

Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens  
zur Ermittlung der Transmissionswärmeverluste im Bereich von  
Diskontinuitäten hochwärmegeämmter Gebäude

Georg Hellinger





## **VORBEMERKUNG UND DANKSAGUNG**

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2007 bis 2012 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Bauphysik und technische Gebäudeausrüstung der Technischen Universität Dortmund.

Die Arbeit wurde von der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dortmund als Dissertation angenommen.

Ich möchte an dieser Stelle all den Menschen danken, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre:

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems danke ich für die langjährige Unterstützung und Betreuung der Arbeit.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinen Zweitgutachtern und Prüfern, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schmidt und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Middel sowie dem Leiter der Prüfungskommission, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Middendorf.

Für die umfangreiche, ausdauernde und fruchtbare Korrekturlesung der Arbeit danke ich Dr. Kai Schild, Prof. Dr. Dietmar Menck, Dr. Thomas Günthermann und meiner Schwester Anne.

Weiterhin gilt mein Dank meinen Kollegen der Arbeitsgruppe Baukonstruktionen und Bauphysik der Ruhr-Universität Bochum und des Lehrstuhls Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung der TU Dortmund sowie den Studenten der Lehrstühle, die im Zuge von Studien- und Diplomarbeiten wertvolle Nebenstudien zum Thema beigesteuert haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau Rebecca, meiner Familie und meinen Freunden für ihre langjährige Unterstützung in Form von Geduld, Rat und die vielen motivierenden Worte bedanken.

Dortmund, den 30. August 2012

Georg Hellinger

# Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der Transmissionswärmeverluste im Bereich von Diskontinuitäten hochwärmegedämmter Gebäude

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur  
an der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen  
der Technischen Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation  
von Georg Hellinger, Hattingen

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems
2. Gutachter: Univ.-Prof. Prof. Dr.-Ing. Peter Schmidt, Institut für  
Konstruktiven Ingenieurbau der Universität Siegen  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Mittel, Geschäftsführer der  
BetonMarketing West GmbH, Honorarprofessor der Fakultät  
Architektur und Bauingenieurwesen der TU Dortmund
- Tag der Verteidigung: 26. Juni 2012
- Dortmund 30. August 2012

**INHALT**

1	Einleitung	5
1.1	Problemstellung und Erkenntnisgewinn	5
1.2	Ziel der Arbeit	7
1.3	Vorgehensweise und Struktur	7
1.4	Anmerkungen	8
2	Stand der Technik	10
2.1	Energetische Bilanzierung beheizter Wohn- und Nichtwohngebäude	10
2.2	Ermittlung des Transmissionswärmeverlustes	12
2.2.1	Allgemeines	12
2.2.2	Transmissionswärmeverluste durch Wärmebrücken	14
2.2.3	Berechnung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$	20
2.2.4	Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM)	22
2.2.5	Ermittlung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$ anhand des Wärmebrückenkatalogs des <i>Planungsatlas für den Hochbau</i>	25
2.2.6	Relevante Wärmebrücken	27
2.2.7	Ableitung eines äquivalenten Pauschalzuschlags $\Delta U_{WB}$ zur Berücksichtigung detaillierter Wärmebrückenverluste	32
3	Programm 1. Genauigkeit	38
3.1	Entwicklung und Darstellung der mathematischen Zusammenhänge des Programms 1. Genauigkeit	38
3.1.1	Allgemeines	38
3.1.2	Allgemeine geometrische Ansätze	39
3.1.3	Flächen der Regelbauteile	53
3.1.4	Längen der linearen Wärmebrücken	55
3.1.5	Bandbreite der U-Werte	56
3.1.6	Bandbreite der $\psi$ -Werte	59
3.1.7	Zuordnung der $\psi$ -Werte innerhalb des Programms	61

---

3.1.8	Ableitung des approximierten $\Delta U_{WB}$ -Zuschlags nach automatisierter Berechnung	66
3.2	Programmoberfläche des Programms 1. Genauigkeit	68
3.3	Anwendungsgrenzen	76
4	Programm 2. Genauigkeit	77
4.1	Einleitung	77
4.2	Ermittlung repräsentativer Gebäudedaten	77
4.2.1	Die Gebäudestruktur Deutschlands hinsichtlich Wohn- und Nichtwohngebäuden	77
4.2.2	Geometrische Struktur des deutschen Wohngebäudebestandes (Gebäudetypologie)	80
4.2.3	Das Dämm-Niveau	81
4.3	Variationsbandbreite	83
4.3.1	Thermisch dominante und variable Eingabewerte (Parameter)	83
4.3.2	Thermisch nicht dominante und reduzierte (feste) Parameter	84
4.3.3	Thermisch nicht dominante und kalibrierte (feste) Parameter	86
4.4	Erstellung der $\Delta U_{WB}$ -Datenbank	87
5	Validierung und Bewertung der Programme 1. und 2. Genauigkeit	93
5.1	Beschreibung der Beispielgebäude zur Validierung der Programme	93
5.2	Validierungsergebnisse des Programms 1. Genauigkeit	98
5.3	Validierungsergebnisse des Programms 2. Genauigkeit	101
5.4	Bewertung der Validierungsergebnisse	103
5.5	Leistungsfähigkeit der Programme 1. und 2. Genauigkeit	104
6	Planungshilfen zur Wärmebrückenoptimierung	107
6.1	Einleitung	107
6.2	Bewertung der Nutzung von Pauschalzuschlägen nach EnEV	107
6.3	Bewertung ausgewählter Wärmebrücken	108
7	Zusammenfassung und Ausblick	121
7.1	Zusammenfassung	121
7.2	Ausblick	124
8	Literatur	125

---

9	Anhang	127
9.1	Indizes	127
9.2	Verzeichnis der allgemein verwendeten Formelzeichen	128
9.3	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen der Berechnungs- Programme 1. und 2. Genauigkeit	131
9.4	Anhang zu Abschnitt 2.2.7: Detaillierte Darstellung des Beispielgebäudes	138
9.5	Anhang zu Abschnitt 3.1: Algorithmen des Berechnungs-Programms 1. Genauigkeit	146
9.5.1	Allgemeine geometrische Ansätze	146
9.5.2	Flächen der Regelbauteile	151
9.5.3	Längen der linearen Wärmebrücken	155
9.6	Anhang zu Abschnitt 4.2: Darstellung der Gebäudetypologie Deutschlands	161
9.7	Anhang zu Abschnitt 4.2.3: Stellvertretende Bauteilschichtungen der vier Dämmniveaus	162
9.8	Anhang zu Abschnitt 6.3: Prozentuale Anteile der einzelnen Wärmebrücken	165

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Problemstellung und Erkenntnisgewinn

Angesichts der weltweit steigenden Energienachfrage und der großen Herausforderungen des Klimawandels waren die letzten Jahrzehnte bereits stark geprägt von Rechtsänderungen und Maßnahmen, welche die Energieeinsparung und Effizienzsteigerung im Gebäudesektor zum Ziel hatten. Motive dieser Energiepolitik sind die *Versorgungssicherheit*, die *Wirtschaftlichkeit* und die *Umweltverträglichkeit*. Da der deutsche Gebäudebestand mit mehr als 40% einen erheblichen Anteil am gesamten Energieverbrauch besitzt, zielt ein großer Teil der Rechtsänderungen darauf ab, durch effizientere Energienutzung den Energieverbrauch und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Hierzu zählen Regelungen, welche die klimarelevanten Emissionen beheizter Gebäude einschränken sollen. Ziel ist somit, zu wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen eine minimierte Energiebilanz sowohl für Neubauten als auch Bestandsgebäude zu erreichen.

Vor diesem Hintergrund fordert der Gesetzgeber in Deutschland die Begrenzung der Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle ( $H_T$ ) sowie die Begrenzung des Primärenergiebedarfs ( $Q_p$ ), der die Prozessketten für die Bereitstellung der Energieträger berücksichtigt. Der gesetzliche Nachweis erfolgt dabei auf Basis genormter, im Regelfall computergestützter Bilanzierungsverfahren.

Die Transmissionswärmeverluste stellen den Wärmeverluste über die Gebäudehülle dar und setzen sich aus den Verlusten der Regelbauteile, so z.B. Wände, Fenster oder die Bodenplatte, und der linienförmigen und punktuellen Wärmebrücken in den Bereichen geometrischer und materialbedingter Diskontinuitäten der Gebäudehülle zusammen. Eine hohe Qualität der Hüllfläche hochwärmedämmter Gebäude<sup>1)</sup> ist nur durch die detaillierte, hochwertige Planung und Ausführung dieser Anschlussbereiche möglich.

---

<sup>1)</sup> Unter dem Begriff *hochwärmedämmte Gebäude* sind in dieser Arbeit Gebäude zu verstehen, die seitens deren Transmissionswärmeverlusten mindestens den Anforderungen an ein *Passivhaus* gemäß Definition des Passivhaus-Instituts bzw. *KfW-Energiehaus 55* gemäß Definition der KfW-Bankengruppe erfüllen. Im Zuge dieser Arbeit wurde als oberer Grenzwert für dieses Energieniveau ein stellvertretender Wärmedurchgangskoeffizient von 0,20 W/(m<sup>2</sup>·K) ermittelt.



Seitens des gesetzlich vorgeschriebenen Nachweises der Wärmebrücken kann der Planer zwischen zwei Varianten wählen. Zum einen kann er diesen mittels pauschaler Ansätze und damit geringem Arbeits- und Zeitaufwand führen, oder aber er ermittelt den Wärmeverlust jeder einzelnen Wärmebrücke, was als *detaillierter Nachweis* bezeichnet wird. Dabei sind für jede Wärmebrücke die Länge und der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ( $\psi$ -Wert) zu bestimmen. Je nach geometrischer und materialbedingter Komplexität eines Gebäudes bedeutet dies einen äußerst hohen Arbeitsaufwand.

Da dieser Arbeitsaufwand aber oftmals diametral zu ökonomischen Interessen steht und durch Zeitdruck und/oder unzureichende Fachkenntnis die detaillierte Wärmebrückenberechnung äußerst fehleranfällig wird, bedient man sich in der Praxis oftmals pauschaler Zuschläge zur Berücksichtigung der Wärmebrückenverluste. Für hochwärmegedämmte Gebäude, also den zukünftig geforderten Standard, führt die pauschale Berücksichtigung aber zu groben Ergebnissen, überdimensionierten Bauteilen und schließlich zu unökonomischem Materialeinsatz.

Bei der Erstellung energetischer Gebäudebilanzen wählt der Planer somit zwischen einem äußerst hohen Arbeitsaufwand, der schnell einen unökonomischen Umfang annehmen kann, oder aber dem Risiko, aufgrund der Nutzung von Pauschalwerten überdimensionierte Bauteile abzuleiten. Ein Verfahren, das eine schnelle *und* detaillierte Bestimmung der Wärmebrückenverluste ermöglicht, existiert nicht. Anwendung kann ein solches Verfahren finden

- in der Vorabschätzung der Wärmebrückenverluste im Zuge der Angebotsvergabe für Wärmeschutznachweise,
- bei der Untersuchung der Gesamt-Wärmebrückeneffekte an einem Gebäude und
- bei der Untersuchung des Optimierungspotentials einzelner Wärmebrücken an einem Gebäude.

Ein solches Verfahren stellt den Lückenschluss zwischen gewünschter exakter Ermittlung der Wärmebrückenverluste und Reduzierung des dazu notwendigen Arbeitsaufwandes auf ein ökonomisches Maß dar.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsverfahrens zur Ermittlung der Transmissionswärmeverluste im Bereich von Diskontinuitäten hochwärmegeprägter Gebäude.

Der innovative Gedanke des neuen Verfahrens besteht im Wegfall der objekt-spezifischen und zeitaufwändigen Ermittlung der geometrischen und thermischen Bilanzwerte der Wärmebrücken (Längen und  $\Psi$ -Werte) im Zuge eines detaillierten Wärmebrückennachweises. Gestützt durch die Untersuchungen dieser Arbeit werden für diese Nachweisform detailliert ermittelte U-Wert-Zuschläge ( $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag) abgeleitet. Des Weiteren sollen die Untersuchungen eine Aussage über die Verteilung – also den Anteil – einzelner Wärmebrücken am Gesamttransmissionswärmeverlust eines Gebäudes respektive eine Aussage über deren Optimierungspotential ermöglichen.

## 1.3 Vorgehensweise und Struktur

Zu Anfang wird in Kapitel 2 der theoretische Hintergrund, speziell die physikalischen Grundlagen der energetischen Gebäudebilanzierung mit Fokus auf den Transmissionswärmeverlust, dargestellt. Zur Erfüllung der Aufgabenstellung wurden zwei Verfahren (Programme) entwickelt. Einen zentralen Teil dieser Arbeit stellt die Entwicklung eines ersten Programms zur automatisierten Berechnung des Transmissionswärmeverlustes inklusive der detaillierten Berechnung der Wärmebrücken mit Ausgabe des daraus resultierenden  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlags dar. Mittels des Programms kann eine individuelle objektspezifische Berechnung durchgeführt werden und, gegenüber der Nutzung von Pauschalzuschlägen gemäß EnEV, genauere Ermittlung des  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlags erfolgen. In Kapitel 3 werden die für dieses Programm entwickelten geometrischen Ansätze und Algorithmen erläutert und die Programmoberfläche dargestellt. Zwar ermöglicht das in Kapitel 3 dargestellte Programm bereits eine deutliche Verringerung der Arbeitszeit bei gleichzeitig äußerst geringem Genauigkeitsverlust (Verfahren 1. Genauigkeit), es wurde aber noch ein weiterführendes Kurzverfahren zur Ermittlung statistisch belastbarer, pauschaler  $\Delta U_{WB}$ -Zuschläge entwickelt. In Kapitel 4 erfolgt für dieses Verfahren (Verfahren 2. Genauigkeit) eine Betrachtung der deutschen Gebäudetypologie und eines daraus abgeleiteten repräsentativen Gebäudekatalogs, die Ableitung einer aus diesem Katalog resultierenden Datenbank pauschaler  $\Delta U_{WB}$ -Zuschläge und die Beschreibung des Programms, mit dem eine schnelle Ermittlung der für eine beliebige Gebäudekonfiguration relevanten Zuschläge innerhalb dieser Datenbank ermöglicht wird.

Es folgt in Kapitel 5 eine Validierung der beiden Programme an 18 Beispielgebäuden. In Kapitel 6 erfolgt eine Auswertung des Verfahrens 2. Genauigkeit und die Einschätzung des Wärmebrückenoptimierungspotentials einzelner Wärmebrücken.

Das abschließende Kapitel 7 enthält eine Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten, eine Bewertung der neuen Berechnungsverfahren, praktische Schlussfolgerungen sowie einen Ausblick über Möglichkeiten der weiterführenden Forschung.

## 1.4 Anmerkungen

### Verbesserung des Leseflusses

Für einen verbesserten Lesefluss wurden diverse Formeln, Abbildungen, Tabellen und Berechnungsergebnisse in den Anhang (Kapitel 9) verlagert, die im Text des Hauptteils referenziert wurden.

### Wärmeenergietransporte

Bei der Betrachtung von Wärmeverlusten an Gebäuden spricht man auch von Energieverlusten. Dabei handelt sich um Wärmeenergie, die unter realen Bedingungen stets in andere Energieformen übergehen kann. So führt die Erwärmung eines Körpers stets zu dessen Ausdehnung und somit zu einer Deformation. Die hier betrachteten Zusammenhänge beziehen sich ausschließlich auf Wärmeenergietransporte, die zu keinerlei mechanischen Änderungen führen (Reduktion auf thermische Probleme).

### Anwendung von Computersimulationen

Da eine Zusammenstellung und Auswertung einer signifikanten und repräsentativen Anzahl real ausgeführter Gebäudeberechnungen den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte, wurde auf die Computersimulation zurückgegriffen. Es wurden synthetische Modell-Gebäude<sup>2)</sup> berechnet, um statistisch belegbare Aussagen über die Wärmebrückeneffekte an realen Gebäuden zu gewinnen. Dabei stellt ein *Gebäude* das zu simulierende Objekt bzw. System dar, das energetisch abgebildet bzw. simuliert wurde.

---

<sup>2)</sup> Gebäude, welche aufgrund statistischer Auswertungen als *repräsentativ* für den Gebäudebestand Deutschlands für die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen herangezogen wurden.

Die folgenden Gründe sprechen für den Einsatz der Simulation:

- Eine Untersuchung an realen Gebäuden wäre zu aufwändig und zu teuer und in diesem Fall aufgrund der äußerst großen Anzahl an Gebäuden logistisch nicht umsetzbar.
- Viele thermische Einflüsse eines realen Gebäudes sind nicht quantifizierbar und verfälschen Ergebnisse, die Rückschlüsse auf einzelne Bilanzwerte erlauben könnten. So kann ein geringer Heizwärmebedarf durchaus an einer gut gedämmten Hüllfläche liegen, er kann aber auch aus einem äußerst energieschonenden Nutzerverhalten resultieren.
- Im Gegensatz zu einem realen Gebäude kann ein Simulationsmodell wesentlich leichter modifiziert werden.
- Die aus einer Computersimulation abgeleiteten Ergebnisse sind exakt reproduzierbar.

Die für diese Arbeit erforderlichen Wärmebrückenberechnungen wurden mittels des FE-Programms ANSYS® der Firma SAS IP Inc. berechnet. Es stellt eines der führenden, weltweit eingesetzten FE-Programme dar.

Für die tabellarischen Berechnungen wurde das Programm *Microsoft® Excel 2007/2010* der Firma Microsoft Corporation gewählt.

### **Charakter eines vereinfachten Verfahrens**

Die Vereinfachung eines Berechnungsverfahrens beinhaltet stets die Reduzierung von Eingangsgrößen. Alle in dieser Arbeit entwickelten Vereinfachungen wurden stets auf die Erzeugung *auf der sicheren Seite liegender Ergebnisse* hin abgeleitet, die im Folgenden nur als *sichere Ergebnisse* benannt werden.

## 2 STAND DER TECHNIK

### 2.1 Energetische Bilanzierung beheizter Wohn- und Nichtwohngebäude

Bei der Planung von Gebäuden zählt – neben der Effizienzsteigerung im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung – die Reduzierung der Wärmeverluste über die Gebäudehülle zu den wichtigsten Einsparpotentialen. Hier seien wahlweise die Erfüllung der Mindestanforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) [1], die Reduzierung von Heiz- bzw. Kühlenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Verbesserung des Raumklimas oder auch die Inanspruchnahme verschiedener Förderprojekte (Bezuschussung des Bauprojektes bzw. Nutzung attraktiver Finanzierungsmodelle) als Motivation genannt. Eine zentrale Richtlinie stellt dabei die 2010 erweiterte und aktualisierte EU-Gebäuderichtlinie (EPBD 2010) des europäischen Parlaments und des Rates [2] dar. Sie gibt Anforderungen vor, die „...die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der Union unter Berücksichtigung der jeweiligen äußeren klimatischen und lokalen Bedingungen sowie der Anforderungen an das Innenraumklima und der Kosteneffizienz...“ zum Ziel haben. Diese müssen von den EU-Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt werden. In Deutschland erfolgt diese Umsetzung mittels der EnEV für Wohn- und Nichtwohngebäude und den begleitenden Normen.

Der öffentlich-rechtliche Nachweis, dass ein Gebäude aktuelle Nachweisgrenzen einhält, erfolgt auf der Grundlage energetischer Bilanzierungsverfahren, in denen eine energetische Abbildung des Gebäudes hinsichtlich der wärmedämmenden Hüllfläche sowie der Anlagentechnik stattfindet. Das Bilanzierungsprinzip für die verschiedenen Gebäudetypen und energetischen Niveaus ist grundsätzlich gleich. Den Wärmeverlusten werden stets die Wärmegewinne entgegen gesetzt. Die jeweiligen Komponenten der Bilanz sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

**Tabelle 2-1:** Komponenten einer energetischen Bilanzierung nach DIN EN 832 [3]

Verluste	Gewinne
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transmissionswärmeverluste (<math>H_T</math>)</li> <li>- Lüftungswärmeverluste (<math>H_V</math>)</li> <li>- Erzeugungs-, Verteilungs-, Abgas- und Regelwärmeverluste der technischen Systeme (Heizung, Lüftung oder Kühlung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ interne Wärmegewinne aus der Gebäudenutzung (<math>Q_i</math>)</li> <li>+ solare Wärmegewinne (<math>Q_S</math>), die in aller Regel durch Sonneneinstrahlung über Fenster erzielt werden</li> </ul>

Der Wärmeschutznachweis von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach EnEV (EnEV-Nachweis) erfolgt anhand zweier Bilanzierungsgrößen. Dies ist zum einen der Jahres-Primärenergiebedarf  $Q_p$ , der eine gesamtenergetische Betrachtung inklusive der Prozessketten *Gewinnung*, *Umwandlung* und *Verteilung* darstellt, und zum anderen der spezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust  $H_T'$ . Für diese Werte werden nachzuweisende Maximalwerte angegeben, die es für einen Nachweis zu unterschreiten gilt <sup>3)</sup>.

Ergänzend zum EnEV-Nachweis ist zur Auslegung und Dimensionierung der Heizungsanlage eine gesonderte energetische Bilanzierung nach DIN EN 12831 [4] durchzuführen. Beiden Verfahren ist stets immanent, dass die einzelnen Bilanzierungswerte einer Abhängigkeit unterliegen. So sind der nachzuweisende Primärenergiebedarf  $Q_p$  oder aber die zur Auslegung der Heizungsanlage zu ermittelnde Heizlast  $\Phi_{HL}$  dominant von den Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten abhängig, was diese zu den zentralen Bilanzierungsgrößen macht. Für die Lüftungswärmeverluste aber auch die solaren und internen Wärmegewinne sowie die Wärmeverluste aus Erzeugung, Regelung und Verteilung wird im Zuge dieser Arbeit seitens des Berechnungsverfahrens ein neuer Erkenntnisgewinn ausgeschlossen und diese Anteile somit nicht weiter betrachtet <sup>4)</sup>.

Zur Erläuterung des in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsansatzes, welcher sich direkt auf den zentralen Bilanzanteil der Transmissionswärmeverluste auswirkt, seien nun die Grundlagen von deren Berechnung dargestellt.

Es folgen die zentralen mathematischen Zusammenhänge und eine detaillierte Betrachtung der Ansätze zur Ermittlung der Wärmeverluste aus Wärmebrücken (Wärmebrückenverlust).

---

<sup>3)</sup> Bei Nichtwohngebäuden erfolgt die Begrenzung der Transmissionswärmeverluste nicht über die gesamte wärmeübertragenden Umfassungsfläche, sondern über Teilflächen.

<sup>4)</sup> An dieser Stelle sei für eine vertiefte Erläuterung der Thematik auf aktuelle Handbücher (z. B. [5]) verwiesen.

## 2.2 Ermittlung des Transmissionswärmeverlustes

### 2.2.1 Allgemeines

Im Allgemeinen wird der Transmissionswärmeverlust  $H_T$  entsprechend DIN EN ISO 13789 [6] gemäß Gl. 2-1 ermittelt.

$$H_T = H_D + H_g + H_U + H_A \quad \left[ \frac{W}{K} \right] \quad \text{Gl. 2-1}$$

mit

$H_D$  als direkter Wärmedurchgangskoeffizient zwischen beheiztem oder gekühltem Raum und der Außenumgebung durch die Gebäudehülle in W/K

$H_g$  als stationärer Wärmedurchgangskoeffizient über das Erdreich in W/K

$H_U$  als spezifischer Transmissionswärmedurchgangskoeffizient durch unconditionierte Räume in W/K

$H_A$  als spezifischer Transmissionswärmedurchgangskoeffizient an angrenzenden Gebäuden in W/K

Für eine nationale Anwendung werden zusätzlich in Verbindung mit DIN EN 832 [3] die in DIN 4108 Teil 6 Kapitel 6.1.3 beschriebenen Berechnungsabläufe auf Wohngebäude und auf Gebäude, die auf bestimmte Innentemperaturen beheizt werden müssen, angewandt. Es sei also eine energetische Bilanzierung nach dem *detaillierten Verfahren* (Monatsbilanzverfahren) vorausgesetzt. Diese basiert auf den in Gl. 2-2 dargestellten Zusammenhängen.

$$H_T = \sum_m (A_m \cdot U_m) + H_u + L_s + H_{WB} + \Delta H_{T, FH} \quad \left[ \frac{W}{K} \right] \quad \text{Gl. 2-2}$$

mit

$\sum_m (A_m \cdot U_m)$  als spezifischer Transmissionswärmeverlust über Regelbauteile<sup>5)</sup> m gegen Außenluft in W/K

$H_u$  als spezifischer Transmissionswärmeverlust über nicht oder niedrig beheizte Räume in W/K mit

$$H_u = \sum_m (A_m \cdot U_m \cdot F_{xm})$$

---

<sup>5)</sup> Als *Regelbauteil* wird ein flächiges Bauteil der beheizten Hüllfläche bezeichnet, das in der energetischen Bilanz mit einem *eigenen* Wärmedurchgangskoeffizienten berücksichtigt wird (z. B. Wände, Decken, etc.)

$L_S$	als thermischer Leitwert zwischen beheiztem Raum und Erdreich mit $L_S = \sum_m (A_m \cdot U_m \cdot F_{G,m})^{6)}$
$F_x, F_G$	als Temperatur-Korrekturfaktor gemäß Tabelle 2-2
$H_{WB}$	als spezifischer Wärmeverlust durch Wärmebrücken nach Gl. 2-3
$\Delta H_{T,FH}$	als spezifischer Wärmeverlust über Bauteile mit Flächenheizungen in W/K
$A_m$	als Fläche des Regelbauteils m in m <sup>2</sup>
$U_m$	als Wärmedurchgangskoeffizient (im folgenden <i>U-Wert</i> benannt) des Regelbauteils m in W/(m <sup>2</sup> ·K)

Für das in dieser Arbeit entwickelte Berechnungsverfahren seien an dieser Stelle bereits die folgenden Vereinfachungen und Annahmen getroffen:

- Flächenheizsysteme in Bauteilen (Wänden oder Decken) werden vernachlässigt.
- Wände und Decken gegen unbeheizte Glasvorbauten werden thermisch wie Außenwände gegen Außenluft behandelt.
- Der signifikant dominante Anteil an Wärmeschutznachweisen wird nach dem in Gl. 2-2 dargestellten Bilanzierungsverfahren durchgeführt.

Für diese Arbeit ergeben sich somit die in Tabelle 2-2 aufgeführten Temperatur-Korrekturfaktoren.

---

<sup>6)</sup> Die Verwendung der Temperatur-Korrekturfaktoren  $F_G$  gilt als Vereinfachung für den EnEV-Nachweis. Eine genauere Ermittlung der Wärmeverluste an das Erdreich kann gemäß DIN EN ISO 13370 [14] erfolgen.



**Tabelle 2-2:** Temperatur-Korrekturfaktoren  $F_x$  und  $F_G$  gemäß DIN 4108-6 [7]

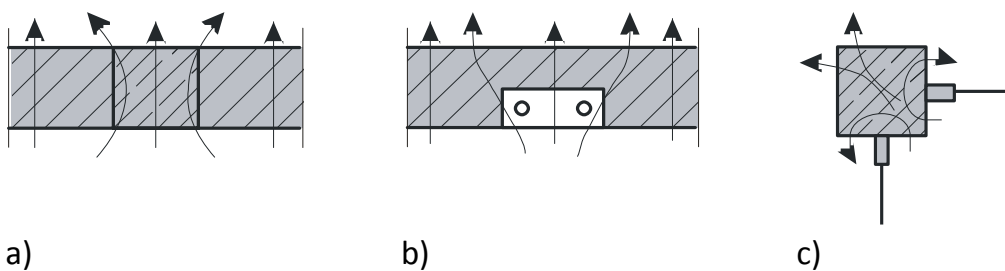
Wärmestrom nach außen über		$F_x, F_G$
Außenwand, Fenster, Decke über Außenluft	$F_e$	1,0
Dach (als Systemgrenze)	$F_D$	
Oberste Geschosdecke (Dach nicht ausgebaut)	$F_D$	0,8
Wände und Decken gegen Abseiten	$F_u$	
Wände und Decken gegen unbeheizte Räume	$F_u$	0,5
Wand des beheizten Kellers	$F_G = F_{bw}$	0,6
Unterer Gebäudeabschluss	$F_G$	

### 2.2.2 Transmissionswärmeverluste durch Wärmebrücken

#### Allgemeine Definition

Gemäß DIN EN ISO 10211 [9] versteht man unter einer Wärmebrücke den „Teil einer Gebäudehülle, wo der ansonsten normal zum Bauteil auftretenden Wärmestrom deutlich verändert wird durch

- eine volle oder teilweise Durchdringung der Gebäudehülle durch Baustoffe mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit (materialbedingte Wärmebrücke)
- einen Wechsel in der Dicke der Bauteile oder
- eine unterschiedlich große Innen- und Außenoberfläche (geometrische Wärmebrücke).“



**Abbildung 2-1:** Beispiele für Bauteilbereiche mit Wärmebrücken a) Stahlbetonstütze in einer Mauerwerksaußenwand b) Installationsschacht in einer Außenwand c) Stahlbetonpfeiler mit beidseitigem Fensteranschluss

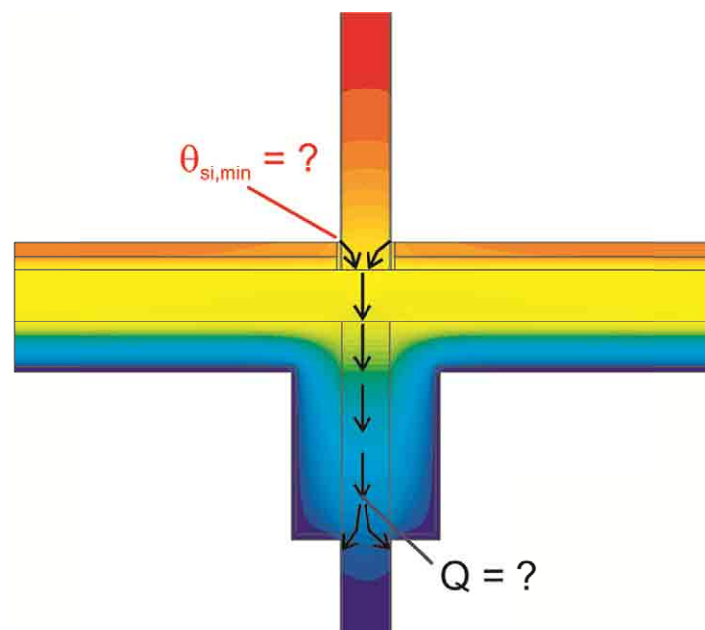
Man spricht von einer konstruktiven Wärmebrücke, wenn sich aufgrund des materialbedingten *und* geometrischen Aufbaus die unter a bis c genannten Effekte überlagern.

Der Vollständigkeit halber sei der Fall a) noch um *systemimmanente Wärmebrücken* ergänzt. Hierbei handelt es sich um punktförmige, regelmäßig innerhalb eines Regelbauteils auftretende thermische Diskontinuitäten (z. B. Maueranker in zweischaligem Mauerwerk, Dachbefestigungen oder Befestigungsmittel in Wärmedämm-Verbundsystemen), die bei der Ermittlung des U-Wertes des jeweiligen Regelbauteils zu erfassen sind.

Bei Wärmebrücken handelt es sich also stets um Stoßbereiche respektive Durchdringungen der Regelbauteile. Diese Stoßbereiche stellen somit örtlich begrenzte Diskontinuitäten der wärmeübertragenden Gebäudehülle dar. Dabei werden die Stoßstellen zweier Regelbauteile als *linienförmige (zweidimensionale) Wärmebrücken* und die dreier Regelbauteile als *punktförmige (dreidimensionale) Wärmebrücken* bezeichnet. Je höher die Dämmleistung der Regelbauteile ist, desto gravierender wirken sich Wärmebrücken in der energetischen Bilanzierung aus.

### Auswirkungen von Wärmebrücken

Dabei sind zwei in Abbildung 2-2 beispielhaft visualisierte Wärmebrückeneffekte zu unterscheiden.



**Abbildung 2-2:** Temperaturverläufe und Wärmeströme im Bereich einer Wärmebrücke

- Minimale raumseitige Oberflächentemperaturen  $\theta_{si,min}$ :

Für die konstruktive Dimensionierung hinsichtlich des Wärmeschutzes eines Bauteils ist die Vermeidung von Schimmelpilzbildung entscheidend. Von einer Schimmelpilzfreiheit kann gemäß DIN 4108-2 [7] beispielsweise im Wohnungsbau bei Gewährleistung von Innenoberflächentemperaturen von mindestens  $\theta_{si,min} = 12,6^\circ\text{C}$  ausgegangen werden.

Da sich im Bereich von Wärmebrücken in der Regel die niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperaturen einstellen, ist an diesen Stellen die Gefahr der Schimmelpilzbildung am höchsten und damit durch den Architekten oder Fachplaner nachzuweisen. Die Betrachtung dieses Planungsinhaltes soll aber im weiteren Verlauf nicht Inhalt dieser Arbeit sein.

- **Zusätzliche Wärmeverluste Q:**

An den Verbindungsstellen der Regelbauteile stellen sich zusätzliche Wärmeverluste ein, die auch im Zuge eines EnEV-Nachweises (Wärmeschutz-nachweises) oder einer Heizlastberechnung numerisch berücksichtigt werden müssen. Da diese Verluste in der Regel ausschließlich durch die linienförmigen Wärmebrücken erzeugt werden, können die punktförmigen Wärmebrücken im Zuge energetischer Gebäudebilanzierungen vernachlässigt werden.

Mittels welcher Ansätze die linienförmigen Wärmebrücken im Zuge eines EnEV-Nachweises berücksichtigt werden können und/oder sollten und welche Auswirkungen die Wahl des Ansatzes auf den Nachweis speziell für hochwärmegedämmte Gebäude hat, soll nun erläutert werden.

### Rechnerische Berücksichtigung von Wärmebrücken nach EnEV 2009

Innerhalb des EnEV-Nachweises ist die Wärmebrückenwirkung im Bereich von Bauteilanschlüssen bei der Berechnung des Transmissionswärmeverlustes  $H_T$  mittels des Anteils spezifischen Wärmeverlustes  $H_{WB}$  gemäß Gl. 2-3 zu berücksichtigen.

$$H_{WB} = \begin{cases} \Delta U_{WB} \cdot A_{ges} & \text{bei Nutzung von Pauschalzuschlägen} \\ \sum_k \psi_k \cdot \ell_k & \text{bei detaillierter Wärmebrückenberechnung} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Mit

$\Delta U_{WB}$  als pauschaler Zuschlag auf die U-Werte der Regelbauteile zur Berücksichtigung von Wärmebrücken in  $W/(m^2 \cdot K)$

$A_{ges}$  als gesamte wärmeübertragende Hüllfläche (Summe über alle Regelbauteile) in  $m^2$

$\ell_k$  als Länge der linienförmigen (baulich konstruktiven) Wärmebrücke  $k$  in  $m$

$\psi_k$  als längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmebrücke  $k$ , berechnet nach DIN EN ISO 10211 [9], gewöhnlich mittels Randbedingungs-sätzen nach DIN 4108 - Beiblatt 2 [8] in  $W/(m \cdot K)$

$n$  als Anzahl der relevanten Wärmebrücken

Dies kann über vier verschiedene Varianten erfolgen (vgl. auch [8]):

- (1) Eine pauschale Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten aller Bauteile der Gebäudehülle um  $\Delta U_{WB} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  bei Gebäuden, bei denen mehr als 50% der Außenwand mit einer innen liegenden Dämmschicht versehen sind und die Massivdecken in die Außenwand einbinden.
- (2) Eine pauschale Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten aller Bauteile der Gebäudehülle um  $\Delta U_{WB} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  bei allen Gebäuden, auf die das Kriterium aus (1) nicht zutrifft.
- (3) Eine pauschale Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten aller Bauteile der Gebäudehülle um  $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Diese günstigere, weil geringere, pauschale Erhöhung darf nur angesetzt werden, wenn die Bauteilanschlüsse gemäß den Planungsbeispielen nach DIN 4108 Beiblatt 2 [8] ausgeführt werden.
- (4) Der genaue rechnerische Nachweis der Wärmebrücken mit spezifischen längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  (im Folgenden  $\Psi$ -Wert benannt), berechnet nach Gl. 2-4.

Für die Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten aller Bauteile der Gebäudehülle um  $\Delta U_{WB}$  wird bei Nutzung dieses Ansatzes ein äquivalenter  $\Delta U_{WB}$ -Wert nach Gl. 2-4 ermittelt.

$$\Delta U_{WB} = \frac{\sum_k \psi_k \cdot \ell_k}{\sum_m A_m} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad \text{Gl. 2-4}$$

Mit

$\sum_m A_m$  als Summe der Flächen aller relevanten Regelbauteile  $m$  in  $\text{m}^2$

$\sum_k \psi_k \cdot \ell_k$  als Summe aller Wärmeverluste relevanten linienförmigen Wärmebrücken  $k$  in  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Die Ansätze (1) bis (4) unterscheiden sich deutlich hinsichtlich des Arbeitsaufwandes – wobei dieser in numerischer Folge ansteigt – aber auch hinsichtlich der resultierenden Genauigkeit.

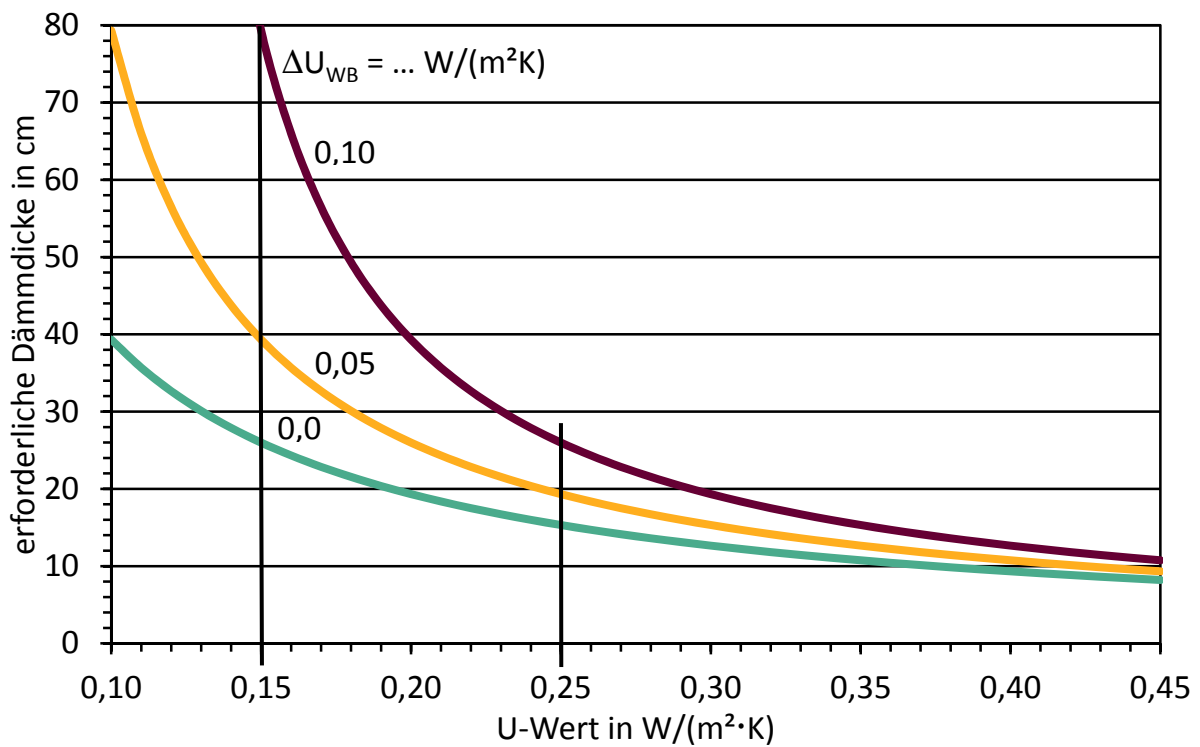
Bei Anwendung der Varianten (1) und (2) sind aus energetischer Sicht keine Restriktionen hinsichtlich der konstruktiven Gestaltung der Bauteilanschlüsse zu beachten. Auf der anderen Seite ist eine ökonomisch sinnvolle Bauplanung auf diesem Wege nicht möglich. Ein verantwortungsbewusster Planer wird daher diese Variante in aller Regel unbeachtet lassen.

In der Praxis hat sich die Variante (3), also die Nutzung des Pauschalzuschlags  $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  als attraktivste Variante herausgestellt. Dies ist leicht nachzuvollziehen, da mit diesem Ansatz nur ein sehr geringer Arbeitsaufwand verbunden ist und die Wärmebrückenverluste gegenüber den Varianten (1) und (2) deutlich geringer ausfallen. Allerdings ist die Nutzung dieser Variante stets mit Restriktionen behaftet. So muss der Nachweisführende einen sogenannten Gleichwertigkeitsnachweis durchführen. Dies bedeutet, dass alle tatsächlich ausgeführten Konstruktionsanschlüsse, die gemäß dem Beiblatt als nachweispflichtig gelten, wärmebrückentechnisch gleich- oder höherwertig gegenüber dem Referenzniveau des Beiblatts ausgeführt werden und rechnerisch auch nachgewiesen werden müssen. Ein Vermerk bzw. eine Bauausführungsanweisung, welche die Umsetzung aller relevanten Wärmebrücken gemäß DIN 4108 Beiblatt 2 vorschreibt, legitimiert die Nutzung nicht. Die Nutzung ist ebenfalls nicht mehr legitimiert, sobald mindestens ein Anschlussdetail nicht nach DIN 4108 Beiblatt 2 geplant und/oder ausgeführt wird oder werden kann – z. B. weil ein entsprechendes Detail nicht in Beiblatt 2 aufgenommen wurde. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Anwendung dieses Pauschalwertes *unzulässig* ist, sobald

- auch nur ein Detail von den Planungsbeispielen nach Beiblatt 2 der DIN 4108 abweicht oder aber
- kein Gleichwertigkeitsnachweis erbracht worden ist.

Die Variante (3) stellt sich also für die meisten Anwendungsfälle als unzulässig heraus.

Wie bereits im *Planungsatlas für den Hochbau* [10] aufgezeigt, führt ein hoher Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  für hochwärmedämmte Gebäude zu unökonomischen Ergebnissen. Legt man einen geforderten U-Wert – z. B. für eine Außenwand – zugrunde, so ergibt sich für die durch einen EnEV-Nachweis ermittelte, notwendige Dämmschichtdicke der Außenwand des Gebäudes ein vom Wärmebrückenanteil abhängiger Wert  $d_{\text{eff}}$ . Den Zusammenhang zwischen dem geforderten U-Wert, dem Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  und der Dämmschichtdicke der Außenwand stellt Abbildung 2-3 dar. Es zeigt sich, dass durch die Wahl des Wärmebrückenzuschlags  $\Delta U_{WB}$  insbesondere bei geringerem U-Wert die notwendige Dämmschichtdicke zunehmend beeinflusst wird.



**Abbildung 2-3:** Beeinflussung der erforderlichen Dämmschichtdicke durch den Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  nach [10]

### Schlussfolgerung

Unter Berücksichtigung der zu den Varianten (1) bis (3) getroffenen Aussagen kommt für einen verantwortungsbewussten Planer bzw. Nachweisführenden nur eine Berechnung gemäß Variante (4), also die genaue rechnerische Ermittlung der Wärmebrücken mit spezifischen  $\Psi$ -Wert, in Frage.

Dieser Wert muss entweder mittels zeitintensiver computergestützter Berechnungen auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) für jede Wärmebrücke gemäß Kapitel 2.2.3 einzeln berechnet oder sogenannten *Wärmebrückenatlanten* (vgl. Kapitel 2.2.5) entnommen werden.

### 2.2.3 Berechnung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$

Berechnet wird der  $\Psi$ -Wert nach DIN 4108-6 [7] und DIN EN ISO 10211 [9] in Verbindung mit weiteren anerkannten Regeln der Technik gemäß Gl. 2-5.

$$\psi = L^{2D} - L^0 \quad \left[ \frac{W}{(m \cdot K)} \right] \quad \text{Gl. 2-5}$$

Mit

$L^{2D}$  als tatsächlicher Wärmeverlust der zweidimensionalen Wärmebrücke, der durch eine zweidimensionale Wärmebrückenberechnung gemäß [8] und [9] in Verbindung mit weiteren anerkannten Regeln der Technik ermittelt wird in  $W/(m \cdot K)$

$L^0$  als Wärmeverlust einer gleichgroßen ungestörten Fläche  $k$  in  $W/(m \cdot K)$  mit

$$L^0 = \sum_k U_k \cdot \ell_k \cdot \left( \frac{\theta_{i,k} - \theta_{e,k}}{25} \right)$$

$U_k$  als Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils  $k$  in  $W/(m^2 \cdot K)$

$\ell_k$  als Länge des Bauteils  $k$  in  $m$

$\theta_i$  als Lufttemperatur auf der warmen Seite (innen) des Bauteil  $k$  (gewöhnlich  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$\theta_e$  als Lufttemperatur auf der kalten Seite (außen) des Bauteil  $k$  nach Tabelle 2-3

Bei einer solchen Berechnung ist allerdings die Wahl der Randbedingungssatze, also der Vorgaben für die Modellgeometrie, für Temperatur und Warmeübergangsrandbedingungen entscheidend dafür, ob das Ergebnis für die gesamte Gebäudebilanzierung genutzt werden kann.

#### Randbedingungen einer Wärmebrückenberechnung

Bei der Berechnung der  $\Psi$ -Werte wird zwischen einer *allgemeinen Wärmebrückenberechnung* und dem *Gleichwertigkeitsnachweis* von Detailausfuhungen gemäß DIN 4108, Beiblatt 2 [8] unterschieden. Für beide Berechnungsziele werden unterschiedliche Randbedingungssatze gegeben. Für *allgemeine Wärmebrückenberechnungen* ist dabei ausschließlich die DIN EN ISO 10211 [9] maßgebend, wohingegen *Gleichwertigkeitsnachweise* mittels abweichender Randbedingungssatze nach DIN 4108 Beiblatt 2 [8] geführt werden.

Die in dieser Arbeit genutzten Randbedingungen entsprechen denen eines *Gleichwertigkeitsnachweises*. Diese Wahl wurde aus den folgenden Gründen getroffen:

- Bei energetischen Berechnungen nach DIN V 18599 [11], welche gemäß EnEV für Nichtwohngebäude anzuwenden ist, sind die  $\Psi$ -Werte nach DIN EN ISO 10211 [9] unter Verwendung der Randbedingungen aus DIN 4108 Beiblatt 2 [8] zu berechnen.
- Bisherige Untersuchungen im Zuge der Erstellung des *Planungsatlas für den Hochbau* [10] haben gezeigt, dass die Ergebnisse, welche auf den Randbedingungen des Beiblatts 2 beruhen, in der Gesamtwirkung stets zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führen.
- Die Randbedingungen einer  $\Psi$ -Wert-Berechnung müssen zu denen der Transmissionswärmeverluste der Regelbauteile passen. Setzt man das Verfahren gemäß Gl. 2-2 voraus, so weist DIN EN ISO 10211 für Bauteile zum Erdreich bezüglich der Randbedingungsdefinition Lücken auf, vgl. dazu auch Ausführungen in [12].

Die in dieser Arbeit herangezogenen  $\Psi$ -Werte wurden mittels der Temperaturreandbedingungen für Wärmebrückenberechnungen gemäß Tabelle 2-3 ermittelt.

**Tabelle 2-3:** Temperaturreandbedingungen für Wärmebrückenberechnungen nach Beiblatt 2 der DIN 4108

Lage	$\theta$
Innen	
Allgemein	$\theta_i = 20\text{ °C}$
in unbeheizten Räumen	$\theta_i = 10\text{ °C}$
in unbeheizten Dachräumen	$\theta_u = 0\text{ °C}$
Außen	
Bauteile gegen Außenluft	$\theta_e = -5\text{ °C}$
Erdreich	$\theta_e = 5\text{ °C}$
Erdberührter Teil der Außenwand	
bei geringer ( $\leq 1\text{ m}$ ) oder keiner Erdreichanschüttung	$\theta_e = -5\text{ °C}$
bei Erdreichanschüttung $> 1\text{ m}$	$\theta_e = 5\text{ °C}$

Aus einer mittels dieser Randbedingungen durchgeführten, rechnergestützten zweidimensionalen Wärmebrückenberechnung lässt sich der tatsächliche Wärmeverlust ermitteln. Im Zuge dieser Arbeit wurde für die Ermittlung der  $\Psi$ -Werte die Finite-Elemente-Methode (FEM) herangezogen.



