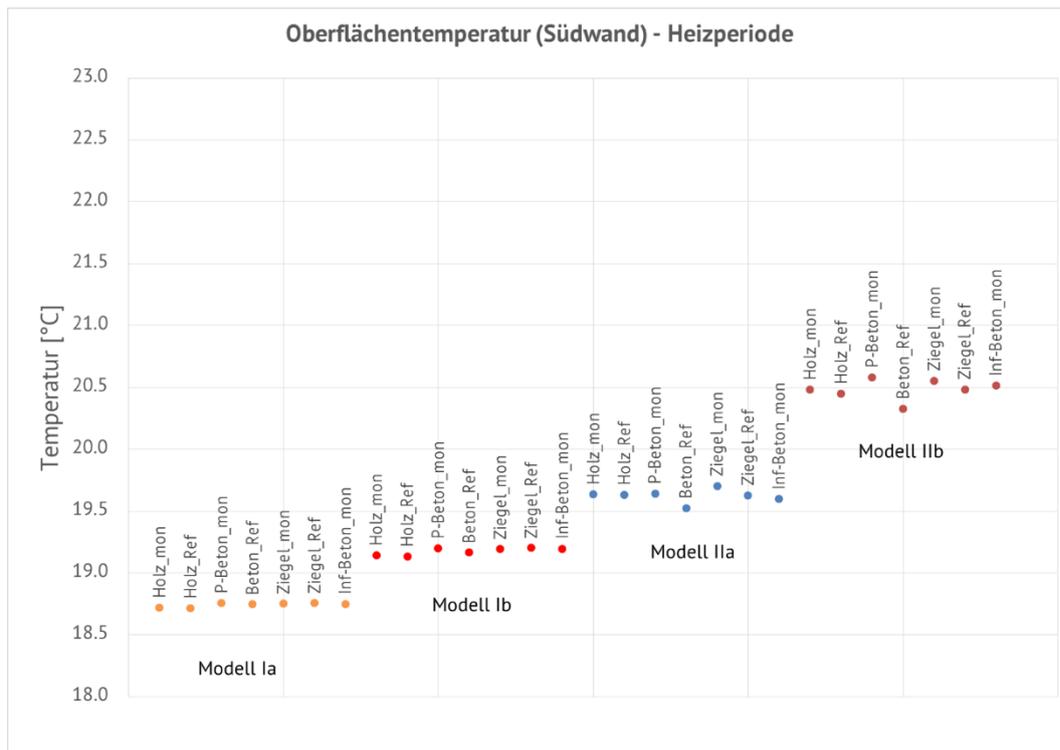


Abbildung 68: mittlere Oberflächentemperatur der Südwand während der Heizperiode

Die mittleren Oberflächentemperaturen haben eine maximale Abweichung von ca. 0,65°C (Holz monolithisch mit 20,98°C; Beton Referenz mit 20,33°C), während der Heizperiode und 0,58°C während der Kühlperiode (Porenbeton monolithisch 21,22°C; Beton Referenz mit 21,78°C). Aus den mittleren sowie den minimalen und maximalen Oberflächentemperaturen lässt sich schließen, dass die Oberflächen-Temperaturkurve des Beton-Referenzmodells eine im Tages- und Jahrgang geringere Amplitude aufweist, als die Kurve der monolithischen Konstruktionen. Die Abweichungen sind geringer, im Mittel heben sie sich gegenseitig nahezu auf.

Eine mittlere Oberflächentemperatur mit geringer tages- und jahreszeitlicher Schwankung und geringem Temperatur-Unterschied zur Raumtemperatur führt zur höheren Behaglichkeit im Raum.

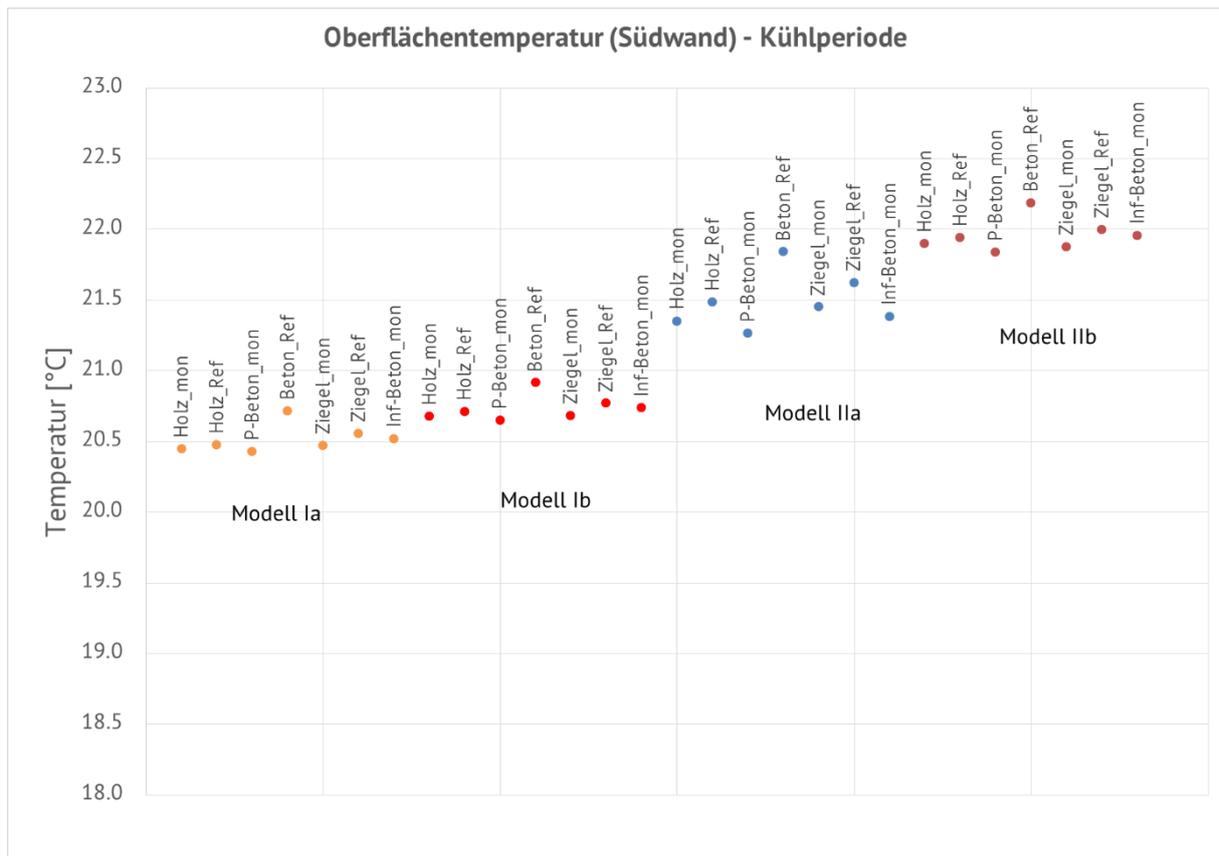


Abbildung 69: mittlere Oberflächentemperatur der Südwand während der Kühlperiode

#### 4.4.4 Systembetrachtung - Operative Temperaturen

Bei der operativen Raumtemperatur verhält es sich ähnlich, da sie das arithmetische Mittel aus Raumluft- und Oberflächentemperaturen darstellt, ergo von der sich einstellenden Oberflächentemperatur abhängt. Die Abweichung zur Raumlufttemperatur fließt jedoch nur zur Hälfte ein.

Die maximalen operativen Temperaturen entstehen wiederum während der Heizperiode, da hier nutzerprofilbedingt keine Nachtlüftung angesetzt wird. Sie treten beim Mittelraum, der allseitig von gleichtemperierten Zonen umschlossen ist (IIb), auf. Er weist eine maximale Abweichung von ca. 4,56°C zwischen den Materialien auf. Das Maximum der maximalen operativen Temperaturen am Tag liegt beim monolithischen Holz, das Minimum bei der Beton-Referenzwand. Gleichzeitig liegt das Minimum in der Nacht während der Heizperiode beim monolithischen Holz, das Maximum bei der Beton-Referenz.

Während der Kühlperiode sind die minimalen operativen Temperaturen beim Eckraum zu finden. Die maximale Abweichung zwischen den Materialien liegt bei ca. 2,2°C. Das Minimum liegt am Tag bei der Betonreferenzwand, das Maximum bei der Holzreferenzwand. Gleichzeitig liegt das Maximum in der Nacht bei der Beton-Referenzwand, das Minimum bei der monolithischen Ziegelkonstruktion.

Es gilt, dass die Temperatur-Amplitude im Tages- und Jahreszyklus bei der Betonkonstruktion geringer ist als bei der Holzkonstruktion.

Bewertet man die Behaglichkeit mit der maximalen bzw. minimalen operativen Temperatur, führen die Monolithen tagsüber während der Heizperiode zu besseren, nachts zu schlechteren Behaglichkeitswerten. Während der Kühlperiode führen die monolithischen Konstruktionen nachts zu besseren, tagsüber zu schlechteren Behaglichkeitswerten. Über die gesamte Heiz- bzw. Kühlperiode betrachtet führen Monolithen zu größeren Amplitudenschwankungen der Oberflächen-, Raum- sowie operativen Temperaturen in Folge geringerer Wärmeeindringtiefen.

Die mittlere operative Temperatur der monolithischen Holzkonstruktion liegt während der Heizperiode um max. 0,65°C bei süd-, also für die Heizperiode idealausgerichteten Räumen höher als bei der Referenzkonstruktion, während der Kühlperiode um maximal 0,23°C niedriger. Auch hier führt die monolithische Konstruktion im Vergleich zum Referenzkonstruktion zu besseren Behaglichkeitswerten, auch wenn die Unterschiede der mittleren operativen Temperatur im besten Fall noch unter 0,65°C liegen.

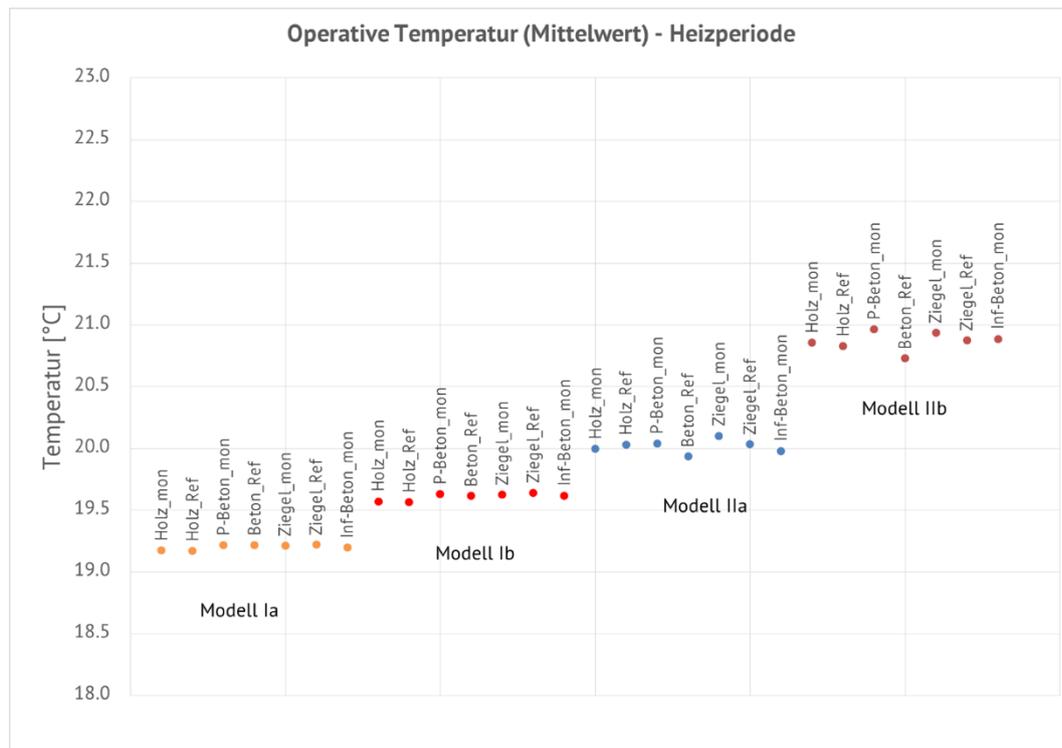


Abbildung 70: mittlere operative Temperatur des Raums während der Heizperiode

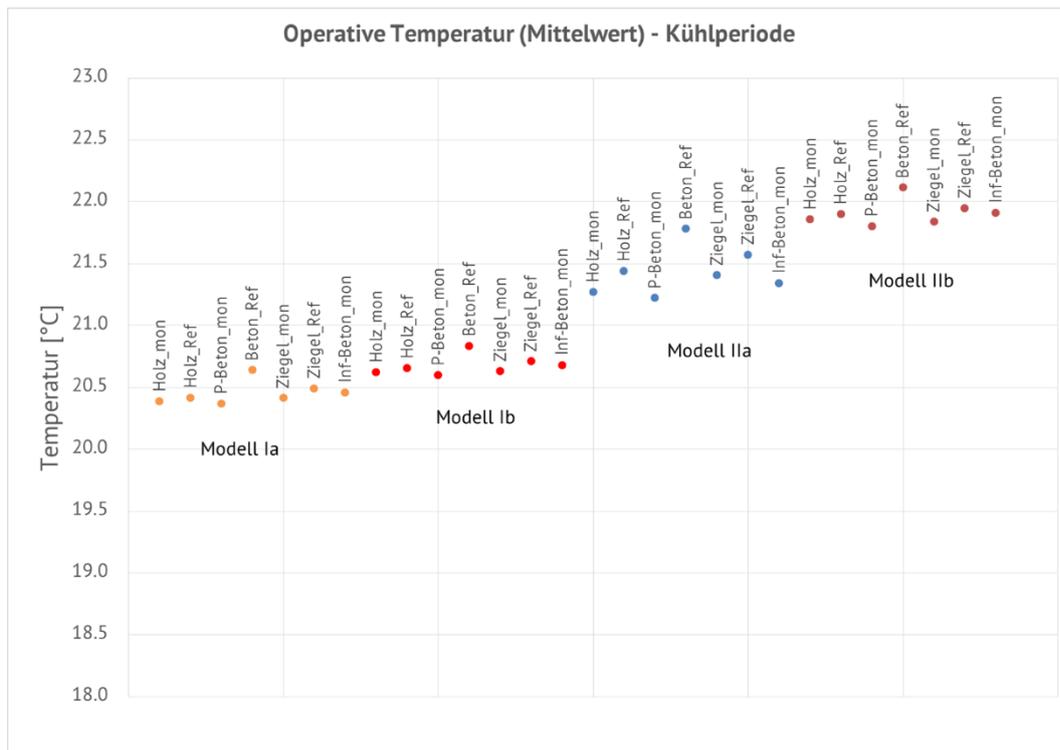


Abbildung 71: mittlere operative Temperatur des Raums während der Kühlperiode

Die Werte zeigen generell, dass eine große Wärmeeindringtiefe der raumumfassenden Bauteile für geringere Temperaturpeaks im Tages- und Jahresgang sorgt, und dass andersherum eine geringere Wärmeeindringtiefe, wenn auch nur geringfügig, zu behaglicheren operativen Temperaturen in Folge höherer Oberflächentemperaturen führt.

#### 4.4.5 Systembetrachtung - Speicherzyklen

Im realen Gebäudemodell mit der Fenstergröße 3,5 m<sup>2</sup>, Nutzung Einfamilienhaus, sind die volatilen Wärmegewinne geringer, als für eine Vollbeladung der Speichermassen notwendig wäre. Um die Wirkung der Wärmespeicherung abbilden zu können, wurde das Modell für den beispielhaft kältesten Tag im Referenzjahr (04.Januar) mit erhöhten Wärmegewinnen simuliert, sodass die Materialien in der behaglichkeitsbedingten Spanne vollgeladen werden. Die Beladungsgrenze bildet die Raumlufttemperatur während der Heizperiode von 24°C. Vergleichend werden im gleichen Zeitraum die realen Gewinne simuliert.

Für die abstrakte Simulation wurde  $Q_{source}/Q_{sink}$  im Zeitraum vom 03.Januar bis zum 05.Januar gleich 4,0 angenommen. In realen Fall ist  $Q_{source}/Q_{sink}$  im selben Zeitraum gleich 1,0. In den Grafiken wurden die Verläufe vom Mittag des 03. Januar (Stunde 60) bis Mittag des 05.Januar (Stunde 108) dargestellt.

Die Raumlufttemperatur erhöht sich im Beton-Referenz-Modell langsamer, als in den Monolith-Modellen. Gleichmaßen fällt die Lufttemperatur in Folge Ausbleibens der volatilen Gewinne langsamer ab – die thermische Trägheit der Konstruktionsart wird deutlich. Die maximale Raumlufttemperatur bleibt unter der Raumlufttemperatur der anderen Konstruktionen.

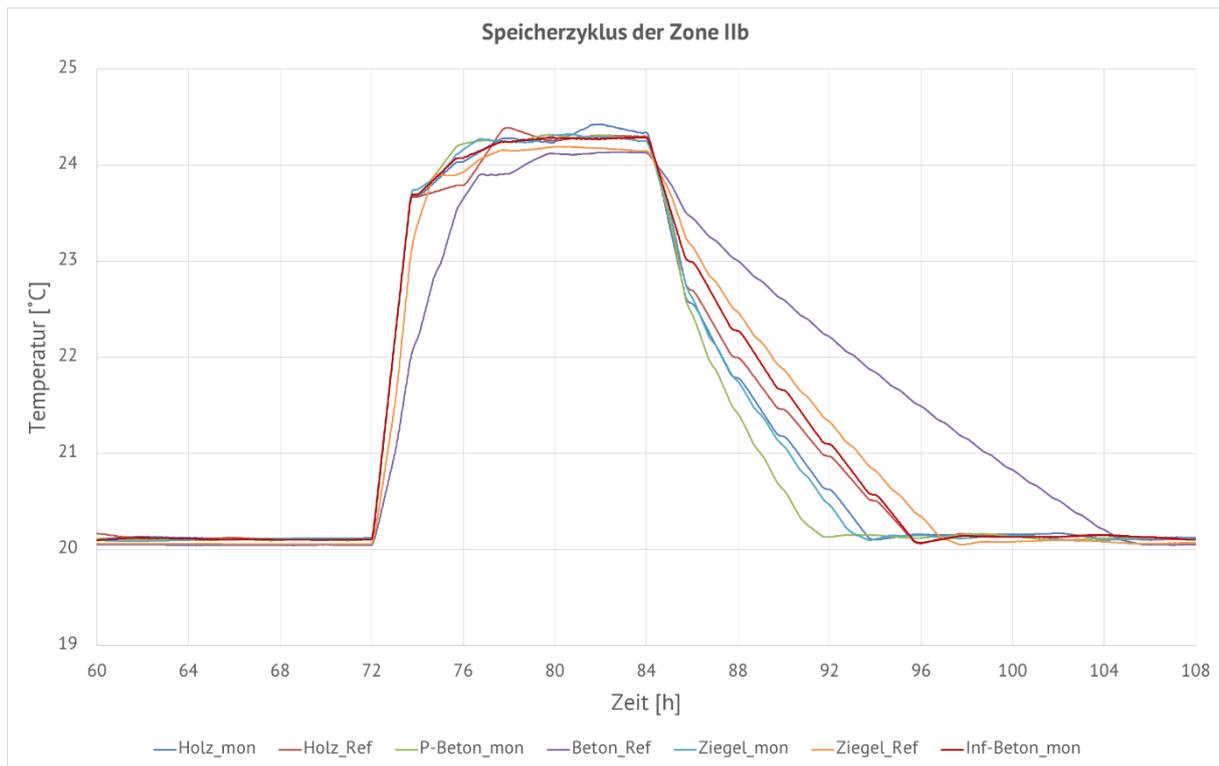


Abbildung 72: Beladungs-/Speicherzyklen, 4. Januar,  $Q_{source}/Q_{sink}=4$ , Mittelraum, Mittelgeschoss

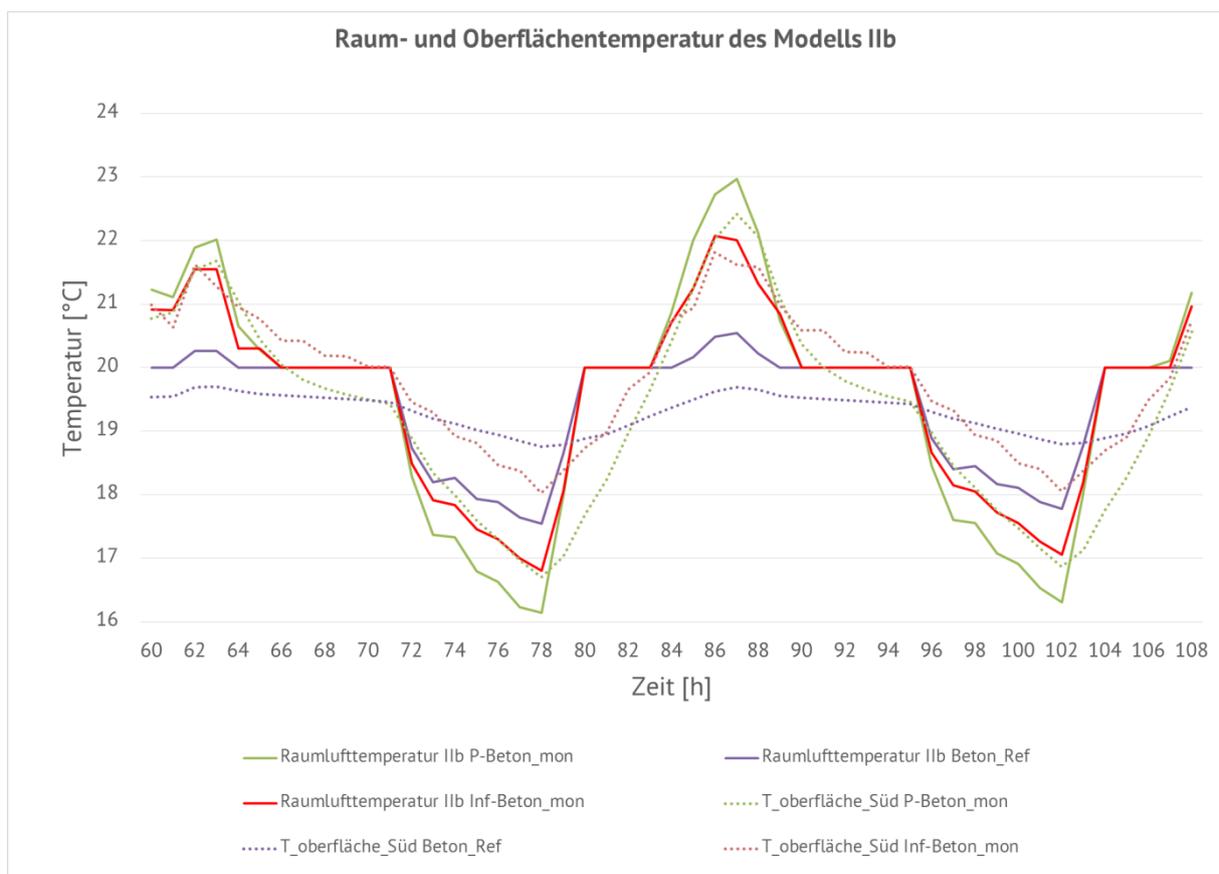


Abbildung 73: Beladungs-/Entladungszyklen, 4. Januar,  $Q_{source}/Q_{sink}=1$ , Mittelraum, Mittelgeschoss

Am Beispiel des Prüfraumes IIb (Mittelraum im mittleren Geschoss) werden die Zusammenhänge im Vergleich von Beton-Referenz und Porenbeton deutlich. Porenbeton weist eine geringere Speicherfähigkeit bei geringerer Wärmeeindringtiefe auf.

Beton kann auf Grund seiner Materialkennwerte, insbesondere auf Grund der höheren Masse, mehr Wärme speichern als Porenbeton. Keines der Materialien nutzt unter realen Bedingungen das gesamte Speichervermögen, die Obergrenze der akzeptablen Temperatur wird nicht erreicht, es ergibt sich keine Überhitzung. In der Zeit, in denen Wärmegewinne verfügbar sind, führen monolithische Materialien zu höheren Temperaturen als die jeweiligen Referenzkonstruktionen. In Zeiten ohne Wärmegewinne führen Sie zu geringeren Temperaturen. Die mittlere operative Temperatur ist daher nahezu gleich.

Für Wärmegewinne nach DIN (Geometrie nach DIN 13791 [66], äußere Lasten: TRY 04, Fenstergröße 3,5m<sup>2</sup>, innere lasten nach DIN 18599-2 [81]) haben monolithische und Referenzkonstruktionen ausreichend Speichermasse. Im abstrakten Modell sieht man jedoch, dass die Referenzkonstruktionen, besonders die Normalbetonkonstruktion, mit höheren Wärmegewinnen energetisch besser funktioniert, weil mehr Wärme gespeichert werden kann. Mit steigenden volatilen Gewinnen steigt die Bedeutung der Speichermasse.

#### 4.4.6 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass eine hohe Effizienz nur bei Nutzung der zur Verfügung stehenden volatilen Energien bei gleichzeitig minimalen Wärmeverlusten gewährleistet werden kann. Ein hoher solarer Deckungsgrad steht in direkter Abhängigkeit zum geringen Wärmeverlust und demnach geringen Wärmebedarf. Das Bürohaus 2226 zeigt dies eindrücklich durch die Realisierung von Außenwänden mit passivhaustauglichen U-Werten von knapp über 0,1 W/(m<sup>2</sup>K). Ein direkter, für den Nutzer spürbarer Zusammenhang zwischen monolithischem Bauen und erhöhter Effizienz bzw. erhöhter Behaglichkeit konnte nicht nachgewiesen werden. Die Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass im Nutzungsprofil Büro die Maximierung der Speichermasse zielführend ist. Im 2226 sind sowohl Boden, als auch Decke so ausgebildet, dass sie die reduzierte Speichermasse der Außenwände (im Vergleich zur Stahlbetonkonstruktion) kompensieren dürften.

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen hinsichtlich des Bürohauses 2226 weitere Schlussfolgerungen zu. Das Haus weist erhöhte Geschosshöhen auf, die einerseits mit einer verbesserten Thermik beim natürlichen Lüften, andererseits mit der Reduktion der Lüftungsverluste begründet werden. Die monolithischen Ziegelaußenwände sowie die Innenbauteile werden als Speichermasse angesetzt (vgl. Projektrecherche). Auf Basis der vorliegenden Simulationsergebnisse kann eine Bewertung des energetischen Konzeptes abgeleitet werden. Die Erhöhung der Geschosse führt zu höheren Transmissionswärmeverlusten über die Gebäudehülle, gleichzeitig zu höheren solaren Gewinnen in Folge größerer Fensterkonstruktionen. Die erhöhten solaren Gewinne führen temporär zur Erhöhung der Innenraumtemperaturen. Da die solaren Gewinne im 2226 auf Grund der innenbündig

eingebauten Fenster minimiert werden sollen, ist die Auswirkung relativ gering. Das erhöhte Luftvolumen soll dazu führen, dass seltener gelüftet werden muss, die Luftwechselrate soll geringer sein. Die Lüftungswärmeverluste bleiben allerdings gleich, wenn reduziert sich die Lüftungstaktung (es wird seltener gelüftet, dafür erhöht sich die auszutauschende Luftmenge). Während der Heizperiode wird primär CO<sub>2</sub>-, sekundär temperatur- und feuchtegeführt gelüftet. Wenn man voraussetzt, dass CO<sub>2</sub> schwerer als Luft ist, müsste bei geringer Luftzirkulation die Lüftungstaktung annähernd gleichbleiben. Da sich ein großes Luftvolumen langsamer erwärmt als ein geringes, sind die Raumlufttemperaturen in Folge der erhöhten Geschosse real geringer, was dazu führt, dass weniger Energie in der Speichermasse gespeichert werden kann. Die maximale Raumtemperatur reduziert sich. Gleichzeitig bietet das Haus durch eine um 16 % erhöhte Geschossigkeit 16 % mehr Speichermasse in den Außen- und Innenwänden. Das Verhältnis von  $Q_{\text{source}}$  zu  $Q_{\text{sink}}$  ist geringer, wenn  $Q_{\text{source}}$  annähernd gleichbleibe und  $Q_{\text{sink}}$  durch steigende Transmissionswärmeverluste und gleichbleibende Lüftungswärmeverluste stiege. Wenn  $Q_{\text{source}}$  annähernd gleichbleibe, würde der Ausnutzungsgrad sinken. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das architektonische Konzept des 2226 aus architektonischer Sicht klar, aus bauphysikalischer Sicht jedoch nicht zu begründen ist. Die Simulationsergebnisse zeigen zudem, dass reine Betonkonstruktionen im Bürobau energetisch zielführender wären.

## 5 AP 4 Ökologisch-ökonomische Betrachtung

Die Kosten stellen bei vielen Bauvorhaben das wichtigste Kriterium bei der Auswahl aus unterschiedlichen Varianten dar. Dabei müssen neben den Investitionskosten die Kosten für Betrieb und Nutzung sowie für die Verwertung beachtet werden (Lebenszykluskosten). Des Weiteren finden ökologische Aspekte immer stärkeren Eingang in die Entscheidungsfindung. Im Folgenden werden diese Aspekte für die untersuchten Bauteile und zwei Beispielgebäude dargestellt.

### 5.1 Allgemeines Vorgehen

Zur Bilanzierung wird ein *bottom-up*-Ansatz gewählt. Die Bauteile werden also als Summe der einzelnen Komponenten betrachtet. Hieraus resultieren drei wichtige Vorteile:

#### 1) Begrenzte Datengrundlage

Die genutzten Kostenkennwerte beruhen auf statistischen bzw. repräsentativen Erhebungen zu bereits errichteten Gebäuden. Diese Erhebungen umfassen vor allem häufig gebaute Konstruktionen. Die Datenbasis für die hier untersuchten monolithischen Konstruktionen ist gering einzuschätzen. Durch den *bottom-up*-Ansatz können Komponenten, die üblicher Weise getrennt verbaut werden, kombiniert werden.

#### 2) Bessere Vergleichbarkeit ähnlicher Varianten

Ein weiterer Vorteil ergibt sich bei der Bewertung ähnlicher Bauteile, die sich z.B. nur in jeweils zwei Materialstärken unterscheiden. Durch die Kalkulation der einzelnen Komponenten entsteht so ein einheitlicher Kostenansatz für ähnliche Bauteile oder Bauteile mit identischen Komponenten.

#### 3) Ökologische Bilanzierung

Für die ökologische Betrachtung müssen die Bauteile in ihre einzelnen Komponenten zerlegt werden, da Kennwerte zur ökologischen Bewertung überwiegend nur für einzelne Komponenten vorliegen.

Der gleiche Ansatz wird für die Bilanzierung des Gesamtgebäudes gewählt. Somit entsteht zum einen ein homogener Ansatz in der Bilanzierung, zum anderen können unterschiedliche Wandaufbauten in einem Gebäude kombiniert werden. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, unterschiedliche Bauteile mit diversen wünschenswerten Eigenschaften zu kombinieren und spezifische Nachteile der Komponenten untereinander auszugleichen.

Das so entstehende Baukasten-Prinzip kann in einer Software-Applikation nutzerfreundlich umgesetzt werden. Die resultierenden Eigenschaften der jeweiligen Varianten, wie z.B. Herstellungskosten oder Treibhausgasemissionen, werden automatisch kumuliert und dargestellt.

### 5.1.1 Nutzungsdauern und Betrachtungszeitraum

Die Wahl des Betrachtungszeitraumes hat einen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung, sowohl auf die ökonomische, als auch auf die ökologische Bilanz. In Abbildung 65 sind exemplarisch zwei Bauteile skizziert, die unterschiedliche Lebensdauern aufweisen. Ein Betrachtungszeitraum beispielsweise, der zwischen der Lebensdauer des Bauteils 1 und 2 liegt, führt dazu, dass in der Bilanz für Bauteil 1 im Gegensatz zum Bauteil 2 ein zusätzlicher Austausch mit allen hiermit verbundenen Auswirkungen wie bspw. der Entsorgung des ausgetauschten ursprünglichen Bauteils enthalten ist (vgl. Betrachtungszeitraum 3). Werden Betrachtungszeiträume gewählt, die etwas weniger oder etwas mehr als das Mehrfache der Lebensdauern der betrachteten Bauteile betragen, hat dies entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse.

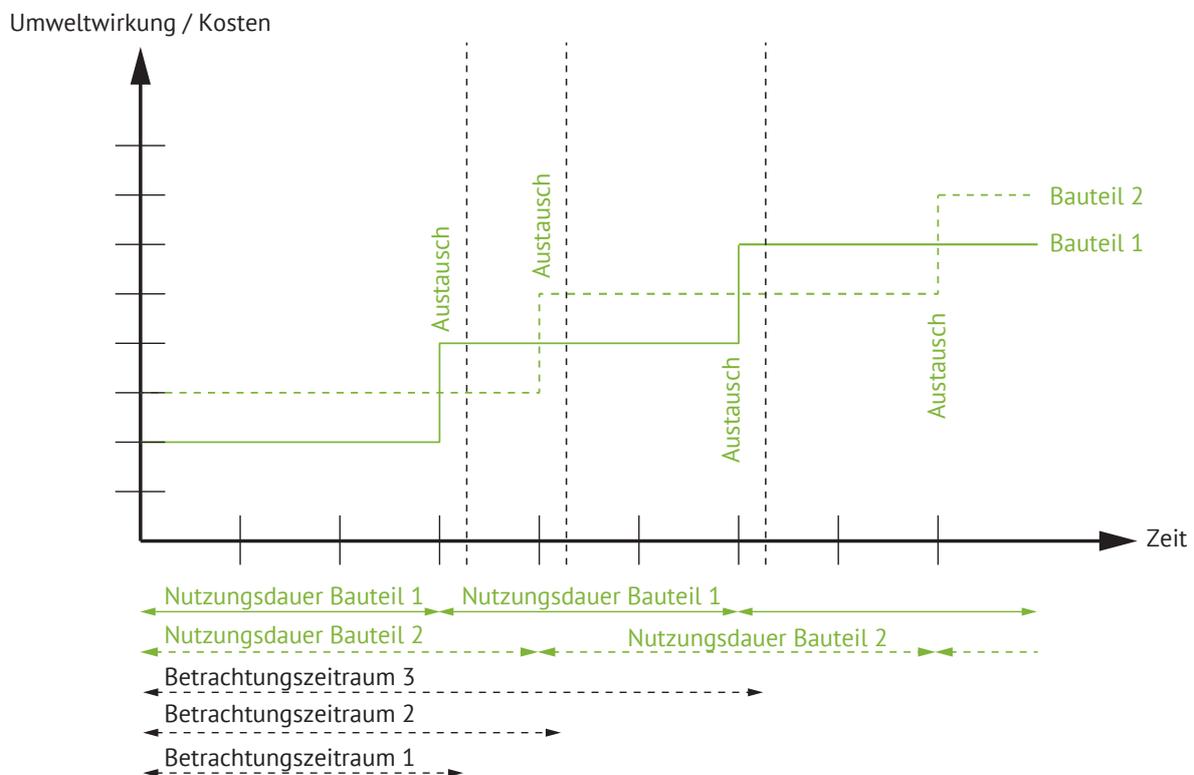


Abbildung 74: Nutzungsdauern und Betrachtungszeitraum: Skizze

In der vorliegenden Forschungsarbeit stehen monolithische, massive Bauteile im Fokus. Diesen Konstruktionen werden gemäß „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ Lebensdauern größer gleich 50 Jahren zugeordnet. Die Architekturanalysen zeigten, dass auch die den monolithischen Konstruktionen zugeordneten längeren Nutzungsdauern zu den aufgeführten Argumenten gehörten, monolithisch zu bauen. Die vorliegenden Untersuchungen sollen zudem möglichst realitätsnah sein. Der 50-Jahre-Betrachtungszeitraum erscheint hinsichtlich der Forschungsfragen zu kurz, zudem können Zeitspannen für Lebensdauern nicht in eine statische Betrachtung von Lebenszykluskosten

integriert werden. Für die vorliegende Arbeit wurde daher entschieden, einen gegenüber BNB und DGNB längeren Betrachtungszeitraum von 75 Jahren zu wählen.

### 5.1.2 Relevanz beschreibender Datensätze und Indikatoren der Ökobilanzierung

Die Ökobau.dat stellt Datensätze für die Ökobilanzierung in Form von Umwelt-Produktdeklarationen (*Environmental Product Declaration*, EPD) zur Verfügung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die aktuelle Version Ökobau.dat 2013 verwendet. Die EPDs folgen im Aufbau und Inhalt der EN 15804 „Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012“. Die EPDs, die nach Umstellungen auf die Regeln der EN 15804 bereitgestellt wurden, bieten eine einheitliche Struktur und einen einheitlichen Informationsgehalt. Die Datensätze enthalten Angaben zum Material oder Produkt, zu 25 Umweltwirkungen sowie zur Methode deren Ermittlung bzw. Informationen zu deren Systemgrenzen und zur Anwendbarkeit.

„Prinzipiell gibt es in der Ökobau.dat folgende Datensatz-Typen:

- Generisch erstellte Datensätze (= Generischer Datensatz), nicht-verifiziert, basierend auf technischem Wissen, Literatur, o. Ä., mit Sicherheitszuschlag versehen (Generische Datensätze)
- Repräsentative Datensätze von Industrieverbänden (= EPD-Datensatz), basierend auf verifizierten Ökobilanzen von repräsentativ erhobenen Daten von Industrieverbänden (Muster-Datensätze aus Muster-EPDs)
- Durchschnittliche Datensätze von Industrieverbänden oder mehrerer Firmen (= EPD-Datensatz), basierend auf verifizierten Ökobilanzen von Durchschnittsberechnungen aus erhobenen Daten (Durchschnitts-Datensätze aus Durchschnitts-EPDs)
- Hersteller-spezifische Datensätze (= EPD-Datensatz), basierend auf verifizierten Ökobilanzen von spezifischen Herstellerdaten (Spezifische Datensätze aus Hersteller-spezifischen EPDs)<sup>2</sup>

Die Wahl der jeweiligen für die Bilanzierung genutzten Datensätze definiert bereits eine Schärfe bzw. Unschärfe der Beurteilung von Bauteilen und Materialien. Sicherheitsaufschläge sind direkt in den EPDs vermerkt, um im Rahmen der Ökobilanz möglichst den „*worst case*“ abzubilden. Die Sicherheitszuschläge können 0 %, 10 %, 20 % und 30 % betragen. An der Höhe des Sicherheitszuschlages kann im Groben abgelesen werden, wie hoch die Datengenauigkeit der ursprünglichen Datensätze eingestuft wird. An Datensätze, die direkt vom Hersteller aus der Industrie stammen, sollten erhöhte Verifizierungsanforderungen bestehen, da die Werte der EPD schlussendlich direkten Einfluss auf die Vermarktung des Produktes haben und somit ein

---

<sup>2</sup> Erläuterungsdokument ÖKOBADAT 2013.1. (Stand: 27. August 2013; Aufgestellt: PE International AG; BBSR). Abrufbar unter:  
[http://www.oekobaudat.de/fileadmin/downloads/oekobaudat2013/OEKOBADAT\\_2013\\_Erlaeuterungsdokument\\_2013-08-15.pdf](http://www.oekobaudat.de/fileadmin/downloads/oekobaudat2013/OEKOBADAT_2013_Erlaeuterungsdokument_2013-08-15.pdf). Aufruf: 01.05.2016

gesteigertes Eigeninteresse besteht, gute Werte zu etablieren. Die Datensätze werden durch die Ökobau.dat als verifiziert ausgegeben. Berichte über die Ermittlung der Werte können in der Regel online beim jeweiligen Hersteller eingesehen werden, die Richtigkeit der Zahlen kann vom Anwender allerdings kaum geprüft werden. Eine etwaige Fehlerabweichung innerhalb der Bestimmungsmethoden wird nicht deutlich. Eigene Plausibilitätsprüfungen im Rahmen vergleichender Ökobilanzierungen sind jedoch praktikabel.

Die Mischung verschiedener Datensatztypen erscheint im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung zunächst nicht ratsam, ist allerdings unausweichlich, da für die untersuchten Materialien oftmals keine Auswahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Datensatztypen besteht. Zudem können nicht alle Materialien abgebildet werden, so dass im Rahmen von Ökobilanzen häufig die Daten ähnlicher Materialien genutzt werden müssen.

Ein Vergleich verschiedener Datensatztypen zur Bewertung von Wärmedämmstoffen, die als WDVS verbaut werden können, zeigt die Auswirkung der darstellenden Indikatoren auf die jeweiligen Ergebnisse. Verglichen werden exemplarisch reine Dämmstoffschichten von Polystyrol, Mineral- und Holzwole mit dem Wärmedurchgangswiderstand von 3,0 (m<sup>2</sup>·K)/W, vgl. Abbildung 75. Folgende Datensätze werden genutzt:

- EPS W/D 040 – IVH | EPD-IVH-2009311-D | IBU  
End of life – EPS Wand und Boden – IVH | EPD-IVH-2009311-D
- Mineralwolle (Fassadendämmung) (A1-A3) | Durchschnittsdatsatz | PE INTERNATIONAL  
End of life Bauschutt-Deponierung (C1-C4, D) | Durchschnittsdatsatz | PE INTERNATIONAL
- Holzfaserdämmplatte DFF – Egger | EPD-EHW-2008611-D | IBU  
End of life – DFF \_ Egger | EPD-EHW-2008611-D | IBU

Der Datensatz für Mineralwolle erhält einen 10 %-Sicherheitsaufschlag. Die anderen Datensätze sind aufschlagsfrei.

Die vergleichende Auswertung der Ökobilanzen verdeutlicht Folgendes:

- Bei 17 der 25 Umweltwirkungen sind geringe Werte als positiv, bei 8 Umweltwirkungen hingegen als negativ zu bewerten: bei den Umweltwirkungen, die das Recyclingpotential, die energetische Verwertung oder den regenerativen Anteil an Ressourcen beziffern, haben hohe Werte positive Auswirkungen, bei allen anderen Umweltwirkungen niedrige.
- Negative Bilanzen sind möglich und drücken „Guthaben“ aus: die Bindung von CO<sub>2</sub> führt beispielsweise bei Holz und Holzwerkstoffen zur negativen CO<sub>2</sub>-Bilanz.
- Die Wahl der beschreibenden und bewertenden Umweltwirkung ist ausschlaggebend für eine vergleichende Bewertung: Betrachtet man die Bilanzen des Globalen Erwärmungspotentials GWP, schneidet die Holzfaserdämmung im Vergleich am besten ab. Vergleicht man hingegen den erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergieanteil, schneidet die Mineralwolle am besten ab. Bei den Umweltwirkungen nach DGNB (Treibhauspotential GWP; Ozonschichtabbaupotential ODP; Ozonbildungspotential POCP, Versauerungspotential AP; Überdüngungspotential EP) hat die EPS-Dämmung, außer beim GWP, die geringsten Werte bzw. die positivste Auswirkung.

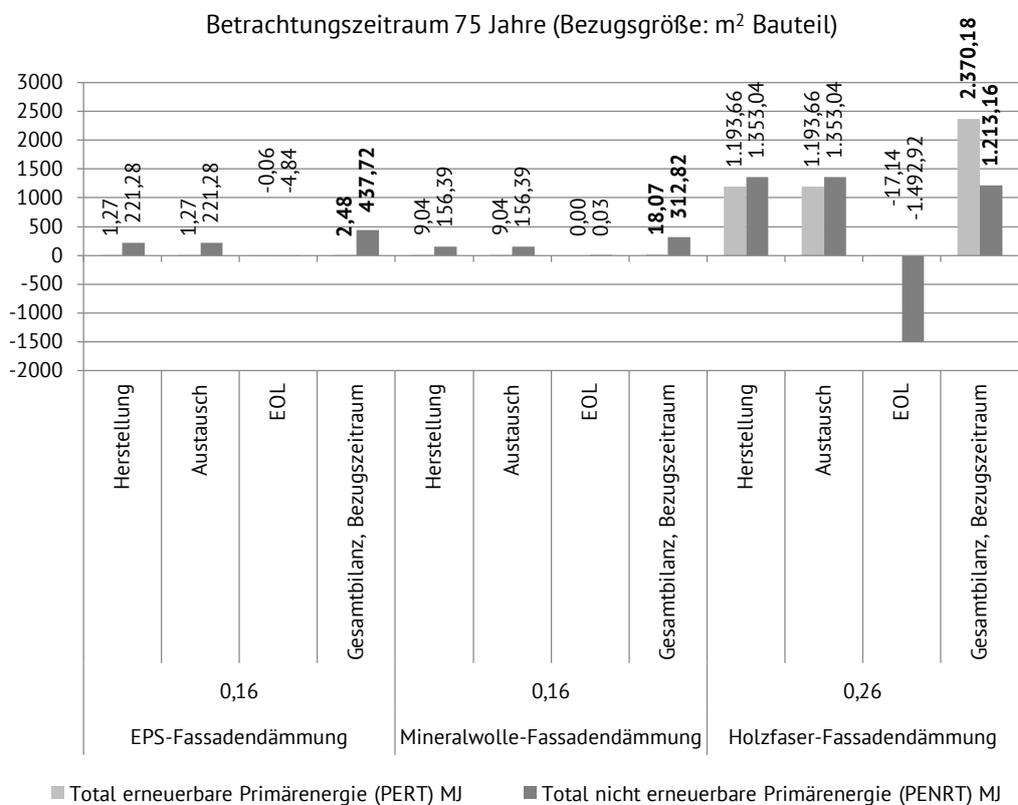
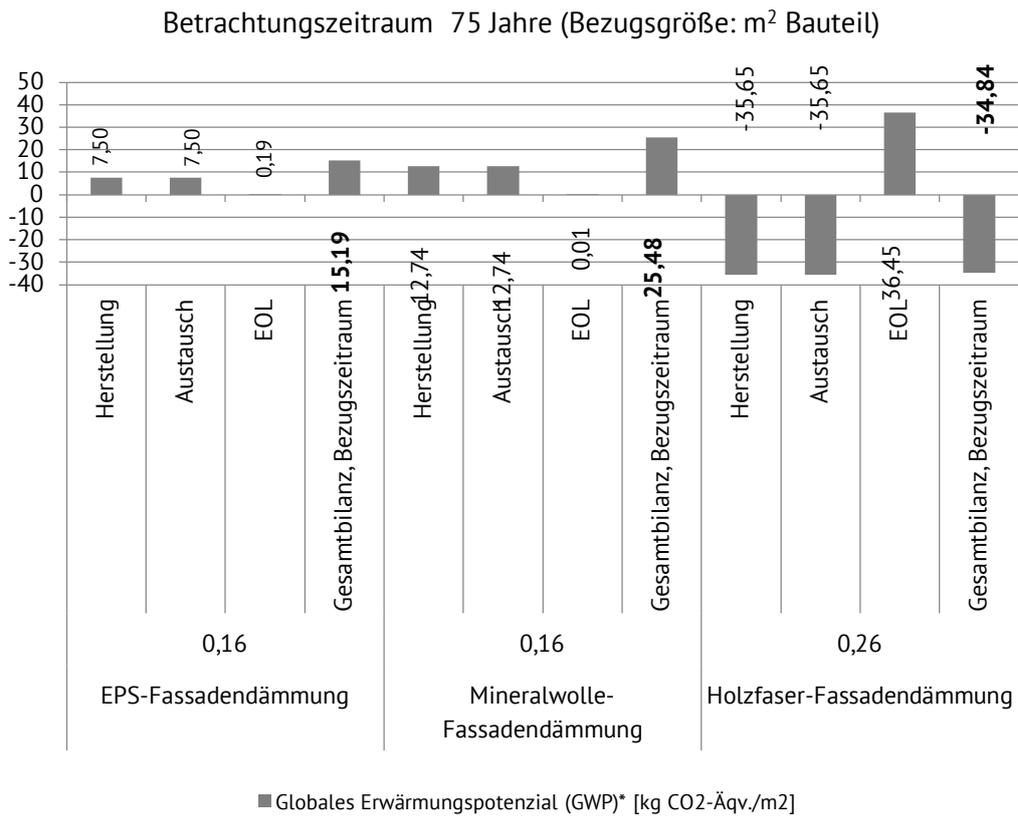


Abbildung 75: GWP, PERT, PENRT: Vergleich dreier Dämmstoffe (eigene Darstellung; Daten: Ökobau.dat 2013)

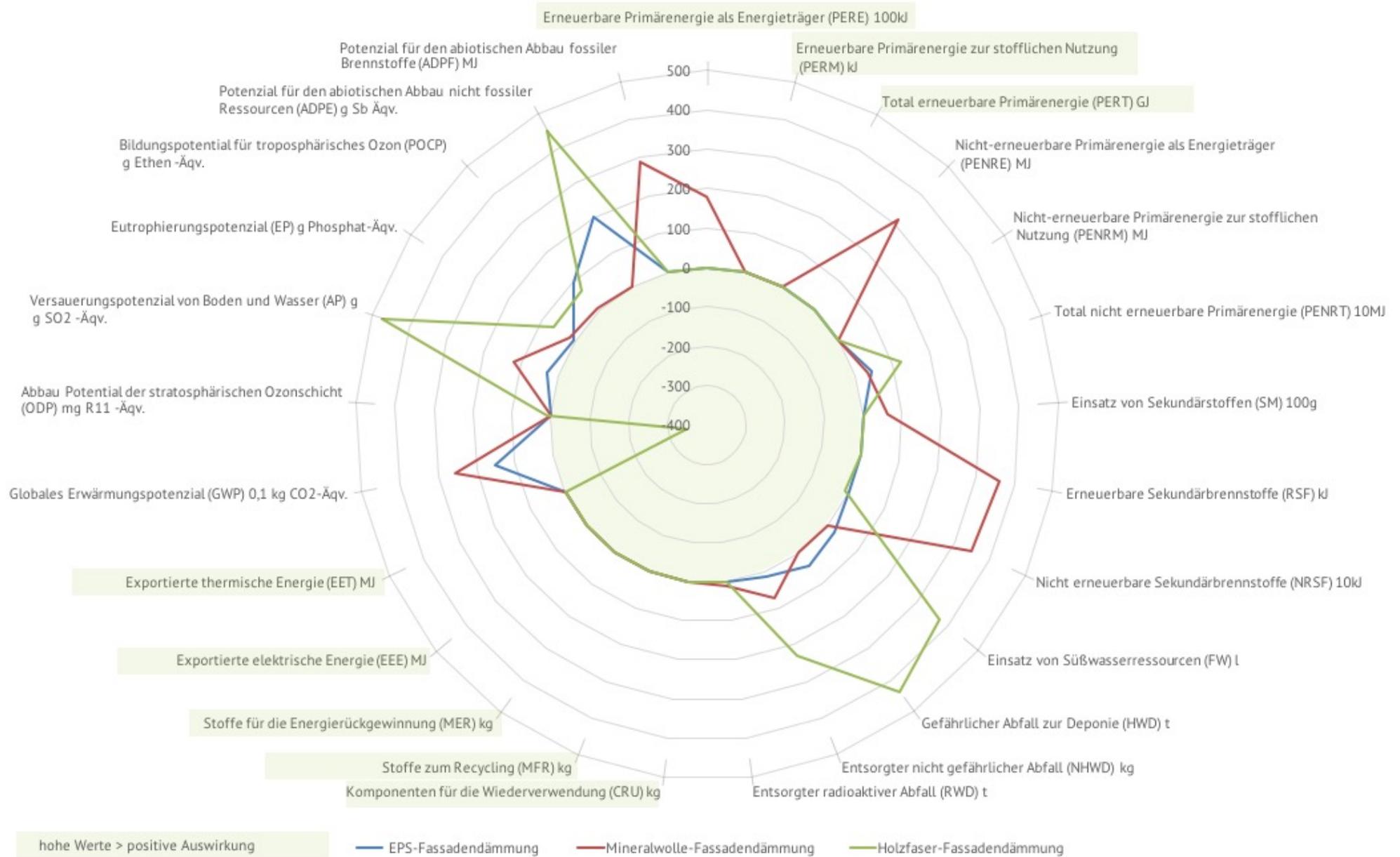


Abbildung 76: 30 Umweltwirkungen dreier Dämmmaterialien (eigene Darstellung; Daten: Ökobau.dat 2013)

### 5.1.3 Ökonomische Bilanz: Lebenszykluskostenbilanz (LCC)

Die Ermittlung von Lebenszykluskosten (LZK) dient zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen bei Investitionsalternativen. Im Rahmen des Forschungsprojektes werden die LZK zur ökonomischen Bewertung der ausgearbeiteten Varianten herangezogen. Mit ihrer Hilfe lassen sich die Varianten kostenseitig beurteilen. Analysiert werden im Rahmen der LZK-Rechnung neben den Baukosten auch die Nutzungskosten und Kosten für den Rückbau. Die Kalkulation erfolgt nach GEFMA 220-2 bzw. ISO 15686-5:2008, in den drei Phasen:

- 1) Herstellung: Kosten zur Herstellung des Bauteils.
- 2) Betrieb und Nutzung: Kosten für den Betrieb des Bauteils.
- 3) Verwertung: Kosten für den vollständigen Rückbau.

