

- Inhalt:** **Bericht per 31. August 2014**
- Projekt:** **Co<sub>2</sub>olBricks**  
**Holstenkamp, Hamburg**  
**Leadpartner Denkmalschutzamt Hamburg**  
**im Rahmen des Work Package 4**  
**WP 4 Leader: Dipl.-Ing.Arch. Albert Schett**
- Auftraggeber:** **Freie und Hansestadt Hamburg**  
**Kulturbehörde Denkmalschutzamt**  
**Große Bleichen 30**  
**20354 Hamburg**
- Telefon: +49 (0) 40 42824-720 /-729  
Fax: +49 (0) 40 427310008
- Auftragnehmer:** **GWT- TUD GmbH**  
**Blasewitzer Straße 43**  
**01307 Dresden**
- Telefon: +49 (0) 351 463-33043  
Fax: +49 (0) 351 463-32627
- Stand/Datum:** **31. August 2014**

.....

Dr.-Ing. Rudolf Plagge  
Ressortleiter bei der GWT-TUD GmbH und  
Leiter des Forschungs- und Entwicklungslabors  
Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden

## Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage / Motivation	5
1.1	Vorangestellte Projekte zur Analyse der Bausubstanz und Planungsbegleitung	5
1.2	Bezug der Untersuchungen zum EU-Projekt Co <sub>2</sub> olBricks	6
1.3	Einordnung in laufende nationale und internationale Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten	7
1.4	Sanierungsgegenstand und –potenzial in Hamburg	8
2	Untersuchungsgebiet	9
2.1	Allgemeine Darstellung	9
2.2	Auswahl der Wohneinheiten für das Monitoring	10
3	Grundlegende bauphysikalische Zusammenhänge	13
4	Untersuchungsdesign	14
4.1	Vergleichsfälle	14
4.2	Hardwareausstattung der Messstellen	14
4.3	Lage der Messstellen im Gebäude / in den WE	15
4.4	Beschreibung der erfassten Daten	16
4.5	Beschreibung der abgeleiteten Daten	16
4.6	Ergänzung der Datenbasis durch Messdaten des DWD	16
4.7	Aufbereitung der Daten als Eingangsgrößen für die Simulationsrechnungen	17
5	Messergebnisse	18
5.1	Erfasste Rohdaten / Beurteilung der Rohdatenqualität	18
5.2	Klimarandbedingungen (Außenluft und Raumlufte)	19
5.3	Oberflächentemperaturen der Konstruktion (außen und innen)	21
5.4	Hygrothermische Zustände innerhalb der Konstruktion	22
5.5	Darstellung abgeleiteter Größen	26
5.6	Energieverbrauchswerte der untersuchten Wohneinheiten	28
5.7	Ergänzende Daten des DWD	29
6	Modellbildung und Simulation	34
6.1	Beschreibung der Konstruktion und Umsetzung im Modell	34

6.1.1	Geometrische Eigenschaften / Wandaufbau	34
6.1.2	Materialdaten	36
6.2	Darstellung der Simulationsergebnisse	38
6.2.1	Modellkalibrierung zur Qualifikation der Simulationsergebnisse	38
6.2.2	Betrachtung der U-Werte der verschiedenen Konstruktionen	41
6.2.3	Vergleichsrechnungen zur Bewertung verschiedener Sanierungsoptionen	52
6.2.4	Vergleich der Transmissionswärmeverluste über die Außenwandkonstruktion bei verschiedenen Sanierungsoptionen	61
6.2.5	Vergleich der Lüftungswärmeverluste für unterschiedliche Raumlufttemperaturen und Luftwechselraten	68
6.3	Integrierter Vergleich verschiedener Systemansätze	70
7	Schlussfolgerungen	73
7.1	Vorzüge und Nachteile der betrachteten Grundsystemansätze	73
7.1.1	Konvektiv beheizte Systeme	73
7.1.2	Systeme mit Wandflächentemperierung	73
7.2	Ableitung einer Hybridlösung	74
8	Glossar	75
8.1	Absolute Luftfeuchtigkeit	75
8.2	Ausgleichsfeuchte $w_{80}$ und Sättigungsfeuchtegehalt $w_{sat}$	75
8.3	Dampfdiffusion	75
8.4	Heizwärmebedarf (Q <sub>h</sub> )	75
8.5	Konvektion	75
8.6	Lüftungswärmeverlust	75
8.7	Relative Luftfeuchtigkeit	76
8.8	Rohdichte	76
8.9	Spezifische Wärmekapazität c	76
8.10	Strömung	76
8.11	Taupunkttemperatur	76
8.12	Transmissionswärme	76
8.13	Wärmebrücke	76
8.14	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)	77

8.15	Wärmedurchgangswiderstand R	77
8.16	Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ -Wert)	77
8.17	Wärmeleitfähigkeitsgruppe (WLG)	77
8.18	Wärmeleitfähigkeitsstufe (WLS)	77
8.19	Wärmespeicherfähigkeit $\rho * c$	78
8.20	Wasseraufnahmekoeffizient $A_w$	78
8.21	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl $\mu$	78

# 1 Ausgangslage / Motivation

## 1.1 Vorangestellte Projekte zur Analyse der Bausubstanz und Planungsbe- gleitung

Bereits im Sommer 2012 wurden für die zu betrachtenden Gebäude umfangreiche Gutachten erstellt. Diese hatten

- eine numerische Gebäudesimulation zur Betrachtung der energetischen Sa-  
nierungsqualitäten unterschiedlicher Sanierungsvarianten (**Gebäudesimulati-  
on – Anhang 1**) sowie
- die Hygrothermische Untersuchung konstruktiver Details (**Bauteilsimulation –  
Anhang 2**)

zum Gegenstand.

Im Rahmen der **Gebäudesimulation** wurden zunächst drei verschiedene Grundvari-  
anten als Sanierungsoptionen betrachtet und mit einem unsanierten Modell (als Ver-  
gleichsfall – im Gutachten als Variante 0 bezeichnet) verglichen:

- **Variante 1:** Konvektionsheizung mit Innendämmung bestehend aus 70 mm  
starken Multiporplatten
- **Variante 2:** Wandflächentemperierung mit Innendämmung bestehend aus ei-  
ner 30 mm starken Dämmputzschicht (Klimasan)
- **Variante 3:** Wandflächentemperierung mit Innendämmung bestehend aus  
70 mm starken Multiporplatten

Die Betrachtung der erreichbaren U-Werte für die einzelnen Varianten zeigt deutlich,  
dass gegenüber dem unsanierten Bestand naturgemäß in allen Varianten Verbesse-  
rungen erzielt werden können. Erkennbar ist jedoch auch, dass die Energieverluste  
der Varianten mit dem Dämmputz in einer Stärke von nur 30 mm nicht in dem Maße  
reduziert werden können wie bei den Varianten mit der stärkeren Dämmplatte (siehe  
dazu auch Abbildung 1).

Variante	V0	V1	V2	V3
U-Wert [W/m²K]	1,625	0,448	1,087	0,465
Transmissionswärmeverlust [W/m²K]	0,71	0,48	0,61	0,48

Abbildung 1 *Vergleich der U-Werte der jeweiligen Außenwand fowie der  
flächenbezogenen Transmissionswärmeverluste pro m2 Hüllfläche  
(Quelle: Gutachten zur numerischen Gebäudesimulation, 08/2012)*

Im nachfolgend erstellten Gutachten zur hygrothermischen Verhalten der Konstrukti-  
on mussten die Varianten mit einer Dämmputzstärke von 30 mm schließlich verwor-

fen werden, da bei ausgeschalteter Wandflächentemperierung der Mindestwärmeschutz nicht in allen Fällen eingehalten werden würde (siehe nachfolgender Abschnitt).