## 2.2.4 Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM)

### Temperaturfeldberechnung

Ist die charakteristische Größe bei statischen Problemen eine Funktion der Verschiebung  $u$ , so wird nun ein funktionaler Zusammenhang der Temperatur aufgestellt. Dies geschieht mithilfe einer Differentialgleichung. Zum besseren Verständnis diene hier die Betrachtung skalarer Werte, welche im Anschluss lediglich in Matrixschreibweise überführt werden. Für einen der einfachsten Elementtypen – einen Stab – sei eine lineare, eindimensionale Temperaturfunktion gewählt:

$$T_x = a \cdot x + b \quad \text{Gl. 2-6}$$

Anmerkung: Für den zwei- respektive dreidimensionalen Fall gilt entsprechend:

$$T_y = c \cdot y + d$$

$$T_z = e \cdot z + f$$

Ersetzt man  $a$  und  $b$  durch die unbekanntenen Knotentemperaturen  $T_1$  und  $T_2$  als jeweilige Endpunkttemperaturen und löst die Gleichung nach diesen auf, so erhält man mit  $L$  als Elementlänge:

$$T_1 = b \quad \text{Gl. 2-7}$$

$$T_2 = a \cdot L + b$$

Für eine beliebige Funktion der Temperatur  $T(x)$  und deren Ableitung  $T'(x)$  (dem Temperaturgradienten) ergibt sich:

$$T(x) = \left( T_1 + \frac{T_2 - T_1}{L} \cdot x \right) = \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \cdot T_1 + \left( \frac{x}{L} \right) \cdot T_2 \quad \text{Gl. 2-8}$$

$$T'(x) = \frac{dT(x)}{dx} = -\frac{1}{L} \cdot T_1 + \frac{1}{L} \cdot T_2 \quad \text{Gl. 2-9}$$

Nach Definition der Terme  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $B_1$  und  $B_2$  führt dies zu folgender Form:

$$T(x) = N_1 \cdot T_1 + N_2 \cdot T_2 \quad \text{Gl. 2-10}$$

$$T'(x) = B_1 \cdot T_1 + B_2 \cdot T_2 \quad \text{Gl. 2-11}$$

mit

$$N_1(x) = 1 - \frac{x}{L} \quad N_2(x) = \frac{x}{L}$$

$$B_1(x) = -\frac{1}{L} \quad B_2(x) = \frac{1}{L}$$

Verknüpft man den Temperaturgradienten über die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , so liefert dies die Wärmestromdichte  $q(x)$ .

$$q(x) = -\lambda \cdot T'(x) \quad \text{Gl. 2-12}$$

Damit können die Gl. 2-10 bis Gl. 2-12 als Matrizenform wie folgt dargestellt werden.

$$T(x) = [N_1; N_2] \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = [N] \cdot \{T\} \quad \text{Gl. 2-13}$$

$$T'(x) = [B_1; B_2] \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = [B] \cdot \{T\} \quad \text{Gl. 2-14}$$

$$q(x) = -[D] \cdot [B_1; B_2] \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} = -[D] \cdot [B] \cdot \{T\} \quad \text{Gl. 2-15}$$

mit  $[D]$  als Werkstoffmatrix

Die gesuchten Werte  $T$  und  $q$  sind somit bis auf die noch unbekanntenen Werte der Knotentemperaturen festgelegt. Man bestimmt die Knotentemperaturen nun nach dem Variationsprinzip über die Forderung nach minimaler potentieller Energie. Das bedeutet, dass innere und äußere Potentialströme der Knoten gleich groß sein müssen. Dieses Verfahren wird an dieser Stelle nicht näher vertieft.

Es ergibt sich das Gleichungssystem gemäß Gl. 2-16 und die unbekanntenen Knotentemperaturen demnach gemäß Gl. 2-17.

$$\overbrace{\left( \sum_{\text{Elemente}} [k]_e \right)}^{[k]} \cdot \{T\} = \{Q\} \quad \begin{bmatrix} W \\ m \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 2-16}$$

$$\{T\} = -[k]^{-1} \cdot \{Q\} \quad [K] \quad \text{Gl. 2-17}$$

mit

$[k]$  als Leitfähigkeitsmatrix (Steifigkeitsmatrix) der Gesamtstruktur, also der Summe aller Elementleitfähigkeitsmatrizen  $[k]_e$

$\{T\}$  als Temperaturvektor

$\{Q\}$  als Wärmestrom, Lastvektor

Ferner lässt sich aus der Forderung nach minimaler potentieller Energie die Elementleitfähigkeitsmatrix  $[k]_e$  eines Elements wie folgt ableiten.

$$[k]_e = \int_0^V [B]^T \cdot [D] \cdot [B] dV \quad \text{Gl. 2-18}$$

Bei der Werkstoffmatrix  $[D]$  handelt es sich tatsächlich um eine skalare Größe: die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ . Für ein zweidimensionales Element mit isotropen Materialverhalten und

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad [B]^T = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

ergibt sich für  $[k]_e$ :

$$\begin{aligned} [k]_e &= \int_0^V \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \cdot \lambda \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} dV = \int_0^V \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{L^2} & -\frac{\lambda}{L^2} \\ -\frac{\lambda}{L^2} & \frac{\lambda}{L^2} \end{bmatrix} dV = \int_0^V \left\{ \frac{\lambda}{L^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \right\} dV \\ &= A_m \cdot \int_0^L \left\{ \frac{\lambda}{L^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \right\} dx = \frac{\lambda \cdot A_m}{L^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}_0^L = \frac{\lambda \cdot A_m}{L} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Das Gleichungssystem aus Gl. 2-16 ist nun hinreichend definiert und kann vom FE-Programm (ANSYS) nach den Knotentemperaturen aufgelöst werden. Für die Berechnung ist die Notwendigkeit der Angabe der Geometriedaten (A und L), der äußeren Lasten (Q) sowie der Materialkennwerte ( $\lambda$ ) ersichtlich.

Mit zunehmender Netzdichte (Elementanzahl) steigt auch die Zahl der Knoten. Es ist offensichtlich, dass der Vektor T statt zwei, mehrere tausend zu bestimmende Größen enthält. Ferner nimmt bei höheren Dimensionen (hier 2D) die Zahl der Koordinatenrichtungen zu.

Für die numerische Lösung des Gleichungssystems bedient sich das Programm iterativer Verfahren wie dem Gaußschen Eliminationsverfahren, der Cramerschen Regel oder anderer Algorithmen wie des iterativen Verfahrens nach Jacobi (eng. Jacobi Conjugate Gradient).

Es ist abschließend hinzuzufügen, dass es sich bei den anstehenden Betrachtungen um stationäre Probleme handelt, also keine Variation mit der Zeit berücksichtigt wird.

## Abschlussbemerkung zur FE-Methode

Die analytischen, hier rechnergestützten, Verfahren werden oft als *exakte Verfahren* bezeichnet. Man muss sich aber darüber im Klaren sein, dass nur der Schritt von der Differentialgleichung zur Lösung als *exakt* bezeichnet werden kann. Vielfach muss aber die technische Aufgabenstellung sehr weit idealisiert und vereinfacht werden, damit eine lösbare Differentialgleichung aufgestellt werden kann. Die Anwendung von analytischen Verfahren ist auf wenige Sonderfälle beschränkt. Für Aufgaben in der Praxis sind numerische Verfahren besser geeignet. Sie sind auf komplexe Geometrien anwendbar, was die Nutzung im Zuge dieser Arbeit rechtfertigt.

Die in dieser Arbeit genutzten  $\Psi$ -Werte sind im Zuge der Entwicklung des *Planungsatlas für den Hochbau* [10] mittels der FE-Methode berechnet worden und können im Sinne der o.g. Definition als *exakt* eingestuft werden.

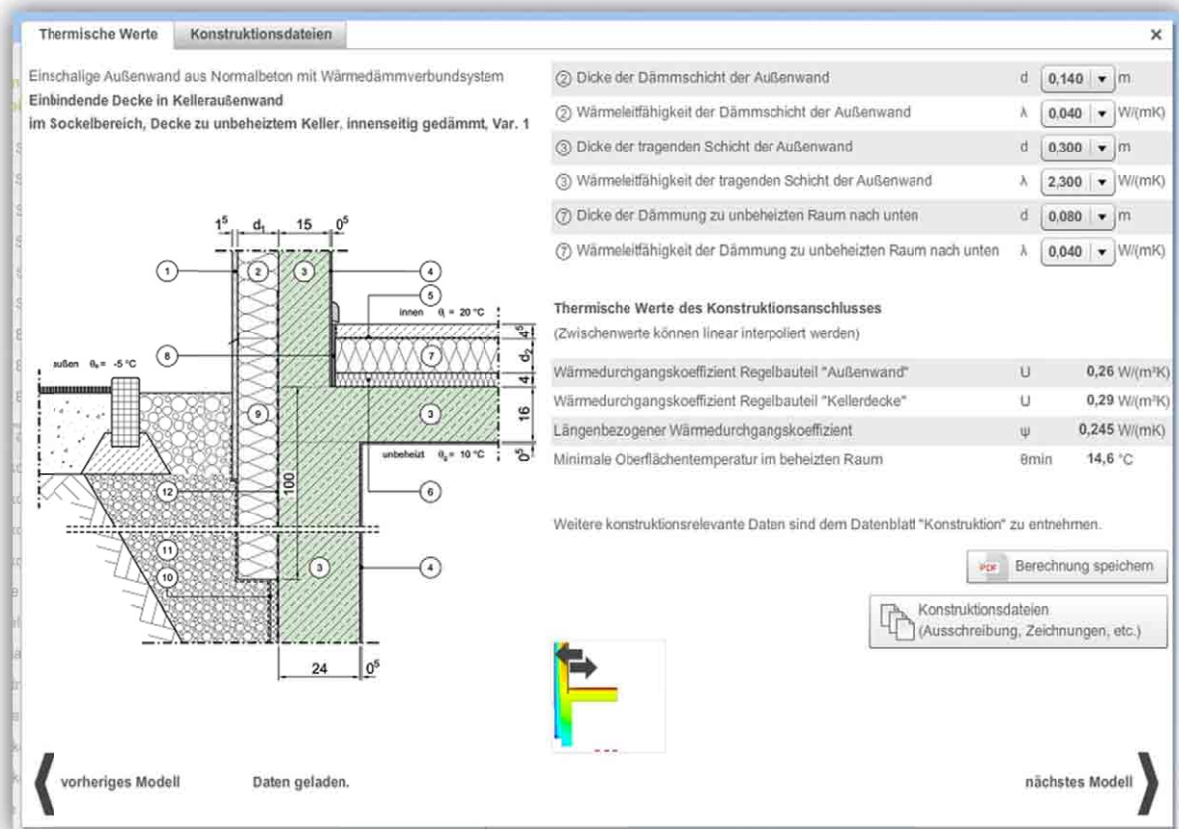
### 2.2.5 Ermittlung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten $\Psi$ anhand des Wärmebrückenkatalogs des *Planungsatlas für den Hochbau*

Mit dem Ziel, Planern eine umfangreiche Datenbank von wärmebrückentechnisch optimierten Konstruktionsanschlüssen der Massivbauweise des Wohnungs- und Nichtwohnungsbaus und den dazugehörigen thermischen Werten an die Hand zu geben, wird am Lehrstuhl für *Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung* der TU Dortmund in Zusammenarbeit mit der deutschen Zement- und Betonindustrie seit mehreren Jahren der *Planungsatlas für den Hochbau* [10] entwickelt. Diese Datenbank ermöglicht es Fachplanern und Architekten, für beliebige bauliche Maßnahmen die zu erwartenden Wärmeverluste über Konstruktionsanschlüsse während der Planungsphase genau zu ermitteln und die entsprechenden baukonstruktiven Details thermisch zu optimieren. Für dieses Werk wurden bis zu Beginn der vorliegenden Arbeit über 3.500.000 detailliert mittels FE-Methode ermittelte  $\Psi$ -Werte gemäß Kapitel 2.2.3 für insgesamt knapp 300 Konstruktionsanschlüsse berechnet <sup>7)</sup>. Für jede Wärmebrücke können abhängig von der geometrischen und materialbedingten Ausführung der thermisch relevanten Bauteilschichten  $\Psi$ -Werte mit einem äußerst geringen Zeitaufwand ermittelt werden.

In Abbildung 2-4 ist beispielhaft der Anschluss einbindende Decke in Außenwand im Sockelbereich und dessen wärmebrückenrelevante Werte aufgezeigt.

---

<sup>7)</sup> Diese Anzahl konnte in diese Arbeit übernommen werden. Zum Ende dieser Arbeit hat sich die Anzahl der Modelle und  $\Psi$ -Werte bereits mehr als verdoppelt.



**Abbildung 2-4:** Konstruktionsanschluss *Einbindende Decke in Kelleraußenwand, im Sockelbereich, Decke zu unbeheiztem Keller, innenseitig gedämmt* aus [10] mit Angabe der wärmebrückenrelevanten Werte für eine beispielhafte Konfiguration: Außenwand: 30 cm Stahlbeton und eine Außenwanddämmung mit  $d_1 = 14$  cm,  $U_{AW} = 0,26$  W/(m<sup>2</sup>·K); Decke: 4,5 cm Estrich, 4 cm Trittschalldämmung, 16 cm Beton und eine Deckendämmung mit  $d_2 = 8$  cm,  $U_{De} = 0,29$  W/(m<sup>2</sup>·K);  $\psi = 0,245$  W/(m·K)

Mittels dieses Werkes können die den Anschlüssen entsprechenden  $\psi$ -Werte und damit der zusätzliche Wärmeverlust der einzelnen Wärmebrücken ermittelt werden. Hier steht anfangs allerdings noch die Frage im Raum, welche Anschlüsse überhaupt nachzuweisen sind.

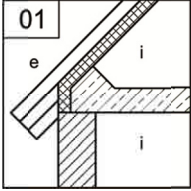
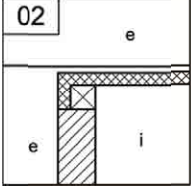
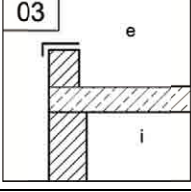
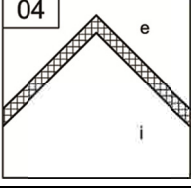
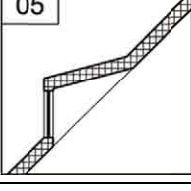
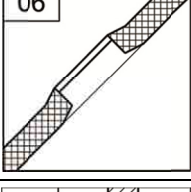
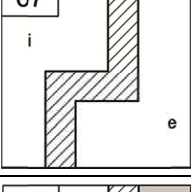
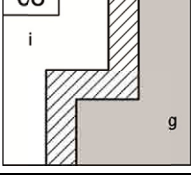
### 2.2.6 Relevante Wärmebrücken

Das Beiblatt 2 der DIN 4108 [8] enthält „Planungs- und Ausführungsbeispiele zur Verminderung von Wärmebrückenwirkungen. Das Beiblatt stellt Prinzipskizzen von Anschlussdetails aus dem Hochbau dar ... und enthält Planungs- und Ausführungsbeispiele zur Verminderung von Wärmebrückenwirkungen. ... Es berücksichtigt nicht alle bei Gebäuden auftretenden Wärmebrücken.“ Explizit nennt das Beiblatt die folgenden Anschlüsse, die dort für energetische Betrachtungen als *vernachlässigbar* eingestuft werden:

- (1) Anschlüsse, welche (teils in Kombination) in einer energetischen Bilanzierung vernachlässigbar kleine Werte erzeugen:
  - Anschluss *Außenwand/Außenwand* (Außen- und Innenecke),
  - Anschluss *Innenwand an durchlaufende Außenwand* oder obere oder untere Außenbauteile, die nicht durchstoßen werden bzw. eine durchlaufende Dämmschicht mit einer Dicke  $\geq 100$  mm bei einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,04$  W/(m · K) aufweisen,
  - Anschluss *Geschossdecke (zwischen beheizten Geschossen) an Außenwand*, bei der eine durchlaufende Dämmschicht mit  $R$  größer gleich  $2,5$  (m<sup>2</sup>·K)/W vorliegt.
- (2) Einzeln auftretende Türanschlüsse von Wohngebäuden in der wärmetauschenden Hüllfläche (Haustür, Kellerabgangstür, Kelleraußentür, Türen zum unbeheizten Dachraum).
- (3) Kleinflächige Querschnittsänderungen in der wärmetauschenden Hüllfläche z. B. durch Steckdosen und Leitungsschlitze.
- (4) Anschlüsse außenluftberührter kleinflächiger Bauteile wie z. B. Unterzüge und untere Abschlüsse von Erkern mit außen liegenden Wärmedämmschichten mit  $R \geq 2,5$  (m<sup>2</sup>·K)/W.

Eine Vernachlässigung der genannten Anschlüsse erzeugt in der Regel immer noch sichere Ergebnisse und vereinfacht die Berechnung. Die Vernachlässigung der unter (2) bis (4) genannten Anschlüsse findet auch im Zuge dieser Arbeit statt. Demgegenüber werden aber die unter (1) genannten Anschlüsse und damit auch positive Effekte auf die Wärmebilanz berücksichtigt. Unter Berücksichtigung des Beiblatts haben sich im Zuge der Entwicklung des *Planungsatlas für den Hochbau* [10] die in Tabelle 2-4 aufgeführten 31 Wärmebrücken als prüf- und ggf. nachweisrelevant herausgestellt.

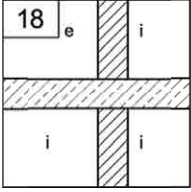
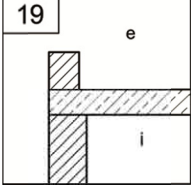
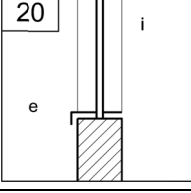
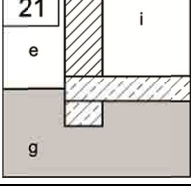
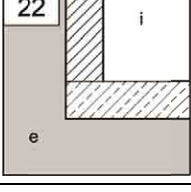
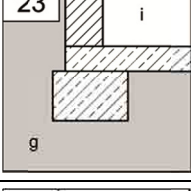
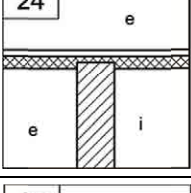
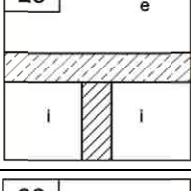
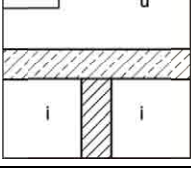
**Tabelle 2-4:** Aufstellung der 31 nachzuweisenden und in dieser Arbeit untersuchten Wärmebrücken

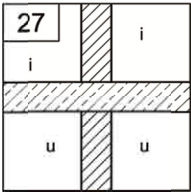
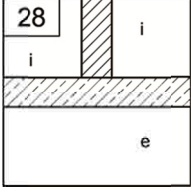
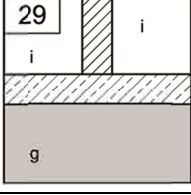
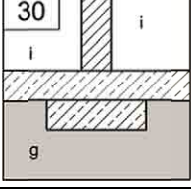
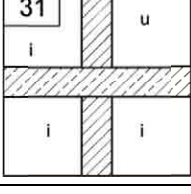
Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung	Bild
01 Traufe des geneigten Daches	
02 Ortgang des geneigten Daches	
03 Rand des Flachdaches	
04 First des geneigten und des Flachdaches	
05 Ränder von Gauben werden im Zuge dieser Arbeit wie Anschluss 20 (Randanschlüsse ohne zusätzliche thermische Einflüsse) berücksichtigt	
06 Ränder von Dachflächenfenstern werden im Zuge dieser Arbeit wie Anschluss 20 (Randanschlüsse ohne zusätzliche thermische Einflüsse) berücksichtigt	
07 Außenwandkanten an Außenluft	
08 Außenwandkanten im Erdreich	

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Bild
09	Einbindende Innenwand in Außenwand	
10	Einbindende Innenwand in Kelleraußenwand	
11	Stütze in/an Außenwand <sup>8)</sup>	(werden im Zuge dieser Arbeit nicht berücksichtigt)
12	Stützenanschlüsse und -durchdringungen (3D)	
13	Einbindende Decke in Außenwand	
14	Einbindende Decke in Kelleraußenwand	
15	Thermisch getrennte, auskragende Decke / Balkon- bzw. Trogplatte	
16	Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten – oberer Anschluss kragend	
17	Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten – oberer Anschluss aufgehende Wand	

<sup>8)</sup> Der thermische Einfluss von Stützen kann gravierend sein und bedarf einer gesonderten Betrachtung und Untersuchung.



Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung	Bild
18 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten – unterer Anschluss an aufgehende Wand	
19 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten – unterer Anschluss Brüstung	
20 Randanschlüsse ohne zusätzliche thermische Einflüsse (z.B. Fensterlaibung)	
21 Bodenplatte im Sockelbereich	
22 KG-Fundament mit Flachgründung	
23 KG-Fundament mit Streifengründung	
24 Innenwand unter geneigtem Dach gegen Außenluft	
25 Innenwand unter Flachdach gegen Außenluft	
26 Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach oben	

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Bild
27	Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach unten	
28	Innenwand auf Decke zu Außenluft nach unten	
29	Innenwand auf Bodenplatte mit Flachgründung	
30	Innenwand auf Bodenplatte mit Streifengründung	
31	Innenwand zu unbeheiztem Raum	

Diese 31 Anschlüsse müssen teilweise aber noch weiter thermisch-konstruktiv unterschieden werden. Ein Beispiel soll dabei die Nr. 01 *Traufe des geneigten Daches* sein. Dieser Anschluss kann noch weiter unterschieden werden in die

- Traufe des geneigten Daches zu *beheiztem* Dachraum
- Traufe des geneigten Daches zu *unbeheiztem* Dachraum.

Die weitere Unterscheidung wird im Folgenden mit einer Dezimalstelle in der Nummerierung dargestellt (hier z.B. „1.1“ und „1.2“).

Ermittelt man nun für alle relevanten Wärmebrücken deren zusätzliche Wärmeverluste, so lässt sich der kumulierte Effekt in einem *äquivalenten* Pauschalzuschlag  $\Delta U_{WB}$  zusammenfassen.

### 2.2.7 Ableitung eines äquivalenten Pauschalzuschlags $\Delta U_{WB}$ zur Berücksichtigung detaillierter Wärmebrückenverluste

Bildet man für jede Wärmebrücke das Produkt aus deren Länge und  $\Psi$ -Wert, so erhält man den zusätzlichen Wärmebrückenverlust nach Gl. 2-3. Aus dieser Summe ist der äquivalente  $\Delta U_{WB}$ -Wert nach Gl. 2-4 abzuleiten. Zur Veranschaulichung dieses Zusammenhangs und später folgender Vergleiche sei nun ein ausgewähltes Beispiel vorgestellt.

#### Das Beispielgebäude

Bei dem in Abbildung 2-5 dargestellten Beispielgebäude handelt es sich um ein zweigeschossiges Einfamilienhaus mit vollständig beheiztem Kellergeschoss. Es besitzt ein massives Satteldach mit 25 cm Dämmdicke, 20 cm dicke Außenwände aus Leichtbeton und 30 cm dicke Kelleraußenwände aus Normalbeton, eine 14 cm dicke Dämmung der Außenwand und eine 10 cm dicke Dämmung der Kelleraußenwände sowie eine mit 5 cm perimetergedämmte Bodenplatte. Das Gebäude dient auch im Kapitel 5 zur Validierung der neuen Berechnungs-Programme (Haus 4).



**Abbildung 2-5:** 3D-Ansichten des Beispielgebäudes (eine ausführliche Beschreibung ist in 9.4 hinterlegt)

Im Zuge einer detaillierten Wärmebrückenuntersuchung sind für diese Gebäude insgesamt 17 Wärmebrücken zu berücksichtigen (in der detaillierten Gebäude-dokumentation in Kapitel 9.4 sind diese auch teilweise farblich markiert). Die  $\Psi$ -Werte, die dazugehörigen Längen  $l$  und die resultierenden Transmissionswärmeverluste sind in Tabelle 2-5 aufgestellt.

**Tabelle 2-5:** Aufstellung der mittels einer detaillierten Handrechnung berechneten zusätzlichen Verluste aus Wärmebrücken für das Beispielgebäude

	Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung	Bild	$\Psi$ in W/m·K	$l_{WB}$ in m	$\Psi \cdot l_{WB}$ in W/K
	1.1 Traufe des geneigten Daches zu beheiztem Dachraum		<b>-0,040</b>	<b>19,52</b>	<b>-0,78</b>
	2 Ortgang des geneigten Daches		<b>0,111</b>	<b>11,60</b>	<b>1,29</b>
	4 First des geneigten Daches		<b>-0,060</b>	<b>11,38</b>	<b>-0,68</b>
	7.1 Außenecke an Außenluft		<b>-0,076</b>	<b>16,04</b>	<b>-1,22</b>

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Bild	$\psi$ in $\text{W/m}\cdot\text{K}$	$l_{\text{WB}}$ in m	$\psi \cdot l_{\text{WB}}$ in $\text{W/K}$
8.1	Außenecke an Erdreich		<b>-0,045</b>	<b>12,20</b>	<b>-0,55</b>
9.1	Einbindende Innenwand in Außenwand		<b>0,000</b>	<b>22,00</b>	<b>0,00</b>
10.1	Einbindende Innenwand in Kelleraußenwand		<b>0,001</b>	<b>12,20</b>	<b>0,01</b>
13.1	Einbindende Decke in Außenwand		<b>0,001</b>	<b>34,12</b>	<b>0,03</b>
13.2	Einbindende Decke in Außenwand, Fenster ohne Rollladenkasten		<b>0,033</b>	<b>2,40</b>	<b>0,08</b>

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Bild	$\Psi$ in W/m·K	$l_{WB}$ in m	$\Psi \cdot l_{WB}$ in W/K
13.3	Einbindende Decke in Außenwand, Fenster mit Rollladenkasten		0,185	24,61	4,55
14.1	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller		0,002	20,38	0,04
14.2	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller, mit Tür		-0,058	28,15	-1,63
20.1	Fensterbrüstung		0,034	9,00	0,31
20.2	Fenster- oder Türleibung		0,032	85,72	2,74

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Bild	$\psi$ in W/m·K	$l_{WB}$ in m	$\psi \cdot l_{WB}$ in W/K
22	KG-Fundament mit Flachgründung		0,006	41,00	0,25
24	Innenwand unter geneigtem Dach gegen Außenluft		0,050	5,80	0,29
29	Innenwand auf Bodenplatte mit Flachgründung		0,067	15,22	1,02

$$H_{WB} = 5,75$$

Der aus der detaillierten Berechnung resultierende  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag gemäß Gl. 2-4 ergibt sich für dieses Beispiel wie folgt:

$$\Delta U_{WB} = \frac{\sum_k \psi_k \cdot l_k}{\sum_m A_m} = \frac{5,75}{566,8} = 0,010 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$$

Anhand dieses Beispiels ist bereits der große Vorteil einer detaillierten Berechnung ersichtlich. Anstatt eines Pauschalzuschlags von  $0,05 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  oder gar  $0,10 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  kann hier der Wärmeschutznachweis mit einem deutlich geringeren Wert durchgeführt werden, was zu den folgenden positiven Effekten führt:

- Der Transmissionswärmeverlust der Hüllfläche wird nicht mittels pauschaler Werte überschätzt und ist somit exakter gegenüber dem realen Verlust,
- die anhand des Transmissionswärmeverlusts auszulegende Heizungsanlage kann effizienter geplant werden und
- Nachweisziele des Wärmeschutznachweises sind ohne weitere Anpassungen der Dämmhülle (z. B. die Vergrößerung der Dämmdicken) erreichbar.

Nun besteht theoretisch die Möglichkeit, einzelne Wärmebrücken (hier z. B. die Wärmebrücken 1 und 12) weiter zu optimieren und den  $\Delta U_{\text{WB}}$ -Zuschlag sogar auf Null zu reduzieren.

Demgegenüber steht aber ein erhöhter Arbeitsaufwand seitens des Nachweisführenden. In dieser Arbeit sollen nun zwei Verfahren entwickelt werden, die die Ermittlung des auf der Grundlage einer *detaillierten Wärmebrückenberechnung* ermittelten  $\Delta U_{\text{WB}}$ -Zuschlags in wenigen Minuten ermöglicht. Dies wird in den Kapiteln 3 bis 5 erläutert.



### 3 PROGRAMM 1. GENAUIGKEIT

#### 3.1 Entwicklung und Darstellung der mathematischen Zusammenhänge des Programms 1. Genauigkeit

##### 3.1.1 Allgemeines

Für die Erstellung einer Datenbank von approximierten Wärmebrückenzuschlägen, die eine ökonomische, auf der sicheren Seite liegende und äußerst schnelle Ermittlung der Wärmebrückenverluste nach dem detaillierten Verfahren erlaubt, ist die Entwicklung eines geeigneten Berechnungs-Programms erforderlich. Dieses soll vollkommen automatisiert den Transmissionswärmeverlust gemäß Gl. 2-2 inklusive der detailliert ermittelten Wärmebrückenverluste gemäß Gl. 2-3 berechnen können. Zwar standen zum Zeitpunkt der Arbeit diverse Bilanzierungsprogramme zur Ermittlung des Transmissionswärmeverlustes zur Verfügung, doch erlaubten diese

- weder die automatisierte Berechnung einer großen Anzahl unterschiedlicher Gebäude,
- noch ließen diese eine automatisierte Berechnung der detailliert ermittelten Wärmebrückenverluste nach Kapitel 2.2.2 (4) zu.

Aus diesem Grunde wurde als einer der zentralen Inhalte dieser Arbeit ein EDV-Programm entwickelt, das diese Funktionen beinhaltet. Es folgt eine Beschreibung der Ansätze und umgesetzten Algorithmen sowohl hinsichtlich allgemeiner geometrischer Größen, gewählter Variablen und fester Standardwerte als auch eine detaillierte Darstellung der Berechnung der Wärmeverluste der Regelbauteile und der Wärmebrücken. Eine Validierung des Programms erfolgt in Kapitel 5.2.

Für einen besseren Lesefluss sind die dem Berechnungs-Programm zugrundeliegenden mathematischen Zusammenhänge in Kapitel 9 ausgegliedert worden, die dorthin verwiesenen Formeln sind somit mit „Gl. 9-X“ gekennzeichnet.

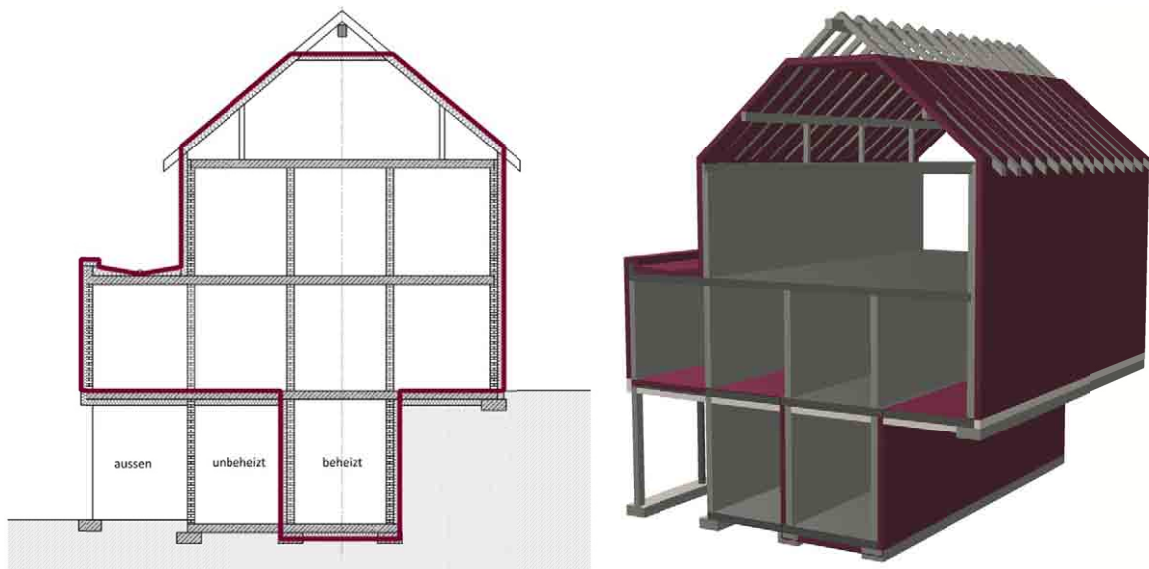
Im Folgenden wird das Programm auch mit **autoHw** (**automatisierte  $H_T$ -Berechnung inklusive detaillierter Wärmebrückenermittlung**) benannt.

### 3.1.2 Allgemeine geometrische Ansätze

#### Maßbezug der wärmeübertragenden Hüllfläche

Im Falle außenluftberührter Bauteile wird stets das Außenmaß als Bezugsgröße zur Berechnung verwendet. Gemäß DIN EN ISO 13789 [6] respektive DIN EN ISO 13370 [14] wird die Lage der Systemgrenze für erdberührte Bauteile bzw. den unteren Gebäudeabschluss, wie in Abbildung 3-1 verdeutlicht, wie folgt abgeleitet:

- Bei nicht unterkellerten Gebäuden – also bei Bodenplatten auf Erdreich – und unterkellerten Gebäuden mit unbeheizten Kellergeschossen sowie bei Decken die nach unten gegen Außenluft abschließen, liegt die Systemgrenze in Höhe der raumseitigen Bodenplattenoberfläche (OK Rohdecke).
- Bei unterkellerten Gebäuden mit beheizten Kellergeschossen liegt die Systemgrenze außenmaßbezogen – also z.B. außerhalb einer Perimeterdämmung und unterhalb der Bodenplatte.



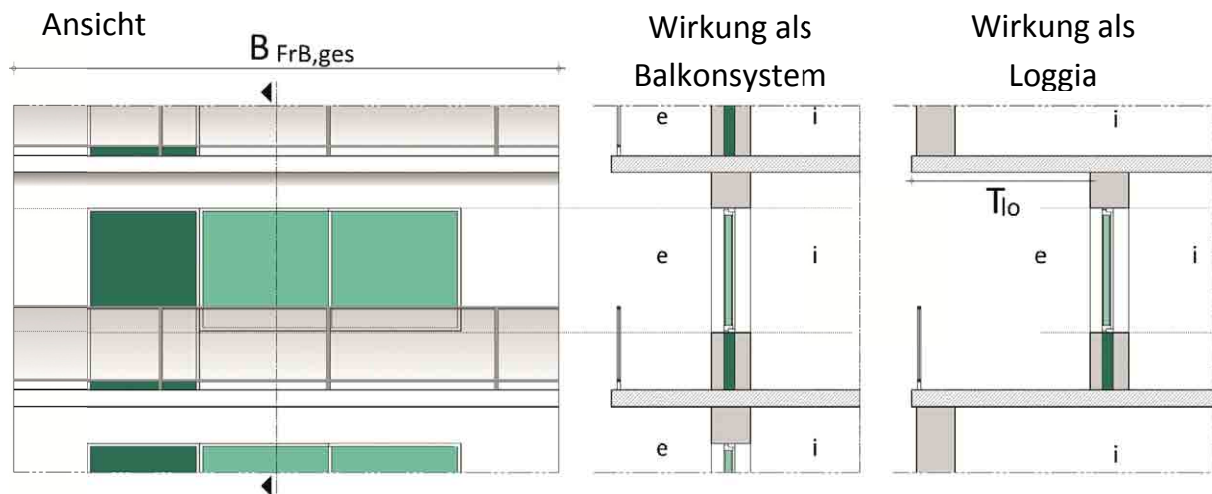
**Abbildung 3-1:** Lage der Systemgrenzen beim Nachweis nach EnEV

### „Freibereiche“ wie Balkone oder Loggien

Wie Abbildung 3-2 darstellt muss die thermische Wirkung von auskragenden thermisch getrennten Deckenplatten differenziert betrachtet werden. Das Programm erlaubt die Unterscheidung zwischen *Balkonsystemen* und in einem Geschoss eingerückte *Loggien*.

Bei der Wirkung als *Loggia* müssen die unter- und oberseitigen Flächen zur Außenluft als Regelbauteil angesetzt werden. Die oberseitigen Deckenflächen werden gemäß Abbildung 3-2 den *Decken nach unten gegen Außenluft* und die unterseitigen Deckenflächen dem *Flachdach zu Außenluft* zugeordnet.

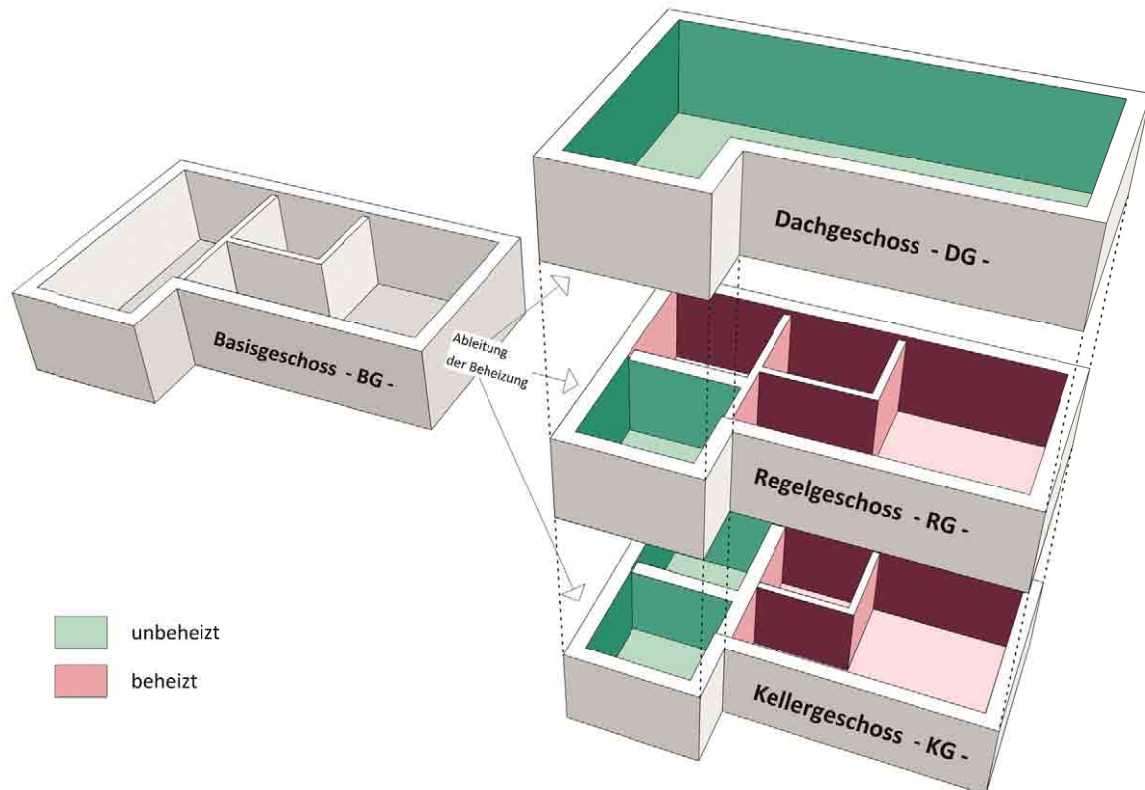
Des Weiteren wird ein Balkonsystem erst ab zwei und ein Loggien-System erst ab drei Geschossen aktiviert. Es wird stets nur *ein* System angesetzt.



**Abbildung 3-2:** Darstellung des geometrischen Ansatzes von Balkonen und Loggien

### BASIS-Geschoss / Dach-, Regel- und Kellergeschosse

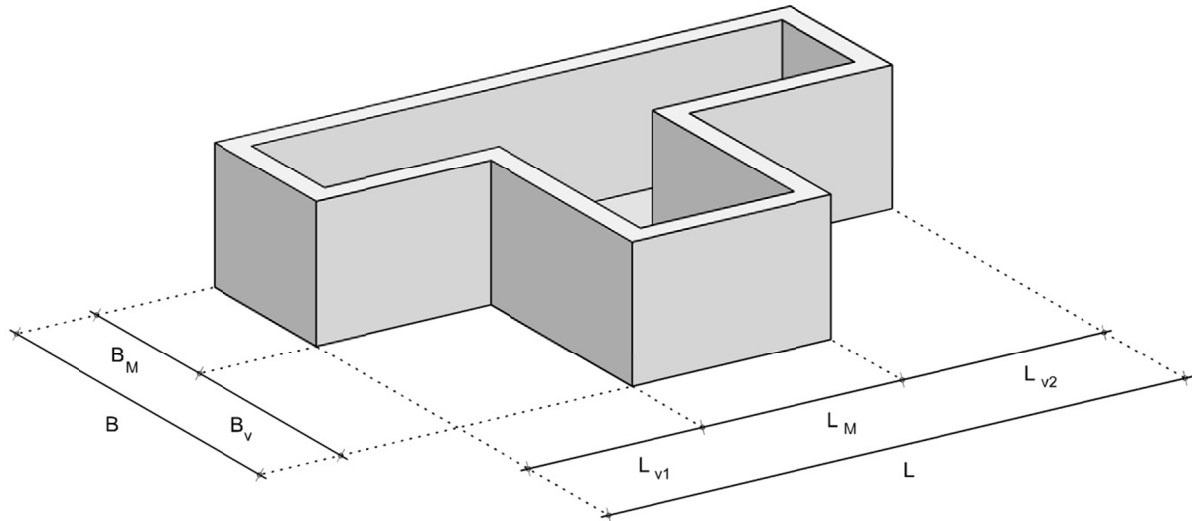
Die Geschosse des Gebäudes werden in drei Nutzungstypen unterteilt. Dies sind das *Dach-*, das *Regel-* und das *Kellergeschoss*. Für diese drei Typen kann jeweils eine individuelle Nutzung respektive Beheizung angesetzt werden. Für die spätere differenzierte Berechnung der einzelnen Geschosse wird anfangs jedoch ein *BASIS-Geschoss* definiert, aus dem alle Geschosse abgeleitet werden. Rechnerisch weisen damit zwar alle Geschosse den gleichen Grundriss auf, das Programm lässt aber die Eingabe einer unterschiedlichen Beheizung zu.



**Abbildung 3-3:** Darstellung der drei zugrunde gelegten Geschosstypen *Dach-*, *Regel-* und *Kellergeschoss*, die zwar stets geometrisch dem BASIS-Geschoss entsprechen, aber bezüglich deren Beheizung individuell konfiguriert werden können

### Gebäude-Grundform

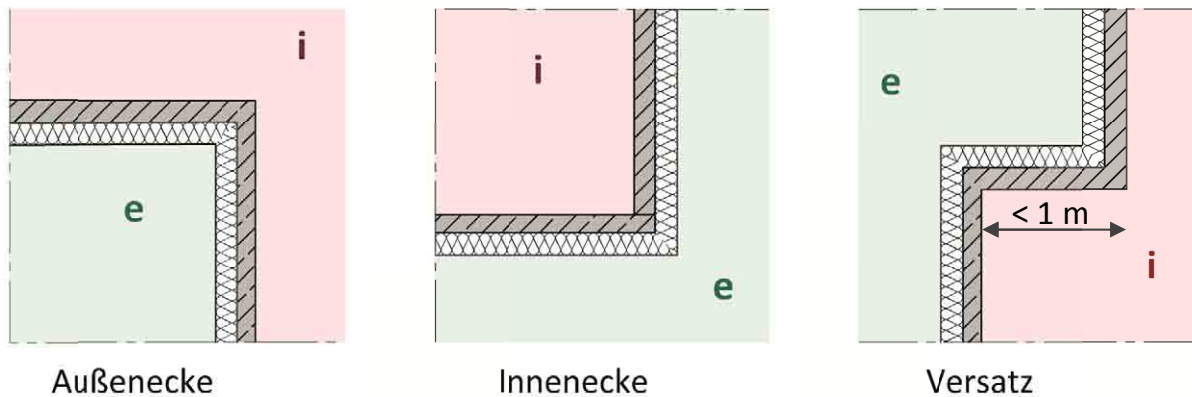
Mit dem in Abbildung 3-4 dargestellten variablen Grundriss können anhand von fünf Variablen drei Grundrisstypen abgebildet werden. Der Rechteck-, der L- und der T-Grundriss. Vgl. hierzu Gl. 9-1 bis Gl. 9-3.



**Abbildung 3-4:** Darstellung des variablen Grundrisses des BASIS-Geschosses

### Innen- und Außenecken sowie Versätze

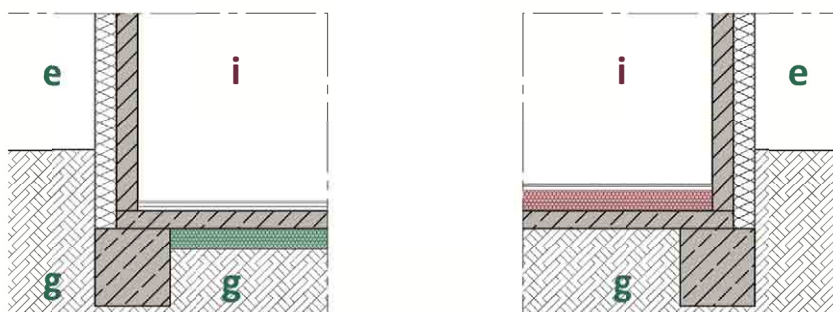
Aufgrund der unterschiedlichen Wärmebrückenwirkung sind Innen- und Außenecken zu unterscheiden. Deren Gesamtlänge wird anhand deren Höhe und Anzahl ermittelt. Wenn eine Außen- und Innenecke weniger als ein Meter voneinander entfernt sind, wirken diese eher als *Versatz* und stellen eine dritte Art der Gebäudeecke dar. Das Programm ermittelt die in Abbildung 3-5 dargestellten Wärmebrücken anhand einer vom Gebäudegrundriss abhängigen Fallunterscheidung automatisch. Vgl. hierzu Gl. 9-4 bis Gl. 9-7.



**Abbildung 3-5:** Darstellung der wärmebrückentechnisch unterschiedlich wirkenden Eckausbildung, von links nach rechts: Innenecke, Außenecke und Versatz

### Deckensysteme

Es wird stets eine 16 cm dicke Rohdecke angesetzt. Auf Basis des Außenmaßbezuges ist am unteren Gebäudeabschluss des Weiteren eine Angabe der wirksamen Lage der jeweiligen Dämmschicht gemäß Abbildung 3-6 notwendig, was im Programm berücksichtigt wird.



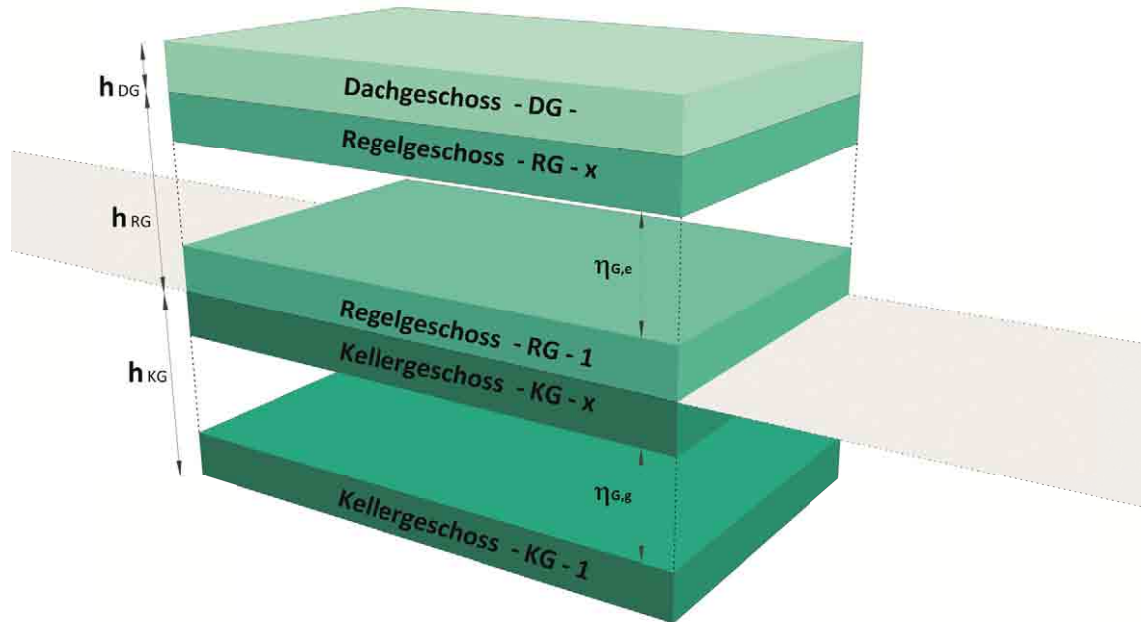
Dämmung "außen" liegend

Dämmung "innen" liegend

**Abbildung 3-6:** Unterscheidung der thermischen Wirkung der Dämmlage zwischen *Innen* und *Außen* am unteren Gebäudeabschluss

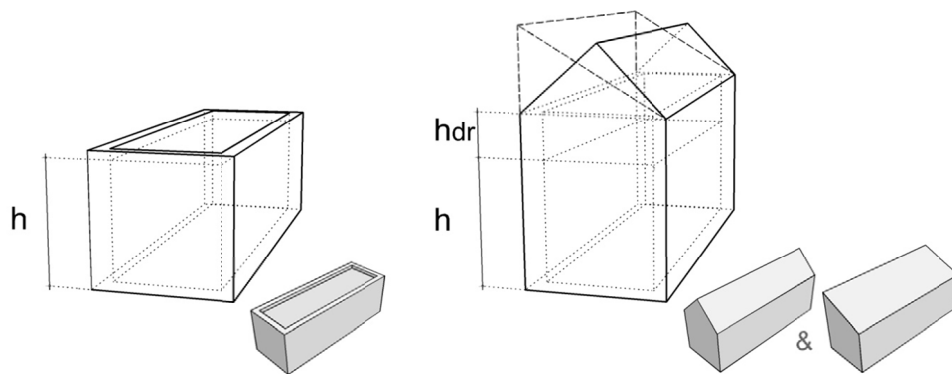
### Außenwand- bzw. Geschosshöhen (vertikale Längen)

Die gesamte Außenwandhöhe setzt sich aus dem Höhenanteil der (des) Keller-  
 geschosse(s)  $h_{AW,KG}$ , der Regelgeschosse  $h_{AW,RG}$  und des Dachgeschosses  $h_{AW,DG}$  gemäß  
 Abbildung 3-7 zusammen. Vgl. hierzu Gl. 9-8.