Die Bewertung der Kosten, unter Berücksichtigung der Zeitpunkte, erfolgt durch Barwerte mittels Kalkulationstableau.<sup>3</sup> Die Vorgehensweise entspricht den Anforderungen von DGNB/BNB. Im Anhang findet sich eine Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des Diskontierungszinssatzes auf die Lebenszykluskosten.

Für sämtliche Kosten wird jeweils eine Kostenspanne einschließlich erwartetem Wert angegeben. Zur Ermittlung der Gesamtkosten einzelner Varianten gehören neben den Baukosten die Baunebenkosten, u.a. für behördliche Prüfungen, Unterhaltung der Baustelle, Planungsleistungen und Bauherrenaufgaben. Da eine detaillierte Aufstellung der Baunebenkosten bei fiktiven Bauprojekten nicht möglich ist, werden diese üblicherweise mit einem Prozentsatz von 15 bis 30 % den Baukosten zugeschlagen. Hier wird, für das Gesamtgebäude, ein pauschaler Ansatz von 20 % der Herstellungskosten für die Baunebenkosten gewählt. Bei der Bauteilbetrachtung entfällt dieser Aufschlag.

#### 5.1.3.1 Herstellung

Die Herstellung umfasst alle Schritte, die zur Herstellung des Bauteils nötig sind, beginnend bei der Gewinnung der Rohstoffe, dem Verarbeiten zu Halbzeugen und Produkten, sowie dem Transport und Einbau zur bzw. auf der Baustelle. Entsprechend der Zielsetzung des Projekts werden bei der Herstellung die Kostengruppen (KG) 300 bis 350 betrachtet [90].

Fördermittel bleiben in der Kalkulation unberücksichtigt. Allerdings ist denkbar, anhand der Ergebnisse Fördermöglichkeiten im Bereich Bau anzupassen oder zu ergänzen. Die Kalkulation der Baukosten der einzelnen Varianten erfolgt auf Basis der Herstellungskosten. Finanzierungskosten bleiben im Rahmen der Kalkulation außen vor, da diese spezifisch für den

---

<sup>3</sup> Der Barwert drückt den Wert künftiger Zahlungsströme in der Gegenwart aus. Zur Berechnung des Barwerts werden alle über den Betrachtungszeitraum anfallenden jährlichen Zahlungsströme auf einen spezifischen Zeitpunkt abgezinst. Es wird ein Diskontierungszinssatz ( $i$ ) von 4,0 % zugrunde gelegt, der an langfristig marktübliche, gewichtete Kapitalkosten von Wohnungsunternehmen angelehnt ist.

jeweiligen Bauherren bzw. Bestandshalter sind und die Rangfolge der Varianten davon unabhängig ist.

#### 5.1.3.2 Betrieb und Nutzung

Über die Nutzungsdauer der Gebäude fallen Nutzungskosten als wiederkehrende Folgekosten an. Aus diesem Grund erfolgt die ökonomische Bewertung mehrerer Varianten auf Basis der LZK (Erst- und Folgekosten).

Unter Betriebskosten werden alle Kosten zusammengefasst, die nach der Herstellung und vor der Verwertung anfallen. Dies sind:

- 1) Energiekosten (Heizkosten)
- 2) Kosten für Prüfung, Instandhaltung, Wartung (PIW)
- 3) Kosten für Instandsetzung und Ersatzinvestition (Reinvest)

Für die Energiekosten werden nur die Arbeitskosten im Bereich Heizung berücksichtigt, also Kosten für die bezogenen Energiemengen zur Beheizung des Gebäudes. Grundgebühren sowie Kosten für Instandhaltung der technischen Gebäudeausrüstung etc. werden nicht berücksichtigt, da diese je nach Projekt variieren bzw. nicht Gegenstand der Untersuchung sind. Die Wärmeerzeugung wird als perfekter Erzeuger und in allen Varianten identisch angenommen. Für den Arbeitspreis wird eine langfristige Steigerung von 2,0 % p.a. angenommen. Die Energiebedarfe wurden bereits in Abschnitt 4.4 im Rahmen der Gebäudesimulation ermittelt. Diese weisen nur geringe Abweichungen auf, sodass die **Energiebedarfe für alle** untersuchten **Varianten konstant** angenommen werden. Somit sind auch die Energiekosten über alle Varianten konstant.

Kosten für PIW werden mit einem pauschalen Ansatz, bezogen auf die Herstellungskosten, abgebildet. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass bei fast allen betrachteten Bauteilen die gleichen Oberflächen erstellt werden, die entscheidend für die entstehenden Kosten im Bereich PIW sind. Die Berechnung der jährlichen PIW-Kosten in den Varianten erfolgt nach festgelegten Prozentsätzen bezogen auf die Herstellungskosten der Bauteile. Für die PIW-Kosten der hier betrachteten Bauteile wird ein Prozentsatz von 0,2 % p.a. angesetzt.

Anmerkung: Aus Nutzersicht sind vor allem die als Nebenkosten umlagefähigen Verbrauchskosten und Kosten für PIW von Interesse. Aus Eigentümersicht haben die Instandsetzungskosten einen übergeordneten Stellenwert, da diese i.d.R. keine auf den Nutzer umlagefähigen Nebenkosten sind.

Kosten für Instandsetzung und Ersatzinvestition (Reinvest) werden auf Grundlage der Herstellungskosten ebenfalls mit dem o.g. Zinssatz (2,0 %) indexiert und als Barwert ( $i=4,0\%$ ) berücksichtigt. Zudem werden neben den Kosten für Instandsetzung und Ersatzinvestition auch damit verbundene Kosten für den Rückbau bilanziert.

Für Betrieb und Nutzung wird eine Nutzungsdauer von 75 Jahren angenommen. Dies entspricht der angenommenen Nutzungsdauer für die tragenden Bauteile (Außenwände). Zur genauen Ermittlung des Barwertes werden für alle Bauteile definierte, mittlere Nutzungsdauern angenommen. Die Nutzungsdauern der Bauteile stammen aus Schmitz et al. (2015) [91].

### 5.1.3.3 Verwertung

In der Verwertungsphase erfolgt der Rückbau des Gebäudes. Rückbau bezeichnet die vollständige Wiederherstellung der Grundstückeigenschaften, wie sie vor der Baumaßnahme vorgefunden wurden. Deshalb werden für den Rückbau sämtliche damit einhergehenden Kosten und Erlöse bilanziert. Diese umfassen neben den Kosten für den Rückbau auch Kosten und Erlöse für die Deponierung und Verwertung der Baustoffe.

Die Rückbaukosten sind nicht in jedem Fall Bestandteil einer LZK-Berechnung, da sie aufgrund des langen Zeitraums bis zu ihrer Fälligkeit nicht hinreichend genau prognostizierbar sind. Überdies ist ihr Anteil an den LZK durch Diskontierung i.d.R. gering. Die Rückbaukosten der Varianten werden auf Basis von Kostenkennwerten in Abhängigkeit des Volumens ermittelt.

### 5.1.4 Ökologische Bilanz: Life Cycle Assessment (LCA)

Zur besseren Vergleichbarkeit zwischen ökonomischer und ökologischer Bilanz werden neben den oben vorgestellten die im Folgenden beschriebenen Annahmen zugrunde gelegt. Eine „Aufzinsung“ bzw. „Barwertbildung“ für die Emissionen, wie bei LZK, wird im LCA nicht angewendet.

Im Rahmen des LCA werden folgende Indikatoren betrachtet:

- 1 Klimawandel: Treibhauspotential (*Global Warming Potential, GWP*)
- 2 Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht: Ozonschichtabbaupotential (*Ozone Depletion Potential, ODP*)
- 3 Sommersmog: Ozonbildungspotential (*Photochemical Ozone Creation Potential, POCP*)
- 4 Wald- und Fischsterben: Versauerungspotential (*Acid Potential, AP*)
- 5 Überdüngung: Überdüngungspotential (*Eutrophication Potential, EP*)
- 6 Energieressourcen Verbrauch: Nicht-erneuerbare Primärenergie (*Primary energy non-renewable, total, PENRT*)

Alle Indikatoren werden aus Ökobau.dat (Stand 03/2017) entnommen. Bei Bauteilen, die aus mehreren Komponenten bestehen (z.B. Fenster), wird die Zusammensetzung nach eLCA angenommen.

Im Rahmen der Bilanzierung wurden die Phasen A1, A2, A3, B2, B5, C1, C2, C3 sowie D berücksichtigt, somit sind folgende Phasen des Lebenszyklus abgebildet:

- Modul A1: Rohstoffversorgung
- Modul A2: Transport der Rohstoffe zum Produktionsstätte und interne Transporte
- Modul A3: Herstellung im Werk
- Modul B2: Instandhaltung
- Modul B5: Erneuerung
- Modul B6: Energieeinsatz für den Betrieb des Gebäudes (hier: ausschl. Heizwärme)
- Modul C1: Rückbau/Abbruch
- Modul C2: Transport
- Modul C3: Abfallbehandlung
- Modul D: Wiederverwertungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotential (Gutschrift)

Der Transport zur Baustelle (A4) und der Einbau ins Gebäude (A5) wurden in allen Varianten nicht berücksichtigt, da diesbezüglich nicht für alle Varianten Daten vorlagen. Der Anteil dieser Module an den einzelnen Indikatoren kann je nach Menge und Gewicht des Bauteils deutlich variieren. Nimmt man den LKW-Transport von Normalbeton als schwerste und ungünstigste Variante an, liegt der Anteil für Transport an den gesamten Emissionen bei allen Indikatoren bei unter 5%, lediglich das Überdüngungspotential liegt mit rd. 25% deutlich höher. Einen mindestens ebenso großen Einfluss haben die Art, Bahn, Schiff, etc., und die Entfernung des Transports, daher kann bei einer sehr allgemeinen Betrachtung wie dieser keine absolute Einordnung stattfinden. Zudem schwankt der Aufwand für den Transport zur Baustelle deutlich mit der jeweiligen lokalen Verfügbarkeit. Analoges gilt für die Deponierung (C4). Das Modul B7 *Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes* wurde nicht betrachtet, da dieser vor allem durch die Nutzung beeinflusst wird und für alle Varianten gleich ist.

#### 5.1.5 Flächenverbrauch

Neben den oben beschriebenen ökologischen und ökonomischen Indikatoren wird der Flächenverbrauch erhoben. Hierzu wird die Bruttogrundfläche (BGF) der Modellgebäude berechnet. Diese setzt sich gem. DIN 277 [92] zusammen aus der Nutzungsfläche (NuF) und den Flächen für die Wände (KGF). Zur Bewertung unterschiedlicher Varianten wird das Verhältnis aus NuF zu BGF herangezogen. Ohne Wände beträgt die Wanddicke 0, das Verhältnis entspricht dann 1.

Die Flächeneffizienz ergänzt sowohl die ökonomische als auch die ökologische Bewertung. Bei der ökonomischen Bewertung werden ein Grundstückspreis und typische Werte für GRZ und GFZ zu Grunde gelegt, sodass zur Herstellung der gleichen NuF bei unterschiedlichen Varianten unterschiedliche BGF benötigt werden. In die ökologische Betrachtung fließt die Flächeneffizienz als zusätzlicher Indikator ein. Hintergrund ist hier das 30 ha-Ziel der Bundesregierung. Bei diesem steht die Flächenneuanspruchnahme – kurz Flächenverbrauch – im Vordergrund, da Fläche zwar nicht verbraucht werden kann, aber eine endliche Ressource ist. Zielsetzung der Bundesregierung ist, den täglichen Flächenverbrauch in Deutschland von aktuell rd. 66 ha/Tag auf 30 ha/Tag im Jahr 2030 zu reduzieren. Somit soll eine Zersiedlung der Landschaft und neben Weiterem der durch Zersiedlung steigende Bedarf für Mobilität gebremst werden. Mit dem Mobilitätsbedarf werden auch Primär- und Endenergieverbrauch sowie Emissionen reduziert [93].

## 5.2 Ergebnisse AP 4

Die Bewertung der einzelnen Varianten erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die ungestörten Wandquerschnitte untereinander verglichen und gegenübergestellt. Anschließend fließen die Ergebnisse aus der thermischen Simulation der Bauteile und Räume ein. Hierzu werden neben den Kosten und Emissionen für die oben beschriebenen Phasen auch die Energieaufwendungen, sowie Fenster berücksichtigt. Die Auswahl der untersuchten Varianten erfolgt auf Grundlage der bauphysikalischen Untersuchung und aktuell gängiger Kombinationen von Materialien für Außen- und Innenwände (vgl. Punkt 3.1.4). In beiden Schritten werden die im obigen Abschnitt dargestellten ökonomischen und ökologischen Kennwerte verglichen. Zusätzlich wurden für die

Bauweisen mit Beton und Porenbeton Bewehrungen vorgesehen. Diese entsprechen, wie in der Baubranche üblich, den nach Schneider minimal nötigen Massen (vgl. Anhang 9.7).

Des Weiteren wurden bei der Kalkulation marktübliche Bauprodukte zu Grunde gelegt, die zum Teil leicht von den in Punkt 3.1.4 dargestellten Maßen abweichen. Eine Übersicht findet sich in Anhang 9.7.

### 5.2.1 Ungestörte Wandquerschnitte

#### Ökonomische Bilanz

Zuerst werden die ungestörten Querschnitte betrachtet. Da keine weiteren Bauteile wie Fenster oder Geschossdecken, die in allen Varianten gleich oder ähnlich sind, betrachtet werden, zeigt sich deutlich der Einfluss der unterschiedlichen Wandaufbauten. Betrachtet werden die Lebenszykluskosten je  $m^2$  Wandfläche.

Bei der Untersuchung der Lebenszykluskosten der ungestörten Querschnitte zeigt sich, dass bei allen Varianten die Herstellungskosten mit einem Anteil von über 90 % dominierend sind (vgl. Abbildung 77). Die LZK liegen zwischen 153 (Porenbeton, monolithisch) und 466 €/m<sup>2</sup><sub>Wandfläche</sub> (Holz, monolithisch). Zudem zeigt sich, dass die monolithischen Bauweisen, außer Holz, geringere LZK aufweisen als die korrespondierenden mehrschichtigen Bauweisen. Über beide Bauweisen hinweg können drei Stufen identifiziert werden: Porenbeton und Dämm-Ziegel (jeweils monolithisch) weisen Kosten von rd. 175 €/m<sup>2</sup><sub>Wandfläche</sub> auf. Die WDVS-Varianten mit Beton, CEM-III-Beton und Ziegel, sowie monolithischer Infraleichtbeton weisen Kosten von rd. 200 €/m<sup>2</sup><sub>Wandfläche</sub> auf. Die Holzbauweisen – monolithisch und Sandwichbauweise – schlagen mit rd. 465 bzw. 285 €/m<sup>2</sup><sub>Wandfläche</sub> zu Buche. Während bei diesen der Großteil der LZK im Baumaterial begründet ist, ist allen Bauweisen der zweiten Gruppe gemein, dass diese zum Teil aus Dämmmaterialien bestehen (beim Porenbeton in Form von Blähton direkt im Baumaterial selbst).

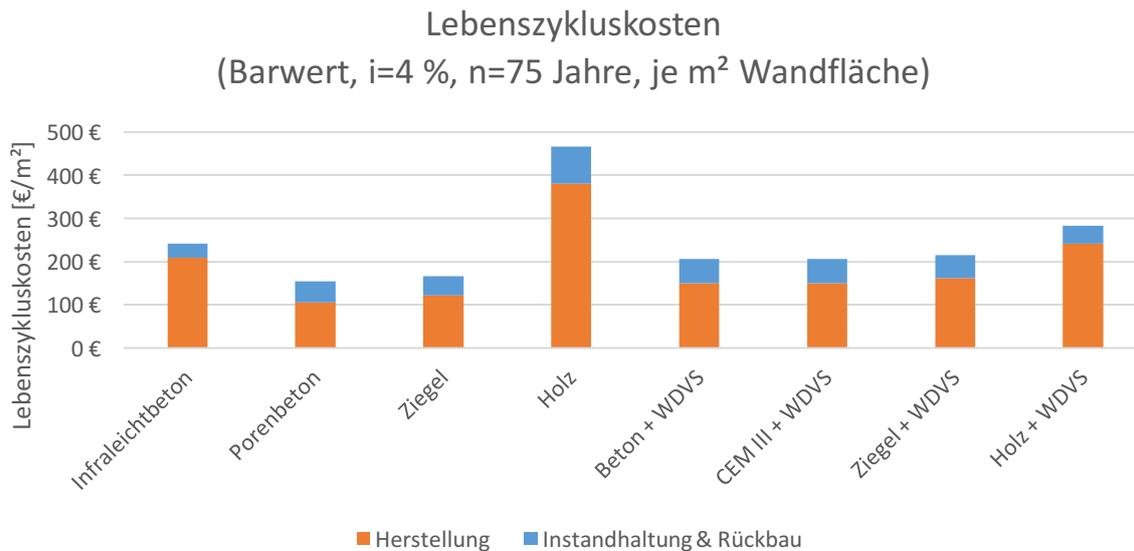


Abbildung 77: Lebenszykluskosten je  $m^2$  Wandfläche der Varianten (Barwert, 75 Jahre,  $i=4\%$ ) (eigene Darstellung)

Die höheren Kosten der mehrschichtigen Bauweisen resultieren zum einen aus höheren Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen durch die Erneuerung des WDVS nach 40 Jahren und den höheren Herstellungskosten durch einen zusätzlichen Arbeitsschritt. Dies zeigt sich auch in der folgenden Sensitivitätsanalyse (Abbildung 95, S. 123).

Der Kostenanteil für Instandhaltung & Rückbau variiert zwischen 13 und 31 % der LZK.

### Ökologische Bilanz

Die ökologische Bilanz gliedert sich in die in Punkt 5.1.4 beschriebenen sechs Aspekte. Hinzu kommt der Flächenverbrauch, auf den in Abschnitt 5.3 auch aus ökonomischer Sicht gesondert eingegangen wird. Das Recycling-Potential wird am Ende der Ausführungen zur ökologischen Bilanz separat ausgewiesen.

Betrachtet man die Treibhausgasemissionen, zeigen sich deutliche Unterschiede. Die Varianten mit Holz weisen in der Herstellung eine negative  $CO_2$ -Bilanz auf, da hier das Treibhausgas im Baumaterial gebunden wird. Alle anderen Varianten weisen sowohl für Herstellung als auch Instandhaltung & Rückbau Emissionen zwischen 50 und 120  $kg-CO_2\text{-Äq./m}^2$  auf. Bis auf die beiden Holz-Varianten kann der Anteil für Instandhaltung & Rückbau jeweils vernachlässigt werden. Bei der Verwertung der Holz-Varianten werden rund  $2/3$  der Emissionen frei, welche vorher gebunden wurden. Somit resultiert nur für die Varianten Holz monolithisch eine Treibhausgasbilanz kleiner 0 und für alle anderen Bauweisen Emissionen per Saldo von 20 bis 100  $kg-CO_2\text{-Äq./m}^2$ . (vgl. Abbildung 78)

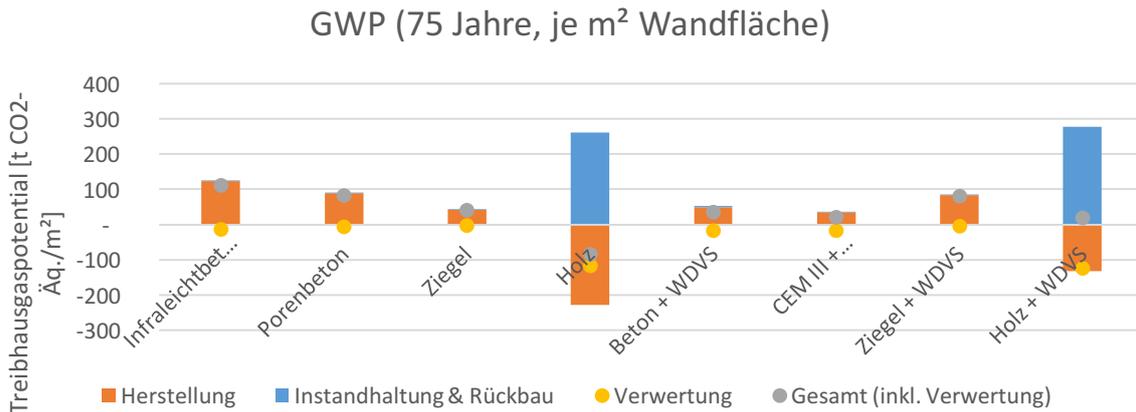


Abbildung 78: Treibhauspotential: CO<sub>2</sub>-Emissionen (GWP) (eigene Darstellung)

Bzgl. des Abbaupotentials von Ozon resultiert ein deutlich differenzierteres Bild. Die Emissionen können zum einen deutlich den Dämmstoffen (WDVS) zugeordnet werden; der Wert liegt hier, abhängig von der benötigten Dicke, bei rd. 1 kg R11-Äq. Zum anderen werden bei der Verwertung von Holz R11-Äq. freigesetzt, sodass diese beiden Versionen erneut deutlich hervorstechen. Die Holz+WDVS-Bauweise weist die höchsten Emissionen auf, während alle monolithischen Bauweisen (ohne Holz) keine Emissionen aufweisen. Betrachtet man ebenfalls die Verwertung am Ende des Lebenszyklus, so ergeben sich für die Varianten Infralicht- und Porenbeton, Beton+WDVS und CEM III+WDVS per Saldo negative Emissionen und für beide Holz-Varianten sowie für die Variante Ziegel+WDVS positive Emissionen (vgl. Abbildung 79).

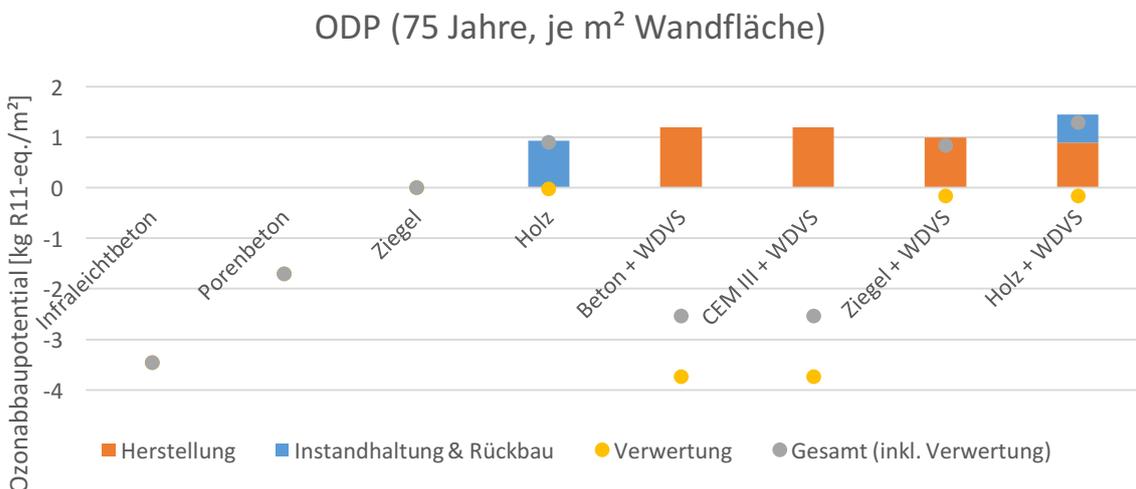


Abbildung 79: Ozonschichtabbaupotential: R11-Emissionen (ODP) (eigene Darstellung)

Die Bilanzierung von POCP und AP zeigt, dass wieder die Herstellung der Wand deutlich dominiert (Abbildung 80 und Abbildung 81). Wie zuvor können hier nur für Holz und nur beim Versauerungspotential eine bilanziell neutrale Bauweise erhoben werden. Bezüglich der POCP-Bilanz liegen die Emissionen bei rd. 0,2 kg-Ethen-Äq./m<sup>2</sup>. Ausnahme hiervon ist die mit höheren

Emissionen belastete Infraleichtbeton-Bauweise. Porenbeton und Dämmziegel weisen mit 0,01 bzw. 0,003 kg-Ethen-Äq./m<sup>2</sup> die geringsten Emissionswerte auf.

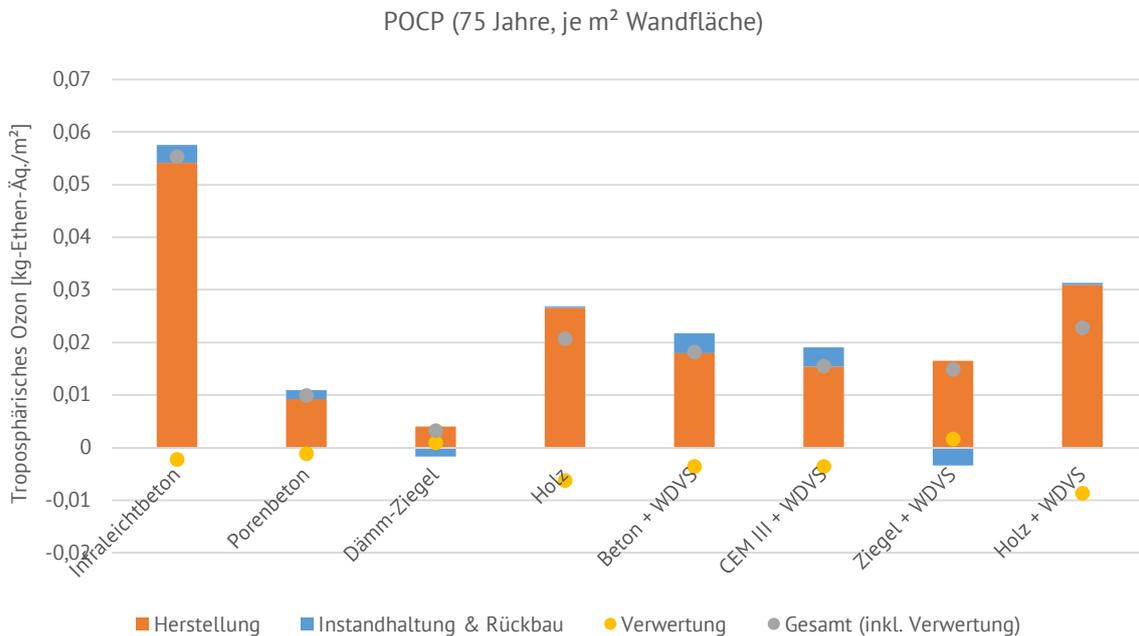


Abbildung 80: Ozonbildungspotential: Ethen-Emissionen (POCP) (eigene Darstellung)

Das Versauerungspotential (AP) zeigt eine deutlichere Differenzierung mit Werten zwischen 0 bis 0,1 und 0,75 kg-SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup>. Die Varianten Dämm-Ziegel, Ziegel+WDVS und Holz+WDVS weisen mit 0,1 kg-SO<sub>2</sub>-Äq./m<sup>2</sup> die geringsten Versauerungspotentiale auf. Analog zu den Treibhausgasemissionen erhalten die Varianten mit Holz eine AP-Gutschrift. In Summe weist die Variante Holz+WDVS mit einer neutralen Bilanz das geringste Versauerungspotential auf (vgl. Abbildung 81).

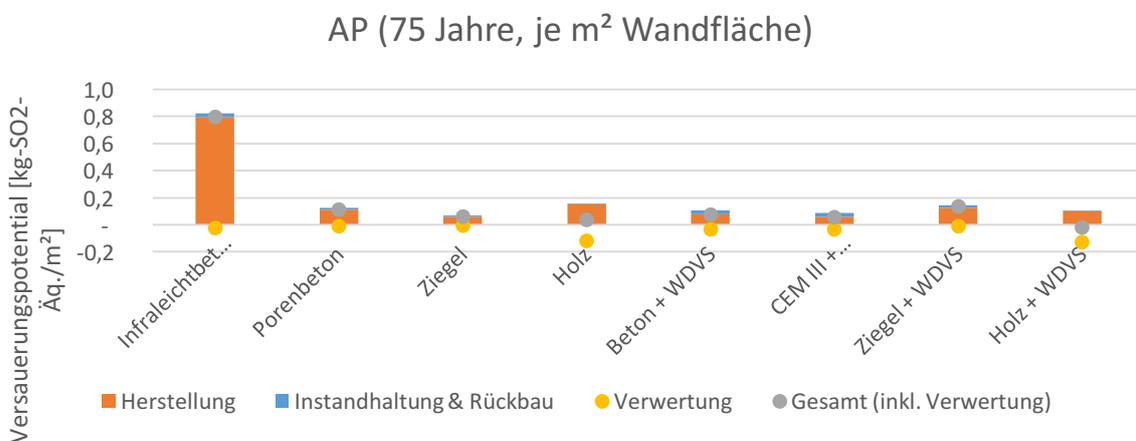


Abbildung 81: Versauerungspotential: SO<sub>2</sub>-Emissionen (AP) (eigene Darstellung)

Das Eutrophierungspotential (EP), dargestellt in Abbildung 82, weist wieder eine deutliche Differenzierung auf. Hier kann klar zwischen den Varianten mit und ohne WDVS unterschieden werden. Während die monolithischen Varianten Emissionen von 0,01 bis 0,05 kg-PO<sub>4</sub>-Äq. aufweisen, fallen bei den mehrschichtigen Bauweisen deutlich höhere Emissionen zwischen 0,06 und 0,12 kg-PO<sub>4</sub>-Äq. an. Beim Vergleich mit den gewählten Dämmstoffdicken von 12 bis 5 cm zeigt sich deutlich, dass die Emissionen dem WDVS zuzuordnen sind. Da bei der Verwertung kaum Gutschriften erfolgen, zeigt sich per Saldo auch hier das gleiche Ergebnis.

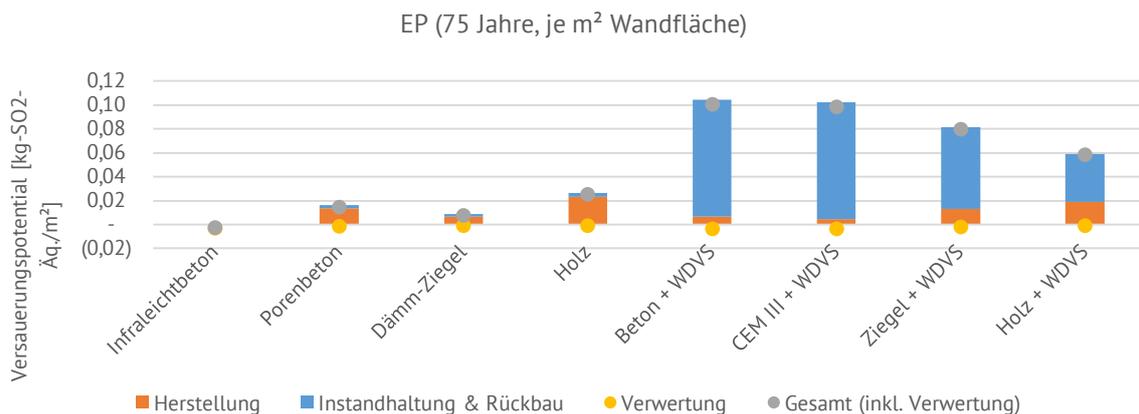


Abbildung 82: Überdüngungspotenzial: PO<sub>4</sub>-Emissionen (EP) (eigene Darstellung)

Beim Einsatz von PENRT resultieren deutliche Unterschiede (vgl. Abbildung 83). Auffällig ist hier der deutlich höhere Primärenergieeinsatz für Infraleichtbeton (rd. 500 kWh/m<sup>2</sup>), der zum größten Teil auf die Herstellung des Blähtons zurück zu führen ist. Der Primärenergieeinsatz ist somit drei- bis siebenmal so hoch wie für die anderen monolithischen Varianten mit einem Einsatz an Primärenergie von 115 bis 151 kWh/m<sup>2</sup>. Wieder kann der Anteil für Instandhaltung und Rückbau vernachlässigt werden. Wird zudem die stoffliche oder energetische Verwertung nach dem Rückbau betrachtet, zeigen sich deutliche Unterschiede. Außer bei Holz stellt die Verwertung einen vernachlässigbaren zusätzlichen Primärenergieeinsatz dar. Die Gesamtbewertung verschiebt sich also nicht. Bei Holz können für die energetische Nutzung Primärenergieträger geschont werden, sodass eine deutliche Gutschrift erfolgt. Beide Holzvarianten weisen per Saldo einen negativen Primärenergiebedarf auf und stellen somit die primärenergetisch günstigste Variante dar.

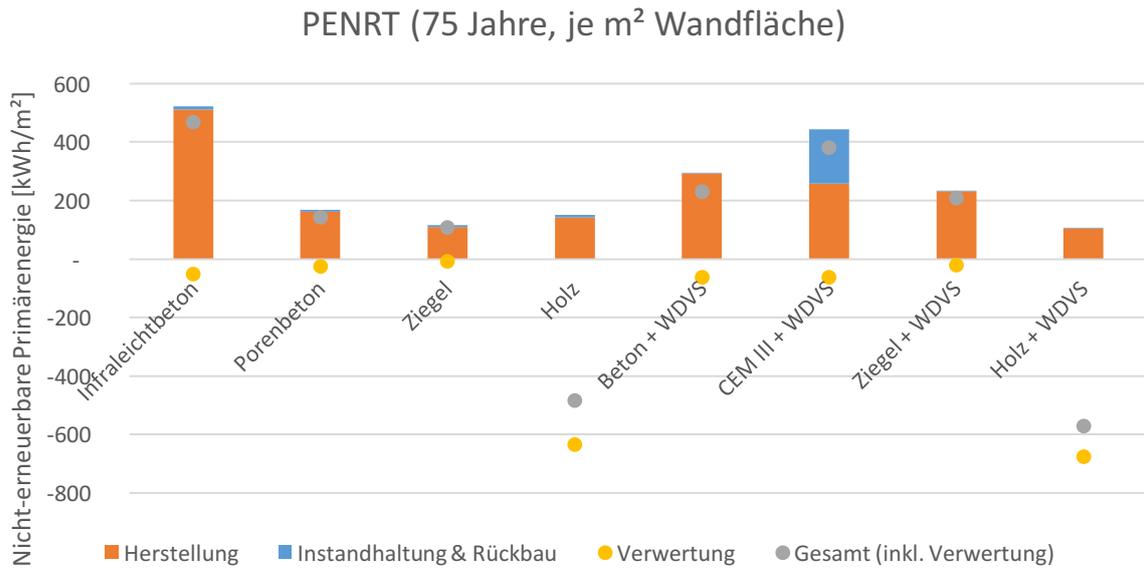


Abbildung 83: Bedarf nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT) (eigene Darstellung)

## Untersuchung zur Korrelation zwischen Kosten und Umwelteinfluss

Betrachtet man abschließend die Korrelation zwischen LZK und Emissionen bzw. Primärenergieeinsatz, zeigt sich bei keinem Umweltindikator eine klare lineare Korrelation (Korrelationskoeffizient  $r$  nach Bravais-Pearson: 0,0529, 0,0671, 0,5180, 0,1273 bzw. 0,0775 für Treibhausgas-Emissionen, nicht-erneuerbarer Primärenergieeinsatz, Versauerungspotential, Bildungspotential für Troposphärisches Ozon und Eutrophierungspotential respektive).

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass die LZK der Varianten von 153 bis 466 €/m<sup>2</sup> insgesamt eine deutlich Streuung aufweisen. Abgesehen von der monolithischen Holzbauweise sind mehrschichtige Bauweisen auf Grund der zusätzlichen Dämmschicht teurer. Holz+WDVS stellt in fast allen ökologischen Betrachtungen die günstigste Variante dar. Dies ist durchgängig auf die energetische Verwertung am Ende des Lebenszyklus zurückzuführen. Der Einsatz von CEM-III-Beton führt nur in einigen Varianten zu einer Reduktion der Emissionen gegenüber Normalbeton. Dies liegt zum Teil daran, dass der Anteil an CEM-III-Beton am Normalbeton bereits bei rd. 30 % liegt. Bezogen auf die Treibhausgase stellen die monolithischen Poren- und Infralichtbetonbauweisen die ungünstigsten Varianten dar. Infralichtbeton führt ebenfalls zu einer deutlichen Steigerung der POCP- und AP-Emissionen, welche deutlich über denen der anderen Varianten liegen, dasselbe gilt für den Anteil nicht-erneuerbarer Primärenergie. Beim Eutrophierungspotential zeigt sich deutlich der Einfluss des Dämmmaterials, was bei allen mehrschichtigen Bauweisen zu einer signifikant schlechteren Bilanz führt. Abgesehen von Infralichtbeton weisen alle anderen Varianten über alle Indikatoren hinweg kaum signifikante Unterschiede auf.

### 5.2.2 Gebäudemodell Wohnen / Büro

Im Gegensatz zur dargestellten Bauteilbilanzierung werden im Folgenden die Umwelteinflüsse und LZK auf die Nutzungsfläche (NuF) bezogen. Hierzu werden neben den Außenwänden auch Innenwände und Deck bzw. Böden und ein Fundament berücksichtigt. Auch Baunebenkosten fließen in diese Kalkulation ein. Somit wird zum einen ein reales Gebäude abgebildet und zum anderen eine übliche Bezugsgröße gewählt. Dies erleichtert den Vergleich mit ähnlichen und weiteren spezifischen Kennwerten wie Herstellungskosten inkl. aller Kostengruppen und Instandhaltungs- oder Reinigungskosten. Letztere sind vor allem für die gewerbliche Nutzung, z.B. als Büro üblich und relevant.

#### Beschreibung Gebäudemodell

Die folgenden ökologischen und ökonomischen Betrachtungen basieren auf den in Punkt 5.2.1 genannten Außenwandquerschnitten. Neben diesen werden zusätzlich Innenwände, Geschosdecken, oberste Geschosdecken und ein Fundament berücksichtigt. Zusammen mit den in Punkt 3.1.4 dargestellten Nutzungsarten und Abmaßen kann ein vollständiges Gebäude abgebildet werden. Hierzu werden die in Tabelle 16 dargestellten Kombinationen angenommen. Zudem wird eine Gründung als Streifenfundament angenommen. Deren Abmaße entsprechen der angenommenen NuF zzgl. des zusätzlichen Bedarfs durch unterschiedliche Wandstärken, wie in Punkt 5.2.1 beschrieben. Die Außenwände entsprechen denen aus Punkt 5.2.1. Innenwände

werden mit einer Dicke von 11,5 cm zzgl. einer Beschichtung angenommen. Die Geschosdecke besteht aus Normalbeton und hat eine Materialstärke von 22 cm. Bei der gedämmten obersten Geschosdecke (OGD), die den Abschluss der thermischen Hülle bildet, wird eine zusätzliche Dämmung von 17 cm berücksichtigt. Eine Ausnahme bildet die CEM-III-Beton-Variante, bei der sämtliche Normalbetonanteile durch CEM-III-Beton substituiert wurden.

*Tabelle 17: Variantenbildung für die ökonomische und ökologische Betrachtung – Aufbauten (eigene Darstellung)*

NR.	AUSSENWAND	MATERIAL	
		Außenwand	Innenwand
1	Porenbeton	Porenbeton	Porenbeton
2	Infraleichtbeton	Infraleichtbeton	Infraleichtbeton
3	Normalbeton + WDVS (Referenz)	Normalbeton + WDVS (Referenz)	Normalbeton
4	Holz	Holz	Holz
5	Holz + WDVS	Holz + WDVS	Holz
6	Ziegel	Hochlochziegel	Hochlochziegel
7	Ziegel + WDVS	Hochlochziegel + WDVS	Hochlochziegel
8	CEM-III-Beton+WDVS	CEM-III-Beton+WDVS	CEM-III-Beton

Neben den Konstruktionen werden zwei Nutzungsarten differenziert. Diese unterscheiden sich neben der benötigten Energie für Raumwärme durch die Anzahl der einzelnen Bauteile (vgl. Tabelle 17).

*Tabelle 18: Variantenbildung für die ökonomische und ökologische Betrachtung – Stückzahlen (eigene Darstellung)*

NUTZUNG BEZEICHNUNG BAUTEIL	AUSSENWAND				INNENWAND	
	Lang m. Fenster	Kurz m. Fenster	Lang	Kurz	Lang	Kurz m. Tür
BÜRO	24	12	-	12	24	12
WOHNEN	6	24	12	-	33	24

Daneben werden je Gebäude eine Gründung (Streifenfundament), 24 Zwischengeschosdecken und 12 oberste Geschosdecken (jeweils á 19,8 m<sup>2</sup>) berücksichtigt. Für die Fenster wird ein liches Maß von 3,5 m<sup>2</sup> angenommen. Die Bauteile ergeben in beiden Varianten ein dreigeschossiges Gebäude mit 712,8 m<sup>2</sup><sub>NuF</sub>, abzüglich Durchbrüchen für Treppen.

Auf Grund der geringen Abweichung wird für jede Variante ein Heizwärmebedarf von 48 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Wohngebäude und 85 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Büronutzung angenommen. Der Anlagenwirkungsgrad wird jeweils mit 90 % gewählt.

Ökonomische Bilanz

Analog zur Bauteilbetrachtung gliedern sich die Kosten wieder in die Bereiche Herstellung, Betrieb, Rückbau und Verwertung. Die Kosten werden ebenfalls als Barwert angegeben.

Analog zur Bauteilbetrachtung ergibt sich für die LZK ein ähnliches Bild, bei dem die Herstellungskosten die LZK dominieren. Die Heizkosten schlagen bei allen Varianten mit 89.215 € zu buche. Dies bedeutet einen LZK-Anteil je nach Variante von 6 bis 10 %. Der Anteil für Reinvest und Rückbau liegt bei allen Varianten bei rd. 22 %, bei den Holzvarianten leicht niedriger bei 18 %. Die Kosten für Prüfung, Inspektion & Wartung wurden mit 0,2 % p.a. der Herstellungskosten angenommen (in Anlehnung an [94]). Somit summieren sich die LZK für die monolithische und die Sandwichbauweise aus Holz auf rd. 1,5 bzw. 1,4 Mio. € und somit zu den teuersten Varianten. Die Bauweise mit monolithischem Porenbeton hat mit rd. 90.000 € die geringsten LZK. Alle anderen Varianten liegen zwischen 0,937 und 0,96 Mio. € bezogen auf den Lebenszyklus von 75 Jahren (vgl. Abbildung 84).

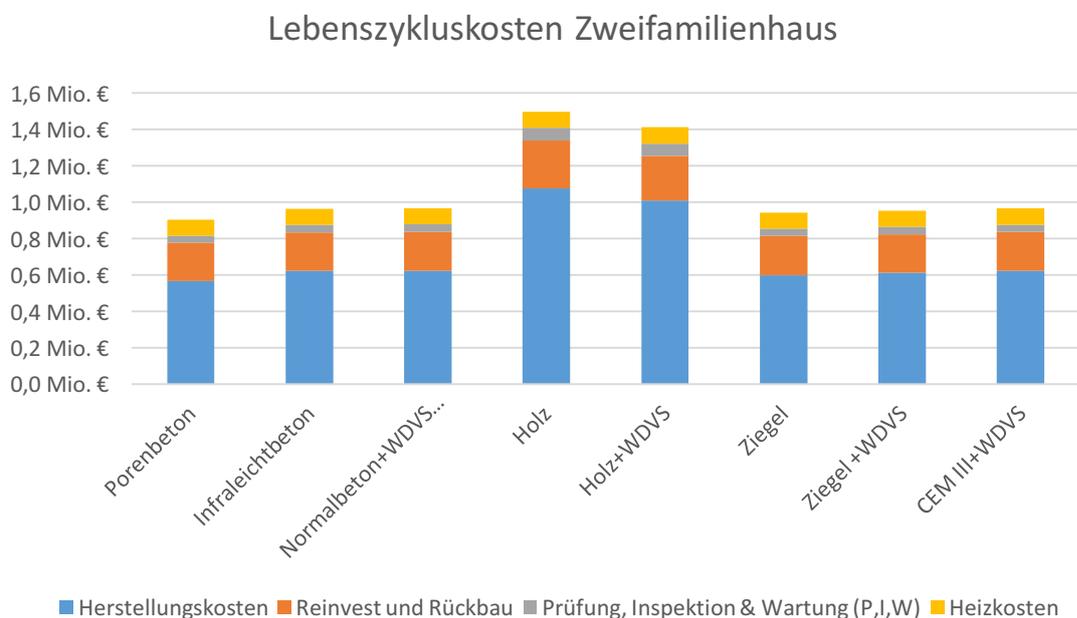


Abbildung 84: Lebenszykluskosten Wohngebäude (eigene Darstellung)

Abbildung 85 zeigt für das Bürogebäude auf Grund derselben Bauweisen das gleiche Bild. Die Heizkosten liegen hier bei 158.000 € bzw. einem Anteil von 10 % an den gesamten LZK. Der Anteil für Reinvest und Rückbau liegt, etwas geringer als bei der Wohnnutzung, bei 21 %. Die gesamten LZK variieren je nach Bauweise zwischen 1,7 Mio. € für beide Holz-Varianten und der günstigsten Variante Porenbeton mit 1,47 Mio. €. Alle anderen Varianten liegen hinsichtlich der LZK zwischen 1,51 und 1,58 Mio. €.

## Lebenszykluskosten Bürogebäude

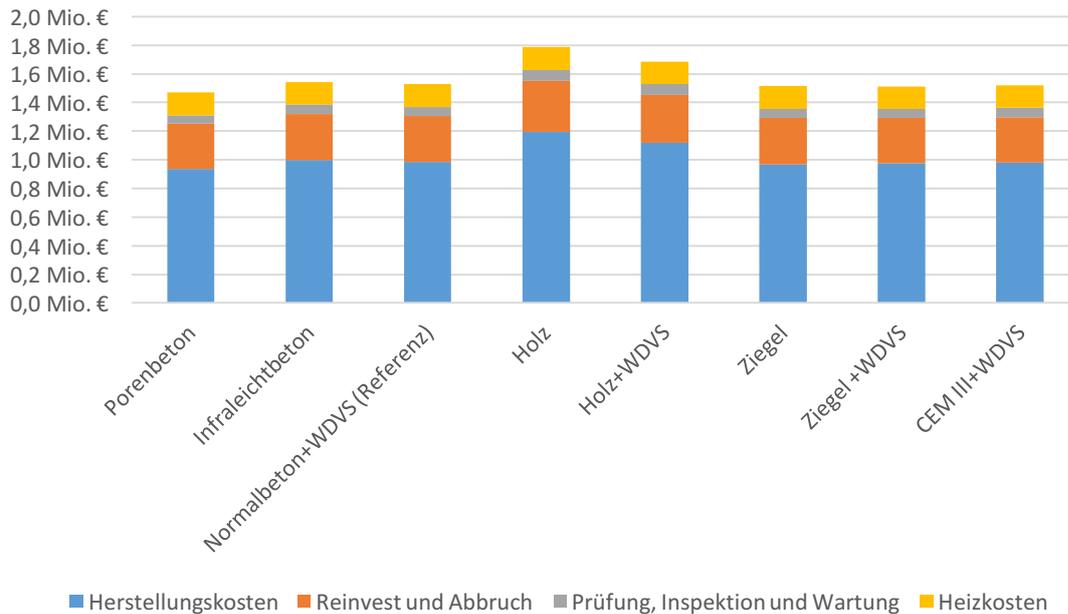


Abbildung 85: Lebenszykluskosten Bürogebäude (eigene Darstellung)

### Ökologische Bilanz

Die ökologische Bilanz, wie in Punkt 5.1.4 beschrieben, gliedert sich ebenfalls in sechs Aspekte:

- 1 Klimawandel: Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP)
- 2 Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht: Ozonschichtabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP)
- 3 Sommersmog: Ozonbildungspotential (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP)
- 4 Wald- und Fischsterben: Versauerungspotential (Acid Potential, AP)
- 5 Überdüngung: Überdüngungspotential (Eutrophication Potential, EP)
- 6 Energieressourcen Verbrauch: Nicht-erneuerbare Primärenergie (Primary energy non-renewable, total, PENRT)

Hinzu kommt der Flächenverbrauch, auf den in Abschnitt 5.3 auch aus ökonomischer Sicht gesondert eingegangen wird. Das Recycling-Potential wird am Ende der Ausführungen zur Ökobilanz separat ausgewiesen.

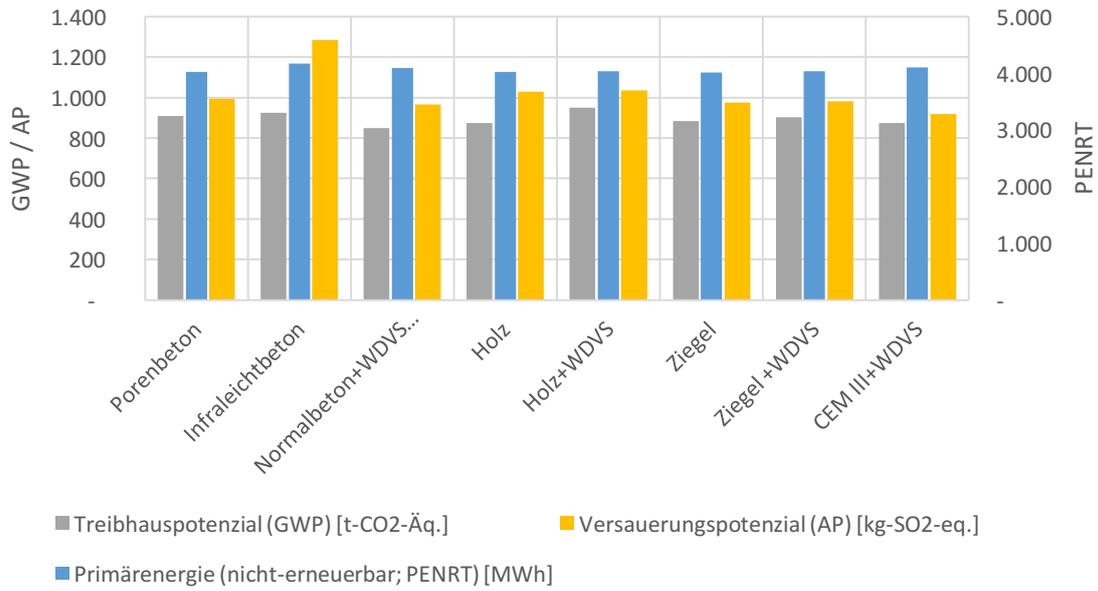
Die Umweltauswirkungen auf Grund der Gebäudebeheizung, wurden wie oben beschrieben auf Basis einer Erdgasheizung bilanziert. Eine mögliche Kühlung im Sommer wurde nicht bilanziert. Somit ergeben sich für die einzelnen Umweltauswirkungen spezifische Faktoren und Emissionen je Nutzungsart über den gesamten Lebenszyklus (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Umweltauswirkungen für die Bereitstellung von Heizwärme (eigene Darstellung, Quelle: Ökobau.dat)

<b>UMWELTAUSWIRKUNG</b>	<b>PRIMÄRENERGIE (NICHT-ERNEUERBAR; PENRT)</b> [kWh <sub>PE</sub> ]	<b>TROPOSPHÄRISCHES OZON (POCP)</b> [kg-Ethen-Äq.]	<b>TREIBHAUSPOTENTIAL (GWP)</b> [kg-CO <sub>2</sub> -eq.]	<b>VERSAUERUNGSPOTENTIAL (AP)</b> [kg-SO <sub>2</sub> -eq.]
<b>FAKTOR [1/KWH<sub>HWB</sub>]</b>	1,197	0,0000330	0,265	0,000197
<b>WOHNEN [1/75A]</b>	3.072.960	84,6	681.152	504,4
<b>BÜRO [1/75A]</b>	5.441.700	149,8	1.206.206	893,2

Die Diagramme (Abbildung 86 und Abbildung 87) zeigen deutlich die geringeren Umweltauswirkungen des Wohngebäudes im Vergleich zum Bürogebäude. Zudem zeigt sich, dass die Bauarten deutlich im Eutrophierungspotential variieren (Infraleichtbeton: 1.247 und CEM III-Beton: 916 kg-SO<sub>2</sub>-Äq.). Durch die Berücksichtigung der gleichen Heizwärmebedarfe und der zum Teil identischen Bauteile fallen die Unterschiede zwischen den einzelnen Bauweisen deutlich weniger signifikant als bei der Bauteilbetrachtung aus. Der Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie liegt bei allen Varianten bei rd. 4 GWh. Die Treibhausgase schwanken ebenfalls gering mit Werten zwischen 848 und 950 t-CO<sub>2</sub>-Äq. für Normalbeton+WDVS und Holz+WDVS (vgl. Abbildung 86).