Bei der **Bauteilsimulation** bestand das Ziel darin, ausgewählte konstruktive Details bei der Ausführung der Innendämmung mittels einer Klimasan-Wärmedämmputzschicht hinsichtlich ihres hygrothermischen Verhaltens zu überprüfen. Herausgestellt wurde, dass bei der Realisierung einer 55 mm starken Klimasan-Schicht auf der Wand der Mindestwärmeschutz an den ausgewählten Details gewährleistet werden kann. In einigen Fällen wurden dazu die Detailaufbauten in Abstimmung mit dem Architekten optimiert (Einbringen entsprechender Flankendämmungen etc.), so dass auch in den kritischen Bereichen (z.B. Fensteranschlussdetails, Terrassentüren, Sockelanschlüsse, Holzbalkeneinbindungen) die minimalen Oberflächentemperaturen nicht unterschritten werden. Eine alternative Betrachtung mit einer Stärke des Dämmputzes von lediglich 30 mm hingegen hat gezeigt, dass die Vorgaben zum Mindestwärmeschutz und Feuchteschutz ohne eingeschaltete Wandflächenheizung nicht eingehalten werden. Die Betrachtung sämtlicher Details erfolgte daher ausschließlich für die 55 mm starke Dämmvariante.

Beide genannten Gutachten bildeten die Grundlage für das im Anschluss entwickelte Monitoring-Projekt, welches Gegenstand des vorliegenden Berichts ist. Sie werden im Sinne einer vollständigen Darstellung aller Sachverhalte als Anlagen zum Bericht beigefügt.

## 1.2 Bezug der Untersuchungen zum EU-Projekt Co<sub>2</sub>olBricks

Das Denkmalschutzamt der Freien und Hansestadt Hamburg koordinierte als Lead-Partner im Rahmen des EU INTERREG IVB Ostseeprogramms (Baltic Sea Region Programme 2007 – 2013) die gemeinsamen Forschungsaktivitäten von 18 Partnern (Behörden, Universitäten, Stiftungen und Verbände) aus neun Ostseeanrainerstaaten im Rahmen von **Co<sub>2</sub>olBricks**. Das Projekt wurde 2011 gestartet und wurde im Dezember 2013 abgeschlossen. Ziel war die Erprobung und Dokumentation alternativer technischer Lösungen zur energetischen Ertüchtigung bestehender Bauwerke unter besonderer Berücksichtigung baukultureller Belange – insbesondere im Hinblick auf die Erhaltung der äußeren Fassade und damit verbunden des gewohnten Stadtbildes. Der Schlussbericht des Projektes wurde im Dezember 2013 vorgelegt. Die Messungen wurden bis zum 30.04.2014 über das Projektende hinaus fortgeführt, um eine weitere vollständige Heizperiode betrachten zu können.

Ergänzend zu den hier geführten Untersuchungen am Standort Hamburg Passierzettel ergab sich die Möglichkeit, weitere Messungen an einem zweiten Standort in Hamburg Bahrenfeld vorzubereiten und umzusetzen. Die Zielstellung des Denkmal-

schutzamtes ist es, die vorhandene Datenbasis zu verbreitern und für künftige – weiterführende Betrachtungen verfügbar zu machen. Insbesondere sollen modifizierte Schichtenaufbauten (Verwendung Dämmputz vs. mineralischer Dämmplatten) und weitere Gebäudetypen (Kubatur, Standortbedingungen, Art der Bestandskonstruktion etc.) im Rahmen eines dreijährigen Langzeitversuches betrachtet und in die Untersuchung einbezogen werden. Die Betrachtung wird nicht ausschließlich auf das Verhalten der Außenwandkonstruktion beschränkt – vielmehr soll die Untersuchung die tatsächlichen Energieverbrauchswerte einbeziehen und Rückschlüsse auf das Nutzerverhalten gestatten.

Die hier zu untersuchende Gebäudestruktur unterscheidet sich erheblich von der Situation am Standort Passierzettel. Während es sich in der vorangegangenen Untersuchung um eine klassische Blockbebauung mit einer sehr kompakten Kubatur handelt, befindet sich am Standort Hamburg Holstenkamp ein aufgelöstes Gebäudeensemble (ehemals eingeschossig – künftig mit ausgebauten Dachgeschossen), welches weitaus komplexere Anforderungen an eine energetische Sanierung mit sich bringt.

### **1.3 Einordnung in laufende nationale und internationale Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten**

Die angestrebten Untersuchungen zur energetischen Sanierung von Gebäuden ohne Beeinträchtigung des äußeren Erscheinungsbildes fügen sich nahtlos in eine Reihe von F&E-Aktivitäten in Deutschland und Europa ein. Neben Fragen im Zusammenhang mit der technischen Realisierung von Innendämmsystemen (Analyse und Beseitigung von Wärmebrücken, Vermeidung von Kondensatbildung in der Konstruktion, Gewährleistung des notwendigen Schlagregenschutzes und Sicherung einer dauerhaft schadensfreien Sanierung), rücken zunehmend auch Überlegungen hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Natur in den Focus der Betrachtungen. Fragen wie beispielsweise:

- Bis zu welcher Dämmstärke ist die Umsetzung von substanzerhaltenden Innendämmmaßnahmen sinnvoll?
- In welcher Weise kann man durch eine Kombination von Innendämmmaßnahmen mit weiteren technischen Lösungen zu einem möglichst rigiden System gelangen, welches gegen negative Einflüsse weitgehend tolerant ist?
- Wie müssen ggf. weitere Anpassungen der Planungsrandbedingungen (Klima/Nutzer) hinsichtlich der Behaglichkeitskriterien beim Einsatz von Flächenheizsystemen anstelle konventioneller Konvektionsheizungen in Betracht gezogen werden?

- Welche Energiesparpotenziale können durch technische Lösungen tatsächlich erzielt werden (unter Berücksichtigung des Nutzerverhaltens)?

sollen im Sinne einer komplexen Betrachtung am konkreten Beispiel diskutiert werden. Der Ansatz zielt auf die Entwicklung rigider Systeme, welche langfristig eine schadensfreie Ertüchtigung erhaltenswerter Gebäude ermöglichen.

#### 1.4 Sanierungsgegenstand und –potenzial in Hamburg

Speziell im Norden Deutschlands spielen ziegelsichtige (Klinker-) Fassaden eine herausragende Rolle im Bezug auf das Erscheinungsbild von Städten und Gemeinden. Diese im Rahmen energetischer Sanierungen mit einem „klassischen“ außenliegenden Wärmedämmverbundsystem zu überarbeiten, würde einen regelrechten Identitätsverlust nach sich ziehen, der aus der Sicht des Denkmalschutzamtes nicht hinnehmbar ist (eine Überarbeitung der backsteinernen Fassaden – bspw. mit einem Wärmedämmverbundsystem – würde die baugeschichtliche / baukulturelle Aussage für den Betrachter unzugänglich machen).