**Abbildung 3-7:** Ermittlung der Außenwand- bzw. Geschosshöhen

Bei Anordnung eines Schrägdachsystems (Sattel- oder Pultdach) wird die Außenwandfläche um die Höhe des Drenpels <sup>9)</sup> mit variabler Höhe  $h_{Dr}$  gemäß Abbildung 3-8 erweitert. Bei Flachdächern wird die Außenwandfläche stets bis zur Oberkante der Dachdämmung des Flachdaches (nicht der Attika) berechnet.



**Abbildung 3-8:** Zugrunde gelegte Höhenanteile für die drei Dachformen Flachdach, Steil- und Satteldach

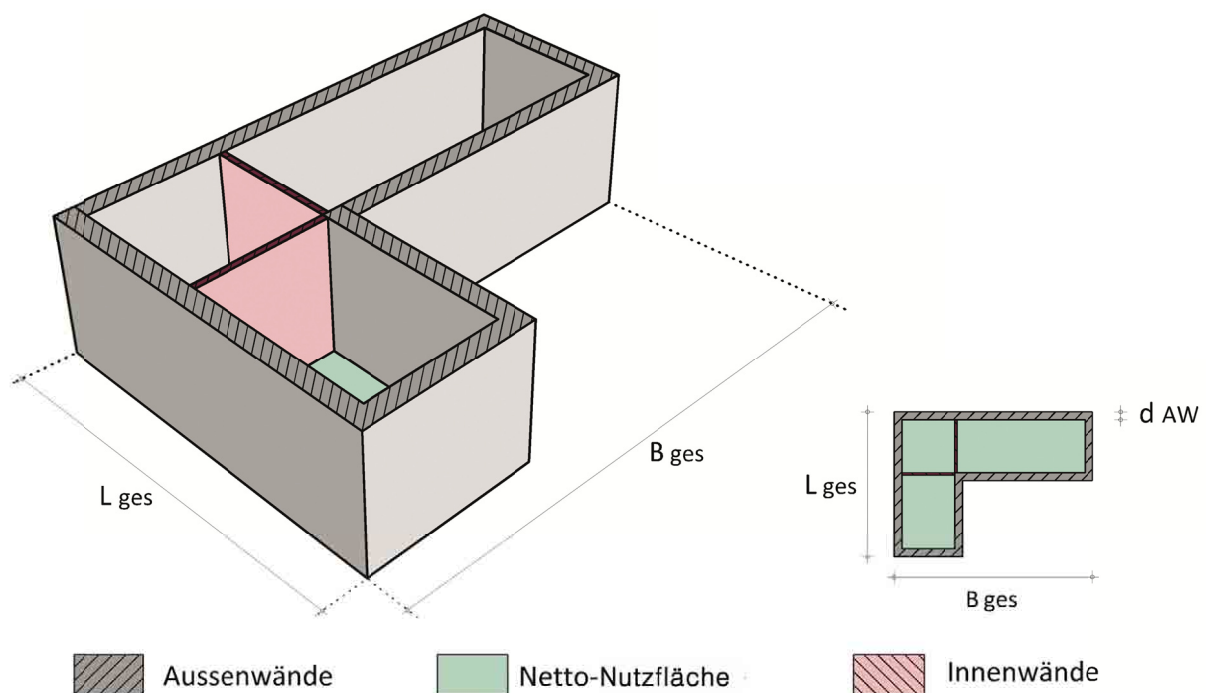
<sup>9)</sup> Ein Drenpel ist ein im Dachgeschoss über den Fußboden hinausragender Teil der Außenmauern bis zum Dachansatz.

### Perimeterumfang des BASIS-Geschosses

Der Perimeterumfang des BASIS-Geschosses entspricht stets dem außenmaßbezogenen Umfang der Grundfläche des Gebäudes. Vorausgesetzt wird dabei, dass jedes Gebäude eine umlaufend homogene Außenwandkonstruktion besitzt. Vgl. hierzu Gl. 9-9.

### Konstruktionsflächen und Innenwandlängen (horizontale Längen)

Es wird ein pauschaler Anteil  $\eta_{\text{Kon}}$  an der Bruttofläche des BASIS-Geschosses gemäß Abbildung 3-9 als *Konstruktionsfläche der Außen- und Innenwände*  $A_{\text{Kon,BG}}$  definiert. Zieht man diese Flächen von der Bruttofläche ab, so ergibt sich die Nettofläche des BASIS-Geschosses  $A_{\text{Netto,BG}}$ . Vgl. hierzu Gl. 9-10 bis Gl. 9-12.



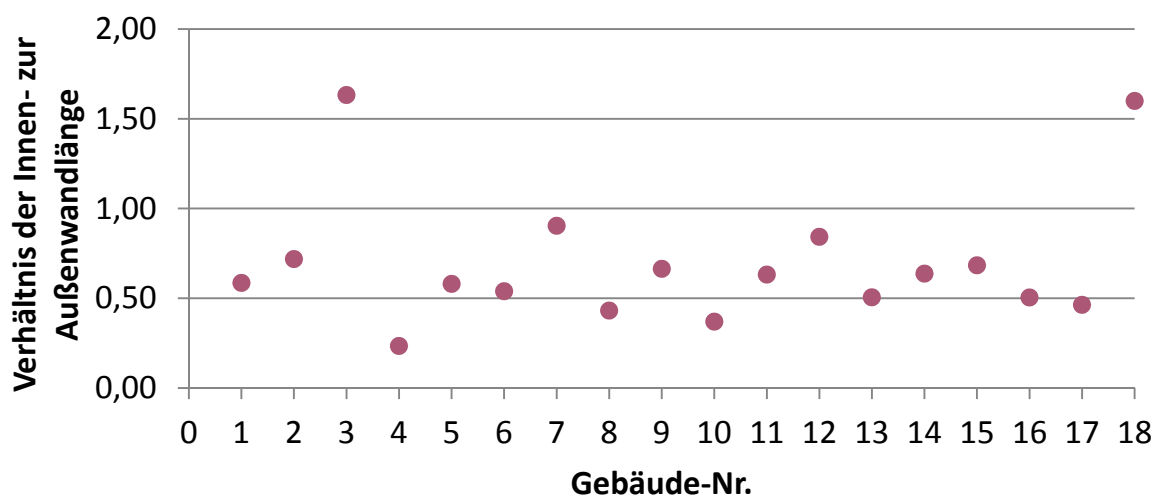
**Abbildung 3-9:** Visualisierung der Flächenanteile der Innen- und Außenwände und der Nettofläche (Nutzfläche)

Die Längen der Außenwände  $\ell_{\text{AW,BG}}$  ergeben sich stets äquivalent zum Perimeter  $P_{\text{BG}}$ , allerdings auf die Mittelachse der Außenwand bezogen.

Für die Ermittlung der zusätzlichen Wärmeverluste aus Innenwandanschlüssen zu unbeheizten Bereichen zur Außenluft, zum unbeheizten Raum oder zum Erdreich muss die Länge der Innenwände bekannt sein. Sind die Dicke der Außen- und Innenwände und die Länge der Außenwände bekannt, so kann die Länge der Innenwände aus der absoluten Konstruktionsfläche abgeleitet werden.



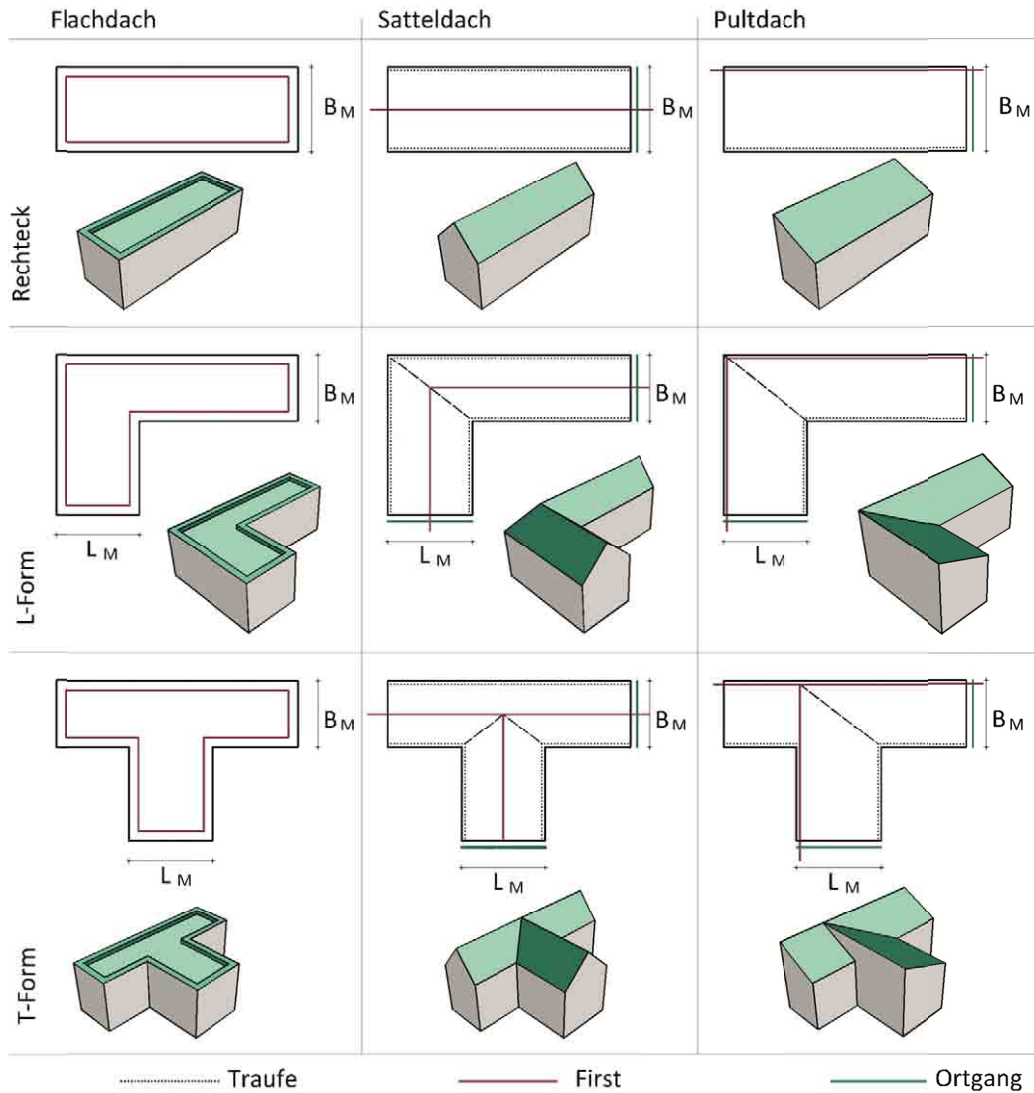
Für Gebäude mit einem sehr kleinen A/V-Verhältnis muss bei diesem Ansatz allerdings noch eine Deckelung vorgenommen werden, da sich für derartige Gebäude stets sehr hohe Innenwandlängen ergeben. Geht man davon aus, dass sowohl für Neubauten als auch für sanierte Bestandsbauten dem Trend zu größeren Räumen und damit geringeren Innenwandlängen entsprochen wird (bei Bestandsgebäuden entspräche dies einer Entkernung), wird dies rechnerisch anhand eines von der Außenwandlänge abhängigen Maximums für die Innenwandlänge berücksichtigt. Im Zuge der Validierungsberechnungen nach Kapitel 5 wurde nach diesem Verhältnis gesucht. Es ergeben sich die Werte nach Abbildung 3-10. Für die weitere Betrachtung wird das 1,6-fache der Außenwände als Maximum für die Länge der Innenwände angesetzt.



**Abbildung 3-10:** Verhältnis der Innenwandlänge zur Außenwandlänge für 18 ausgewählte Gebäude

### Geometrische Stützwerte des Daches


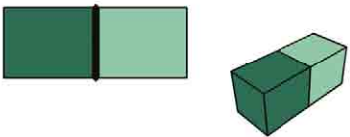
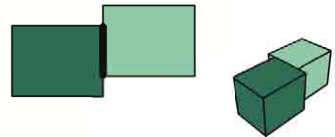

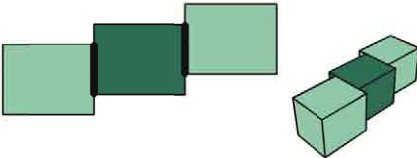
Das Programm kann die drei verbreitetsten Dachformen – das Flachdach, das Satteldach und das Pultdach – berücksichtigen. Zur Berechnung der jeweiligen Dachflächen sind die in Abbildung 3-8 dargestellten Ausrichtungen bezüglich der drei Grundriss-Formen zugrunde gelegt. Vgl. hierzu Gl. 9-13 bis Gl. 9-15.



**Abbildung 3-11:** Darstellung der den drei Grundrisstypen zugeordneten Dachformen

### Exposition zu Nachbargebäuden / Auswirkung von Gebäudeversätzen

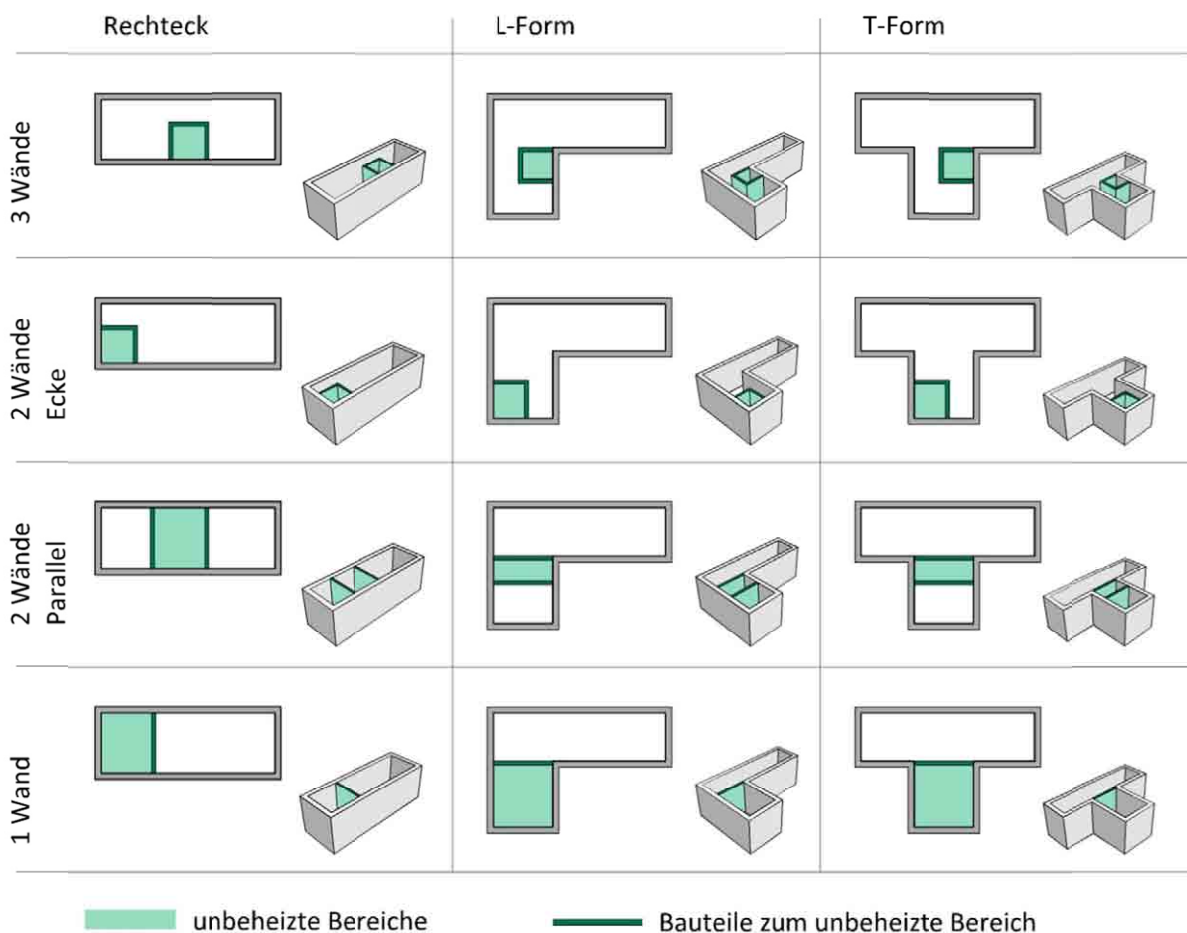
Zur Berücksichtigung der Lage des Gebäudes zu anderen beheizten Gebäuden (z. B. zur Simulation von freistehenden Häusern, Reihenmittel- oder Reihenendhäusern) ermöglicht das Programm anhand eines prozentualen Anteils am Perimeter  $\gamma_{Exp}$  die Eingabe eines thermisch neutralen Randes. Rechnerisch wird so berücksichtigt, dass in diesem Abschnitt der Gebäudehülle kein Wärmeaustausch stattfindet. Auch ein möglicher Gebäudeversatz soll dabei gemäß Abbildung 3-12 berücksichtigt werden können. Vgl. hierzu Gl. 9-16.

	Ohne Versatz	Mit Versatz
Freistehend		
Einseitig angebaut		
Zweiseitig angebaut		

**Abbildung 3-12:** Beispiele für verschiedene Arten der Gebäudeexposition zu anderen beheizten Gebäuden, schwarz gegenzeichnet: thermisch neutraler Bereich ohne Wärmeaustausch

### Unbeheizte Räume

Zur Berücksichtigung von unbeheizten Räumen (Treppenhaus, Abstellraum, Garage, etc.) werden diese anhand des prozentualen Anteils an der Brutto-Geschoss-Fläche angesetzt. Dies wird für das Dach-, Regel- und Kellergeschoss getrennt vorgenommen da der Anteil der unbeheizten Räume im Keller größer sein kann als der der Regelgeschosse. Es wird stets nur *ein* zusammenhängender unbeheizter Bereich mit Kontakt nach Außen angesetzt. Zur Beschreibung dessen thermischer Wirkung wird die Anzahl der an das beheizte Volumen grenzenden Wände abgefragt (vgl. Abbildung 3-13). Die daraus abgeleiteten Längen der *Innenwände zu unbeheizten Räumen* stellen allerdings auf der sicheren Seite liegende Näherungslösungen dar. Vgl. hierzu Gl. 9-17 bis Gl. 9-22.



**Abbildung 3-13:** Darstellung der den drei Grundrisstypen zugeordneten möglichen Lagen unbeheizter Bereiche (Räume) und deren seitlich trennender Bauteile

Mittels dieses Ansatzes können die horizontalen Längen der Innen- und Außenwände, die an unbeheizte Räume grenzen und somit teilweise oder ganz aus der energetischen Bilanz fallen, ermittelt werden.

## Das beheizte Gebäudevolumen

Das beheizte Gebäudevolumen  $V_e$  ist das Volumen, das von der ermittelten wärmeübertragenden Umfassungsfläche  $A$  umschlossen wird. Vgl. hierzu Gl. 9-23 bis Gl. 9-25.

## Fenster und Türen

Die Fläche der transparenten Bauteile  $A_{BT,trans,BG}$  wird im Programm abhängig von der Netto-Geschossfläche gemäß Gl. A-27 ermittelt, wobei stets gilt  $f_{trans,BG} \geq 1/8$ , da nach § 47 (2) der Musterbauordnung (MBO) festgelegt ist, dass Aufenthaltsräume eine Mindest-Fensterfläche von  $1/8$  der Netto-Grundfläche des Raumes haben müssen. Allerdings kann diese Fläche nie größer werden als die Außenwandfläche, was ebenfalls für flache Gebäude im Programm berücksichtigt wird. Darüber hinaus ist  $f_{trans,BG}$  abhängig vom Fensterflächenanteil  $f_{Fen,EnEV}$  gemäß EnEV, der im Zuge der Untersuchung eine Variable darstellt. Vgl. hierzu Gl. 9-26 bis Gl. 9-40.

Für eine eindeutige geometrische und thermische Zuordnung ist es notwendig, die Tür- und Fensterflächen in verschiedene Gruppen zu unterteilen.

1. Es ist zwischen *über dem Erdniveau liegenden Fenstern* und *Kellerfenstern* zu unterscheiden, da die Auswirkung auf die jeweiligen Regelflächen unterscheidbar sein muss. Zur Vereinfachung werden dabei allerdings *keine* Kellertüren angesetzt.
2. Für die zu berücksichtigenden linearen Wärmebrückenverluste entlang der Fenster- und Türrahmen ist, ausgehend von der Fensterfläche pro Geschoss, eine Unterscheidung zwischen *Fenstern* und *Türen* (bzw. *raumhohen Fenstern*) zu treffen. Aufgrund der thermisch unterschiedlichen Wirkung müssen diese Längen ferner in *Tür- und Fensteranschlüsse* unterteilt werden.
3. Alle Längen und Flächen der Türen und Fenster sind in den Regelgeschossen ferner in *Freibereiche* (Balkone oder Loggien) und *Sonstige* zu unterteilen. Ist ein *Freibereich* vorhanden, werden stets 70% der Breite des Freibereiches mit Fenstern angesetzt.

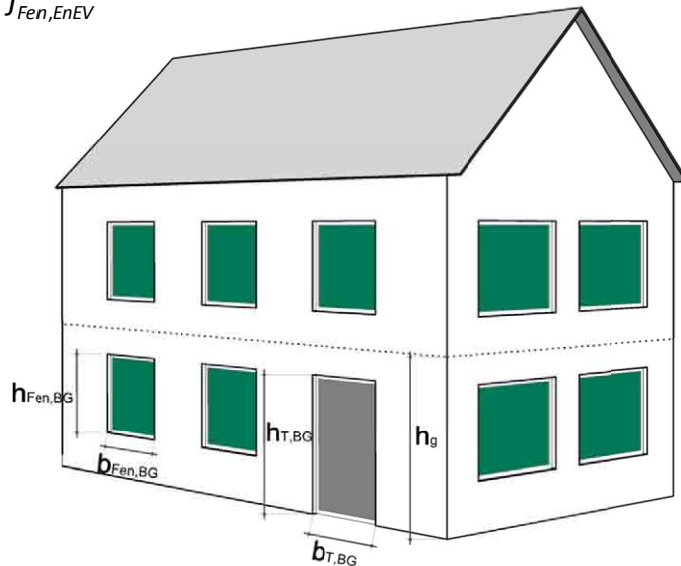
Um eine automatische Berechnung der Fenster- und Türflächen *und* der Laibungs-, Sturz- und Brüstungslängen zu ermöglichen, werden die folgenden meist überhöhten Ansätze für Fenster und Türen getroffen:

$$h_{Fen,BG} \geq h_G \cdot 0,6 \Rightarrow \text{abhängig von } f_{Fen,EnEV}$$

$$b_{Fen,BG} \geq 1,00m \Rightarrow \text{abhängig von } f_{Fen,EnEV}$$

$$h_{Tür,BG} = 2,15m$$

$$b_{Tür,BG} = 1,15m$$



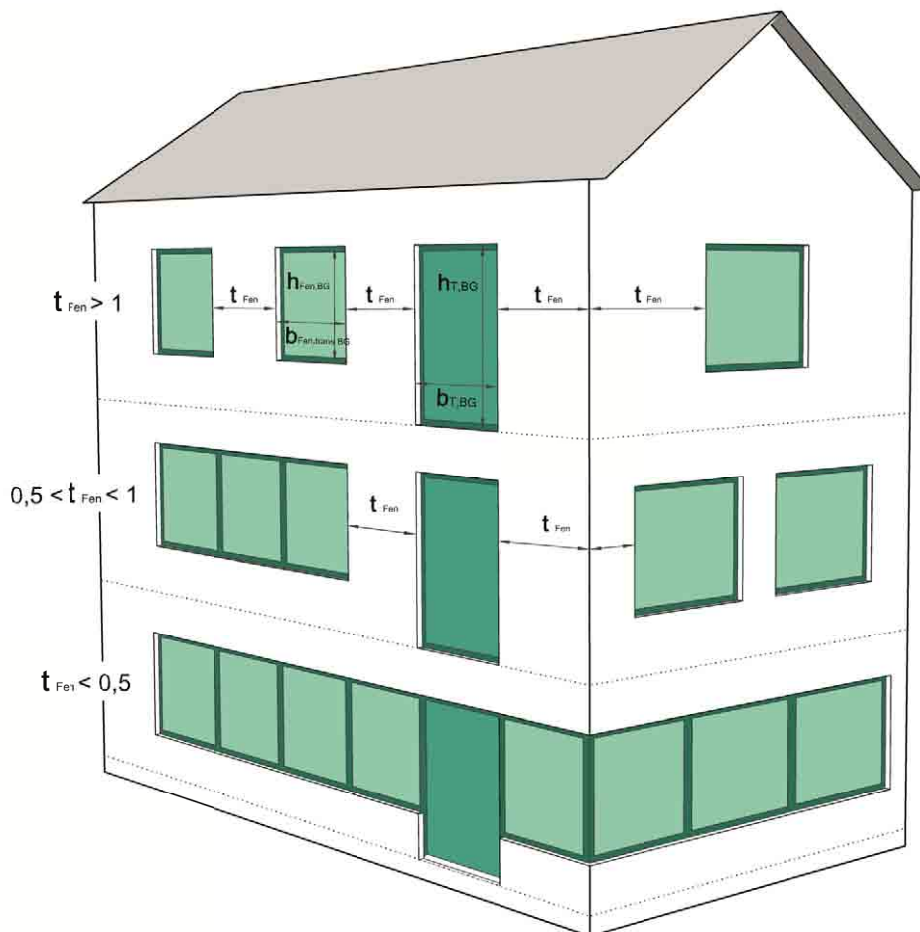
**Abbildung 3-14:** Visualisierung der geometrischen Ansätze für Fenster und Türen

Daraus abgeleitet ergeben sich die Gesamtlängen der Stürze, Laibungen und Brüstungen für das Gesamtgebäude, die stets eine Überschätzung der Längen erzeugen. Die Längen werden auf Grundlage der *Gesamtfensterfläche* und dem *durchschnittlichen Seitenverhältnis der Fenster* ermittelt. Dabei muss allerdings noch eine wichtige Einschränkung berücksichtigt werden. Bei Gebäuden mit einem hohen Glasanteil (etwa ab einem Fensterflächenanteil nach EnEV von über 60%) liegen die Fenster sehr nah beieinander, was thermisch damit gleichzusetzen ist, dass sich die Fenster eine Sprosse teilen. Dies wiederum bedeutet, dass bei ansonsten gleicher Fensterfläche deutlich weniger Laibungen bezüglich ihrer Wärmebrückenwirkung zu berücksichtigen sind, da Sprossen zwischen zwei Fenster im U-Wert, nicht aber im Zuge der Wärmebrückenberechnung zu berücksichtigen sind.

Für die Laibungslängen muss also eine mathematische Unterscheidung abhängig vom durchschnittlichen Abstand der Fenster zueinander erfolgen. Diese Berücksichtigung erfolgt gemäß Abbildung 3-15 wie folgt:

Legt man die durchschnittliche Breite eines Fensterrahmens zwischen 7 und 8 cm zugrunde (moderne automatisiert gefertigte Fenster besitzen meistens einen deutlich dickeren Rahmen), so wäre ein durchschnittlicher Abstand  $t_{\text{Fen/Tür}}$  unter 15 cm gleichbedeutend mit einem umlaufenden Fensterband. Die Laibungslängen werden also wie folgt angesetzt:

- Für  $t_{\text{Fen/Tür}} > 1$  m werden bei jedem Fenster *beide* Laibungen angesetzt,
- für  $0,15 \text{ m} < t_{\text{Fen/Tür}} \leq 1$  m wird für jedes Fenster nur *eine* Laibung angesetzt und
- für  $t_{\text{Fen/Tür}} \leq 0,15$  m werden *keine* Laibungen berücksichtigt.<sup>10)</sup>



**Abbildung 3-15:** Visualisierung der geometrischen Ansätze für Fenster- und Tür-laibungen

<sup>10)</sup> Einzige Ausnahme stellen die Kellertüren dar, für die stets beide Laibungen angesetzt werden.

### 3.1.3 Flächen der Regelbauteile

#### Türen der Außenwand / Fenster und Fenstertüren der Außenwand / Dachflächenfenster / Kellerfenster

Vgl. hierzu Gl. 9-41 bis Gl. 9-49.

Ansätze:

- Die Fenster- und Türflächen der einzelnen Geschosse (Keller- Regel- und Dachgeschoss) basieren auf den Werten des BASIS-Geschosses.
- (Opake) Eingangstüren werden pauschal mit  $h_{\text{Tür,BG}} \cdot b_{\text{Tür,BG}} = 2,15 \cdot 1,15 = 2,5 \text{ m}^2$  angesetzt. Die Gesamtfläche dieser Türen wird anhand der Anzahl an Wohnungen berücksichtigt. Betrachtet man den Wohnungsbestand der Jahre 1995 bis 2007 so beträgt laut Statistischem Bundesamt [15] die durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung in Deutschland  $85 \text{ m}^2$ . Dieser Wert soll zur Ermittlung der durchschnittlichen Wohnungsanzahl pro Gebäude anhand der berechneten Netto-Grundfläche pro Geschoss gemäß Gl. A-41 herangezogen werden.
- In den Regelgeschossen sind nur im Erdgeschoss opake Türen und im Dachgeschoss gar keine Türen eingesetzt.
- Für die Kellergeschosse werden ausschließlich opake Türen und nur 50% der Fenster des BASIS-Geschosses angesetzt. Im Dachgeschoss werden die Hälfte der Fenster der Außenwand (Giebel) und die andere Hälfte der Dachfläche (Dachflächenfenster) zugeordnet.
- Fensterflächen im Dachgeschoss werden bei Ausführung eines Sattel- oder Pultdachs zur Hälfte den Dachflächen zugerechnet und führen bei den Wandflächen nicht mehr zu Abzügen.

#### Außenwände an Außenluft und Erdreich

Es werden ausschließlich *thermisch aktive* Außenwandflächen angesetzt. Außenwände unbeheizter Räume werden also nicht berücksichtigt. Hierzu müssen aufgrund der möglichen unterschiedlichen Beheizung die Außenwandanteile der einzelnen Geschosse (Keller-, Regel- und Dachgeschoss) getrennt voneinander ermittelt werden. Ferner werden automatisch die Fensterflächen nach den o. g. Ansätzen abgezogen. Vgl. hierzu Gl. 9-50 bis Gl. 9-55.



## **Dächer, Dachschrägen zu Außenluft / Flachdächer an Außenluft**

Vgl. hierzu Gl. 9-56 bis Gl. 9-60.

Für *Dächer* und *Dachschrägen zu Außenluft* (Sattel- und Pultdachsysteme) und *Flachdächer* gilt, dass

- bei Schrägdachsystemen die Dachgeschossfenster von der Dachfläche abgezogen werden,
- bei Flachdachsystemen *keine* Fenster im Dach (also keine Dachkuppeln) angesetzt werden und dort die Beleuchtung der Räume durch die Fenster der Wände erzielt wird und
- bei Ansatz eines Loggiasystems die jeweils an die Außenluft grenzenden Flächen den Flachdachflächen zugeordnet werden. Ein Loggiasystem wird nur für jede zweite Etage und die Räume unter und über Loggien stets als *beheizt* angesetzt, da übereinander liegende Loggien thermisch eher wie ein *Balkonsystem* wirken.

## **Decken zu unbeheizten Räumen nach oben / unten**

Für den Fall, dass das Dach-, Regel- und Kellergeschoss unterschiedlich große beheizte Flächen besitzen, werden die horizontalen Restflächen den *Decken zu unbeheizten Räumen* zugeordnet. Vgl. hierzu Gl. 9-61 bis Gl. 9-65.

## **Wände gegen unbeheizte Räume (seitlich)**

Es werden ausschließlich *thermisch aktive* Innenwandflächen angesetzt. Innenwände zwischen zwei unbeheizten Räumen werden also nicht berücksichtigt. Hierzu müssen aufgrund der möglichen unterschiedlichen Beheizung die Innenwandanteile der einzelnen Geschosse (Keller- Regel- und Dachgeschoss) getrennt voneinander ermittelt werden. Vgl. hierzu Gl. 9-66 bis Gl. 9-69.

## **Decken gegen Erdreich (Bodenplatten)**

Eine Decke gegen Erdreich wird nur angesetzt, wenn ein beheiztes Kellergeschoss oder ein nicht unterkellertes Gebäude vorhanden ist. Bei teilbeheizten Kellern oder Erdgeschossen werden nur die Bodenflächen zu den beheizten Räumen angesetzt. Vgl. hierzu Gl. 9-70.

### 3.1.4 Längen der linearen Wärmebrücken

Vgl. hierzu Gl. 9-71 bis Gl. 9-93.

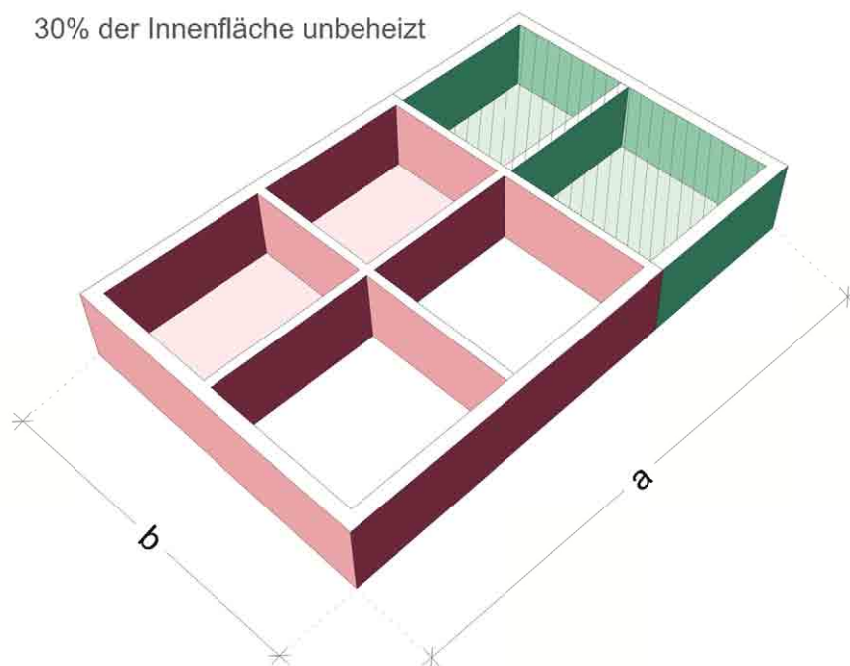
Die detaillierte Wärmebrückenberechnung setzt die möglichst detaillierte Ermittlung der Längen der Wärmebrücken voraus. Zur Vereinfachung der automatisierten Ermittlung der Längen wird – speziell für unbeheizte Bereiche – die folgende Vereinfachung bzgl. der Längenermittlung angesetzt:

- Wärmebrücken mit **negativem**  $\psi$ -Wert werden bzgl. deren Länge ggf. **untermessen** (zu kurze Längen) und
- Wärmebrücken mit **positivem**  $\psi$ -Wert werden bzgl. deren Länge ggf. **übermessen**.

Mittels der Gl. 9-71 bis Gl. 9-93 werden stets die maximalen Werte (volle Beheizung jedes Geschosses) ermittelt. Die Minimalwerte (Untermessung) werden dann mittels eines Abminderungsfaktors  $f_{unbeh}$  gemäß Gl. 3-1 abgeleitet.

$$l_{WB,min} = l_{WB,max} \cdot (1 - f_{unbeh}) \tag{Gl. 3-1}$$

$f_{unbeh}$  stellt dabei den Anteil der unbeheizten Fläche an der Brutto-Fläche für das Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss) dar. Dass dieser Ansatz stets sichere Ergebnisse erzielt, kann am folgenden Beispiel aufgezeigt werden. Gegeben sei der in Abbildung 3-16 dargestellte Grundriss. Für diesen wird angenommen, dass 30% der Nettofläche unbeheizt sind.



**Abbildung 3-16:** Beispielgrundriss zur Visualisierung des Ansatzes zur Ermittlung minimaler Längen für Wärmebrücken mit negativem  $\psi$ -Wert

Die geometrischen Werte ergeben sich wie folgt:

Gesamtfläche und beheizte Fläche des Geschosses:

$$A_{\text{Geschoss,ges}} = a \cdot b$$

$$A_{\text{Geschoss,beh}} = 0,7 \cdot a \cdot b$$

Gesamtlänge der Innenwände des Geschosses:

$$\ell_{\text{IW,Geschoss}} = a + 2 \cdot b$$

Die approximierte Innenwandlänge im beheizten Raum nach oben gewähltem Ansatz:

$$\ell_{\text{IW,beh,appr}} = 0,7 \cdot \ell_{\text{IW,Geschoss}}$$

$$= 0,7 \cdot (a + 2 \cdot b)$$

Die tatsächliche Innenwandlänge im beheizten Raum:

$$\ell_{\text{IW,beh,tats}} = 0,7 \cdot a + 2 \cdot b$$

Für das Beispiel ist  $\ell_{\text{IW,beh,tats}}$   $0,6 \cdot b$  größer als  $\ell_{\text{IW,beh,appr}}$ . Somit stellt Gl. 3-1 eine auf der sicheren Seite liegende Approximation dar.

### 3.1.5 Bandbereite der U-Werte

Für die Berechnung des in Gl. 2-2 beschriebenen Transmissionswärmeverlustes ist die Ermittlung der U-Werte der Regelbauteile erforderlich. Das Programm erlaubt die Konfiguration vordefinierter Stützstellen der thermisch relevanten Schichten (Dicke und Wärmeleitfähigkeit) der Regelbauteile. Die U-Werte der Regelbauteile werden dann automatisch gemäß DIN EN ISO 6946 [16] und teils DIN EN ISO 10211 [9] berechnet.

Bei der U-Werte-Berechnung sind über die konfigurierbaren Schichten hinaus bei allen Regelbauteilen noch weitere, thermisch sekundäre Schichten berücksichtigt. So sind für eine *einschalige Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem* nur deren tragende und dämmende Schicht zu konfigurieren. Eine innere und äußere Putzschicht kann nicht konfiguriert werden, wird aber pauschal im U-Wert berücksichtigt. In Tabelle 3-2 sind alle im Programm enthaltenen Regelbauteile mit Angabe ihrer konfigurierbaren und nicht konfigurierbaren Schichten aufgeführt. Dabei werden die nicht konfigurierbaren Schichten mit einem festen Wärmedurchgangswiderstand R berücksichtigt.

**Tabelle 3-1:** Konstruktionsbeschreibung der Regelbauteile mit Angabe der Bauteilschichten

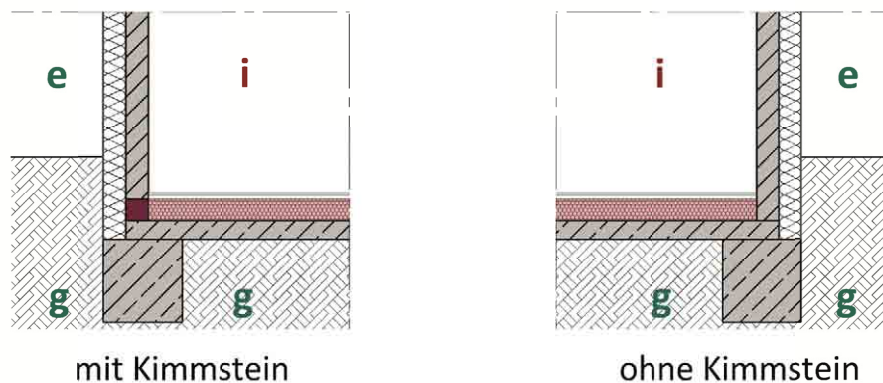
Regelbauteil	Schichten
Türen der Außenwand	Es erfolgt eine Direkteingabe des U-Wertes ohne Konfigurationsmöglichkeit des Glases oder Rahmens
Fenster und Fenstertüren der Außenwand	
Dachflächenfenster	
Kellerfenster	
Außenwand an Außenluft und Wände gegen Erdreich	<p><b>Einschalige Außenwand mit WDVS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Innenputz mit <math>R = 0,01 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Tragschicht: konfigurierbar</li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> <li>• Außenputz mit <math>R = 0,02 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}^{11)}</math></li> </ul>
	<p><b>Zweischalige Außenwand mit Kerndämmung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Innenputz mit <math>R = 0,01 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Tragschicht: konfigurierbar</li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> <li>• Vorsatzmauerwerk mit <math>R = 0,12 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> </ul>
	<p><b>Monolithische Außenwand:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Innenputz mit <math>R = 0,01 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Trag- und Dämmschicht: konfigurierbar</li> <li>• Außenputz mit <math>R = 0,02 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}^4)</math></li> </ul>
Dächer, Dachschrägen zu Außenluft	<p><b>Einschaliges Massivdach:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Innere Tragschicht mit <math>R = 0,02 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> </ul>
	<p><b>Zweischaliges Massivdach:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Innere Tragschicht mit <math>R = 0,03 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> <li>• Äußere Tragschicht mit <math>R = 0,03 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> </ul>
	<p><b>Holzdach mit Zwischen- oder Aufsparrendämmung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Innenausbau mit <math>R = 0,20 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> </ul>

<sup>11)</sup> Für Wände ans Erdreich wird kein äußerer Wärmeübergangswiderstand angesetzt.

Regelbauteil	Schichten
Flachdächer an Außenluft	<b>Massives Flachdach:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Innenputz mit <math>R = 0,01 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Betondecke mit <math>R = 0,07 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> </ul>
	<b>Holzdach mit Zwischen- oder Aufsparrendämmung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Innenausbau mit <math>R = 0,20 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> </ul>
Decken zu unbeheizten Räumen nach oben	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innenputz mit <math>R = 0,01 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Betondecke mit <math>R = 0,07 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> </ul>
Decken zu Außenluft nach unten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrich mit <math>R = 0,03 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Trittschalldämmung mit <math>R = 1,00 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Betondecke mit <math>R = 0,07 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> <li>• Innenputz mit <math>R = 0,02 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> </ul>
Decken zu unbeheizten Räumen nach unten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrich mit <math>R = 0,03 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Trittschalldämmung mit <math>R = 1,00 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Betondecke mit <math>R = 0,07 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> <li>• Innenputz mit <math>R = 0,01 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> </ul>
Wände gegen unbeheizte Räume	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Innenputz mit <math>R = 0,01 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Tragende Schicht mit <math>R = 0,07 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> <li>• Gipskartonplatte mit <math>R = 0,05 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> </ul>
Decken gegen Erdreich (Bodenplatten)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estrich mit <math>R = 0,03 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Trittschalldämmung mit <math>R = 1,00 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Betondecke mit <math>R = 0,07 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}</math></li> <li>• Dämmschicht: konfigurierbar</li> </ul>

### 3.1.6 Bandbreite der $\psi$ -Werte

Je nach geometrischer und materialbedingter Ausführung eines Wärmebrückenanschlusses kann der  $\psi$ -Wert stark divergieren. Ist ein Anschluss hinsichtlich der Wärmebrückenwirkung optimiert, so kann der Wert  $\leq 0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  sein. Bei schlechter Ausführung kann der Wert sogar Werte  $> 0,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  annehmen <sup>12)</sup>. Die Unterscheidung der thermisch dominantesten Wärmebrückeneffekte wurde in das Programm integriert. So kann z. B. gemäß Abbildung 3-7 bei *in die Außenwand einbindenden Bodenplatten* unterschieden werden, ob der Anschluss mit einem Kimmstein <sup>13)</sup> oder ohne ausgeführt wird.



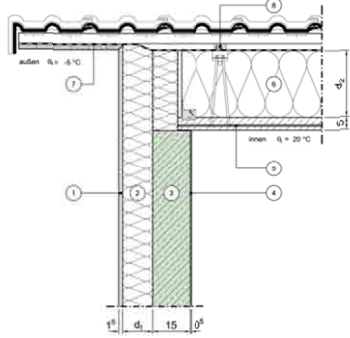
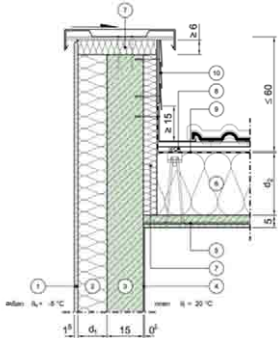
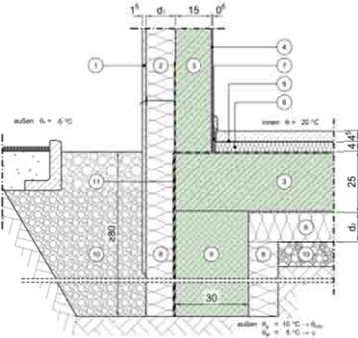
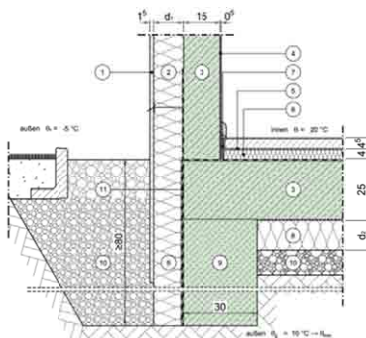
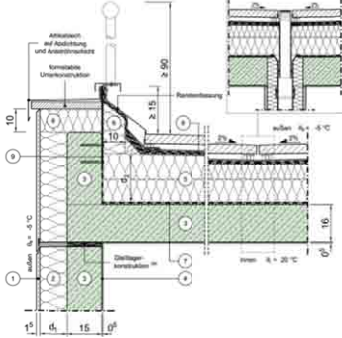
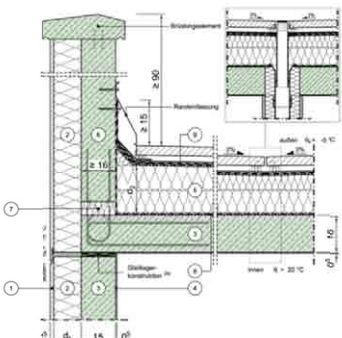
**Abbildung 3-17:** Unterscheidung eines hinsichtlich der Wärmebrückenwirkung optimierten Anschlusses einer Bodenplatte an die Außenwand mit Kimmstein (links) und eines nicht optimierten Anschlusses (rechts)

Im Zuge dieser Arbeit seien *zweitrangige Effekte* als Wärmebrückeneffekte bezeichnet, deren Einzelwirkung sich maximal in der dritten Nachkommastelle auf den  $\Delta U_{\text{WB}}$ -Zuschlag auswirken. Diese zweitrangigen Effekte müssen aber aufgrund ihrer *kumulativen Wirkung* ebenfalls berücksichtigt werden. Hierzu wurden jedem Wärmebrückenanschluss in der im Programm enthaltenen  $\psi$ -Wert-Datenbank zwei  $\psi$ -Werte hinterlegt. Für eine thermisch optimierte Ausführung wird ein minimaler Wert angegeben und für eine thermisch schlechte Ausführung ein maximaler  $\psi$ -Wert. In Tabelle 5-1 sind drei ausgewählte Beispiele für eine derartige Unterscheidung aufgeführt. Es sei dabei darauf hingewiesen, dass es sich bei der nicht optimierten Lösung nicht um den schlechtesten Fall handelt, sondern vielmehr um eine den anerkannten Regeln der Technik entsprechende Konstruktion mit thermischem Optimierungspotential.

<sup>12)</sup> Der  $\psi$ -Wert ist stets abhängig vom Dämmniveau der Regelbauteile und sollte daher nicht ohne Berücksichtigung des Dämmniveaus interpretiert werden.

<sup>13)</sup> Eine sogenannte „Kimmsteinlage“ stellt eine Steinlage dar, die bei gleicher Tragfähigkeit eine höhere Dämmwirkung gegenüber der übrigen tragenden Wand aufweist.

**Tabelle 3-2:** Ausgewählte Beispiele für Wärmebrücken; die  $\psi$ -Werte gelten stets für eine ansonsten identische Konfiguration (Schichtdicken und Wärmeleitfähigkeiten der Materialien)

	Hinsichtlich der Wärmebrückenwirkung optimierter Anschluss	Hinsichtlich der Wärmebrückenwirkung nicht optimierter Anschluss
1	 <p><math>\psi = -0,084 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})</math></p>	 <p><math>\psi = 0,173 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})</math></p>
2	 <p><math>\psi = 0,246 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})</math></p>	 <p><math>\psi = 0,351 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})</math></p>
3	 <p><math>\psi = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})</math></p>	 <p><math>\psi = 0,149 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})</math></p>

Innerhalb des Programms werden somit für jede Gebäudekonfiguration zwei detaillierte Wärmebrückenberechnungen durchgeführt. Die erste Berechnung nutzt stets die  $\psi$ -Werte der nicht optimierten Anschlüsse und erzeugt damit einen *oberen Grenzwert* des Wärmebrückenzuschlags. In der zweiten Berechnung werden die  $\psi$ -Werte der optimierten Anschlüsse genutzt, was zu einem *unteren Grenzwert* des Wärmebrückenzuschlags führt. Aus der Differenz ist dann das Potential abzuleiten, das in der Optimierung aller Wärmebrücken liegt. Zur Veranschaulichung folgt in Kapitel 3.1.8 die Ableitung des approximierten  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlags nach automatisierter Berechnung für das in Kapitel 2.2.7 vorgestellte Berechnungsbeispiel. Zuvor soll aber kurz beschrieben werden, wie die eigentliche automatisierte  $\psi$ -Wert-Zuordnung im Programm umgesetzt wird.