## Umweltauswirkungen Lebenszyklus Zweifamilienhaus I



## Umweltauswirkungen Lebenszyklus Zweifamilienhaus II

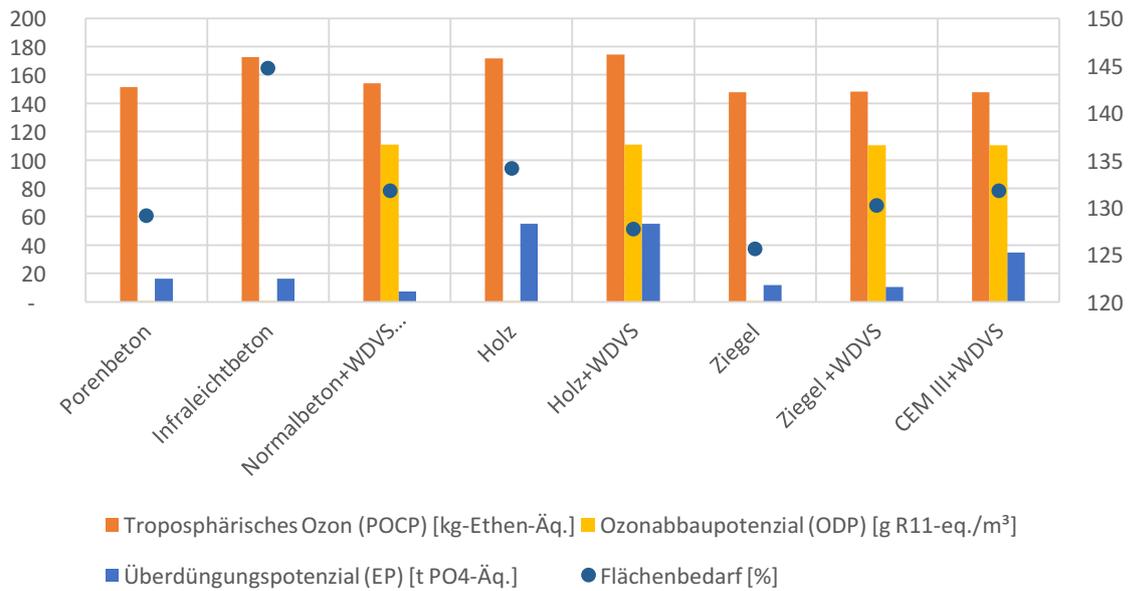
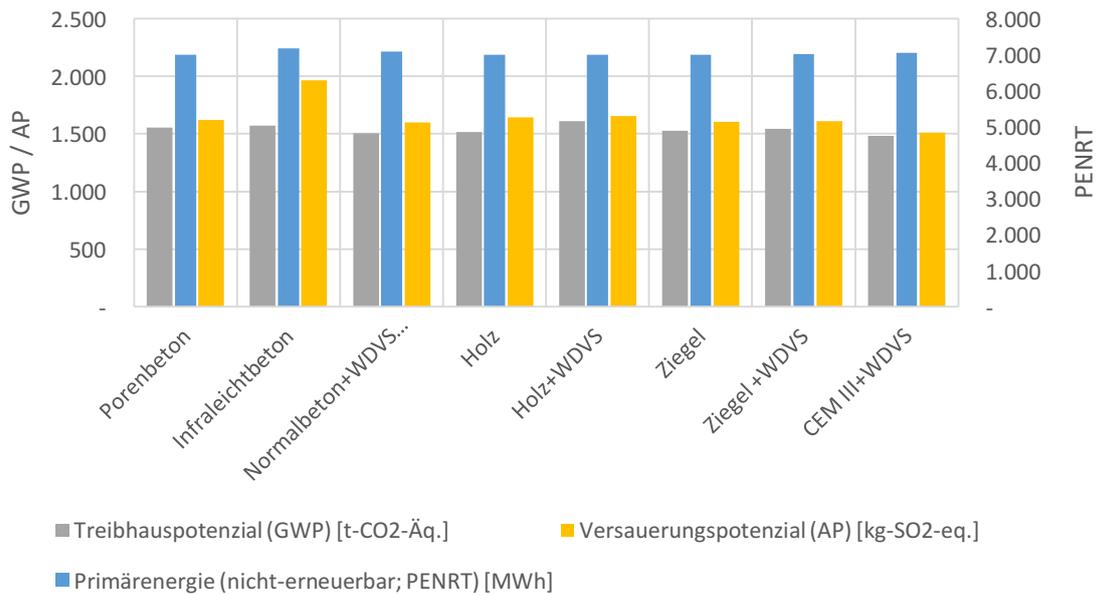


Abbildung 86: Umweltauswirkungen des Wohngebäudes im gesamten Lebenszyklus (LCA) (eigene Darstellung)

Bei der Büronutzung zeigt sich ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 87).

## Umweltauswirkungen Lebenszyklus Bürogebäude I



## Umweltauswirkungen Lebenszyklus Bürogebäude II

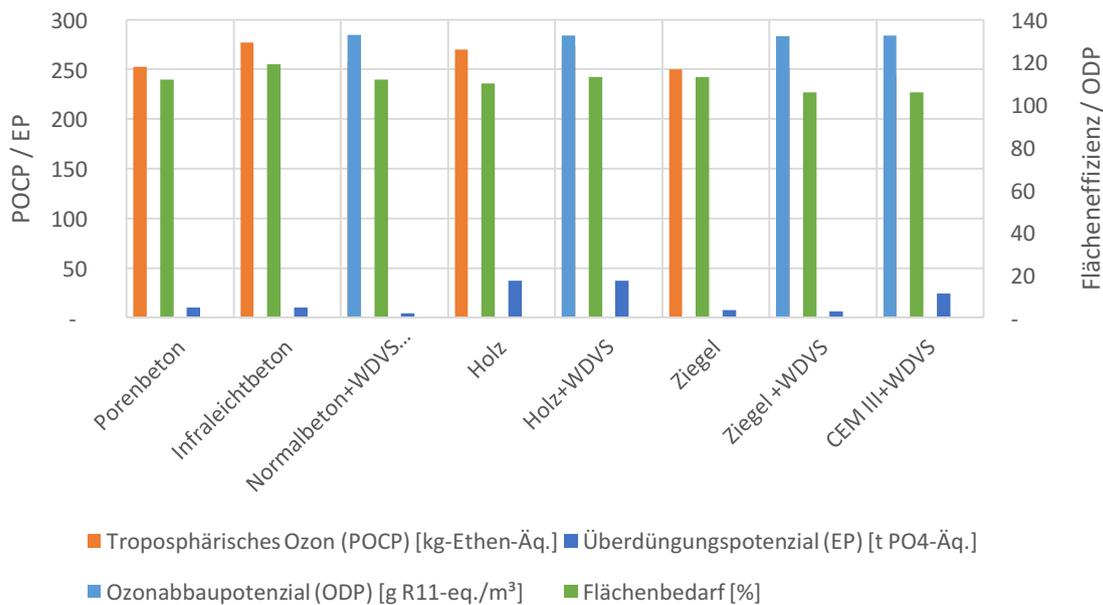


Abbildung 87: Umweltauswirkungen des Bürogebäudes im gesamten Lebenszyklus (LCA) (eigene Darstellung)

Betrachtet man nun die Anteile der Beheizung an den Gesamtbilanzen, zeigt sich deren dominierender Für die Indikatoren nicht-erneuerbare Primärenergie, Troposphärisches Ozon, Treibhausgaspotential und Versauerungspotenzial stellen die Beheizung einen Anteil zwischen 49 und 78 % (vgl. Abbildung 88 und Abbildung 89).

### Anteil Wärmeversorgung Umweltauswirkungen Lebenszyklus Zweifamilienhaus

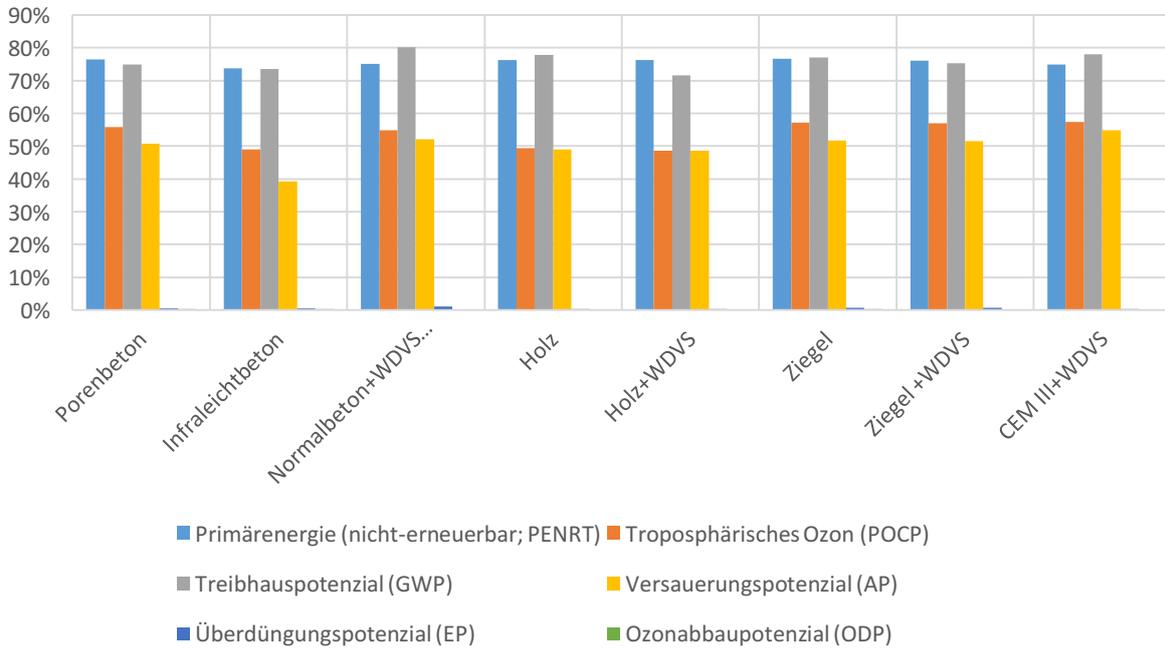


Abbildung 88: Anteil Umweltauswirkung an gesamten Lebenszyklus (Wohnen) (eigene Darstellung)

### Anteil Wärmeversorgung Umweltauswirkungen Lebenszyklus Bürogebäude

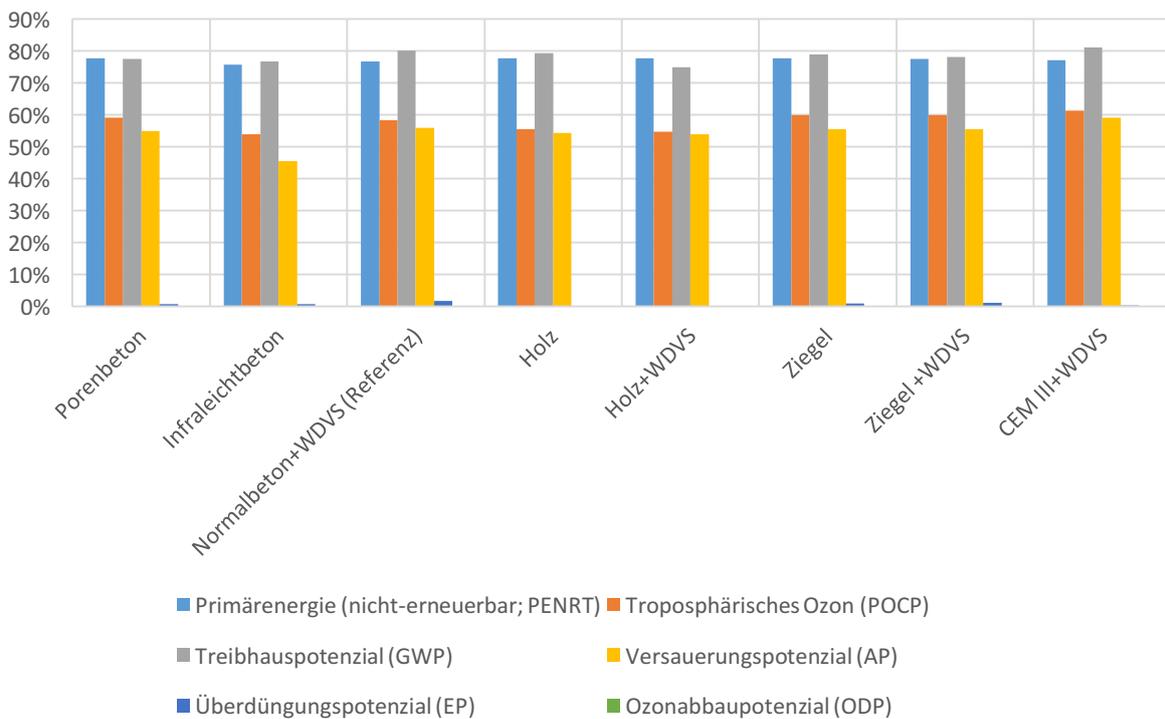


Abbildung 89: Anteil Umweltauswirkung an gesamten Lebenszyklus (Büro) (eigene Darstellung)

Die Umweltauswirkungen ohne Berücksichtigung von Umweltauswirkungen des Heizsystems und der Verwertung nach dem Rückbau sind deutlicher differenziert, in der Tendenz aber analog zu den Ergebnissen der Bauteilbetrachtung in Punkt 5.2.1.

Beim Wohngebäude variieren die nicht-erneuerbaren Primärenergie-Aufwendungen zwischen 1.090 und 934 MWh für CEM-III-Beton+WDVS bzw. Normalbeton. Die anderen Varianten liegen bei 950 MWh, jeweils bezogen auf den gesamten Lebenszyklus.

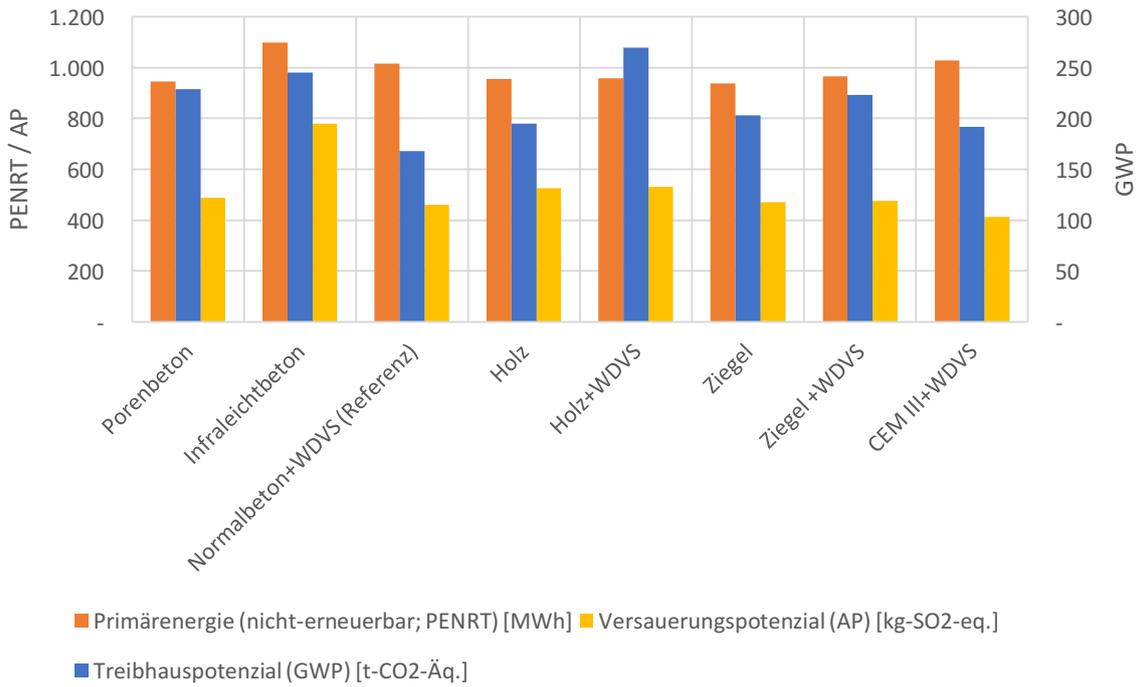
Bei der Emission von POCP-Stoffen liegen die Werte zwischen 90 kg-Ethen-Äq für die monolithische Holz-Variante und 63 kg-Ethen-Äq. bei beiden Ziegelbauweise und der CEM-III-WDVS-Variante.

Die treibhausrelevanten Emissionen variieren zwischen 166 und 269 t-CO<sub>2</sub>-Äq. für Normalbeton und Holz+WDVS respektive. Das Versauerungspotential ist für alle Varianten annähernd konstant bei rd. 0,5 t-SO<sub>2</sub>-Äq., nur Infralichtbeton weist mit 779 kg-SO<sub>2</sub>-Äq. einen deutlich höheren Wert auf.

Beim Überdüngungspotential sind deutlich erhöhten Emissionen bei beiden Holz-Varianten, sowie CEM-III-Beton+WDVS (55 bzw. 35 t PO<sub>4</sub>-Äq.) zu bilanzieren. Alle anderen Varianten liegen deutlich darunter bei 7 bis 16 t PO<sub>4</sub>-Äq.

Ein analoges Bild mit höheren Werten ergibt sich für die Nutzungsart Büro (vgl. Abbildung 91).

### Umweltauswirkungen Herstellung Zweifamilienhaus I



### Umweltauswirkungen Herstellung Zweifamilienhaus II

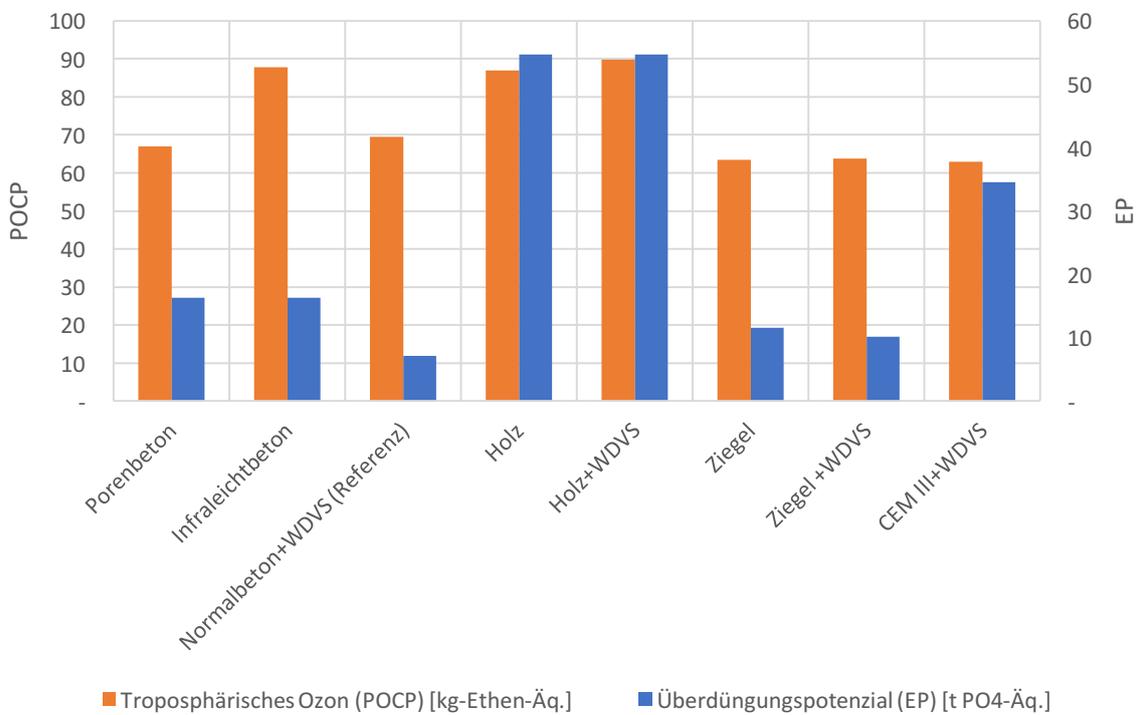
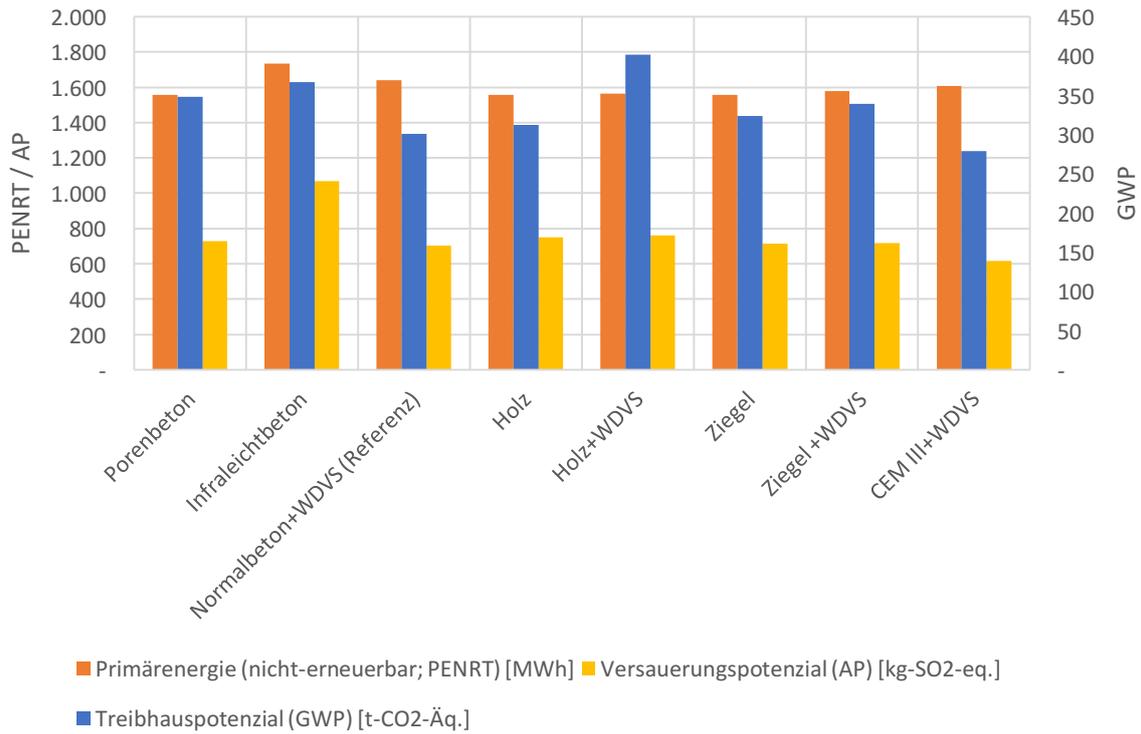


Abbildung 90: Umweltauswirkung Bauwerk (Wohnen) (eigene Darstellung)

## Umweltauswirkungen Herstellung Bürogebäude I



## Umweltauswirkungen Herstellung Bürogebäude II

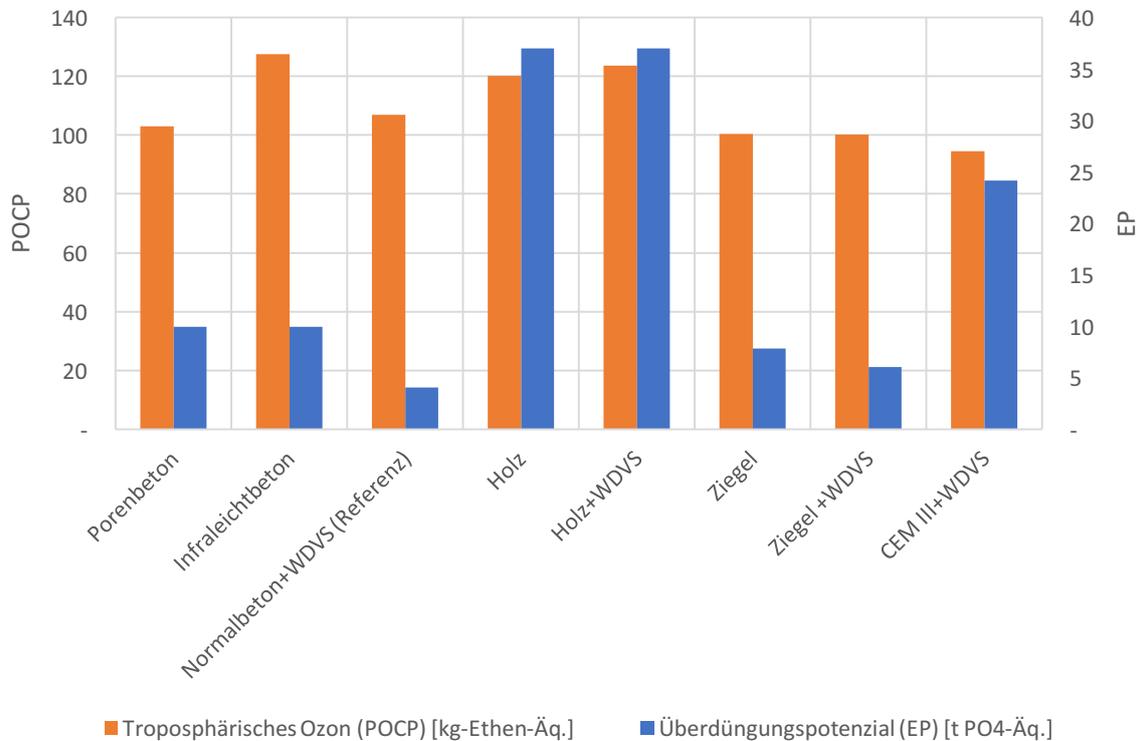


Abbildung 91: Umweltauswirkung Bauwerk (Büro) (eigene Darstellung)

Bezieht man nun die bilanzierten Emissionen auf die Referenzvariante Normalbeton+WDVS, so lassen sich die relativen Einsparungen je Umweltauswirkung aufzeigen. Es zeigen sich nur für einige Indikatoren und Varianten signifikante Abweichungen (vgl. Abbildung 86 bis Abbildung 89). Als signifikant werden Abweichungen von über 5 % betrachtet.

In Bezug auf **Treibhausgase** stechen Infraleichtbeton, Porenbeton und mit 9,7 bzw. 6 % höheren Emissionen als die Referenz hervor. Alle anderen Bauweisen führen zu keinen oder vernachlässigen Einsparungen. Der **Primärenergiebedarf** ist bei für alle Bauweisen annähernd identisch.

Das Potential zur **Versauerung** führt zu einer deutlicheren Differenzierung, hier können beide Ziegel- und die CEM-III-Beton-Variante im Vergleich zur Referenz 4 % einsparen, während Infraleichtbeton (+7 %) und Porenbeton (+4 %) zu höheren Emissionen führen.

Beide Holz-Varianten haben um 11 bzw. 13 % und die Infraleichtbeton-Bauweise (+12 %) erhöhte **POCP-Emissionen**, während Ziegel, Ziegel+WDVS und CEM III+WDVS zu geringeren Emissionen führen (-4 %, -4 % bzw. -3 %).

Eine deutliche Differenzierung zeigt sich bei den **ODP-Emissionen**, bei welchen Infraleichtbeton zu höheren Emissionen (+7 %) führt, während alle anderen Varianten Einsparungen von 6 bis 9 % erzielen. Das **Überdüngungspotential** (EP) weist mit bis zu +660 % höheren Emissionen die deutlichsten Abweichungen gegenüber der Referenz auf. Während die Poren- und Infraleichtbeton die Emissionen fast verdoppeln, führt eine monolithische Holzbauweise oder beide Ziegelbauweisen nur zu Erhöhungen von rd. 50 %.

Bezogen auf das Bürogebäude zeigt sich wieder ein ähnliches Verhalten.

Im Ergebnis bestehen sowohl beim Wohnungs- als auch beim Bürobau durch die Auswahl des Baumaterials zum Teil signifikante Unterschiede bei den betrachteten Umwelteinflüssen. Während nicht-erneuerbare Primärenergie, Versauerungspotential und Treibhausgase um weniger als 10 % kaum variieren, weisen die Bauweisen bezogen auf POCP deutlichere Unterschiede auf. Das Überdüngungspotential, nicht zuletzt auf Grund der geringen absoluten Menge, weist mit -6 bis +660%, die größte Varianz auf.

### 5.3 Flächenverbrauch

Wie in Punkt 5.1.5 beschrieben, ist der Flächenverbrauch eine wichtige zusätzliche ökonomische und ökologische Bewertungsgröße. Als Flächeneffizienz wird im Folgenden das Verhältnis aus entstandener Nutzfläche (NuF) und beanspruchter Baufläche (Brutto-Grundfläche) definiert. Beim Vergleich der einzelnen Varianten zeigt sich ein homogenes Bild, nur drei Varianten haben eine deutlich bessere (Ziegel, Holz+WDVS & Porenbeton) bzw. schlechtere (Infraleichtbeton) Flächeneffizienz (vgl. Abbildung 92). Die restlichen fünf Varianten weisen eine Flächeneffizienz von rd. 227 % auf. Im Mittel der acht Varianten liegt die Flächeneffizienz des Wohngebäudes bei 228 %.

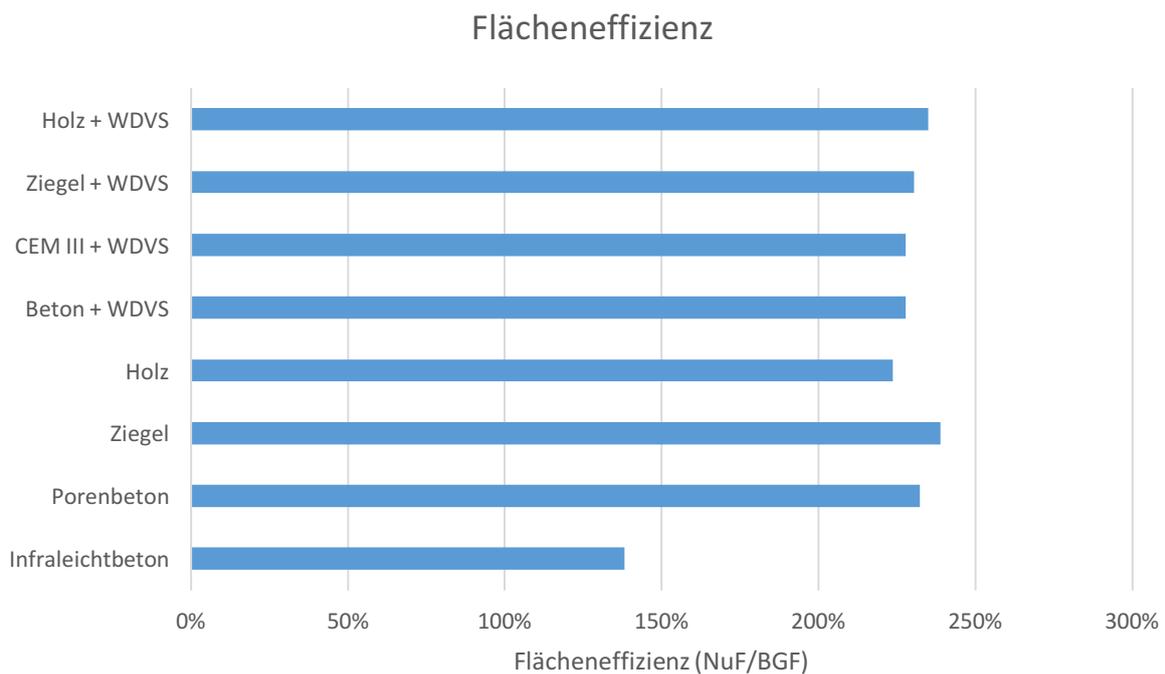


Abbildung 92: Flächeneffizienz der untersuchten Varianten (jeweils Wohnen)

Bei einer angenommenen Grundflächenzahl (GRZ) von 0,3 und einer Geschossflächenzahl (GFZ) von 0,8 ohne Begrenzung der Gebäudehöhe ergeben sich für das betrachtete Referenzgebäude Wohnen mit 237,6 m<sup>2</sup> NGF folgende Kennwerte und Bedarfe an Bauland (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 20: Flächenbedarf (eigene Darstellung)

Variante	Minimale Baufläche auf Grund der...	
	GRZ [m <sup>2</sup> ]	GFZ [m <sup>2</sup> ]
Infraleichtbeton	573	645
Porenbeton	511	575
Ziegel	497	559
Holz	531	597
CEM-III-Beton	522	587
Beton + WDVS	522	587
CEM-III-Beton + WDVS	515	580
Ziegel + WDVS	506	569
Holz + WDVS	573	645

Auf Grund der gewählten Geschoszahl von 3 führt die Erfüllung der minimalen GFZ immer zu einem höheren Bedarf an Bauland als die Erfüllung der GRZ. Folglich ist für alle Varianten die minimale Baufläche auf Grundlage der GFZ relevant. Monetisiert man die Flächeneffizienz mittels Bodenrichtwert und unter Berücksichtigung der obigen Annahmen ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Bodenrichtwert und Kaufpreis (vgl. Abbildung 93). Tabelle 20 zeigt exemplarisch die Kosten für das Bauland bei unterschiedlichen Bodenrichtwerten.

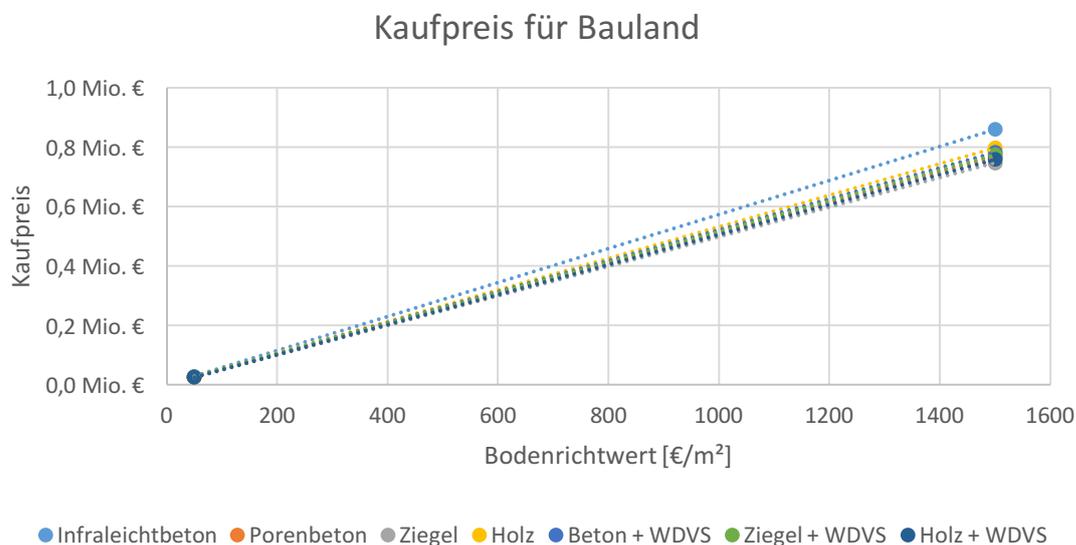


Abbildung 93: Kaufpreis für Bauland bezogen auf 712,6 m<sup>2</sup><sub>NuF</sub> (eigene Darstellung)

Bei einem Bodenrichtwert von 250 €/m<sup>2</sup> ergeben sich für 712,6 m<sup>2</sup><sub>NuF</sub> bspw. Mehrkosten für das Bauland zwischen den geringsten und den höchsten Kosten von rd. 19.000 € bzw. rd. 15 %. Für das gesamte Bauland wird eine angemessene (fiktive) Bodenwertverzinsung in Höhe von 4 % p.a. zugrunde gelegt, die dem langfristigen Durchschnittswert für Liegenschaftszinssätze von

bebauten Wohngrundstücken mittlerer Lage in Deutschland entspricht. Je nach Variante resultieren Bodenwertverzinsungsbeträge von 4.973 € p.a. bis 5.731 € p.a.

Tabelle 21: Bodenwertverzinsung ( $i=4\%$ ) für Bauland in Abhängigkeit von Bodenrichtwerten [€/p.a.] (eigene Darstellung)

	Porenbeton	Infraleicht- beton	Normalbeton + WDVS	Holz	Holz + WDVS	Dämm-Ziegel	Ziegel + WDVS	CEM-III-Beton + WDVS
<b>50</b>								
€/m <sup>2</sup>	1,146 €	1,023 €	995 €	1,062 €	1,043 €	1,043 €	1,031 €	1,011 €
<b>250</b>								
€/m <sup>2</sup>	5,731 €	5,113 €	4,973 €	5,311 €	5,216 €	5,216 €	5,154 €	5,055 €
<b>1.500</b>								
€/m <sup>2</sup>	34,384 €	30,676 €	29,835 €	31,865 €	31,294 €	31,294 €	30,923 €	30,333 €

Diese Bodenwertverzinsungsbeträge stellen einen weiteren Bestandteil der LZK dar, werden aber in der hauptsächlichen Betrachtung (Punkt 5.2.2) aufgrund der großen Schwankungen nicht berücksichtigt.

Je nach Bauweise ergeben sich bei einem durchschnittlichen Bodenrichtwert von 250 €/m<sup>2</sup> für die Bodenpacht LZK von 359.000 bis 413.000 €. Berücksichtigt man die in Punkt 5.2.2 dargestellten LZK von 1,1 bis 1,3 Mio. € für ein Bürogebäude zeigt sich, dass der Anteil der Bodenwertverzinsung an den gesamten LZK in diesem Szenario bereits 19 bis 24 % betragen kann (vgl. Abbildung 94).

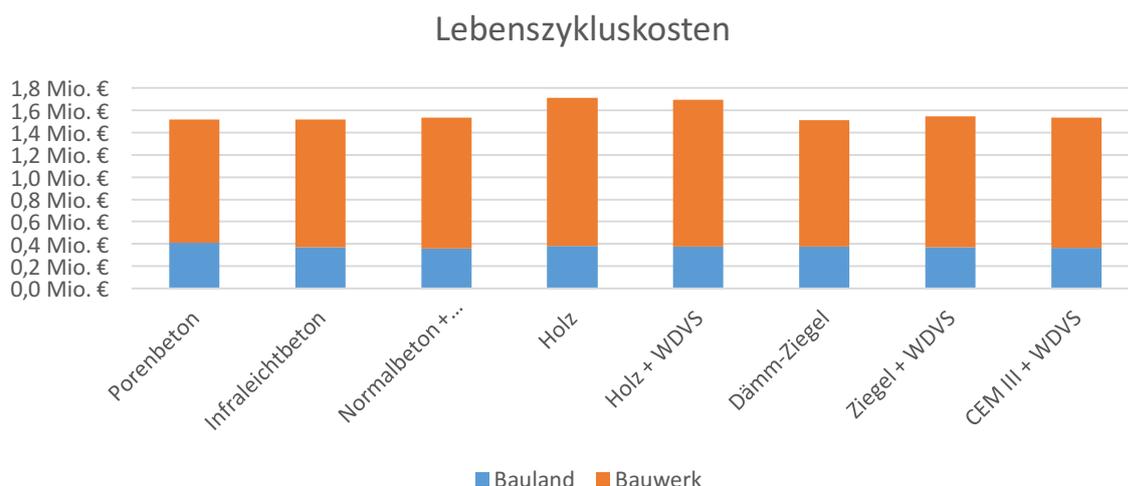


Abbildung 94: Lebenszykluskosten (Bauland & Bauwerk) ( $i=4\%$ ; Bodenrichtwert 250 €/m<sup>2</sup>a)

Somit ergeben sich inkl. Grundstückskosten, bei einem Bodenrichtwert von 250 €/m<sup>2</sup>, LZK bezogen auf die Nutzungsfläche von 2.009 bis 2.286 €/m<sup>2</sup><sub>NuF</sub>.

## 5.4 Recyclingfähigkeit

Recyclingfähigkeit kann unterteilt werden in

- 1) Sortenreine Rückbaubarkeit der Materialien
- 2) Rezyklierbarkeit bzw. Verwertung der Materialien

Der Rückbau der Materialien am Ende des Lebenszyklus erfolgt abhängig von dem durchführenden Unternehmen als auch vom jeweiligen Material. Die Entscheidung aus Sicht der Unternehmen ist vor allem abhängig von den nachgeschalteten Prozessen. Sind Kapazitäten zur mechanisch-automatisierten Aufarbeitung und Separierung verfügbar, erfolgt der Rückbau des Gebäudes selbst weniger sortenrein als bei Unternehmen, die aufgrund fehlender Kapazitäten vor Ort die Materialien möglichst sortenrein trennen. Beide Varianten funktionieren besonders dann gut, wenn die Baustoffe bereits möglichst sortenrein und nicht (vollflächig) verklebt, sondern punktuell und formschlüssig, z.B. durch Dübel, verbunden sind. Als besonders kritisch ist die Vermengung von ähnlichen Stoffen, wie z.B. Gips und Beton zu bewerten. Der „zugeschlagene“ Gips sorgt bei der Wiederverwendung von Beton durch Aufquellen zu deutlichen Einschränkungen. Diese Aspekte sind nicht Gegenstand der Untersuchung und seien nur am Rande erwähnt. An dieser Stelle wird auf das Zukunft-Bau-Forschungsprojekt „urban mining – Leitfaden zur Vermeidung nicht recyclingfähiger Bauabfälle bei künftigen kommunalen Hochbauvorhaben“ der TU Berlin verwiesen (Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-15.53), in dem die oben beschriebenen Fragestellungen ausführlich diskutiert werden.

Unter den oben beschriebenen Aspekten sind vor allem Bauweisen mit unterschiedlichsten Baustoffen kritisch zu bewerten. Dies sind konkret die Varianten mit WDVS sowie die hier nicht untersuchten aber marktüblichen gedämmten Ziegel in monolithischer Bauweise. Bei letzteren ist der Hohlraum mit Dämmstoff verfüllt.

## 5.5 „Weiche Kriterien“

Die betrachteten Konstruktionen unterscheiden sich durch weitere Aspekte, die im Rahmen der ökonomischen wie ökologischen Bilanz allerdings nicht abgebildet wurden. Einige Aspekte werden folgend ohne Anspruch auf Vollständigkeit dargestellt.

### Bauzeit:

Vorgefertigte Konstruktionen wie im Holzbau und im Beton-Fertigbau reduzieren die Bauzeiten teils erheblich. Vorgefertigte Bauten können, je nach Größe, in wenigen Tagen errichtet werden. Vor Ort geschalte, betonierte oder gemauerte Konstruktionen weisen längere Bauzeiten auf.

### Fehleranfälligkeit während der Bauphase:

Bei kammerführenden und porösen Konstruktionen wie Ziegel- oder Porenbetonkonstruktionen, die während der Baupausen vor Regen geschützt werden müssen, kann es während der Realisierung zu Bauzeitverzögerungen von mehreren Monaten kommen, wenn die Wandkonstruktionen durchnässt werden oder „volllaufen“. Die Konstruktionen müssen in dem Fall aufwendig getrocknet werden. Bei Mineralwolle-Dämmung, die vor Regen geschützt werden muss, kann die Durchfeuchtung zur Strukturveränderung und resultierend erhöhter Wärmeleitfähigkeit führen, was den Austausch erforderlich macht.

### Fehleranfälligkeit während der Bau- und Nutzungsphase:

Die Verankerung von Gerüsten muss gemäß Herstellerangaben respektive Produkterfordernis erfolgen. In der Praxis entstehen Probleme, wenn bei kammerführenden und porösen Konstruktionen wie Ziegel- oder Porenbetonkonstruktionen falsche Verankerungen genutzt werden. Werden keine Durchsteckanker genutzt, können Gerüste aus der Verankerung reißen.

## 5.6 Sensitivität

Die bilanzierten Kennwerte hängen zum Teil maßgeblich von den gewählten Lebensdauern und Betrachtungszeiträumen ab. Der oben gewählte Betrachtungszeitraum von 75 Jahren wurde variiert, um dessen Einfluss auf die Bilanzierung aufzuzeigen (vgl. Abbildung 95).

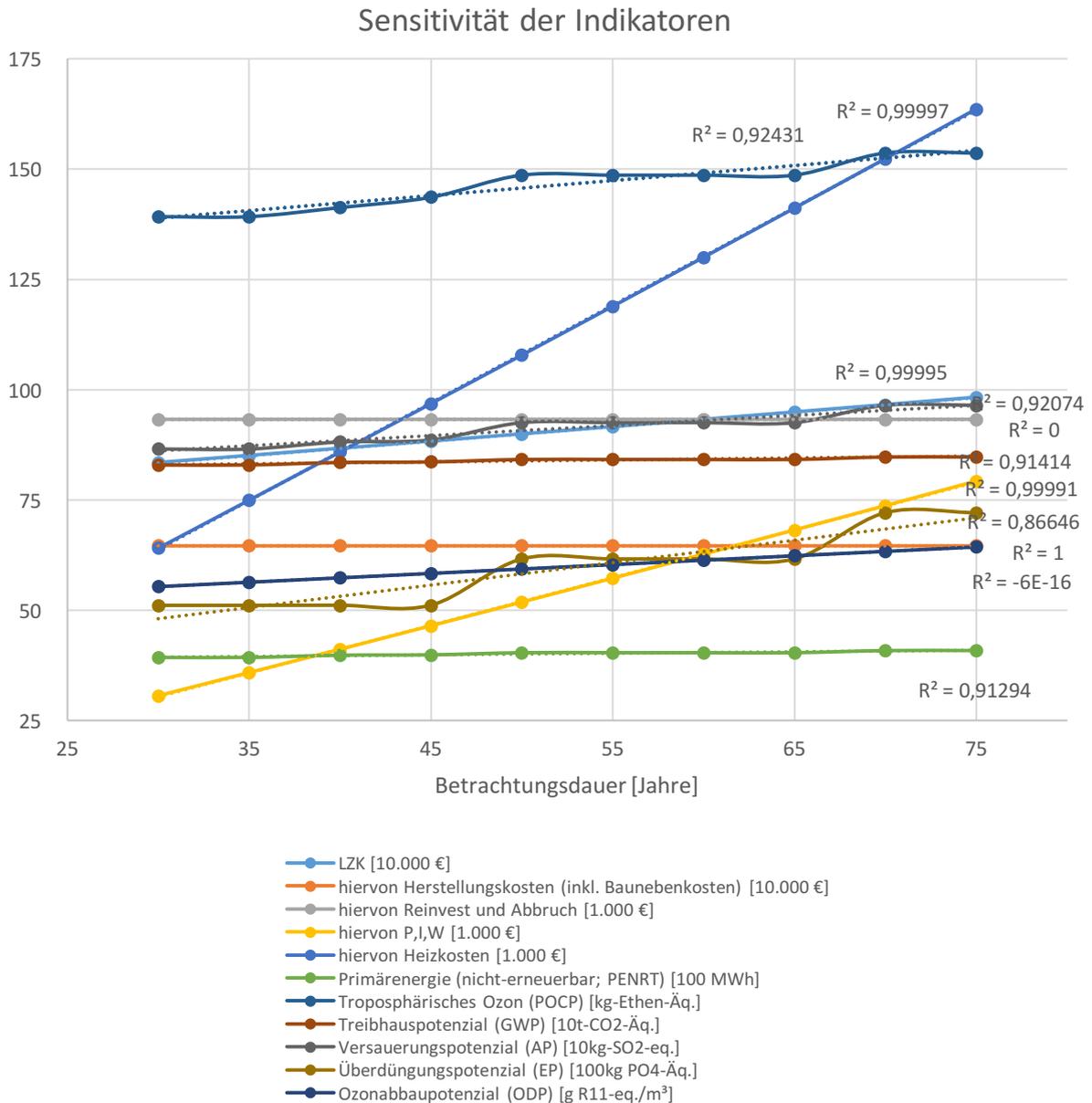


Abbildung 95: Sensitivität der betrachteten Indikatoren (eigene Darstellung)

Somit können die Indikatoren identifiziert werden, bei denen eine Änderung der Betrachtungsdauer besonders großen Einfluss auf die Bilanzierung hat. Dies sind neben dem Überdüngungspotential (EP) vor allem das Potential zum Abbau von troposphärischem Ozon (POCP) und das Versauerungspotential (AP). Die Sprünge treten jeweils zwischen den Betrachtungsdauern 45/50 bzw. 65/70 Jahre auf, was auf einige Bauteile mit Lebensdauern von 40 Jahren zurückzuführen ist. Alle anderen Indikatoren haben einen deutlich lineareren Verlauf.

## 5.7 Fazit

In AP 4 wurden die ökonomische Bilanz (LCC) und die ökologische Bilanz (LCA) für die acht Varianten über eine Nutzungsdauer von 75 Jahren ermittelt. Grundlage für die Herstellungskosten, Instandsetzungskosten und Ersatzinvestitionen im LCC sind ausschließlich die Kostengruppen (KG) 300 bis 350 gem. DIN 276.

Bei der Bauteilbetrachtung streuen die **Lebenszykluskosten** deutlich um 160 % von rd. 150 bis 470 €/m<sup>2</sup><sub>Wandfläche</sub>. Die höheren LZK sind vor allem auf die zusätzliche Dämmschicht in mehreren Varianten zurückzuführen. Bei der Gebäudebetrachtung weisen die beiden Holzvarianten insgesamt die höchsten LZK auf (für das ZFH rd. 1,5 Mio. € bzw. 2.104 €/m<sup>2</sup><sub>NuF</sub>), während alle anderen Varianten mit rd. 0,95 Mio. € bzw. 1.338 €/m<sup>2</sup><sub>NuF</sub> zu Buche schlagen. Die Kosten für Herstellung dominieren bei allen Varianten die LZK, während Kosten für Reinvest & Rückbau (22 %), Prüfung, Inspektion & Wartung (0,2 %) sowie Heizkosten (9 %) insgesamt mit weniger als einem Drittel zu den eng gefassten LZK beitragen.<sup>4</sup> Die LZK für das Referenzgebäude (Normalbeton + WDVS) betragen 0,967 Mio. € bzw. 1.357 €/m<sup>2</sup><sub>NuF</sub>.

Bezüglich der Umweltwirkungen des Gesamtgebäudes treten deutliche Unterschiede bei der Herstellung auf. Diese werden durch die zusätzliche Betrachtung von Rückbau und Betrieb abgeschwächt. Ein Potential zur Treibhausgaseinsparung (**GWP**) besteht in dem Verzicht auf Infraleicht- und Porenbeton, während bei allen anderen Varianten die Emissionen kaum von der Referenz abweichen. Das Abbaupotential für Ozon (**ODP**) ist besonders bei Infraleichtbeton ggü. der Referenz erhöht. Alle anderen Varianten führen zu Reduktionen von 6 bis 9 %. Beim troposphärischen Ozon (**POCP**) stellt sich eine deutlichere Differenzierung ein. Während die Varianten CEM-III-Beton+WDVS, Ziegel und Ziegel+WDVS mit -3 bis -4 % Einsparungen erzielen, führt die Verwendung von Holz oder Infraleichtbeton zu höheren Emissionen (+11 bis +13 %). Bezogen auf das Versauerungspotential (**AP**) weisen beide Ziegel- und die CEM-III-Beton-Variante mit -4 % geringe Einsparungen auf, während Infraleicht- und Porenbeton mit +7 bzw. +4 % zu höheren Emissionen führt. Mit Hilfe der unterschiedlichen Baumaterialien können deutliche Einsparungen an PO<sub>4</sub>-Äquivalenten (**EP**) erzielt werden. Bezogen auf die Referenz weisen beide Holzvarianten und CEM-III-Beton+WDVS einen deutlichen Anstieg um 660 bzw. 380 % auf. Alle anderen Varianten führen ebenfalls zu signifikanten Erhöhungen um 1 bis 62 %. Bezogen auf nicht-erneuerbare Primärenergie (**PENRT**) führt keine Bauart zu höheren oder niedrigeren Bedarfen gegenüber der Referenz.

Das **größte Einsparpotential** liegt für alle Indikatoren außer EP und ODP allerdings bei der **Wärmeversorgung**. Diese macht je nach Variante und Indikator 40 bis 80 % der Umweltauswirkungen aus. Das größte Potential resultiert also aus der Wahl eines umweltfreundlichen Heizsystems.