Aus diesem Grund setzt der Denkmalschutz einen Hauptschwerpunkt auf die behutsame Ertüchtigung des Gebäudebestandes unter Verwendung geeigneter Sanierungsstrategien. Neben der zwischenzeitlich vielfach zur Anwendung gebrachten Innendämmung als „Ideallösung“ für besonders schützenswerte Gebäude sollen gleichzeitig Möglichkeiten zu alternativen Heizungslösungen untersucht werden. Dabei soll nicht zwischen der einen oder der anderen Lösung entschieden werden – vielmehr geht es um eine sinnvolle Kombination verschiedener Strategien, so dass jeweils das optimale Aufwands-/Nutzen-Verhältnis erreicht werden kann.

Allein in der Freien und Hansestadt Hamburg verfügen die Wohnungsgesellschaften (öffentliche Träger) über einen immensen Bestand an sanierungsbedürftigen Wohnbauten, bei denen (neben der Wohnfunktion) das äußere Erscheinungsbild aus denkmalpflegerischer und städtebaulicher Sicht zu erhalten ist. Um das Wohnen in Städten (wie beispielsweise in Hamburg) auch weiterhin attraktiv und bezahlbar zu halten, müssen zwangsläufig ökonomisch optimale Lösungen entwickelt und umgesetzt werden. Soll der Gebäudebestand weiterhin genutzt werden, muss er in den nächsten Jahren energetisch umfassend aufgewertet werden, um steigenden Warmmieten entgegenzuwirken.



## 2 Untersuchungsgebiet

### 2.1 Allgemeine Darstellung

Das zu betrachtende Gebäudeensemble befindet sich nordwestliche vom Hamburger Zentrum und ist über den Holstenkamp mit dem Stadtzentrum verbunden. Die Bebauung im näheren Umfeld ist aufgelockert – es grenzt ein Kleingartengebiet an.

Der Umbau des Areals und der darin befindlichen Gebäude erfolgt durch eine Eigentümergemeinschaft, die als Erwerber und Bauherren überwiegend auch als spätere Eigennutzer einziehen werden. Damit verbunden viele verschiedene Nutzeranforderung, welcher durch die Architekten bei der baulichen Umsetzung des Vorhabens entsprechend Rechnung getragen werden muss.

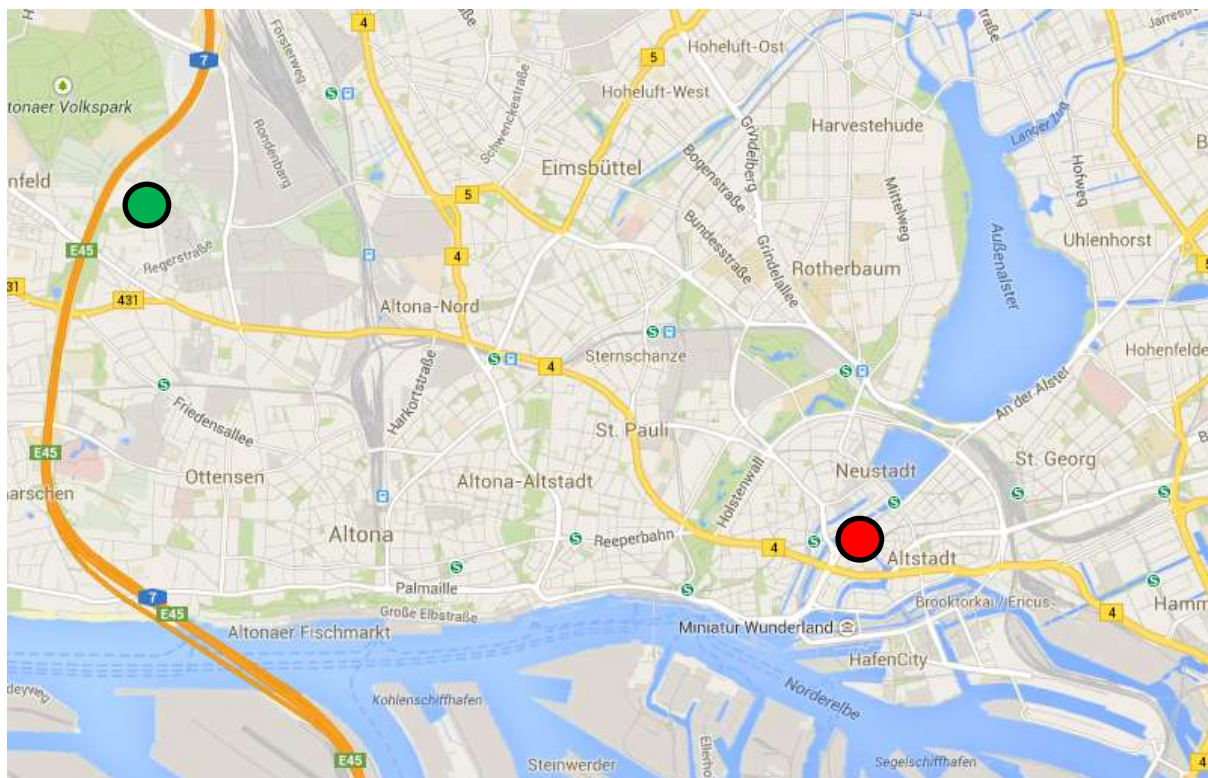


Abbildung 2 *Übersichtslageplan Untersuchungsgebiet: grün markiert ist der Standort Hamburg Holstenkamp, rot markiert das Stadtzentrum (Bildquelle: Google Maps, 11.04.2014)*

Die räumliche Einordnung des Untersuchungsgebietes ist in der Abbildung 2 dargestellt. Es handelt es sich um mehrere Einzelgebäude, welche in der Regel über ein Erdgeschoss und ein ausgebautes Dachgeschoss verfügen. Die Außenwandstärken betragen in der Regel ca. 36 cm und bestehen aus einer äußeren Ziegelschale (Klinker) und einem 24 cm starken Hintermauerwerk aus Kalksandsteinen.

In den zu untersuchenden Gebäuden (Haus 2 und Haus 3) werden jeweils drei Wohnungen eingeordnet, deren Grundrisse von den jeweiligen Eigentümern individuell gestaltet werden.

## 2.2 Auswahl der Wohneinheiten für das Monitoring

Die Auswahl der zu untersuchenden Wohneinheiten erfolgte in Abstimmung mit dem Denkmalschutzamt und den Eigentümern. Dabei wurden zwei vergleichbare WE (Lage der WE jeweils im Nord-Westen der Gebäude) ausgewählt (siehe Abbildung 3).