### 3.1.7 Zuordnung der $\psi$ -Werte innerhalb des Programms

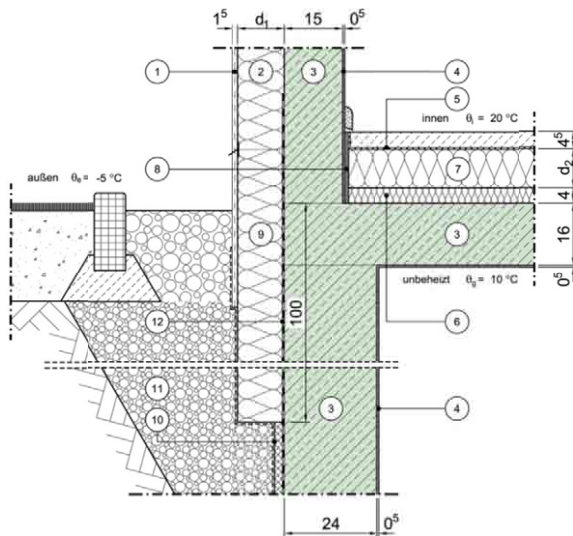
Die eindeutige Zuordnung der  $\psi$ -Werte erfolgt für jeden Wärmebrückenanschluss mittels eines Schlüsselsystems. Dabei handelt es sich um eine Zahlenkombination, die sich aus der Konfiguration der thermisch relevanten Schichten der Regelbauteile generiert. Die *Schichtdicken*, *Wärmeleitfähigkeiten* oder *U-Werte* sind innerhalb des Programms anhand vordefinierter Stützstellen auszuwählen. Nach Auswahl wird dann für den jeweiligen Parameter eine Schlüsselzahl erzeugt, die für das gesamte Gebäude gilt. Darüber hinaus beginnt der Schlüssel mit der Zuordnung der Konstruktionsart der Außenwand gemäß Tabelle 3-3.



**Tabelle 3-3:** Zuordnung der Konstruktionsart der Außenwand mittels Buchstabenlüssel

Buchstabe	Bild	Konstruktionsart
A		<p>Einschalige Außenwände aus Normal- und Leichtbeton mit WDV-System</p>
B		<p>Zweischalige Wand mit Kerndämmung</p>
C		<p>Monolithische Konstruktionen</p>

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 3-18 erneut der Anschluss *Einbindende Decke in Kelleraußenwand – im Sockelbereich, Decke zu unbeheiztem Keller, innenseitig gedämmt* dargestellt.



**Abbildung 3-18:** Beispielhafte Darstellung des Anschlusses *Einbindende Decke in Kelleraußenwand – im Sockelbereich, Decke zu unbeheiztem Keller, innenseitig gedämmt*

Zur Abbildung der für diesen Anschluss relevanten Regelbauteile *Außenwand an Außenluft* und *Decken zu Außenluft nach unten* können deren thermisch relevante Schichten im Programm mittels Stützwerten konfiguriert werden. Für dieses Beispiel sind in Tabelle 3-4 alle Stützwerte für diese beiden Regelbauteile aufgeführt. Für eine ausgewählte Konfiguration (Außenwand: 30 cm Stahlbeton und einer Außenwanddämmung mit  $d_1 = 14$  cm; Decke: 4,5 cm Estrich, 4 cm Trittschalldämmung, 16 cm Beton und einer Deckendämmung von  $d_2 = 8$  cm) ergeben sich die rot markierten Werte.



**Tabelle 3-5:** Beispielhafter Datenbankauszug der im Programm 1. Genauigkeit implementierten  $\psi$ -Werte des Wärmebrückenanschlusses *Einbindende Decke in Kelleraußenwand – im Sockelbereich, Decke zu unbeheiztem Keller, innenseitig gedämmt* mit insgesamt 19.200 hinterlegten Werten

Schlüssel	$\psi$ in W/(m·K)
...	
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-2-1-3-1-1-1-1	0,021
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-2-1-4-1-1-1-1	0,016
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-3-1-1-1-1-1-1	0,083
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-3-1-2-1-1-1-1	0,076
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-3-1-3-1-1-1-1	0,071
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-3-1-4-1-1-1-1	0,066
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-4-1-1-1-1-1-1	0,126
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-4-1-2-1-1-1-1	0,118
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-4-1-3-1-1-1-1	0,113
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-4-1-4-1-1-1-1	0,108
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-5-1-1-1-1-1-1	0,263
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-5-1-2-1-1-1-1	0,256
A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-5-1-3-1-1-1-1	0,250
<b>A-3-3-1-3-1-1-1-1-1-1-1-5-5-1-4-1-1-1-1</b>	<b>0,245</b>
A-3-3-1-4-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1	0,022
A-3-3-1-4-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-2-1-1-1-1	0,016
A-3-3-1-4-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-3-1-1-1-1	0,011
A-3-3-1-4-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-4-1-1-1-1	0,007
...	

Für jeden im Programm implementierten Wärmebrückenanschluss wird auf diese Weise ein Schlüssel erzeugt und dadurch der zur Regelbauteil-Konfiguration passende  $\psi$ -Wert ermittelt. Zusammen mit dessen Länge kann damit der zusätzliche Wärmeverlust errechnet und aus der Summe aller Anschlussverluste der somit automatisiert ermittelte approximierter  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag abgeleitet werden.

### 3.1.8 Ableitung des approximierten $\Delta U_{WB}$ -Zuschlags nach automatisierter Berechnung

Zur Veranschaulichung der automatisierten Ermittlung der detaillierten Wärmebrückenverluste durch das Programm sei das in Kapitel 2.2.5 dargestellte Beispiel erneut herangezogen. In Tabelle 3-6 sind nun alle relevanten Wärmebrückenanschlüsse hinsichtlich deren Längen und Wärmeverluste aufgeführt. In 2.2.7 wurden die geometrischen Werte objektspezifisch und manuell errechnet. Hier basieren die Ergebnisse auf der automatisierten und teils durch geometrische Vereinfachungen geprägte Berechnung durch das Programm 1. Genauigkeit. Die **minimalen** und **maximalen**  $\psi$ -Werte zur Unterscheidung zwischen *optimierten* und *nicht optimierten* Wärmebrücken sind gemäß Kapitel 3.1.6 errechnet und gemäß Kapitel 3.1.7 zugeordnet.

**Tabelle 3-6:** Aufstellung der mittels des Programms 1. Genauigkeit berechneten zusätzlichen Verluste aus Wärmebrücken für das Beispielgebäude

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		$\psi$ in W/(m·K)		$l_{WB}$ in m	$\Psi \cdot l_{WB}$ in W/K	
		Min	Max		Min	Max
1.1	Traufe des geneigten Daches zu beheiztem Dachraum	-0,032	-0,030	22,6	-0,72	-0,68
2	Ortgang des geneigten Daches	-0,092	0,106	26,3	-2,41	2,80
4	First des geneigten Daches	-0,060	-0,060	11,3	-0,67	-0,67
7.1	Außenecke an Außenluft	-0,079	-0,079	15,4	-1,22	-1,22
8.1	Außenecke an Erdreich	-0,046	-0,046	10,8	-0,50	-0,50
9.1	Einbindende Innenwand in Außenwand	0,000	0,000	15,4	0,00	0,00
10.1	Einbindende Innenwand in Kelleraußenwand	0,000	0,000	10,8	0,00	0,00
13.1	Einbindende Decke in Außenwand	0,002	0,002	12,6	0,02	0,02
13.2	Einbindende Decke in Außenwand, Fenster ohne Rollladenkasten	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00
13.3	Einbindende Decke in Außenwand, Fenster mit Rollladenkasten	0,179	0,179	28,6	5,13	5,13
14.1	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller	0,002	0,002	29,8	0,06	0,06
14.2	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller, mit Tür	-0,044	-0,044	11,4	-0,51	-0,51
20.1	Fensterbrüstung	0,021	0,021	24,7	0,51	0,51
20.2	Fenster- oder Türleibung	0,018	0,018	94,1	1,66	1,66
22	KG-Fundament mit Flachgründung	-0,025	-0,025	41,2	-1,01	-1,01
24	Innenwand unter geneigtem Dach gegen Außenluft	0,005	0,005	9,3	0,05	0,05
29	Innenwand auf Bodenplatte mit Flachgründung	0,067	0,082	9,3	0,62	0,76
$H_{WB} =$					1,02	6,42

Aus der *automatisierten Berechnung* ergibt sich eine gegenüber der manuell ermittelten Fläche von 566,8 m<sup>2</sup> also etwas überschätzte wärmeübertragende Hüllfläche von 574,41 m<sup>2</sup>. Für eine nicht weiter optimierte Ausführung (**rote** Werte) ergibt sich der resultierende  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag für dieses Beispiel wie folgt.

$$\Delta U_{WB} = \frac{\sum_{k=1}^n \psi_k \cdot \ell_k}{\sum_{j=1}^m A_j} = \frac{6,42}{574,41} = \overbrace{0,011}^{\text{automatisierte Berechnung}} \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \geq \overbrace{0,010}^{\text{manuelle Berechnung}} \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$$

Gegenüber dem tatsächlichen Verlust (vgl. Ausführungen unter Kapitel 2.2.5) wird der Zuschlag mittels des automatisierten Verfahrens also minimal überschätzt.

Wie bereits in Kapitel 2.2.5 erwähnt, besteht die Möglichkeit, einzelne Wärmebrücken weiter zu optimieren. Führt man dies für die optimierungsfähigen Anschlüsse durch (**blaue** Werte), so ergibt sich der resultierende  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag für dieses Beispiel wie folgt.

$$\Delta U_{WB} = \frac{\sum_{k=1}^n \psi_k \cdot \ell_k}{\sum_{j=1}^m A_j} = \frac{1,02}{574,41} = 0,002 \frac{W}{(m^2 \cdot K)} \sim 0$$

Mittels einer Wärmebrückenoptimierung kann für dieses Beispiel somit sogar der *Nachweis der Wärmebrückenfreiheit* erbracht werden.

### 3.2 Programmoberfläche des Programms 1. Genauigkeit

Für das Programm wurden die unter Kapitel 3.1 dargestellten mathematischen Zusammenhänge in einer Tabellenkalkulation (MS Excel) zusammengefasst. Das Programm ist auf der beigefügten CD unter „Programm\_autoHw.xlsm“ zu finden und wird in Abbildung 3-19 bis Abbildung 3-22 anhand des Beispielgebäudes erläutert.

### 1. Teil der Eingabeseite 1 (vgl. Abbildung 3-19 und in *autoHw* Tabellenblatt *Eingabe*)

Hier können die Regelbauteile konfiguriert werden. Es erfolgt ebenfalls die direkte Ausgabe (Berechnung) ihrer Flächen und Transmissionswärmeverluste.

**Bereich A:** Anhand von vordefinierten Stützwerten sind die Dicken und Wärmeleitfähigkeiten der thermisch relevanten Schichten einzugeben. Auch die Überdämmhöhe der Fensterrahmen oder der Wände zu unbeheizten Kellern ist hier vorzunehmen.

**Bereich B:** Hier erfolgt die Ausgabe der gemäß Kapitel 3.1.3 ermittelten Flächen und der gemäß Kapitel 3.1.5 berechneten U-Werte und der Regelbauteile.

**Bereich C:** Hier erfolgt die Ausgabe der Temperatur-Korrekturfaktoren gemäß Tabelle 2-2 und der Transmissionswärmeverluste der Regelbauteile gemäß Gl. 2-2.

Beschreibung der Regelbauteile	Bereich A		Regel-Bauteil-V		riuste	
	$U_i$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	$A_i$ [m <sup>2</sup> ]	$F_i$ [-]	$H_{T,Regel}$ [W/K]	$F_i$ [-]	$H_{T,Regel}$ [%]
<b>Außenwand an Außenluft → We</b>						
Einschlige Außenwand mit WDVS						
Tragende Schicht der Außenwand	0,240 m	1,000 W/(mK)				
Dämmschicht der Außenwand (entfällt bei monolith. Konst.)	0,140 m	0,040 W/(mK)				
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,25	160,87 28%	1,00	40,89 20%		
<b>Fenster und Fenstertüren der Außenwand → Fen</b>						
Türen der Außenwand → Tür						
Dachflächenfenster → DFen						
Kellerfenster → KFen						
Überdämmung der	0,040 m		1,4	43,59 8%	1,00	61,52 30%
			1,4	10,00 2%	1,00	14,00 7%
			1,4		1,00	
			1,4	8,01 1%	1,00	11,30 6%
<b>Dächer, Dachschrägen zu Außenluft → D,e</b>						
Einschliges Massivdach						
Dämmschicht des Daches	0,250 m	0,035 W/(mK)				
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,19	148,62 26%	1,00	27,86 14%		
<b>Decker zu unbeh. Räumen nach oben → De,u,OA</b>						
Dämmschicht der Decke	0,250 m	0,035 W/(mK)			0,80	
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,13					
<b>Flachdächer an Außenluft → FD,e</b>						
Massives Flachdach						
Dämmschicht des Daches	0,180 m	0,040 W/(mK)			1,00	
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,21					
<b>Decker zu Außenluft nach unten → De,e</b>						
Dämmschicht der Decke	0,180 m	0,035 W/(mK)			1,00	
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,15					
<b>Decker zu unbeh. Räumen nach unten → De,u,UA</b>						
Dämmschicht der Decke	0,140 m	0,024 W/(mK)			0,50	
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,14					
Überdämmung der Wände zu unbeh. Räumen	1,000 m					
<b>Wände gegen unbeh. Räume → W,u</b>						
Dämmschicht der Wand	0,140 m	0,024 W/(mK)			0,50	
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,16					
<b>Wände gegen Erdreich → W,g</b>						
Einschlige Außenwand mit WDVS						
Tragende Schicht der Außenwand	0,300 m	2,300 W/(mK)				
Dämmschicht der Außenwand (entfällt bei monolith. Konst.)	0,100 m	0,040				
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,35	98,23 17%	0,60	20,81 10%		
<b>Decker gegen Erdreich (Bodenplatten) → De,g (BP)</b>						
Dämmschicht der Decke	0,050 m	0,040 W/(mK)			0,60	25,00 12%
Resultierender Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	0,40	105,09 18%				
<b>Σ =</b>		<b>574,41</b>				<b>201,39</b>

**Abbildung 3-19:** Darstellung des Berechnungs-Programms, Eingabeseite 1, Teil 1: Eingabe der Regelbauteile und Ausgabe deren Flächen und Wärmeverluste



## 2. Teil der Eingabeseite 1 (vgl. Abbildung 3-20 und in *autoHw* Tabellenblatt *Eingabe*)

Hier sind weitere geometrisch und thermisch relevante Eingaben

- zur Konstruktionsfläche pro Geschoss,
- dem Grundriss und der Geschossigkeit
- der Gründungsart,
- der Gebäude-Exposition und
- der Dämmlage des unteren Gebäudeabschlusses

vorzunehmen woraus resultierende Werte ausgegeben werden.

Dicke der Außenwände	$d_{AW}$	0,40 m	
Dicke der Innenwände	$d_{IW}$	0,15 m	
Höhe der Dämmebene des oberen Gebäudeabschlusses über OKR	$d_{DB,OGA}$	0,25 m	
Geschosshöhe (OKR bis OKR)	$h_G$	2,70 m	
Anzahl der beheizten Vollgeschosse	$\eta_{G,e}$	1,0	
	$\eta_{G,g}$	1,0	
Höhe des Drepfels im DG	$h_{Dr}$	1,14	1,14 m
Gründungs-Art (Flachgründung oder Streifengründung)	$NB_{Gr}$	Flachgründung	
Lage der Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses (Innen oder Außen)	$NB_{Dämmlage}$	Außen	Erläuterung
Ansatz eines Kimmsteins (mit oder ohne Kimmstein)	$NB_{Kimm}$	Ohne Kimmstein	
Gebäude-Grundform (Brutto)	$B_V$	m	Erläuterung
	$B_M$	9,30 m	
	$L_{V1}$	m	
	$L_M$	11,30 m	
	$L_{V2}$	m	
	$B$	9,30 m	
	$L$	11,30 m	
	<b>Typ</b>	Rechteck	1
Perimeterumfang des BASIS-Geschosses	$P_{BG}$	41,20 m	
Brutto-Geschossfläche	$A_{Brutto,BG}$	105,09 m <sup>2</sup>	
Anteil der Konstruktionsfläche an der Brutto-Geschossfläche	$\eta_{Kon}$	16,4%	0,16   Erläuterung
Netto-Geschossfläche	$A_{Netto,BG}$	87,86 m <sup>2</sup>	
Netto-Konstruktionsfläche	$A_{Kon,BG}$	17,23 m <sup>2</sup>	
Außenwandlänge pro Geschoss bezogen auf die Mittelachse	$\ell_{AW,BG}$	39,60 m	
Innenwandlänge pro Geschoss bezogen auf die Mittelachse	$\ell_{IW,BG}$	9,30 m	
Anzahl der Wohnungen pro Geschoss	$\eta_{Woh,BG}$	2	
Gebäude-Exposition --> Anteil des Perimeters, der an andere beheizte Gebäude angrenzt	$\eta_{Exp,BG}$	%	
Gebäude-Exposition --> Art der Gebäudelage	<b>Exp-Art</b>	Freistehend	1,0
Gebäude-Exposition --> Länge, über die das Gebäude an andere beheizte Gebäude angrenzt	$\ell_{AW,Exp}$	m	
Anzahl der in die Außenwand einbindenden Innenwände	$\eta_{IW-AW,beh}$	4	4
Anzahl der Außenecken	$\eta_{AE}$	4	
Anzahl der Innenecken	$\eta_{IE}$		
Anzahl der Versätze	$\eta_{VS}$		
	$\ell_{VS,1}$	m	0,20
Tiefe des Versprungs (gilt ab < 1 Meter)	$\ell_{VS,2}$	m	

**Abbildung 3-20:** Darstellung des Berechnungs-Programms, Eingabeseite 1, Teil 2: Geometrische und thermische Stützwerke gemäß 3.1

**Eingabeseite 2 (vgl. Abbildung 3-21 und in *autoHw* Tabellenblatt *Eingabe*)**

Bereich A: Hier sind weitere geometrisch und thermisch relevante Eingaben zur Art des Freibereichs, des Dachtyps und der Fenster/Türen und deren geometrischer Ausbildung vorzunehmen. Daraus werden resultierende Werte ausgegeben.

Bereich B: Hier wird die für die einzelnen Geschosse (Keller- Regel- und Dachgeschoss) voneinander unabhängig zu definierende Beheizung und die geometrische Ausbildung des beheizten/unbeheizten Raumes eingegeben. Die abgeleiteten Stützwerte der Fenster und Türen sind nicht nur pro Geschosstyp, sondern auch noch hinsichtlich der Zuordnung zu einer Loggia oder einem Balkon (*Freibereich*) und der sonstigen Außenfläche (*Sonst*) zu unterscheiden.

Bereich A			
Art des "Freibereiches" (0 = kein; 1 = Balkonsystem, 2 = Loggia)	NB <sub>FB</sub>		
Anteil des "Freibereiches" am Gesamtumfang P <sub>0</sub>	Y <sub>FB,BG</sub>	%	
Breite eines "Freibereiches" pro Geschoss	B <sub>FB,BG</sub>	m	
Tiefe bei Loggien	T <sub>Lo,BG</sub>	m	
Dachform	α <sub>M</sub>	Sattel	
Dachneigung		45,0°	
Geometrische Stützwerte des Daches	Höhe der Firste über Traufe	h <sub>First_Tr</sub>	4,65
	Ortganglänge im Gebäudeteil "M"	OL <sub>M</sub>	6,58 m
	Ortganglänge im Gebäudeteil "V"	OL <sub>V</sub>	7,32
Dachfläche	A <sub>D</sub>	148,62 m <sup>2</sup>	
Fläche der Giebel-Wand	A <sub>AW,Giebel</sub>	43,25 m <sup>2</sup>	
Anteil der transparenten Flächen pro Geschoss (bezogen auf die Netto-Geschossfläche)	f <sub>trans,BG</sub>	40,5%	0,41
Absolut mögliche Außenwandfläche	A <sub>AW,abs,BG</sub>	111,2 m <sup>2</sup>	
Fläche aller transparenten Bauteile im BASIS-Geschoss	A <sub>BT,trans,BG</sub>	35,6 m <sup>2</sup>	
Anteil der nicht bodentiefen Fenster an den transparenten Bauteilen im BASIS-Geschoss	f <sub>Fen,trans,BG</sub>	45,0%	0,45
Gesamtbreite der Fenster im BASIS-Geschoss	b <sub>Fen,trans,BG</sub>	m	
Verhältnis der durchschnittl. Höhe der Fenster zur Geschoss-Höhe	Y <sub>Fen</sub>	80%	0,60
Fläche aller opaquen Türen (hier Eingangstüren der einzelnen Wohnungen)	A <sub>Tür,opaque,BG</sub>	5,0 m <sup>2</sup>	
Fläche aller transparenten Türen	A <sub>Tür,trans,BG</sub>	19,6 m <sup>2</sup>	
Fläche aller Fenster	A <sub>Fen,trans,BG</sub>	16,0 m <sup>2</sup>	
Fensterlage (Wand- oder Dämmebene)	NB <sub>Fensterlage</sub>	Wand	
Sturz-Ausführung (Ohne oder mit Rolladenkasten)	NB <sub>RK</sub>	Mit RK	1,00
Bereich B			
Höhenanteil	h <sub>AW</sub>	DG 1,14    RG 2,70    KG	
Anteil der unbeheizten Fläche an der Bruttofläche des BASIS-Geschosses	f <sub>unbeh</sub>		
Zuordnung der Art des unbeheizten Bereiches	η <sub>unbeh,NW</sub>		
Anzahl der in die Außenwand einbindenden Innenwände zu unbeheizten Räumen	η <sub>NW-AW,unbeh</sub>		
unbeheizte Brutto-Fläche	A <sub>unbeh</sub>	m <sup>2</sup>	
beheizte Brutto-Fläche	A <sub>beh</sub>	105,09    105,09    105,09 m <sup>2</sup>	
Verhältnis der Seiten des unbeh. Bereiches	Y <sub>unbeh</sub>	1    1    1	
Raummaße	B <sub>unbeh</sub>	m	
	L <sub>unbeh</sub>	m	
Länge der Innenwände im beheizten Bereich	ℓ <sub>NW,beh-beh</sub>	9,30    9,30    9,30 m	
Länge der Innenwände zum unbeheizten Bereich	ℓ <sub>NW,beh-unbeh</sub>	m	
Länge der Außenwände eines beheizten Bereiches zur Außenluft/Erdrreich	ℓ <sub>AW,beh-ℓ(g)</sub>	41,20    41,20    41,20 m	
Länge der Außenwände des unbeheizten Bereiches zur Außenluft/Erdrreich	ℓ <sub>AW,unbeh-ℓ(g)</sub>	m	
Fläche der Wände (inkl. Fenster/Türen) gegen Außenluft/Erdrreich	A <sub>AW,beh-ℓ(g)</sub>	46,97    111,24    111,24 m <sup>2</sup>	
Absolut mögliche Außenwandfläche	A <sub>AW,abs</sub>	46,97    111,24    111,24 m <sup>2</sup>	
Fläche aller opaquen Türen	A <sub>Tür,opaque</sub>	5,00    5,00 m <sup>2</sup>	
Fläche aller transparenten Türen	A <sub>Tür,trans</sub>	19,57 m <sup>2</sup>	
Fläche aller Fenster	A <sub>Fen,trans</sub>	8,01    16,01    8,01 m <sup>2</sup>	
Flächen der Wände gegen Außenluft/Erdrreich	A <sub>AW,ℓ(g)</sub>	46,97    70,66    98,23 m <sup>2</sup>	
Durchschnittliche Höhe der Fenster	h <sub>Fen,trans</sub>	1,6    1,6    1,6 m	
Gesamte Breite der Fenster	b <sub>Fen,trans,ges</sub>	4,9    9,9    4,9 m	
Durchschnittliche Breite der Fenster	b <sub>Fen,trans,dur</sub>	1,5    1,5    1,5 m	
Gesamte Breite der Türen	b <sub>Tür,ges</sub>	11,4    2,3 m	
Durchschnittlicher Abstand der Fenster und Türen untereinander	t <sub>Fen/Tür</sub>	1,20    m	
Balkon- oder Loggiabereich: Anzahl der Fenster	η <sub>Fen,trans,FB</sub>		
Balkon- oder Loggiabereich: Gesamtlänge aller Fenster-Laibungen	ℓ <sub>Laib,Fen,FB</sub>	m	
Balkon- oder Loggiabereich: Gesamtlänge aller Fenster-Brüstungen	ℓ <sub>Brü,Fen,FB</sub>	m	
Balkon- oder Loggiabereich: Gesamtlänge aller Fenster-Stürze	ℓ <sub>Sturz,Fen,FB</sub>	m	
Balkon- oder Loggiabereich: Anzahl der Türen	η <sub>Tür,FB</sub>		
Balkon- oder Loggiabereich: Gesamtlänge aller Tür-Laibungen	ℓ <sub>Laib,Tür,FB</sub>	m	
Balkon- oder Loggiabereich: Gesamtlänge aller Tür-Brüstungen	ℓ <sub>Brü,Tür,FB</sub>	m	
Balkon- oder Loggiabereich: Gesamtlänge aller Tür-Stürze	ℓ <sub>Sturz,Tür,FB</sub>	m	
Sonstiger Bereich: Anzahl der Fenster	η <sub>Fen,trans</sub>	3,3    6,6    3,3	
Sonstiger Bereich: Gesamtlänge aller Fenster-Laibungen	ℓ <sub>Laib,Fen</sub>	10,7    21,3    10,7 m	
Sonstiger Bereich: Gesamtlänge aller Fenster-Brüstungen	ℓ <sub>Brü,Fen</sub>	4,9    9,9    4,9 m	
Sonstiger Bereich: Gesamtlänge aller Fenster-Stürze	ℓ <sub>Sturz,Fen</sub>	4,9    9,9    4,9 m	
Sonstiger Bereich: Anzahl der Türen	η <sub>Tür</sub>	9,9    2,0	
Sonstiger Bereich: Gesamtlänge aller Tür-Laibungen	ℓ <sub>Laib,Tür</sub>	42,7    8,7 m	
Sonstiger Bereich: Gesamtlänge aller Tür-Brüstungen	ℓ <sub>Brü,Tür</sub>	11,4    2,3 m	
Sonstiger Bereich: Gesamtlänge aller Tür-Stürze	ℓ <sub>Sturz,Tür,RG</sub>	11,4    2,3 m	

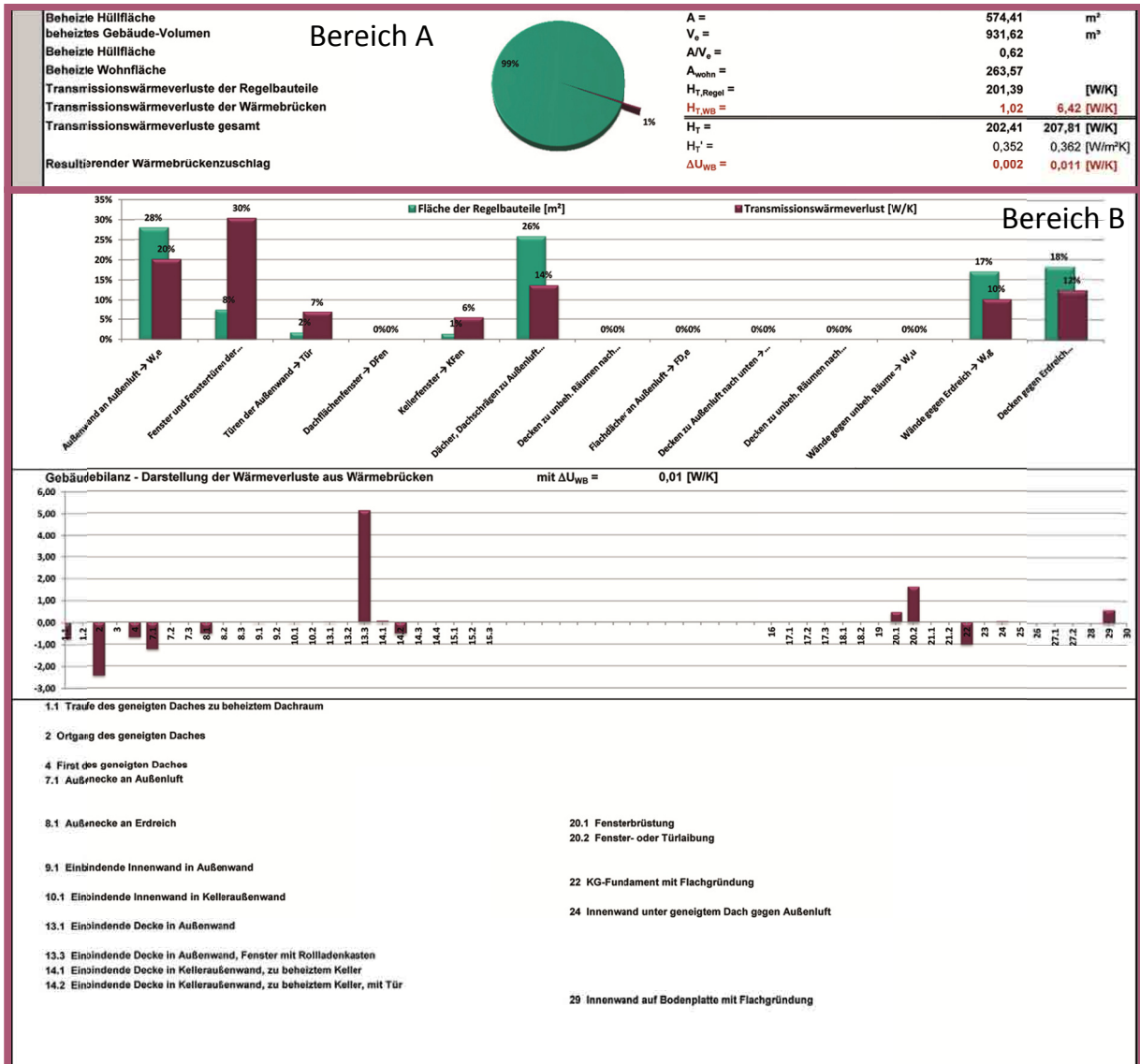
Abbildung 3-21: Darstellung des Berechnungs-Programms, Eingabeseite 2: Geometrische und thermische Stützwerte

**Ausgabeseite (vgl. Abbildung 3-22 und in *autoHw* Tabellenblatt *Eingabe*)**

Auf der Ausgabeseite erfolgen die numerische und die grafische Ausgabe des Transmissionswärmeverlustes inklusive der Wärmeverluste der Regelbauteile sowie der Wärmebrücken.

Bereich A: Hier erfolgt die numerische Ausgabe der zentralen energetischen Gebäudedaten. Hinsichtlich des Transmissionswärmeverlustes wird noch unterschieden zwischen dem Verlust der Regelbauteile und der Wärmebrücken. Für letztere erfolgt noch eine differenzierte Ausgabe für eine optimierte (hier  $H_T = 1,02 \text{ W/K}$ ) und nicht optimierte (hier  $H_T = 6,42 \text{ W/K}$ ) Ausführung gemäß 3.1.6. Darauf aufbauend wird abschließend der dazugehörige  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag ausgegeben.

Bereich B: Für eine bessere Einschätzung der thermischen Einzelwirkung der Regelbauteile und Wärmebrücken werden hier die Verlustanteile (in % am Gesamttransmissionswärmeverlust bei den Regelbauteilen) und die absoluten Verluste (in W/K) bei den Wärmebrücken angezeigt. Mittels dieser Darstellung sollen die Optimierungspotentiale aufgezeigt werden.



**Abbildung 3-22:** Darstellung des Berechnungs-Programms, Ergebnisdarstellung auf Seite 3: Ausgabe des Transmissionswärmeverlustes inklusive der detaillierten Ausgabe und grafischen Darstellung der Wärmeverluste der Regelbauteile sowie der Wärmebrücken

**Ausgabe der detaillierten Wärmebrückenverluste (vgl. Abbildung 5-1 und in *autoHw* Tabellenblatt *HTWB*)**

Im Tabellenblatt HTWB erfolgt die Aufstellung der detaillierten Wärmebrückenverluste nach Kapitel 3.1.8.

Wärmebrückenaufstellung		Approximierte WB-Berechnung						
		Min	Max	Min	Max	Aktiv	Min	Max
		$\psi$ -Wert [W/mK]		$\ell_{WB}$ [m]			$\psi \cdot \ell_{WB}$ [W/K]	
01	1.1 Traufe des geneigten Daches zu beheiztem Dachraum	-0,032	-0,030	22,6	22,6	1	-0,72	-0,68
	1.2	-0,061	-0,056			1		
02	2 Ortgang des geneigten Daches	-0,092	0,106	26,3	26,3	1	-2,41	2,80
03	3	-0,066	0,140	41,2	41,2			
04	4 First des geneigten Daches	-0,060	-0,060	11,3	11,3	1	-0,67	-0,67
07	7.1 Außenecke an Außenluft	-0,079	-0,079	15,4	15,4	1	-1,22	-1,22
	7.2	0,032	0,032			1		
	7.3	-0,036	-0,036			1		
08	8.1 Außenecke an Erdreich	-0,046	-0,046	10,8	10,8	1	-0,50	-0,50
	8.2	0,025	0,025			1		
	8.3	-0,022	-0,022			1		
09	9.1 Einbindende Innenwand in Außenwand	0,000	0,000	15,4	15,4	1	0,00	0,00
	9.2	0,064	0,091					
10	10.1 Einbindende Innenwand in Kelleraußenwand	0,000	0,000	10,8	10,8	1	0,00	0,00
	10.2	0,090	0,110			1		
13	13.1 Einbindende Decke in Außenwand	0,002	0,002	12,6	12,6	1	0,02	0,02
	13.2	-0,012	-0,012	28,6	28,6			
	13.3 Einbindende Decke in Außenwand, Fenster mit Rollladenkasten	0,179	0,179	28,6	28,6	1	5,13	5,13
14	14.1 Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller	0,002	0,002	29,8	29,8	1	0,06	0,06
	14.2 Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller, mit Tür	-0,044	-0,044	11,4	11,4	1	-0,51	-0,51
	14.3	0,156	0,156			1		
...								
19	19	0,027	0,140					
20	20.1 Fensterbrüstung	0,021	0,021	24,7	24,7	1	0,51	0,51
	20.2 Fenster- oder Türleibung	0,018	0,018	94,1	94,1	1	1,66	1,66
21	21.1	0,146	0,229	38,9	38,9			
	21.2	-0,036	-0,003	2,3	2,3			
22	22 KG-Fundament mit Flachgründung	-0,025	-0,025	41,2	41,2	1	-1,01	-1,01
23	23	0,157	0,234	41,2	41,2			
24	24 Innenwand unter geneigtem Dach gegen Außenluft	0,005	0,005	9,3	9,3	1	0,05	0,05
25	25	0,005	0,005	9,3	9,3			
26	26	0,000	0,086			1		
27	27.1	0,005	0,047	9,3	9,3			
	27.2	-0,010	-0,010					
28	28	0,000	0,364					
29	29 Innenwand auf Bodenplatte mit Flachgründung	0,067	0,082	9,3	9,3	1	0,62	0,76
30	30	0,451	0,451	9,3	9,3			
							1,02	6,42

Abbildung 3-23: Darstellung des Berechnungs-Programms, Ausgabe der detaillierten Wärmebrückenverluste

### 3.3 Anwendungsgrenzen

Die Überprüfung der Anwendbarkeit des Programmes auf Gebäude, die *signifikante* Abweichungen hinsichtlich der unter Kapitel 3.1 aufgeführten geometrischen und materialbedingten Ansätze respektive Restriktionen aufweisen, soll hier nicht durchgeführt werden. Daher müssen die Ergebnisse des Programms seitens des Entwicklers als *nicht uneingeschränkt zuverlässig* eingestuft werden, wenn einer der folgenden Punkte zutrifft:

- Es handelt sich um ein *nicht gemäß EnEV 2002 oder höherwertig saniertes* Bestandsgebäude;
- Das Gebäude besitzt mehrere thermisch deutlich unterschiedliche Regelbauteilgruppen (z. B. unterschiedliche Außenwandsysteme);
- Nicht alle Längen, Flächen und Volumen wurden gemäß DIN EN ISO 13789 [6] ermittelt;
- Die Wärmebilanzierung wurde nicht gemäß DIN 4108 Teil 6 Kapitel 6.1.3 durchgeführt;
- Das nachzuweisende Gebäude besitzt einen deutlich vom rechteckigen, T- oder L-Grundriss abweichenden Grundriss;
- Die Geschosse weisen stark inkongruente Grundrisse bezüglich der Innen- und Außenwände auf;
- Unbeheizte Bereiche der Geschosse liegen nicht übereinander und unbeheizte Flächen im Regelgeschoss (RG) sind größer als die unbeheizten Flächen im Kellergeschoss (KG) oder Dachgeschoss (DG);
- Bauteile mit Flächenheizung sowie Wände und Decken gegen unbeheizte Glasvorbauten mit einer Verglasung sind thermisch nicht vernachlässigt.

Die eventuell gegebene Anwendbarkeit des Verfahrens auf Gebäude, auf die mindestens einer der genannten Punkte zutrifft, muss gegebenenfalls mittels einer Feldstudie geprüft werden.

Auf Grundlage des Programms 1. Genauigkeit wurde ein zweites, noch zeitsparenderes Programm abgeleitet, indem repräsentative Gebäude mittels des Programms *autoHw* berechnet wurden und daraus eine Datenbank von U-Wert-Zuschlägen generiert wurde. Die Beschreibung dieses Programms (dieser Datenbank) erfolgt in Kapitel 4. Da hierzu eine Reduzierung der Eingabewerte auf die thermisch dominanten Parameter erforderlich war, geht mit dieser Reduzierung auch eine Verringerung der Genauigkeit einher.

## **4 PROGRAMM 2. GENAUIGKEIT**

### **4.1 Einleitung**

Damit die mögliche Vielfalt an zu variierenden Werten (Eingabewerten) auf eine sinnvolle und praxistaugliche Anzahl begrenzt wird, ist bei der Entwicklung des in Kapitel 3 beschriebenen Berechnungs-Programms 1. Genauigkeit bereits auf die Minimierung der Variationsgrößen geachtet worden. Um ein zweites, gegenüber dem Verfahren 1. Genauigkeit noch kürzeres Verfahren abzuleiten, ist eine Reduzierung der in Kapitel 3.1 beschriebenen Eingabewerte erforderlich. Es gilt somit, diejenigen Werte zu ermitteln, welche im Zuge einer energetischen Gebäudebilanzierung einen dominanten Effekt auf die zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken erzeugen, und das Programm auf diese zu reduzieren. Damit trotz dieser Reduzierung eine Anwendbarkeit auf reale beheizte Gebäude möglich ist, wurde eine Datenbank repräsentativer Gebäude in Form eines Gebäudekatalogs zusammengestellt.

### **4.2 Ermittlung repräsentativer Gebäudedaten**

#### **4.2.1 Die Gebäudestruktur Deutschlands hinsichtlich Wohn- und Nichtwohngebäuden**

Da ein zu Simulationszwecken dienender Gebäudekatalog die aktuelle *und* zukünftige Gebäudestruktur abbilden können muss, gilt es, die energetische Beschaffenheit der bestehenden Gebäudestruktur Deutschlands und dessen Entwicklung in den kommenden Jahrzehnten abzuschätzen und die dabei gewonnenen charakteristischen Werte in den Katalog einfließen zu lassen.

Um ein Abbild der Gebäudestruktur Deutschlands zu erzeugen, ist zunächst die reale Struktur zu erarbeiten. Dies bedeutet, dass die folgende Frage beantwortet werden muss: Wie viele Gebäude gibt es von welcher Art?

Zu Anfang soll geklärt werden, in wie weit eine Unterscheidung zwischen Wohn- und Nichtwohngebäuden<sup>14)</sup> zu treffen ist. Speziell seitens der Anlagentechnik sind Nichtwohngebäude signifikant von Wohngebäuden zu unterscheiden, was in der EnEV 2009 durch die Differenzierung der Berechnungsgänge berücksichtigt wird.

Nun soll geklärt werden, ob auch eine Unterscheidung der Wohn- und Nichtwohngebäude bezüglich der Wärmebrückenproblematik notwendig ist.

---

<sup>14)</sup> Nichtwohngebäude sind Gebäude, die überwiegend (mindestens zu mehr als der Hälfte der Nutzfläche) Nichtwohnzwecken dienen. Beispiele: Anstaltsgebäude, Büro- und Verwaltungsgebäude, Schulgebäude, Kindertagesstätten und Sporthallen etc.

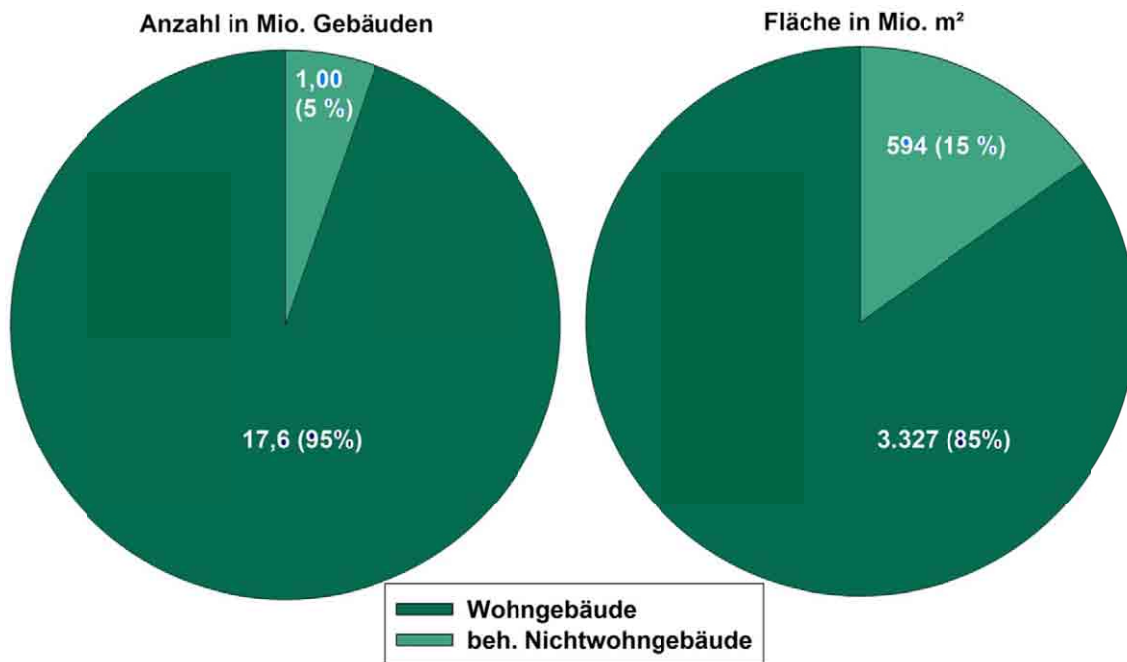


Die Zahl der Nichtwohngebäude lässt sich nur schwierig abschätzen. Für eine statistisch abgesicherte Angabe der relevanten Anzahl an Gebäuden dient hier ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit 2004 in Auftrag gegebenes Gutachten, welches die „Ermittlung an Fachleuten zur Umsetzung der GebäudeRL“ [17] zum Ziel hatte. Für das Jahr 1995 wird in dem Gutachten die Anzahl der beheizten Nichtwohngebäude auf 1,55 Mio. beziffert, wobei allein „ein Drittel dieser Gebäude 3,5-geschossige Massivbauten mit Ladenlokal im EG und Büro- oder Gewerbeflächen in den Obergeschossen“ darstellte [17]. Die für das Jahr 1995 bezifferte Anzahl an „öffentlichen Gebäuden mit Publikumsverkehr“ (und somit mit der Pflicht zum Aushang eines Energieausweises behaftet) wird auf 55 Tsd. geschätzt.

Aufbauend auf der Bestandsaufnahme von 1995 wurden Prognosen [18] für die Jahre 2005 und 2020 aufgeschlüsselt nach *neuen* und *alten Bundesländer* durchgeführt. Da für eine weitere Betrachtung nur *beheizte* Nichtwohngebäude von Bedeutung sind, kann der ermittelte Bestand ferner auf knapp 60% reduziert werden. Berücksichtigt man diesen Anteil, kann für das Jahr 2005 ein Bestand von knapp 1,0 Mio. (60% von 1,66 Mio.) und für das Jahr 2020 ein Bestand von 1,04 Mio. (60% von 1,73 Mio.) beheizten Nichtwohngebäuden angesetzt werden.

Der Bestand an Wohngebäuden ist demgegenüber deutlich besser dokumentiert. Das Statistische Bundesamt erhebt jährlich die Anzahl an Wohngebäuden, Wohneinheiten und Wohnfläche. Zusammen mit einer weiteren Prognoseberechnung nach [18] kann der Bestand an Wohngebäuden im Jahr 2005 auf 17,6 Mio. und für das Jahr 2016 auf 19,0 Mio. Wohngebäude beziffert werden.

Betrachtet man den Gebäudebestand Deutschlands im Jahr 2005 (vgl. Abbildung 4-1), so ist festzustellen, dass – bezogen auf die Wohn- bzw. Nutzfläche von insgesamt 3,9 Mrd. m<sup>2</sup> – der Anteil der Wohngebäude bei 85% und der der beheizten Nichtwohngebäude bei 15% liegt. Geht es um die Anzahl der Berechnungsobjekte, so entfallen von insgesamt 18,6 Mio. Gebäuden 95% auf Wohn- und nur 5% auf beheizte Nichtwohngebäude.



**Abbildung 4-1:** Bestand an Wohngebäuden und beheizten Nichtwohngebäuden sowie Angabe der Wohn- und Nutzfläche in Deutschland für das Jahr 2005

Ein Vergleich der jeweiligen Bestandszahlen der Jahre 1995 und 2005 und der Prognoseberechnungen für die Jahre 2016 für Wohngebäude und 2020 für Nichtwohngebäude zeigt ein konstantes Verhältnis von 95% zu 5% auf. Es kann also stets von einem durch das Jahr 2005 repräsentativen Verhältnis der Gebäudetypen ausgegangen werden. Bezüglich der Wohn- bzw. Nutzflächen wurde im Folgenden ein ebenfalls konstantes Verhältnis von 85% zu 15% festgelegt, da davon auszugehen ist, dass die neu errichteten beheizten Nichtwohngebäude dem bisherigen Flächentrend folgen.

### Schlussfolgerung

Aufgrund der statistisch in Anzahl und Fläche belegten Überzahl an Wohngebäuden werden für die weiteren Betrachtungen ausschließlich Daten dieser Gebäudegruppe herangezogen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die folgenden Ausführungen für diejenigen Nichtwohngebäude, welche *wohnungsbauähnlich* sind, übernommen werden können.

#### **4.2.2 Geometrische Struktur des deutschen Wohngebäudebestandes (Gebäudetypologie)**

Das Institut Wohnen und Umwelt (IWU) hat 2003 die „deutsche Gebäudetypologie - Systematik und Datensätze“ [19] veröffentlicht. In diesem Dokument wurde der Bestand an Wohngebäuden in 44 Klassen eingeteilt. Die Einteilung erfolgte nach Gebäudetyp (Ein-, Mehr-, Reihen- oder auch Hochhaus) und Baualter. Jede Klasse wurde durch ein repräsentatives Gebäude beschrieben und die Fläche der Wohneinheiten – also Gesamtwohnfläche der Gebäude – und die Anzahl der Wohneinheiten der Gebäude zugrunde gelegt. Gestützt durch Datenreihen des Statistischen Bundesamtes (siehe [20] und [21]) wurde diese Typologie bis Ende 2007 aktualisiert und kann „bei Fragestellungen, die den Heizwärme- bzw. Energiebedarf betreffen, als eine geeignete Ausgangsbasis für Hochrechnungen auf den gesamten deutschen Gebäudebestand verwendet werden“ [22]. Da die Auswertung des Bestandes unter energetischen Gesichtspunkten geführt wurde, bietet sich die Nutzung der abgeleiteten Daten an. Die Typologie ist Abbildung 9-8 zu entnehmen.

Da die hier entwickelten Verfahren ausschließlich für sanierte Bestandsgebäude und Neubauten gelten sollen, steht die Betrachtung der geometrischen Bandbreite der Gebäudetypen im Vordergrund. Da eines der Ziele der IWU-Typologie [22] in der „Einschätzung des energetischen Sanierungsbedarfs der bestehenden Gebäudesubstanz“ bestand, wurden den 44 Klassen repräsentative Gebäude mit Angabe wärmeschutzrelevanter Kenngrößen zugeordnet. Jedem Gebäudetyp wurden die in Tabelle 4-1 aufgeführten geometrischen Werte hinterlegt, deren Minimal- und Maximalwerte (rot markiert) für den Gebäudekatalog als Korridor der Variationsbreite herangezogen wurden.