---

<sup>4</sup> Der hohe Anteil der Herstellungskosten an den LZK ist insbesondere in der Beschränkung auf die Kostengruppen 300 bis 350 (DIN 276) mit entsprechend langlebigen Bauteilen und den Heizkosten als einzigen bilanzierten Betriebskosten begründet (vgl. Punkt 5.1.3).

Genauso wie durch eine umweltfreundlichere Wärmeversorgung können auch durch eine emissionsarme Bereitstellung von Prozessenergie für die Herstellung der Bauprodukte die Umweltwirkungen deutlich reduziert werden. Hiervon profitieren diejenigen Materialien am meisten, bei denen der Großteil der Emissionen aus der Energieraufwendung in der Produktion herrührt. Ähnliches gilt für Produkte, die ohne großen Energieeinsatz wieder zurück gewonnen werden können. Hier ist vor allem bei der Planung und Ausführung auf eine möglichst sortenreine Bau- und Rückbauweise zu achten. Die Rückbauverfahren und somit auch die Potentiale zur stofflichen Rückgewinnung sind aktuell allerdings deutlich von ausführenden Unternehmen abhängig. Kein Umweltindikator weist eine signifikante lineare Proportionalität mit den LZK auf.

Die **Flächeneffizienz**, also das Verhältnis zwischen erzeugter Nutzfläche und benötigtem Bauland, liegt bei allen Varianten bei rd. 230 %, nur Infraleichtbeton weist mit 138 % eine deutlich geringere Flächenausnutzung auf.

## 6 Bewertung und Vergleich: Ökonomie, Ökologie und Bauphysik AP 5

Nachfolgend wird der Versuch unternommen, die sehr heterogenen Bewertungsaspekte möglichst homogen darzustellen, um eine übersichtliche Zusammenfassung der Ergebnisse zu gewährleisten. Die detaillierten Informationen, die der Darstellung hinterlegt sind, können in den vorangegangenen Kapiteln nachvollzogen werden.

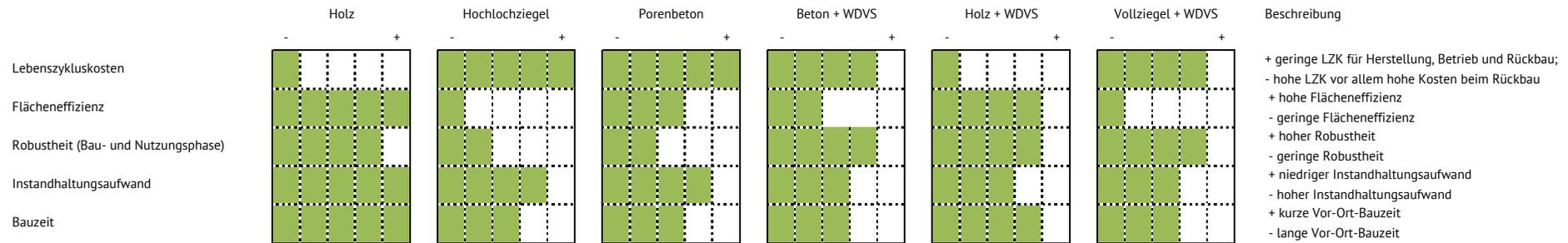
Der Vergleich der untersuchten Konstruktionen aus ökonomischer, ökologischer und bauphysikalisch-energetischer Sicht ist komplex. Empfehlungen könnten daher nur hinsichtlich einzelner Aspekte formuliert, jedoch nie pauschaliert werden. Die Ergebnisse basieren auf der diesem Bericht zugrundeliegenden Modellbildung. Auf Grund einer nicht durchgängigen Datenlage wird auf die Bewertung des Infraleichtbetons verzichtet. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Rahmenbedingungen ist je nach Bewertungsaspekt eingeschränkt möglich. Die Ergebnisse können als Leitfaden für die Verwendung monolithischer oder mehrschichtigen Wandkonstruktionen dienen und geben einen guten Überblick über den Zusammenhang der einzelnen Aspekte.

Bauherrn und Planern wird empfohlen, die für das spezifische Bauvorhaben relevanten Aspekte zu betrachten und individuell zu gewichten.

Folgend wird eine Bewertungsgrafik genutzt, die ähnlich einem Balkendiagramm Gemeinsamkeiten und Unterschiede skizziert. Die Skalierung ist aspektspezifisch gewählt: Sind Abweichungen darzustellen, die nur einen geringfügigen Einfluss haben, weisen die Materialien ähnliche Bewertungen auf. Sind große, für die Bauaufgabe relevante Abweichungen zu verzeichnen, wird das gesamte Bewertungsspektrum genutzt. Eine identische Bewertung innerhalb eines Betrachtungsaspektes bedeutet nicht, dass es keine Unterschiede zwischen den Materialien gibt, sondern dass die Unterschiede für die Anwendung der Materialien nur geringfügige Bedeutung haben. Eine Bewertung, die das gesamte Bewertungsspektrum nutzt, bildet einen großen Einfluss hinsichtlich des Bewertungsaspektes ab.

## Ökonomisch

Zu den möglichen ökonomischen Bewertungsaspekten gehören die Betrachtung der LZK, der Flächeneffizienz, der Robustheit, des Instandhaltungsaufwandes sowie der Bauzeit.



Die eng gefassten LZK berücksichtigen die Kosten für die Herstellung (Kosten zur Herstellung des Bauteils), den Betrieb (Heizkosten) und die Nutzung (Kosten für Prüfung, Inspektion & Wartung) sowie Reinvest und Rückbau des Bauteils im Betrachtungszeitraum von 75 Jahren.

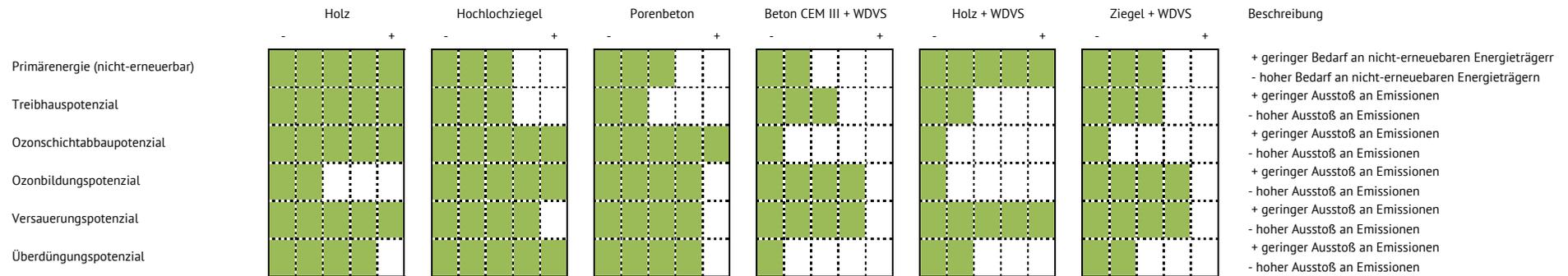
Die Flächeneffizienz bewertet die Fläche, die für eine Außenwandkonstruktion mit dem U-Wert von  $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  benötigt wird.

Unter dem Kriterium Robustheit sind die „weichen Faktoren“ wie die Anfälligkeit für Fehler während der Bau- und Nutzungsphase subsummiert. Hierzu gehören bspw. die Notwendigkeit des Regenschutzes während der Bauphase, die Präzision beim Verbau von Sonderbauteilen usw.

Die Bauzeit beschreibt die Zeitspanne, die auf der Baustelle benötigt wird, um den Rohbau des Gebäudes fertig zu stellen. Generell haben alle vorgefertigten Konstruktionen aus Holz- oder Betonfertigteilen geringere zu erwartende Bauzeiten als Konstruktionen, die aus Elementen gefügt oder gegossen werden. Bewertet wurde obenstehend Ortbeton. Der Bau mit Betonfertigteilen entspräche der Bewertung des Holzbaus.

## Ökologisch

Zu den möglichen ökologischen Bewertungsaspekten gehören die Betrachtung der aufzuwendenden nicht-erneuerbaren Primärenergie sowie der Umweltwirkungen Treibhauspotenzial, Ozonschichtabbaupotenzial, Ozonbildungspotenzial, Versauerungspotenzial und Überdüngungspotenzial.

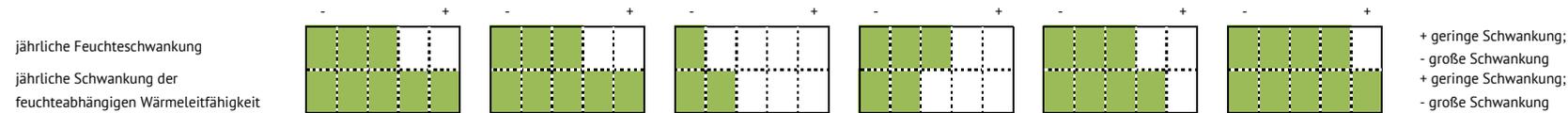


Die Umweltwirkungen berücksichtigen die Herstellung (Emissionen durch Herstellung des Bauteils), den Betrieb und die Nutzung (Emissionen durch Betrieb) sowie die Verwertung (Emissionen durch den vollständigen Rückbau) des Bauteils im Betrachtungszeitraum von 75 Jahren.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass Holz im Kontext der gewählten Indikatoren die geringsten Umweltwirkungen aufweist.

## Bauphysikalisch-energetisch

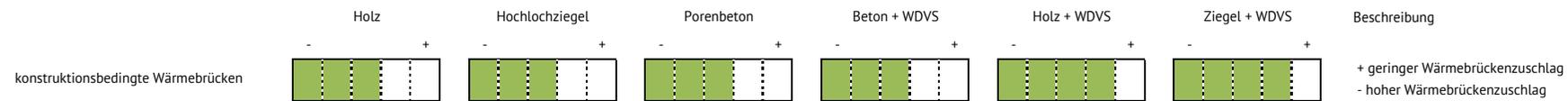
Betrachtet werden die jährliche Feuchteschwankung sowie die jährliche Schwankung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit unter den zuvor beschriebenen Modellbedingungen.



Der Porenbeton erfährt größte Feuchteschwankungen über das Jahr. Ein direkter Rückschluss auf das Raumklima ist allerdings nicht möglich, da ein Feuchtemassenstrom von außen und innen in bzw. aus dem Bauteil vorhanden ist und die Schwankung einen gemittelten Wert über die gesamte Bauteildicke darstellt. Das Raumklima war in der Bauteil-Simulation eine Randbedingung. Der Feuchtemassenstrom von außen ist beim Porenbeton viel größer als von innen, für die anderen Baustoffe sind die Unterschiede viel geringer.

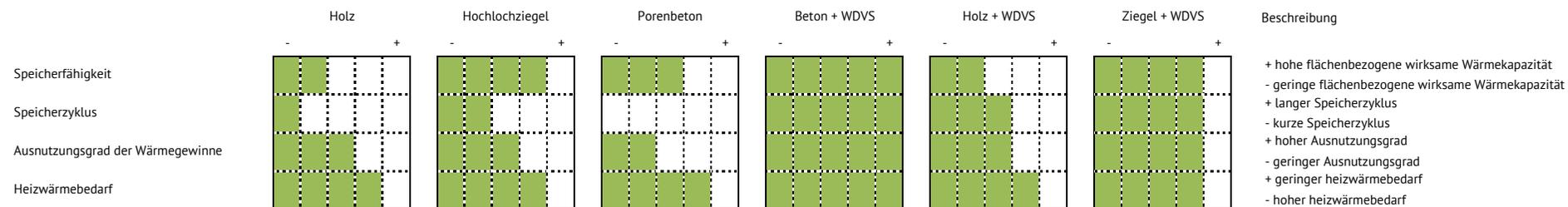
Die Wärmeleitfähigkeit ändert sich mit dem Wassergehalt des Baustoffs. Porenbeton besitzt die größte Schwankung des Wassergehalts über das Jahr. Die Änderungen der Wärmeleitfähigkeit sind für alle Baustoffe einschließlich Porenbeton als gering einzustufen, sodass mit keiner signifikanten Erhöhung bzw. Verringerung der Wärmeverluste zu rechnen ist.

Die Wärmebrückenbetrachtung ergab folgendes Bild.



Die Gesamtübersicht des Wärmebrückenzuschlags leitet sich aus den Einzelbewertungen bautypischer Anschlussdetails, Fenster, Deckenaufleger, Außenwandecke ab. Es wird ersichtlich, dass der Wärmebrückenzuschlag für WDVS-Konstruktionen etwas geringer ist. Die Ergebnisse der einzelnen Anschlüsse sind jedoch stark von der konstruktiven Ausbildung der Details abhängig (insbesondere bei den Fensteranschlüssen). Der planerische Aufwand zur Minimierung des Wärmebrückenzuschlags ist deshalb bei monolithischen Konstruktionen höher.

Im Bereich der energetischen Betrachtung könnten die Bewertung der Speicherfähigkeit, des Speicherzyklus, des Ausnutzungsgrades der Wärmegewinne sowie des resultierenden Heizwärmebedarfes Kriterien sein.

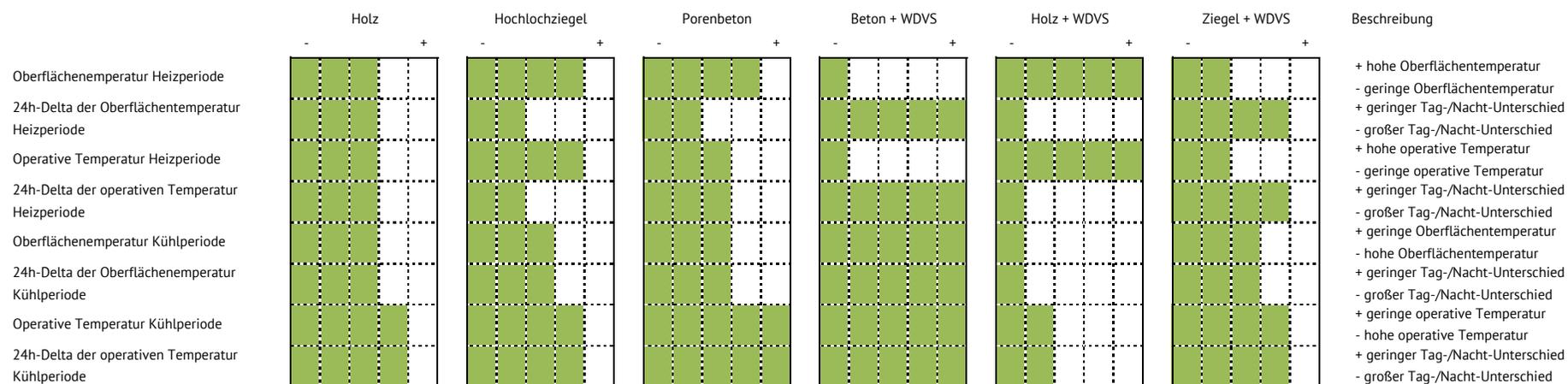


Generell wird erkenntlich, dass Normalbeton für die Wärmespeicherung am besten geeignet ist. Die Simulationen haben gezeigt, dass es nicht relevant ist, wo die für einen Raum verfügbare Speichermasse angeordnet wird (max. Abweichung der Bauteile Innenwand, Außenwand, Decke, Boden max. 2%). Entscheidend ist, dass dem Raum genügend Masse zur Verfügung steht.

Hieraus folgt, dass bei während der Nutzungszeit hohen anzunehmenden internen Lasten (Büronutzung / große solare Gewinne) die verfügbare Speichermasse maximal sein sollte. Die effiziente Nachtauskühlung muss gewährleistet sein. Im Bürobau findet man oftmals die Situation vor, dass die leichten Innenwände kaum Speichermasse bieten, der Hohlraumboden zur Verlegung der notwendigen Infrastruktur zudem dazu führt, dass die Speichermasse des Betonbodens nicht beladen werden kann. Allein die Betondecke sowie geringe Anteile der Gebäudehülle bleiben als beladbare Masse übrig. In dem Fall sollte die gesamte Decke für die thermische Speicherung nutzbar bleiben, Akustiksegel bspw. müssen luftumströmt ausgebildet werden, um die Beladung nicht zu reduzieren. Baumschlager Eberle zeigen im Projekt „2226“, dass die Aktivierung sowohl des Bodens, als auch der Decke, ohne große Nutzungseinschränkungen möglich ist.

Im Bereich des Wohnungsbaus, der durch geringere interne Lasten und auf die Nacht verschobene Nutzungszeiten geprägt ist, zeigte sich, dass die monolithische Bauweise vorteilhaft sein kann. Die verfügbare Speichermasse durch die raumbegrenzenden Bauteile wie Innen-, Außenwände, Decken und Böden reicht aus, die geringere Speicherfähigkeit der monolithischen Materialien kann zudem zu verkürzten Aufheizzeiten führen.

Die Betrachtung der Oberflächentemperaturen sowie der resultierenden, sich einstellenden operativen Temperatur im Raum ergibt folgendes Bild:



Beton weist zwar die geringste Oberflächentemperatur während der Heizperiode, jedoch auch die geringste Temperaturschwankung an der Innenoberfläche auf. Während der Kühlperiode ist Beton der zur größten temperaturbezogenen Behaglichkeit führende Baustoff.

Bei den monolithischen Konstruktionen stellen sich während der Heizperiode tagsüber, während interne und solare Gewinne verfügbar sind, höhere Oberflächentemperaturen ein, was zu erhöhter Behaglichkeit durch erhöhte operative Temperatur führt. Nachts hingegen liegen tiefere Oberflächentemperaturen vor, was zur geringeren operativen Temperatur führt. Das Delta ist im Vergleich zum Beton groß.

Über das Jahr betrachtet unterscheiden sich die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen nur unwesentlich (<2 %). Die Heizwärmebedarfe sind bei identischen Rahmen-Bedingungen (Verfügbarkeit von Speichermasse / Lasten) bei allen Konstruktionen annähernd gleich.

Während der Kühlperiode zeigen sich die Vorteile hoher verfügbarer Speichermasse in Kombination mit entsprechender Nachtauskühlung deutlich.

Die Relevanz des energetischen Konzeptes ist hoch.

1. Je größer die Wärmeverluste, desto größer ist der Einfluss von Speichermasse auf die Ausnutzung volatiler Energien. Je geringer die Wärmeverluste und je größer gleichzeitig der Ausnutzungsgrad, desto höher ist der mögliche Deckungsgrad.
  - > Der Gebäudeentwurf muss es leisten, Wärmeverluste zu minimieren sowie gleichermaßen volatile Gewinne nutzbar zu machen.
2. Speichermasse kann nur wirken, wenn sie beladen wird. Hieraus folgt, dass die Beladung durch volatile Energien durch planerische Maßnahmen gewährleistet sein muss. Die Speichermasse muss luftumströmt sein, Fußbodenaufbauten, Teppiche, nicht umströmte abgehängte Decken usw. führen dazu, dass die verfügbare Speichermasse nicht nutzbar ist.
  - > Der Gebäudeentwurf muss es leisten, nutzbare thermische Energien einzuspeichern.
3. Speichermasse kann nur wirken, wenn sie auch entladen wird. Hieraus folgt, dass die Entladung der gespeicherten thermischen Energie durch planerische Maßnahmen gewährleistet sein muss.
  - > Der Gebäudeentwurf muss es leisten, thermische Energie, die nicht benötigt wird, abzuführen. Das Haus muss zudem vor nicht nutzbaren thermischen Energien geschützt werden. Andernfalls sind technische Maßnahmen notwendig, was zu erhöhtem Energiebedarf führt.
4. Während eines 24h-Nutzungs-Zyklus beträgt die wirksame, der Raumluft zugewandte Speicherschicht max. 10 cm. Eine tiefe Wandkonstruktion erhöht die Speicherung raumseitiger thermischer Energie nicht. Die Temperatur-Amplitudendämpfung steigt mit steigender Wandtiefe, die untersuchten Konstruktionen weisen alle eine ähnlich zu bewertende Amplitudendämpfung auf. Da die Temperaturschwankung durch die Außenwand eine geringe Relevanz, die Nutzbarkeit der raumseitigen Gewinne hingegen eine hohe Relevanz haben, ist die Wahl des der Raumluft zugewandten Materials höher zu bewerten als die realisierte Wandtiefe.
5. Steht eine große Menge volatiler thermischer Energie zur Verfügung, ist die Maximierung der Speichermasse zielführend. Der Umkehrschluss gilt ebenso. Bei geringen nutzbaren volatilen Energien führt eine geringe Speichermasse zu geringen Aufheizzeiten. Das Konzept muss individuell von der Nutzung abhängen. Bei den untersuchten Konstruktionen ist in jeder Konstellation genügend Speichermasse vorhanden, um behagliche Konditionen herzustellen.
6. Bei Niedertemperatur-Heizsystemen ist die Auslegung der direkten Speichermasse projektabhängig zu prüfen.

## 7 Fazit und weiterer Forschungsbedarf

Die Untersuchungen der Wärmebrückeneinflüsse zwischen monolithischen und WDVS-Konstruktionen bestätigen die publizierten und baupraktischen Erkenntnisse, wonach sich mit WDVS-Konstruktionen Wärmebrückenzuschläge etwas leichter minimieren lassen. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse sensibel auf Änderungen der Geometrie reagieren (z.B. Fensteranschluss) und von den getroffenen Annahmen abhängen. Deswegen ist ein pauschales Fazit nur bedingt möglich.

Es bleibt festzuhalten, dass bei Fensteranschlüssen der Anschluss des Rahmens an die Mauerwerkskonstruktion einen entscheidenden Einfluss auf den Wärmebrückenzuschlag hat. Weiterführende Untersuchungen müssen sich mit dem Einfluss von detailliert abgebildeten Rahmenprofilen im Vergleich zur hier in Anlehnung an DIN 4108-Beiblatt 2 vereinfachten Modellierung als Holzklötz beschäftigt.

Der Einfluss der Konstruktion auf den Feuchtehaushalt war bis auf eine Konstruktion (Porenbeton) sehr gering. Da für die hygrothermischen Simulationen eine große Anzahl an Materialkennwerten erforderlich ist und diese sich gegenseitig beeinflussen, ist man auf vorhandene Datenbanken angewiesen. Zukünftig müssen diese vor allem um aktuelle Materialien erweitert werden. Eine gemeinsame Datengrundlage bzw. der Austausch zwischen verschiedenen Materialdatenbanken (Delphin und WUFI) ist anzustreben.

Die Untersuchungen auf Gebäudeebene konnten nur einen für den Nutzer geringfügig spürbaren Zusammenhang zwischen monolithischem Bauen und erhöhter energetischer Effizienz oder erhöhter thermischer Behaglichkeit nachweisen. Im Bürobau zeigt sich das monolithische Bauen auf Grund der geringeren Speichermasse als nachteiliger, im Wohnungsbau als vorteilhafter, was den verfügbaren Forschungsergebnissen aus dem Bereich Bürobau entspricht. Ein direkter Zusammenhang von Bauweise und gebäudetechnischem Konzept ist nicht zu erkennen. Im Fall von Niedertemperatur-Heizsystemen ist die detaillierte Untersuchung der verfügbaren Speichermassen bzw. resultierend eine Prüfung der Wandkonstruktionsarten empfehlenswert, dies könnte einen weiteren Forschungsbedarf darstellen.

Bezüglich der sieben bilanzierten Umweltwirkungen (Treibhauspotential, Ozonschichtabbaupotential, Ozonbildungspotential, Versauerungspotential, Überdüngungspotential, nicht-erneuerbare Primärenergie, Flächenbedarf; EN 15804) treten zum Teil deutliche Unterschiede auf. Monolithische Aufbauten weisen gegenüber mehrschichtigen Konstruktionen durchgängig geringere oder ähnliche Umweltauswirkungen auf. Das größte Einsparpotential liegt für die meisten Indikatoren bei der Wärmeversorgung, die je nach Variante und Indikator 40 bis 80 % der Umweltauswirkungen ausmacht. Nur das Versauerungspotential weist mit einem Korrelationskoeffizient  $r$  nach Bravais-Pearson von rd. 0,5 einen leicht linearen Zusammenhang mit den LZK auf. Die Flächeneffizienz – bezogen auf das in Anspruch genommene Bauland – liegt bei allen Varianten bei 228 %, nur bei Infraleichtbeton liegt diese mit 138 % deutlich niedriger.

Bei der Bauteilbetrachtung streuen die Lebenszykluskosten (LZK) deutlich von rd. 150 bis 470 €/m<sup>2</sup><sub>Wandfläche</sub>, hauptsächlich aufgrund der zusätzlichen Dämmschicht in mehreren Varianten. Bei der Gebäudebetrachtung weisen die beiden Holzvarianten insgesamt die höchsten LZK auf (2.100 €/m<sup>2</sup><sub>NuF</sub>), während alle anderen Varianten rd. 1.350 €/m<sup>2</sup><sub>NuF</sub> erreichen. Somit liegen diese Kosten leicht über bzw. unter den Kosten für das Referenzgebäude (Normalbeton + WDVS) von 1.357€/m<sup>2</sup><sub>NuF</sub>. Die Kosten für Herstellung dominieren bei allen Varianten die LZK, während Kosten für Reinvest & Rückbau (22 %), Prüfung, Inspektion & Wartung (0,2 %) sowie Heizkosten (9 %) insgesamt mit weniger als einem Drittel zu den eng gefassten LZK beitragen.

Aus ökonomischer Sicht bleibt insbesondere zu klären, ob höhere Kosten für bestimmte Ausführungsvarianten (z.B. Holz, Ziegel + WDVS) etwa durch höhere Stückzahlen bzw. Verkaufsvolumina (Skalen- bzw. Synergieeffekte) ausgeglichen werden können, da es sich teilweise um innovative Varianten mit entsprechend geringer Verbreitung handelt. Die unterschiedlichen Umweltauswirkungen einzelner Baumaterialien (z.B. Beton) sind ebenfalls relevant. Hier ist zu prüfen, ob Materialien substituiert oder Umweltauswirkungen im Herstellungsprozess reduziert werden können. So sind z.B. THG-Emissionen u.a. vom zugrundeliegenden THG-Faktor z.B. für Energieträger abhängig.

Der Bürobau „2226“ zeigt einen interessanten Ansatz auf, mit erhöhtem konstruktivem Aufwand ein technikreduziertes Gebäude zu ermöglichen und so einen positiven Einfluss auf Ökobilanz und LZK zu nehmen. Da kein direkter Zusammenhang zum monolithischen Bauen besteht, wurde das Konzept im Rahmen dieses Projekts nicht detailliert untersucht. Wir sehen allerdings weiteren Forschungsbedarf in der Betrachtung architektonisch-konstruktiver Gebäudekonzepte, die technikreduziert funktionieren. Die Betrachtung sollte auf ökonomischer, energetischer und ökologischer Sicht sowie idealerweise auch soziologischer Sicht erfolgen.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Süd-Ost-Ansicht Villa H 36 [9].....	6
Abbildung 2: Ansicht Gebäudekubus [17].....	8
Abbildung 3: Grundriss [16].....	8
Abbildung 4: Ansicht 2shelter [20]. ....	11
Abbildung 5: Ansicht EFH Rauch. [21].....	12
Abbildung 6: MFH B35 Straßenansicht. [23].....	13
Abbildung 7: Ansicht Längsseite [17]. ....	14
Abbildung 8: Ansicht Woodcube [17].....	15
Abbildung 9: Wandaufbau Massivholzwand [32].....	15
Abbildung 10: Detailaufnahme Wandaufbau Woodcube [3].....	15
Abbildung 11: Wärmeleitfähigkeit in abhängig zur Rohdichte [40].....	17
Abbildung 12: Dynamische, auf Außenwandbauteile einwirkende Parameter.....	22
Abbildung 13: Simulationsgrenze gem. DIN V 18599 [63].....	23
Abbildung 14: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für Außenwände.....	24
Abbildung 15: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für Innenwände.....	25
Abbildung 16: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für Bodenplatte.....	25
Abbildung 17: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für Geschossdecke.....	26
Abbildung 18: Bauteilkatalog: Materialabhängige Wandaufbauten für oberste Geschossdecke..	26
Abbildung 19: Bsp. Systemschnitt für das Material Ziegel.....	27
Abbildung 20: Exemplarischer Wandaufbau der Grund- und Referenzkonstruktionen [53].....	29
Abbildung 21: Symmetrieebene für das geometrische Modell.....	31
Abbildung 22: Vereinfachte Modellbildung Fensterbrüstung und Wandaufbau [58].....	32
Abbildung 23: li.: Außenwanddecke Hochlochziegel; re.: Deckenaufleger Hochlochziegel [58] ....	34
Abbildung 24: li.: Fenstersturz- und Brüstung Hochlochziegel; re.: Fensterlaibung Hochlochziegel [58].....	34
Abbildung 25 – DIN EN ISO 13791 [66]: 2012-08, Geometrie der Prüfräume.....	35
Abbildung 26: Grundriss Regelgeschoss   Bürogebäude.....	36
Abbildung 27: Grundriss Erdgeschoss   1.   2. Obergeschoss   Wohngebäude.....	36
Abbildung 28: Tagesmittel der raumseitigen Lufttemperatur und -feuchte in Abhängigkeit vom Tagesmittel der Außenlufttemperatur nach WTA 6-2 [69].....	41
Abbildung 29: Nachweisfrei Konstruktion nach DIN 68800-2.....	42
Abbildung 30: Grenzkurve der rel. Porenluftfeuchte für eine 1 cm dicke Holzschicht, nach [46]	43
Abbildung 31: Wärmeeindringtiefe für 12- und 24-Stunden-Zyklen, Quellen der Grundlagenwerte: DIN 10456 [1], DIN 4108-4 [36], Produktkataloge [29, 37–39], Wärmeeindringtiefe: eigene Berechnungen.....	46
Abbildung 32: Modellbildung Parameterstudie: 567 Varianten in 3 Raummodellen.....	47
Abbildung 33: 28 Varianten in 4 Raummodellen mit [81].....	48
Abbildung 34: Input des Einfamilienhauses [64, 81–85, 85].....	50
Abbildung 35: Input vom Mehrfamilienhaus [81–84].....	51

Abbildung 36: Input Büro [81–84].....	52
Abbildung 37: Input Materialkombinationen im Raum- und Gebäudemodell.....	53
Abbildung 38: Vergleich Einschwingdauer HLZ und WDVS-NB-HLZ 36,5 cm.....	55
Abbildung 39: Einschwingdauern der Holz-, Porenbeton- und Lehmkonstruktionen für die Dicken von 36,5 cm, 45 cm, 55 cm und 76 cm; positiv Entfeuchtung .....	57
Abbildung 40: Untersuchter Bereich für die Bewertung der Holzfeuchte .....	58
Abbildung 41: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 36,5 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion).....	58
Abbildung 42: Feuchtegehalt der Holzfaserdämmung; 36,5 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion).....	59
Abbildung 43: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 76 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion).....	60
Abbildung 44: Feuchtegehalt der Holzfaserdämmung; 76 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion).....	60
Abbildung 45: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 36,5 cm Referenzkonstruktion Holz + Polystyrol.....	61
Abbildung 46: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 36,5 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion).....	62
Abbildung 47: Porenluftfeuchte der kritischen 10 mm; 36,5 cm Holzkonstruktion (Grundkonstruktion mit Polystyrol).....	62
Abbildung 48: Vergleich der Feuchtemassenverläufe im eingeschwungenen Zustand von Holzfaser- und Polystyrol.....	63
Abbildung 49: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit; links Hochlochziegel, rechts Porenbeton..	64
Abbildung 50: 20 jähriger Verlauf der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Grundkonstruktionen .....	64
Abbildung 51: Feuchtemasse Hochlochziegel und Porenbeton 36,5 cm.....	65
Abbildung 52: 20jähriger Verlauf der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Referenzkonstruktionen.....	66
Abbildung 53: links: $\Psi$ -Werte Außenwändecken; rechts: $\Psi$ -Wert in Abhängigkeit von der Dicke der Außenwand.....	67
Abbildung 54: $\Psi$ -Werte Deckenaufleger ( $\Psi$ -Wert Dämmbeton 12 cm Auflager und Beton 25 cm + WDVS sehr gering und nicht erkennbar) .....	68
Abbildung 55: $\Psi$ -Werte Fensterbrüstung.....	69
Abbildung 56: Simulationsmodell Fensterbrüstung Referenzkonstruktion, mittlerer Anschluss...	69
Abbildung 57: $\Psi$ -Werte Fensterlaibung .....	70
Abbildung 58: $\Psi$ -Werte Fenstersturz.....	70
Abbildung 59: Übersicht $\Psi$ -Werte verschiedener Anschlussdetails.....	71
Abbildung 60: Temperaturamplitudenverhältnis.....	72
Abbildung 61: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände) abhängig von der Speicherkapazität des Gebäudes pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	73

Abbildung 62: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände) abhängig von der Gesamt-Speicherkapazität des Raumes pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	75
Abbildung 63: Heizwärmebedarf der realen Modelle abhängig von Materialien, sortiert nach Materialien.....	78
Abbildung 64: Heizwärmebedarf der realen Modelle abhängig von den Raum-Anordnungen, sortiert nach Raumtypen .....	79
Abbildung 65: Ausnutzungsgrad der realen Modelle abhängig von den Raum-Anordnungen, sortiert nach Raumtypen .....	79
Abbildung 66: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne abhängig vom Verhältnis der Wärmequellen zu den Wärmesenken.....	80
Abbildung 67: Verhältnis Gewinne zu Verlusten und Überhitzungsstunden, massenloses Modell .....	81
Abbildung 68: mittlere Oberflächentemperatur der Südwand während der Heizperiode .....	83
Abbildung 69: mittlere Oberflächentemperatur der Südwand während der Kühlperiode.....	84
Abbildung 70: mittlere operative Temperatur des Raums während der Heizperiode .....	85
Abbildung 71: mittlere operative Temperatur des Raums während der Kühlperiode.....	86
Abbildung 72: Beladungs-/Speicherzyklen, 4. Januar, $Q_{source}/Q_{sink}=4$ , Mittelraum, Mittelgeschoss .....	87
Abbildung 73: Beladungs-/Entladungszyklen, 4. Januar, $Q_{source}/Q_{sink}=1$ , Mittelraum, Mittelgeschoss .....	87
Abbildung 74: Nutzungsdauern und Betrachtungszeitraum: Skizze.....	91
Abbildung 66: GWP, PERT, PENRT: Vergleich dreier Dämmstoffe (eigene Darstellung; Daten: Ökobau.dat 2013).....	94
Abbildung 67: 30 Umweltwirkungen dreier Dämmmaterialien (eigene Darstellung; Daten: Ökobau.dat 2013 .....	95
Abbildung 77: Lebenszykluskosten je m <sup>2</sup> Wandfläche der Varianten (Barwert, 75 Jahre, i=4 %) (eigene Darstellung).....	101
Abbildung 78: Treibhauspotential: CO <sub>2</sub> -Emissionen (GWP) (eigene Darstellung).....	102
Abbildung 79: Ozonschichtabbaupotential: R11-Emissionen (ODP) (eigene Darstellung).....	102
Abbildung 80: Ozonbildungspotential: Ethen-Emissionen (POCP) (eigene Darstellung).....	103
Abbildung 81: Versauerungspotential: SO <sub>2</sub> -Emissionen (AP) (eigene Darstellung).....	103
Abbildung 82: Überdüngungspotenzial: PO <sub>4</sub> -Emissionen (EP) (eigene Darstellung).....	104
Abbildung 83: Bedarf nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT) (eigene Darstellung).....	105
Abbildung 84: Lebenszykluskosten Wohngebäude (eigene Darstellung).....	108
Abbildung 85: Lebenszykluskosten Bürogebäude (eigene Darstellung) .....	109
Abbildung 86: Umweltauswirkungen des Wohngebäudes im gesamten Lebenszyklus (LCA) (eigene Darstellung).....	111
Abbildung 87: Umweltauswirkungen des Bürogebäudes im gesamten Lebenszyklus (LCA) (eigene Darstellung).....	112
Abbildung 88: Anteil Umweltauswirkung an gesamten Lebenszyklus (Wohnen) (eigene Darstellung).....	113

Abbildung 89: Anteil Umweltauswirkung an gesamten Lebenszyklus (Büro) (eigene Darstellung)	113
Abbildung 90: Umweltauswirkung Bauwerk (Wohnen) (eigene Darstellung)	115
Abbildung 91: Umweltauswirkung Bauwerk (Büro) (eigene Darstellung)	116
Abbildung 92: Flächeneffizienz der untersuchten Varianten (jeweils Wohnen)	118
Abbildung 93: Kaufpreis für Bauland bezogen auf $712,6 \text{ m}^2_{\text{NuF}}$ (eigene Darstellung)	119
Abbildung 94: Lebenszykluskosten (Bauland & Bauwerk) ( $i=4 \%$ ; Bodenrichtwert $250 \text{ €/m}^2\text{a}$ )	120
Abbildung 95: Sensitivität der betrachteten Indikatoren (eigene Darstellung)	123
Abbildung 96: links: Außenwanddecke Vollholz; rechts: Deckenaufleger Vollholz [58]	150
Abbildung 97: links: Fenstersturz- und Brüstung Vollholz; rechts: Fensterlaibung Vollholz	150
Abbildung 98: Fenstersturz mit Deckenaufleger Vollholz	151
Abbildung 99: links: Außenwanddecke Referenzkonstruktion; rechts: Deckenaufleger Referenzkonstruktion	151
Abbildung 100: links: Fenstersturz- und Brüstung Referenzkonstruktion; rechts: Fensterlaibung Referenzkonstruktion	152
Abbildung 101: Fenstersturz mit Deckenaufleger Referenzkonstruktion	152
Abbildung 102: links: Außenwanddecke Referenzwand Normalbeton; rechts: Deckenaufleger Referenzwand Normalbeton	153
Abbildung 103: links: Fenstersturz- und Brüstung Referenzwand Normalbeton; rechts: Fensterlaibung Referenzwand Normalbeton	153
Abbildung 104: Fenstersturz mit Deckenaufleger Referenzwand Normalbeton[58]	154
Abbildung 105: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Hochlochziegel	155
Abbildung 106: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Porenbeton	155
Abbildung 107: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Vollholz	156
Abbildung 108: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Lehm	156
Abbildung 109: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Normalbeton	157
Abbildung 110: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Holzfaserdämmung	157
Abbildung 111: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Polystyrolämmung	158
Abbildung 112: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Kalkzementputz	158
Abbildung 113: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Zementputz	159
Abbildung 114: Sorptionsisotherme Hochlochziegel	160
Abbildung 115: Sorptionsisotherme Porenbeton	160
Abbildung 116: Sorptionsisotherme Vollholz	161
Abbildung 117: Sorptionsisotherme Lehm	161
Abbildung 118: Sorptionsisotherme Normalbeton	162
Abbildung 119: Sorptionsisotherme Holzfaserdämmung	162
Abbildung 120: Sorptionsisotherme Polystyrolämmung	163
Abbildung 121: Sorptionsisotherme Kalkzementputz	163
Abbildung 122: Sorptionsisotherme Zementputz	164
Abbildung 123: Außenlufttemperatur Potsdam	165
Abbildung 124: relative Außenluftfeuchte Potsdam	166
Abbildung 125: Innenlufttemperatur nach WTA	166

Abbildung 126: relative Innenluftfeuchte nach WTA für eine normale Feuchtelast.....	167
Abbildung 127: Speicherzyklen, 4. Januar, $Q_{source}/Q_{sink}$ ist gleich 4, Eckraum, Erdgeschoss.....	168
Abbildung 128: Speicherzyklen, 4. Januar, $Q_{source}/Q_{sink}$ ist gleich 4, Mittelraum, Erdgeschoss....	168
Abbildung 129: Speicherzyklen, 4. Januar, $Q_{source}/Q_{sink}$ ist gleich 4, Eckraum, Mittelgeschoss....	169
Abbildung 130: Speicherzyklen, 4. Januar, $Q_{source}/Q_{sink}$ ist gleich 4, Mittelraum, Mittelgeschoss	169
Abbildung 131: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	170
Abbildung 132: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	171
Abbildung 133: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Boden) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	172
Abbildung 134: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Boden) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	173
Abbildung 135: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	174
Abbildung 136: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	175
Abbildung 137: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Boden& Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	176
Abbildung 138: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Boden& Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	177
Abbildung 139: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände& Innenwände) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	178
Abbildung 140: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände& Innenwände) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	179
Abbildung 141: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände& Boden &Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	180
Abbildung 142: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände& Boden& Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	181

Abbildung 143: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände& Boden& Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	182
Abbildung 144: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände& Boden& Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	183
Abbildung 145: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände& Außenwände& Boden& Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen.....	184
Abbildung 146: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände& Außenwände& Boden& Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen .....	185
Abbildung 147: Sensitivität der Lebenszykluskosten auf den Diskontierungszinssatz .....	186
Abbildung 148: EPD EPS-Fassadendämmung; Werte: Ökobau.dat und BNB; eigene Berechnung .....	190
Abbildung 149: EPD Mineralwolle-Fassadendämmung; Werte: Ökobau.dat und BNB; eigene Berechnung.....	191
Abbildung 150: EPD Holzfaser-Fassadendämmung; Werte: Ökobau.dat und BNB; eigene Berechnung.....	192
Abbildung 151: Ökobilanz für drei Wärmedämmtypen mit identischem thermischen Widerstand, Betrachtungszeitraum: 75 Jahre, Nutzungsdauer gemäß BNB; Werte: Ökobau.dat; eigene Berechnung.....	193

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauphysikalische Kenndaten der betrachteten Materialien sowie von Vergleichsmaterialien, Quellen: DIN 10456 [1], DIN 4108-4 [36], Produktkataloge [29, 37–39], eigene Berechnungen .....	17
Tabelle 2: Randbedingungen hygrothermische Simulation .....	28
Tabelle 3: Verwendete Materialkennwerte für die hygrothermischen Simulation .....	29
Tabelle 4: Konstruktionsaufbau der Grund- und Referenzkonstruktionen für Hochlochziegelwände .....	30
Tabelle 5: U-Werte, Dicke der Tragkonstruktion und Dämmschicht für die Grund- und Referenzkonstruktion aus Hochlochziegel.....	30
Tabelle 6: Randbedingungen thermische Simulation.....	31
Tabelle 7: Wandaufbauten $U=0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ - thermisch .....	32
Tabelle 8: Stahlbetondecke für Hochlochziegel, Porenbeton und Dämmbeton (thermisch).....	33
Tabelle 9: Holzdecke für Holzkonstruktion (thermisch).....	33
Tabelle 10: Wärme- und Feuchtetransportmechnismen, sowie deren Ursache nach [42] .....	38
Tabelle 11: Randbedingungen Glaserverfahren - Tauperiode .....	39
Tabelle 12: Randbedingungen Glaserverfahren - Verdunstungsperioded.....	40
Tabelle 13: Anforderung an $s_d$ -Werte nach DIN 68800-2 .....	42
Tabelle 14: Einschwingdauern von Hochlochziegelkonstruktionen.....	56
Tabelle 15: feuchtabhängige Wärmeleitfähigkeit - Merkmale von 36,5 cm dicken monolithischen Wänden .....	65
Tabelle 16: feuchtabhängige Wärmeleitfähigkeit - Merkmale der Referenzkonstruktionen.....	66
Tabelle 17: Variantenbildung für die ökonomische und ökologische Betrachtung – Aufbauten (eigene Darstellung).....	107
Tabelle 18: Variantenbildung für die ökonomische und ökologische Betrachtung – Stückzahlen (eigene Darstellung).....	107
Tabelle 19: Umweltauswirkungen für die Bereitstellung von Heizwärme (eigene Darstellung, Quelle: Ökobau.dat).....	110
Tabelle 20: Flächenbedarf (eigene Darstellung).....	119
Tabelle 21: Bodenwertverzinsung ( $i=4 \%$ ) für Bauland in Abhängigkeit von Bodenrichtwerten [€ p.a.] (eigene Darstellung) .....	120
Tabelle 22: Konstruktionsaufbau der Holzwände .....	144
Tabelle 23: U-Werte der Holzwände .....	144
Tabelle 24: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Holz.....	144
Tabelle 25: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Holz .....	145
Tabelle 26: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Normalbeton.....	145
Tabelle 27: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Normalbeton.....	145
Tabelle 28: Konstruktionsaufbau der Porenbetonwände .....	145
Tabelle 29: U-Werte der Porenbetonwände .....	146
Tabelle 30: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Porenbeton.....	146

Tabelle 31: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Porenbeton.....	146
Tabelle 32: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Normalbeton.....	146
Tabelle 33: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Normalbeton.....	147
Tabelle 34: Konstruktionsaufbau der Lehmwände .....	147
Tabelle 35: U-Werte der Lehmwände .....	147
Tabelle 36: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Lehm.....	148
Tabelle 37: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Lehm.....	148
Tabelle 38: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Normalbeton.....	148
Tabelle 39: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Normalbeton.....	149

## 10.1 Konstruktionsaufbauten hygrothermische Untersuchung

### 1. Holz

#### Konstruktionsaufbau der Holzkonstruktion (Grundkonstruktion)

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

Tabelle 22: Konstruktionsaufbau der Holzwände

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
626	Vollholz (innen)	x
270	Holzweichfaserplatte	0,02
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Mit den festgelegten Wandstärken ergeben sich verschiedene U-Werte.

Tabelle 23: U-Werte der Holzwände

Kurzbezeichnung	Dicke der Tragkonstruktion [m]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]
Holz-36,5	0,365	0,189
Holz-45	0,45	0,157
Holz-55	0,55	0,131
Holz-76	0,76	0,097

#### Konstruktionsaufbau der Referenzkonstruktion aus Vollholz

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

Tabelle 24: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Holz

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
626	Vollholz (innen)	0,20
187	Polystyrol	x
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Daraus resultieren folgende Dämmschichtdicken:

Tabelle 25: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Holz

Wandtyp	Dicke der Dämmung der Referenzwand
WDVS-Holz-36,5	0,163
WDVS-Holz-45	0,202
WDVS-Holz-55	0,247
WDVS-Holz-76	0,343

### Konstruktionsaufbau der Referenzkonstruktion aus Normalbeton

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

Tabelle 26: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Normalbeton

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
145	Zementputz (innen)	0,01
569	Normalbeton	0,175
187	Polystyrol	x
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Daraus resultieren folgende Dämmschichtdicken:

Tabelle 27: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Normalbeton

Wandtyp	Dicke der Dämmung der Referenzwand
WDVS-Nb-Holz-36,5	0,180
WDVS-Nb-Holz-45	0,219
WDVS-Nb-Holz-55	0,264
WDVS-Nb-Holz-76	0,360

## 2. Porenbeton

### Konstruktionsaufbau der Porenwandkonstruktion (Grundkonstruktion)

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

Tabelle 28: Konstruktionsaufbau der Porenbetonwände

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
145	Zementputz (innen)	0,01

1	Porenbeton	x
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Mit den festgelegten Wandstärken ergeben sich verschiedene U-Werte.

*Tabelle 29: U-Werte der Porenbetonwände*

Kurzbezeichnung	Dicke der Tragkonstruktion [m]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]
Pb-36,5	0,365	0,246
Pb-45	0,45	0,202
Pb-55	0,55	0,166
Pb-76	0,76	0,122

### **Konstruktionsaufbau der Referenzkonstruktion aus Porenbeton**

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

*Tabelle 30: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Porenbeton*

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
145	Zementputz (innen)	0,01
1	Porenbeton	0,20
187	Polystyrol	x
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Daraus resultieren folgende Dämmschichtdicken:

*Tabelle 31: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Porenbeton*

Wandtyp	Dicke der Dämmung der Referenzwand
WDVS-Pb-36,5	0,063
WDVS-Pb-45	0,095
WDVS-Pb-55	0,133
WDVS-Pb-76	0,212

### **Konstruktionsaufbau der Referenzkonstruktion aus Normalbeton**

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

*Tabelle 32: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Normalbeton*

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
145	Zementputz (innen)	0,01
569	Normalbeton	0,175
187	Polystyrol	x
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Daraus resultieren folgende Dämmschichtdicken:

*Tabelle 33: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Normalbeton*

Wandtyp	Dicke der Dämmung der Referenzwand
WDVS-Nb-Pb-36,5	0,135
WDVS-Nb-Pb-45	0,168
WDVS-Nb-Pb-55	0,205
WDVS-Nb-Pb-76	0,285

### 3. Lehm

#### **Konstruktionsaufbau der Porenwandkonstruktion (Grundkonstruktion)**

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

*Tabelle 34: Konstruktionsaufbau der Lehmwände*

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
145	Zementputz (innen)	0,01
432	Lehm	x
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Mit den festgelegten Wandstärken ergeben sich verschiedene U-Werte.

*Tabelle 35: U-Werte der Lehmwände*

Kurzbezeichnung	Dicke der Tragkonstruktion [m]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> *K)]
Lehm-36,5	0,365	0,344
Lehm-45	0,45	0,283
Lehm-55	0,55	0,234
Lehm-76	0,76	0,172

### Konstruktionsaufbau der Referenzkonstruktion aus Porenbeton

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

Tabelle 36: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Lehm

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
145	Zementputz (innen)	0,01
432	Lehm	0,20
187	Polystyrol	x
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Daraus resultieren folgende Dämmschichtdicken:

Tabelle 37: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Lehm

Wandtyp	Dicke der Dämmung der Referenzwand
WDVS-Lehm-36,5	0,044
WDVS-Lehm-45	0,066
WDVS-Lehm-55	0,093
WDVS-Lehm-76	0,149

### Konstruktionsaufbau der Referenzkonstruktion aus Normalbeton

Die Konstruktion ist wie folgt aufgebaut:

Tabelle 38: Konstruktionsaufbau der Referenzwand aus Normalbeton

Materialnummer in der Datenbank DELPHIN	Material	Dicke [m]
145	Zementputz (innen)	0,01
569	Normalbeton	0,175
187	Polystyrol	x
242	Kalkzementputz (aussen)	0,02

Daraus resultieren folgende Dämmschichtdicken:

*Tabelle 39: Dämmschichtdicken der Referenzwand aus Normalbeton*

Wandtyp	Dicke der Dämmung der Referenzwand
WDVS-Nb-Lehm-36,5	0,094
WDVS-Nb-Lehm-45	0,116
WDVS-Nb-Lehm-55	0,143
WDVS-Nb-Lehm-76	0,199

## 10.2 Konstruktionsaufbauten thermische Untersuchung

Die nachfolgenden Zeichnungen sind [58] entnommen.