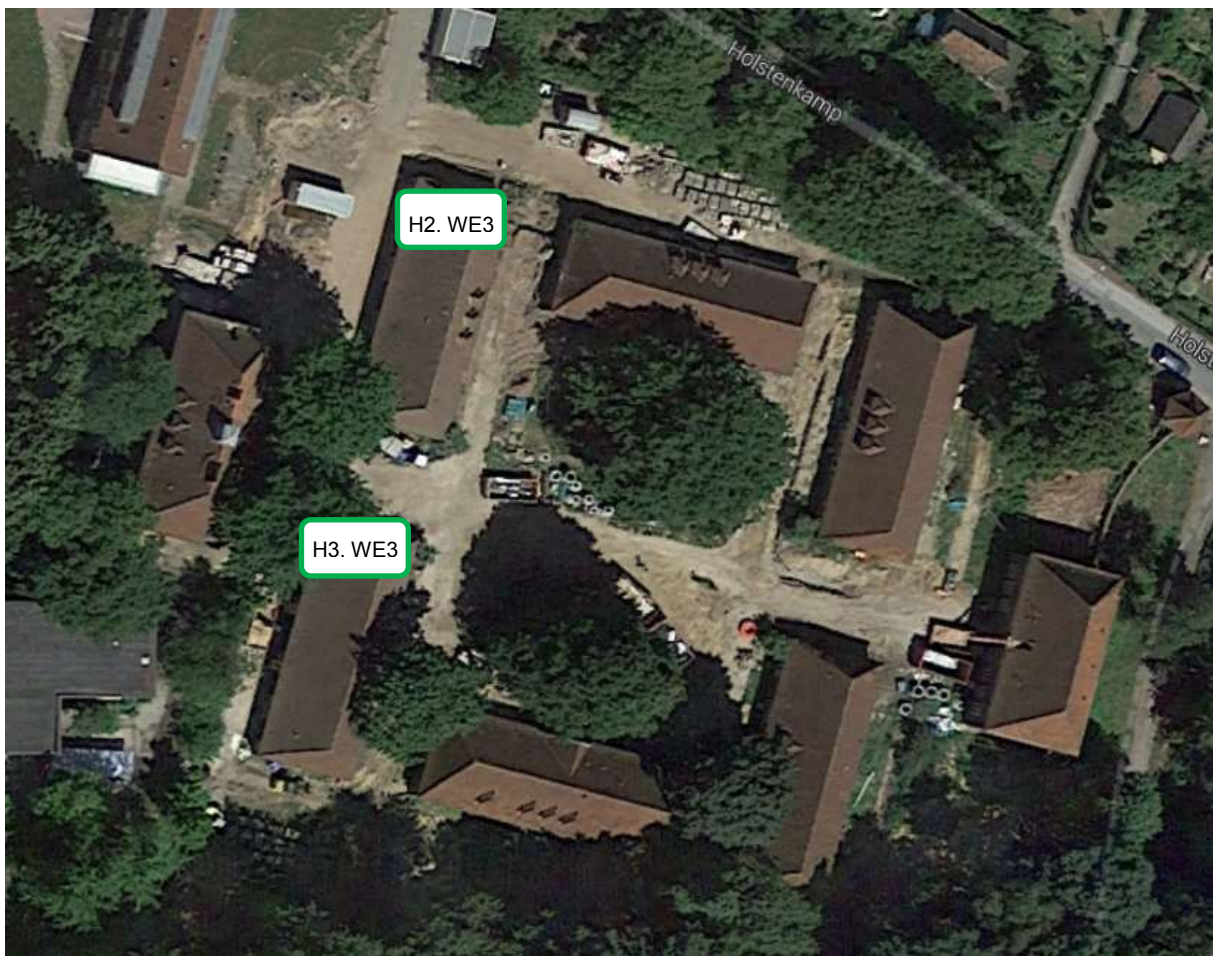


Abbildung 3 Lage der Wohneinheiten im Gebäude (grün/weiß markiert) – im Norden des Areals: Haus 2, WE 3 sowie im Süden: Haus 3, WE 3 (Bildquelle: Google Maps, 11.04.2014)

Einen visuellen Eindruck von der zu untersuchenden Baustruktur vermittelt die nachfolgende Abbildung 4.



Abbildung 4 *Außenaufnahmen der umzubauenden Gebäude*

Die Wohneinheiten sind grundsätzlich ähnlich geschnitten. Die Gestaltung der Grundrisse und die lagemäßige Einordnung der Messstellen ist in der Abbildung 5 grafisch dargestellt.



Abbildung 5 Grundrisse der betrachteten WE und Lage der eingeordneten Messstellen (Quelle: Planung, Heyden und Hidde Architekten)

### 3 Grundlegende bauphysikalische Zusammenhänge

Der Transport von Wärme und Feuchte innerhalb von Baukonstruktionen muss stets im Zusammenhang betrachtet werden. Vor allem bei Innendämmmaßnahmen ist der Feuchteverteilung in der Konstruktion besondere Aufmerksamkeit zu widmen, da infolge der Dämmung die Konstruktion im Winterfall stärker auskühlen kann und so möglicherweise der Gefahr von Frostschäden ausgesetzt wird.

Beide Transportvorgänge hängen von den jeweils innen und außen herrschenden Randbedingungen ab. So erfolgt der Wärmetransport (Transmission) von der wärmeren zur kälteren Seite der Konstruktion. Wasserdampf wird in Richtung des Dampfdruckgefälles transportiert (und ist in der Regel gleichgerichtet mit dem Wärmetransport). Je höher die Differenzen (Gradienten) der Randbedingungen sind um so größer ist der Wärme- bzw. der Dampfstrom.

Neben gasförmigem Wasser wird durch kapillare Wasserleitung auch Flüssigwasser in der Konstruktion transportiert. Hier spielen vor allem die Baustoffeigenschaften (die Porosität, der Wasseraufnahmekoeffizient und die kapillare Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Sättigungsgraden) eine große Rolle.

Die Stoffeigenschaften, welche den Wärme- und Feuchtetransport beeinflussen werden oft vereinfachend als statische Größen angenommen. Genau genommen hängt jedoch beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes von der im Stoff befindlichen Wassermenge ab. Die Wasseraufnahme und -leitung ist ebenfalls abhängig vom Feuchtezustand (ein vollkommen trockenes Material nimmt in der Regel weniger gut Wasserauf als ein bereits befeuchteter Stoff). Ferner bestehen auch Abhängigkeiten zwischen der Temperatur eines Materials und seiner Wärmeleitfähigkeit.

Um diese komplexen Zusammenhänge im Modell hinreichend genau abbilden zu können, werden auf der Grundlage von Messreihen im Labor entsprechende Materialfunktionen erstellt, die im Modell hinterlegt werden. Das Simulationsverfahren selbst berechnet die Zustände in der Konstruktion in kurzen Zeitschritten, so dass neben den von außen wirkenden Randbedingungen jeweils die Ergebnisse des vorangegangenen Schritts (Wärme- und Feuchteverteilung in der Konstruktion) als Ausgangssituation für den nächsten Berechnungsschritt verwendet werden.

Die Berechnungsmethode ermöglicht eine relativ genaue Abbildung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in Baukonstruktionen, so dass deren Verhalten wesentlich besser beurteilt werden kann, als mit den bisher verwendeten analytischen Verfahren.

## 4 Untersuchungsdesign

### 4.1 Vergleichsfälle

Gemäß der Aufgabenstellung sollen zwei Sanierungsvarianten betrachtet werden:

- Fall 1: Die Außenwandkonstruktion wird mit einer Innendämmung aus XELLA-Multipor-Platten versehen, die Heizung wird mittels konventionellen Heizkörpern (konvektiv) realisiert. – Umsetzung in Haus 2, WE3;
- Fall 2: Die Außenwandkonstruktion wird mit einer minimalen Innendämmung aus 30 mm Klimasan-Dämmputz versehen, die Wärmeübergabe wird als Wandflächenheizung realisiert. – Umsetzung in Haus 3, WE3. Zur Sicherung des Mindestwärmeschutzes werden technische Vorkehrungen getroffen, die ein automatisches Einschalten des Heizsystems bei Unterschreitung eines festgelegten Temperaturgrenzwertes gewährleisten. Diese Regelung ist so zu gestalten, dass sie von Nutzer nicht übersteuert werden kann.