**Tabelle 4-1:** Auswertung der Gebäudetypologie [22] hinsichtlich der minimalen und maximalen Geometriewerte für Einfamilien- und Reihenhäuser (EFH/RH), Mehrfamilienhäuser (MFH), großes Mehrfamilienhäuser (GMH) und Hochhäuser (HH)

Kenngröße	EFH / RH		MFH		GMH		HH	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
beheizte Nutzfläche in m <sup>2</sup> <sup>15)</sup>	85	275	280	2.845	750	3.535	4.795	18.015
mittlere lichte Raumhöhe in m	2,3	2,9	2,5	3,0	2,5	2,9	2,5	2,7
Anzahl Geschosse	1	2	3	4	5	8	10	16
Die wärmeübertragende Hüllfläche A in m <sup>3</sup>	145	650	405	4.495	835	4.880	4.945	20.145
A/V-Verhältnis nach EnEV in 1/m	0,40	0,90	0,30	0,66	0,25	0,49	0,23	0,29

Die Ableitung und Diskussion der für die Parametervariation genutzten Werte erfolgt in Kapitel 4.3.

### 4.2.3 Das Dämm-Niveau

Die Anforderungen an die Dämmwirkung der Hüllfläche beheizter Gebäude sind in den letzten Jahren stark gestiegen. Die maximal zulässigen U-Werte erfuhren eine deutliche Verringerung aufgrund stark erhöhter Wärmeschutzanforderungen. Diese Anforderungen werden voraussichtlich auch in Zukunft steigen. Ein vom heutigen Standpunkt aus betrachtetes langfristiges Ziel seitens des Gesetzgebers (durch die EU-Gebäuderichtlinie (EPDB) 2010 [2] gefordert) ist die Standardisierung des sogenannten „Niedrigstenergiehauses“ („nearly zero-energy building“) bis zum Jahr 2021, welches seitens der dämmenden Hüllfläche dem heute bereits gängigen Passivhausniveaus entspricht.

---

<sup>15)</sup> Auf ganze 5-er-Schritte gerundet.

Für die Reduzierung der Eingabewerte wurden im Zuge dieser Arbeit vier Dämm-Niveaus definiert. Eine Anwendung des Verfahrens 2. Genauigkeit soll vom sanierten Bestand bis zum mit EnEV 2021 avisierten Niedrigstenergiehaus reichen, das eine Verschärfung der Anforderungen an das Dämmniveau von etwa 32% gegenüber der Werte der EnEV 2009 darstellt. Die Bezugswerte *EnEV 2009* sind der EnEV 2009 – Tabelle 1 „Ausführung des Referenzgebäudes“ entnommen. In Tabelle 4-2 sind die vier Dämmniveaus mitsamt den repräsentativen U-Werten aufgeführt. Die Werte repräsentieren den für jedes Dämmniveau höchsten respektive schlechtesten U-Wert zur Erzeugung sicherer Ergebnisse.

**Tabelle 4-2:** Definition der vier betrachteten Dämm-Niveaus mit Angabe der zugeordneten repräsentativen U-Werte in W/(m<sup>2</sup>·K)

<b>Regelbauteil (mit Index)</b>	<b>1 Sanierter Bestand</b>	<b>2 EnEV 2009</b>	<b>3 EnEV 2009 + 15%</b>	<b>4 EnEV 2009 + 32%</b>
Türen der Außenwand	1,80	1,60	1,30	1,00
Fenster und Fenstertüren der Außenwand	1,40	1,20	1,00	0,80
Dachflächenfenster				
Kellerfenster				
Außenwand an Außenluft	0,31	0,26	0,21	0,15
Wände gegen Erdreich				
Dächer, Dachschrägen zu Außenluft	0,21	0,18	0,15	0,12
Flachdächer an Außenluft				
Decken zu unbeheizten Räumen nach oben				
Decken zu Außenluft nach unten	0,35	0,25	0,20	0,15
Decken zu unbeheizten Räumen nach unten	0,35	0,30	0,25	0,20
Wände gegen unbeheizte Räume				
Decken gegen Erdreich (Bodenplatten)				

Für jede Konstruktionsart und jedes Dämmniveau wurden stellvertretende bzw. repräsentative Bauteilschichtungen definiert. In Anhang 9.7 sind die gewählten Aufbauten aufgeführt. Diese wurden nicht nach statistisch dominanten Gesichtspunkten, sondern hinsichtlich der schlechtesten Wärmebrückenwirkung ausgewählt.

### 4.3 Variationsbandbreite

#### 4.3.1 Thermisch dominante und variable Eingabewerte (Parameter)

Tabelle 4-3 zeigt die ermittelten thermisch relevanten Eingabewerte und deren Varianten auf. Aufgrund der sich daraus ergebenden Parameterkombination umfasst der Gebäudekatalog somit 407.040 repräsentative fiktive Gebäude.

**Tabelle 4-3:** Darstellung der thermisch dominanten Eingabewerte und deren Varianten

Pos	Eingabewerte	Auswahl / Variante
1	Beheizte Nutzfläche (Gebäudetyp)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50 bis 20.000 m<sup>2</sup> (vgl. Tabelle 4-1)</li> </ul>
2	Dämmniveau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sanierter Bestand</li> <li>• EnEV 2009</li> <li>• EnEV 2009 + 15%</li> <li>• EnEV 2009 + 32%</li> </ul>
3	Fensterflächenanteil $f_{Fen}$ an AW-Fläche	10 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 55 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90%
4	Konstruktionsart	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einschalige Wand mit WDVS</li> <li>• Zweischalige Wand mit Kerndämmung</li> <li>• Monolithische Wand</li> </ul>
5	Ausführung der in die Außenwand einbindenden Decken	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ohne Balkon</li> <li>• mit Balkon</li> </ul>
6	Sturz-Ausführung bei Fenstern und Fenstertüren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ohne Rollladenkasten</li> <li>• mit Rollladenkasten</li> </ul>
7	Fensterposition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in der Wandebene</li> <li>• in der Dämmebene</li> </ul>
8	Lage der Dämmung im unteren Gebäudeabschluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>• innenseitig</li> <li>• außenseitig</li> </ul>
9	Ausführung der Kimmsteinlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ohne Kimmstein</li> <li>• mit Kimmstein</li> </ul>
10	Temperierung des Dachgeschosses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• unbeheizt</li> <li>• beheizt</li> </ul>
11	Unterkellerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• unterkellert</li> <li>• nicht unterkellert</li> </ul>
12	Temperierung des Kellergeschosses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• unbeheizt</li> <li>• beheizt</li> </ul>
13	Art der Gründung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Streifengründung</li> <li>• Flachgründung</li> </ul>

Eine Reduzierung auf 13 zu variierende thermisch dominante Parameter bedingt die Festlegung thermisch nicht dominanter Parameter, die für das Verfahren 2. Genauigkeit auf feste Standardwerte reduziert werden sollen. Eine Darstellung dieser Parameter soll nun folgen.

#### **4.3.2 Thermisch nicht dominante und reduzierte (feste) Parameter**

Für die folgenden Parameter konnten eindeutige Aussagen getroffen werden, wann diese bezüglich der zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken die thermisch ungünstigsten Ergebnisse liefern (maximaler  $\Delta U_{WB}$ -Wert). Die nun beschriebenen Werte stellen im Verfahren 2. Genauigkeit keine Eingabewerte mehr dar.

##### **Reduzierung der Gebäude-Grundformen (des Gebäudegrundrisses)**

Es hat sich gezeigt, dass der größte  $\Delta U_{WB}$ -Wert bei quadratischen Grundrissen entsteht. Dies liegt am günstigen A/V-Verhältnis dieses Grundrisstyps. Da der  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag auf die beheizte Gebäudehüllfläche bezogen wird, wirkt sich eine kompakte Gebäudeform aufgrund der geringen Oberfläche negativ aus (vgl. Gl. 2-4). Bei ansonsten vergleichbarer geometrischer Konfiguration treten für L- und T-Grundrisse stets niedrigere  $\Delta U_{WB}$ -Zuschläge auf. Es erfolgt somit eine Reduzierung auf den **quadratischen Grundriss**.

##### **Festlegung des Dachsystems**

Die größten zusätzlichen Wärmeverluste ergeben sich je nach Gebäudegrundriss für Pult- oder Flachdächer. Da der absolute Unterschied der beiden Dachtypen vernachlässigbar gering ist, erfolgt eine Reduzierung auf ein **15 Grad geneigtes Pultdach ohne Drempe**.

Bei der Untersuchung wurden ferner vier unterschiedliche Konstruktionsarten hinsichtlich ihrer Wärmebrückenwirkung geprüft. Ein einschaliges und ein zweischaliges Massivdachsystem sowie ein zwischen- und ein aufsparrengedämmtes Dachsystem. Zwar kann die Wärmebrückenwirkung an einzelnen Anschlüssen stark divergieren, in der Gesamtaufstellung war jedoch kein signifikanter Unterschied feststellbar. Somit erfolgt eine Reduzierung auf ein **aufsparrengedämmtes Holzdach**.

##### **Festlegung der Gebäudeexposition**

Der größte  $\Delta U_{WB}$ -Wert ergibt sich in der Regel für Reihenmittel- oder -endhäuser. Dies liegt an der geringeren wärmeübertragenden Hüllfläche (Flächen aller Regelbauteile nach Gl. 2-4) bei ansonsten fast identischen Wärmebrückenverlusten gegenüber eines freistehenden Hauses. Somit erfolgt eine Reduzierung auf ein **Reihenendhaus**.

### **Festlegung der Überdämmung der Rahmen transparenter Bauteile**

Es wird davon ausgegangen, dass bei Sanierung und Neubau stets auf die Überdämmung der Rahmenbereiche transparenter Bauteile geachtet wird. Somit erfolgt eine Reduzierung auf eine **3 cm hohe Überdämmung**.

### **Festlegung der Art des Freibereichs**

Es hat sich gezeigt, dass sich ein Balkonsystem energetisch schlechter auswirkt als ein Loggiasystem. Dies liegt an der deutlich geringeren Anzahl negativ<sup>16)</sup> wirkender Wärmebrücken bei Ansatz eines Loggiasystems. Es wird stets ein **Balkonsystem über mindestens 25% des Gebäudeumfangs** angesetzt.

### **Ansatz der unbeheizten Bereiche**

Zwar kann im Berechnungs-Programm 1. Genauigkeit eine Teilbeheizung der Dach-, Regel- oder Kellergeschosse berücksichtigt werden, es hat sich aber gezeigt, dass die jeweiligen Grenzwerte *vollbeheizt* oder *unbeheizt* sichere Ergebnisse liefern und Zwischenwerte – z.B. 50% des Kellers unbeheizt – linear interpoliert werden können. Es erfolgt somit eine Reduzierung auf **reine voll- oder unbeheizte Geschosse** (vgl. Tabelle 4-3, Zeile 4 und 5).

### **Festlegung der lichten Geschosshöhe**

Die in [22] beschriebenen lichten Geschosshöhen liegen zwischen etwa 2,30 und 3,00 Metern (vgl. Tabelle 4-1). Rechnet man mit einer 20 cm dicken Deckenkonstruktion, so ergibt dies Standard-Geschosshöhen (OK Rohdecke bis OK Rohdecke) zwischen 2,50 und 3,20 Metern. Da sich stets eine geringe Geschosshöhe als thermisch ungünstigster Fall herausgestellt hat, wurden alle Berechnungen mit einer **Geschosshöhe von 2,50 Metern** durchgeführt. Dies stellt einen äußerst konservativen Ansatz – für Neubauten eine Unterschätzung um über 50 cm – dar.

---

<sup>16)</sup> Wobei mit „negativ wirkend“ die Absolutwirkung bezüglich des Transmissionswärmeverlusts gemeint ist.



### Verknüpfung der Geschossanzahl mit der beheizten Nutzfläche

Damit der Gebäudekatalog die in Tabelle 4-1 genannten Rahmenbedingungen erfüllt, wurde ein geglätteter Zusammenhang zwischen der *beheizten Nutzfläche* und der *Geschossanzahl* abgeleitet. In Tabelle 4-4 sind die geglätteten Stützstellen aufgeführt, wobei es sich dabei um reine Rechenwerte handelt.

**Tabelle 4-4:** Stützstellen der beheizten Nutzfläche und der Anzahl der Geschosse

beheizte Nutzfläche in m <sup>2</sup>	50	150	250	500	750	1.000
Geschossanzahl	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	4,5
beheizte Nutzfläche in m <sup>2</sup>	2.500	5.000	7.500	10.000	15.000	20.000
Geschossanzahl	7,0	10,0	12,0	14,0	17,0	20,0

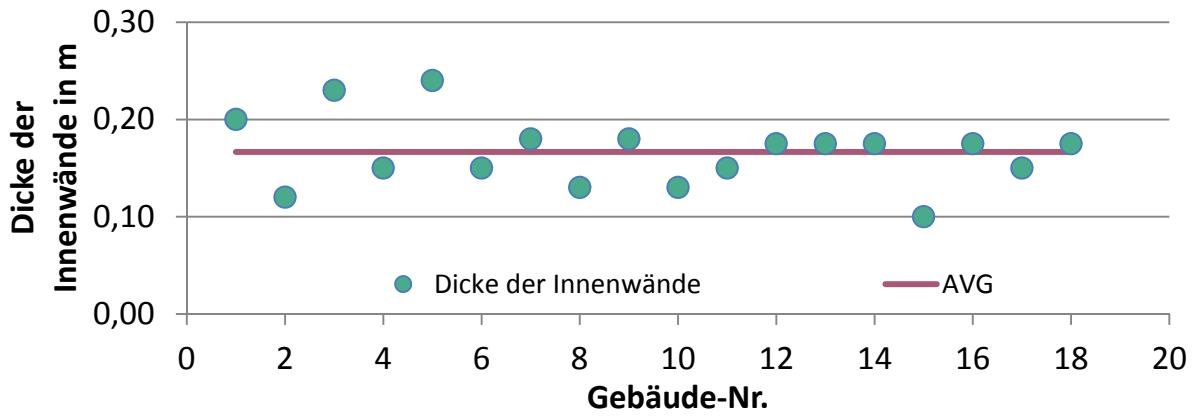
### 4.3.3 Thermisch nicht dominante und kalibrierte (feste) Parameter

Für Parameter mit indifferentem Verhalten bezüglich der Wärmebrückenverluste konnten keine eindeutigen Aussagen gemäß Kapitel 4.3.2 erfolgen. Im Zuge der unter Kapitel 5 beschriebenen Validierung wurden daher nicht nur die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen thermisch dominanten und variablen Eingabewerte abgeleitet, sondern auch verschiedene indifferente Parameter <sup>17)</sup> kalibriert. Diese nun beschriebenen Parameter stellen im Verfahren 2. Genauigkeit ebenfalls keine Eingabewerte mehr dar. Für sie werden die aus der Parameterstudie (vgl. Kapitel 5) abgeleiteten und in Tabelle 4-5 dargestellten (rot markierten) Mittelwerte (MW) angesetzt. Die genauen Ergebnisse sind dabei Abbildung 4-7 bis Abbildung 4-9 zu entnehmen.

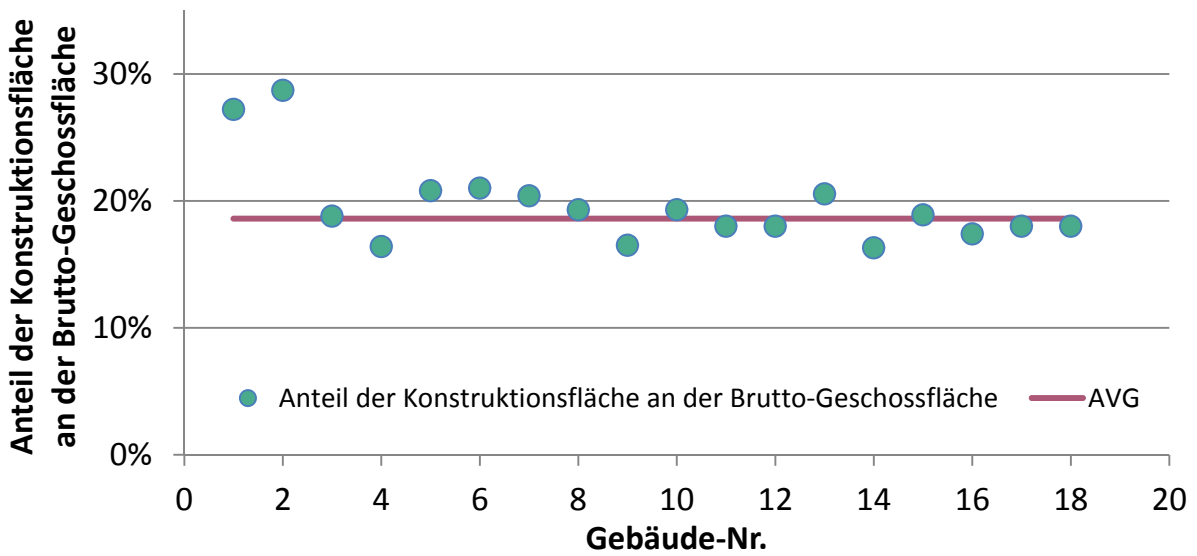
**Tabelle 4-5:** Ergebnis für die thermisch nicht dominanten und an den Beispielgebäuden nach Kapitel 5 kalibrierten (festen) Parameter

		MIN	MW	MAX
Dicke der Innenwände	$d_{IW}$	0,10	<b>0,17</b>	0,24
Anteil der Konstruktionsfläche an der Brutto-Geschossfläche	$\eta_{Kon}$	16%	<b>19%</b>	21%
Anzahl der in die Außenwand einbindenden Innenwände	$\eta_{IW-AW}$	2	<b>6</b>	17
Anteil der nicht bodentiefen Fenster an den transparenten Bauteilen im BASIS-Geschoss	$f_{Fen,trans,BG}$	/	<b>50%</b>	90%
Durchschnittliche Breite der Fenster	$b_{Fen,trans,dur}$	1,2	<b>2,1</b>	10,0

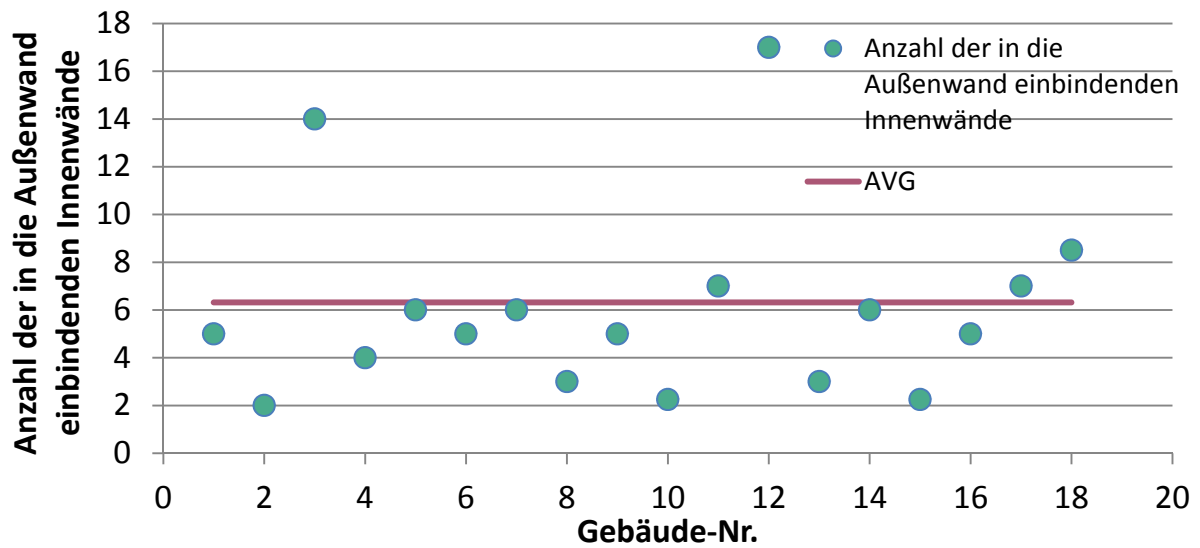
<sup>17)</sup> Geometrie- oder Materialparameter, deren Variation keinen relevanten Einfluss auf den Wärmebrückenverlust hat.



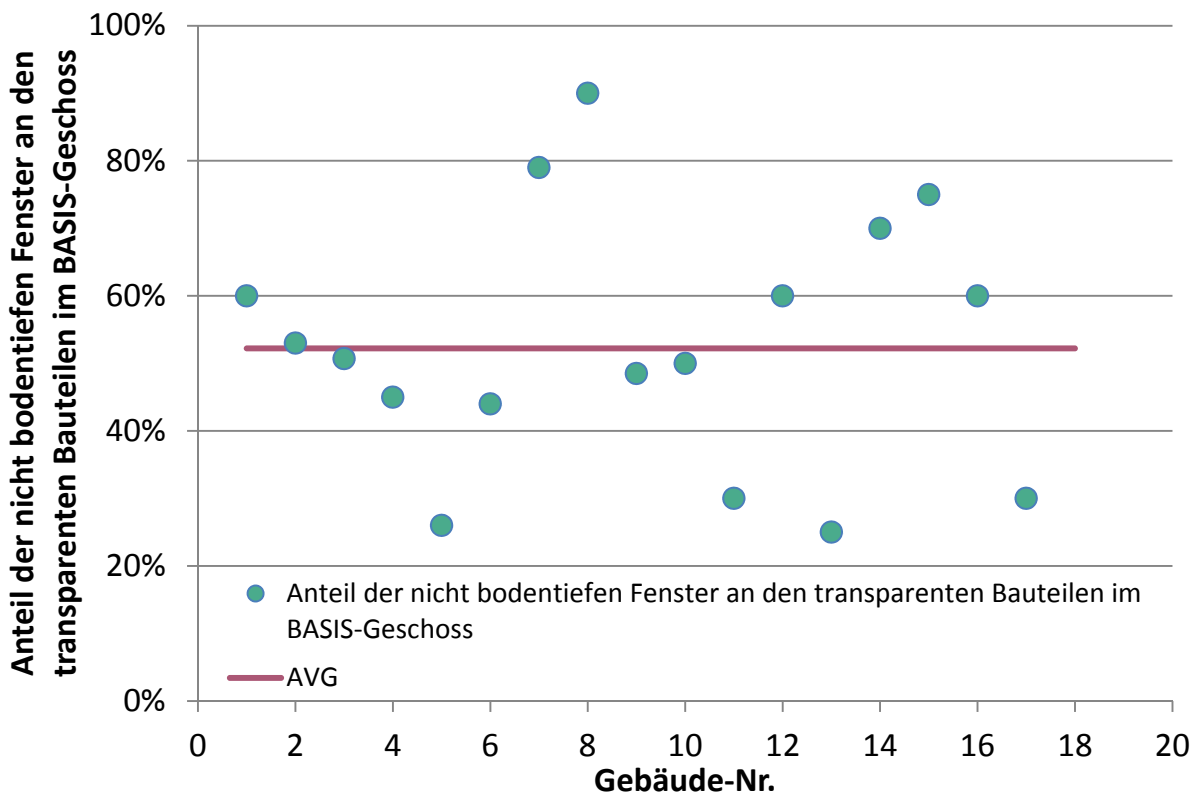
**Abbildung 4-2:** Darstellung des an den Beispielgebäuden kalibrierten Parameters „Dicke der Innenwände“



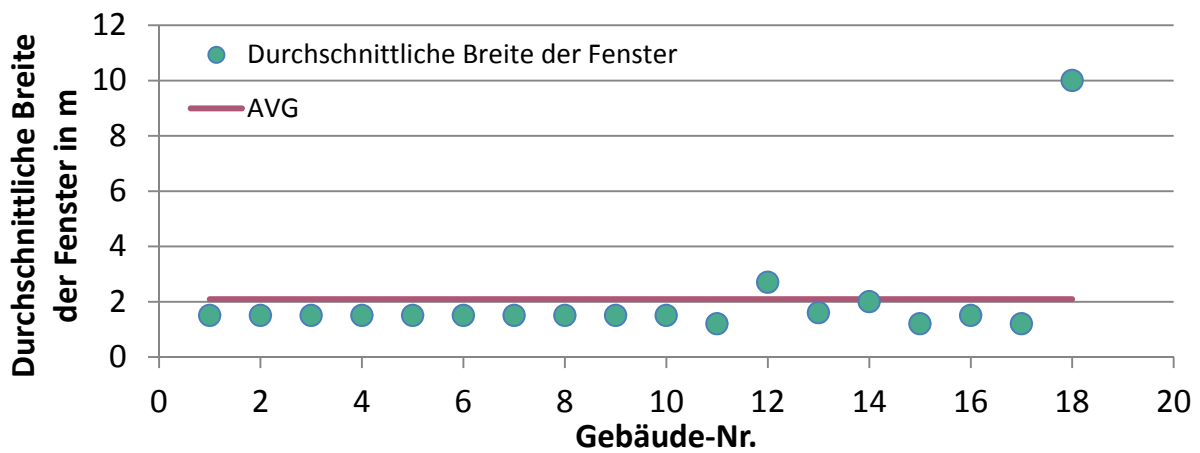
**Abbildung 4-3:** Darstellung des an den Beispielgebäuden kalibrierten Parameters „Anteil der Konstruktionsfläche an der Brutto-Geschossfläche“



**Abbildung 4-4:** Darstellung des an den Beispielgebäuden kalibrierten Parameters „Anzahl der in die Außenwand einbindenden Innenwände“



**Abbildung 4-5:** Darstellung des an den Beispielgebäuden kalibrierten Parameters „Anteil der nicht bodentiefen Fenster an den transparenten Bauteilen im BASIS-Geschoss“



**Abbildung 4-6:** Darstellung des an den Beispielgebäuden kalibrierten Parameters „Durchschnittliche Breite der Fenster“

#### 4.4 Erstellung der $\Delta U_{WB}$ -Datenbank

Mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Berechnungs-Programm wurde der in Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3 dargestellte Gebäudekatalog berechnet. Insgesamt wurden 407.040 repräsentative Gebäudekonfigurationen (vgl. Tabelle 4-3) und die dazugehörigen  $\Delta U_{WB}$ -Werte berechnet.

Zur Ableitung eines gegenüber dem Verfahren 1. Genauigkeit noch schnelleren und einfacheren Verfahrens zur Ermittlung der  $\Delta U_{WB}$ -Werte wurde versucht, vereinfachte funktionale Zusammenhänge abzuleiten. Die dabei entwickelten Algorithmen erfüllten jedoch nicht die gewünschten Anforderungen an die Genauigkeit und stellten auch keine Vereinfachung dar. Somit wurde eine Oberfläche entwickelt, die eine intuitive, einfache und schnelle Gebäudekonfiguration und die Navigation innerhalb der Datenbank ermöglicht. Im Folgenden wird das Programm zur Handhabung der Datenbank mit „*auto $\Delta u_w$* “ (**automatisierte** Ermittlung der  $\Delta U_{WB}$ -Werte auf Basis detaillierter **W**ärmebrückenberechnungen) benannt. Eine Validierung des Programms erfolgt in Kapitel 5. Auf der beigefügten CD ist diese Datenbank unter „*autoDuw.xlsm*“ zu finden und wird in Abbildung 4-7 bis Abbildung 4-9 erläutert.

Unter *Ergebnis* wird im Kopf des Tabellenblatts „DUWB-Zuschlag“ stets der zur aktuellen Gebäudekonfiguration gehörende maximale Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  gemäß Kapitel 3.1.8 angegeben. Zusätzlich erfolgt hier (als Anmerkung) die Angabe des durch weitere Optimierung mindestens erreichbaren Wertes.

Es folgen drei Seiten *Konfiguration* mit insgesamt 13 Eingabefeldern, in denen der Nutzer die thermisch dominanten Parameter gemäß Tabelle 4-3 konfigurieren kann. Eine Auswahl kann mittels der dargestellten Sinnbilder erfolgen. Die geführte Auswahl wird unter „Gewählt:“ bestätigt.

Ergebnis

**Maximaler Pauschalzuschlag der Wärmedurchgangskoeffizienten**

$\Delta U_{WB} =$  **0,015 W/(m<sup>2</sup>K)**

Bei weiterer Optimierung der Wärmebrücken ist eine Reduzierung des Wertes auf 0,004 W/(m<sup>2</sup>K) möglich.

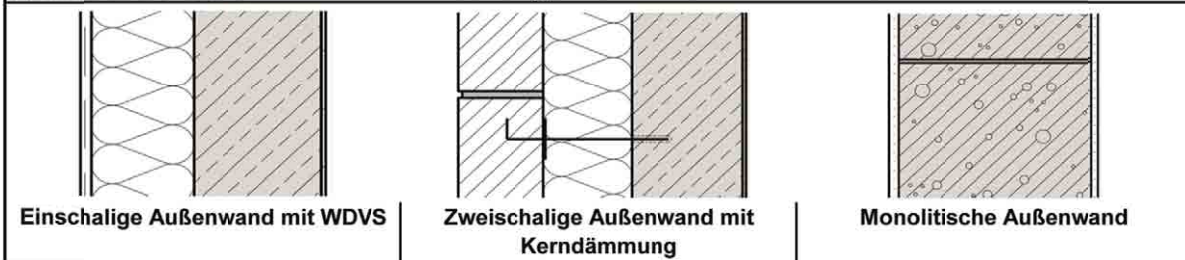
Konfiguration Seite 1

**Beheizte Wohnfläche** **264 m<sup>2</sup>**

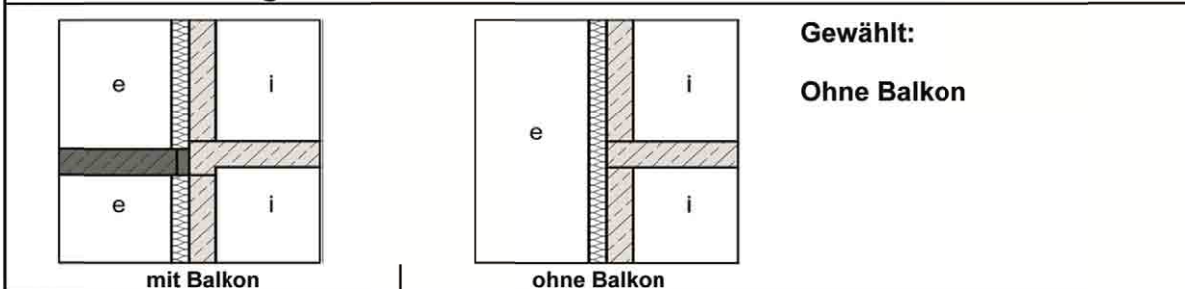
**Dämm-Niveau** **EnEV** [Erläuterung](#)

**Fensterflächenanteil** **10%**

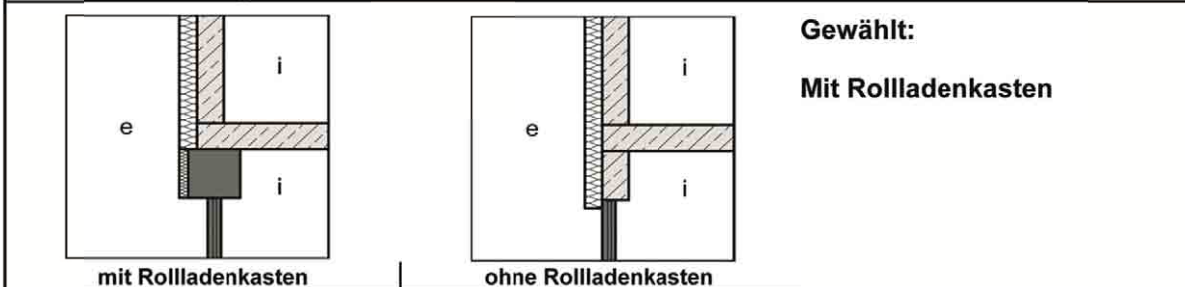
**Konstruktionsart** **Einschalige Außenwand mit WDVS**



**Balkon-Ausführung** Ohne Balkon



**Sturz-Ausführung** mit RK



**Abbildung 4-7:** Darstellung des Programms 2. Genauigkeit, Konfiguration Seite 1

Konfiguration Seite 2

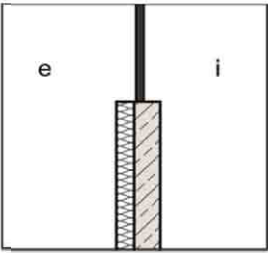
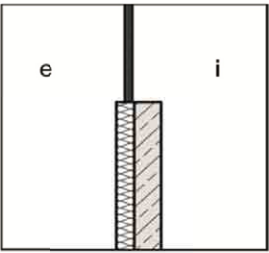
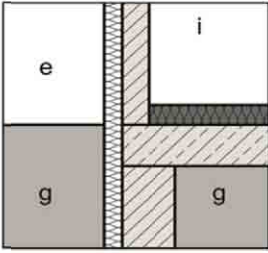
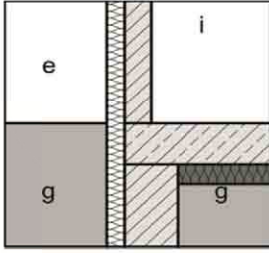
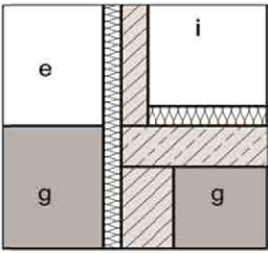
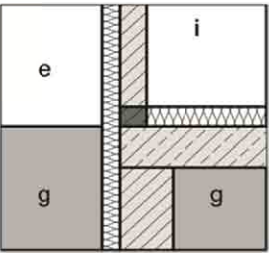
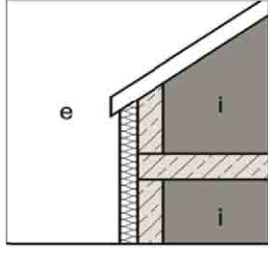
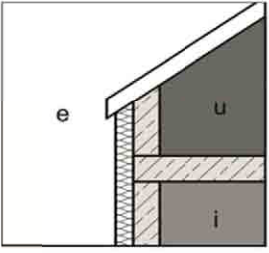
<b>Fensterposition</b>		Wand      Wand
 <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">in Wandebene</p>	 <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">in Dämmebene</p>	<p><b>Gewählt:</b></p> <p><b>Lage in Wandebene</b></p>
<b>Lage der Dämmung im unteren Gebäudeabschluss</b>		Außen
 <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">innenseitig</p>	 <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">außenseitig</p>	<p><b>Gewählt:</b></p> <p><b>Außenseitige Lage</b></p>
<b>Kimmstein-Anordnung</b>		Ohne Kimmstein
 <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">ohne Kimmstein</p>	 <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">mit Kimmstein</p>	<p><b>Gewählt:</b></p> <p><b>Ohne Kimmstein</b></p>
<b>Temperierung des Dachgeschosses</b>		beheizt
 <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">beheizt</p>	 <p style="text-align: center; margin-top: 5px;">unbeheizt</p>	<p><b>Gewählt:</b></p> <p><b>beheizt</b></p>

Abbildung 4-8: Darstellung des Programms 2. Genauigkeit, Konfiguration Seite 2

Konfiguration Seite 3

**Unterkellerung**

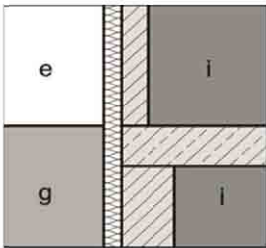
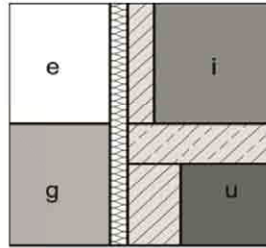
unterkellert

 <p>unterkellert</p>	 <p>nicht unterkellert</p>	<p><b>Gewählt:</b> <b>unterkellert</b></p>
---	---	--

**Temperierung des Kellergeschosses**

beheizt

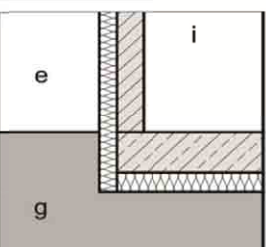
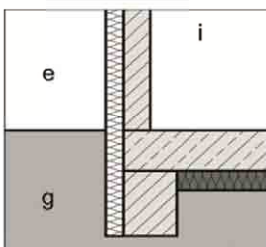
beheizt

 <p>beheizt</p>	 <p>unbeheizt</p>	<p><b>Gewählt:</b> <b>beheizt</b></p>
--	--	---

**Gründungsart**

Flachgründung

Flachgründung

 <p>Flachgründung</p>	 <p>Streifengründung</p>	<p><b>Gewählt:</b> <b>Flachgründung</b></p>
---	--	---

**Abbildung 4-9:** Darstellung des Programms 2. Genauigkeit, Konfiguration Seite 3

## 5 VALIDIERUNG UND BEWERTUNG DER PROGRAMME 1. UND 2. GENAUIGKEIT

### 5.1 Beschreibung der Beispielgebäude zur Validierung der Programme

Damit die beiden entwickelten Programme die Anforderungen in der Praxis erfüllen und eine zuverlässige Abbildung realer Gebäude möglich ist, wurden sie anhand der in Tabelle 5-1 dargestellten und detailliert berechneten Gebäude validiert.

**Tabelle 5-1:** Darstellung der zur Validierung der Programme detailliert berechneten Gebäude



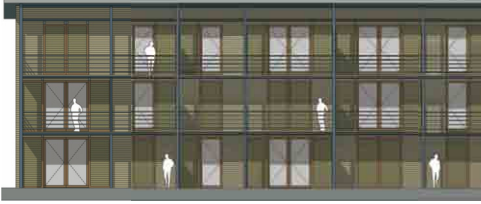
	Bild / Typ	Gebäudedaten
1	 <p>Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 128 m<sup>2</sup></li> </ul>
2	 <p>Mehrfamilienhaus / Reihenmittelhaus (MFH/RMH)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 3</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Reihenmittelhaus</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 198 m<sup>2</sup></li> </ul>
3	 <p>Mehrfamilienhaus (MFH)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 3</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Pultdach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 1.415 m<sup>2</sup></li> </ul>






	Bild / Typ	Gebäudedaten
4	 <p data-bbox="300 506 804 640">Einfamilienhaus (EFH); Entwurf und Planung: Grimm &amp; Kellner – Planen und Bauen GmbH, Peine</p>	<ul data-bbox="836 248 1326 629" style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 264 m<sup>2</sup></li> </ul>
5	 <p data-bbox="300 1025 608 1061">Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 707 1278 1133" style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 1</li> <li>• Gebäude-Grundform: L-Querschnitt</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 246 m<sup>2</sup></li> </ul>
6	 <p data-bbox="300 1487 608 1523">Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 1189 1326 1570" style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Terrasse</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Unbeheizter Bereich im KG</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 147 m<sup>2</sup></li> </ul>

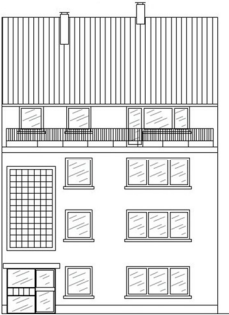
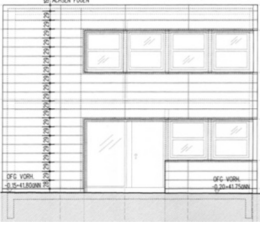






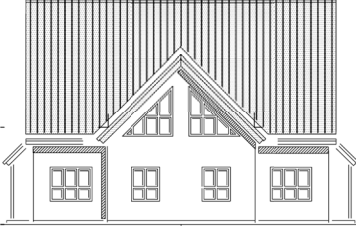



	Bild / Typ	Gebäudedaten
7	 <p>Mehrfamilienhaus / Reihenendhaus (REH/MFH)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 5</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Reihenendhaus</li> <li>• Balkone/Terrassen</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Unbeheizte Bereiche in allen Geschossen</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 455 m<sup>2</sup></li> </ul>
8	 <p>Nichtwohngebäude (NWG)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Flachdach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 110 m<sup>2</sup></li> </ul>
9	 <p>Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Unbeheizter Bereich im KG</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 243 m<sup>2</sup></li> </ul>
10	 <p>Doppelhaushälfte (EFH)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 3</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Doppelhaushälfte</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 173 m<sup>2</sup></li> </ul>

	Bild / Typ	Gebäudedaten
11	 <p data-bbox="300 488 619 533">Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 230 1281 611" style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: L</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 193 m<sup>2</sup></li> </ul>
12	 <p data-bbox="300 891 619 936">Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 633 1326 1014" style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 3</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 244 m<sup>2</sup></li> </ul>
13	 <p data-bbox="300 1328 635 1373">Doppelhaushälfte (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 1037 1326 1417" style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 3</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Doppelhaushälfte</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Unbeheiztes KG</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 167 m<sup>2</sup></li> </ul>
14	 <p data-bbox="300 1753 619 1798">Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 1440 1281 1821" style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: T</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Pultdach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 202 m<sup>2</sup></li> </ul>

	<b>Bild / Typ</b>	<b>Gebäudedaten</b>
15	 <p data-bbox="300 497 657 533">Doppelhaushälfte (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 232 1327 609" style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Doppelhaushälfte</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 103 m<sup>2</sup></li> </ul>
16	 <p data-bbox="300 900 628 936">Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 636 1327 1012" style="list-style-type: none"> <li>• Nicht unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 2</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Keine Balkone/Loggien</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 171 m<sup>2</sup></li> </ul>
17	 <p data-bbox="300 1303 628 1339">Einfamilienhaus (EFH)</p>	<ul data-bbox="836 1039 1327 1415" style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 3</li> <li>• Gebäude-Grundform: L</li> <li>• Freistehend</li> <li>• Mit Balkonen</li> <li>• Dachform: Satteldach</li> <li>• Kein unbeheizter Bereich</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 350 m<sup>2</sup></li> </ul>
18	 <p data-bbox="300 1729 657 1765">Mehrfamilienhaus (MFH)</p>	<ul data-bbox="836 1442 1327 1818" style="list-style-type: none"> <li>• Unterkellert</li> <li>• Beheizte Geschosse: 6</li> <li>• Gebäude-Grundform: Rechteck</li> <li>• Reihenmittelhaus</li> <li>• Mit Balkonen</li> <li>• Dachform: Flachdach</li> <li>• Keller überwiegend unbeheizt</li> <li>• Beheizte Nutzfläche: 1.736 m<sup>2</sup></li> </ul>

## 5.2 Validierungsergebnisse des Programms 1. Genauigkeit

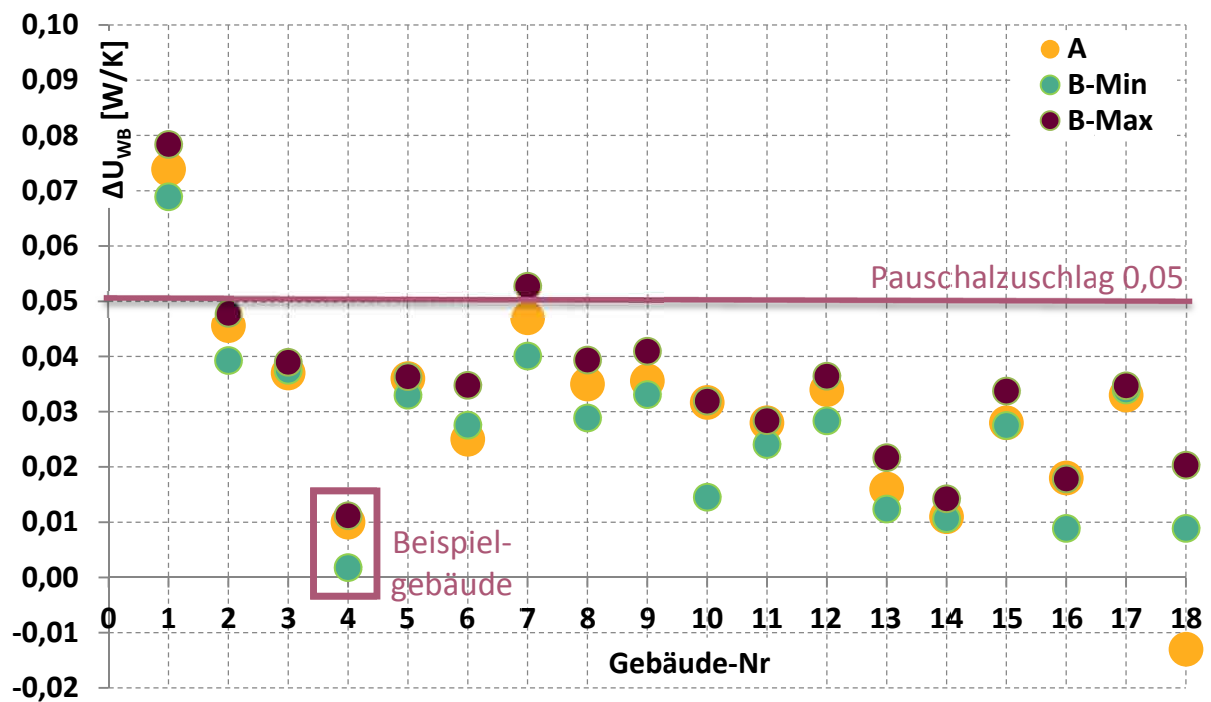
Für die dargestellten Gebäude wurde der  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag zum einen mittels einer detaillierten Handrechnung (Methode A) und zum anderen mittels des Programms 1. Genauigkeit (Methode B) ermittelt und die beiden Werte miteinander verglichen. Für eine bessere Einschätzung der beiden Berechnungsverfahren sind in Tabelle 5-2 neben den  $\Delta U_{WB}$ -Werten die maßgebenden geometrischen Werte aufgeführt.

**Tabelle 5-2:** Vergleich der Ergebnisse nach detaillierter Handrechnung (A) und automatisierter Methode (B) mit Angabe der prozentualen Abweichung für verschiedene geometrische Stützwerte und den resultierenden  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag

Nr.	Methode / Abweichung	wärmeübertr agende Hüllfläche A  in m <sup>2</sup>	beheiztes Gebäude- Volumen V <sub>e</sub>  in m <sup>3</sup>	Gebäude- Nutzfläche A <sub>n</sub>  in m <sup>2</sup>	A/V <sub>e</sub>	$\Delta U_{WB}$	
						MIN	MAX
						in W/(m <sup>2</sup> K)	
1	A	387,70	480,84	153,87	0,81	0,074	
	B	388,22	510,66	163,41	0,76	0,069	0,078
	Abw.	-0,1%	-6,2%	-6,2%	5,7%	0,005	-0,004
2	A	261,44	745,58	238,59	0,35	0,046	
	B	261,90	750,95	240,30	0,35	0,039	0,048
	Abw.	-0,2%	-0,7%	-0,7%	0,5%	0,006	-0,002
3	A	2.402,78	5.604,92	1.793,57	0,43	0,037	
	B	2.329,68	5.488,32	1.756,26	0,42	0,038	0,039
	Abw.	3,0%	2,1%	2,1%	1,0%	-0,001	-0,002
4	A	566,85	862,85	276,11	0,66	0,010	
	B	574,41	931,62	298,12	0,62	0,002	0,011
	Abw.	-1,3%	-8,0%	-8,0%	6,1%	0,008	-0,001
5	A	568,20	728,26	233,04	0,78	0,036	
	B	563,43	846,29	270,81	0,67	0,033	0,036
	Abw.	0,8%	-16,2%	-16,2%	14,7%	0,003	0,000
6	A	480,75	641,29	205,21	0,75	0,025	
	B	467,89	564,97	180,79	0,83	0,028	0,035
	Abw.	2,7%	11,9%	11,9%	-10,5%	-0,003	-0,010
...							

Nr.	Methode / Abweichung	wärmeübertr agende Hüllfläche A	beheiztes Gebäude- Volumen $V_e$	Gebäude- Nutzfläche $A_n$	$A/V_e$	$\Delta U_{WB}$	
		in $m^2$	in $m^3$	in $m^2$		MIN	MAX
						in $W/(m^2K)$	
7	A	833,89	1.552,22	496,71	0,54	0,047	
	B	850,43	1.606,48	514,07	0,53	0,040	0,053
	Abw.	-2,0%	-3,5%	-3,5%	1,5%	0,007	-0,006
8	A	344,73	424,48	135,83	0,81	0,035	
	B	339,39	394,76	126,32	0,86	0,029	0,039
	Abw.	1,5%	7,0%	7,0%	-5,9%	0,006	-0,004
9	A	572,12	861,66	275,73	0,66	0,036	
	B	577,38	849,94	271,98	0,68	0,033	0,041
	Abw.	-0,9%	1,4%	1,4%	-2,3%	0,002	-0,005
10	A	351,18	526,82	168,58	0,67	0,032	
	B	329,28	578,82	185,22	0,57	0,015	0,032
	Abw.	6,2%	-9,9%	-9,9%	14,7%	0,017	0,000
11	A	480,41	747,26	239,12	0,64	0,028	
	B	468,71	636,49	203,68	0,74	0,024	0,028
	Abw.	2,4%	14,8%	14,8%	-14,5%	0,004	0,000
12	A	559,97	800,60	256,19	0,70	0,034	
	B	594,77	986,34	315,63	0,60	0,028	0,036
	Abw.	-6,2%	-23,2%	-23,2%	13,8%	0,006	-0,002
13	A	326,11	484,80	155,14	0,67	0,016	
	B	346,14	483,68	154,78	0,72	0,012	0,022
	Abw.	-6,1%	0,2%	0,2%	-6,4%	0,004	-0,006
14	A	532,92	745,70	238,62	0,71	0,011	
	B	536,27	818,19	261,82	0,66	0,011	0,014
	Abw.	-0,6%	-9,7%	-9,7%	8,3%	0,000	-0,003
15	A	241,98	417,50	133,60	0,58	0,028	
	B	253,77	345,19	110,46	0,74	0,028	0,034
	Abw.	-4,9%	17,3%	17,3%	-26,8%	0,000	-0,006
...							