### Vollholz:

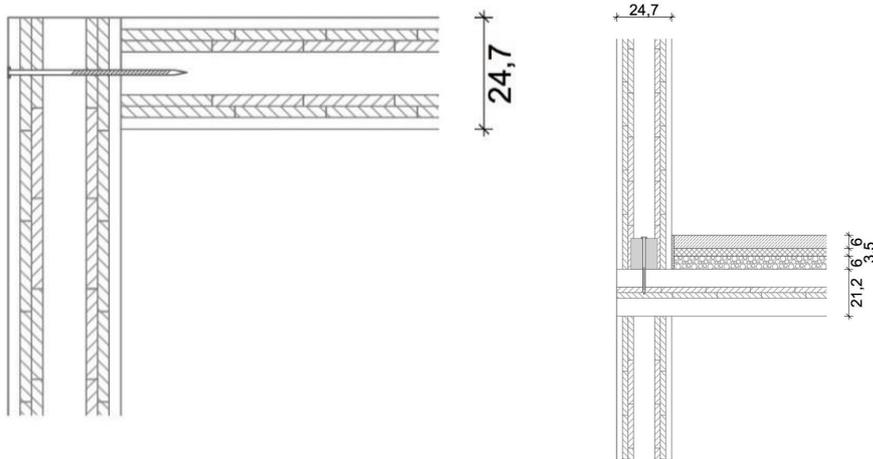


Abbildung 96: links: Außenwanddecke Vollholz; rechts: Deckenauflager Vollholz [58]

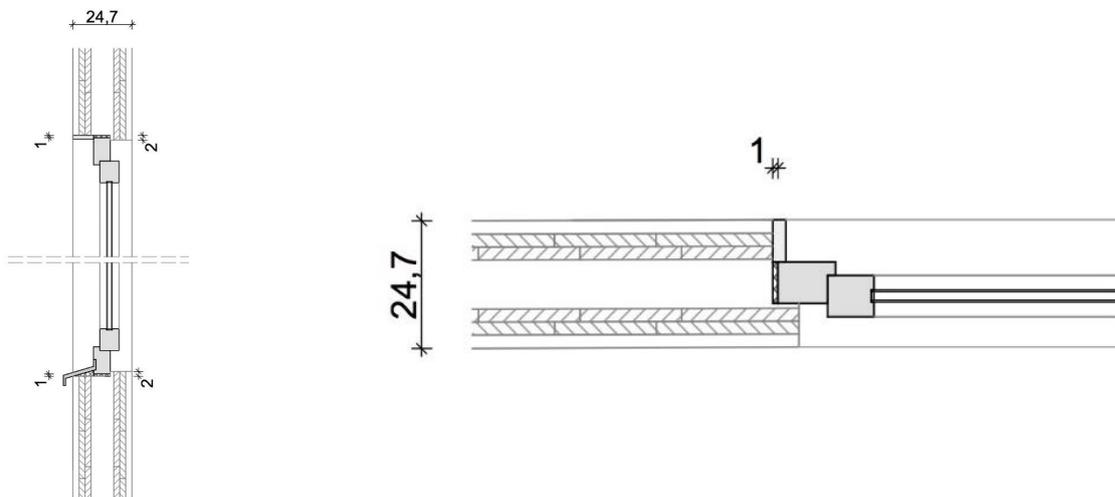


Abbildung 97: links: Fenstersturz- und Brüstung Vollholz; rechts: Fensterlaibung Vollholz

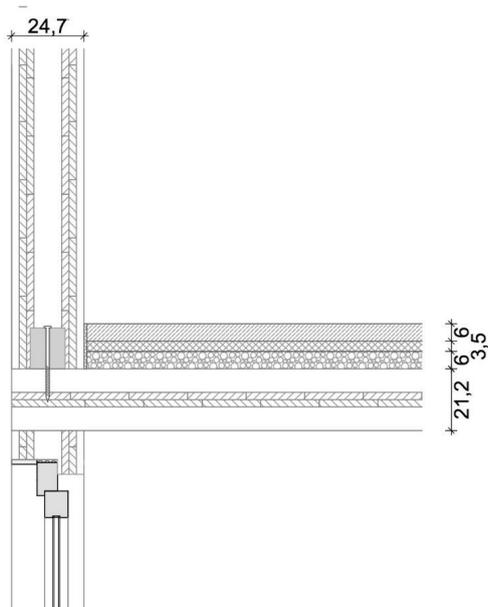


Abbildung 98: Fenstersturz mit Deckenaufleger Vollholz

**Referenzkonstruktion:**

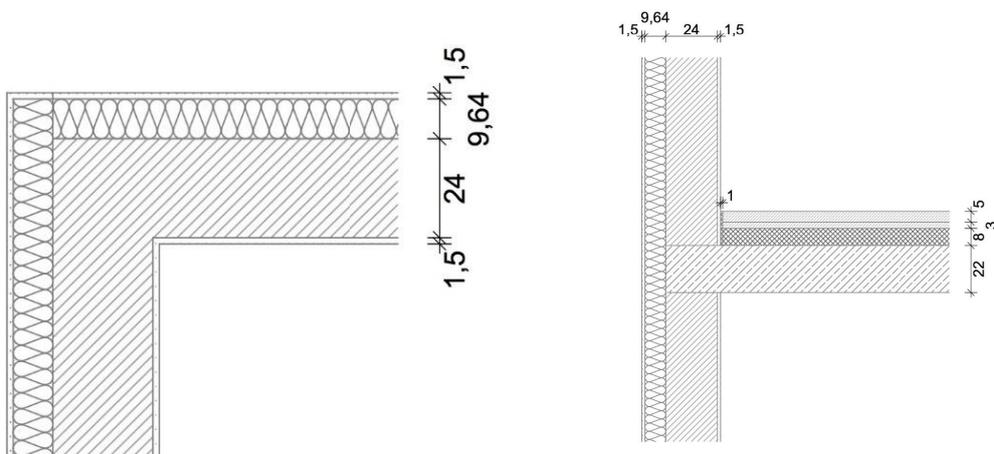


Abbildung 99: links: Außenwanddecke Referenzkonstruktion; rechts: Deckenaufleger Referenzkonstruktion

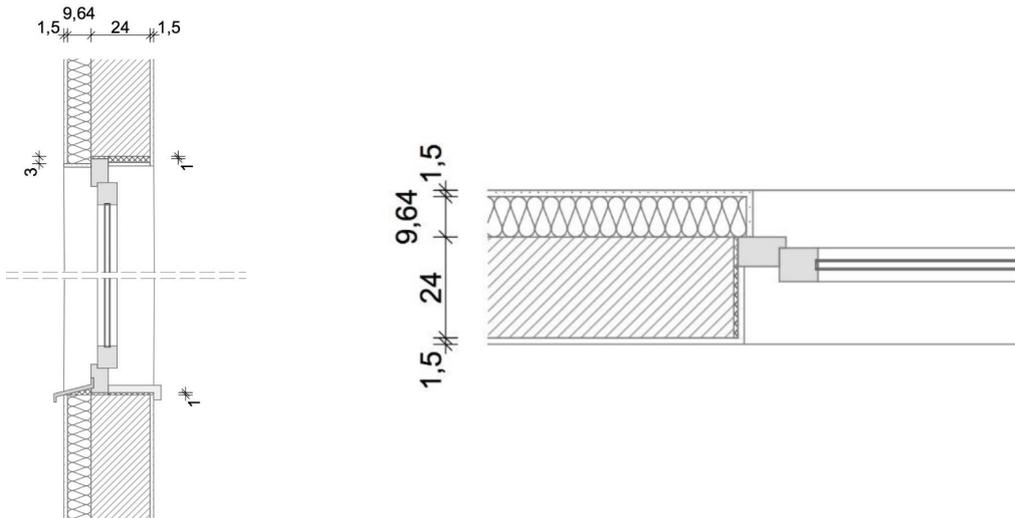


Abbildung 100: links: Fenstersturz- und Brüstung Referenzkonstruktion; rechts: Fensterlaibung Referenzkonstruktion

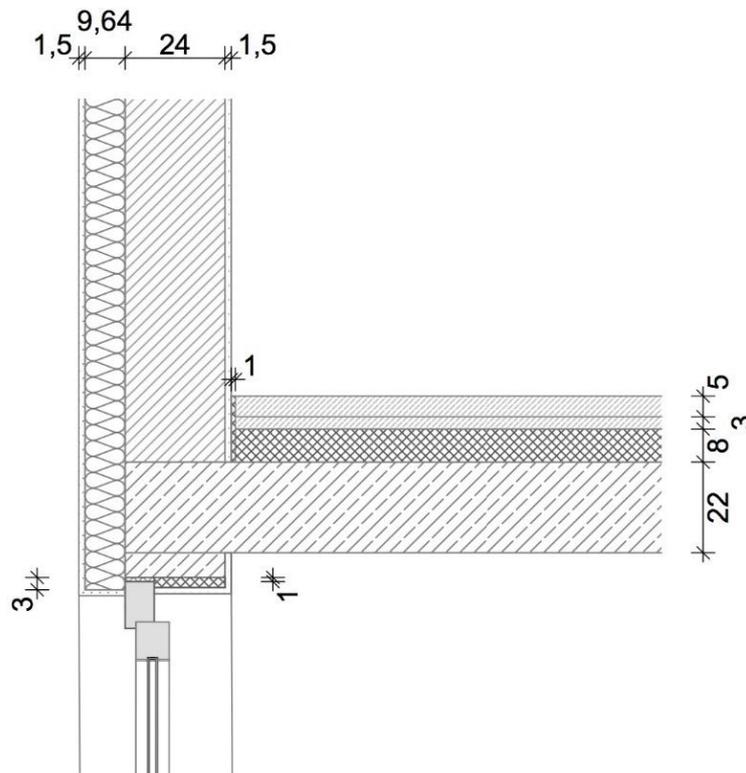


Abbildung 101: Fenstersturz mit Deckenaufleger Referenzkonstruktion

**Normalbeton (Referenzkonstruktion):**

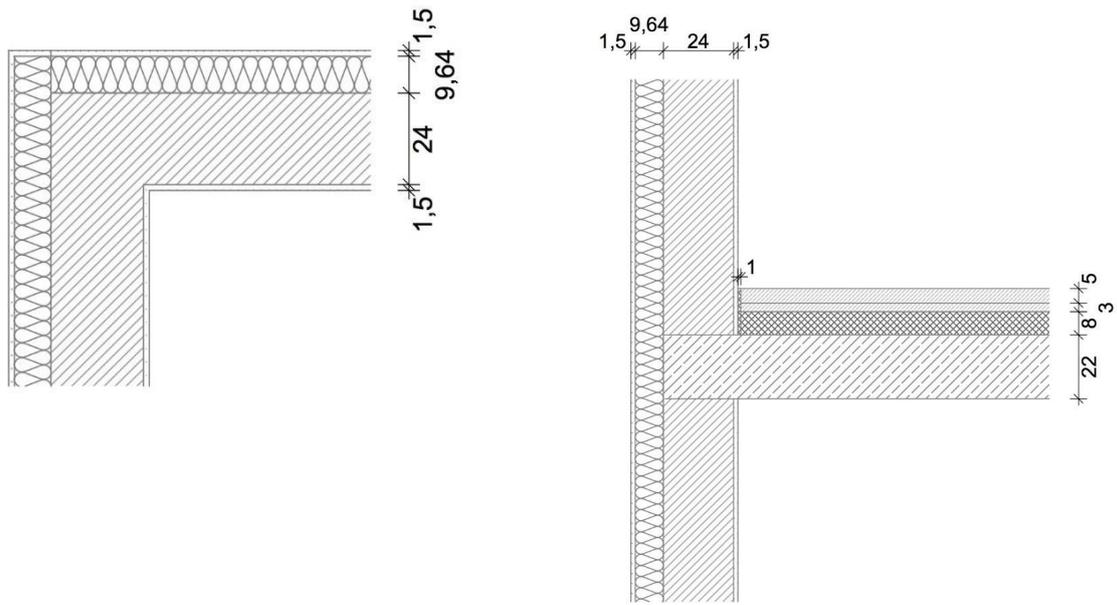


Abbildung 102: links: Außenwanddecke Referenzwand Normalbeton; rechts: Deckenaufleger Referenzwand Normalbeton

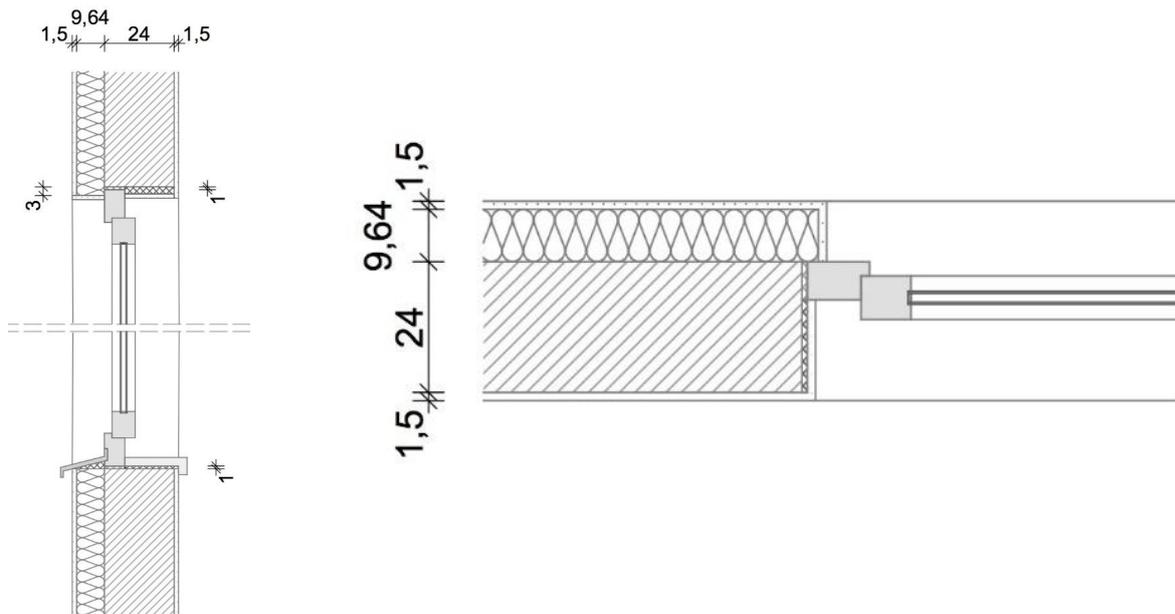


Abbildung 103: links: Fenstersturz- und Brüstung Referenzwand Normalbeton; rechts: Fensterlaibung Referenzwand Normalbeton

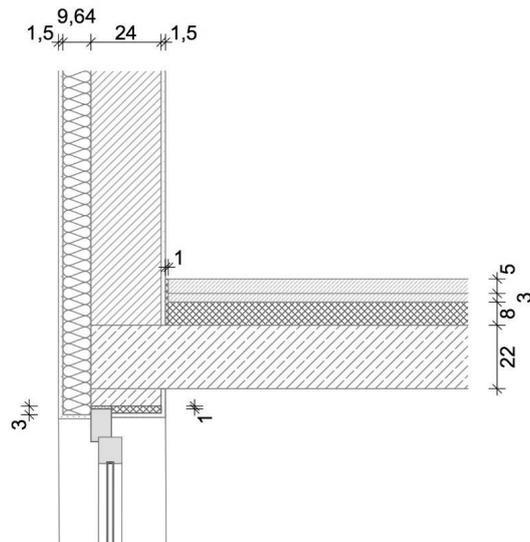


Abbildung 104: Fenstersturz mit Deckenaufleger Referenzwand Normalbeton[58]

## 10.3 Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit

### Hochlochziegel

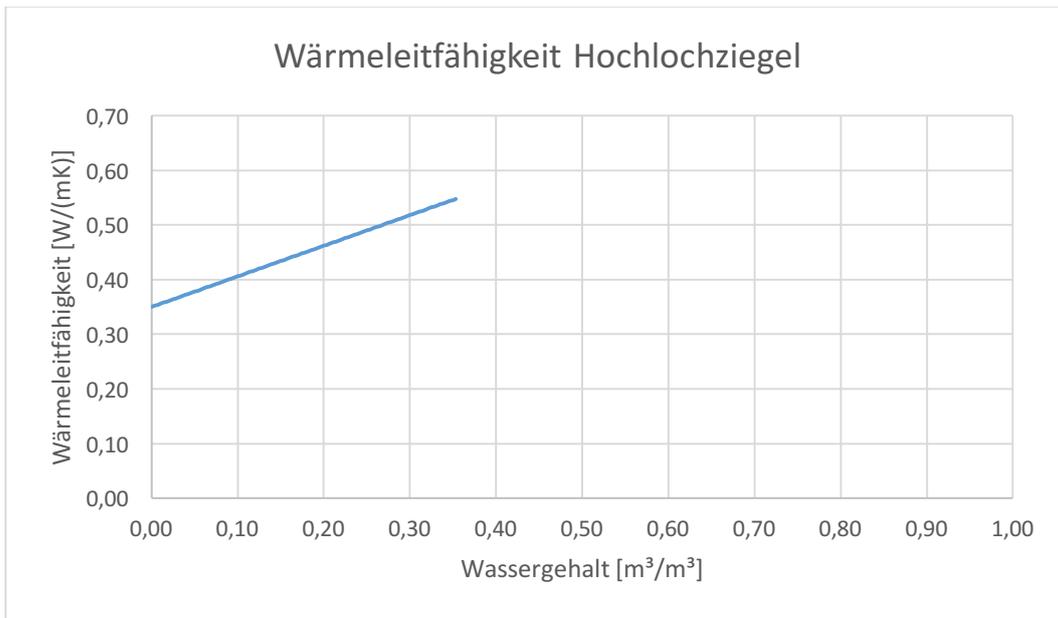


Abbildung 105: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Hochlochziegel

### Porenbeton

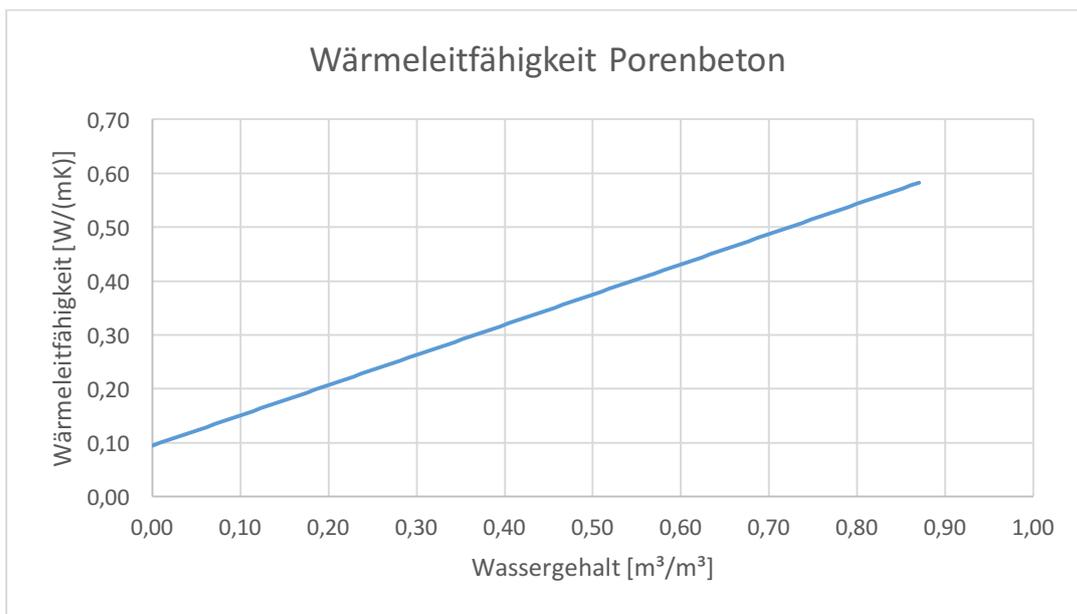


Abbildung 106: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Porenbeton

## Vollholz

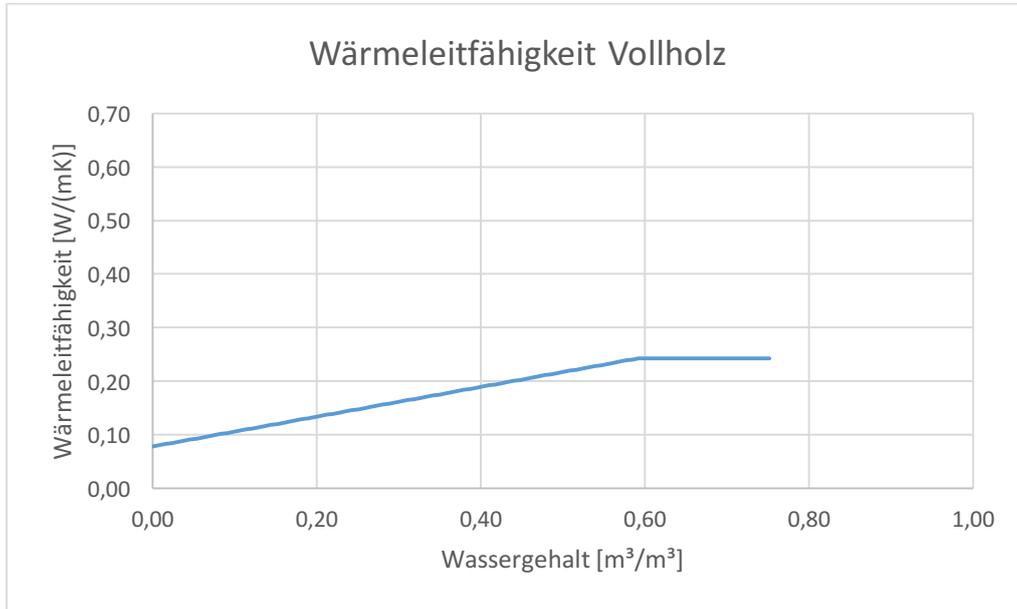


Abbildung 107: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Vollholz

## Lehm

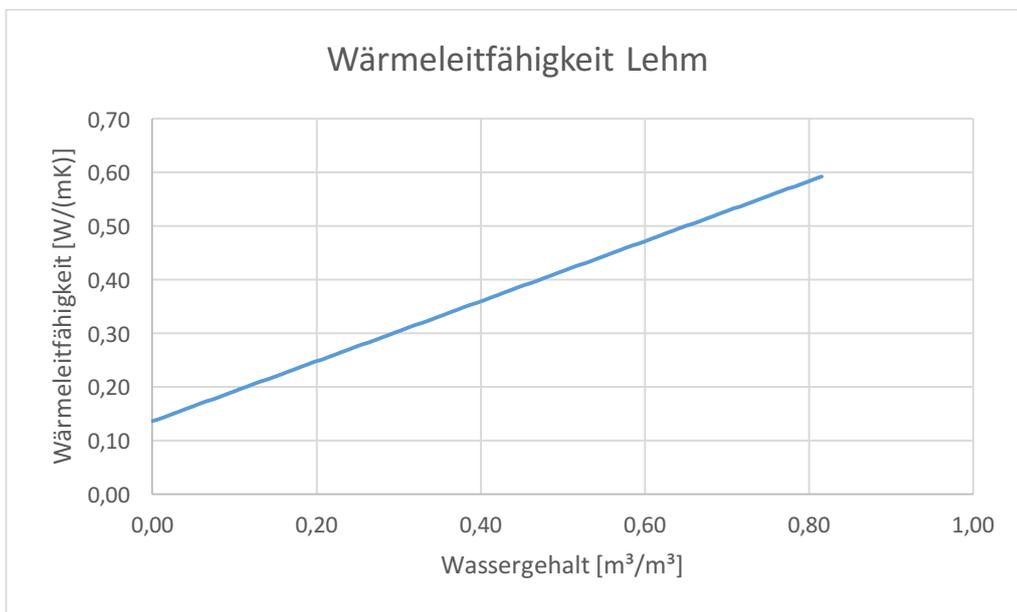


Abbildung 108: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Lehm

## Normalbeton

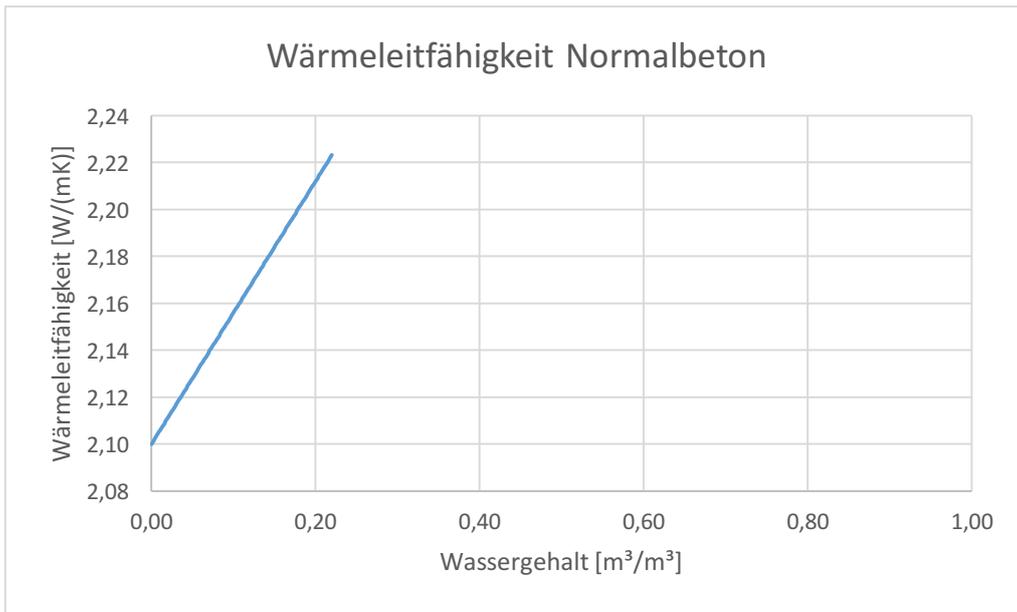


Abbildung 109: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Normalbeton

### Holzfaserdämmung

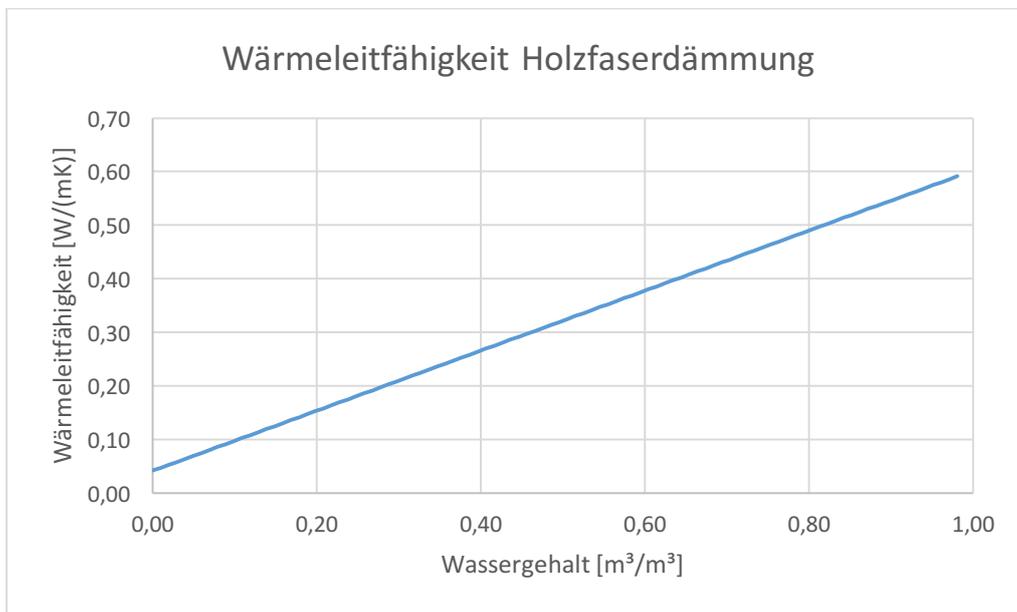


Abbildung 110: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Holzfaserdämmung

### Polystyrolämmung

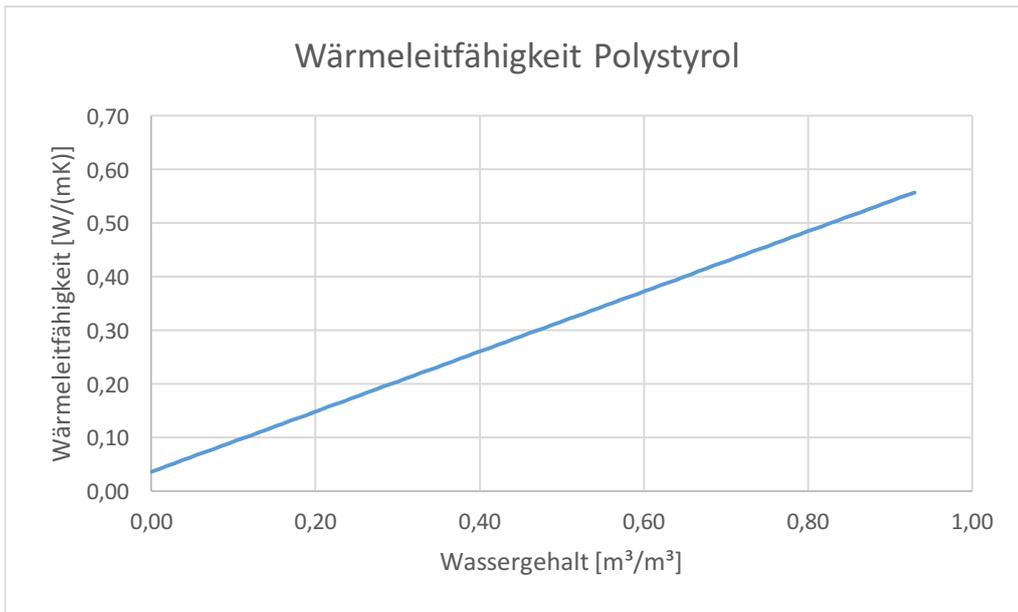


Abbildung 111: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Polystyrolämmung

### Kalkzementputz

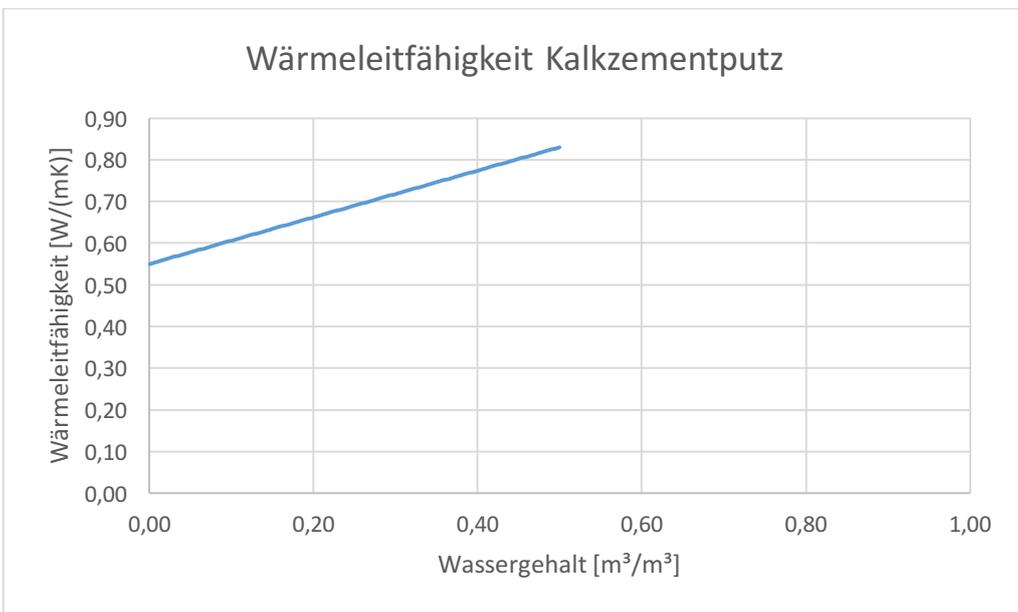


Abbildung 112: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Kalkzementputz