Die Wärmeversorgung erfolgt über ein Nahwärmenetz, welches eigens für das Gebäudeensemble errichtet und von einem BHKW gespeist werden soll.

Zur außenseitigen Ertüchtigung der Fassade zur Gewährleistung des Schlagregenschutzes (gemäß WTA-Merkblatt Voraussetzung bei der Umsetzung von Innendämmmaßnahmen) wird zunächst eine vollständige Fugeninstandsetzung vorgenommen. Ob und in welchem Umfang zusätzlich eine adaptive hydrophobe Beschichtung aufgebracht werden sollte, wird nach Fertigstellung der Fugen beurteilt.

### 4.2 Hardwareausstattung der Messstellen

Die ausgewählten Wohneinheiten wurden mit entsprechender Messtechnik ausgestattet, so dass alle für die Untersuchung notwendigen physikalischen Messgrößen erfasst werden können. Die nachfolgende Abbildung 6 verdeutlicht den Aufbau der einzelnen Messstrecken.

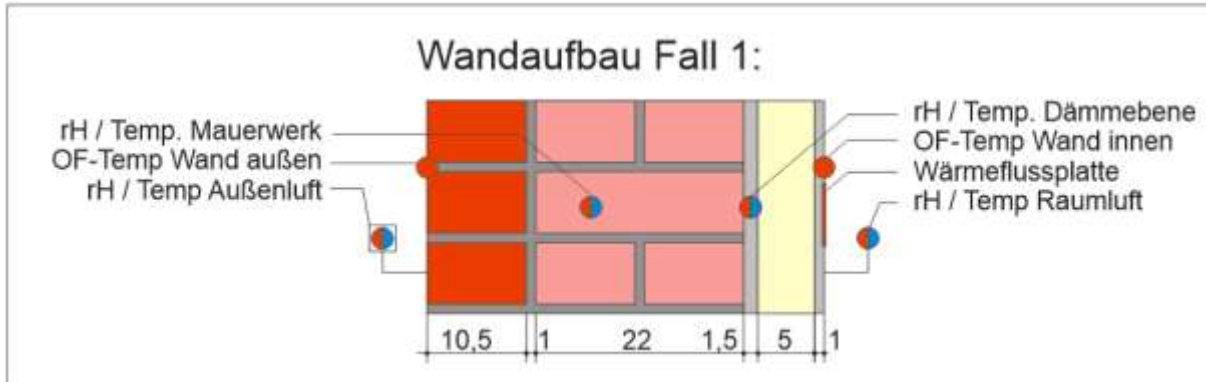


Abbildung 6 *Anordnung der Sensoren  
Messstrecke Fall 1*

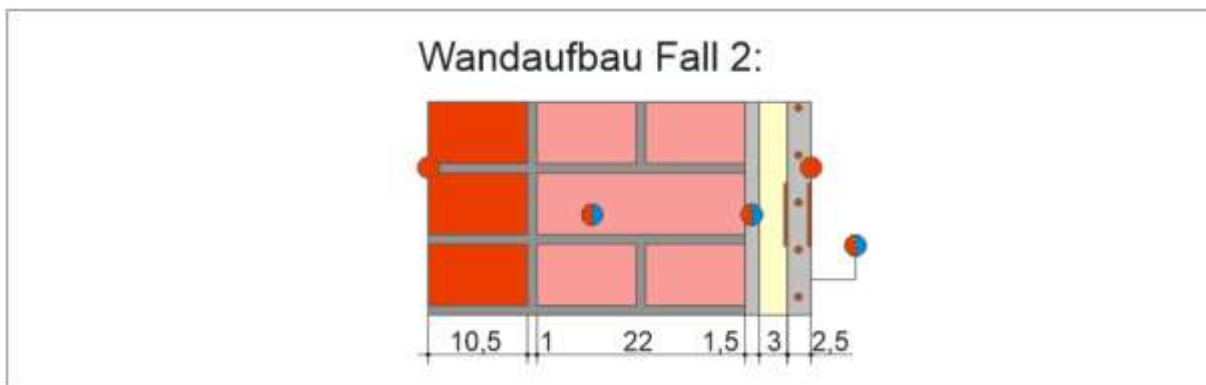


Abbildung 7 *Anordnung der Sensoren  
Messstrecke Fall 2*



### 4.3 Lage der Messstellen im Gebäude / in den WE

Die Lage der Wohneinheiten (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 5) ist hinsichtlich der Fassadenausrichtung vergleichbar, beide Messstrecken befinden sich im Erdgeschoss der Gebäude im nordwestlichen Teil der Gebäude.

#### 4.4 Beschreibung der erfassten Daten

Folgende Primärdaten wurden erfasst:

- Temperatur und relative Luftfeuchte in der Außenluft;
- Temperatur und relative Luftfeuchte in der Raumluft;
- Oberflächentemperatur der Konstruktion (sowohl innen als auch außen);
- Temperatur und relative Luftfeuchte im Mauerwerk;
- Temperatur und relative Luftfeuchte in der Kleberebene (Fall 1) bzw. zwischen Dämmputz und Grundputz (Fall 2);
- Wärmefluss auf der raumseitigen Wandoberfläche sowie (bei Fall 2 – Wandflächentemperierung) zwischen der Wärmeverteilschicht und der folgenden Außenwandkonstruktion.

Die Erfassung der Daten erfolgt durch Datenlogger, welche in der jeweiligen WE dezentral angeordnet sind. Auf eine kabelgebundene Vernetzung zwischen den Gebäuden wurde aufgrund des großen Abstandes verzichtet. Die Datenübertragung auf einen Zentralserver erfolgt direkt per DFÜ (UMTS-Router).

#### 4.5 Beschreibung der abgeleiteten Daten

Eine vollständige Beurteilung der bauphysikalischen Verhältnisse an einer Konstruktion allein anhand der Primärdaten ist nicht möglich. So können beispielsweise die relativen Luftfeuchten verschiedener Messpunkte wegen der stets vorhandenen Temperaturdifferenzen nicht direkt miteinander verglichen werden. Aus diesem Grund werden aus den erfassten Messwerten Sekundärdaten wie:

- der Wassergehalt in der Außenluft und der Raumluft,
- die Taupunkttemperaturen, welche sich anhand der jeweils herrschenden Temperatur und relativen Luftfeuchten ergeben,
- die instationären U-Werte der Außenwandkonstruktion (Ermittlung aus Wärmefluss und Temperaturdifferenz).

abgeleitet. Die Sekundärdaten werden analog zu den erfassten Messwerten aufbereitet und grafisch dargestellt.

#### 4.6 Ergänzung der Datenbasis durch Messdaten des DWD

Ergänzend zu den am Standort erfassten Messdaten wurden im Rahmen der Untersuchungen am Standort Hamburg Passierzettel Wetterdaten des DWD von der Station Hamburg Fuhlsbüttel einbezogen. Dies ermöglichte den Vergleich der selbst erfassten Messdaten (Temperaturen und Luftfeuchten) mit amtlichen Daten und die



Ergänzung des eigenen Datenbestandes mit den notwendigen Informationen bezüglich der Strahlungskomponenten (Globalstrahlung, Direktstrahlung), der Regenmengen sowie der jeweils gemessenen Windverhältnisse. Die Einbeziehung amtlicher Wetterdaten wird auch für das aktuelle Vorhaben vom Denkmalschutzamt angestrebt.