Nr.	Methode / Abweichung	wärmeübertr agende Hüllfläche A  in m <sup>2</sup>	beheiztes Gebäude- Volumen V <sub>e</sub>  in m <sup>3</sup>	Gebäude- Nutzfläche A <sub>n</sub>  in m <sup>2</sup>	A/V <sub>e</sub>	ΔU <sub>WB</sub>  MIN   MAX in W/(m <sup>2</sup> K)	
16	A	391,82	533,21	170,63	0,73	0,018	
	B	444,80	605,06	193,62	0,74	0,009	0,018
	Abw.	-13,5%	-13,5%	-13,5%	0,0%	0,009	0,000
17	A	754,04	1.134,76	363,12	0,66	0,033	
	B	718,10	1.352,01	432,64	0,53	0,034	0,035
	Abw.	4,8%	-19,1%	-19,1%	20,1%	-0,001	-0,002
18	A	2.675,90	6.993,29	2.237,85	0,38	-0,013	
	B	2.565,80	7.087,82	2.268,10	0,36	0,009	0,020
	Abw.	4,1%	-1,4%	-1,4%	5,4%	-0,022	-0,033



**Abbildung 5-1:** Vergleich der Ergebnisse nach detaillierter Handrechnung (A) und Berechnung mittels des Programms 1. Genauigkeit (B)

### 5.3 Validierungsergebnisse des Programms 2. Genauigkeit

Für die dargestellten Gebäude wurde der  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag zum einen mittels einer detaillierten Handrechnung (A) und zum anderen mittels des Programms 2. Genauigkeit (C) ermittelt und die beiden Werte miteinander verglichen. Die zugrundeliegenden Berechnungsergebnisse sind im Anhang Tabelle 5-3 zu entnehmen.

**Tabelle 5-3:** Vergleich der Ergebnisse nach detaillierter Handrechnung (A) und automatisierter Methode (C) mit Angabe der prozentualen Abweichung

Nr.	Methode / Abweichung	$\Delta U_{WB}$ in W/(m <sup>2</sup> K)	
		MIN	MIN
1	A	0,074	
	C	0,046	0,066
	Abw.	0,028	0,008
2	A	0,046	
	C	0,041	0,051
	Abw.	0,005	-0,005
3	A	0,037	
	C	0,019	0,044
	Abw.	0,018	-0,007
4	A	0,010	
	C	0,004	0,015
	Abw.	0,006	-0,005
5	A	0,036	
	C	0,050	0,071
	Abw.	-0,014	-0,035
6	A	0,025	
	C	0,019	0,039
	Abw.	0,006	-0,014
7	A	0,047	
	C	0,021	0,055
	Abw.	0,026	-0,008
...			

Nr.	Methode / Abweichung	$\Delta U_{WB}$ in W/(m <sup>2</sup> K)	
		MAX	MAX
10	A	0,032	
	C	0,021	0,038
	Abw.	0,011	-0,007
11	A	0,028	
	C	0,032	0,037
	Abw.	-0,004	-0,009
12	A	0,034	
	C	0,026	0,036
	Abw.	0,008	-0,002
13	A	0,016	
	C	0,000	0,020
	Abw.	0,016	-0,004
14	A	0,011	
	C	0,007	0,029
	Abw.	0,004	-0,018
15	A	0,028	
	C	0,007	0,030
	Abw.	0,021	-0,002
16	A	0,018	
	C	0,000	0,016
	Abw.	0,018	0,002
...			



Nr.	Methode / Abweichung	$\Delta U_{WB}$ in W/(m <sup>2</sup> K)	
		MIN	MIN
8	A	0,035	
	C	0,038	0,058
	Abw.	-0,003	-0,023
9	A	0,036	
	C	0,018	0,040
	Abw.	0,018	-0,004

Nr.	Methode / Abweichung	$\Delta U_{WB}$ in W/(m <sup>2</sup> K)	
		MAX	MAX
17	A	0,033	
	C	0,026	0,036
	Abw.	0,007	-0,003
18	A	-0,013	
	C	0,015	0,026
	Abw.	-0,028	-0,039

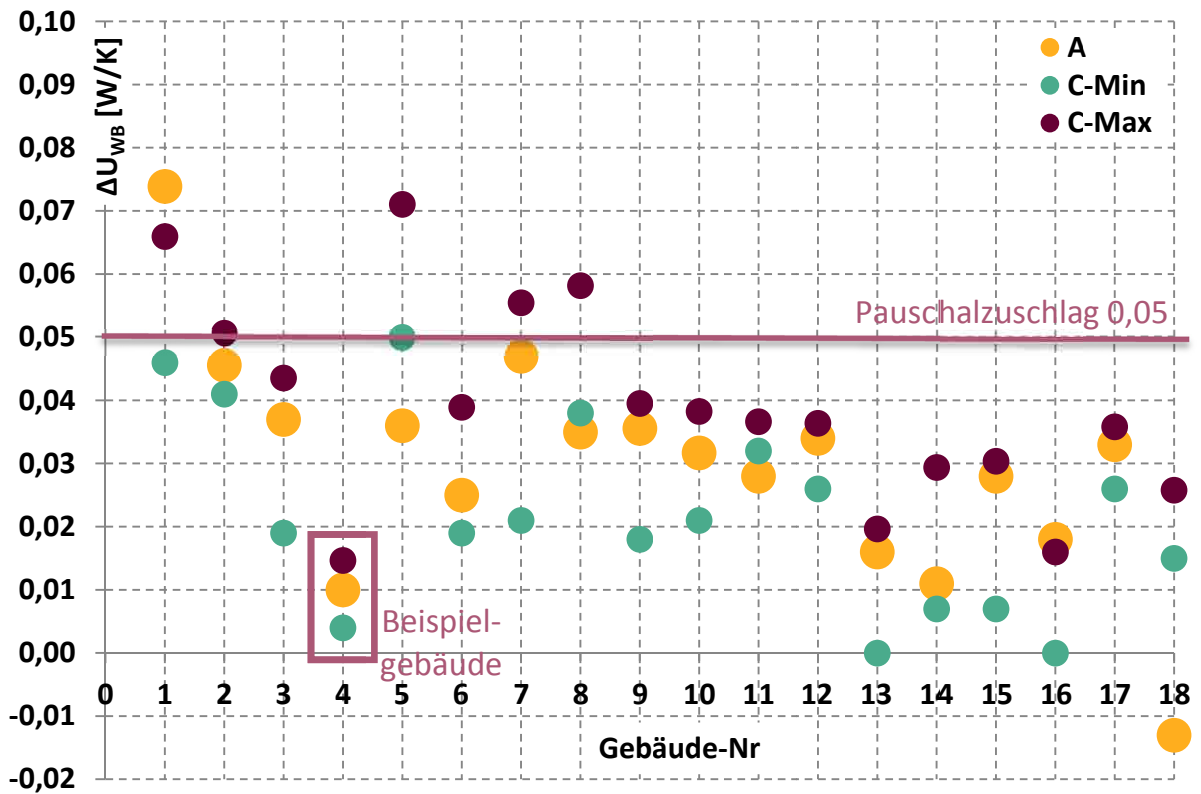


Abbildung 5-2: Vergleich der Ergebnisse nach detaillierter Handrechnung (A) und Berechnung mittels des Programms 2. Genauigkeit (B)

## 5.4 Bewertung der Validierungsergebnisse

Der Vergleich der Ergebnisse lässt folgende Schlüsse zu:

- Eine genaue Ermittlung der geometrischen Stützwerte *wärmeübertragende Hüllfläche, beheiztes Gebäude-Volumen  $V_e$ , Gebäude-Nutzfläche  $A_n$*  oder  *$A/V_e$ -Verhältnis* ist nicht möglich, da die relativen Abweichungen deutlich größer als 3% sind. Die mittlere absolute Abweichung liegt lediglich für die *wärmeübertragende Hüllfläche* bei 3,4% und zwar mit einer maximalen Abweichung von 13,5%. Die drei anderen Stützwerte werden mit einer mittleren Abweichung von knapp 9% mit maximalen Abweichungen von bis zu 27% ermittelt.
- Die Programme 1. und 2. Genauigkeit liefern bezüglich des approximierten  $\Delta U_{WB}$ -Wertes auf der „sicheren Seite liegende“ Näherungslösungen. Da ein Vergleich sehr kleiner Zahlen (z. B.  $\Delta U_{WB} < 0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) im Relativbezug kaum aussagekräftige Werte liefert, bietet sich hier die Bewertung der Absolutwerte an. Es ergeben sich absolute Abweichungen
  - für das Programms 1. Genauigkeit zwischen  $-0,033$  und  $0,000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und
  - für das Programms 2. Genauigkeit zwischen  $-0,039$  und  $0,008 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .
- **Die Programme 1. und 2. Genauigkeit liefern bezüglich des approximierten  $\Delta U_{WB}$ -Wertes stets ein exakteres und ökonomischeres Ergebnis im Vergleich zu den Pauschalzuschlägen  $\Delta U_{WB} = 0,10$  und  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  nach EnEV.**
- Ein exakteres und ökonomischeres Ergebnis im Vergleich zum Pauschalzuschlag  $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  nach ENEV liefert
  - das Programms 1. Genauigkeit für 16 von 17 (relevanten)<sup>18)</sup> geprüften Gebäuden und
  - das Programms 2. Genauigkeit für 13 von 17 (relevanten) geprüften Gebäuden.
- Eine exakte Eingrenzung mittels eines oberen maximalen und unteren minimalen approximierten  $\Delta U_{WB}$ -Wertes erfolgt
  - mittels des Programms 1. Genauigkeit für 16 von 18 geprüften Gebäuden und
  - mittels des Programms 2. Genauigkeit für 13 von 18 geprüften Gebäuden.

---

<sup>18)</sup> Für das Gebäude 1 ergab die Handrechnung A einen Wert  $> 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Beide Verfahren werden vom Verfasser als *ökonomische Näherungsverfahren* eingestuft. Für eine Anwendung

- in der Vorabschätzung der Wärmebrückenverluste im Zuge der Angebotsvergabe für Wärmeschutznachweise,
- zur Untersuchung der Gesamt-Wärmebrückeneffekte an einem Gebäude und
- zur Untersuchung des Optimierungspotentials einzelner Wärmebrücken an einem Gebäude

werden beide Verfahren als validiert und ausreichend genau eingestuft.

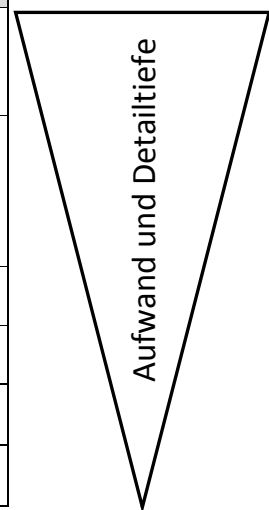
Für eine Anwendung der beiden Verfahren als Ersatz eines detaillierten Wärmebrückennachweises *und* Nutzung der Ergebnisse im Zuge eines Wärmeschutznachweises nach EnEV ist eine Feldstudie erforderlich. Durch Änderung der Programmparameter kann dann eine Genauigkeitssteigerung der Ergebnisse und ggf. eine öffentlich-rechtliche Zulassung der Verfahren erfolgen.

### 5.5 Leistungsfähigkeit der Programme 1. und 2. Genauigkeit

Die zwei Verfahren sollen den Lückenschluss zwischen bereits bekannten Verfahren zur Wärmebrückenermittlung darstellen. Im Einzelnen sind somit die sechs in Tabelle 5-4 aufgestellten Verfahren zu differenzieren.

**Tabelle 5-4:** Auflistung der vier bisher angewandten und um die im Zuge dieser Arbeit neu entwickelten beiden Verfahren zur Ermittlung von Wärmebrückenverlusten im Zuge eines EnEV-Nachweises

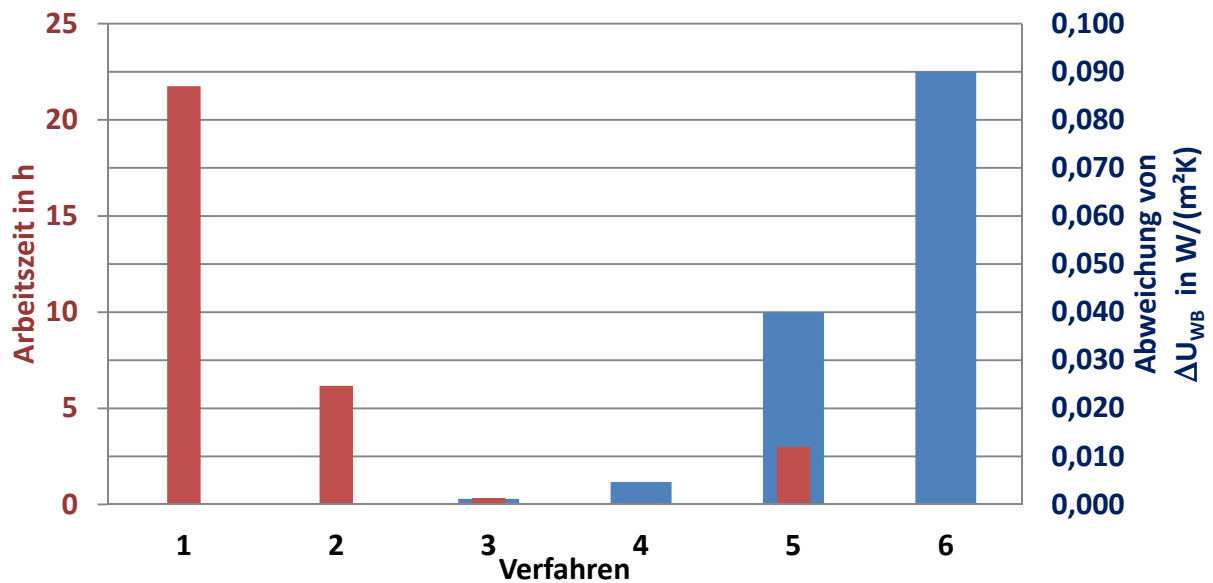
Nr.	Verfahren
1	Detaillierte Handrechnung mit Ermittlung der $\Psi$ -Werte nach DIN EN ISO 10211
2	Detaillierte Handrechnung mit Ermittlung der $\Psi$ -Werte mittels Wärmebrückenatlanten (hier z. B. dem Planungsatlas für den Hochbau [10])
3	Vereinfachtes Verfahren 1. Genauigkeit (Neu)
4	Vereinfachtes Verfahren 2. Genauigkeit (Neu)
5	Pauschalzuschlag $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach EnEV
6	Pauschalzuschlag $\Delta U_{WB} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nach EnEV



Für die sechs Verfahren gelten nun die folgenden Ansätze bzw. Annahmen:

- Die Zeit, welche für eine Einarbeitung und Vorbereitung der Planungsunterlagen benötigt wird, wird nicht berücksichtigt.
- Die detaillierte Ermittlung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  mittels einer detaillierten Wärmebrückenberechnung nach DIN EN ISO 10211 benötigt inklusive Dokumentation ca. 1 Stunde.
- Die detaillierte Ermittlung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten  $\Psi$  mittels des Planungsatlas für den Hochbau benötigt inklusive Dokumentation ca. 5 Minuten.
- Die reine Dokumentation der gesamten detaillierten Wärmebrückenaufstellung dauert ca. 30 Minuten.
- Die komplette Eingabe des Verfahrens 1. Genauigkeit (autoHw) dauert inklusive der Dokumentation ca. 20 Minuten
- Die komplette Eingabe des Verfahrens 2. Genauigkeit (autoHw) dauert inklusive der Dokumentation ca. 5 Minuten
- Der Ansatz des Pauschalwertes  $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  erfordert einen Gleichwertigkeitsnachweis nach Beiblatt 2 der DIN 4108. Hierzu wird eine pauschale Bearbeitungszeit von ca. 3 Stunden inklusive der Dokumentation angesetzt.
- Der Ansatz des Pauschalwertes  $\Delta U_{WB} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  erfordert zumindest die Eingabe bzw. Prüfung im Bilanzierungsprogramm und dauert 1 Minute.

Abbildung 5-3 zeigt die mögliche Reduzierung des Arbeitsaufwandes und der dennoch erreichbaren Genauigkeit mittels der oben genannten Verfahren an einem Beispielgebäude mit 264 m<sup>2</sup> beheizter Nutzfläche auf.



**Abbildung 5-3:** Gegenüberstellung des geschätzten Zeitaufwandes und der Abweichung des dabei ermittelten  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlages von sechs Verfahren zur Ermittlung der Wärmebrückenverluste für ein Beispielgebäude

Es ist für dieses Beispiel ersichtlich, dass mittels der beiden Verfahren ein optimales Verhältnis aus Arbeitsaufwand und Genauigkeit erzielt wird. Auch wird deutlich, dass mittels des Verfahrens 4 (Verfahren 2. Genauigkeit) – z. B. im Zuge einer Angebotsvergabe – in wenigen Minuten bereits eine sehr gute Abschätzung des tatsächlichen U-Wertzuschlags erfolgen kann und dieser in weniger als 20 Minuten mittels des Verfahrens 3 (Verfahrens 1. Genauigkeit) beinahe exakt ermittelt wird.

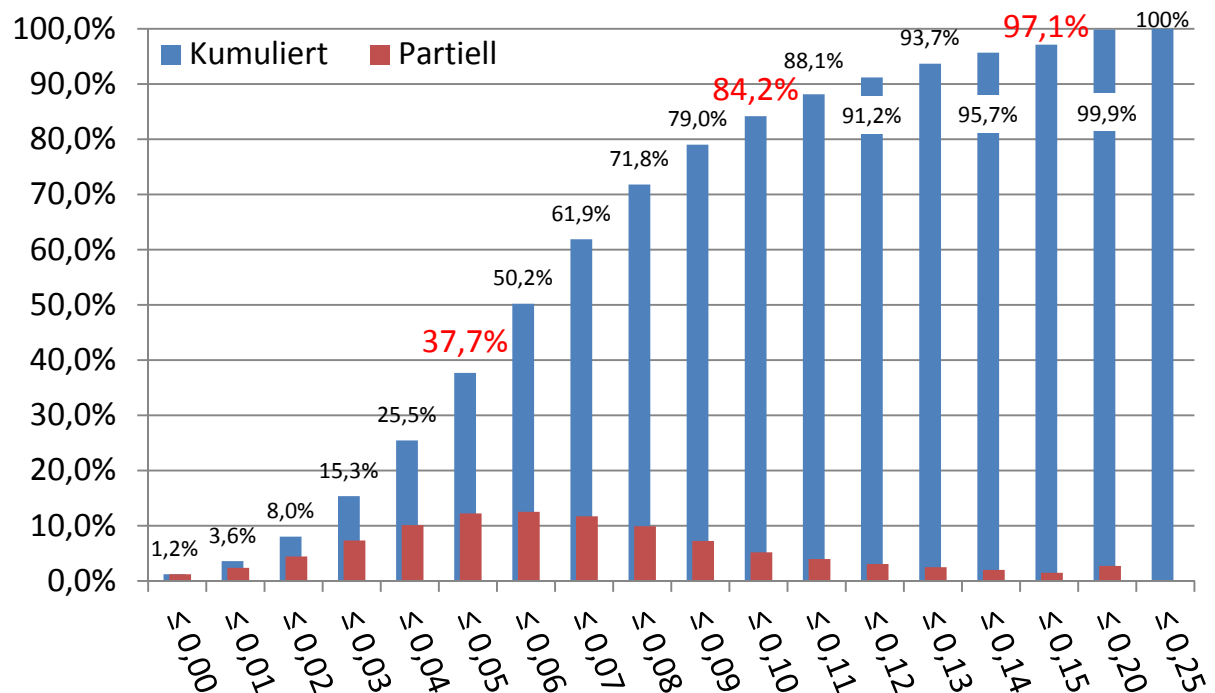
## 6 PLANUNGSHILFEN ZUR WÄRMEBRÜCKENOPTIMIERUNG

### 6.1 Einleitung

Über die reine Entwicklung der vereinfachten Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Wärmebrückenverluste hinaus sollte die Untersuchung zur Ableitung von Planungshilfen zur Wärmebrückenoptimierung dienen. Diese sollen nun folgen.

### 6.2 Bewertung der Nutzung von Pauschalzuschlägen nach EnEV

Die bei der Ableitung des Programms 2. Genauigkeit ermittelten  $\Delta U_{WB}$ -Werte übersteigen teils den als maximalen Zuschlag in der EnEV definierten Wert von 0,15 W/(m<sup>2</sup>·K). Abbildung 6-1 zeigt eine Verteilung der  $\Delta U_{WB}$ -Werte über die 407.040 Gebäude.



**Abbildung 6-1:** Verteilung der  $\Delta U_{WB}$ -Werte über die 407.040 Gebäude

Hieraus lässt sich eine Aussage über die Nutzung der nach EnEV gültigen Pauschalzuschläge ableiten. Hier steht die Frage im Vordergrund, ob die Nutzung eines Pauschalzuschlags überhaupt ein sicheres Ergebnis darstellt. Die Berechnung von 407.040 Gebäuden zeigt, dass rein statistisch eine Abschätzung der Wärmebrückenverluste mittels des Pauschalzuschlags

- $\Delta U_{WB} = 0,05$  W/(m<sup>2</sup>·K) nur für 38% der Fälle,
- $\Delta U_{WB} = 0,10$  W/(m<sup>2</sup>·K) für 84% der Fälle und
- $\Delta U_{WB} = 0,15$  W/(m<sup>2</sup>·K) immerhin für 97% der Fälle

auf der sicheren Seite liegt.

Hier ist den Ausführungen aus Kapitel 2.2.2 noch hinzuzufügen, dass die Nutzung der Pauschalzuschläge nicht einmal sichere Ergebnisse liefert. Die Wahrscheinlichkeit, mit einem Pauschalzuschlag von  $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  eine unsichere Abschätzung der Wärmebrückenverluste zu erzielen, liegt bei knapp 60%. Die anfangs geäußerte Bewertung, dass die unkritische und erst recht die ungeprüfte Nutzung dieses Pauschalzuschlags eine fahrlässige Vorgehensweise darstellt, wird hiermit auch numerisch untermauert.

Demgegenüber stellt die Nutzung der Pauschalzuschläge  $\Delta U_{WB} = 0,10$  und  $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  eine durchaus sichere Abschätzung dar.

### 6.3 Bewertung ausgewählter Wärmebrücken

#### Untersuchte Wärmebrücken und deren Klassifizierung

Für jedes der 407.040 simulierten Gebäude wurden die Wärmebrückenverluste der in Kapitel 2.2.6 dargestellten Anschlüsse detailliert ermittelt. Nun soll eine Auswertung hinsichtlich der Einzelwirkung ausgewählter Wärmebrücken erfolgen. Unter „Einzelwirkung“ sei dabei der Anteil der einzelnen Wärmebrücke am gesamten zusätzlichen Wärmeverlust aus Wärmebrücken  $H_{T,WB}$  gemeint.

Für jede Gebäudeberechnung wird die Summe aller *günstig* wirkenden Wärmebrücken – diese gehen mit einem negativen Wert in die Bilanz ein und erzeugen damit eine Verringerung – und eine zweite Summe aller *ungünstig* wirkenden Wärmebrücken – diese gehen mit einem positiven Wert in die Bilanz ein und erzeugen damit eine Erhöhung – gebildet. Mittels Gl. 6-1 kann der prozentuale Anteil jeder einzelnen günstig wirkenden Wärmebrücke und mittels Gl. 6-2 jeder einzelnen ungünstig wirkenden Wärmebrücken am gesamten zusätzlichen Wärmeverlust aus der jeweiligen Summe der günstig und ungünstig wirkenden Wärmebrücken abgeleitet werden.

$$\eta_{HT,WB,i}^+ = \frac{H_{T,WB,i}^+}{\sum_{i=1}^n H_{T,WB,i}^+} \quad \text{Gl. 6-1}$$

$$\eta_{HT,WB,i}^- = \frac{H_{T,WB,i}^-}{\sum_{i=1}^m H_{T,WB,i}^-} \quad \text{Gl. 6-2}$$

mit

$\eta_{HT,WB,i}^+$  als prozentualer Anteil des Wärmeverlustes einer günstig wirkenden zweidimensionalen Wärmebrücke  $i$  am gesamten Wärmeverlust über alle günstig wirkenden zweidimensionalen Wärmebrücken  $n$

- $\eta_{HT,WB,i}^-$  als prozentualer Anteil des Wärmeverlustes einer ungünstig wirkenden zweidimensionalen Wärmebrücke i am gesamten Wärmeverlust über alle ungünstig wirkenden zweidimensionalen Wärmebrücken m
- $H_{T,WB,i}^+$  als Wärmeverlust einer günstig wirkenden zweidimensionalen Wärmebrücke i, in W/K mit  $H_{T,WB,i}^+ = \ell_i \cdot \psi_i \leq 0$
- $H_{T,WB,i}^-$  als Wärmeverlust einer ungünstig wirkenden zweidimensionalen Wärmebrücke i, in W/K mit  $H_{T,WB,i}^- = \ell_i \cdot \psi_i > 0$

In der allgemeinen Literatur zur Wärmebrückenproblematik finden sich gängige Aussagen über die thermische Wirkung und Relevanz einzelner Wärmebrückenanschlüsse. So wird z. B. in Beiblatt 2 [8] klar auf die Vernachlässigbarkeit einzelner Anschlüsse hingewiesen. Auch kann davon ausgegangen werden, dass ein erfahrener Planer in der Lage ist, thermisch kritische Anschlüsse zu erkennen und in den Fokus der Detailplanung zu nehmen.

Eine statistisch belegte Bewertung in Form eines „Wärmebrücken-Relevanz-Katalogs“, anhand dessen ein Planer das Potential einer Wärmebrückenoptimierung einschätzen kann, fehlte bis zur Erstellung dieser Arbeit. Nun kann mit Hilfe der Untersuchung eine statistisch belastbare Aussage über die Relevanz der einzelnen Wärmebrücken getroffen werden.

Hinsichtlich der absoluten Wirkung der einzelnen Wärmebrücken sind im Folgenden *nicht-monolithisch erstellte Konstruktionen* (Einschalige Wände mit WDVS und zweischalige Außenwände mit Kerndämmung) und *monolithische Konstruktionen* zu unterscheiden. Auf Basis der Ergebnisse in Tabelle 9-6 sind die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte über alle 407.040 simulierten Gebäude in Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 aufgeführt.

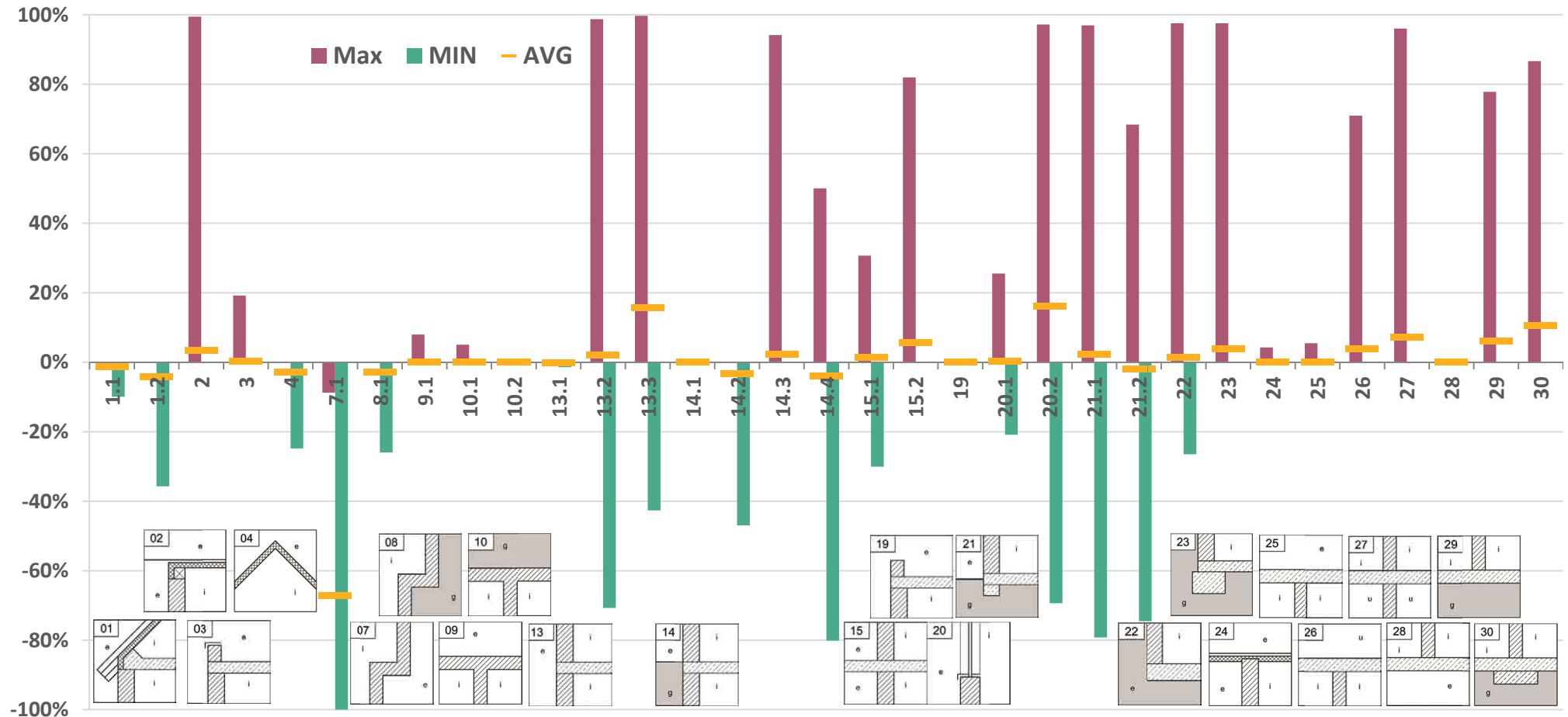
Hierbei dient der Mittelwert (AVG) als Maß der Wärmebrückenrelevanz, da damit eine Aussage über den *Regelfall* getroffen wird und hierdurch eine *qualitative* Einschätzung möglich ist. Die Minimal- und Maximalwerte wiederum dienen zur *quantitativen* Einschätzung der günstigen oder ungünstigen Wärmebrückenwirkung. Betrachtet man die ungünstig wirkenden Wärmebrücken, so kann für diese anhand der folgenden Darstellungen bereits deren „Wärmebrückenoptimierungspotential“<sup>19)</sup> abgeleitet werden. Für eine explizite Bewertung jedes einzelnen Anschlusses soll die in Tabelle 6-1 gegebene Legende dienen.

<sup>19)</sup> Besteht für ein Gebäude aufgrund geometrischer oder materialbedingter Zusammenhänge die Möglichkeit oder sogar Notwendigkeit, Wärmebrückenverluste konstruktiv zu reduzieren, so gelte in Ermangelung eines gängigen geeigneten Begriffes das „Wärmebrückenoptimierungspotential“ als Bewertungsmaß.

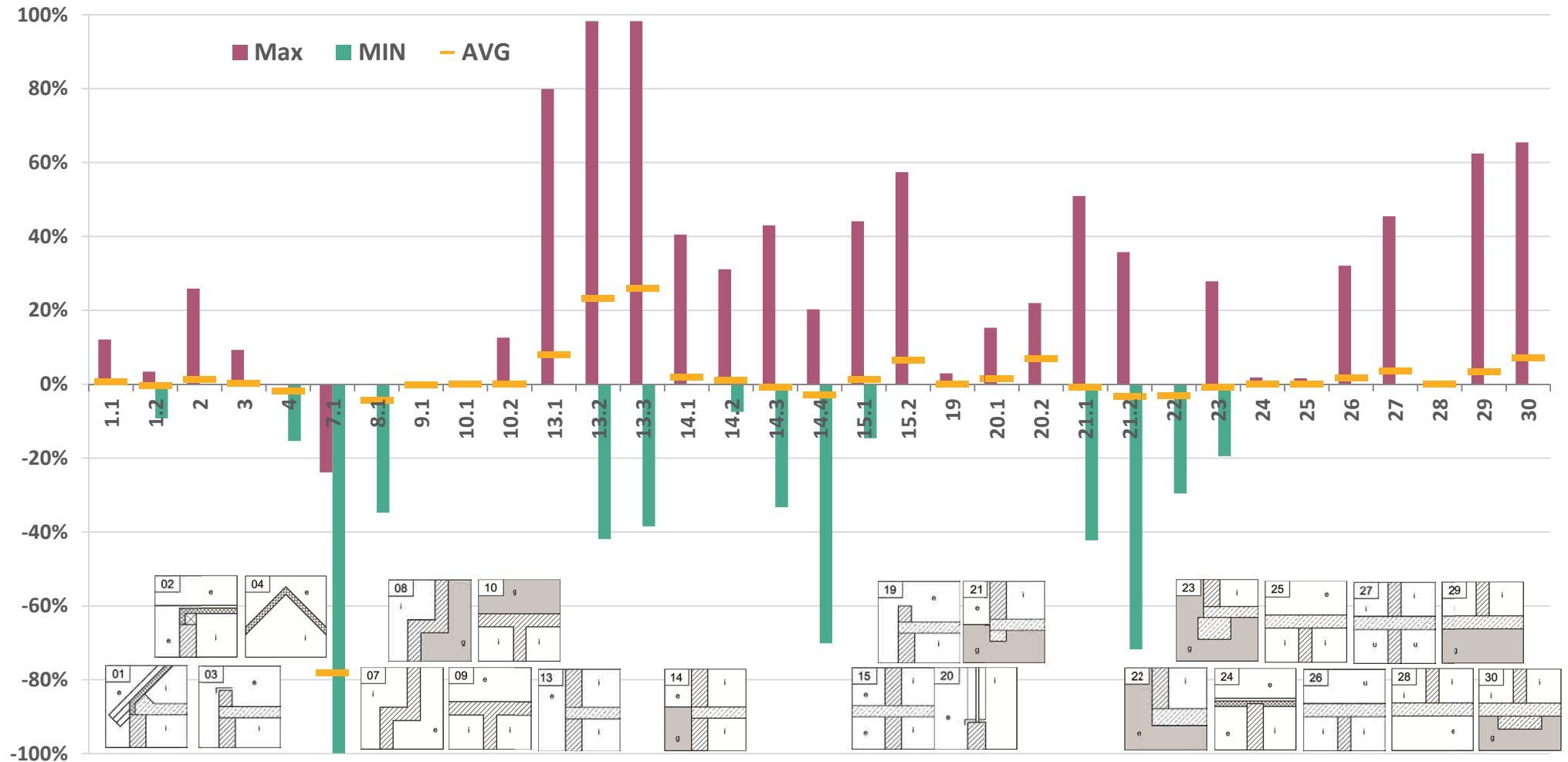


**Tabelle 6-1:** Legende zu Abbildung 6-2, Abbildung 6-3 und Tabelle 9-6; Bewertung der Wirkung der einzelnen Wärmebrücken bzgl. der energetischen Gesamtbilanz

Kriterium	Bewertung der Wirkung der einzelnen Wärmebrücken bzgl. der energetischen Gesamtbilanz
Negativer Wert	Günstige Wärmebrückenwirkung.
Positiver Wert	Ungünstige Wärmebrückenwirkung.
Mittelwert (AVG) < 0	Die Wärmebrücke wirkt sich <i>in der Regel</i> günstig aus. Eine Vernachlässigung dieser Wärmebrücke im Zuge einer detaillierten Wärmebrückenberechnung erzeugt <i>in der Regel</i> sichere aber unökonomische Ergebnisse.
Mittelwert (AVG) > 0	Die Wärmebrücke wirkt sich <i>in der Regel</i> ungünstig aus. Eine Vernachlässigung dieser Wärmebrücke im Zuge einer detaillierten Wärmebrückenberechnung führt zu unsicheren Ergebnissen. Eine Optimierung dieser Wärmebrücke <i>kann</i> sich positiv auf die Gesamtbilanz auswirken und ist daher ratsam.
Minimaler Wert (MIN) < 0	Je niedriger der Wert, desto stärker <i>kann</i> sich die Wärmebrücke günstig auswirken.
Maximaler Wert (MAX) > 0	Je höher der Wert, desto stärker <i>kann</i> sich die Wärmebrücke ungünstig auswirken.



**Abbildung 6-2:** Prozentualer Anteil ausgewählter Wärmebrücken bezogen auf den gesamten Wärmebrückenverlust  $H_{T,WB}$ . Auswertung über 271.360 **nicht-monolithisch** erstellte Gebäude. **Gelber Balken:** Mittelwert; **Grüne Säule:** Maximal möglicher Anteil bei günstiger Wärmebrückenwirkung (negativer  $\Psi$ -Wert) bezogen auf die Summe aller günstig wirkenden Wärmebrücken; **Rote Säule:** Maximal möglicher Anteil bei ungünstiger Wärmebrückenwirkung (positiver  $\Psi$ -Wert) bezogen auf die Summe aller ungünstigen wirkenden Wärmebrücken; Daten gemäß Tabelle 9-6

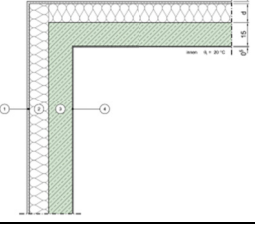
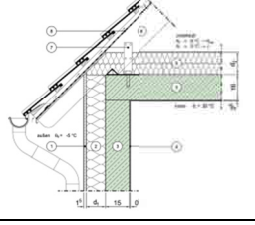
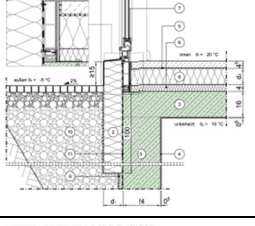
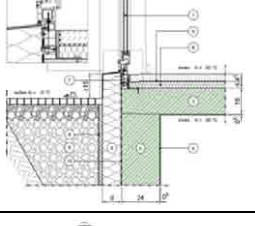
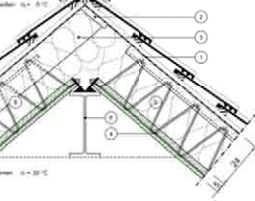


**Abbildung 6-3:** Prozentualer Anteil ausgewählter Wärmebrücken bezogen auf den gesamten Wärmebrückenverlust  $H_{T,WB}$ . Auswertung über 135.680 **monolithisch** erstellte Gebäude. **Gelber Balken:** Mittelwert; **Grüne Säule:** Maximal möglicher Anteil bei günstiger Wärmebrückenwirkung (negativer  $\Psi$ -Wert) bezogen auf die Summe aller günstig wirkenden Wärmebrücken; **Rote Säule:** Maximal möglicher Anteil bei ungünstiger Wärmebrückenwirkung (positiver  $\Psi$ -Wert) bezogen auf die Summe aller ungünstigen wirkenden Wärmebrücken; Daten gemäß Tabelle 9-6

## Die 10 Wärmebrücken mit der günstigsten Wirkung

Die in Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3 aufgezählten Anschlüsse stellen die 10 Wärmebrückenanschlüsse mit der günstigsten Wirkung auf die gesamte Wärmebrückenbilanz dar. Deren Berücksichtigung führt bei der Durchführung einer detaillierten Wärmebrückenberechnung in der Regel zur Verringerung der zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken.

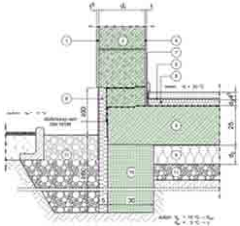
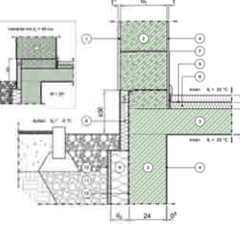
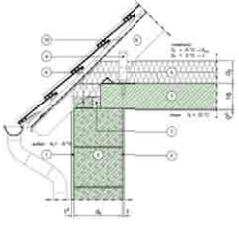
**Tabelle 6-2:** Aufstellung der 10 Wärmebrücken mit der **günstigsten Wirkung** auf die zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken bei **nicht-monolithisch erstellten Gebäuden** (hierarchische Auflistung)

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Beispiel-Bild
7.1	Außenecke an Außenluft	
1.2	Traufe des geneigten Daches zu unbeheiztem Dachraum	
14.4	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu unbeheiztem Keller, Tür-/Fensterebene	
14.2	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller, Tür-/Fensterebene	
4	First des geneigten Daches	

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Beispiel-Bild
8.1	Außenecke an Erdreich	
21.2	Bodenplatte im Sockelbereich, Tür-/Fensterebene	
1.1	Traufe des geneigten Daches zu beheiztem Dachraum	
13.1	Einbindende Decke in Außenwand	
14.1	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller, Tür-/Fensterebene	

**Tabelle 6-3:** Aufstellung der 10 Wärmebrücken mit der **günstigsten Wirkung** auf die zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken bei **monolithisch erstellten Gebäuden** (hierarchische Auflistung)

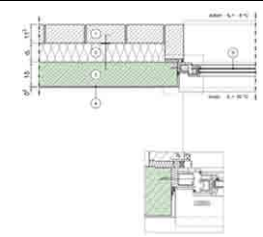
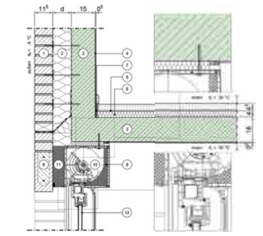
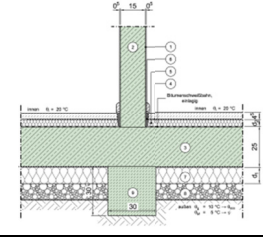
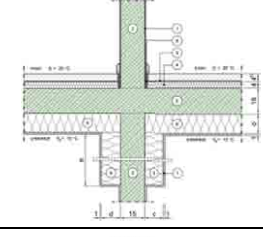
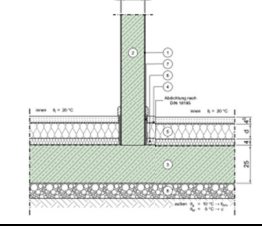
Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Beispiel-Bild
7.1	Außenecke an Außenluft	
8.1	Außenecke an Erdreich	
21.2	Bodenplatte im Sockelbereich, Tür-/Fensterebene	
22	KG-Fundament mit Flachgründung	
14.4	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu unbeheiztem Keller, Tür-/Fensterebene	
4	First des geneigten Daches	
23	KG-Fundament mit Streifengründung	

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Beispiel-Bild
21.1	Bodenplatte im Sockelbereich	
14.3	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu unbeheiztem Keller	
1.2	Traufe des geneigten Daches zu unbeheiztem Dachraum	

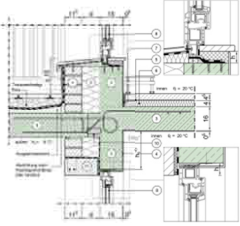
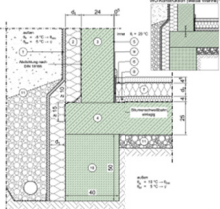
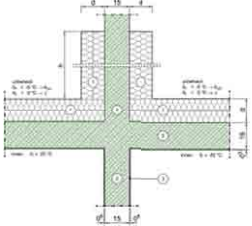
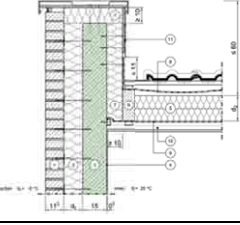
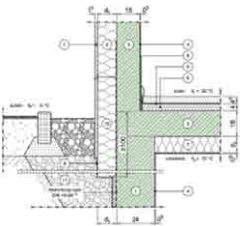
## Die 10 Wärmebrücken mit der ungünstigsten Wirkung

Die in Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5 aufgezählten Anschlüsse stellen die 10 Wärmebrücken mit der ungünstigsten Wirkung auf die gesamte Wärmebrückenbilanz dar. Deren Berücksichtigung führt bei der Durchführung einer detaillierten Wärmebrückenberechnung und bei Vernachlässigung deren thermischer Optimierung in der Regel zur Erhöhung der zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken. Eine Optimierung dieser Anschlüsse führt in der Regel zu einer deutlichen Verringerung der Wärmebrückenverluste.

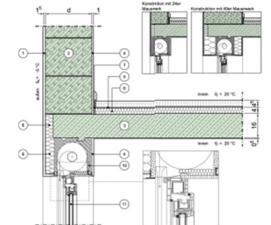
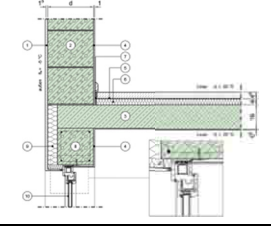
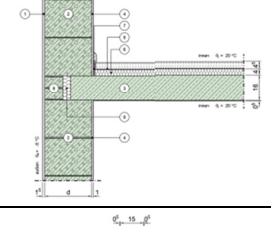
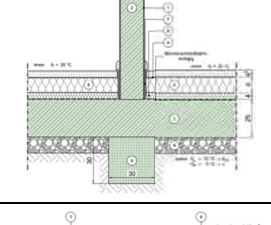
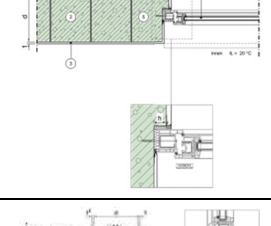
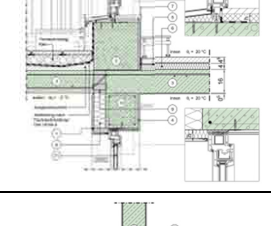
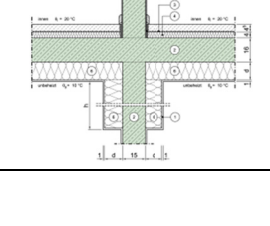
**Tabelle 6-4:** Aufstellung der 10 Wärmebrücken mit der **ungünstigsten Wirkung** auf die zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken bei **nicht monolithisch erstellten Gebäuden** (hierarchische Auflistung)

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Beispiel-Bild
20.2	Fenster- oder Türlaibung	
13.3	Einbindende Decke in Außenwand, Fenster mit Rollladenkasten	
30	Innenwand auf Bodenplatte mit Streifengründung	
27	Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach unten	
29	Innenwand auf Bodenplatte mit Flachgründung	



Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Beispiel-Bild
15.2	Thermisch getrennte Balkonplatte, Fenster/Tür in beiden Geschossen, ohne Rolladenkasten	
23	KG-Fundament mit Streifenfundament	
26	Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach oben	
2	Ortgang des geneigten Daches	
14.3	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu unbeheiztem Keller	

**Tabelle 6-5:** Aufstellung der 10 Wärmebrücken mit der **ungünstigsten Wirkung** auf die zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken bei **monolithisch erstellten Gebäuden** (hierarchische Auflistung)

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Beispiel-Bild
13.3	Einbindende Decke in Außenwand, Fenster mit Rollladenkasten	
13.2	Einbindende Decke in Außenwand, Fenster ohne Rollladenkasten	
13.1	Einbindende Decke in Außenwand	
30	Innenwand auf Bodenplatte mit Streifengründung	
20.2	Fenster- oder Türlaibung	
15.2	Thermisch getrennte Balkonplatte, Fenster/Tür in beiden Geschossen, ohne Rollladenkasten	
27	Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach unten	

Wärmebrücken-Nr. und -bezeichnung		Beispiel-Bild
29	Innenwand auf Bodenplatte mit Flachgründung	<p>The drawing shows a cross-section of a wall on a flat foundation. The wall is on the left, and the foundation is on the right. The wall has a thickness of 15 cm. The foundation is a flat slab. The drawing includes various layers and materials, with labels and dimensions. The wall is shown with a vertical section, and the foundation is shown with a horizontal section. The drawing is labeled with '15 cm' and '15 cm' at the top and bottom. There are also labels for 'Innenraum' and 'Außenraum' with temperature values of 20°C and 0°C respectively. The drawing is a technical drawing showing the construction details of a wall on a flat foundation.</p>
14.1	Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller	<p>The drawing shows a cross-section of a wall and a slab. The wall is on the left, and the slab is on the right. The wall has a thickness of 15 cm. The slab is a flat slab. The drawing includes various layers and materials, with labels and dimensions. The wall is shown with a vertical section, and the slab is shown with a horizontal section. The drawing is labeled with '15 cm' and '15 cm' at the top and bottom. There are also labels for 'Innenraum' and 'Außenraum' with temperature values of 20°C and 0°C respectively. The drawing is a technical drawing showing the construction details of an embedding slab in a basement exterior wall to a heated basement.</p>
26	Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach oben	<p>The drawing shows a cross-section of a wall and a slab. The wall is on the left, and the slab is on the right. The wall has a thickness of 15 cm. The slab is a flat slab. The drawing includes various layers and materials, with labels and dimensions. The wall is shown with a vertical section, and the slab is shown with a horizontal section. The drawing is labeled with '15 cm' and '15 cm' at the top and bottom. There are also labels for 'Innenraum' and 'Außenraum' with temperature values of 20°C and 0°C respectively. The drawing is a technical drawing showing the construction details of an interior wall of a slab to an unheated room above.</p>

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### 7.1 Zusammenfassung

Mit dem Ziel, den Energieverbrauch im Gebäudesektor zu verringern, wurden in den letzten Jahrzehnten immer höhere Anforderungen an die dämmende Hüllfläche beheizter Gebäude gestellt. Zur Erfüllung dieser Anforderungen werden komplexe energetische Berechnungen durchgeführt, die zur Dimensionierung der dämmenden Hüllfläche und deren öffentlich-rechtlichen Nachweis dienen. Neben dem Wärmeverlust der flächigen Bauteile (den Regelbauteilen) sind dabei auch die zusätzlichen Wärmeverluste über die Wärmebrücken zu berechnen. Der Nachweisführende kann bei deren Bestimmung zwischen verschiedenen Ansätzen mit niedrigem oder aber hohem Arbeitsaufwand wählen, wobei mit der Steigerung des Arbeitsaufwands stets auch eine Genauigkeitssteigerung einhergeht. Beim Ansatz mit dem höchsten Zeitaufwand und der höchsten Genauigkeit wird statt der Nutzung von Pauschalwerten eine *detaillierte Wärmebrückenberechnung* durchgeführt. Wirtschaftliche Restriktionen animieren allerdings in der Planungsphase zum Verzicht auf dieses Verfahren. Die damit verbundenen Berechnungsungenauigkeiten resultieren nicht selten in der eigentlich unnötigen Erhöhung der Dämmdicken und somit widersprüchlicherweise auch in einer unökonomischen und sogar ökologisch bedenklicheren Ausführung der dämmenden Hüllfläche. Aus diesem potentiellen Widerspruch heraus wurde die Motivation dieser Arbeit abgeleitet.