### Zementputz

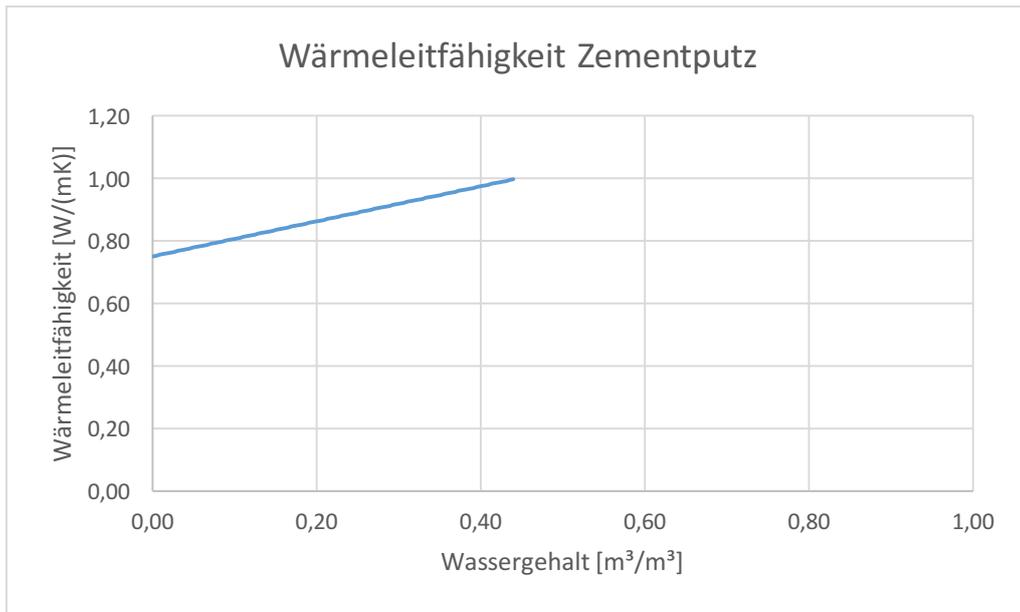


Abbildung 113: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit Zementputz

## 10.4 Sorptionsisotherme

### Hochlochziegel

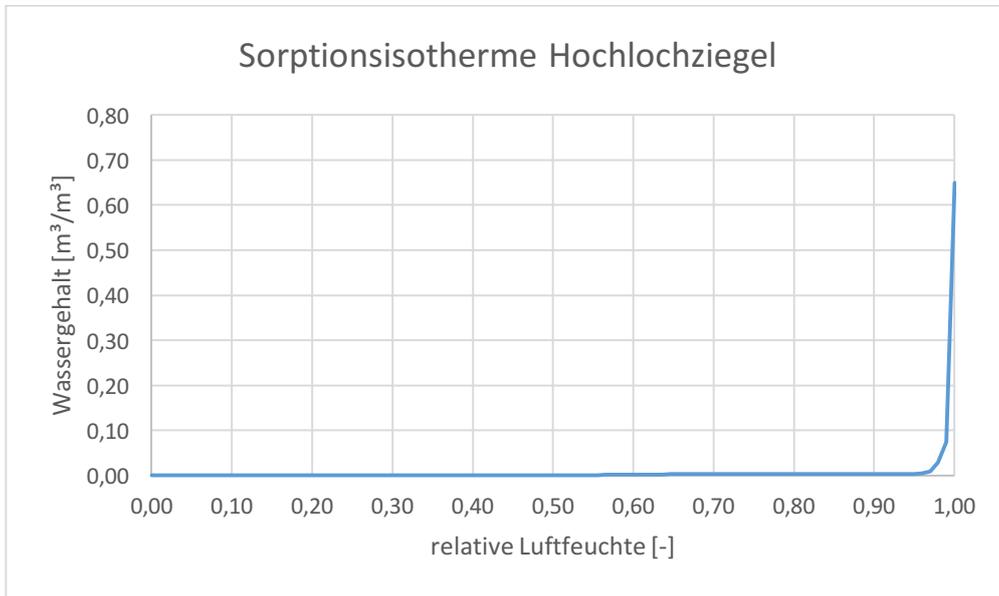


Abbildung 114: Sorptionsisotherme Hochlochziegel

### Porenbeton

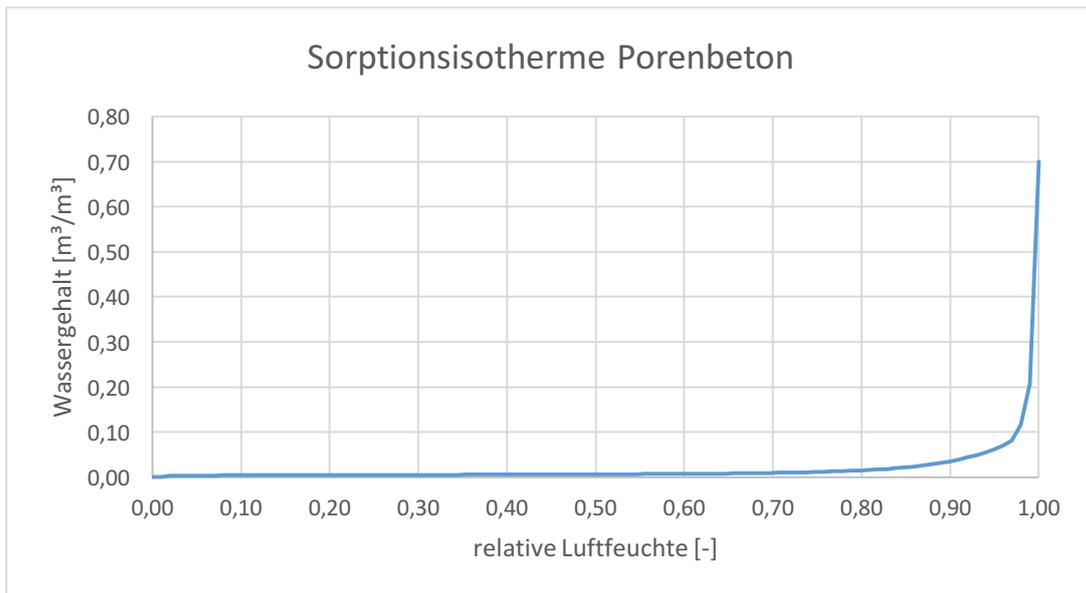


Abbildung 115: Sorptionsisotherme Porenbeton

## Vollholz

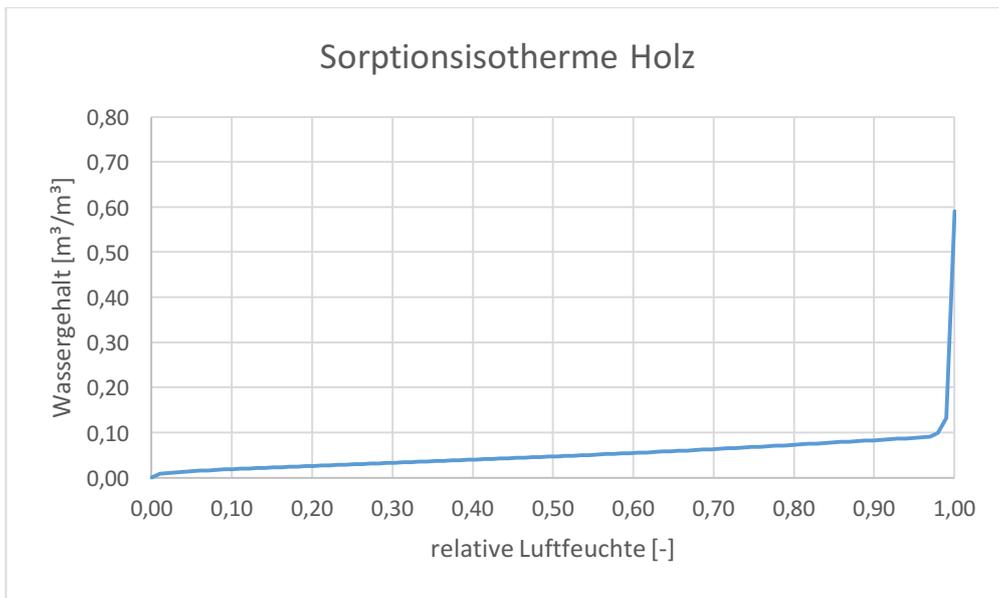


Abbildung 116: Sorptionsisotherme Vollholz

## Lehm

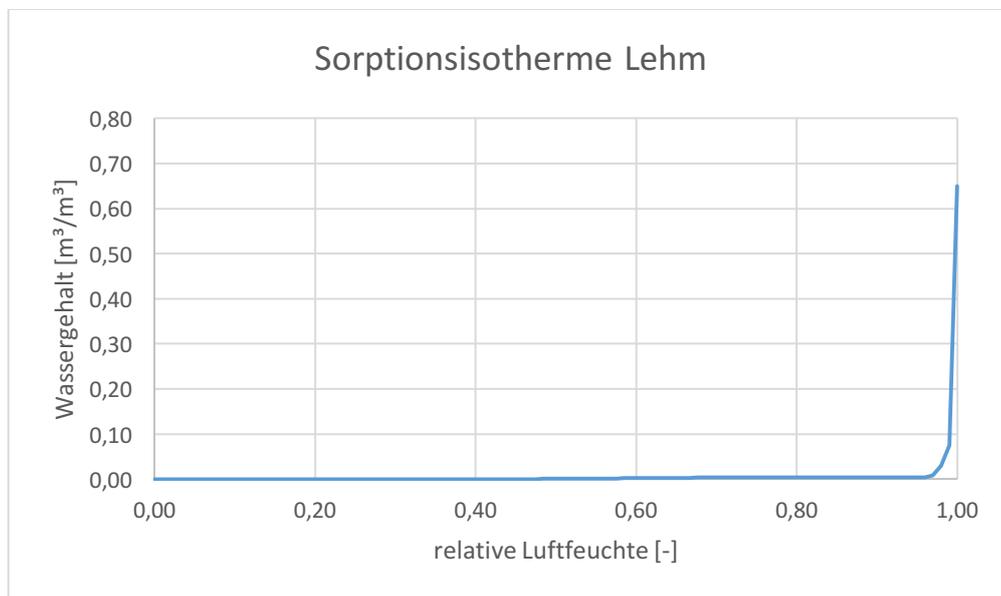


Abbildung 117: Sorptionsisotherme Lehm

## Normalbeton

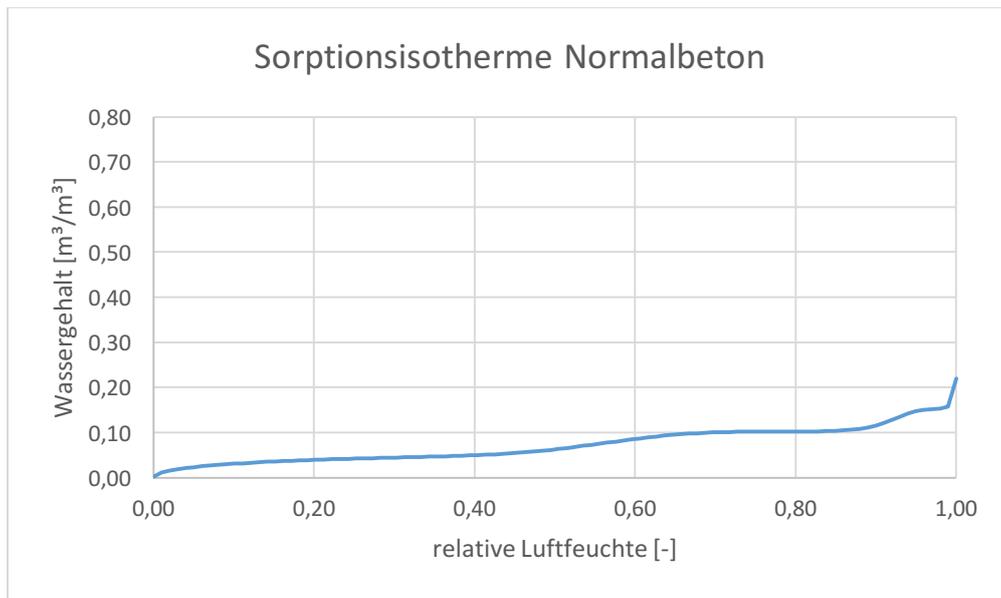


Abbildung 118: Sorptionsisotherme Normalbeton

## Holzfaserdämmung

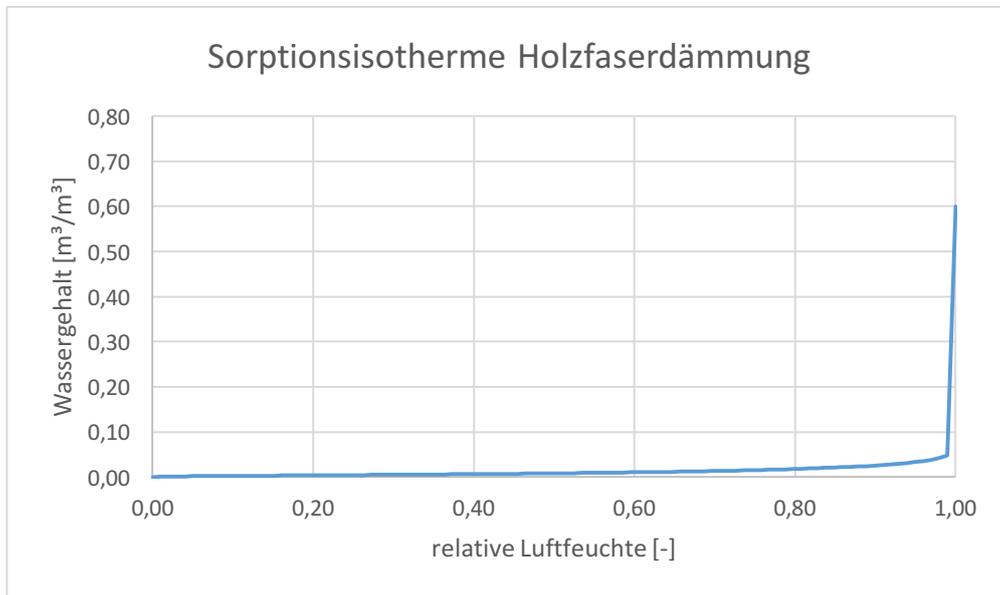


Abbildung 119: Sorptionsisotherme Holzfaserdämmung

## Polystyroldämmung

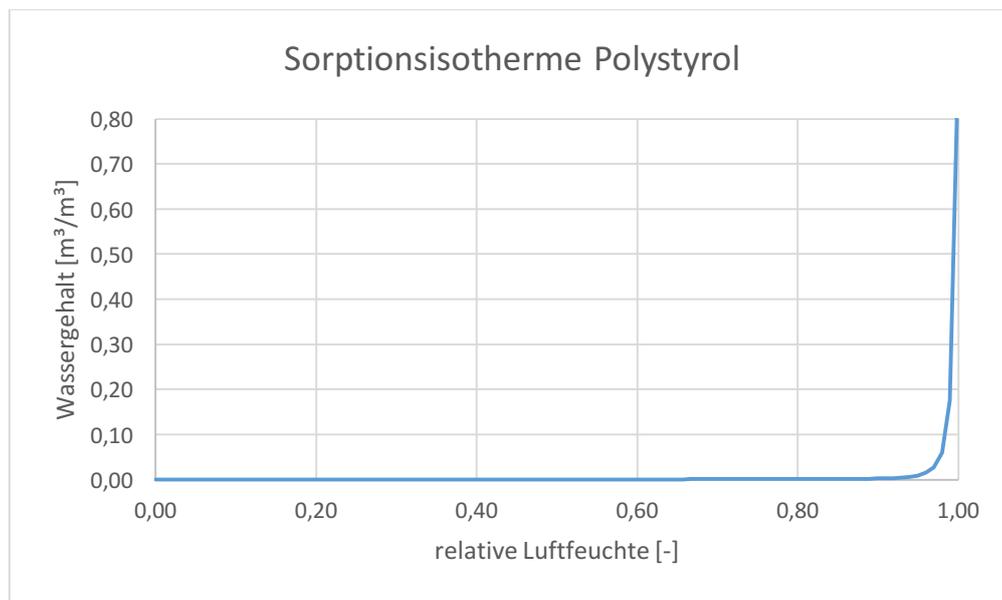


Abbildung 120: Sorptionsisotherme Polystyroldämmung

## Kalkzementputz

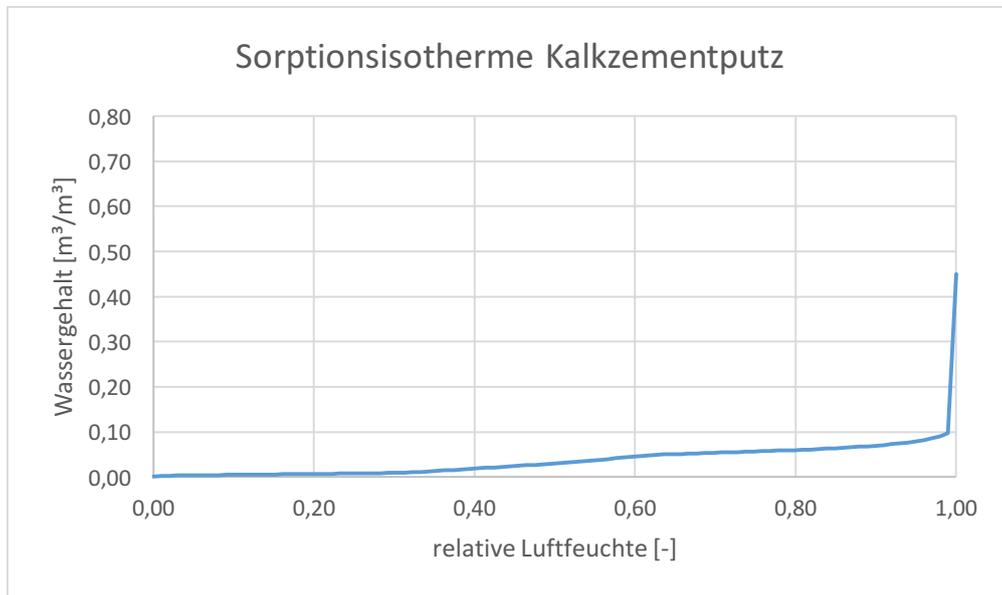


Abbildung 121: Sorptionsisotherme Kalkzementputz

## Zementputz

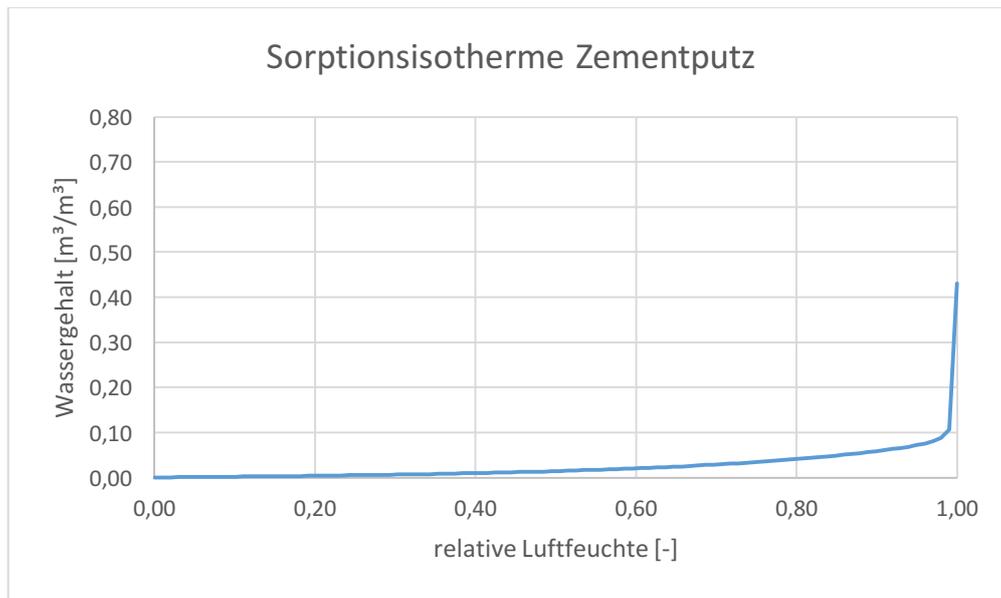


Abbildung 122: Sorptionsisotherme Zementputz

## 10.5 Klimadaten

### Außenklima Potsdam

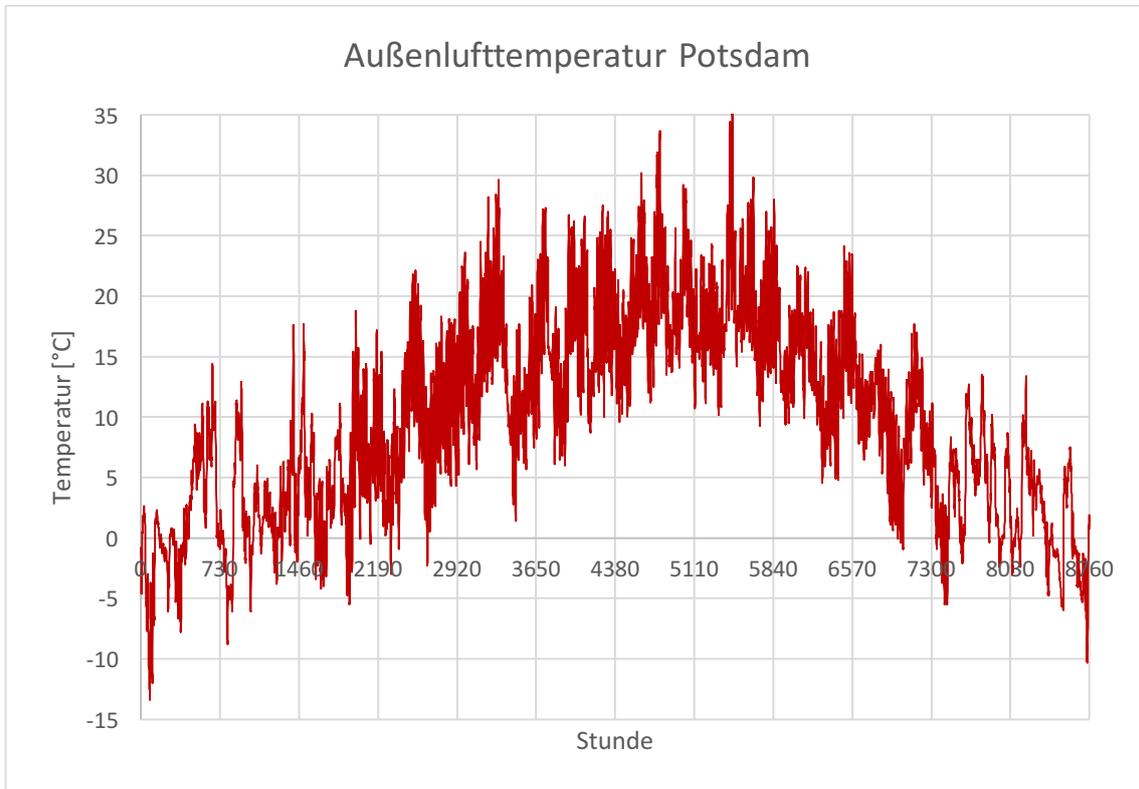


Abbildung 123: Außenlufttemperatur Potsdam

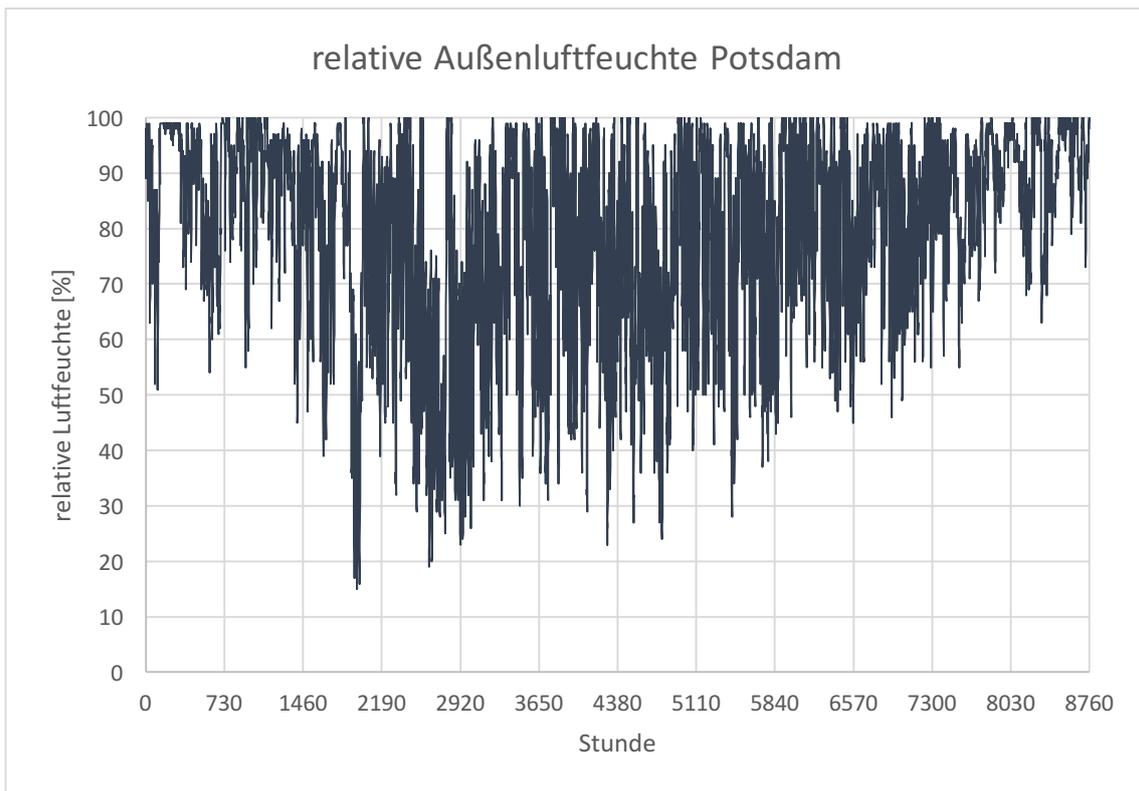


Abbildung 124: relative Außenluftfeuchte Potsdam

**Innenklima für Potsdam nach WTA**

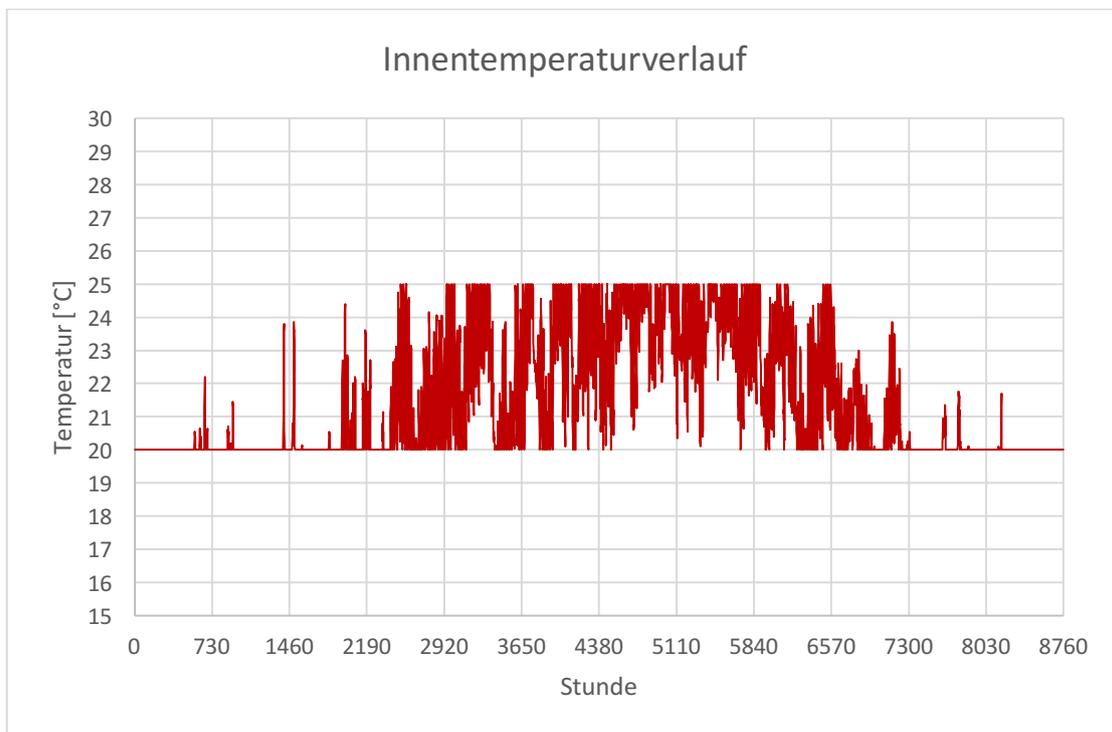


Abbildung 125: Innenlufttemperatur nach WTA

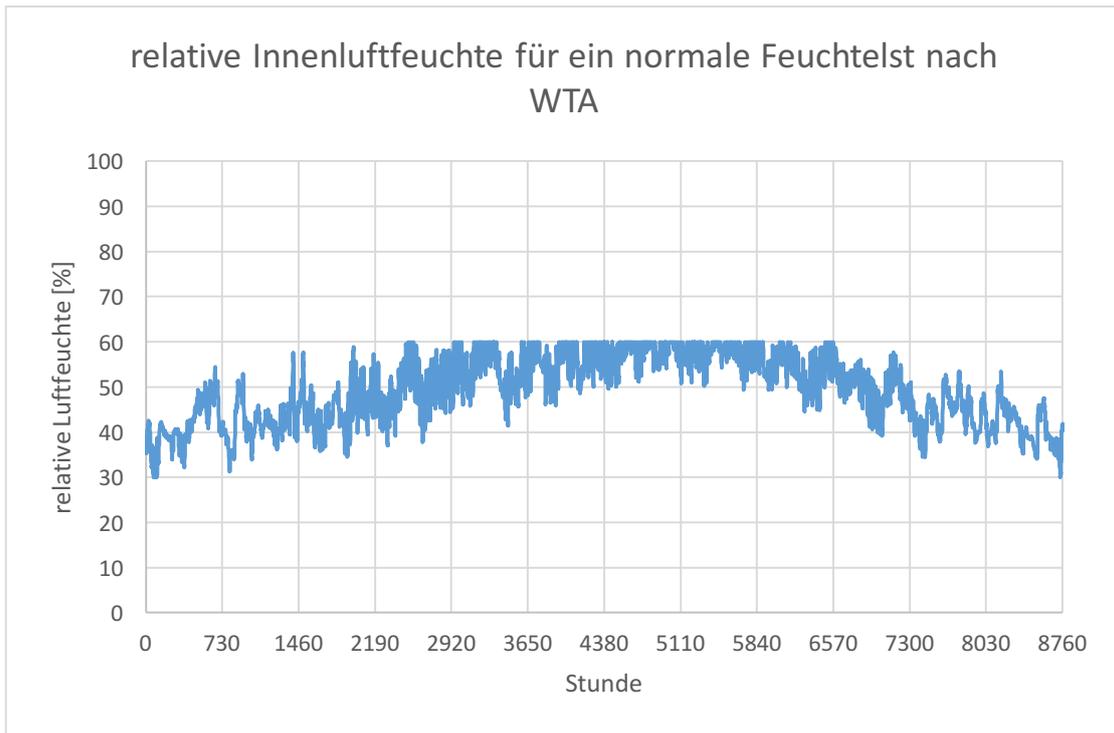


Abbildung 126: relative Innenluftfeuchte nach WTA für eine normale Feuchtelast

## 10.6 Systembetrachtung : Simulationsergebnisse

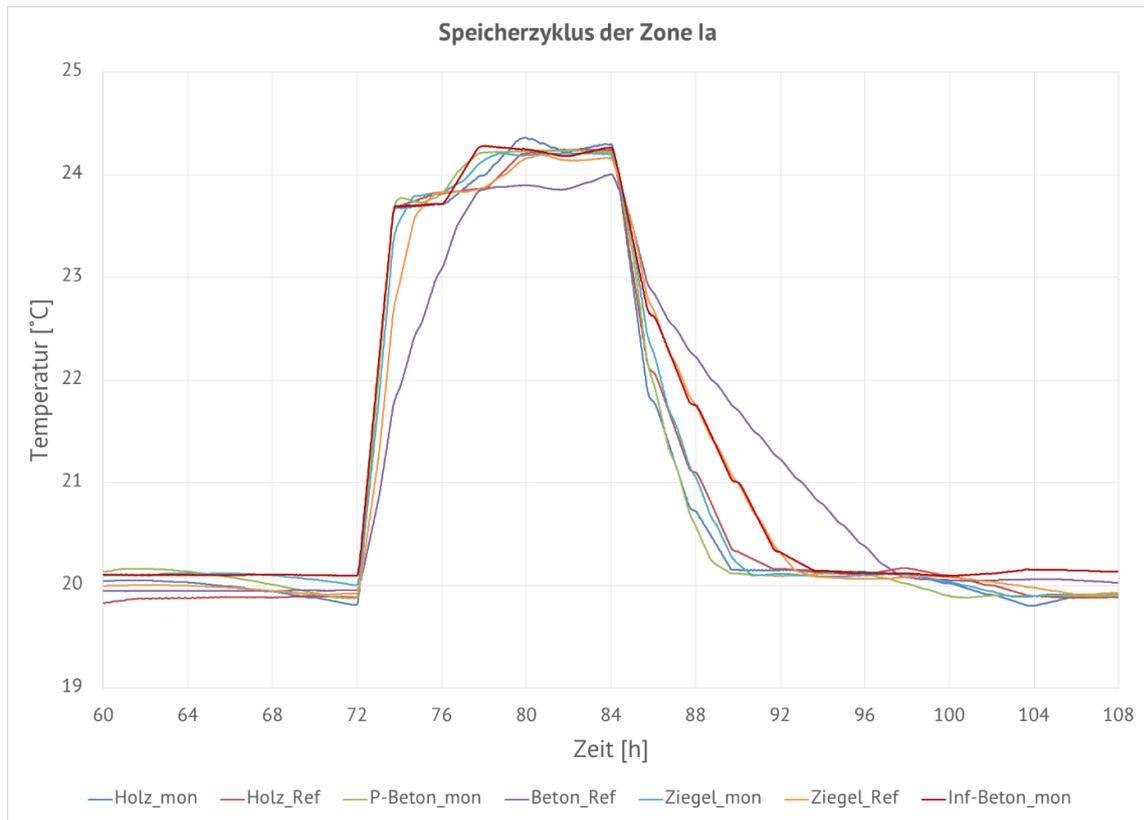


Abbildung 127: Speicherzyklen, 4. Januar,  $Q_{source}/Q_{sink}$  ist gleich 4, Eckraum, Erdgeschoss

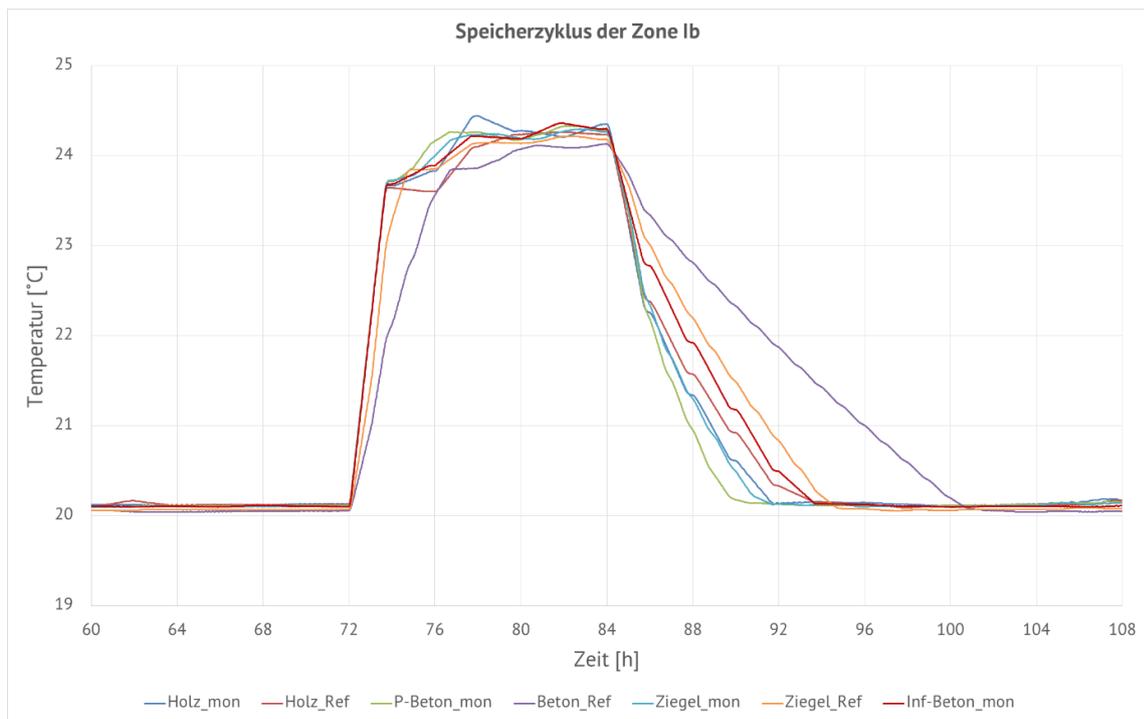


Abbildung 128: Speicherzyklen, 4. Januar,  $Q_{source}/Q_{sink}$  ist gleich 4, Mittelraum, Erdgeschoss

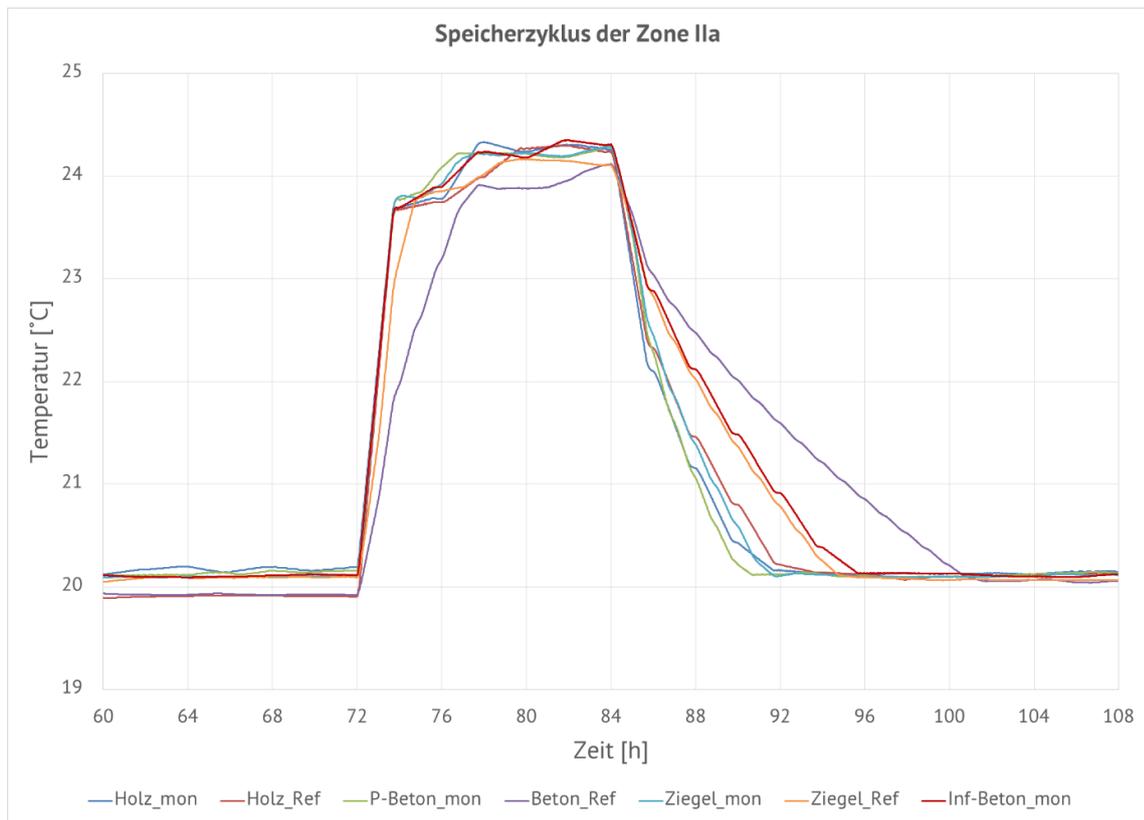


Abbildung 129: Speicherzyklen, 4. Januar,  $Q_{source}/Q_{sink}$  ist gleich 4, Eckraum, Mittelgeschoss

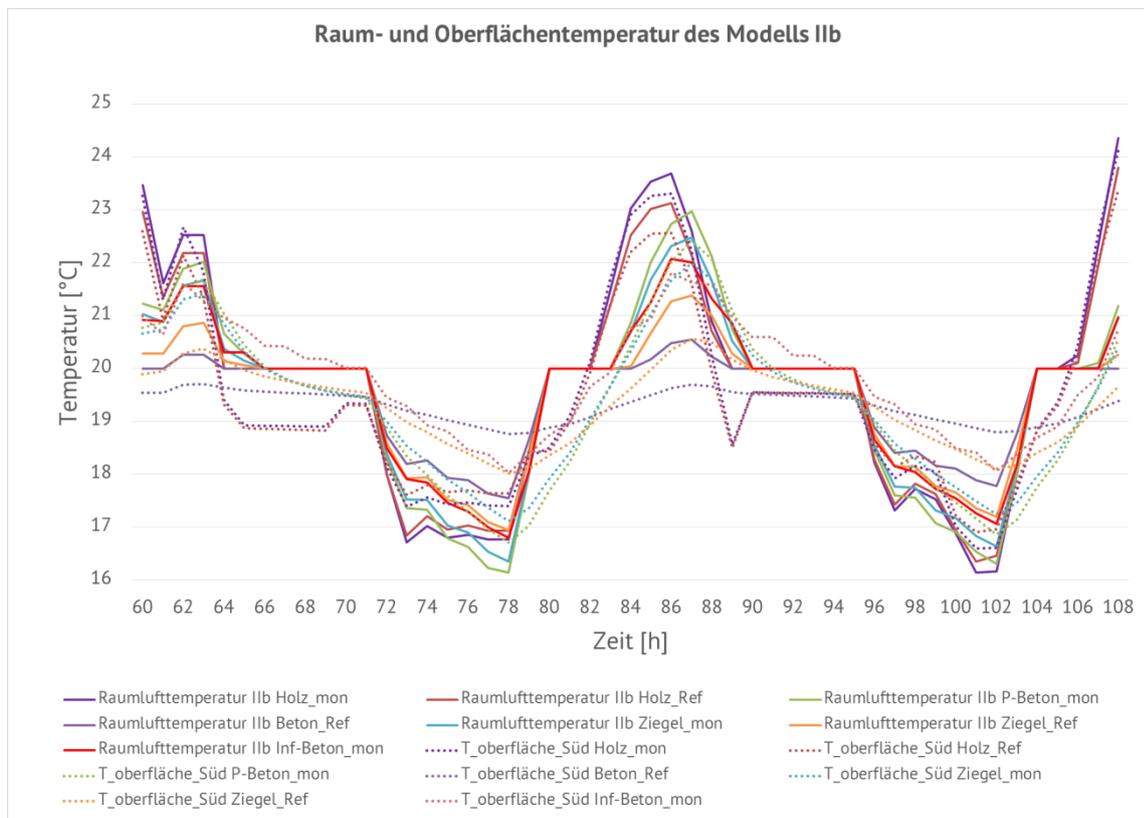


Abbildung 130: Speicherzyklen, 4. Januar,  $Q_{source}/Q_{sink}$  ist gleich 4, Mittelraum, Mittelgeschoss

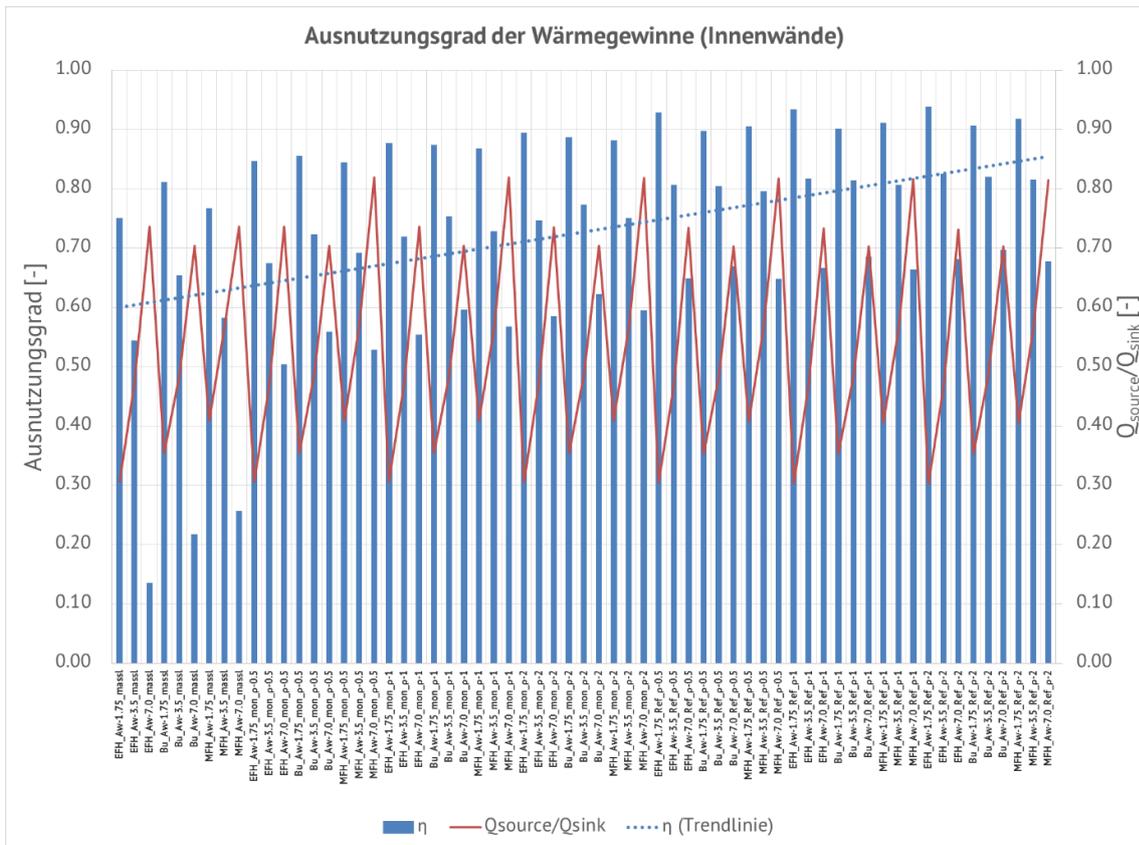
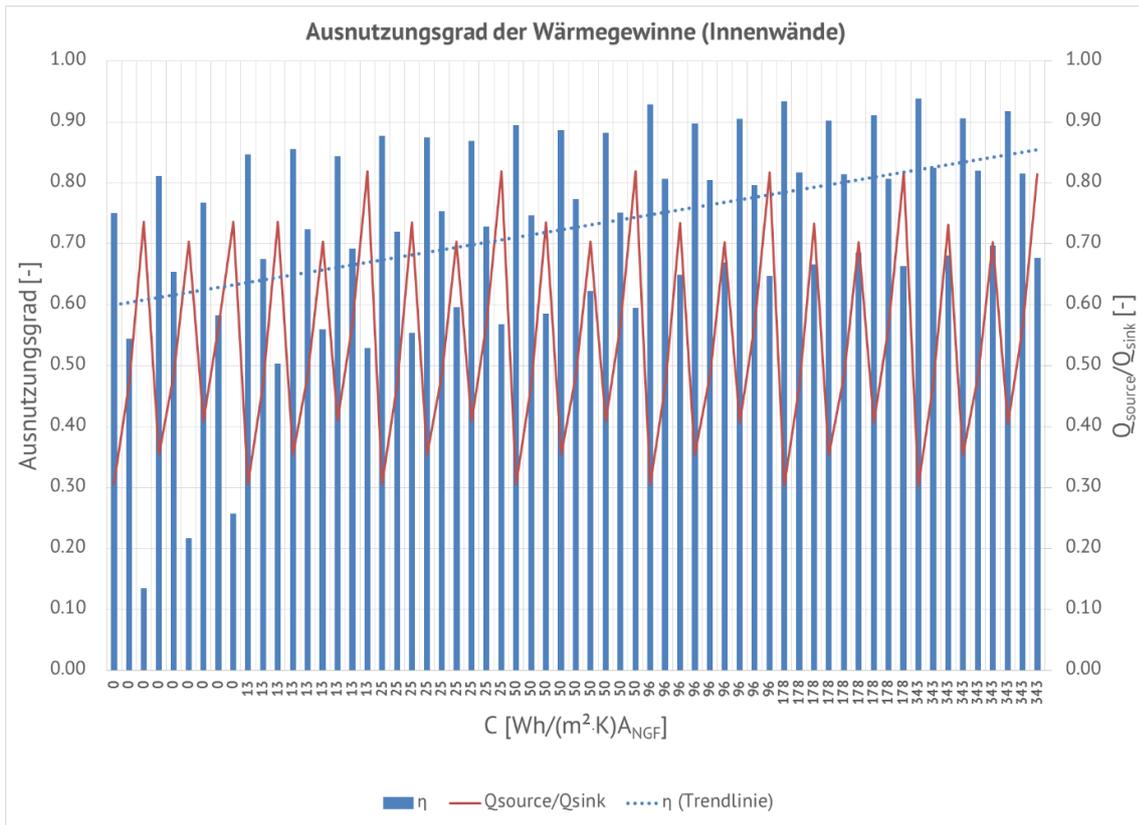


Abbildung 131: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

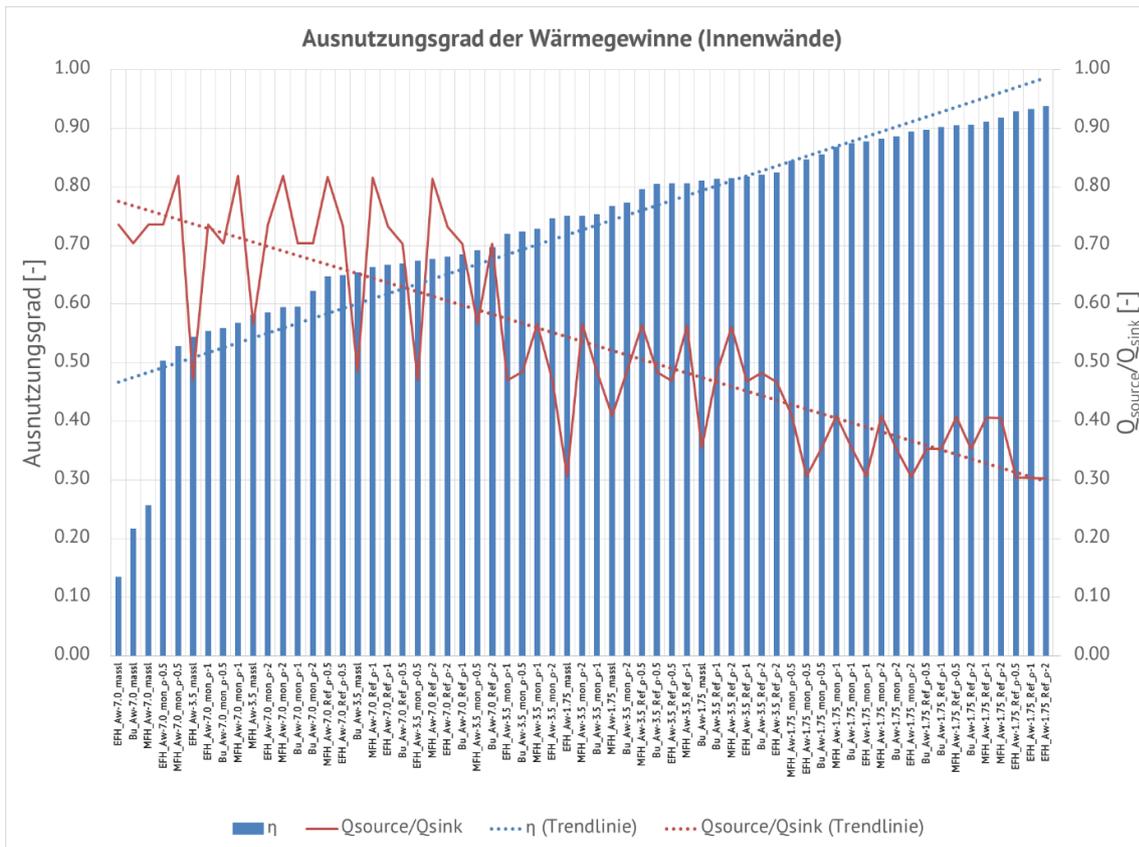
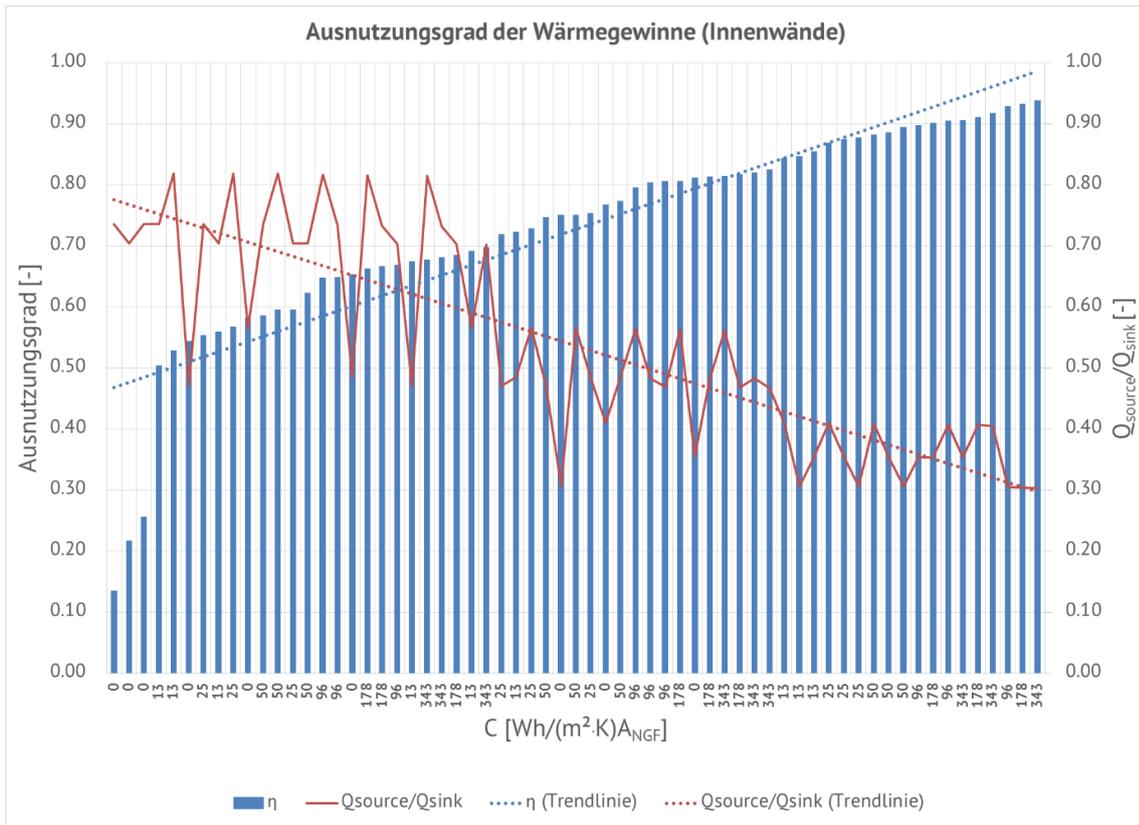


Abbildung 132: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

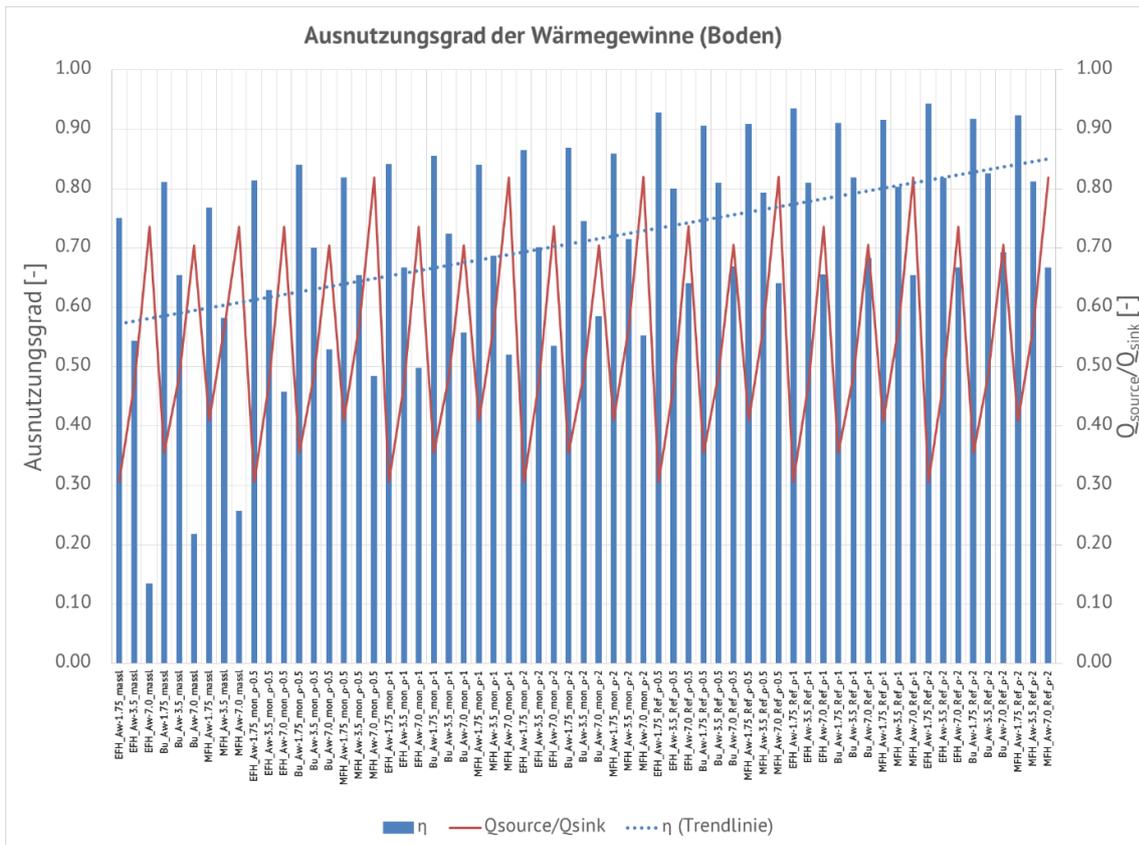
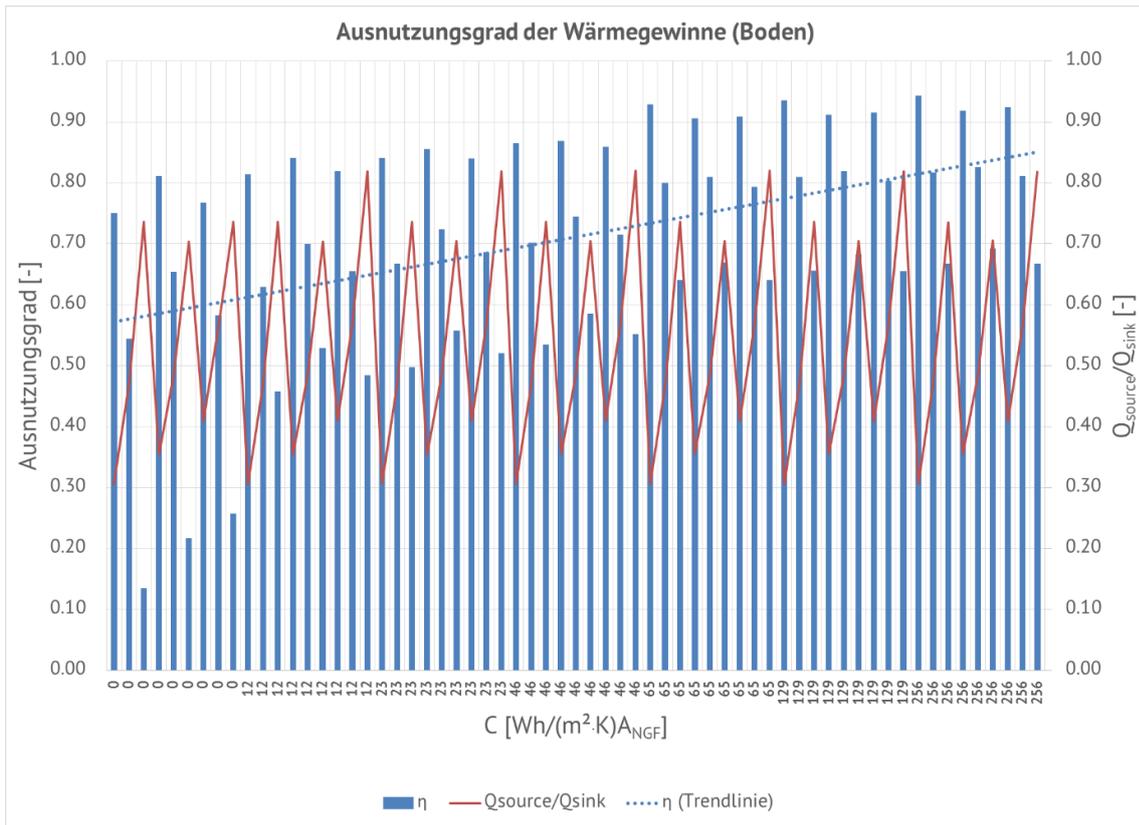


Abbildung 133: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Boden) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

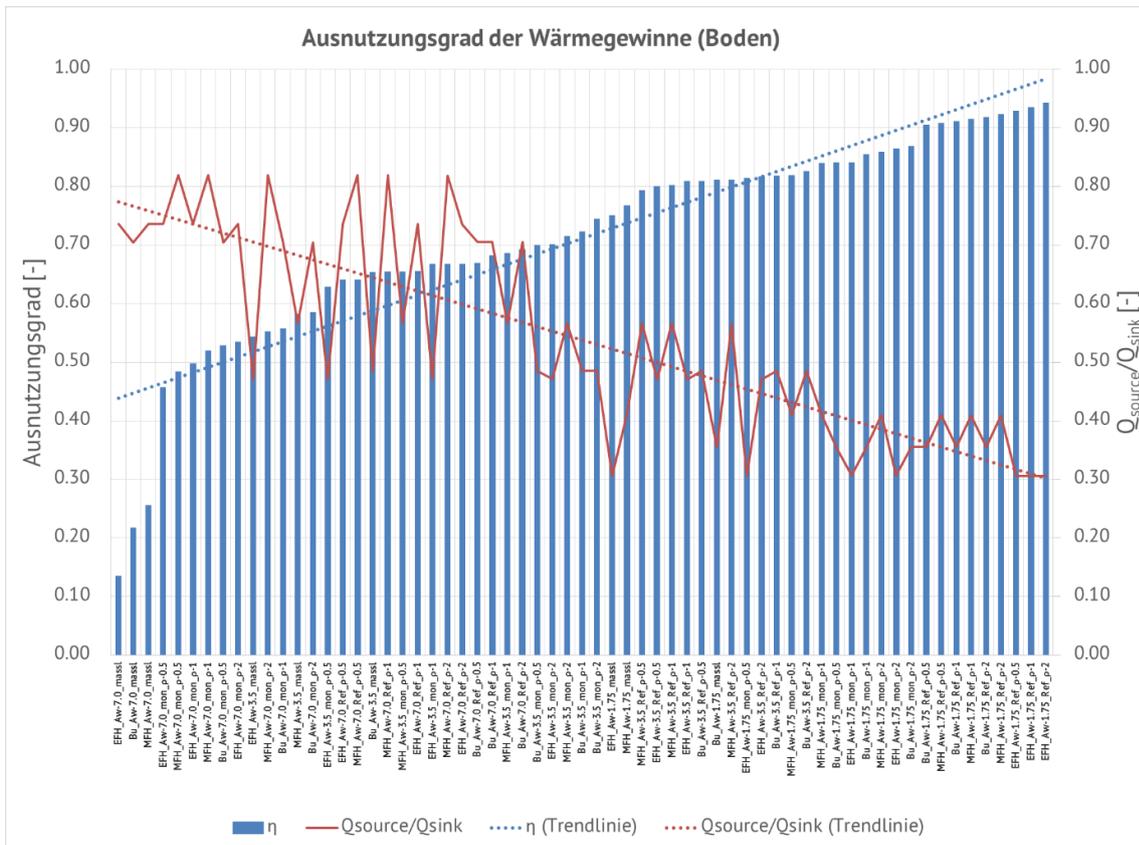
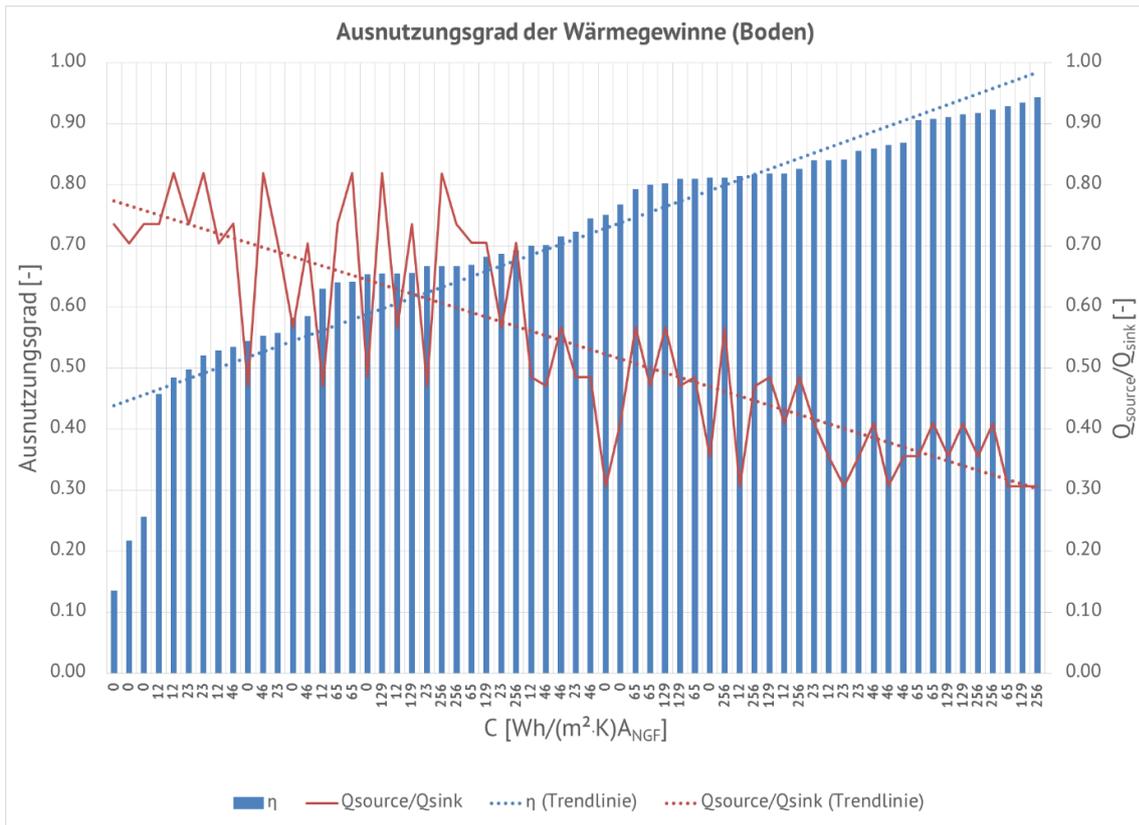


Abbildung 134: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Boden) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

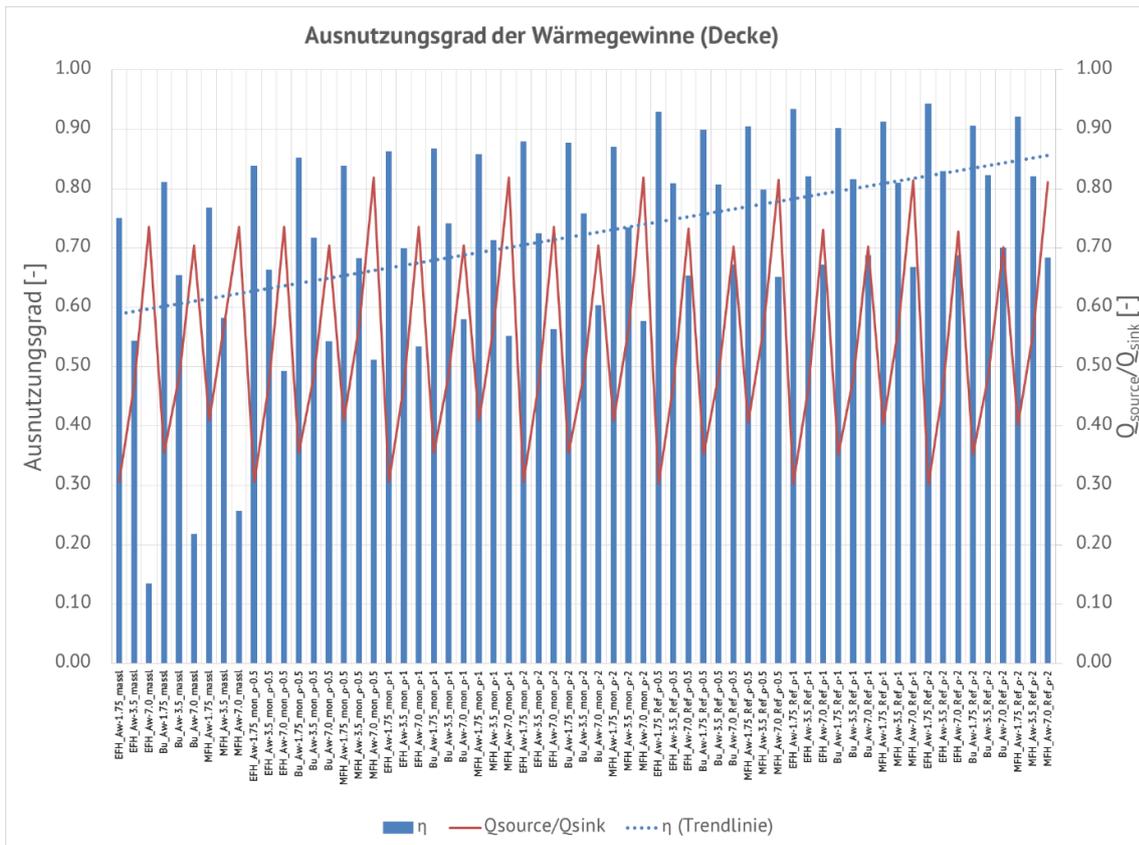
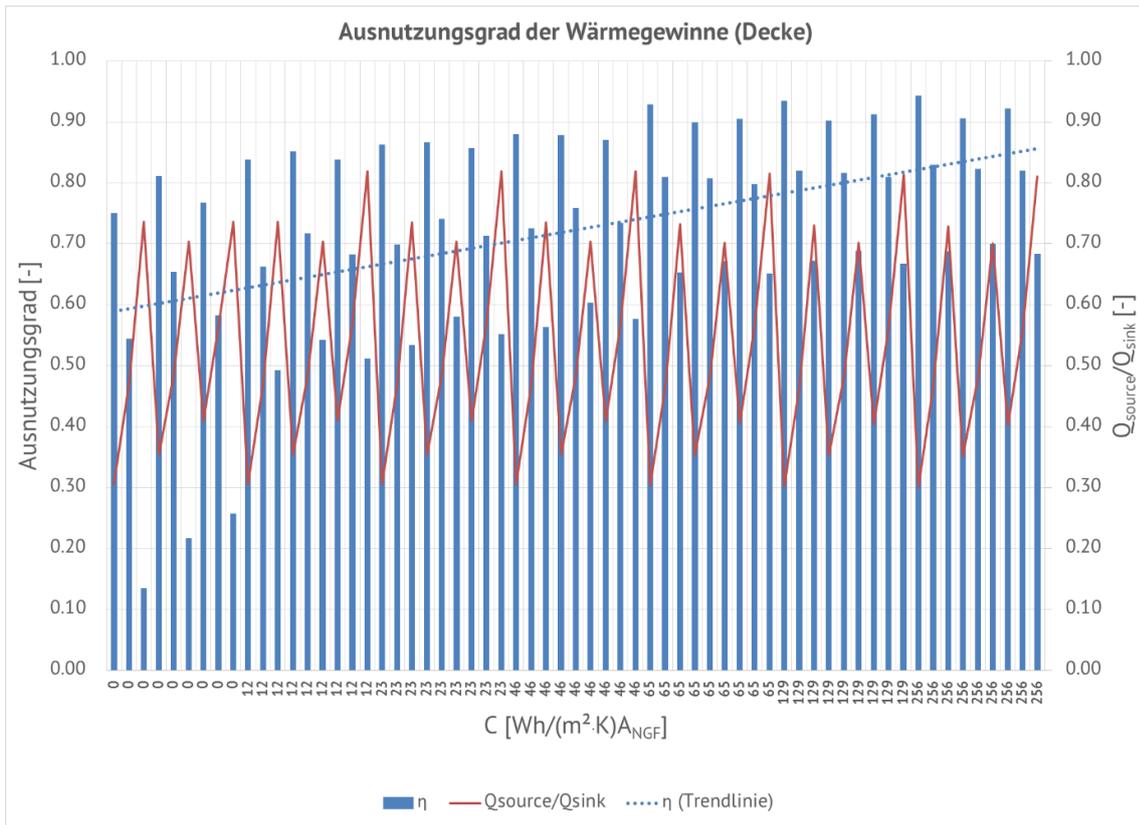