#### **4.7 Aufbereitung der Daten als Eingangsgrößen für die Simulationsrechnungen**

Alle Daten werden mittels eines entsprechenden Konverters so aufbereitet, dass sie mit dem Simulationstool DELPHIN 5 verwendet werden können. Dabei entstehen zum einen Klimarandbedingungen (Lufttemperaturen und relative Luftfeuchten außerhalb des Gebäudes und in den Räumen), welche als Eingangsgrößen für die instationäre Simulation verwendet werden. Darüber hinaus werden Vergleichswerte erstellt (beispielsweise die Ganglinien der Temperatur und der relativen Luftfeuchte innerhalb der Konstruktion), welche anschließend mit den Simulationsergebnissen verglichen und so zur Kalibrierung von Simulationsmodellen herangezogen werden können.

## 5 Messergebnisse

### 5.1 Erfasste Rohdaten / Beurteilung der Rohdatenqualität

Im Vorfeld der Installation der Messtechnik führten statische Erfordernisse, welche erst mit Beginn des Rückbaus erkannt wurden, erkannte Schadstoffrisiken (nahezu vollständiger Austausch der Holzbalkenköpfe wegen festgestellter PAK-Belastungen und Schädigungen am Holz) und die zunehmend schwierigen Witterungsbedingungen zu Verzögerungen im Bauablauf, so dass die Implementation der Sensoren erst zum Jahresende 2013 vorgenommen werden konnte.

Die Erfassung der Rohdaten erfolgte nach einer ersten Inbetriebnahme Inbetriebnahme der Mess- und Kommunikationstechnik im Dezember 2013, musste allerdings im Anschluss daran wieder eingestellt werden, da die bauseits notwendigen Voraussetzungen (z.B. stabile Stromversorgung, mechanische Sicherung der Geräte und Sensoren etc.) erst im März 2014 stabil gesichert werden konnten. Die Daten werden seit Ende März 2014 kontinuierlich zum Zentralserver übertragen. Mit einer Inbetriebnahme der letzten Sensoren (raumseitige Wandoberfläche) kann bis zum Ende des zweiten Quartals gerechnet werden. Im Rahmen der bislang durchgeführten Datenübernahme und -plausibilisierung konnte eine hohe Qualität der Rohdaten festgestellt werden. Ein Sensorausfall musste in der WE3 im Haus 2 festgestellt werden (Temperatur-/Feuchtefühler in der Kleberebene). Der defekte Sensor wurde nach erfolgtem Rückbau der Konstruktion neu gesetzt und erfasst seit dem wieder korrekte Daten.

Die erfassten Rohdaten werden in den folgenden Abbildungen dargestellt und kurz kommentiert.

## 5.2 Klimarandbedingungen (Außenluft und Raumluft)

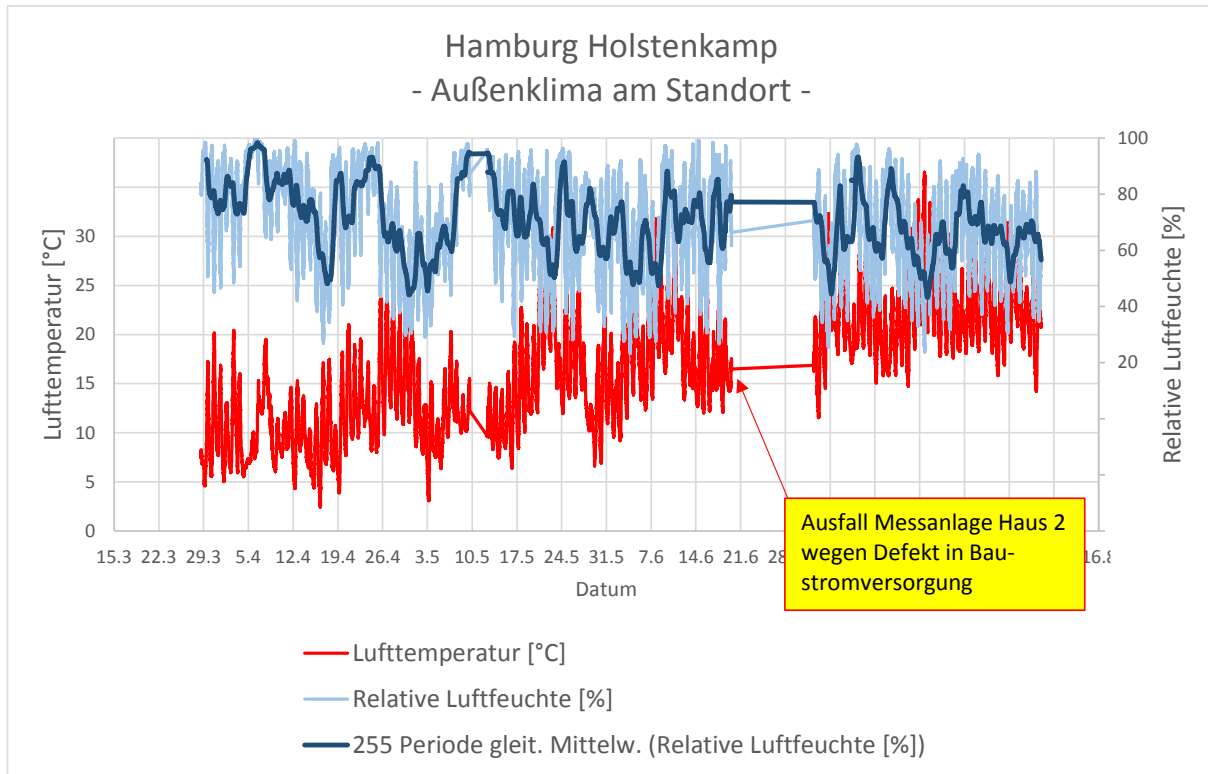


Abbildung 8 Außenklima am Standort Hamburg Holstenkamp

Abbildung 8 zeigt die am Standort erfassten Außenklimabedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte). Die Skalenwerte für die Temperaturkurve befinden sich auf der primären Größenachse. Die Werte für die relativen Luftfeuchten sind auf der sekundären Größenachse ablesbar. Um die Lesbarkeit der Kurve für die relative Luftfeuchte zu verbessern, wird zusätzlich ein gleitender Durchschnittswert (240 Messwerte) eingefügt. Prinzipiell widerspiegeln die beiden Kurven einen standorttypischen Wetterverlauf, gekennzeichnet von relativ hohen Luftfeuchtwerten und gemäßigten Temperaturen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Raumklima in den beiden Wohneinheiten. Zu beachten ist, dass der Einbau einer Heizung erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt. Das bedeutet, die hier dargestellten Daten zeigen demnach lediglich die einwandfreie Funktion der Sensoren.