Um Planern ein Werkzeug respektive ein Verfahren an die Hand zu geben, das ihnen die Vorteile einer detaillierten Wärmebrückenberechnung bietet, ohne die ökonomischen Nachteile in Kauf nehmen zu müssen, bestand das Ziel der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung eines *vereinfachten Berechnungsverfahrens* zur Ermittlung der zusätzlichen Wärmeverluste aus Wärmebrücken. Anwendung kann ein solches Verfahren in den folgenden Planungsphasen eines beheizten Gebäudes finden:

- In der Vorabschätzung der Wärmebrückenverluste im Zuge der Angebotsvergabe für den Wärmeschutznachweis und
- In der Untersuchung des Optimierungspotentials einzelner Wärmebrücken und deren kumulativer Wirkung zur energetischer Vordimensionierung oder aber der abschließenden Detailplanung.

Grundlage der Entwicklung war der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der energetischen Gebäudebilanzierung welcher in Kapitel 2 dargestellt wurde. Es wurden alle aktuell gültigen Ansätze zur pauschalen und auch detaillierten Berechnung der Wärmebrückenverluste diskutiert und ein Ansatz(punkt) für die Aufgabenstellung abgeleitet. Das zu entwickelnde Programm sollte die schnelle Berechnung eines *approximierten*  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlages ermöglichen. Die Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens erfolgte dann in zwei Schritten aus denen sich zwei ergänzende Verfahren (Programme) ableiteten, welche in den Kapiteln 3 und 4 beschrieben sind.

Da die Entwicklung vereinfachter Verfahren mit Pauschalansätzen einhergeht, sind die Ergebnisse mit einer gewissen Ungenauigkeit gegenüber einer konventionell durchgeführten detaillierten Wärmebrückenberechnung behaftet. Abhängig von der Genauigkeit sind die beiden neuen Verfahren daher mit „Verfahren 1. Genauigkeit“ und „Verfahren 2. Genauigkeit“ benannt.

Das in Kapitel 3 beschriebene Verfahren 1. Genauigkeit stellt den Kern der Arbeit und Entwicklung dar. Es handelt sich um ein Berechnungsprogramm, welches anhand von 80 Eingabewerten eine automatisierte Berechnung aller relevanten geometrischen und thermischen Gebäudedaten (Flächen und U-Werte der Regelbauteile und die Längen und  $\Psi$ -Werte der Wärmebrücken) ermöglicht. Neben den hierfür entwickelten Algorithmen zur Berechnung der geometrischen Werte, stellt eine Datenbank mit über 3.500.000 detailliert mittels FE-Methode ermittelten  $\Psi$ -Werten den zentralen Kern des Programms dar. Damit eine schnelle und automatisierte Zuordnung der  $\Psi$ -Werte möglich ist, wurde eigens für das Programm ein Schlüsselsystem entwickelt. Mit diesem kann das Programm automatisch jeder vom Nutzer anzugebenden Gebäudekonfiguration die passenden  $\Psi$ -Werte und die zugehörigen Längen zuordnen.

Das Programm ermittelt den Transmissionswärmeverlust *inklusive detaillierter Wärmebrückenberechnung* und gibt den *approximierten*  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag aus.

Das Verfahren 1. Genauigkeit wurde abschließend noch derart erweitert, als dass eine Datenbank mit 410.000 den Gebäudebestand Deutschlands repräsentierenden Gebäudekonfigurationen hinterlegt wurde. Aus der Berechnung dieses Gebäudekatalogs wurde das Verfahren 2. Genauigkeit abgeleitet, welches in Kapitel 4 inklusive der Herleitung des Katalogs dargestellt wird. Es handelt sich um ein Programm, welches anhand von 13 Eingabewerten den *approximierten*  $\Delta U_{WB}$ -Zuschlag ausgibt.

In Kapitel 5 wurde eine Validierung der neuen Verfahren durchgeführt. Anhand von 18 Beispielgebäuden wurde der Nachweis erbracht, dass die neuen Verfahren zur automatisierten Ermittlung der zusätzliche Wärmeverluste aus Wärmebrücken unter Berücksichtigung möglicher Anwendungsgrenzen geeignet sind und auf der „sicheren Seite liegende Ergebnisse“ liefern. Dabei ermöglicht die Nutzung der daraus ermittelten Werte im Regelfall gegenüber dem Ansatz bisher gebräuchlicher Pauschalzuschläge deutlich wirtschaftlichere Konstruktionen.

Es konnte ferner gezeigt werden, dass bei Nutzung der beiden Verfahren ein optimales Verhältnis aus Arbeitsaufwand und Genauigkeit erzielt wird. Mittels des Verfahrens 4 (Verfahren 2. Genauigkeit) kann – z. B. im Zuge einer Angebotsvergabe – in wenigen Minuten bereits eine sehr gute Abschätzung des tatsächlichen U-Wertzuschlags erfolgen. In weniger als 20 Minuten kann dieser mittels des Verfahrens 3 (Verfahrens 1. Genauigkeit) sogar beinahe exakt ermittelt werden.

Die entwickelten Verfahren 1. und 2. Genauigkeit (autoHw und auto $\Delta U_w$ ) werden seitens des Verfassers als *hinreichend genaue und ökonomische Näherungsverfahren* eingestuft und das Primärziel dieser Arbeit als erfüllt angesehen.

Mit Nutzung der beiden Verfahren ist der Planer somit in der Lage,

- den Transmissionswärmeverlust der Hüllfläche nicht mittels pauschaler Werte zu überschätzen und somit exakter gegenüber dem realen Verlust zu rechnen,
- die anhand des Transmissionswärmeverlusts auszulegende Heizungsanlage effizienter zu planen und/oder
- Nachweisziele des Wärmeschutznachweises ohne weitere Anpassungen der Dämmhülle (z. B. die Vergrößerung der Dämmdicken) zu erreichen.

Darüber hinaus sind zwei weitere Planungshilfen zur Wärmebrückenreduzierung entwickelt worden. Dies ist zum einen die in Kapitel 6.3 abgeleitete Klassifizierung in fünf Gebäudeklassen, welche eine im Planungsablauf erste schnelle Einordnung einer Gebäudeart hinsichtlich deren Empfindlichkeit gegenüber zusätzlichen Wärmebrückenverlusten erlaubt. Zum anderen wurde in Kapitel 6.3 ein Wärmebrücken-Relevanz-Katalog erstellt, der eine von der Konstruktionsart abhängige Einschätzung erlaubt, für welche Wärmebrücken eine detaillierte Berücksichtigung vernachlässigbar oder aber eine Optimierung äußerst wirkungs- und damit sinnvoll ist.

## 7.2 Ausblick

Seitens des Verfassers werden die beiden neuen Verfahren als geeignet für eine Praxisanwendung eingestuft, solange sichergestellt ist, dass Anwender sich stets der Anwendungsgrenzen bewusst sind. Für eine Anwendung der beiden Verfahren als Ersatz eines detaillierten Wärmebrückennachweises *und* Nutzung der Ergebnisse im Zuge eines Wärmeschutznachweises nach EnEV ist eine Feldstudie erforderlich. Durch Änderung der Programmparameter kann dann eine Genauigkeitssteigerung der Ergebnisse und ggf. eine öffentlich-rechtliche Zulassung der Verfahren erfolgen. Diese Feldstudie kann durch die Implementierung der Programme im Planungsatlas für den Hochbau erfolgen, da für diesen bereits eine repräsentativ große Anzahl von Anwendern registriert ist und die beiden Verfahren eine symbiotische Ergänzung des Planungswerkzeugs darstellen.

Basierend auf den hier erarbeiteten Grundlagen ist eine weitere Steigerung der Genauigkeit und Anwendbarkeit der Verfahren mit den folgenden weiterführenden Forschungs- respektive Arbeitsinhalten zu erzielen:

- Erweiterung der berücksichtigten Konstruktionsarten um
  - Stahlbeton-Sandwichwände
  - Hinterlüftete Fassadensysteme
  - Innengedämmte Massivwände
  - Holzständerwände (Leichtbauweise)
- Erweiterung der hinterlegten Wärmebrücken und  $\Psi$ -Werte-Datenbank im Zuge der Erweiterung des Planungsatlas für den Hochbau (zum Abschluss dieser Arbeit lag bereits eine Datenbank mit über 7.500.000  $\Psi$ -Werten bereit)
- Erweiterung der Berechnungsalgorithmen zur Abbildung mehrerer unbeheizter Bereiche pro Geschoss (zur Zeit noch auf einen beschränkt)
- Erweiterung der Grundrisstypen und Dachformen
- Erweiterung der Dämmsysteme des unteren Gebäudeabschlusses um Bodenplatten auf Glasschaumgranulat/-schotter
- Ermöglichung der „benutzerdefinierten Eingabe“ für geometrisch und thermisch dominante Stützwerte für eine maximale Anpassung an die Objektsituation
- Erzeugung eigener Datensätze für den *Bestand* und für *Neubauten*. Durch Anpassung der Randbedingungen kann eine weitere Genauigkeitssteigerung erzielt werden.

Der daraus abgeleitete Arbeitsaufwand ohne den Zeitraum einer Feldstudie wird seitens des Verfassers auf weitere 1.500 bis 2.000 Arbeitsstunden geschätzt.

## 8 LITERATUR

- [1] EnEV 2009: Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung, Berlin, 2009
- [2] EU-Gebäuderichtlinie (EPDB) 2010: Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Berlin, 2010
- [3] DIN EN 832: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude, Berlin, 2003
- [4] DIN EN 12831: Heizungsanlagen in Gebäuden, Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, Berlin, 2003
- [5] Willems, Schild, Dinter: Vieweg Handbuch Bauphysik 1 – Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung, 2006
- [6] DIN EN ISO 13789: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren, Berlin, 2008
- [7] DIN V 4108-6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Berlin, 2003
- [8] DIN 4108 Beiblatt 2: Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele, Berlin, 2003
- [9] DIN EN ISO 10211: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele, Berlin, 2006
- [10] Willems, W., Hellinger, G., Schild, K., Birkner, B.: Planungsatlas für den Hochbau, BetonMarketing Deutschland GmbH, Erkrath, 2006 bis 2012, [www.planungsatlas-hochbau.de](http://www.planungsatlas-hochbau.de)
- [11] DIN V 18599: Energetische Bewertung von Gebäuden, Berechnung des Nutz, End und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Berlin, 2005
- [12] Schild, K., Willems, W., Hellinger, G.: Current calculation rules for thermal bridges and resulting problems for the practical use, proceedings pages 985 to 992, 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland, 2011



- 
- [13] C. Groth, G. Müller: FEM für Praktiker – Band 3: Temperaturfelder, 4. Auflage, Expert Verlag, Renningen, 2001
- [14] DIN EN ISO 13370: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren, Berlin, 1998
- [15] Statistisches Bundesamt: Bautätigkeit und Wohnungen – Bestand an Wohnungen, Wiesbaden, 2008
- [16] DIN EN ISO 6946: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren, Berlin, 2005
- [17] Gutachten - Potential an Fachleuten zur Umsetzung der GebäudeRL, Schlussbericht (Langfassung) zum Dienstleistungsvorhaben 45/4 des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, 2004
- [18] Kleemann et al.: Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050, Forschungszentrum Jülich GmbH und Bremer Energie Institut, Jülich, 2000
- [19] Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze, Institut Wohnen und Umwelt, 2003
- [20] Statistisches Bundesamt, Fachserie 5, Reihen 1 und 3, Wiesbaden, 2006
- [21] Statistisches Bundesamt, Fachserie 5, Reihe 3, Wiesbaden, 2007
- [22] Diefenbach, N., Born, R: Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2007
- [23] Passivhaus Institut Darmstadt, Dr. Wolfgang Feist, [www.passiv.de](http://www.passiv.de)

## 9 ANHANG

### 9.1 Indizes

Index	Bedeutung
2D	Wert einer 2D-Berechnung
3D	Wert einer 3D-Berechnung
BG	Bezug ist das BASIS-Geschoss
D	Dach
Dä	Wärmedämmung
De	Decke
DFen	Dachfenster
Dr	Drempel
e	nach Außen (zur Außenluft)
FD	Flachdach
Fen	Fenster
FrB	„Freibereich“ (Aufenthaltsbereiche außerhalb des beheizten Gebäudevolumens)
g	zum Erdreich
GA	Gebäudeabschluss
ges	gesamt (aus Kumulation mehrerer Teilwerte)
Gr	Gründung
i	nach Innen
Kon	Konstruktion(sfläche)
krDe	auskragende Decke (Balkonplatte)
Lo	Loggia
max	Maximal-Wert bzw. zulässiger Maximal-Wert
min	minimal-Wert bzw. zulässiger Minimal-Wert
OGA	Oberer Gebäudeabschluss
opak	opake (nicht transparente) Bauteile
Ortg	Ortgang

Index	Bedeutung
RK	Rollladenkasten
se	Oberflächen-Wert außen
si	Oberflächen-Wert innen
Tr	Traufe
Tür	Tür
u	zum unbeheizten Raum
UGA	Unterer Gebäudeabschluss
W	Wand

## 9.2 Verzeichnis der allgemein verwendeten Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Physikalische Größe
$\Delta\theta / \Delta T$	K	Temperaturdifferenz
A	m <sup>2</sup>	Fläche
A <sub>ges</sub>	m <sup>2</sup>	Gesamte wärmeübertragende Hüllfläche (Summe über alle Regelbauteile i)
A <sub>i</sub>	m <sup>2</sup>	Fläche des Regelbauteils i
A <sub>n</sub>	m <sup>2</sup>	Gebäudenutzfläche
b	m	Breite
c	J/(kg·K)	spezifische Wärmekapazität
C	J/(m <sup>3</sup> ·K)	Wärmespeicherfähigkeit
$\chi_k$	W/K	Punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der punktförmigen Wärmebrücke k
d	m	Schichtdicke
$\Delta H_{T, FH}$	W/K	Spezifischer Wärmeverlust über Bauteile mit Flächenheizungen
$\Delta U_{WB}$	W/(m <sup>2</sup> ·K)	Pauschaler Zuschlag auf die U-Werte der Regelbauteile i zur Berücksichtigung von Wärmebrücken
e <sub>p</sub>	-	Anlagenaufwandszahl

Formelzeichen	Einheit	Physikalische Größe
$F_x, F_G$	-	Temperatur-Korrekturfaktor
$H_A$	W/K	Spezifischer Transmissionswärmedurchgangskoeffizient an angrenzenden Gebäuden
$H_D$	W/K	Direkter Wärmedurchgangskoeffizient zwischen beheiztem oder gekühltem Raum und der Außenumgebung durch die Gebäudehülle
$H_g$	W/K	Stationärer Wärmedurchgangskoeffizient über das Erdreich
$H_T$	W/K	Spezifischer Transmissionswärmeverlust
$H^1_T$	W/K	Spezifischer, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust
$H^1_T; H^1_{Tmax}$	W/K	Vorhandener und maximal zulässiger spezifischer, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogener Transmissionswärmeverlust
$H_{T,Regel}$	W/K	Spezifischer Transmissionswärmeverlust, Anteil der Regelbauteile
$H_{T,WB}; H_{WB}$	W/K	Spezifischer Transmissionswärmeverlust, Anteil aus Wärmebrücken
$H_u$	W/K	Spezifischer Transmissionswärmeverlust über nicht oder niedrig beheizte (unkonditionierte) Räume
$H_v$	W/K	Lüftungswärmeverlust
$\lambda$	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
$l$	m	Länge
$L$	W/K	Thermischer Leitwert
$l_k$	m	Länge der linienförmigen (baulich-konstruktiven) Wärmebrücke k
$L_s$	W/K	Thermischer Leitwert zwischen beheiztem Raum und Erdreich
$n$	$h^{-1}$	Luftwechselrate bei freier oder maschineller Lüftung

Formelzeichen	Einheit	Physikalische Größe
$n_{50}$	$h^{-1}$	Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz
$Q$	W	Wärmestrom/Wärmemenge
$Q''_P$	kWh / ( $m^2 \cdot a$ )	Vorhandener Jahres-Primärenergiebedarf
$Q''_{Pmax}$	kWh / ( $m^2 \cdot a$ )	Zulässiger Jahres-Primärenergiebedarf
$Q_i$	kWh/a	Wärmegewinne, interne
$Q_s$	kWh/a	Wärmegewinne, solare
$\rho$	$kg/m^3$	Rohdichte
$R$	( $m^2 \cdot K$ )/W	Wärmedurchlasswiderstand
$R_i$	( $m^2 \cdot K$ )/W	Wärmedurchgangswiderstand einer Bauteilschicht i
$R_{se}; R_{se}$	( $m^2 \cdot K$ )/W	Innerer und äußerer Wärmeübergangswiderstand
$T$	K	Thermodynamische Temperatur ( $T = \vartheta + 273,15$ )
$t$	s	Zeit
$U_i$	W/( $m^2 \cdot K$ )	Wärmedurchgangskoeffizient eines Regelbauteils i
$V$	$m^3$	Volumen
$V_e$	$m^3$	Beheiztes Gebäudevolumen/Volumen, brutto (nach EnEV)
$\psi_k$	W/( $m \cdot K$ )	Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmebrücke k
$\theta$	$^{\circ}C$	Celsius-Temperatur
$\theta_i; \theta_e$	$^{\circ}C$	Temperatur der Innen- und Außenluft
$\Delta\theta; \Delta T$	K	Temperaturdifferenz

### 9.3 Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen der Berechnungs-Programme

#### 1. und 2. Genauigkeit

Über die eingangs beschriebenen Formelzeichen hinaus, sind im Folgenden die im H<sub>T</sub>-Programm genutzten Formelzeichen erläutert.

Formelzeichen	Einheit	Geometrische Größe
$\gamma_{\text{Fen,trans,BG}}$	-	Verhältnis der durchschnittlichen Höhe der Fenster des BASIS-Geschosses
$\gamma_{\text{unbeh,DG(RG,KG)}}$	-	Verhältnis der Seiten des unbeheizten Bereiches im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$A_{\text{AW,BG}}$	m <sup>2</sup>	Konstruktionsfläche der Außenwände des BASIS-Geschosses
$A_{\text{AW,abs,BG}}$	m <sup>2</sup>	Absolute (maximal mögliche) Außenwandfläche im BASIS-Geschoss
$A_{\text{AW,abs,DG (RG,KG)}}$	m <sup>2</sup>	Absolute (maximal mögliche) Außenwandfläche Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$A_{\text{AW,e, DG (RG)}}$	m <sup>2</sup>	Fläche der Wände gegen Außenluft im Dachgeschoss (Regelgeschoss)
$A_{\text{AW,g,KG}}$	m <sup>2</sup>	Fläche der Wände gegen Erdreich im Kellergeschoss
$A_{\text{AW,Giebel}}$	m <sup>2</sup>	Fläche der Wände gegen Außenluft am Giebel
$A_{\text{beh,DG (RG,KG)}}$	m <sup>2</sup>	Beheizte Brutto-Fläche des Dach-, Regel- oder Kellergeschoss
$A_{\text{Brutto,BG}}$	m <sup>2</sup>	Konstruktionsfläche des BASIS-Geschosses
$A_{\text{BT,trans,BG}}$	m <sup>2</sup>	Fläche der transparenten Bauteile des BASIS-Geschosses
$A_{\text{D}}$	m <sup>2</sup>	Fläche des beheizten Daches gegen Außenluft abhängig vom Gebäudegrundriss und der Dachform und ohne Berücksichtigung der Fensterflächen
$A_{\text{D,e}}$	m <sup>2</sup>	Fläche des beheizten Daches gegen Außenluft
$A_{\text{De,e,Lo}}$	m <sup>2</sup>	Fläche der Decken nach unten gegen Außenluft (Anteil aus Loggien)
$A_{\text{De,g}}$	m <sup>2</sup>	Fläche der Decken gegen Erdreich (Bodenplatte)

Formelzeichen	Einheit	Geometrische Größe
$A_{De,u,OA}$	$m^2$	Fläche der Decken zu unbeheizten Räumen nach oben
$A_{De,u,UA}$	$m^2$	Fläche der Decken zu unbeheizten Räumen nach unten
$A_{FD,e,Lo}$	$m^2$	Fläche der Decken nach oben gegen Außenluft (Anteil aus Loggien an Flachdachfläche)
$A_{Fen}$	$m^2$	Fläche der Fenster der Geschosse über Erdreich
$A_{Fen,DG}$	$m^2$	Fläche der Fenster im Dachgeschoss
$A_{Fen,trans,BG}$	$m^2$	Fläche aller (transparenten) Fenster des BASIS-Geschosses
$A_{Fen,trans,DG (RG,KG)}$	$m^2$	Fläche aller (transparenten) Fenster im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$A_{IW,BG}$	$m^2$	Konstruktionsfläche der Innenwände des BASIS-Geschosses
$A_{Kon,BG}$	$m^2$	Konstruktionsfläche des BASIS-Geschosses
$\alpha_M$	$^\circ$	Dachneigung
$A_{Netto,BG}$	$m^2$	Netto-Geschossfläche
$A_{Tür,opak,BG}$	$m^2$	Fläche aller opaken Türen des BASIS-Geschosses
$A_{Tür,opak,RG (KG)}$	$m^2$	Fläche aller opaken Türen im Regel- oder Kellergeschoss
$A_{Tür,trans,BG}$	$m^2$	Fläche aller transparenten Türen des BASIS-Geschosses
$A_{Tür,trans,RG (KG)}$	$m^2$	Fläche aller transparenten Türen im Regel- oder Kellergeschoss
$A_{W,u}$	$m^2$	Fläche der Wände gegen unbeheizte Räume
$A_{W,u,DG (RG,KG)}$	$m^2$	Fläche der Wände gegen unbeheizte Räume im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$b_{Fen,trans,BG}$	m	Gesamtbreite der Fenster im BASIS-Geschoss (abhängig vom Fensterflächenanteil)
$b_{Fen,trans,dur,DG(RG,KG)}$	m	Durchschnittliche Breite der Fenster im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss), stets $b_{Fen,trans,dur,DG(RG,KG)} = 1,50 \text{ m}$

Formelzeichen	Einheit	Geometrische Größe
$b_{\text{Fen,trans,ges,DG(RG,KG)}}$	m	Gesamte Breite der Fenster im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$B_{\text{FrB,BG}}$	m	Breite des „Freibereichs“ im BASIS-Geschoss bzw. pro Geschoss $B_{\text{FrB,ges}} = \gamma_{\text{FrB,G}} \cdot P_{\text{BG}}$
$b_{\text{Tür,BG}}$	m	Breite der Türen im BASIS-Geschoss (stets 1,15 m)
$b_{\text{Tür,ges,RG(KG)}}$	m	Gesamte Breite der Türen/Fenstertüren im Regel- oder Kellergeschoss
$B_{\text{unbeh,DG(RG,KG)}}$	m	Breite des unbeheizten Bereiches im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$d_{\text{AW}}$	m	Dicke der Außenwände
$d_{\text{Dä,OGA}}$	m	Höhe der Dämmebene des oberen Gebäudeabschlusses über OKR
$d_{\text{ges}}$	m	Dicke des Gesamtbauteils
$d_{\text{IW}}$	m	Dicke der Innenwände
$f_{\text{Fen,beh-e.RG}}$	%	Längen-Anteil der Außenwände von beheizten Bereichen zur Außenluft/Erdreich
$f_{\text{Fen,trans,BG}}$	%	Anteil der nicht bodentiefen Fenster an den transparenten Bauteilen im BASIS-Geschoss. Für den Fall einer Kompletต์verglasung gilt stets $f_{\text{Fen,trans,BG}} = 0$
$f_{\text{Rsi}}$	-	Temperaturfaktor
$f_{\text{Fen,EnEV}}$	%	Fensterflächenanteil gemäß EnEV
$f_{\text{trans,BG}}$	%	Anteil der transparenten Bauteile des BASIS-Geschosses in Bezug auf die Netto-Geschossfläche
$f_{\text{unbeh,DG(RG,KG)}}$	%	Anteil der unbeheizten Fläche an der Brutto-Fläche des BASIS-Geschosses für das Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$\gamma_{\text{Exp,BG}}$	%	Prozentualer Anteil des Gesamtumfangs $P_{\text{G}}$ des BASIS-Geschosses zu direkt angrenzenden beheizten Nachbargebäuden
$\gamma_{\text{Fen,BG}}$	%	Prozentualer Anteil der durchschnittlichen Höhe der Fenster zur Geschoss-Höhe $h_{\text{G}}$ (stets 60% = 0,6)



Formelzeichen	Einheit	Geometrische Größe
$\gamma_{FrB,BG}$	%	Prozentualer Anteil des <i>Freibereichs</i> am Gesamtumfang $P_G$ im BASIS-Geschoss
$\gamma_{unbeh,DG (RG,KG)}$	%	Prozentualer Anteil der unbeheizten Fläche im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss) bezogen auf die Brutto-Geschossfläche
$\eta_{AE(IE,VS)}$	-	Anzahl der Außenecken (Innenecken oder Versätze)
$h_{AW,DG (RG,KG)}$	m	Höhe der Außenwände im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss) = $\ell_{AW,beh-e,DG (RG,KG)} = \ell_{IW,beh-unbeh,DG (RG,KG)}$
$h_{Dr}$	m	Höhe des Drenpels (Kniestocks) im Dachgeschoss
$h_{Fen,trans,BG}$	m	Höhe der Fenster im BASIS-Geschoss
$\eta_{Fen,trans,FB}$	-	Anzahl der Fenster im <i>Freibereich</i>
$h_{Fen,trans,DG(RG,KG)}$	m	Höhe der Fenster im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$\eta_{Fen,trans,DG(RG,KG)}$	-	Anzahl der Fenster im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss) (aufgeteilt in <i>Freibereich</i> und <i>Sonstige</i> )
$h_{First\_Tr}$	m	Höhe der Firste über der Traufe (abhängig von der Dachform)
$h_G$	m	Geschosshöhe (OKR bis OKR)
$\eta_{G,e}$ $\eta_{G,g}$	-	Anzahl der beheizten Geschosse (exklusiv beheiztem Dach mit Drenpel) über Erdreich und im Erdreich
$\eta_{IW-AW,beh}$	-	Anzahl der in die Außenwände einbindenden Innenwände von beheizten Räumen (bei Reihenendhäusern 75% und bei Reihenmittelhäusern 50%)
$\eta_{IW-AW,beh}$	-	Anzahl der in die Außenwände einbindenden Innenwände zwischen beheizten Räumen
$\eta_{IW-AW,unbeh}$	-	Anzahl der in die Außenwände einbindenden Innenwände zu unbeheizten Räumen

Formelzeichen	Einheit	Geometrische Größe
$\eta_{\text{Kon,BG}}$	-	Konstruktionsflächenanteil des BASIS-Geschosses
$\eta_{\text{Tür}}$	-	Anzahl der Wohnungstüren (nichts transparent)
$h_{\text{Tür,BG}}$	m	Höhe der Türen im BASIS-Geschoss (stets 2,15 m)
$\eta_{\text{Tür,trans,RG(KG)}}$	-	Anzahl der Türen/Fenstertüren im Regel- oder Kellergeschoss (aufgeteilt in <i>Freibereich</i> und <i>Sonstige</i> )
$\eta_{\text{Woh,BG}}$	-	Anzahl der Wohnungen des BASIS-Geschosses
$L, B, L_M, B_M$	m	Gebäude-Geometriewert (Grundriss)
$L_{\text{unbeh,DG(RG,KG)}}$	m	Länge des unbeheizten Bereiches im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{AW,beh,RG/unbeh,KG}}$	m	Horizontale Länge der Außenwände eines beheizten Bereiches (Raumes) im Erdgeschoss zu einem unbeheizten im Kellergeschoss
$l_{\text{AW,beh-e(g),DG(RG,KG)}}$	m	Horizontale Länge der Außenwände von beheizten Bereichen nach außen (zum Erdreich) im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{AW,beh-e(g),DG(RG,KG)}}$	m	Horizontale Länge der Außenwände von beheizten Bereichen (Räumen) zur Außenluft im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{AW,beh-e(g),DG(RG,KG)}}$	m	Horizontale Länge der Außenwände von beheizten Bereichen (Räumen) nach außen im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{AW,BG}}$	m	Horizontale Länge aller Außenwände im BASIS-Geschoss bezogen auf die Mittelachse der Wand
$l_{\text{AW,Exp}}$	m	Länge, über die das Gebäude an andere beheizte Gebäude angrenzt
$l_{\text{AW,unbeh,RG}}$	m	Länge der Außenwände eines unbeheizten Bereiches im EG zu einem unbeheizten im KG
$l_{\text{AW,unbeh-e(g),DG(RG,KG)}}$	m	Horizontale Länge der Außenwände von unbeheizten Bereichen (Räumen) nach außen im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{Brü,Tür,FB,RG(KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Tür-Brüstungen im Freibereich im Regel- oder Kellergeschoss

Formelzeichen	Einheit	Geometrische Größe
$l_{\text{Brü,Tür,RG(KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Tür-Brüstungen im Regel- oder Kellergeschoss
$l_{\text{IW,beh-beh,DG(RG,KG)}}$	m	Horizontale Länge der Innenwände zwischen beheizten Bereichen im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{IW,beh-unbeh,DG(RG,KG)}}$	m	Horizontale Länge der Innenwände zwischen beheizten und unbeheizten Bereichen im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{IW,BG}}$	m	Horizontale Länge aller Innenwände im BASIS-Geschoss bezogen auf die Mittelachse der Wand
$l_{\text{Laib,Fen,DG(RG,KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Fenster-Laibungen im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{Laib,Fen,DG(RG,KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Fenster-Brüstungen im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{Laib,Tür,DG(RG,KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Tür-Laibungen im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{Sturz,Fen,DG(RG,KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Fenster-Stürze im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{Sturz,Fen,FB,DG(RG,KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Fenster-Stürze im „Freibereich“ im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)
$l_{\text{Sturz,Tür,FB}}$	m	Gesamtlänge aller Tür-Stürze im Regel- oder Kellergeschoss
$l_{\text{Sturz,Tür,FB,RG(KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Tür-Stürze im <i>Freibereich</i> im Regel- oder Kellergeschoss
$l_{\text{Sturz,Tür,RG(KG)}}$	m	Gesamtlänge aller Tür-Stürze im Regel- oder Kellergeschoss
$l_{\text{VS,1}}$	m	Länge (Tiefe) des Versatzes 1
$l_{\text{VS,2}}$	m	Länge (Tiefe) des Versatzes 2
$\text{NB}_{\text{Dämmlage}}$	-	Beiwert zur Berücksichtigung der Lage der Dämmung des unteren Gebäudeabschlusses („Außen“ oder „Innen“)
$\text{NB}_{\text{Fensterlage}}$	-	Beiwert zur Berücksichtigung der Lage der Fenster

Formelzeichen	Einheit	Geometrische Größe
		bezüglich der Dämmebene (Lage in „Wandebene“ oder in „Dämmebene“)
$NB_{Gr}$	-	Beiwert zur Einstellung der Gründungsart (Flachgründung oder Streifengründung)
$NB_{Kim}$	-	Beiwert zur Berücksichtigung eines Kimmsteins ("Mit Kimmstein" oder "Ohne Kimmstein")
$NB_{RK}$	-	Beiwert zur Berücksichtigung von Rollladenkästen: "Mit Rollladenkasten" oder "Ohne Rollladenkasten "
$OL_M$	m	Ortganglänge im Gebäudeteil „M“
$OL_V$	m	Ortganglänge im Gebäudeteil „V“
$P_{BG}$	m	Perimeterumfang des BASIS-Geschosses
$T_{Lo,BG}$	m	Tiefe der Loggien
$t_{Fen/Tür}$	m	Durchschnittlicher Abstand der Fenster und Türen untereinander
$V_{FrB}$	m <sup>3</sup>	Volumen des Freibereichs bei Loggien
$\gamma_{Fen,trans,BG}$	-	Verhältnis der durchschnittlichen Höhe der Fenster des BASIS-Geschosses
$\gamma_{unbeh,DG(RG,KG)}$	-	Verhältnis der Seiten des unbeheizten Bereiches im Dachgeschoss (Regel- oder Kellergeschoss)

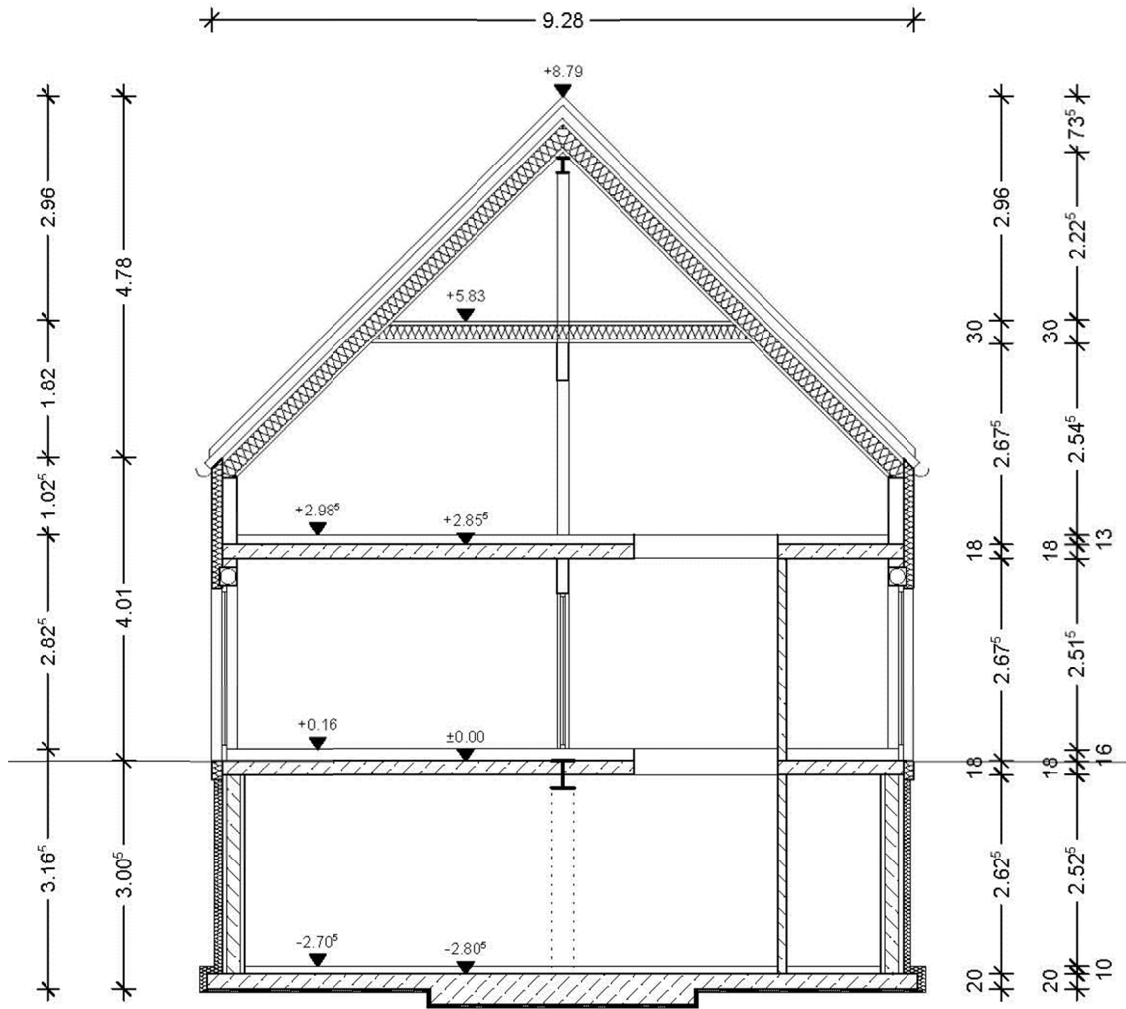
#### 9.4 Anhang zu Abschnitt 2.2.7: Detaillierte Darstellung des Beispielgebäudes



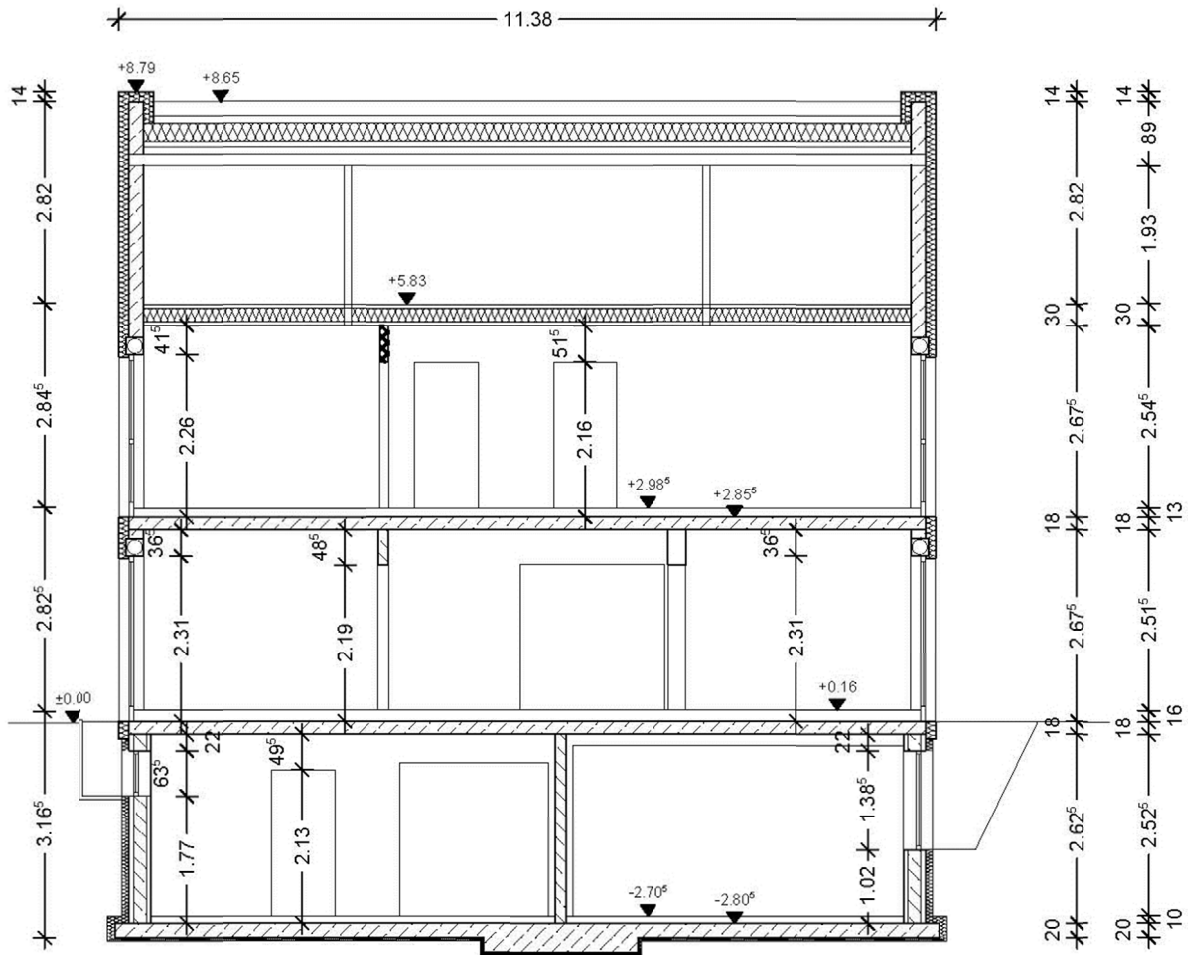
**Abbildung 9-1:** 3D-Darstellung des Beispielgebäudes mit farblicher Markierung ausgewählter linienförmiger Wärmebrücken (Nummerierung gemäß Tabelle 2-4)



**Abbildung 9-1:** 3D-Darstellung des Beispielgebäudes mit farblicher Markierung ausgewählter linienförmiger Wärmebrücken (Nummerierung gemäß Tabelle 2-4)

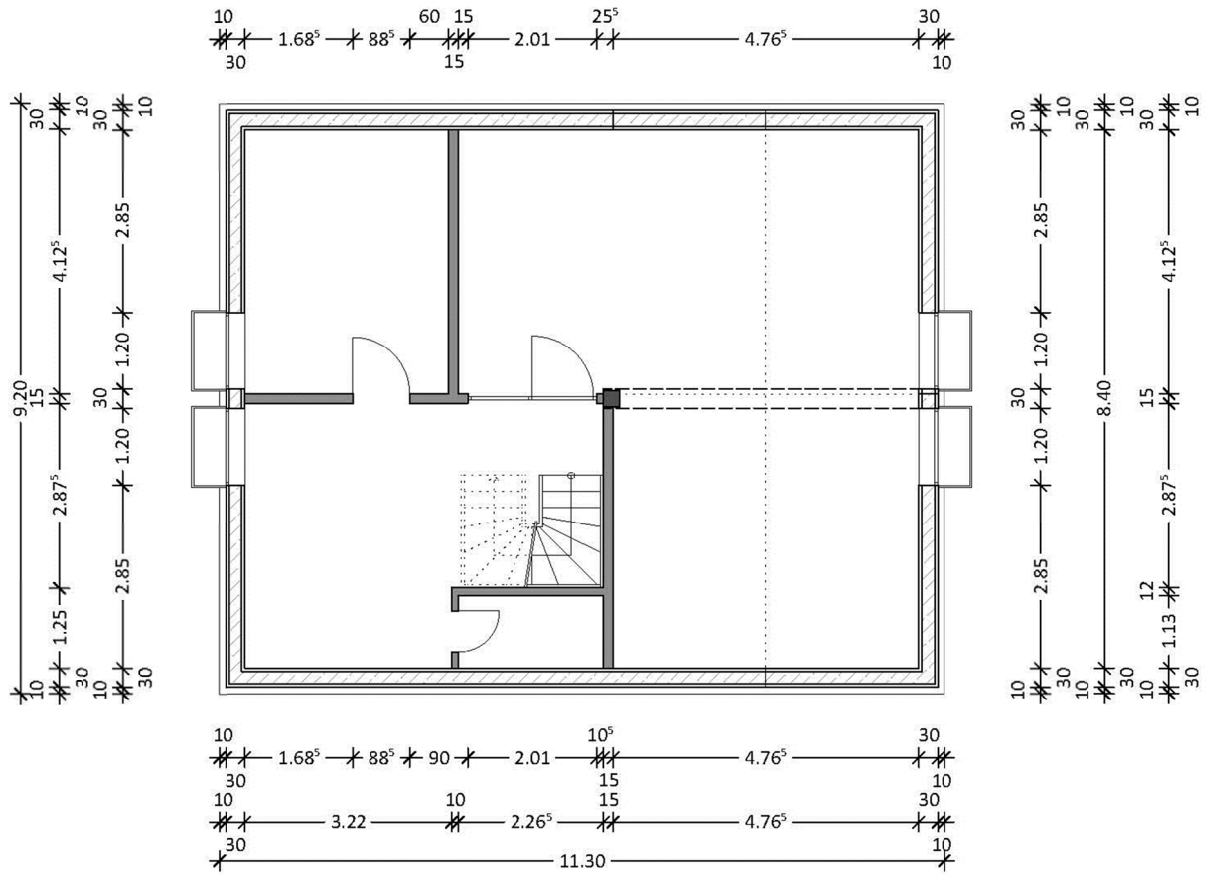


**Abbildung 9-2:** Schnitt A-A des Beispielgebäudes; Entwurf und Planung: Grimm & Kellner – Planen und Bauen GmbH, Peine



**Abbildung 9-3:** Schnitt B-B des Beispielgebäudes; Entwurf und Planung: Grimm & Kellner – Planen und Bauen GmbH, Peine





**Abbildung 9-4:** Kellergeschoss-Grundriss des Beispielgebäudes; Entwurf und Planung: Grimm & Kellner – Planen und Bauen GmbH, Peine







**Abbildung 9-7:** Ansichten des Beispielgebäudes; Entwurf und Planung: Grimm & Kellner – Planen und Bauen GmbH, Peine

## 9.5 Anhang zu Abschnitt 3.1: Algorithmen des Berechnungs-Programms 1. Genauigkeit

### 9.5.1 Allgemeine geometrische Ansätze

#### Gebäude-Grundform

$$L = L_{V1} + L_M + L_{V2} \quad \text{Gl. 9-1}$$

$$B = B_M + B_V \quad \text{Gl. 9-2}$$

$$A_{\text{Brutto,BG}} = B_M \cdot L + B_V \cdot L_M \quad \text{Gl. 9-3}$$

#### Innen- und Außenecken sowie „Versätze“

$\eta_{AE} = \begin{cases} 6 & \text{für } B_V > 1 \wedge L_{V1} > 1 \wedge L_{V2} > 1 \\ 5 & \text{für } B_V > 1 \wedge L_{V1} < 1 \wedge L_{V2} > 1 \text{ oder} \\ & B_V > 1 \wedge L_{V1} > 1 \wedge L_{V2} < 1 \\ 4 & \text{sonst} \end{cases}$	Gl. 9-4
$\eta_{IE} = \begin{cases} 2 & \text{für } B_V > 1 \wedge L_{V1} > 1 \wedge L_{V2} > 1 \\ 1 & \text{für } B_V > 1 \wedge L_{V1} < 1 \wedge L_{V2} > 1 \text{ oder} \\ & B_V > 1 \wedge L_{V1} > 1 \wedge L_{V2} < 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$	Gl. 9-5
$\eta_{VS} = \begin{cases} 0 & \text{für } B_V > 1 \wedge L_{V1} > 1 \wedge L_{V2} > 1 \\ 1 & \text{für } B_V > 1 \wedge L_{V1} < 1 \wedge L_{V2} > 1 \text{ oder} \\ & B_V > 1 \wedge L_{V1} > 1 \wedge L_{V2} < 1 \\ 2 & \text{sonst} \end{cases}$	Gl. 9-6
$\eta_{\text{IW-AW,unbeh}} = \begin{cases} 4 & \text{für } \eta_{\text{unbeh,IW}} = 3 \wedge f_{\text{unbeh}} > 0 \\ 2 & \text{für } \eta_{\text{unbeh,IW}} = \text{sonst} \wedge f_{\text{unbeh}} > 0 \\ 0 & \text{für } f_{\text{unbeh}} = 0 \end{cases}$	Gl. 9-7

#### Außenwandhöhen (vertikale Längen)

$h_{\text{AW,DG}} = \begin{cases} h_{Dr} & \text{falls DG beheizt} \\ d_{Dä,OGA} & \text{falls DG unbeheizt} \end{cases}$	Gl. 9-8
$h_{\text{AW,RG}} = \eta_{G,e} \cdot h_G$	
$h_{\text{AW,KG}} = \eta_{G,g} \cdot h_G$	

### Perimeterumfang des BASIS-Geschosses

$$P_{BG} = 2 \cdot (L + B) \quad \text{Gl. 9-9}$$

### Konstruktionsflächen und Innenwandlängen (horizontale Längen)

$$A_{Kon,BG} = \eta_{Kon,BG} \cdot A_{Brutto,BG} \quad \text{Gl. 9-10}$$

$$A_{Netto,BG} = (1 - \eta_{Kon,BG}) \cdot A_{Brutto,BG}$$

$$\ell_{AW,BG} = 2 \cdot (L + B - 2 \cdot d_{AW}) \quad \text{Gl. 9-11}$$

$$\underbrace{A_{AW,BG} + A_{IW,BG}}_{A_{Kon,BG}} = \ell_{AW,BG} \cdot d_{AW} + \ell_{IW,BG} \cdot d_{IW} \quad \text{Gl. 9-12}$$

$$\Rightarrow \ell_{IW,BG} = \text{MIN} \left( \frac{1,6 \cdot \ell_{AW,BG}}{\eta_{Kons} \cdot A_{Brutto,BG} - \ell_{AW,BG} \cdot d_{AW}} \right)$$