Abbildung 135: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

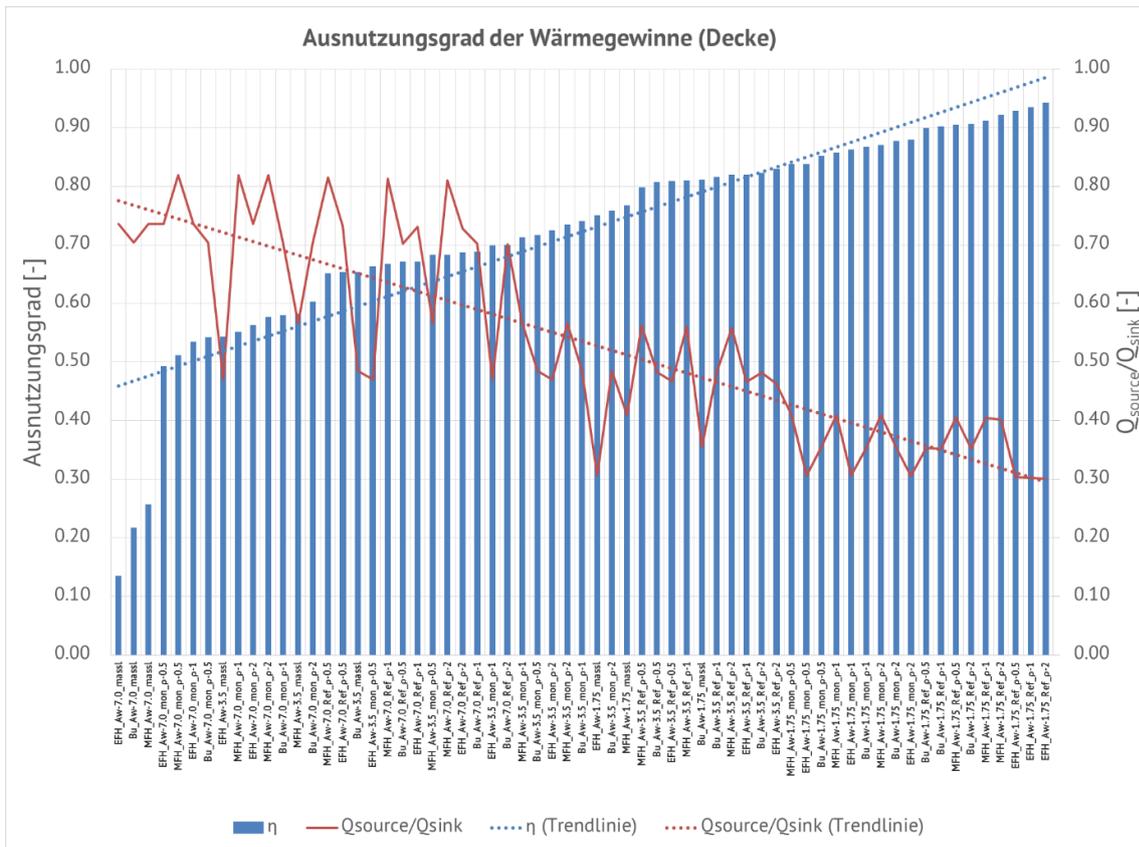
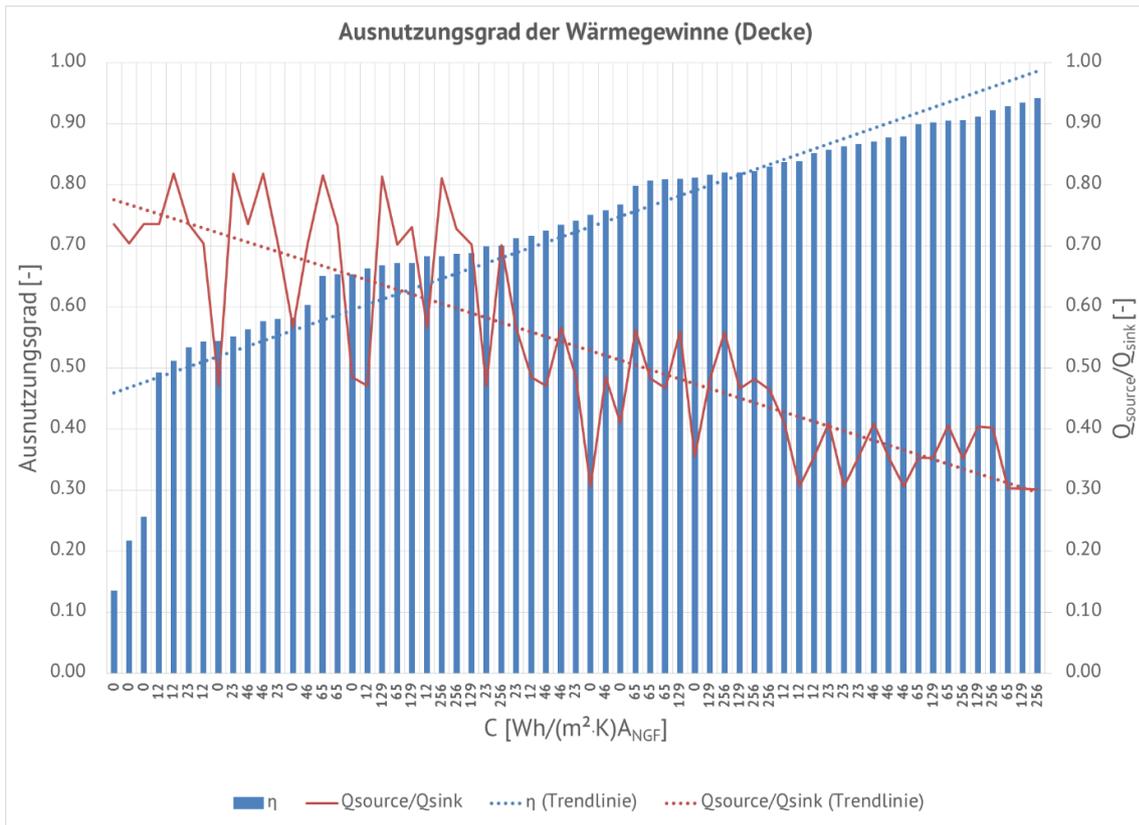


Abbildung 136: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

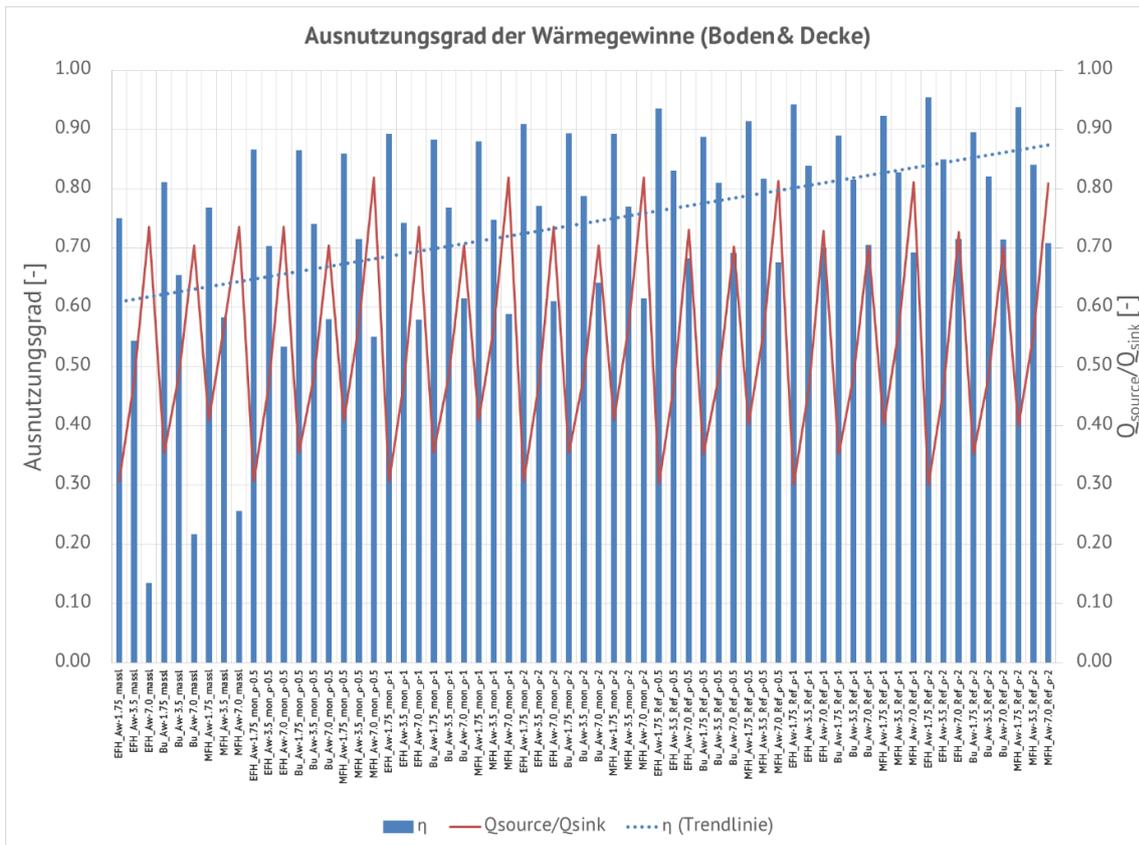
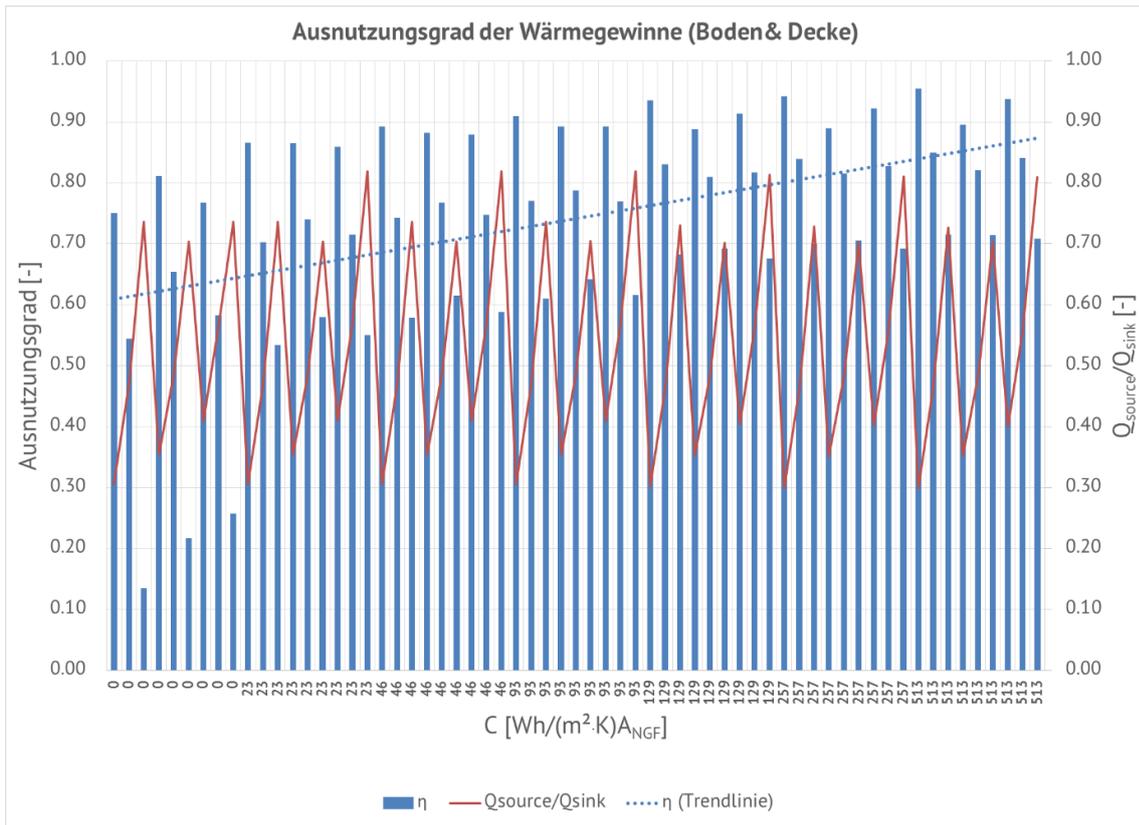


Abbildung 137: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Boden & Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

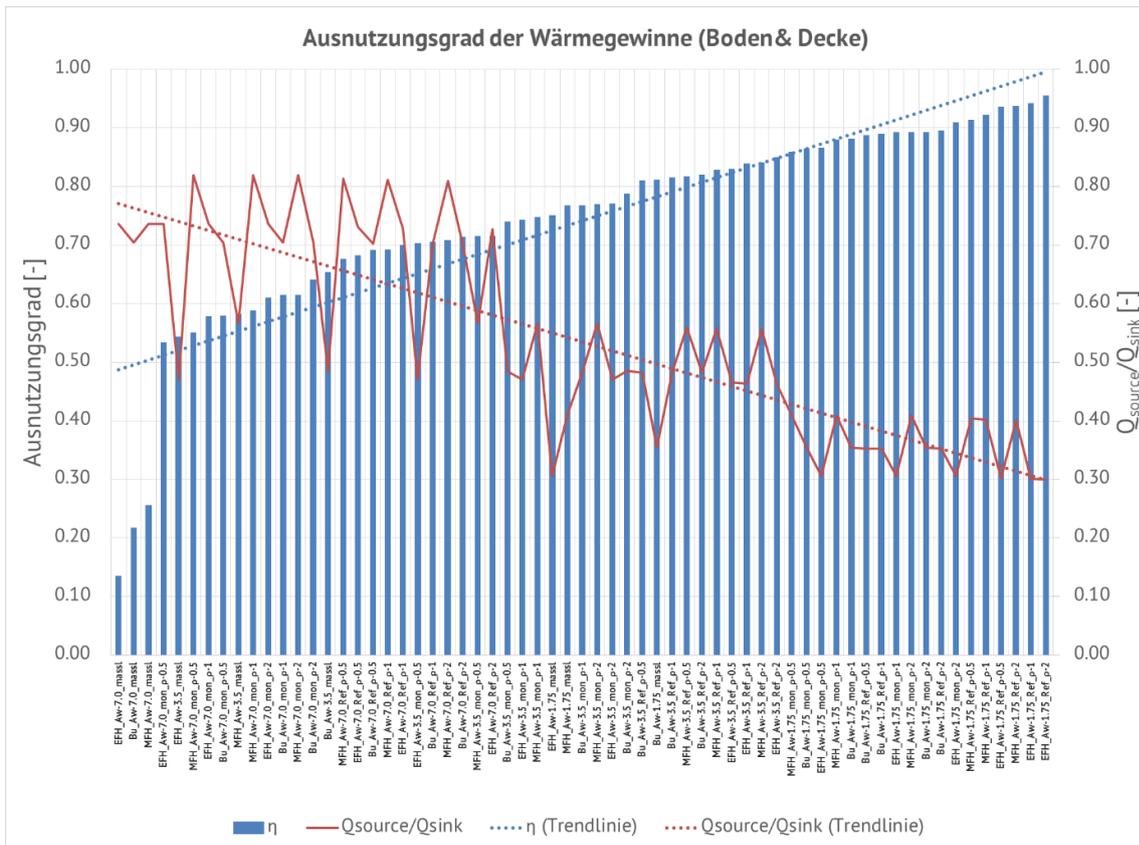
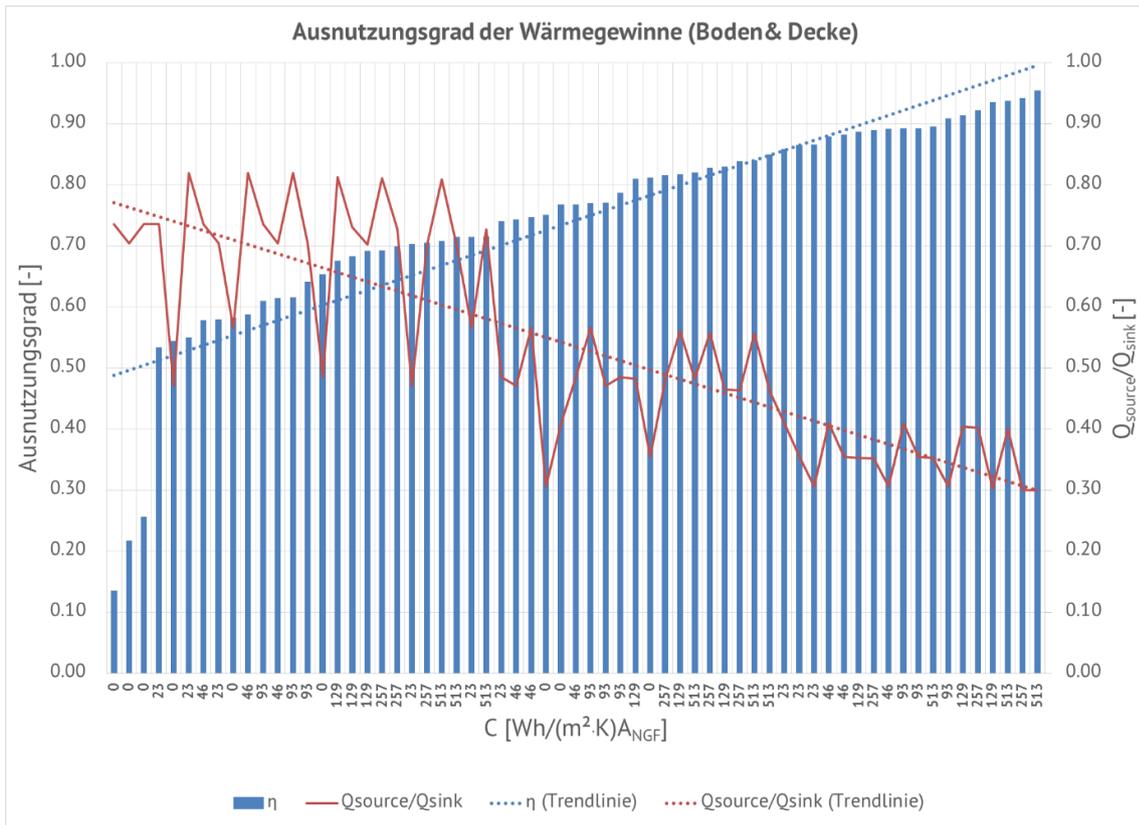


Abbildung 138: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Boden & Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

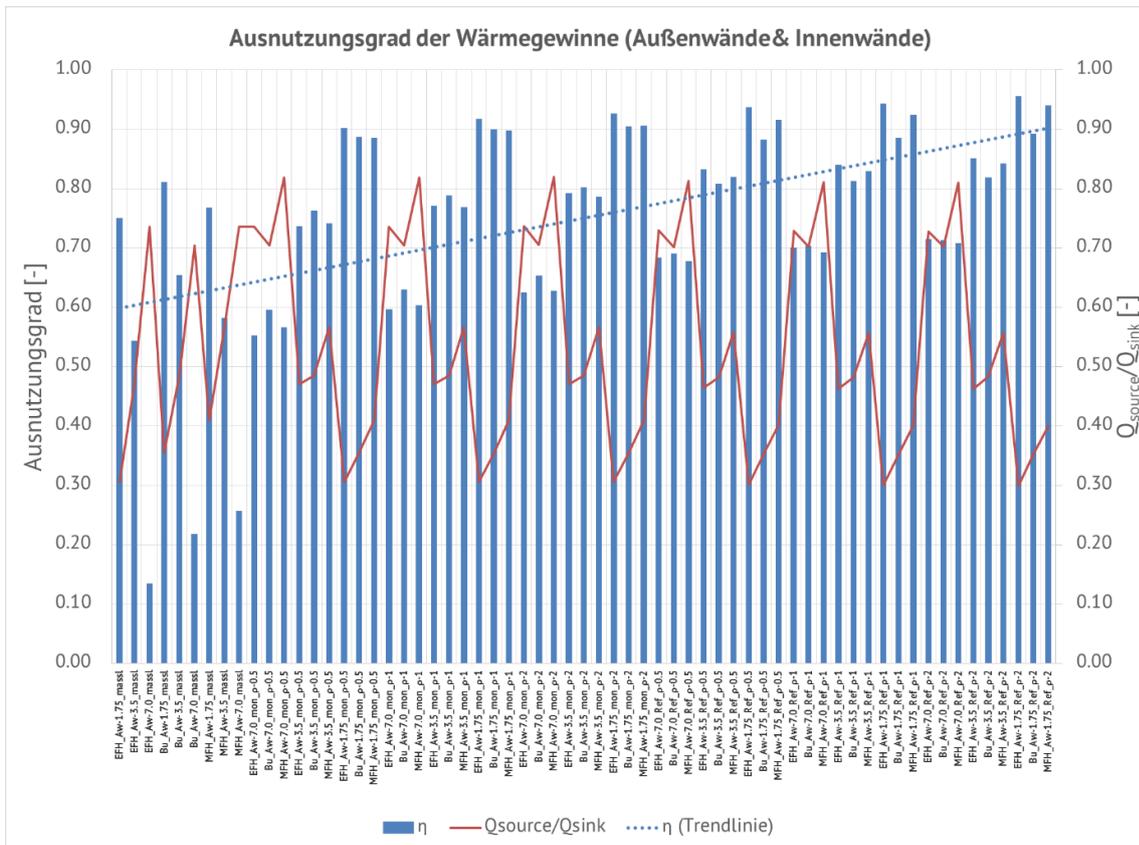
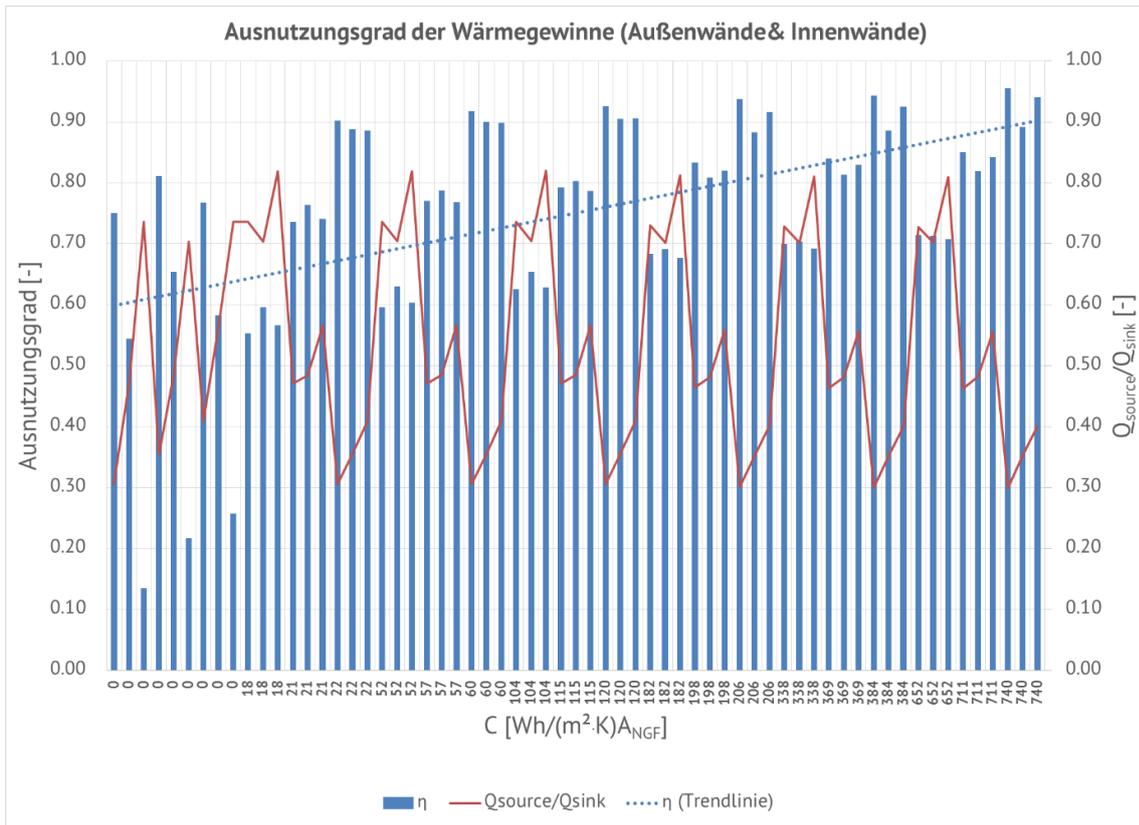


Abbildung 139: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände & Innenwände) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

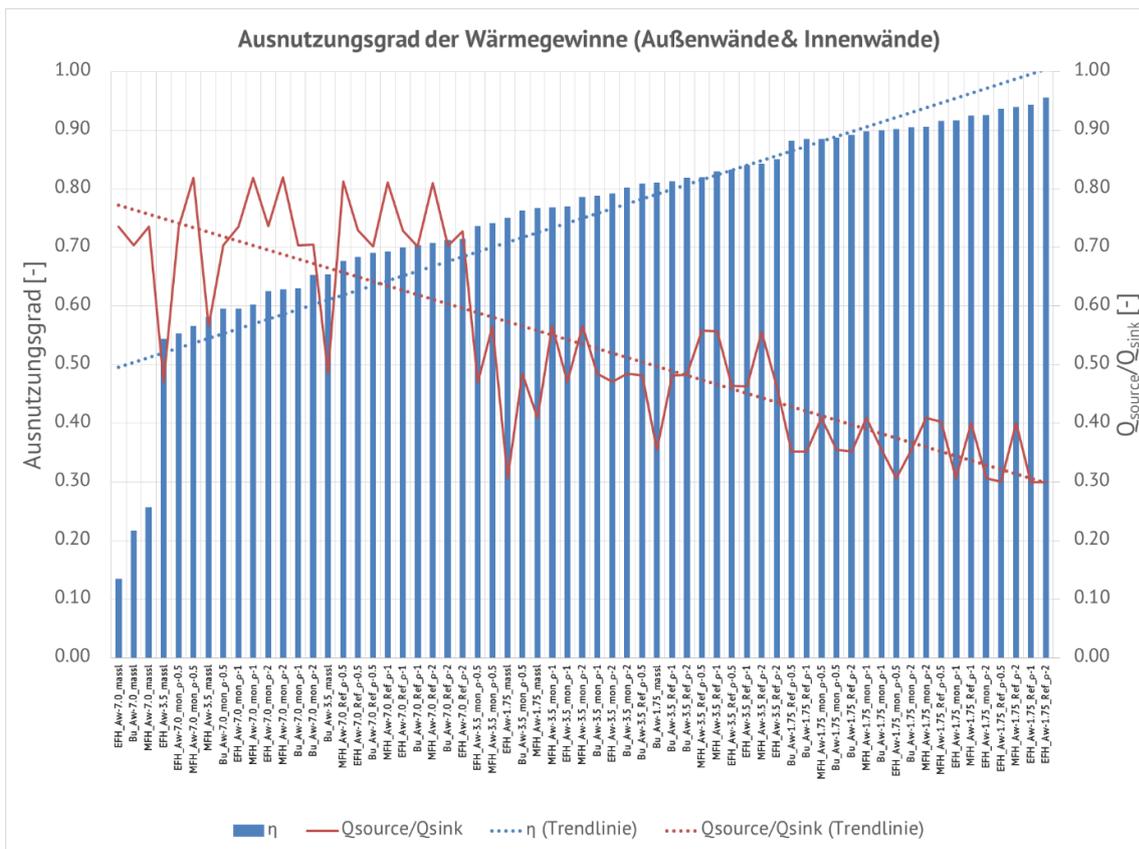
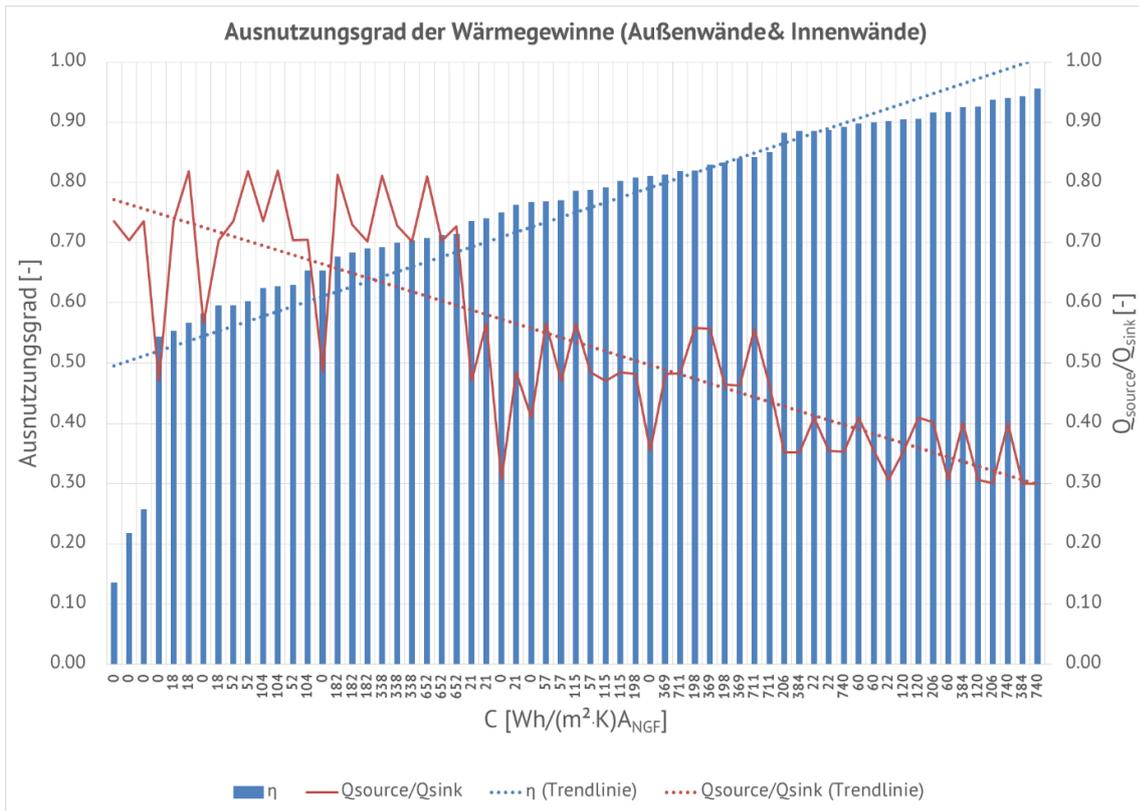


Abbildung 140: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände & Innenwände) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

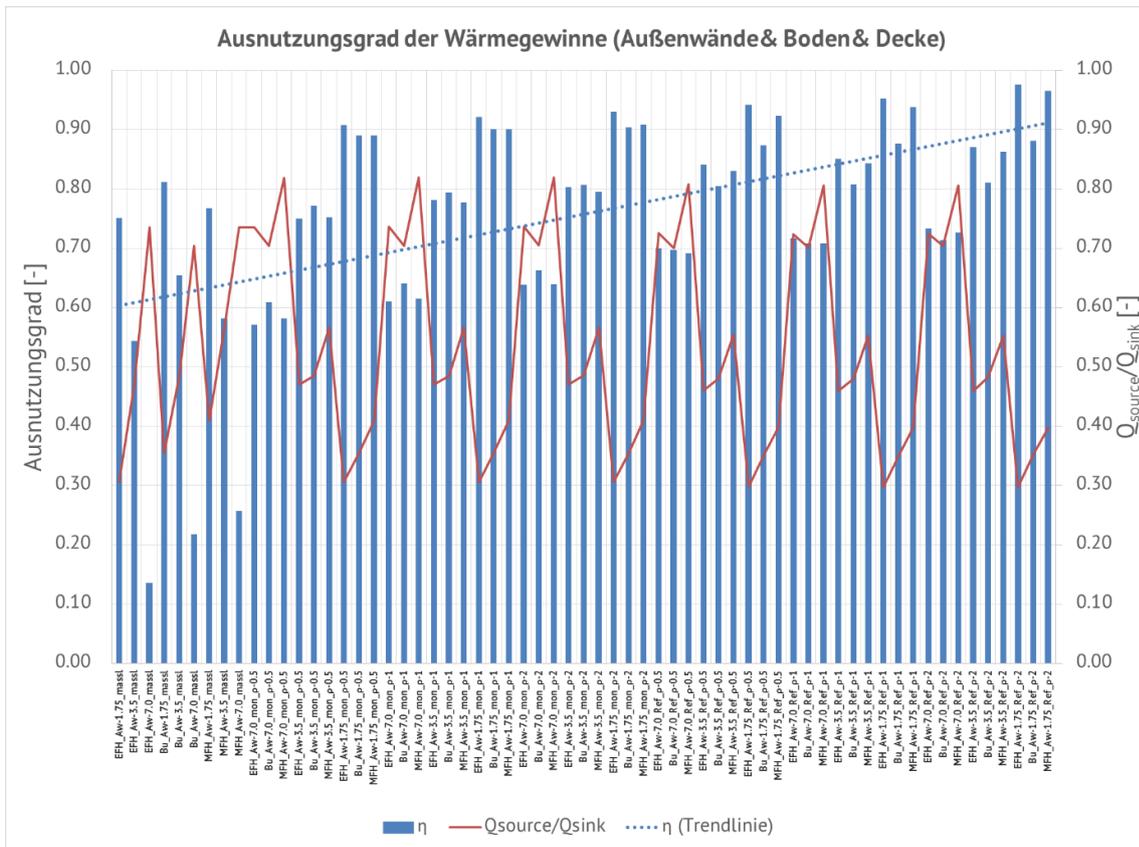
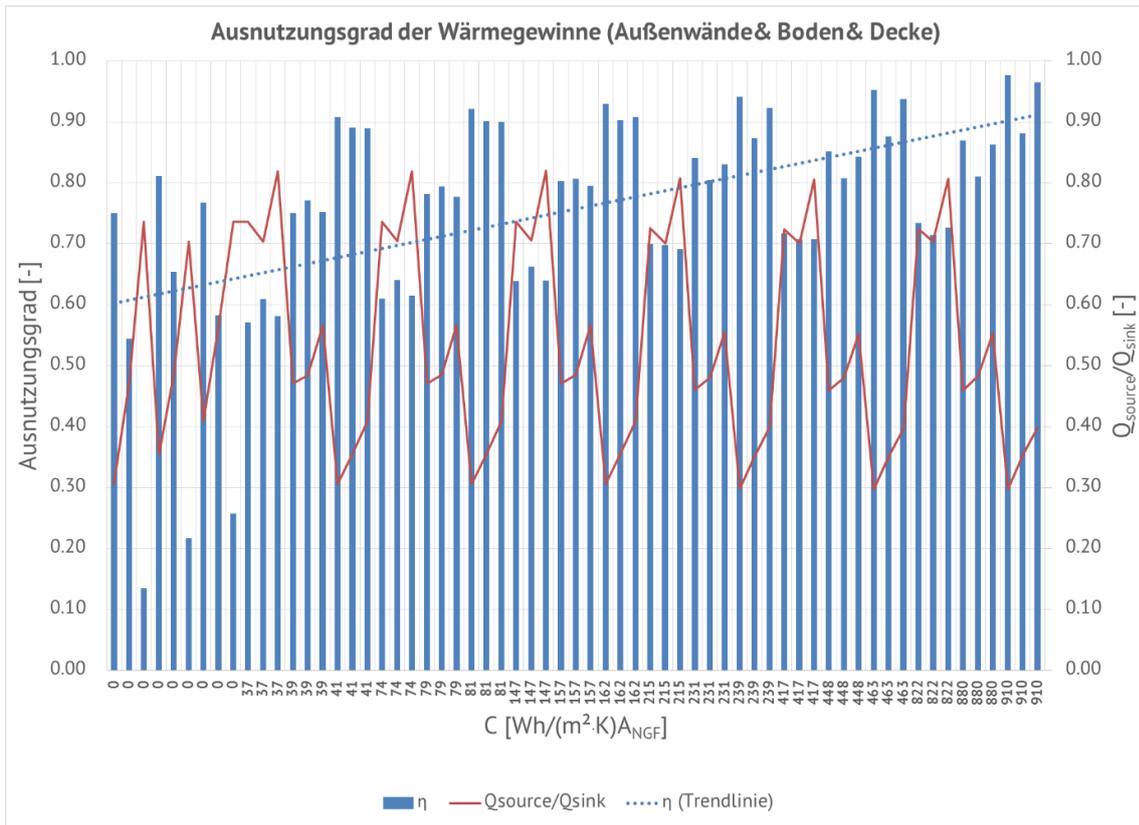


Abbildung 141: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände & Boden & Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

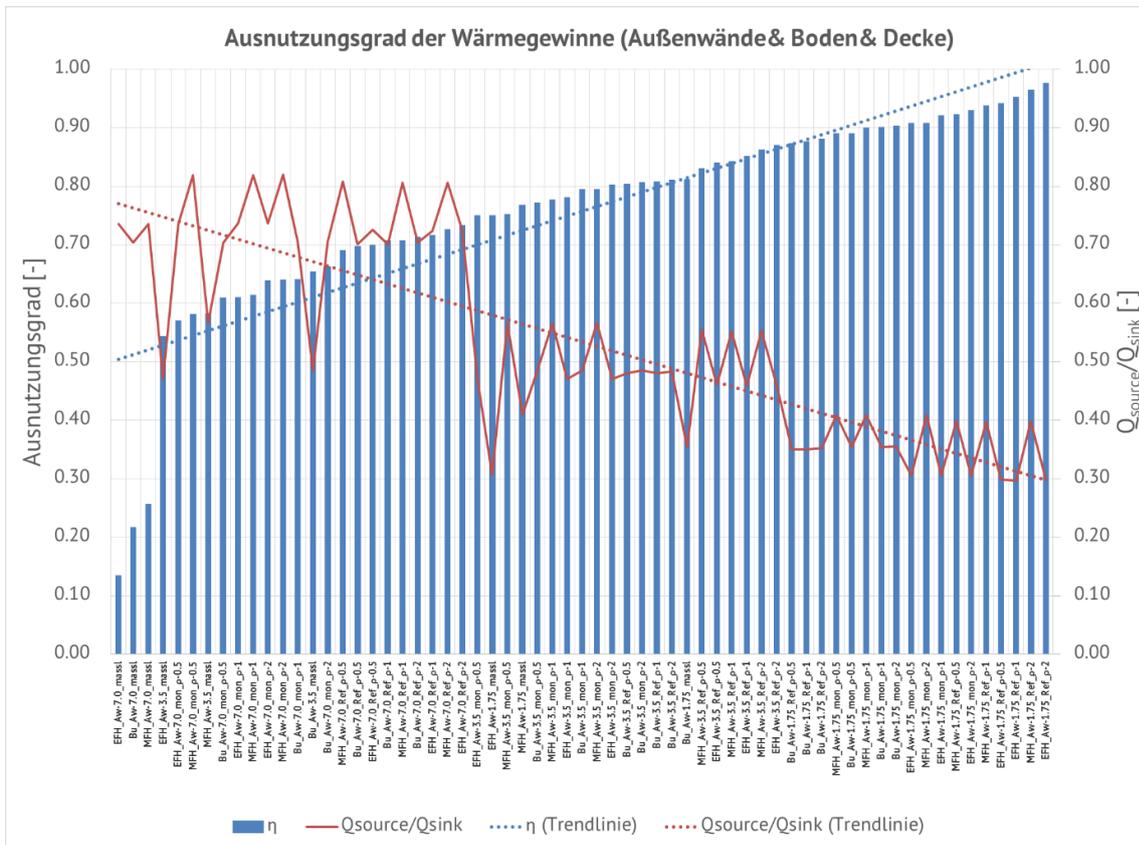
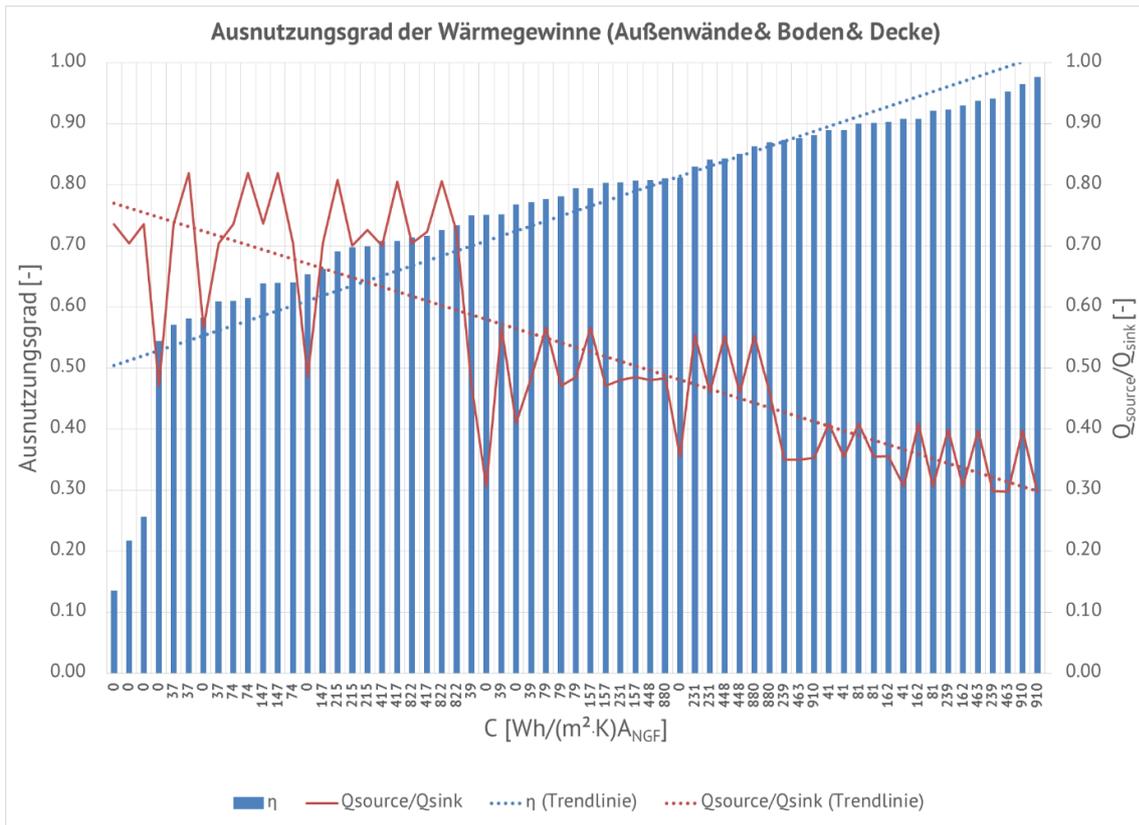


Abbildung 142: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Außenwände & Boden & Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

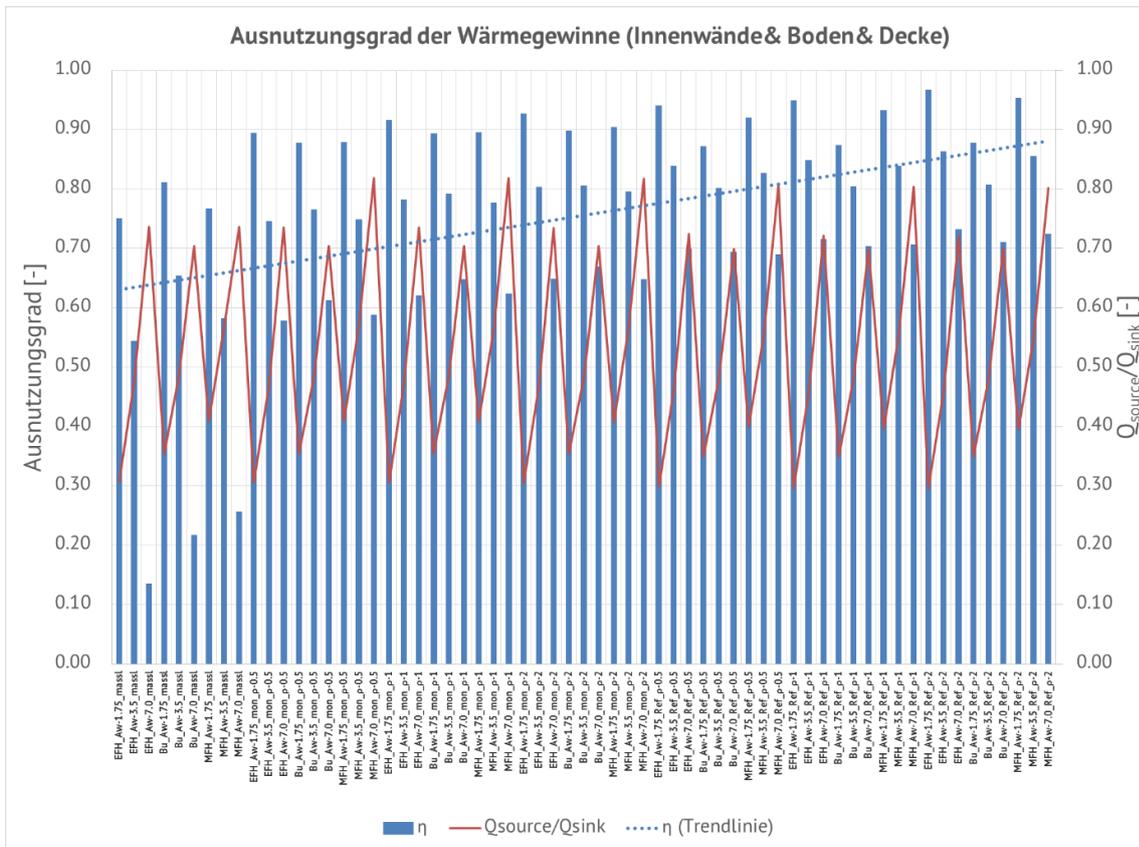
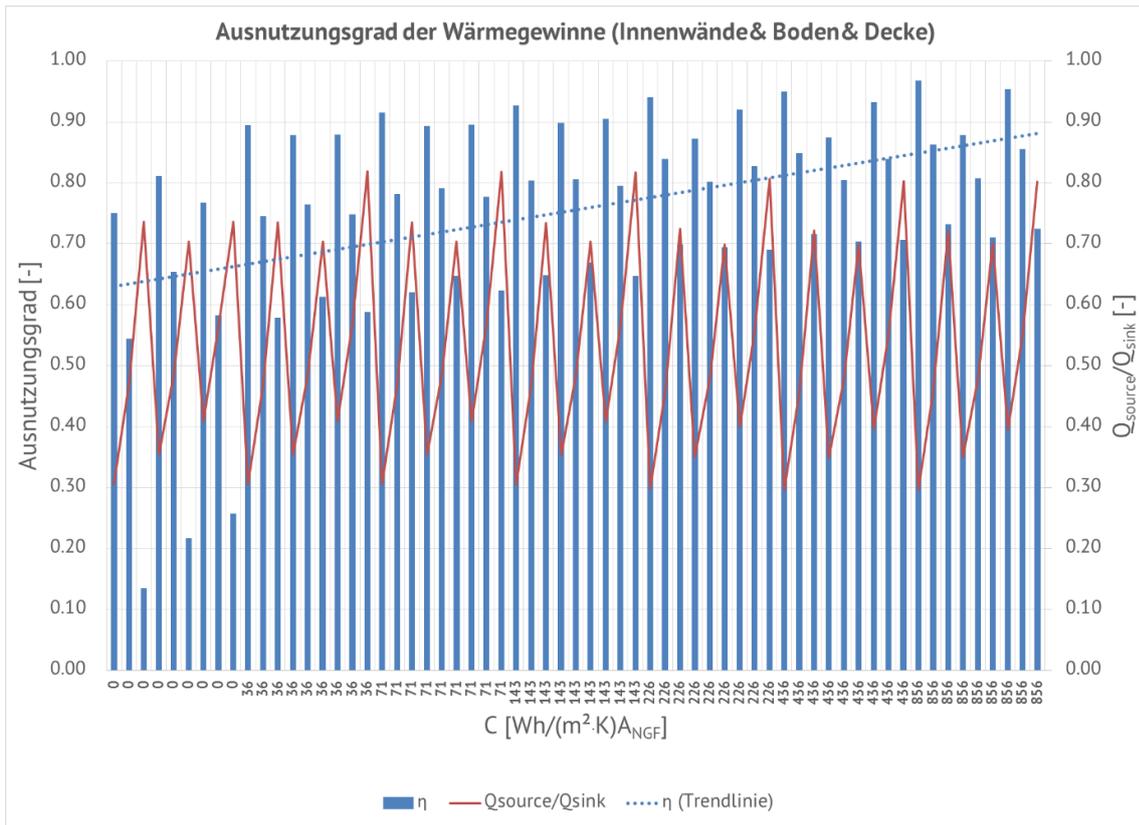


Abbildung 143: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände & Boden & Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

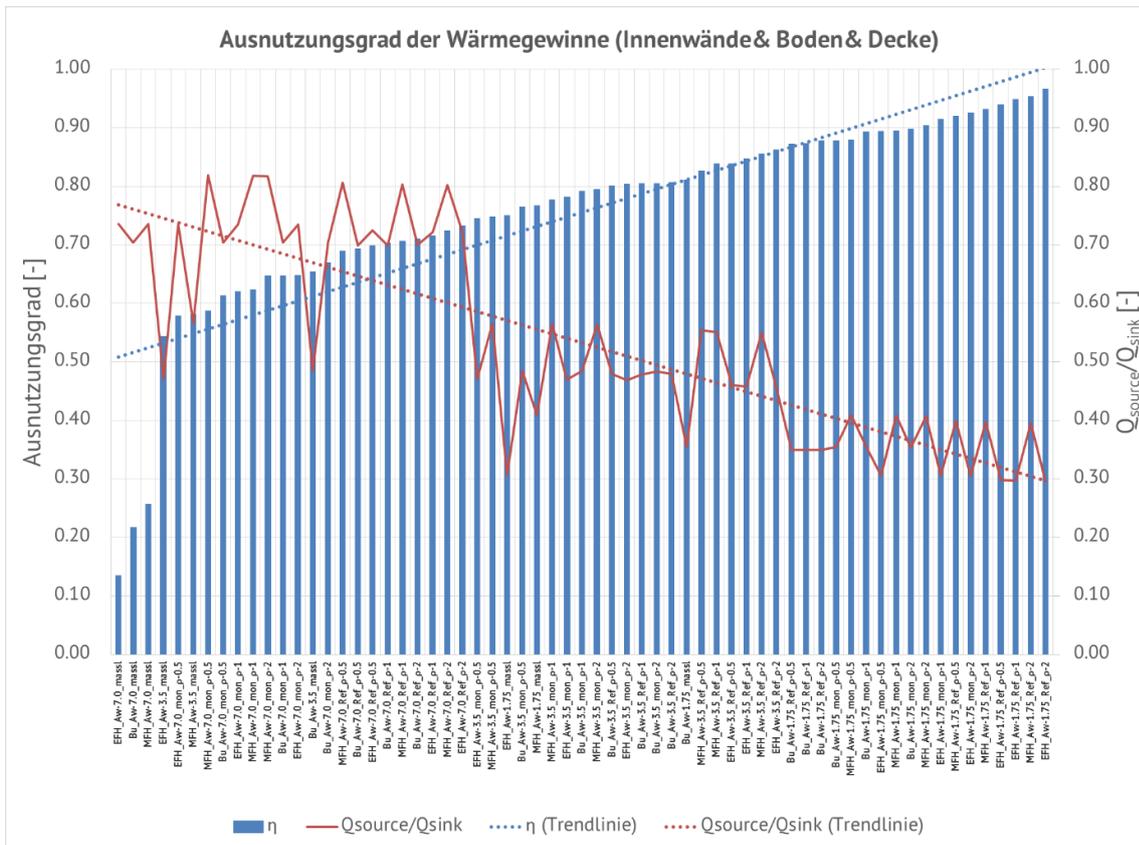
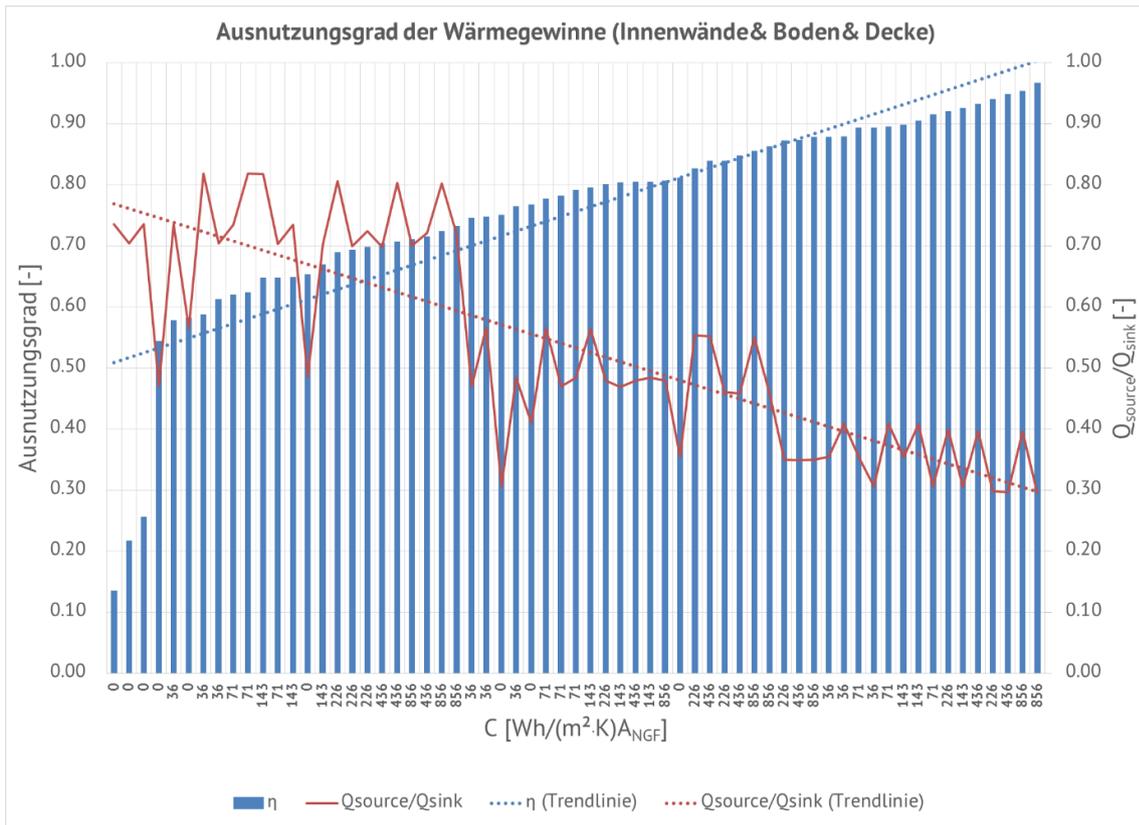