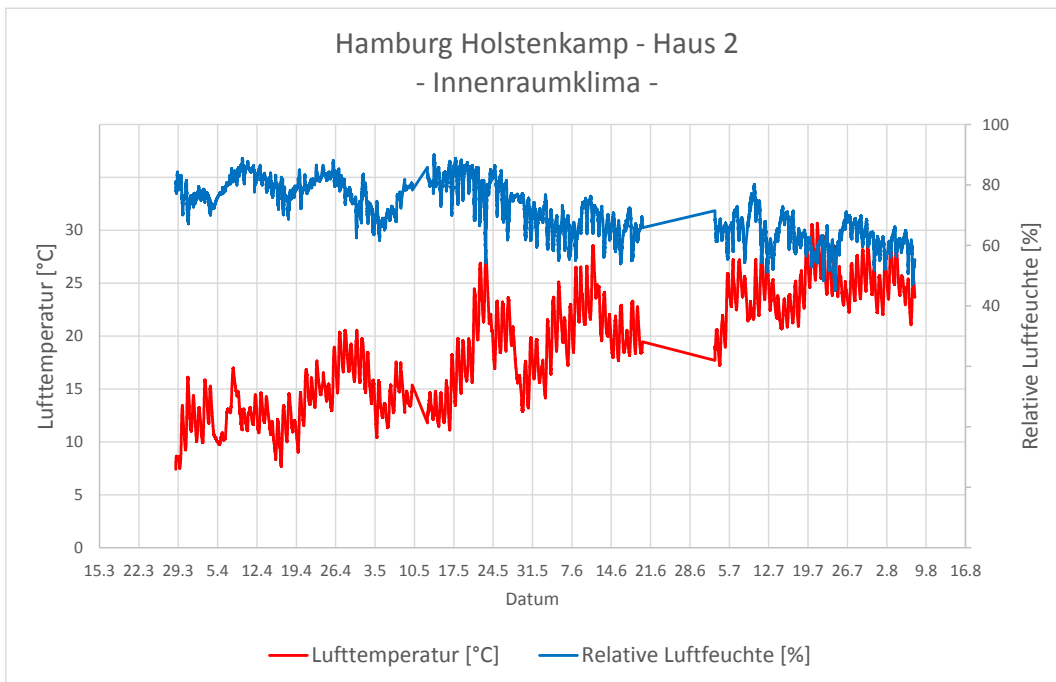


Abbildung 9 *Raumklima Haus 2 WE 3*

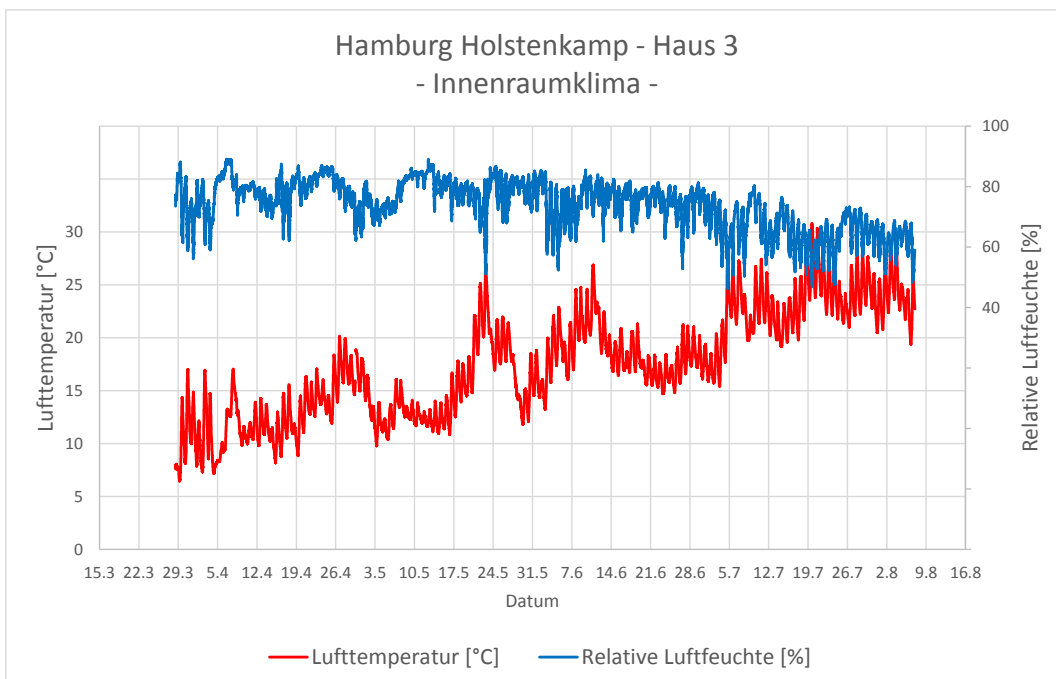


Abbildung 10 *Raumklima Haus 3 WE 3*

### 5.3 Oberflächentemperaturen der Konstruktion (außen und innen)

Die folgenden Darstellungen in Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen den Verlauf der Temperaturen auf der Innen- und der Außenoberfläche der Fassade.