### Geometrische Stützwerte des Daches

	Flachdach	Satteldach	Pulldach	
$h_{First\_Tr} =$	0	$\frac{1}{2} \cdot B_M \cdot \tan(\alpha_M)$	$B_M \cdot \tan(\alpha_M)$	Gl. 9-13
$OL_M =$	0	$\sqrt{h_{First\_Tr}^2 + \left(\frac{B_M}{2}\right)^2}$	$\sqrt{h_{First\_Tr}^2 + B_M^2}$	Gl. 9-14
$OL_V =$	0	$\sqrt{h_{First\_Tr}^2 + \left(\frac{L_M}{2}\right)^2}$	$\sqrt{h_{First\_Tr}^2 + L_M^2}$	Gl. 9-15

### Exposition zu Nachbargebäuden/Auswirkung von Gebäudeversätzen

$$\ell_{AW,Exp} = \gamma_{Exp,BG} \cdot P_{BG} \quad \text{Gl. 9-16}$$

### Unbeheizte Räume

$$A_{unbeh,DG(RG;KG)} = f_{unbeh,DG(RG;KG)} \cdot A_{Brutto,BG} \quad \text{Gl. 9-17}$$

$$B_{unbeh,DG(RG;KG)} = \sqrt{\frac{A_{unbeh,DG(RG;KG)}}{\gamma_{unbeh,DG(RG;KG)}}} \quad \text{Gl. 9-18}$$

$$L_{unbeh,DG(RG;KG)} = \gamma_{unbeh,DG(RG;KG)} \cdot B_{unbeh,DG(RG;KG)} \quad \text{Gl. 9-19}$$

$$\ell_{IW,beh-unbeh,DG(RG;KG)} =$$

$$2 \cdot \text{MAX} \begin{pmatrix} B_{unbeh,DG(RG,KG)} \\ L_{unbeh,DG(RG,KG)} \end{pmatrix} + \text{MIN} \begin{pmatrix} B_{unbeh,DG(RG,KG)} \\ L_{unbeh,DG(RG,KG)} \end{pmatrix}$$

Für 3 Wände

$$B_{unbeh,DG(RG,KG)} + L_{unbeh,DG(RG,KG)}$$

Für 2 Wände  
über Eck

Gl. 9-20

$$2 \cdot \text{MAX} \begin{pmatrix} B_{unbeh,DG(RG,KG)} \\ L_{unbeh,DG(RG,KG)} \end{pmatrix}$$

Für 2 Wände  
parallel

$$\text{MAX} \begin{pmatrix} B_{unbeh,DG(RG,KG)} \\ L_{unbeh,DG(RG,KG)} \end{pmatrix}$$

Für 1 Wand

$$\ell_{AW,unbeh-e,DG(RG,KG)} =$$

$$\text{MIN} \begin{pmatrix} B_{unbeh,DG(RG,KG)} \\ L_{unbeh,DG(RG,KG)} \end{pmatrix}$$

Für 3 Wände

$$B_{unbeh,DG(RG,KG)} + L_{unbeh,DG(RG,KG)}$$

Für 2 Wände  
über Eck

$$2 \cdot \text{MIN} \begin{pmatrix} B_{unbeh,DG(RG,KG)} \\ L_{unbeh,DG(RG,KG)} \end{pmatrix}$$

Für 2 Wände  
parallel

Gl. 9-21

$$2 \cdot (B_{unbeh,DG(RG,KG)} + L_{unbeh,DG(RG,KG)}) - \text{MIN} \begin{pmatrix} B_{unbeh,DG(RG,KG)} \\ L_{unbeh,DG(RG,KG)} \end{pmatrix}$$

Für 1 Wand

$$P_{BG}$$

Für komplett  
unbeheizten  
Keller

$$\ell_{AW,beh-e,DG(RG;KG)} = \ell_{AW,BG} - \text{MAX} \begin{pmatrix} \ell_{AW,unbeh-e,DG(RG;KG)} \\ \ell_{AW,Exp} \end{pmatrix}$$

Gl. 9-22

### Das „beheizte Gebäudevolumen“

$$V_e = V_{e,DG} \cdot (1 - f_{unbeh,DG}) + A_{beh,DG} \cdot h_{AW,DG} + A_{beh,RG} \cdot h_{AW,RG} + A_{beh,KG} \cdot h_{AW,KG} - V_{FrB} \quad \text{Gl. 9-23}$$

Mit den folgenden vom Grundrisstyp abhängigen Werten

$$V_{e,DG,Flach} = 0$$

$$V_{e,DG,Sattel,\square} = V_{e,DG,Pult,\square} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot B_M \cdot h_{First\_Tr}$$

$$V_{e,DG,Sattel,L} = V_{e,DG,Pult,L} = \frac{1}{2} \cdot h_{First\_Tr} \cdot \left( \left( L_{V1} + L_{V2} + \frac{L_M}{2} \right) \cdot B_M + \left( B_V + \frac{B_M}{2} \right) \cdot L_M \right) \quad \text{Gl. 9-24}$$

$$V_{e,DG,Sattel,T} = V_{e,DG,Pult,T} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot B_M \cdot h_{First\_Tr} + \frac{1}{2} \cdot h_{First\_Tr} \cdot \left( B_V + \frac{B_M}{2} \right) \cdot L_M$$

$$V_{FrB} = B_{FrB,BG} \cdot T_{Lo,BG} \cdot h_G \cdot \frac{\eta_{G,e}}{2} \quad \text{Gl. 9-25}$$

### Allgemeine Ansätze für Fenster und Türen im BASIS-Geschoss:

$$f_{Fen,EnEV} = \frac{A_{Fen} + A_{DFen}}{A_{W,e} + A_{Fen} + A_{DFen} + A_{Tür} + A_{De} + A_{FD,e}} \quad \text{Gl. 9-26}$$

$$A_{AW,abs,BG} = h_G \cdot P_{BG} \quad \text{Gl. 9-27}$$

$$A_{BT,trans,BG} = \text{MIN} \left( \frac{f_{trans,BG} \cdot A_{Netto,BG}}{A_{AW,abs,BG}} \right) \quad \text{Gl. 9-28}$$

$$h_{Fen,trans,BG} = h_G \cdot \gamma_{Fen} \quad \text{wobei } \gamma_{Fen} \text{ abhängig von } f_{Fen,EnEV} \text{ ist} \quad \text{Gl. 9-29}$$

$$b_{Fen,trans,BG} = \text{MIN} \left( \frac{P_{BG}}{\frac{A_{Fen,trans,BG}}{h_{Fen,trans,BG}}} - \frac{A_{Tür,opaque,BG} + A_{Tür,trans,BG}}{2,15} \right) \stackrel{!}{\geq} 1,0 \quad \text{Gl. 9-30}$$

$$h_{Tür,BG} = 2,15 \quad \text{Gl. 9-31}$$

$$b_{Tür,BG} = 1,15 \quad \text{Gl. 9-32}$$

### Grundlagen der geometrischen Ansätze für Fenster und Türen in den Geschossen (DG, RG und KG):

$$b_{Tür,ges,RG(KG)} = \frac{A_{Tür,opaque,RG(KG)} + A_{Tür,trans,RG(KG)}}{2,15} \quad \text{Gl. 9-33}$$

$$b_{Fen,trans,ges,RG} = \text{MIN} \left( \frac{A_{Fen,trans,RG}}{h_{Fen,trans,RG}}; \eta_{G,e} \cdot \ell_{AW,beh-e,RG} - b_{Tür,ges,RG} \right) \quad \text{Gl. 9-34}$$

$$b_{Fen,trans,ges,DG(KG)} = \frac{A_{Fen,trans,DG(KG)}}{h_{Fen,trans,DG(KG)}}$$

$$\eta_{Tür,RG(KG)} = \frac{b_{Tür,ges,RG(KG)}}{1,15} \quad \text{Gl. 9-35}$$



$$\eta_{Fen,trans,FB,RG} = \begin{cases} \frac{f_{Fen,trans,BG} \cdot B_{FrB,BG}}{b_{Fen,trans,dur,RG}} & \text{für Balkonsystem} \\ \frac{f_{Fen,trans,BG} \cdot B_{FrB,BG}}{b_{Fen,trans,dur,RG}} \cdot \frac{\eta_{G,e}}{2} & \text{für Loggiasystem} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 9-36}$$

$$\eta_{Fen,trans,DG(KG)} = \frac{b_{Fen,trans,ges,DG(KG)}}{b_{Fen,trans,dur,DG(KG)}}$$

$$\eta_{Fen,trans,RG} = \frac{b_{Fen,trans,ges,RG}}{b_{Fen,trans,dur,RG}} - \eta_{Fen,trans,FB,RG}$$

### Sturz-, Brüstungs- und Laibungslängen der Fenster und Türen in den Geschossen (DG, RG und KG):

$$t_{Fen/Tür} = \frac{P_{BG} \cdot \eta_{G,e} - (\eta_{Fen,trans,FB,RG} + \eta_{Fen,trans,RG}) \cdot b_{Fen,trans,dur,RG} - b_{Tür,ges,RG}}{\eta_{Fen,trans,FB,RG} + \eta_{Fen,trans,RG} + \eta_{Tür,FB,RG} + \eta_{Tür,RG}} \quad \text{Gl. 9-37}$$

$$l_{Laib,Tür,RG(KG)} = \begin{cases} 2 \cdot \eta_{Tür,RG(KG)} & \cdot 2,15 \text{ für } t > 1,0 \\ 1 \cdot \eta_{Tür,RG(KG)} & \cdot 2,15 \text{ für } 0,15 < t \leq 1,0 \\ 0 & \text{für } t \leq 0,15 \end{cases} \quad \text{Gl. 9-38}$$

$$l_{Brü,Tür,RG(KG)} = l_{Sturz,Tür,RG(KG)} = \eta_{Tür,RG(KG)} \cdot 1,15$$

$$l_{Laib,Fen,FB,RG} = \begin{cases} 2 \cdot \eta_{Fen,trans,FB,RG} & \cdot h_{Fen,trans,BG} \text{ für } t > 1,0 \\ 1 \cdot \eta_{Fen,trans,FB,RG} & \cdot h_{Fen,trans,BG} \text{ für } 0,15 < t \leq 1,0 \\ 0 & \text{für } t \leq 0,15 \end{cases} \quad \text{Gl. 9-39}$$

$$l_{Laib,Fen,DG(RG;KG)} = \begin{cases} 2 \cdot \eta_{Fen,trans,DG(RG;KG)} & \cdot h_{Fen,trans,BG} \text{ für } t > 1,0 \\ 1 \cdot \eta_{Fen,trans,DG(RG;KG)} & \cdot h_{Fen,trans,BG} \text{ für } 0,15 < t \leq 1,0 \\ 0 & \text{für } t \leq 0,15 \end{cases}$$

$$l_{Brü,Fen,FB,DG(RG;KG)} = l_{Sturz,Fen,DG(RG;KG)} = \eta_{Fen,trans,DG(RG;KG)} \cdot b_{Fen,trans,dur,DG(RG;KG)} \quad \text{Gl. 9-40}$$

$$l_{Brü,Fen,DG(RG;KG)} = l_{Sturz,Fen,DG(RG;KG)} = \eta_{Fen,trans,DG(RG;KG)} \cdot b_{Fen,trans,dur,DG(RG;KG)}$$

## 9.5.2 Flächen der Regelbauteile

### Türen der Außenwand/Fenster und Fenstertüren der Außenwand/Dachflächenfenster/Kellerfenster

$$\eta_{Woh,BG} = \frac{A_{Netto,BG}}{85} \quad (\text{auf ganze Zahl gerundet}) \quad \text{Gl. 9-41}$$

$$A_{Tür,opaque,BG} = 2,50 \cdot \eta_{Woh,BG} \quad \text{Gl. 9-42}$$

$$A_{Fen,trans,BG} = A_{BT,trans,BG} \cdot f_{Fen,trans,BG}$$

$$A_{Tür,trans,BG} = A_{BT,trans,BG} \cdot (1 - f_{Fen,trans,BG}) \quad \text{Gl. 9-43}$$

$$A_{Fen,trans,DG} = \begin{cases} \frac{A_{Fen,trans,BG} \cdot (1 - f_{unbeh,DG})}{2} & \text{falls geneigtes Dach} \\ 0 & \text{falls Flachdach} \end{cases} \quad \text{Gl. 9-44}$$

$$A_{Tür,opaque,RG} = A_{Tür,opaque,BG} \quad \text{Gl. 9-45}$$

$$A_{Tür,trans,RG} = \begin{cases} \eta_{G,e} \cdot A_{Tür,trans,BG} & \text{falls geneigtes Dach} \\ (\eta_{G,e} - 1) \cdot A_{Tür,trans,BG} & \text{falls Flachdach} \end{cases} \quad \text{Gl. 9-46}$$

$$\leq h_{AW,RG} \cdot P_{BG} - A_{Tür,opaque,RG} - A_{Fen,trans,RG}$$

$$A_{Fen,trans,RG} = \begin{cases} \eta_{G,e} \cdot A_{Fen,trans,BG} & \text{falls geneigtes Dach} \\ (\eta_{G,e} - 1) \cdot A_{Fen,trans,BG} & \text{falls Flachdach} \end{cases} \quad \text{Gl. 9-47}$$

$$A_{Tür,opaque,KG} = \begin{cases} 0 & \text{für } A_{AW,beh-g,KG} - A_{Tür,opaque,BG} < A_{Fen,trans} \\ A_{Tür,opaque,BG} & \text{Sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 9-48}$$

$$A_{Fen,trans,KG} = 0,5 \cdot A_{Fen,trans,BG} \quad \text{Gl. 9-49}$$

## Außenwände an Außenluft und Erdreich

$$A_{W,e} = A_{AW,e,DG} + A_{AW,Giebel} + A_{AW,e,KG} \quad \text{Gl. 9-50}$$

$$A_{W,g} = A_{AW,g,KG} \quad \text{Gl. 9-51}$$

mit

$$A_{AW,e,DG} = h_{AW,DG} \cdot \ell_{AW,beh-e,DG} \quad \text{Gl. 9-52}$$

$$A_{AW,e,KG} = h_{AW,KG} \cdot \ell_{AW,beh-e,KG} - (A_{Tür,KG} + A_{Fen,KG}) \cdot f_{Fen,beh-e,KG} \quad \text{Gl. 9-53}$$

$$A_{AW,g,KG} = h_{AW,KG} \cdot \ell_{AW,beh-g,KG} - (A_{Tür,KG} + A_{Fen,KG}) \cdot f_{Fen,beh-g,KG} \quad \text{Gl. 9-54}$$

$$A_{AW,Giebel,\square} = \frac{h_{First\_Tr}}{2} \cdot 2 \cdot B_M$$

$$A_{AW,Giebel,L} = \frac{h_{First\_Tr}}{2} \cdot (1 \cdot B_M + 1 \cdot L_M) \quad \text{Gl. 9-55}$$

$$A_{AW,Giebel,T} = \frac{h_{First\_Tr}}{2} \cdot (2 \cdot B_M + 1 \cdot L_M)$$

**Dächer, Dachschrägen zu Außenluft/Flachdächer an Außenluft**

$$A_{D,e} = (A_D - A_{Fen,DG}) \cdot (1 - f_{unbeh,DG}) \quad \text{Gl. 9-56}$$

mit

$$\begin{aligned} A_{D,Sattel;\square} &= 2 \cdot OL_M \cdot L \\ A_{D,Sattel;L} &= OL_M \cdot (2 \cdot L_{V2} + L_M) + OL_V \cdot 3 \cdot B_M \\ A_{D,Sattel;T} &= 2 \cdot [OL_M \cdot (2 \cdot L_{V2} + \frac{3}{4} \cdot L_M) + OL_V \cdot (\frac{1}{4} \cdot B_M + L_M)] \\ A_{D,Pult;\square} &= OL_M \cdot L \\ A_{D,Pult;L} &= OL_M \cdot (\frac{1}{2} \cdot L_M + L_{V2}) + OL_V \cdot \frac{3}{2} \cdot B_M \\ A_{D,Pult;T} &= OL_M \cdot (L_{V1} + \frac{1}{2} \cdot L_M + L_{V2}) + OL_V \cdot \frac{3}{2} \cdot B_M \end{aligned}$$

$$A_{FD,e} = A_{FD,\square(L;T)} \cdot (1 - f_{unbeh,DG}) \quad \text{Gl. 9-57}$$

mit

$$A_{FD,\square(L;T)} = B_M \cdot L + B_V \cdot L_M + A_{FD,e,Lo} \quad \text{Gl. 9-58}$$

$$A_{FD,e,Lo} = A_{De,e,Lo} = \frac{\eta_{Ge}}{2} \cdot T_{Lo} \cdot B_{FrB,BG} \quad \text{Gl. 9-59}$$

$$B_{FrB,BG} = P_{BG} \cdot \gamma_{FrB,BG} \quad \text{Gl. 9-60}$$

**Decken zu unbeheizten Räumen nach oben/unten**

$$A_{De,\mu,OA} = A_{unbeh,OA,DG-RG} + A_{unbeh,OA,RG-KG} \quad \text{Gl. 9-61}$$

$$A_{De,\mu,UA} = A_{unbeh,UA,DG-RG} + A_{unbeh,UA,RG-KG}$$

mit

Decken zu unbeheiztem Raum nach oben zwischen DG und RG: Gl. 9-62

$$A_{unbeh,OA,DG-RG} = A_{unbeh,DG} - A_{unbeh,RG} \quad \text{wenn } A_{unbeh,DG} < A_{unbeh,RG}$$

Decken zu unbeheiztem Raum nach oben zwischen RG und KG: Gl. 9-63

$$A_{unbeh,OA,RG-KG} = A_{unbeh,RG} - A_{unbeh,KG} \quad \text{wenn } A_{unbeh,RG} < A_{unbeh,KG}$$

Decken zu unbeheiztem Raum nach unten zwischen DG und RG: Gl. 9-64

$$A_{unbeh,UA,DG-RG} = A_{unbeh,DG} - A_{unbeh,RG} \quad \text{wenn } A_{unbeh,DG} > A_{unbeh,RG}$$

Decken zu unbeheiztem Raum nach unten zwischen RG und KG: Gl. 9-65

$$A_{unbeh,UA,RG-KG} = A_{unbeh,RG} - A_{unbeh,KG} \quad \text{wenn } A_{unbeh,RG} > A_{unbeh,KG}$$

**Wände gegen unbeheizte Räume (seitlich)**

---

$$A_{W,u} = A_{W,u,DG} + A_{W,u,RG} + A_{W,u,KG} \quad \text{Gl. 9-66}$$

---

mit

$$A_{W,u,DG} = h_{AW,DG} \cdot (\ell_{IW,beh-unbeh,DG} + h_{First\_Tr}) \quad \text{Gl. 9-67}$$

---

$$A_{W,u,RG} = h_{AW,RG} \cdot \ell_{IW,beh-unbeh,RG} \quad \text{Gl. 9-68}$$

---

$$A_{W,u,KG} = h_{AW,KG} \cdot \ell_{IW,beh-unbeh,KG} \quad \text{Gl. 9-69}$$

---

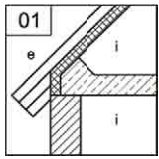
**Decken Erdreich (Bodenplatten)**

---

$$De_g = \begin{cases} A_{beh,RG} & \text{falls KG nicht vorhanden} \\ A_{beh,KG} & \text{falls KG vorhanden} \end{cases} \quad \text{Gl. 9-70}$$

---

### 9.5.3 Längen der linearen Wärmebrücken



**1.1 Traufe des geneigten Daches zu beheiztem Dachraum**

**1.2 Traufe des geneigten Daches zu unbeheiztem Dachraum**

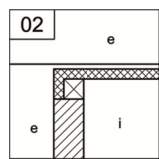
$$l_{1.1} = l_{1.1,Grund} \cdot (1 - f_{unbeh})$$

$$l_{1.2} = l_{1.1,Grund} \cdot f_{unbeh}$$

Gl. 9-71

mit

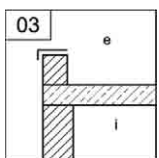
$$l_{1.1,Grund} = \begin{cases} 0 & \text{für ein Flachdach} \\ 2 \cdot L_{ges} & \text{für ein rechteckiges Satteldach} \\ L_{ges} & \text{für ein rechteckiges Pultdach} \\ L_{ges} + B_{ges} + L_{V1} + L_{V2} + B_V & \text{für ein L-förmiges Satteldach} \\ L_{V1} + L_{V2} + B_V & \text{für ein L-förmiges Pultdach} \\ L_{ges} + B_{ges} + L_{V1} + L_{V2} + 2 \cdot B_V & \text{für ein T-förmiges Satteldach} \\ L_{V1} + L_{V2} + B_V & \text{für ein T-förmiges Pultdach} \end{cases}$$



**2 Ortgang des geneigten Daches**

$$l_2 = \begin{cases} 0 & \text{für ein Flachdach} \\ 4 \cdot OL_{M,Sattel} & \text{für ein rechteckiges Satteldach} \\ 2 \cdot OL_{M,Pult} & \text{für ein rechteckiges Pultdach} \\ 2 \cdot OL_{M,Sattel} + 2 \cdot OL_{V,Sattel} & \text{für ein L-förmiges Satteldach} \\ 1 \cdot OL_{M,Pult} + 1 \cdot OL_{V,Pult} & \text{für ein L-förmiges Pultdach} \\ 4 \cdot OL_{M,Sattel} + 2 \cdot OL_{V,Sattel} & \text{für ein T-förmiges Satteldach} \\ 2 \cdot OL_{M,Pult} + 1 \cdot OL_{V,Pult} & \text{für ein T-förmiges Pultdach} \end{cases}$$

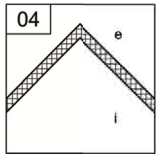
Gl. 9-72



**3 Traufe / Ortgang des Flachdaches**

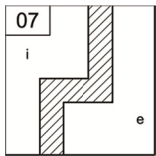
$$l_3 = \begin{cases} l_{AW,beh-e,DG} & \text{für ein Flachdach} \\ 0 & \text{für ein Satteldach} \\ 0 & \text{für ein Pultdach} \end{cases}$$

Gl. 9-73



#### 4 First des geneigten Daches

$$l_4 = \begin{cases} 0 & \text{für ein Flachdach} \\ L_{ges} & \text{für ein rechteckiges Satteldach} \\ L_{ges} & \text{für ein rechteckiges Pultdach} \\ L_{V1} + L_{V2} + \frac{1}{2} \cdot L_M + B_V + \frac{1}{2} \cdot B_M & \text{für ein L-förmiges Satteldach} \\ L_{ges} + B_{ges} & \text{für ein L-förmiges Pultdach} \\ L_{ges} + B_V + \frac{1}{2} \cdot B_M & \text{für ein T-förmiges Satteldach} \\ L_{ges} + B_{ges} & \text{für ein T-förmiges Pultdach} \end{cases} \quad \text{Gl. 9-74}$$

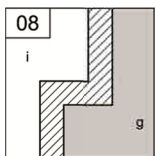


#### 7.1 Außenecke an Außenluft

#### 7.2 Innenecke an Außenluft

#### 7.3 Versatz (Außen- und Innenecke) an Außenluft

$$\begin{aligned} l_{7.1} &= \eta_{AE} \cdot (h_{AW,DG} + h_{AW,RG}) \\ l_{7.2} &= \eta_{IE} \cdot (h_{AW,DG} + h_{AW,RG}) \\ l_{7.3} &= \eta_{VS} \cdot (h_{AW,DG} + h_{AW,RG}) \end{aligned} \quad \text{Gl. 9-75}$$

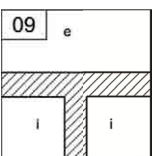


#### 8.1 Außenecke an Erdreich

#### 8.2 Innenecke an Erdreich

#### 8.3 Versatz (Außen- und Innenecke) an Erdreich

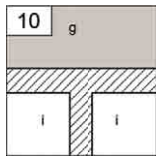
$$\begin{aligned} l_{8.1} &= \eta_{AE} \cdot h_{AW,KG} \\ l_{8.2} &= \eta_{IE} \cdot h_{AW,KG} \\ l_{8.3} &= \eta_{VS} \cdot h_{AW,KG} \end{aligned} \quad \text{Gl. 9-76}$$



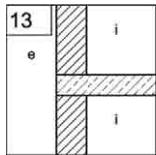
#### 9.1 Einbindende Innenwand in Außenwand

#### 9.2 Einbindende Innenwand in Außenwand zu unbeheiztem Raum

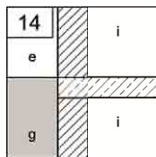
$$\begin{aligned} l_{9.1} &= \left( \eta_{IW-AW,beh,DG} - \eta_{IW-AW,unbeh,DG} \right) \cdot h_{AW,DG} + \left( \eta_{IW-AW,beh,RG} - \eta_{IW-AW,unbeh,RG} \right) \cdot h_{AW,RG} \\ l_{9.2} &= \eta_{IW-AW,unbeh,DG} \cdot h_{AW,DG} + \eta_{IW-AW,unbeh,RG} \cdot h_{AW,RG} \end{aligned} \quad \text{Gl. 9-77}$$

**10.1 Einbindende Innenwand in Kelleraußenwand****10.2 Einbindende Innenwand in Kelleraußenwand zu unbeheiztem Raum**

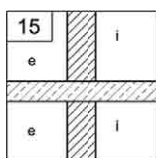
$$\begin{aligned} \ell_{10.1} &= \left( \eta_{IW-AW, beh} - \eta_{IW-AW, unbeh} \right) \cdot h_{AW, KG} \\ \ell_{10.1} &= \eta_{IW-AW, unbeh} \cdot h_{AW, KG} \end{aligned} \quad \text{Gl. 9-78}$$

**13.1 Einbindende Decke in Außenwand****13.2 Einbindende Decke in Außenwand, Fenster ohne Rollladenkasten****13.3 Einbindende Decke in Außenwand, Fenster mit Rollladenkasten**

$$\begin{aligned} \ell_{13.1} &= \eta_{G,e} \cdot \ell_{AW, beh-e, RG} - \left( \ell_{Sturz, Fen, RG} + \ell_{Sturz, Tür, RG} \right) \\ \ell_{13.2} = \ell_{13.3} &= \ell_{Sturz, Fen, RG} + \ell_{Sturz, Tür, RG} + \ell_{Sturz, Fen, KG} + \ell_{Sturz, Tür, KG} - \ell_{Sturz, Tür, FB} \end{aligned} \quad \text{Gl. 9-79}$$

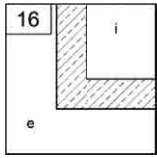
**14.1 Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller****14.2 Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller, mit Tür****14.3 Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu unbeheiztem Keller****14.4 Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu unbeheiztem Keller, mit Tür**

$$\begin{aligned} \ell_{14.1} &= \ell_{AW, beh-e, RG} - \ell_{AW, \frac{beh, RG}{unbeh, KG}} - \ell_{14.2} \\ \ell_{14.2} &= \left( 1 - f_{unbeh, KG} \right) \cdot \frac{\ell_{Brü, Tür, RG}}{\eta_{G,e}} \\ \ell_{14.3} &= \ell_{AW, \frac{beh, RG}{unbeh, KG}} - \ell_{14.4} \\ \ell_{14.4} &= f_{unbeh, KG} \cdot \frac{\ell_{Brü, Tür, RG}}{\eta_{G,e}} \end{aligned} \quad \text{Gl. 9-80}$$

**15.1 Thermisch getrennte Balkonplatte****15.2 Thermisch getrennte Balkonplatte, Fenster/Tür in beiden Geschossen, ohne Rollladenkasten****15.3 Thermisch getrennte Balkonplatte, Fenster/Tür in beiden Geschossen, mit Rollladenkasten**

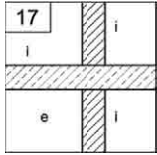
$$\begin{aligned} \ell_{15.1} &= B_{FrB, BG} \cdot \left( \eta_{G,e} - 1 \right) - \left( \ell_{Sturz, Fen, FB} + \ell_{Sturz, Tür, FB} \right) \\ \ell_{15.2} = \ell_{15.3} &= \ell_{Sturz, Fen, FB} + \ell_{Sturz, Tür, FB} \end{aligned} \quad \text{Gl. 9-81}$$





**16 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten - oberer Anschluss kragend**

$$\ell_{16} = B_{FrB,BG} \cdot \frac{\eta_{G,e}}{2} \quad \text{Gl. 9-82}$$



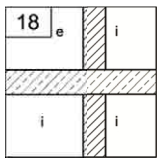
**17.1 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten - oberer Anschluss aufgehende Wand**

**17.1 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten - oberer Anschluss aufgehende Wand, Fenster/Tür, ohne Rollladenkasten**

**17.1 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten - oberer Anschluss aufgehende Wand, Fenster/Tür, mit Rollladenkasten**

$$\ell_{17.1} = B_{FrB,BG} \cdot \frac{\eta_{G,e}}{2} - (\ell_{Sturz,Fen,FB} + \ell_{Sturz,Tür,FB}) \quad \text{Gl. 9-83}$$

$$\ell_{17.2} = \ell_{17.3} = \ell_{Sturz,Fen,FB} + \ell_{Sturz,Tür,FB}$$

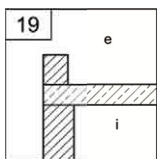


**18.1 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten - unterer Anschluss an aufgehende Wand**

**18.2 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten - unterer Anschluss an aufgehende Wand, Fenster/Tür**

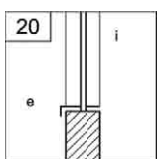
$$\ell_{18.1} = B_{FrB,BG} \cdot \frac{\eta_{G,e}}{2} - \ell_{Brü,Tür,FB} \quad \text{Gl. 9-84}$$

$$\ell_{18.2} = \ell_{18.3} = \ell_{Brü,Tür,FB}$$



**19 Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten - unterer Anschluss Brüstung (ähnlich wie „Flachdach“)**

$$\ell_{19} = B_{FrB,BG} \cdot \left( \frac{\eta_{G,e}}{2} - 1 \right) \quad \text{Gl. 9-85}$$



**20.1 Fensterbrüstung**

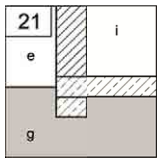
**20.2 Fenster- oder Türleibung**

$$l_{20.1} = l_{Brü,Fen,FB,RG} + \sum l_{Brü,Fen,DG(RG,KG)} + l_{Sturz,Fen,DG}$$

Gl. 9-86

$$l_{20.2} = l_{Leib,Fen,FB,RG} + l_{Leib,Tür,FB,RG} + \sum l_{Leib,Fen,DG(RG,KG)} + \sum l_{Leib,Tür,KG}$$

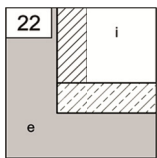
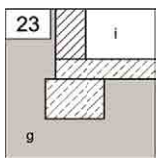
Thermisch werden die Stürze der Fenster im Dachgeschoss den Brüstungen zugeordnet. Mit  $\Sigma$  als Summe über die Geschosse DG, RG und KG.

**21.1 Bodenplatte im Sockelbereich****21.2 Bodenplatte im Sockelbereich, Fenster/Tür**

$$l_{21.1} = l_{AW,beh-e} - \frac{l_{Brü,Tür,RG}}{\eta_{G,e}}$$

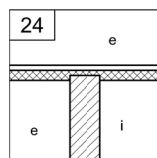
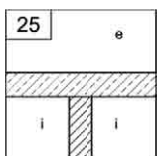
$$l_{21.2} = \begin{cases} \frac{l_{Brü,Tür,RG}}{\eta_{G,e}} & \text{falls ohne Kellergeschoss} \\ l_{Brü,Tür,KG} & \text{falls mit Kellergeschoss} \end{cases}$$

Gl. 9-87

**22 KG-Fundament mit Flachgründung****23 KG-Fundament mit Streifengründung**

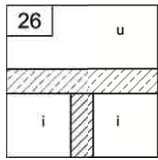
$$l_{22} = l_{23} = l_{AW,beh-g}$$

Gl. 9-88

**24 Innenwand unter geneigtem Dach gegen Außenluft****25 Innenwand unter Flachdach gegen Außenluft**

$$l_{24} = l_{25} = (1 - f_{unbeh,DG}) \cdot l_{IW,BG}$$

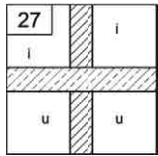
Gl. 9-89



26 Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach oben

$$\ell_{26} = \ell_{IW,BG} \cdot f_{unbeh,DG} \cdot (1 - f_{unbeh,RG})$$

Gl. 9-90



27.1 Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach unten

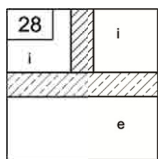
27.2 Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach unten, Keller teilbeheizt

Es wird angenommen, dass die unbeheizte Fläche im Regelgeschoss vernachlässigbar, nur der Anteil der unbeheizten Fläche im KG entscheidend ist und die relevanten Innenwände auf beide Arten aufgeteilt werden können.

$$\ell_{27.1} = \ell_{IW,BG} \cdot (1 - f_{unbeh,RG}) - \ell_{IW,beh-unbeh,KG}$$

Gl. 9-91

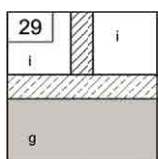
$$\ell_{27.2} = \ell_{IW,beh-unbeh,KG}$$



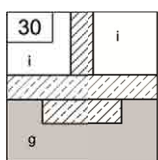
28 Innenwand auf Decke zu Außenluft nach unten

$$\ell_{28} = \frac{T_{Lo} \cdot B_{FrB,ges}}{A_{Netto,BG}} \cdot (\ell_{IW,beh-beh,RG} + \ell_{IW,beh-unbeh,RG})$$

Gl. 9-92



29 Innenwand auf Bodenplatte mit Flachgründung



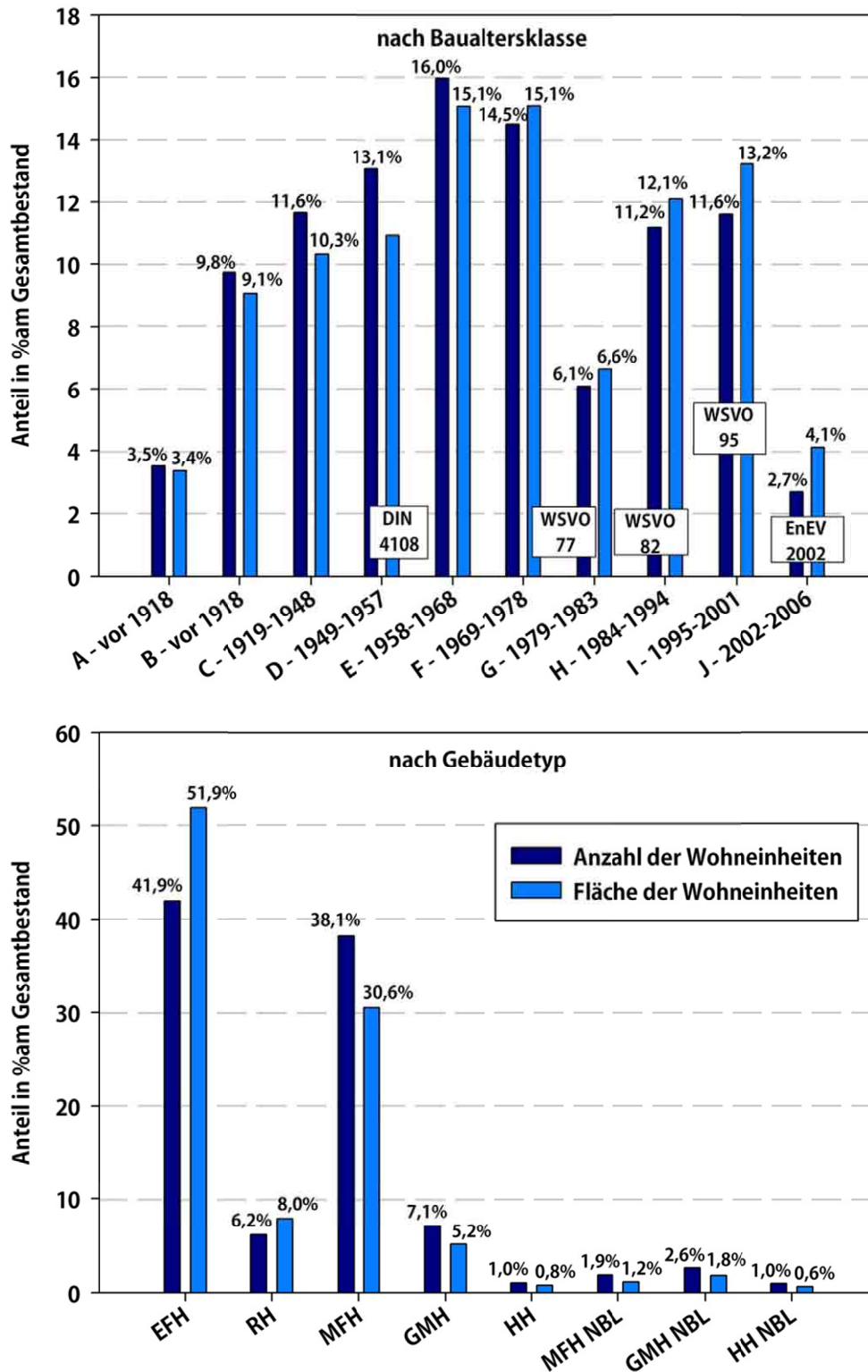
30 Innenwand auf Bodenplatte mit Streifengründung

Türöffnungen werden hier vernachlässigt

$$\ell_{29} = \ell_{30} = \begin{cases} (1 - f_{unbeh,RG}) \cdot (\ell_{IW,beh-beh,RG} + \ell_{IW,beh-unbeh,RG}) & \text{für } \eta_{G,g} = 0 \\ (1 - f_{unbeh,KG}) \cdot (\ell_{IW,beh-beh,KG} + \ell_{IW,beh-unbeh,KG}) & \text{für } \eta_{G,g} > 0 \end{cases}$$

Gl. 9-93

## 9.6 Anhang zu Abschnitt 4.2: Darstellung der Gebäudetypologie Deutschlands



**Abbildung 9-8:** Gebäudetypologie Deutschlands, Prozentuale Anteile der Baualtersklassen (oben) und der Gebäudetypen (unten) nach [22] bzw. [19] mit EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhaus, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus, HH = Hochhaus und NBL = neue Bundesländer

## 9.7 Anhang zu Abschnitt 4.2.3: Stellvertretende Bauteilschichtungen der vier Dämmniveaus

In Tabelle 9-1 bis Tabelle 9-5 sind die stellvertretenden Bauteilschichtungen der vier in den Programmen wählbaren Dämmniveaus aufgeführt.

**Tabelle 9-1:** Bauteilschichtung des Regelbauteils „Außenwand an Außenluft“ und „Wände gegen Erdreich“ abhängig vom geforderten Dämmniveau und der Konstruktionsart

Dämmniveau	1 Sanierter Bestand	2 EnEV 2009	3 EnEV 2009 + 15%	4 EnEV 2009 + 32%
Einschalige Außenwand mit WDVS  UND *  Zweischalige Außenwand mit Kerndämmung	30 cm Beton mit $\lambda = 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$			
	10 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	14 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	18 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	22 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Monolithische Außenwand	36,5cm Mauerwerk mit $\lambda = 0,12$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	36,5 cm Mauerwerk mit $\lambda = 0,10$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	42,5 cm Mauerwerk mit $\lambda = 0,09$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	49 cm Mauerwerk mit $\lambda = 0,08$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

\* Bei beinahe identischer thermischer Wirkung als Regelbauteil sind die Konstruktionsarten „Einschalige Außenwand mit WDVS“ und „Zweischalige Außenwand mit Kerndämmung“ dennoch zu unterscheiden, da sie unterschiedliche Wärmebrückenwirkungen besitzen.

**Tabelle 9-2:** Bauteilschichtung des Regelbauteils „Dächer, Dachschrägen zu Außenluft“ abhängig vom geforderten Dämmniveau

Dämmniveau	1 Sanierter Bestand	2 EnEV 2009	3 EnEV 2009 + 15%	4 EnEV 2009 + 32%
	2,5 cm Holzwerkstoffplatte mit $\lambda = 0,13 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$			
Holzdach mit Aufsparrendämmung	18 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	20 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	22 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	30 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

**Tabelle 9-3:** Bauteilschichtung des Regelbauteils „Decken zu unbeheizten Räumen nach oben“ und „Flachdächer an Außenluft“ abhängig vom geforderten Dämmniveau

Dämmniveau	1 Sanierter Bestand	2 EnEV 2009	3 EnEV 2009 + 15%	4 EnEV 2009 + 32%
	16 cm Beton mit $\lambda = 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$			
massives Deckensystem	18 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	18 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	22 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	30 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

**Tabelle 9-4:** Bauteilschichtung des Regelbauteils „Decken zu Außenluft nach unten“ abhängig vom geforderten Dämmniveau

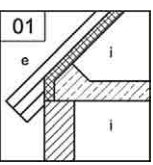
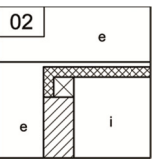
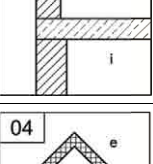
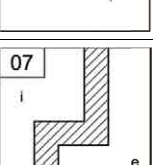
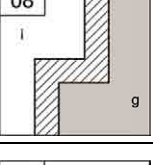
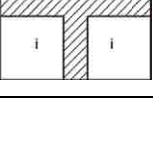

Dämmniveau	1 Sanierter Bestand	2 EnEV 2009	3 EnEV 2009 + 15%	4 EnEV 2009 + 32%
	4,5 cm Estrich mit $\lambda = 1,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$			
	+			
	4 cm Trittschalldämmung mit $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$			
	+			
	16 cm Beton mit $\lambda = 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$			
	+			
massives Deckensystem	6 cm Dämmung mit $\lambda = 0,030 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	10 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	14 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	18 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

**Tabelle 9-5:** Bauteilschichtung des Regelbauteils „Decken zu unbeheizten Räumen nach unten“, „Wände gegen unbeheizte Räume“ und „Decken gegen Erdreich (Bodenplatten)“ abhängig vom geforderten Dämmniveau

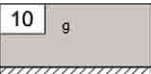

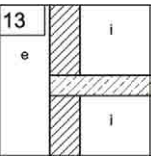
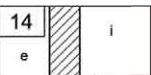

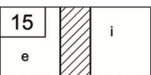

Dämmniveau	1 Sanierter Bestand	2 EnEV 2009	3 EnEV 2009 + 15%	4 EnEV 2009 + 32%
massive Decke zu unbeh. Räumen nach unten	4,5 cm Estrich mit $\lambda = 1,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ + 4 cm Trittschalldämmung mit $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ + 16 cm Beton mit $\lambda = 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ +			
	6 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	8 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	10 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	14 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
massive Innenwand zu unbeheiztem Raum	15 cm Beton mit $\lambda = 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ + 1,25 cm Gipskartonplatte mit $\lambda = 0,25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ +			
	8 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	10 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	12 cm Dämmung mit $\lambda = 0,040$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	14 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
massive Decke gegen Erdreich (Bodenplatte)	4,5 cm Estrich mit $\lambda = 1,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ + 4 cm Trittschalldämmung mit $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ + 16 cm Beton mit $\lambda = 2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ +			
	5 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	5 cm Dämmung mit $\lambda = 0,024$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	10 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	14 cm Dämmung mit $\lambda = 0,035$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

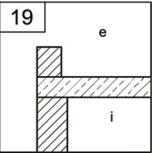
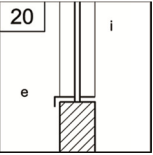
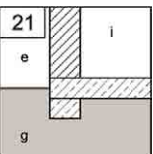
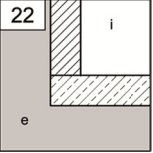
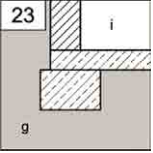
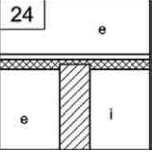
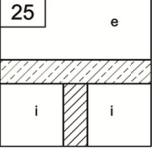
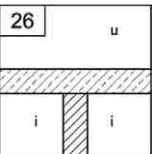
## 9.8 Anhang zu Abschnitt 6.3: Prozentuale Anteile der einzelnen Wärmebrückenanschlüsse

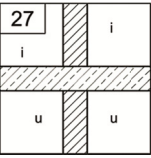
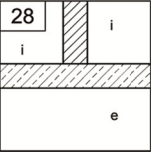
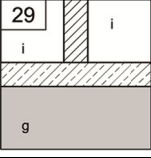
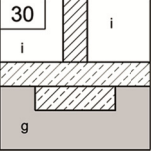
**Tabelle 9-6:** Prozentuale Anteile der einzelnen Wärmebrücken über alle 407.040 berechneten Gebäude unterschieden nach „monolithisch“ und „nicht-monolithisch“ erstellten Gebäuden

Nr.	Bild	Wärmebrückenanschluss	Farbcodierung und Verteilung					
			nicht-monolithisch erstellte Gebäude			monolithisch erstellte Gebäude		
			Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel	Min.
1.1		Traufe des geneigten Daches zu beh. Dachraum	0%	-1%	-10%	12%	1%	0%
1.2		Traufe des geneigten Daches zu unbeh. Dachraum	0%	-4%	-36%	3%	0%	-9%
2		Ortgang des geneigten Daches	99%	3%	0%	26%	1%	0%
3		Traufe / Ortgang des Flachdaches	19%	0%	0%	9%	0%	0%
4		First des geneigten Daches	0%	-3%	-25%	0%	-2%	-15%
7.1		Außenecke an Außenluft	-9%	-67%	-100%	-24%	-78%	-100%
8.1		Außenecke an Erdreich	0%	-3%	-26%	0%	-4%	-35%
9.1		Einbindende Innenwand in Außenwand zu unbeheiztem Raum	8%	0%	0%	0%	0%	0%



Nr.	Bild	Wärmebrücken- anschluss	Farbcodierung und Verteilung					
			nicht-monolithisch erstellte Gebäude			monolithisch erstellte Gebäude		
			Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel	Min.
10.2		Einbindende Innenwand in Kelleraußenwand	5%	0%	0%	0%	0%	0%
10.2		Einbindende Innenwand in Kelleraußenwand	0%	0%	0%	13%	0%	0%
13.1		Einbindende Decke in Außenwand	0%	0%	-1%	80%	8%	0%
13.2		Einbindende Decke in Außenwand, Fenster ohne Rollladenkasten	99%	2%	-71%	98%	23%	-42%
13.3		Einbindende Decke in Außenwand, Fenster mit Rollladenkasten	100%	16%	-43%	98%	26%	-38%
14.1		Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller	0%	0%	-1%	41%	2%	0%
14.2		Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu beheiztem Keller, mit Tür	0%	-3%	-47%	31%	1%	-7%
14.3		Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu unbeheiztem Keller	94%	2%	0%	43%	-1%	-33%
14.4		Einbindende Decke in Kelleraußenwand, zu unbeheiztem Keller, mit Tür	50%	-4%	-80%	20%	-3%	-70%
15.1		Thermisch getrennte Balkonplatte	31%	1%	-30%	44%	1%	-15%
15.2		Thermisch getrennte Balkonplatte, Fenster/Tür in beiden Geschossen, ohne RK	82%	6%	0%	57%	7%	0%

Nr.	Bild	Wärmebrücken- anschluss	Farbcodierung und Verteilung					
			nicht-monolithisch erstellte Gebäude			monolithisch erstellte Gebäude		
			Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel	Min.
19		Loggien • Erker • Balkone • Terrassen • Durchfahrten - unterer Anschluss Brüstung	0%	0%	0%	3%	0%	0%
20.1		Fensterbrüstung	26%	0%	-21%	15%	1%	0%
20.2		Fenster- oder Türleibung	97%	16%	-69%	22%	7%	0%
21.1		Bodenplatte im Sockelbereich	97%	2%	-79%	51%	-1%	-42%
21.2		Bodenplatte im Sockelbereich, Fenster/Tür	68%	-2%	-75%	36%	-3%	-72%
22		KG-Fundament mit Flachgründung	98%	1%	-26%	0%	-3%	-30%
23		KG-Fundament mit Streifengründung	98%	4%	0%	28%	-1%	-19%
24		Innenwand unter geneigtem Dach gegen Außenluft	4%	0%	0%	2%	0%	0%
25		Innenwand unter Flachdach gegen Außenluft	5%	0%	0%	2%	0%	0%
26		Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach oben	71%	4%	0%	32%	2%	0%

Nr.	Bild	Wärmebrücken- anschluss	Farbcodierung und Verteilung					
			nicht-monolithisch erstellte Gebäude			monolithisch erstellte Gebäude		
			Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel	Min.
27		Innenwand einer Decke zu unbeheiztem Raum nach unten	96%	7%	0%	45%	4%	0%
28		Innenwand auf Decke zu Außenluft nach unten	0%	0%	0%	0%	0%	0%
29		Innenwand auf Bodenplatte mit Flachgründung	78%	6%	0%	62%	3%	0%
30		Innenwand auf Bodenplatte mit Streifengründung	87%	11%	0%	65%	7%	0%