Abbildung 144: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände & Boden & Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

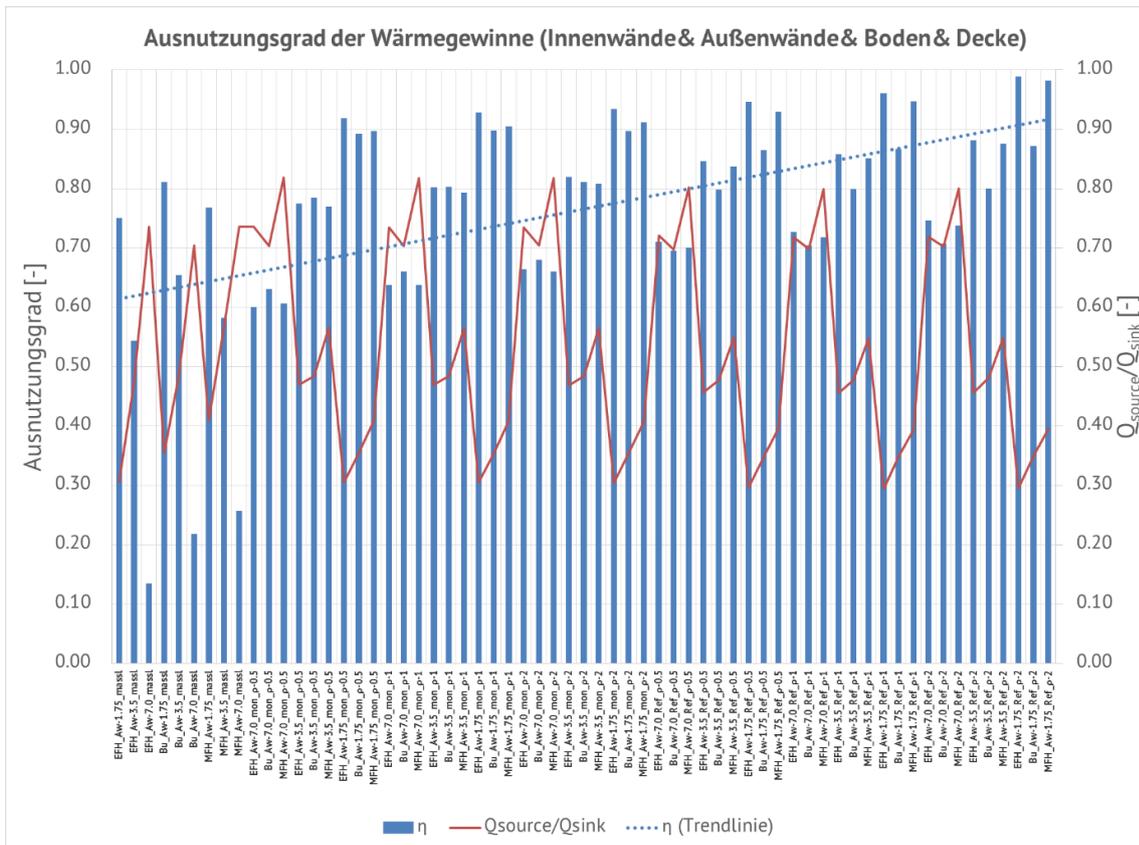
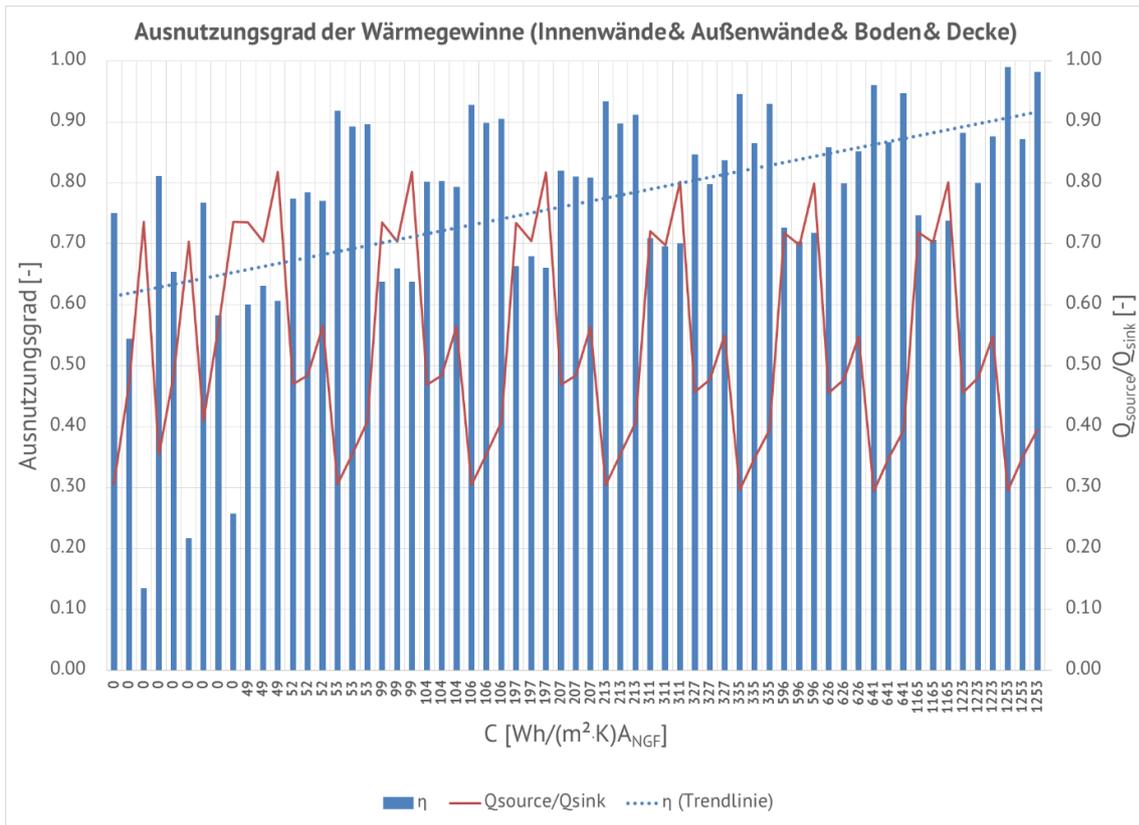


Abbildung 145: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände & Außenwände & Boden & Decke) abhängig von der Speicherkapazität vom Gebäude pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

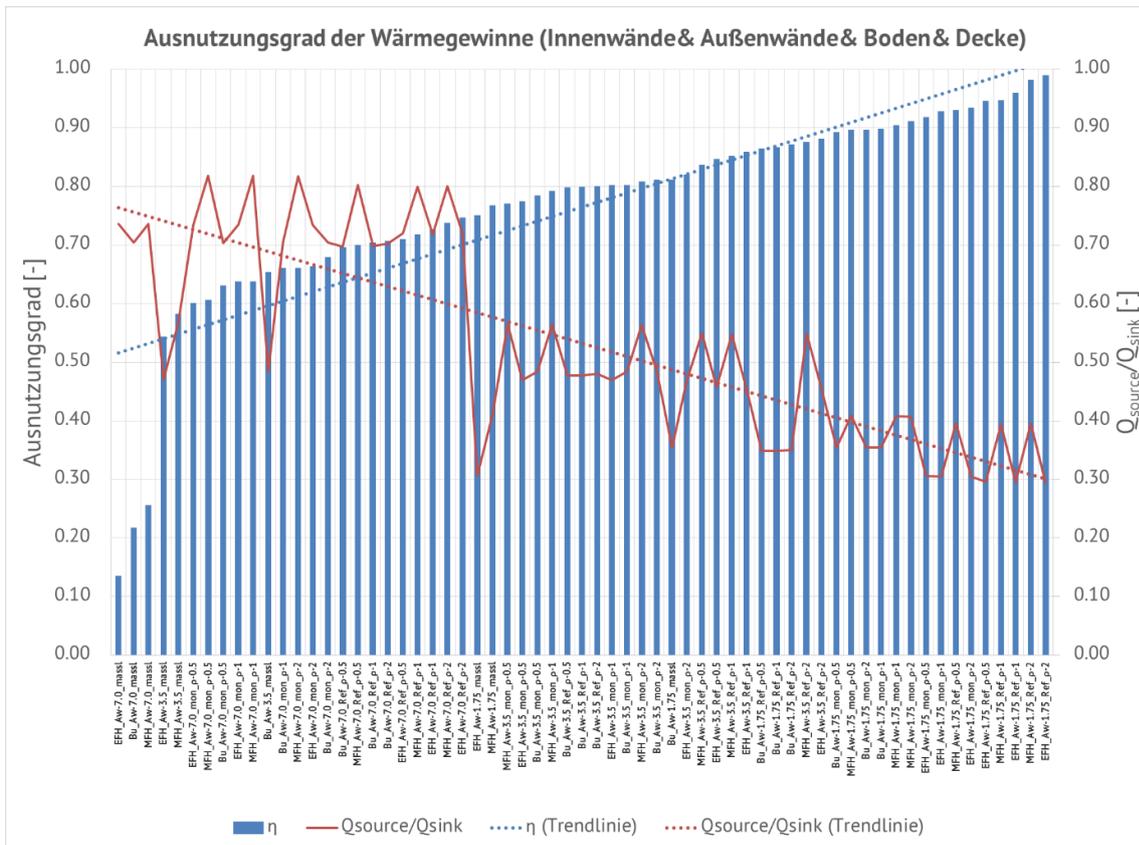
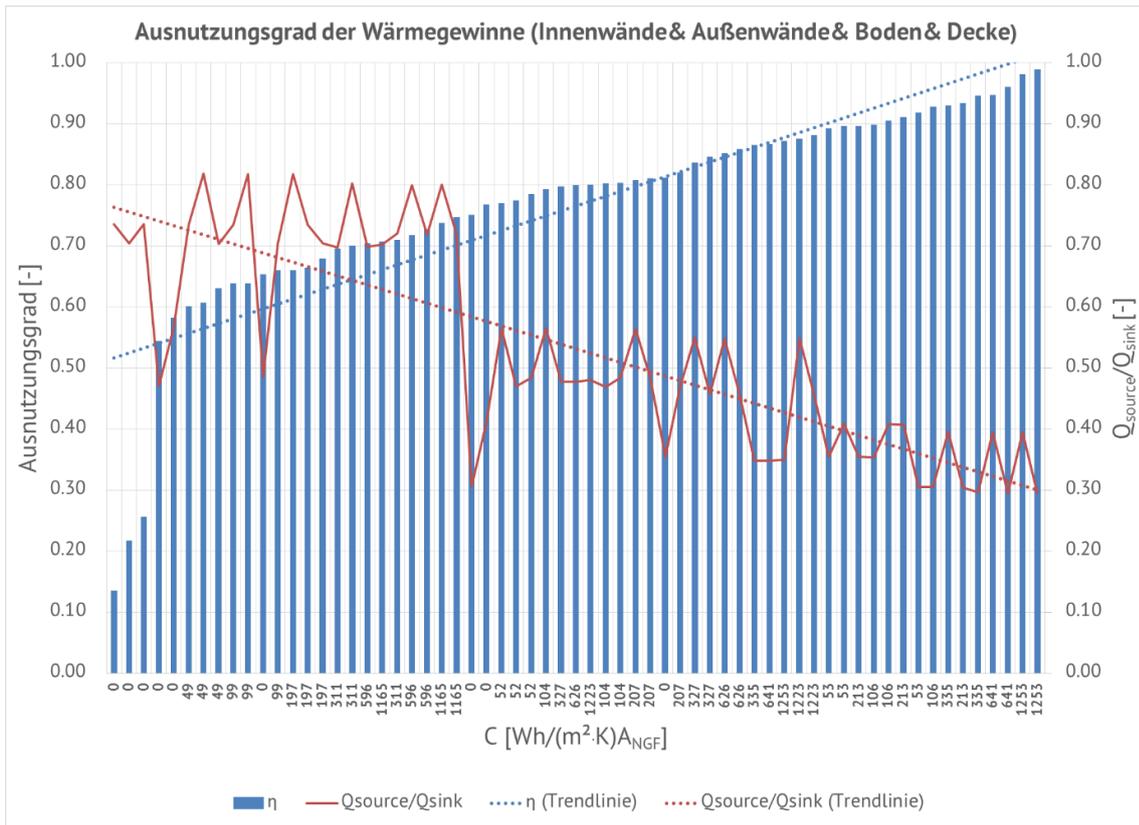


Abbildung 146: Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne (Innenwände & Außenwände & Boden & Decke) abhängig von der Wärmekapazität pro Nettogrundfläche mit unterschiedlichen Wärmesenken und Wärmequellen

## 10.7 Sensitivität Diskontierungszinssatz

Folgende Abbildung 143 zeigt die Veränderung der Lebenszykluskosten durch einen veränderten Diskontierungszinssatz in Prozent, bezogen auf den Referenzzinssatz von 4%. Alle Varianten weisen quasi identische Verhalte auf, daher wird im Folgenden nur die Referenzkonstruktion (Normalbeton) untersucht.

Aus Abbildung 143 lassen sich deutlich mehrere Verhalten erkennen und erklären:

- 1) Die Herstellungskosten sind insensitiv, da diese zum Zeitpunkt 0 anfallen und nicht aufgezinst werden.
- 2) Alle anderen Kosten, welche über die gesamte Nutzungsdauer anfallen, weisen eine deutliche Abhängigkeit auf. Aufgrund der geringen Diskontierung müssen deutlich höhere Rücklagen zum Zeitpunkt 0 vorliegen. Die Heizkosten genauso wie die Kosten für Prüfung, Instandhaltung, Wartung (P,I,W), reagieren weniger sensitiv. Die größte relative Abweichung weisen die Kosten für Reinvest und Abbruch auf, da diese überwiegend am Ende des Lebenszyklus auftreten und somit eine höhere Rücklage zum Zeitpunkt 0 benötigen.
- 3) Auf Grund des hohen Anteils der Herstellungs- an den Gesamtkosten werden ist deren Sensitivität nur halb so stark.

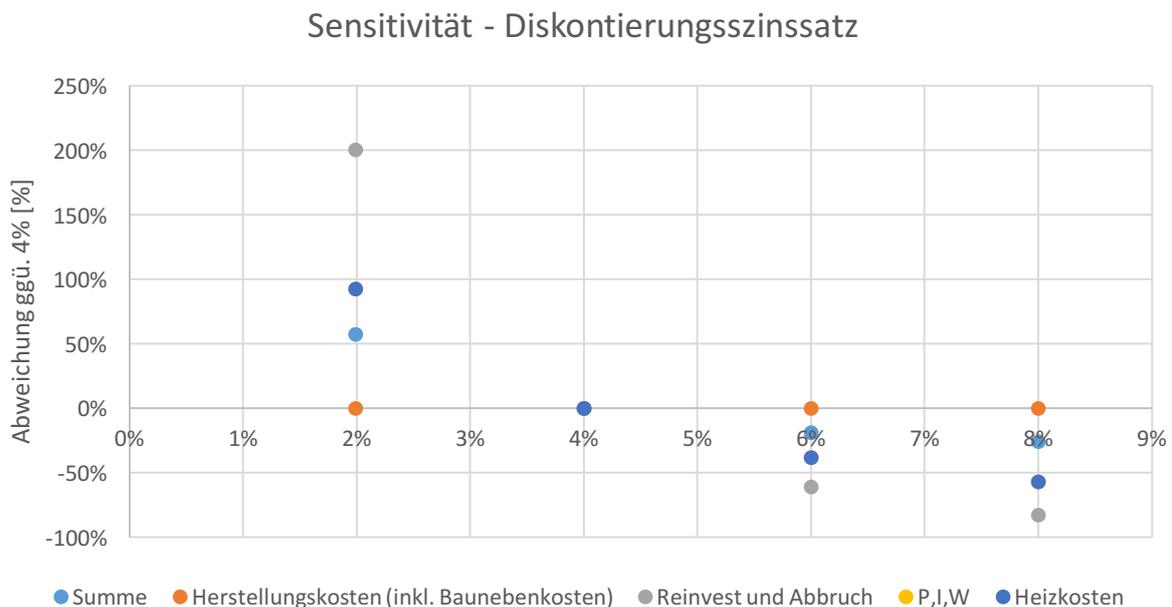


Abbildung 147: Sensitivität der Lebenszykluskosten auf den Diskontierungszinssatz

Bezieht man die Sensitivität auf die absoluten Kosten zeigt sich, dass je nach Diskontierungszinssatz die Lebenszykluskosten zwischen 1,6 Mio € ( $i=2\%$ ) und 740.000€ ( $i=8\%$ ) liegen.

## 10.8 Ökologie: Daten und Bauprodukte

Für die Abschätzung der Umweltwirkung wurden die Daten aus der Ökobau.dat entnommen. (Stand: Mai 2017) Hierbei wurden folgende Zuordnung der Baumaterialien getroffen; in der 1. Spalte findet ist das im Text beschriebene Baumaterial in Spalte 2 der zugeordnete Baustoff aus der Ökobau.dat.

Komponente	Datensatz bzw. Datensätze aus Ökobau.dat
Fenster	A: Isolierglas 2-Scheiben; C1 = C1(Porenbeton)/10; C2-D: Glasdach_PR60
Beton, Fenstersturz, Fensterbank (4cm x 44cm)	C 20/25
Infraleichtbeton	1/19: Beton; 18/19: Blähton; C+D: 0.75*Beton
Porenbeton	A: Porenbeton P4-5 bewährt; C+D: 0,75*Beton
CEM-III-Beton	A: CEM III 42,5: 140kg/m <sup>3</sup> + Sand&Kies: 2030kg/m <sup>3</sup> (somit gleiche GWP wie Beton, C+D wie Beton
Ziegel	Mauerziegel
Holz, Bretterschalung außen, Fensterschalung	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE); C1 = Beton/10
Mineralputz außen	A: Kalk-Gips-Putz; C+D: Gipsputz
Lehmputz innen	A: Lehmputz; C+D: Knauf Gipskartonplatte GKB
Gipsputz innen	A: Gipsputz (Gips); C+D: Knauf Gipskartonplatte GKB
Putz + Gipsfaserplatte	Gipsfaserplatte nach DIN EN 15283-2 oder ETA & Knauf Gipskartonplatten GKB
Bewehrung	A: Bewehrungsstahl; C+D: Stahlprofil
WDVS	WDVS Brillux Qju + PI-Dämmplatten mit 50µm Aluminium; C1=Beton/10
Innentür	Innentüren aus Holz und Holzwerkstoffen

Des Weiteren wurden für die Kalkulation marktübliche Bauprodukte zu Grunde gelegt, die zum Teil von den Simulierten Aufbauten abweichen. Diese werden folgend dargestellt:

Komponente	Abweichung bei	Simulation	Kalkulation	Anmerkung
Ziegel (Außenwand)	Dicke	0,252 m	0,24m	
WDVS	Dicke	0,043 bis 0,114m	0,12m	Abschläge bezogen auf 75% der Kosten proportional zur Dicke vorgenommen
Dämmung Oberste Geschossdecke (Holz)	Dicke	0,035m	0,02m	zzgl. Dampfsperre in Kalkulation
Dämmung Oberste Geschossdecke (Beton)	Dicke	0,165m	0,16m	

## 10.9 Ökologie: Lebensdauern

Die Lebensdauern stellen einen entscheidenden Faktor bei der ökonomischen und ökologischen Bewertung von Bauteilen dar. Folgend die in der Kalkulation angenommenen Lebensdauern. Dies sind, wie in Abschnitt 5.1.3 beschrieben aus Schmitz et al. (2015) [91] entnommen. Die letzte Dauerhaftigkeitsklasse wurde zur Kalkulation von konkreten Werten auf 75 Jahre festgelegt. Eine deutlich längere oder kürzere Lebensdauer ist aktuell kaum abzuschätzen, da die untersuchten Bauweisen, in dieser Zusammensetzung, erst seit einigen Jahren verbaut werden.

Nutzungsdauer [a]	Bauteil
75	Infraleichtbeton, Beton, Porenbeton, CEM-III-Beton, Ziegel, Konstruktionsholz, Holzschalung, Fensterbank, Fensterschalung, Fenstersturz, Bewehrung, Streifenfundament, Dämmung (oberste Geschossdecke)
41	Mineralputz (außen innen), Lehmputz (innen), Gipsputz (innen), Bretterschalung (außen), WDVS
23	Fenster, Innentür, Holzschalung (innen)

Somit ergeben sich für die einzelnen Bauteile folgende Anzahlen an Erneuerungen zzgl. der ursprünglichen Herstellung zum Zeitpunkt 0.

Anzahl (Herstellung + Erneuerung) [-]	Bauteil
1 (1+0)	Infraleichtbeton, Beton, Porenbeton, CEM-III-Beton, Ziegel, Konstruktionsholz, Holzschalung, Fensterbank, Fensterschalung, Fenstersturz, Bewehrung, Streifenfundament, Dämmung (oberste Geschossdecke)
2 (1+1)	Mineralputz (außen innen), Lehmputz (innen), Gipsputz (innen), Bretterschalung (außen), WDVS
4 (1+3)	Fenster, Innentür, Holzschalung (innen)

Für die einzelnen Komponenten wurden folgende Sicherheitsaufschläge, nach Ökobau.dat, gewählt.

Sicherheitszuschlag [%]	Bauteil
20	Infraleichtbeton, Beton, CEM-III-Beton, Ziegel, Fensterbank, Fensterschalung, Fenstersturz, Bewehrung, Streifenfundament, Dämmung (oberste Geschossdecke), Mineralputz (außen innen), Lehmputz (innen), WDVS, Fenster, Innentür
10	Porenbeton, Gipsputz (innen),
0	Konstruktionsholz, Holzschalung, Bretterschalung (außen), Holzschalung (innen),

## Bewehrung

Für die Bauteile aus Beton und Porenbeton wurden Bewehrungen vorgesehen. Diese entsprechen den minimalen Massen nach Schneider. Folgende Mengen wurden zu Grunde gelegt.

Bauteil	Bewehrungsmatte	Anzahl je Bauteil	Spezifische Stahlmasse [kg/m <sup>2</sup> ]	Kosten [€/Stk.]
Wände	Q188A	2	4,1	
Decken	Q524A	2	7,31	

Bauteil	Wand	Decke
Bewehrungsmatte	Q257 A	Q524 A
Anzahl je Bauteil	2	
Spezifische Stahlmasse je Matte [kg/m <sup>2</sup> ]	4,12	7,31
Größe [m <sup>2</sup> /Stk.]	13,8	
Kosten [€/Stk.]	92	160

# 10.10 Ökologie: Ökobilanz Wärmedämmung

EPS-Fassadendämmung A1-A3 EPS W/D 040 - IVH EPD (EPD-IVH-2009311-D) : IBU			C/D End of life - EPS Wand und Boden - IVH EPD (EPD-IVH-2009311-D)		
m3			kg		
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	0	MJ	Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	0	MJ
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	0	MJ	Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	0	MJ
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	7,937	MJ	Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	-0,3915	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	0	MJ	Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	0	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	0	MJ	Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	0	MJ
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	1.383	MJ	Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	-30,22	MJ
Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	0	kg	Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	0	kg
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	0	MJ	Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	0	MJ
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	0,00E+00	MJ	Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	0,00E+00	MJ
Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	75.390	m3	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	2.130	m3
Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	0,1322	kg	Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	-1,09E-03	kg
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	43,53	kg	Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	-2,647	kg
Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	0	kg	Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	0	kg
Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	0	kg	Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	0	kg
Stoffe zum Recycling (MFR)	0	kg	Stoffe zum Recycling (MFR)	0	kg
Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	0	kg	Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	0	kg
Exportierte elektrische Energie (EEE)	0	MJ	Exportierte elektrische Energie (EEE)	0	MJ
Exportierte thermische Energie (EET)	0	MJ	Exportierte thermische Energie (EET)	0	MJ
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	46,88	kg CO2-Äqv.	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	1,171	kg CO2-Äqv.
Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	1,44E-06	kg R11-Äqv.	Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	-8,26E-08	kg R11-Äqv.
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	9,94E-02	kg SO2-Äqv. kg Phosphat-Äqv.	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	-1,95E-03	kg SO2-Äqv. kg Phosphat-Äqv.
Eutrophierungspotenzial (EP)	1,01E-02	Äqv.	Eutrophierungspotenzial (EP)	-1,85E-04	Äqv.
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	3,02E-01	kg Ethen-Äqv.	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	-1,72E-04	kg Ethen-Äqv.
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	6,39E-01	kg Sb-Äqv.	Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	-1,31E-02	kg Sb-Äqv.
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	0	MJ	Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	0	MJ
<b>Sicherheitsfaktor gemäß EPD</b>	<b>1,0</b>				
<b>Rohdichte</b>			<b>16,6</b>	<b>kg/m3</b>	
<b>Lebensdauer</b>			<b>40</b>	<b>a</b>	
<b>Materialstärke</b>			<b>0,16</b>	<b>m</b>	

Abbildung 148: EPD EPS-Fassadendämmung; Werte: Ökobau.dat und BNB; eigene Berechnung

Mineralwolle-Fassadendämmung A1-A3			C/D		
Mineralwolle (Fassaden-Dämmung) (A1-A3) Durchschnittsdatensatz : PE INTERNATIONAL			End of life Bauschutt-Deponierung (C1-C4,D) Durchschnittsdatensatz : PE INTERNATIONAL		
m3			kg		
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	51,34	MJ	Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	0,01449	MJ
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	0	MJ	Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	0	MJ
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	51,34	MJ	Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	0,01449	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	888,6	MJ	Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	0,1953	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	0	MJ	Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	0	MJ
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	888,6	MJ	Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	0,1953	MJ
Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	18,39	kg	Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	0	kg
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	1,03	MJ	Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	3,42E-04	MJ
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	9,887	MJ	Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	8,13E-04	MJ
Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	44	m3	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	0	m3
Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	0	kg	Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	0	kg
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	201,6	kg	Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	1,019	kg
Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	0,02896	kg	Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	3,47E-06	kg
Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	0	kg	Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	0	kg
Stoffe zum Recycling (MFR)	0	kg	Stoffe zum Recycling (MFR)	0	kg
Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	0	kg	Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	0	kg
Exportierte elektrische Energie (EEE)	0	MJ	Exportierte elektrische Energie (EEE)	0	MJ
Exportierte thermische Energie (EET)	0	MJ	Exportierte thermische Energie (EET)	0	MJ
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	72,37	kg CO2-Äqv.	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	0,06054	kg CO2-Äqv.
Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	9,45E-08	kg R11-Äqv.	Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	1,23E-11	kg R11-Äqv.
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	0,3367	kg SO2-Äqv. kg Phosphat-	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	8,52E-05	kg SO2-Äqv. kg Phosphat-
Eutrophierungspotenzial (EP)	4,56E-02	Äqv.	Eutrophierungspotenzial (EP)	1,31E-05	Äqv.
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	0,02562	kg Ethen-Äqv.	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	2,21E-05	kg Ethen-Äqv.
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	8,71E-04	kg Sb-Äqv.	Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	5,02E-09	kg Sb-Äqv.
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	817,4	MJ	Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	0,1867	MJ
<b>Sicherheitsfaktor gemäß EPD</b>	<b>1,1</b>				
<b>Rohdichte</b>			<b>46</b>		<b>kg/m3</b>
<b>Lebensdauer</b>			<b>40</b>		<b>a</b>
<b>Materialstärke</b>			<b>0,16</b>		<b>m</b>

Abbildung 149: EPD Mineralwolle-Fassadendämmung; Werte: Ökobau.dat und BNB; eigene Berechnung

Holzfaser-Fassadendämmung A1-A3 Holzfaserplatte DFF - Egger EPD (EPD-EHW-2008611-D) : IBU			C/D End of life - DFF - Egger EPD (EPD-EHW-2008611-D) : IBU		
m3			kg		
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	0	MJ	Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	0	MJ
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	0	MJ	Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	0	MJ
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	4591	MJ	Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	-65,94	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	0	MJ	Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	0	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	0	MJ	Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	0	MJ
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	5204	MJ	Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	-5.742	MJ
Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	0	kg	Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	0	kg
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	0	MJ	Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	0	MJ
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	0,00E+00	MJ	Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	-4,22E-01	MJ
Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	780.456	m3	Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	-127.058	m3
Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	9,41E-01	kg	Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	-0,1941	kg
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	677,2	kg	Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	-475,8	kg
Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	0	kg	Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	0	kg
Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	0	kg	Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	0	kg
Stoffe zum Recycling (MFR)	0	kg	Stoffe zum Recycling (MFR)	0	kg
Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	0	kg	Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	0	kg
Exportierte elektrische Energie (EEE)	0	MJ	Exportierte elektrische Energie (EEE)	0	MJ
Exportierte thermische Energie (EET)	0	MJ	Exportierte thermische Energie (EET)	0	MJ
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	-137,1	kg CO2-Äqv.	Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	140,2	kg CO2-Äqv.
Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	2,45E-05	kg R11-Äqv.	Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	-1,39E-05	kg R11-Äqv.
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	9,25E-01	kg SO2-Äqv. kg Phosphat-	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	-1,89E-02	kg SO2-Äqv. kg Phosphat-
Eutrophierungspotenzial (EP)	1,25E-01	Äqv.	Eutrophierungspotenzial (EP)	1,83E-05	Äqv.
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	1,44E-01	kg Ethen-Äqv.	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	-2,17E-02	kg Ethen-Äqv.
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	2,13E+00	kg Sb-Äqv.	Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	-2,52E+00	kg Sb-Äqv.
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	0	MJ	Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	0	MJ
<b>Sicherheitsfaktor gemäß EPD</b>	<b>1,0</b>				
<b>Rohdichte</b>			<b>280</b>	<b>kg/m3</b>	
<b>Lebensdauer</b>			<b>40</b>	<b>a</b>	
<b>Materialstärke</b>			<b>0,26</b>	<b>m</b>	

Abbildung 150: EPD Holzfaser-Fassadendämmung; Werte: Ökobau.dat und BNB; eigene Berechnung



## 11 Literaturverzeichnis

- [1] *Haus ohne Heizung: Bürogebäude von Baumschlager Eberle in Lustenau* : Baumschlager Eberle. 2226. URL <http://www.detail.de/artikel/haus-ohne-heizung-buerogebaeude-von-baumschlager-eberle-in-lustenau-11703/>.
- [2] ZANDERROTHARCHITEKTEN: *ch39*. URL <http://www.zanderroth.de/de/projekte/ch39/>.
- [3] ARCHITEKTURAGENTUR: *Woodcube*. In: *DetailGREEN 01/2014* (2014), Nr. 01.
- [4] HERZOG & DE MEURON: *Ricola Kräuterzentrum*. In: *Detail 03/15* (2015), Nr. 03.
- [5] SCHOCH, Torsten: *EnEV 2009 und DIN V 18599 : Nichtwohnbau Kompaktdarstellung, Kommentar, Praxisbeispiele*. 2., Aufl. Berlin : Beuth, 2009 (Bauwerk).
- [6] BAUTECHNIK/LEXIKON: *Lexikon : Bautechnik*. URL [http://baupraxis.de/magazin/bautechnik/lexikon\\_M.html](http://baupraxis.de/magazin/bautechnik/lexikon_M.html).
- [7] RAENDCHEN, Hartmut: *Monolith in Hanglage: Haus 36 in Stuttgart*. URL <http://www.detail.de/artikel/monolith-in-hanglage-haus-36-in-stuttgart-21170> – Überprüfungsdatum 2016-03-17.
- [8] *Monolithische Bauweise: Ein Haus aus einem Guss*. URL [http://www.pnp.de/nachrichten/ratgeber/bauen\\_und\\_wohnen/bauen/1452264\\_Monolithische-Bauweise-Ein-Haus-aus-einem-Guss.html](http://www.pnp.de/nachrichten/ratgeber/bauen_und_wohnen/bauen/1452264_Monolithische-Bauweise-Ein-Haus-aus-einem-Guss.html) – Überprüfungsdatum 2016-03-17.
- [9] *german-architects.com | Profiles of Selected Architects | Deutsche Architekten | Willkommen*. Ronald Halbe. URL <http://www.german-architects.com/de> – Überprüfungsdatum 2016-03-17.
- [10] *Beton.org: Bauen mit dem Baustoff Beton - Beton.org*. MBA/S. URL <http://www.beton.org/startseite/> – Überprüfungsdatum 2016-03-17.
- [11] MATTHIAS BAUER ASSOCIATES: *Meilenstein aus Dämmbeton : Villa H36*. In: *zement + beton* (2014), Nr. 4, S. 34–37. URL [http://www.zement.at/service/literatur/fileupl/04\\_14\\_meilenstein\\_aus\\_daemmbeton.pdf](http://www.zement.at/service/literatur/fileupl/04_14_meilenstein_aus_daemmbeton.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-03-17.
- [12] *MBA/S : ARCHITECTURE URBANISM LANDSCAPE*. Haus 36. Haus 36. 2015. URL [http://www.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb\\_ev/Kooperationen/bau/2015/Praesentationen/BAU2015\\_VortragMBAS\\_Haus36.pdf](http://www.dgnb.de/fileadmin/de/dgnb_ev/Kooperationen/bau/2015/Praesentationen/BAU2015_VortragMBAS_Haus36.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-03-17.
- [13] *Pionierarbeit : Haus 36, Stuttgart* (2016), Nr. 02. URL [http://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Pionierarbeit\\_Haus\\_36\\_Stuttgart\\_2495694.html](http://www.dbz.de/artikel/dbz_Pionierarbeit_Haus_36_Stuttgart_2495694.html) – Überprüfungsdatum 2017-01-02.
- [14] DB DEUTSCHE BAUZEITUNG: *Beton im Besonderen: Gespräch mit Matthias Bauer zum Projekt H36 aus Dämmbeton in Stuttgart. : Monolithischer Prototyp*. URL <http://www.db-bauzeitung.de/db-empfehl/produkte/monolithischer-prototyp/>. – Aktualisierungsdatum: 2014-05-07.
- [15] JAKOB SCHOOF: *Haus ohne Heizung: Bürogebäude von Baumschlager Eberle in Lustenau*. URL <http://www.detail.de/artikel/haus-ohne-heizung-buerogebaeude-von-baumschlager-eberle-in-lustenau-11703/>. – Aktualisierungsdatum: 2014-02-03 – Überprüfungsdatum 2016-04-08.

- [16] EBERLE, Dietmar ; AICHER, Florian: *be 2226: Die Temperatur der Architektur: Portrait eines energieoptimierten Hauses*, 2016.
- [17] *german-architects.com | Profiles of Selected Architects | Deutsche Architekten | Willkommen*. URL <http://www.german-architects.com/de>.
- [18] PELZETER, Andrea ; DIN E.V.: *Lebenszyklus-Management von Immobilien : Ressourcen- und Umweltschonung in Gebäudekonzeption und -betrieb* : Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [19] MÄURLE, Barbara: *Bürogebäude in Lustenau (A). Rückbesinnung auf das Elementare*. URL <http://www.db-bauzeitung.de/db-themen/db-archiv/rueckbesinnung-auf-das-elementare/>. – Aktualisierungsdatum: 2014-03-02 – Überprüfungsdatum 2016-04-08.
- [20] *2shelter*. In: *DER ENTWURF* (2016). URL [https://www.fh-muenster.de/fb5/downloads/studierende/DerEntwurf\\_April2016\\_1\\_.pdf](https://www.fh-muenster.de/fb5/downloads/studierende/DerEntwurf_April2016_1_.pdf) – Überprüfungsdatum 2017-04-26.
- [21] *Lehm Ton Erde, Martin Rauch, Vorarlberg*. URL <http://www.lehmtonerde.at/de/>.
- [22] BAUNETZ MEDIA GMBH: *Mehrfamilienhaus B35 in Zürich : Ressourcenschonende TGA: Solarhybride, Wärmepumpen und Geothermie*. URL <https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/objekte/wohnen/mehrfamilienhaus-b35-in-zuerich-2528325> – Überprüfungsdatum 2016-02-02.
- [23] BAUNETZ MEDIA GMBH: *Baunetz\_Wissen*. URL <https://www.baunetzwissen.de/>.
- [24] *Das 2SOL-Gebäude B35 : Das 2SOL-Labor an der Bolleystrasse 35 in Zürich*. URL <http://www.2sol.ch/2sol-gebaeude/b35> – Überprüfungsdatum 2016-02-02.
- [25] *Nachhaltige Architektur: Wohnhaus in Zürich*. URL <http://www.detail.de/inspiration/nachhaltige-architektur-wohnhaus-in-zuerich-111085.html>. – Aktualisierungsdatum: 02.2011 – Überprüfungsdatum 2016-02-02.
- [26] HANSJÜRG LEIBUNDGUT: *Konzepte und Technologien für den ZeroEmission-Gebäudebetrieb*. URL [http://www.fws.ch/tl\\_files/download\\_d/Downloads/120418-HJ-Leibundgut-Konzepte\\_und\\_Technologien.pdf?phpMyAdmin=6b841e574b7e027eb2ac08849f32af](http://www.fws.ch/tl_files/download_d/Downloads/120418-HJ-Leibundgut-Konzepte_und_Technologien.pdf?phpMyAdmin=6b841e574b7e027eb2ac08849f32af) – Überprüfungsdatum 2016-03-21.
- [27] GERMAN-ARCHITECTS: *Die Bibliothek im Mittelpunkt*. URL [http://www.german-architects.com/de/projects/27414\\_Mittelpunktbibliothek\\_in\\_Berlin\\_Koepenick](http://www.german-architects.com/de/projects/27414_Mittelpunktbibliothek_in_Berlin_Koepenick).
- [28] DEUTSCHE BAUZEITSCHRIFT: *Massiver fünfköpfiger Ziegelbau : Mittelpunktbibliothek in Berlin-Köpenick*. URL [http://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Massiver\\_fuenfkoepfiger\\_Ziegelbau\\_Mittelpunktbibliothek\\_in\\_Berlin-Koepenick\\_86981.html#](http://www.dbz.de/artikel/dbz_Massiver_fuenfkoepfiger_Ziegelbau_Mittelpunktbibliothek_in_Berlin-Koepenick_86981.html#). – Aktualisierungsdatum: 02.2009.
- [29] *Das ist Holz100 - Thoma Holz*. URL <https://www.thoma.at/holz100/>.
- [30] *Hamburg würfelt – mit Holz: Der „Woodcube“ in Wilhelmsburg*. URL <http://www.detail.de/artikel/hamburg-wuerfelt-mit-holz-der-woodcube-in-wilhelmsburg-9979/>. – Aktualisierungsdatum: 2012-12-15.

- [31] *Wohngebäude in Hamburg: Haus ohne Zusatzstoffe*. In: *DetailGreen* (2014), Nr. 01, S. 22–31.
- [32] *Woodcube Hamburg*. URL <http://deepgreen-development.com/woodcube-hamburg/>.
- [33] ERWIN THOMA HOLZ GMBH: *Bauteilkatalog : System Thoma Holz 100* (März 2014). URL [https://www.thoma.at/cms/wp-content/uploads/2014/03/Holz100\\_Bauteilkatalog\\_Mrz\\_2014.pdf](https://www.thoma.at/cms/wp-content/uploads/2014/03/Holz100_Bauteilkatalog_Mrz_2014.pdf).
- [34] MINKE, Gernot: *Das neue Lehm-Bau-Handbuch : Baustoffkunde, Konstruktionen, Lehmarchitektur*. 6., verb. und erw. Aufl. Staufen bei Freiburg: Ökobuch-Verl., 2001.
- [35] KAPFINGER, Otto ; SAUER, Marko: *Martin Rauch. Gebaute Erde. Gestalten & konstruieren mit Stampflehm*. München : DETAIL, 2015.
- [36] 2012. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte*.
- [37] BONNEN, Clemens ; SCHLAICH, Mike: *Monolithische Bauweise mit Infralichtbeton : Wohnhaus in Berlin, Prenzlauer Berg*. In: *zement + beton* (2010), Nr. 04, S. 10–13. URL [http://www.zement.at/service/literatur/fileupl/04\\_10infralichtbeton.pdf](http://www.zement.at/service/literatur/fileupl/04_10infralichtbeton.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-03-17.
- [38] *Monolithisches Bauen : Mehrgeschossbau mit Ytong Porenbeton*. URL <https://www.ytong-silka.de/de/docs/ytong-porenbeton-mehrgeschossbau.pdf>.
- [39] *JUWÖ-Poroton*. URL <http://www.juwoe.de/de/empfehlung/ziegel-hausarten/thermoplan-s75.php>.
- [40] ZÜRCHER, Christoph ; FRANK, Thomas: *Bauphysik : Bau & Energie*. 3., überarb. u. aktualis. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverl., 2010.
- [41] TERSLUISEN, Angèle: *Konzept zur Planung und Bewertung wärmeenergiegewinnender, energetisch dynamischer Bauteil- und Raumstrukturen im Wohnungsbau*. 1., Auflage. Freiburg : syntagma, 2012.
- [42] KÜNZEL, Hartwig Michael: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. @Stuttgart, Univ., Diss., 1994.
- [43] GRUNEWALD, John: *Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen*. Dresden : TU Dresden, 1997 (Dresdner bauklimatische Hefte H. 3).
- [44] RUISINGER, Ulrich ; GRUNEWALD, John: *Feuchteatlas zur Vermeidung planungsbedingter Feuchteschäden : Neue Beurteilungskriterien zur Bewertung innen gedämmter Konstruktionen ; Abschlussbericht*. Dresden, Hannover : TU Institut für Bauklimatik; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2009.
- [45] KEHL, Daniel: *Feuchte-technische Bemessung von Holzkonstruktionen nach WTA. Hygrothermische Auswertung der anderen Art*. In: *Holzbau Die Neue Quadriga* (2013), Nr. 6, S. 24–28.

- [46] KEHL, Daniel ; BACHINGER, Julia: *Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - vereinfachte Nachweise und Simulation : Assessment of humidity in timber constructions - simplified verification and simulation ; [WTA Merkblatt E-6-8/D. Deutsche Fassung vom September 2015]*. Ausg. 09.2015/D. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2015 (WTA-Merkblatt E-6-8).
- [47] BORSCH-LAACKS, R: *Flachdächer in Holzbauweise. Voll gedämmt und unbelüftet in die GK 0?* In: *Feuchte, Wärme, Schimmelpilz : 23. Hanseatische Sanierungstage vom 01. bis 03. November 2012 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom ; Vorträge*. 1. Aufl. Berlin, Stuttgart: Beuth; Fraunhofer IRB-Verl., 2012 (Bauwesen Forum, 7), S. 75–87.
- [48] GARIGLIO, Federico ; SCHNIDER, Thomas ; NIEMZ, Peter ; GHAZI WAKILI, Karim ; BROMBACHER, Volker: *Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von Flachdachelementen mit Hohlkastensystem*. In: *Bauphysik 37* (2015), Nr. 1, S. 17–30.
- [49] WINTER, Stefan ; FÜLLE, Claudia ; WERTHER, Norman: *Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerichteter Konstruktionen : [Abschlussbericht]*. Stuttgart : Fraunhofer IRB-Verl., 2009 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 2736).
- [50] ZIRKELBACH, Daniel ; STÖCKL, Beate: *Hygrothermische Bemessung von Gründächern - Modellentwicklung und praktische Anwendung*. In: *Bauphysik 37* (2015), Nr. 1, S. 1–7.
- [51] DIN 68800-2. 2012-02. *Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*.
- [52] FÜLLE, Claudia ; LEOPOLD, Nadine: *WDVS im Holzbau - Optimierter Nachweis des dauerhaften Witterungsschutzes durch Kombination von Messungen im Wandprüfstand und hygrothermischen Simulationen*. In: *Bauphysik 38* (2016), Nr. 3, S. 135–146.
- [53] ZIPFEL, Mandy: *Untersuchung zeitgemäßer, monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer Eigenschaften*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Professur Bauphysik. Masterarbeit. 2016.
- [54] JÄGER, Wolfram ; REICHEL, Stephan ; ORTLEPP, Sebastian: *Energetische und mechanische Optimierung des Anschlusses der Decke an monolithische Außenwände aus Mauerwerk mit Passivhausstandard : [Abschlussbericht]*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2015 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 2967).
- [55] KLATECKI, Marc ; SCHLITZBERGER, Stephan ; MAAS, Anton ; BAUER, Anna: *Erarbeitung eines Wärmebrückenkatalogs für Fensteranschlüsse*. Kassel, 2016.
- [56] KRANZLER, Thomas: *Zur Planung, Ausführung und Leistungsfähigkeit des Außenwand-Decken-Knotens von monolithischem Ziegelmauerwerk*. In: *Mauerwerk 18* (2014), Nr. 2, S. 58–66.
- [57] SCHULZE, Phillip ; GRETHE, Wiebke ; SCHÄFERS, Martin: *Einfluss von Gebäudeart und Außenwandkonstruktion auf die Größe des detaillierten Wärmebrückenzuschlags*. In: *Bauphysik 38* (2016), Nr. 5, S. 257–264.

- [58] ENGELS, Merit Louisa: *Untersuchung von Wärmebrückeneinflüssen bei monolithischen Wandaufbauten*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Professur Bauphysik. Bachelorarbeit. 2016.
- [59] IM BBSR, ÖKOBAU DAT: *Forschungsprojekte | Info | ÖKOBAUDAT : Anpassung der Ökobau.dat an die Norm DIN EN 15804*. URL <http://www.oekobaudat.de/info/forschungsprojekte-zur-oekobaudat.html> – Überprüfungsdatum 2017-06-30.
- [60] DIN EN 15804. *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013*.
- [61] IM BBSR, ÖKOBAU DAT: *Forschungsprojekte | Info | ÖKOBAUDAT : "Ökobilanzierungstool eLCA: Konsolidierung, Erweiterung, Optimierung – Bilanzierung Bestand" sowie „Entwicklung eines Online-Ökobilanztools für den Verwaltungsbau - Erfassung von Ökobilanzdaten*. URL <http://www.oekobaudat.de/info/forschungsprojekte-zur-oekobaudat.html> – Überprüfungsdatum 2017-06-30.
- [62] IM BBSR, ÖKOBAU DAT: *Forschungsprojekte | Info | ÖKOBAUDAT : „Vernetzung der Baustoffdatenbank Ökobau.dat mit dem Ausschreibungstextsystem STLB-Bau zur Bewertung der ökologischen Qualität“*. URL <http://www.oekobaudat.de/info/forschungsprojekte-zur-oekobaudat.html> – Überprüfungsdatum 2017-06-30.
- [63] 2011. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*.
- [64] SCHOCH, Torsten: *EnEV 2012 und DIN V 18599 : Nichtwohnbau Kompaktdarstellung, Kommentar, Praxisbeispiele*. 3., Aufl. Berlin: Beuth, 2013 (Bauwerk).
- [65] DIN EN 15026. 2007-07: *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*.
- [66] DIN EN ISO 13791. 2012-08. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik -Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13791:2012*.
- [67] INSTITUT FÜR BAUKLIMATIK: *Delphin* : TU Dresden.
- [68] DIN 4108-3. 2014-11. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter*.
- [69] KEHL, Daniel: *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse : Simulation of heat and moisture transfer = Simulation du transfert de chaleur et d'humidité*. Ausg.: 12.2014/D, Dt. Fassung vom Dezember 2014, endgültige Fassung: Dezember 2014. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl., 2014 (WTA-Merkblatt 6-2).
- [70] BLÜMEL, Klaus: *Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland*. Eggenstein-Leopoldshafen : Fachinformationszentrum Energie

Physik Mathematik Karlsruhe, 1986 (Technologische Forschung und Entwicklung, nichtnukleare Energietechnik).

[71] DIN 68800-2.

[72] WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR BAUWERKSERHALTUNG UND DENKMALPFLEGE: *Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos : Calculative prognosis of mould growth risk = Méthode de calcul du risque de croissance de moisissure*. Endgültige Fassung: Februar 2007. München : WTA, 2006 (WTA-Merkblatt 6-3-05/D).

[73] DIN 4108-7. 2011-01. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele*.

[74] FOUAD, Nabil A. (Hrsg.): *Bauphysik Kalender 2015 : Simulations- und Berechnungsverfahren*. 15. Jahrgang. Berlin: Ernst & Sohn, 2015.

[75] ZIRKELBACH, Daniel: *Hygrothermische Simulation - Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige*. In: *12. Internationale Baufach- und Sachverständigentagung Ausbau und Fassade, ISK*, S. 119–129.

[76] KÜNZEL, Hartwig M. ; ZIRKELBACH, Daniel ; SCHAFACZEK, Beate: *Berücksichtigung der Wasserdampfkongvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen*. In: *Wksb 55* (2010), Nr. 63, S. 25–33.

[77] VIITANEN, H. ; TORATTI, T. ; MAKKONEN, L. ; PEUHKURI, R. ; OJANEN, T. ; RUOKOLAINEN, L. ; RÄISÄNEN, J.: *Towards modelling of decay risk of wooden materials*. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 68 (2010), Nr. 3, S. 303–313.

[78] WORCH, Anatol: *Innendämmung nach WTA II - Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren : Interior insulation according to WTA II - evaluation of internal insulation systems with numerical design methods = Isolation thermique par l'intérieur selon WTA II - évaluation des systèmes d'isolation interne par des méthodes de calcul numériques*. Ausg.: 04.2014/D, Dt. Fassung vom April 2014, endgültige Fassung: Mai 2014. Stuttgart : Fraunhofer IRB-Verl., 2014 (WTA-Merkblatt 6-5).

[79] DIN EN ISO 10211.

[80] 2006. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele*.

[81] 2011. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*.

[82] 2008. *Bauteile – Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*.

- [83] 2011. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.*
- [84] 2011. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.*
- [85] *TRNSYS 17.2: A Transient System Simulation Program* : Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison (USA), 2014.
- [86] SCHILD, Kai ; WILLEMS, Wolfgang M.: *Wärmeschutz : Grundlagen - Berechnung - Bewertung.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011 (Detailwissen Bauphysik).
- [87] FEIST, Wolfgang (Hrsg.): *Passivhaus-Sommerfall.* 1. Aufl. Darmstadt : Passivhaus-Institut, 1999 (Protokollband / Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Phase II Nr. 15).
- [88] GERTIS, Karl ; HAUSER, Gerd: *Instationärer Wärmeschutz : Mit 45 Bildern und 7 Tabellen.* Berlin : Ernst, 1975 (Berichte aus der Bauforschung 103).
- [89] HEINDL, W.: *Der Wärmeschutz einer ebenen Wand bei periodischen Wärmebelastungen.* In: *Ziegelindustrie* (1966), Nr. 18, 18 ff.
- [90] DIN 276. 2008-12. *Kosten im Bauwesen.*
- [91] *Baukosten 2014/2015 Instandsetzung-Sanierung-Modernisierung-Umnutzung : Band 1: Altbau.* 22. Aufl., bearb. Ausg. Essen, Ruhr : Wingen, 2014.
- [92] DIN 277. 2016-01. *Grundflächen und Rauminhalte im Bauwesen.*
- [93] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: *Flächenverbrauch – Worum geht es?* URL <http://www.bmub.bund.de/themen/strategien-bilanzen-gesetze/nachhaltige-entwicklung/strategie-und-umsetzung/reduzierung-des-flaechenverbrauchs/>. – Aktualisierungsdatum: 2017-01-23 – Überprüfungsdatum 2017-03-13.
- [94] ROTERMUND, UWE ; NENDZA, STEFAN: *Modelle und Verfahren zur Lebenszykluskosten-Berechnung von Gebäuden : Berechnung der Lebenszykluskosten in der Gebäudezertifizierung.* In: *Facility Management* (2011), Nr. 3. URL [http://www.facility-management.de/artikel/fm\\_Berechnung\\_der\\_Lebenszykluskosten\\_in\\_der\\_Gebaeudezertifizierung\\_1215179.html](http://www.facility-management.de/artikel/fm_Berechnung_der_Lebenszykluskosten_in_der_Gebaeudezertifizierung_1215179.html) – Überprüfungsdatum 2017-10-11.