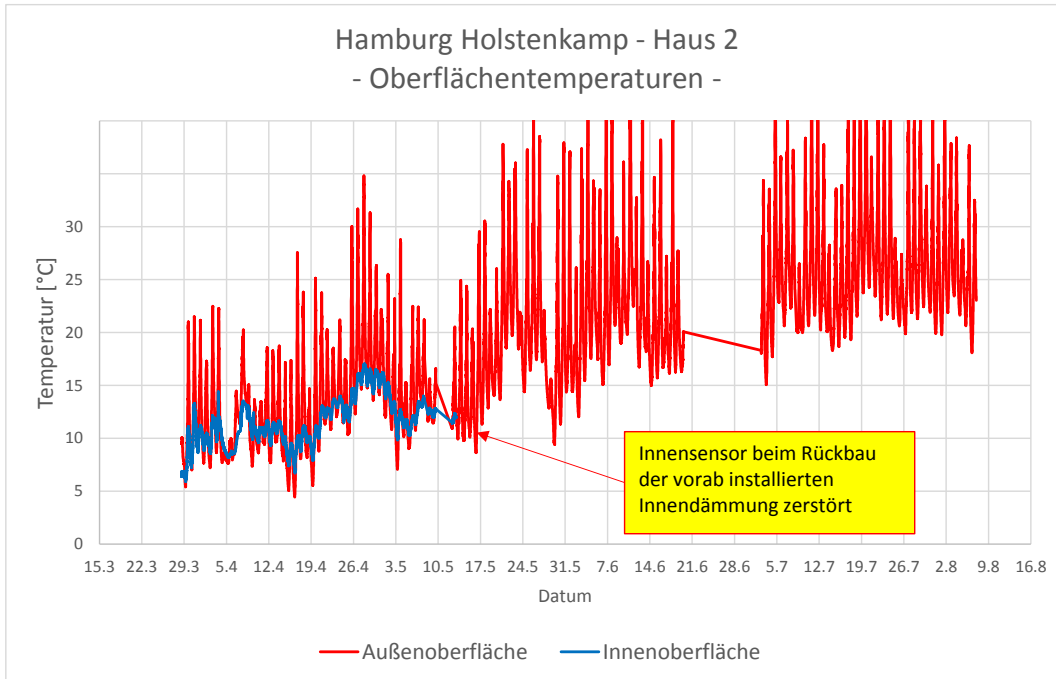


Abbildung 11 Oberflächentemperaturen Haus 2 WE 3

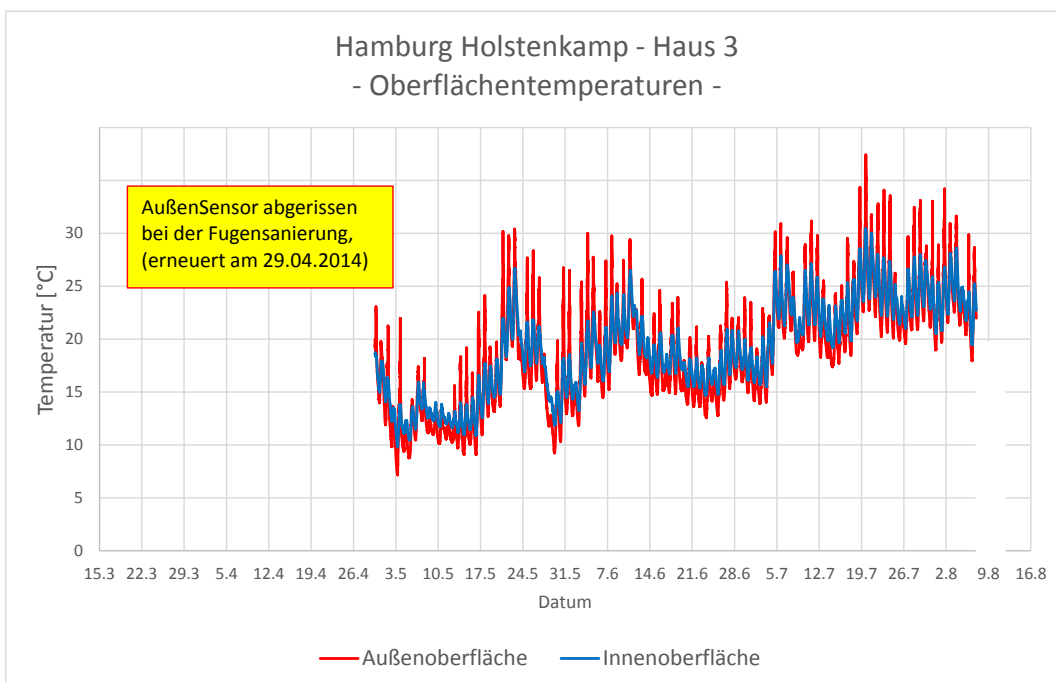


Abbildung 12 Oberflächentemperaturen Haus 3 WE 3

## 5.4 Hygrothermische Zustände innerhalb der Konstruktion

Die folgenden Darstellungen zeigen die Zustände in der Bestandskonstruktion.

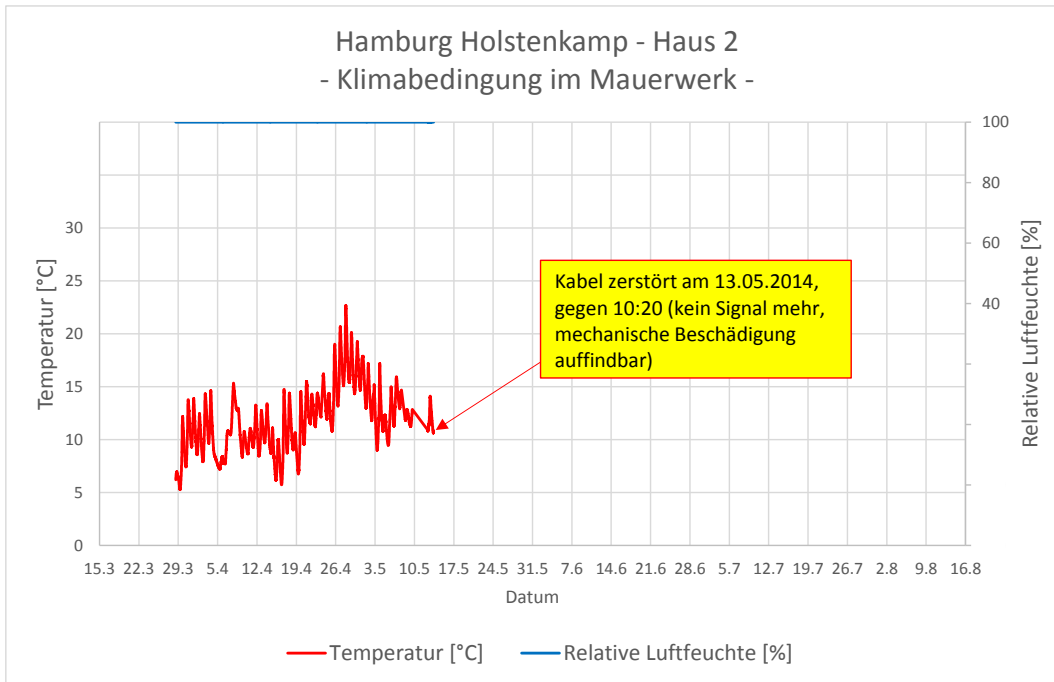


Abbildung 13 Temperatur und relative Luftfeuchte in der Ziegelschale Haus 2 WE 3

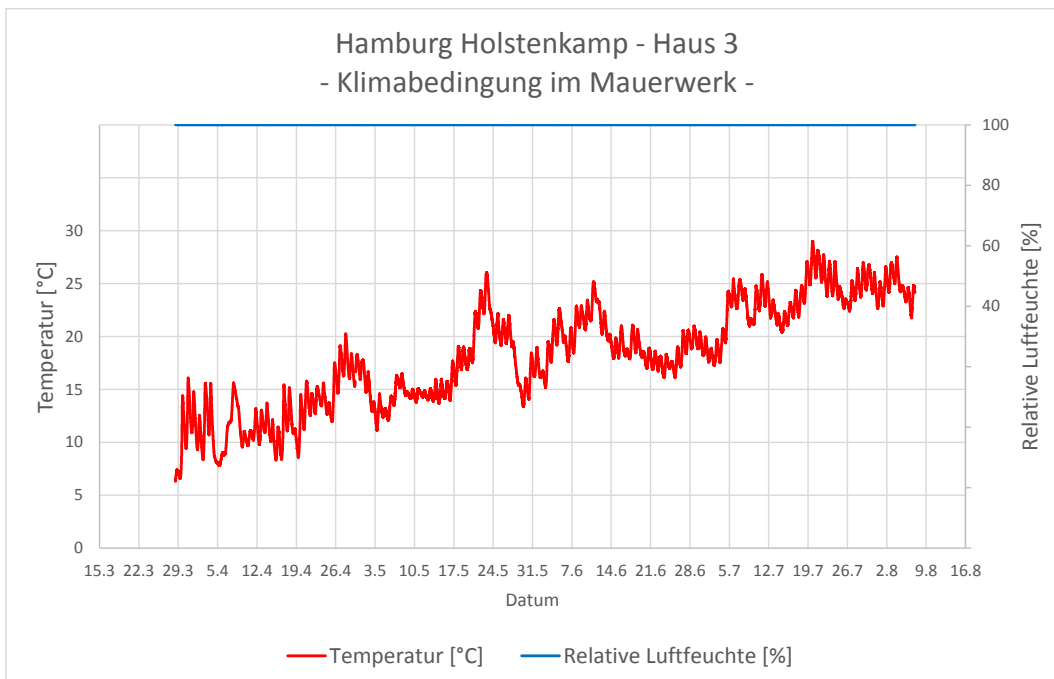


Abbildung 14 Temperatur und relative Luftfeuchte in der Ziegelschale Haus 2 WE 3

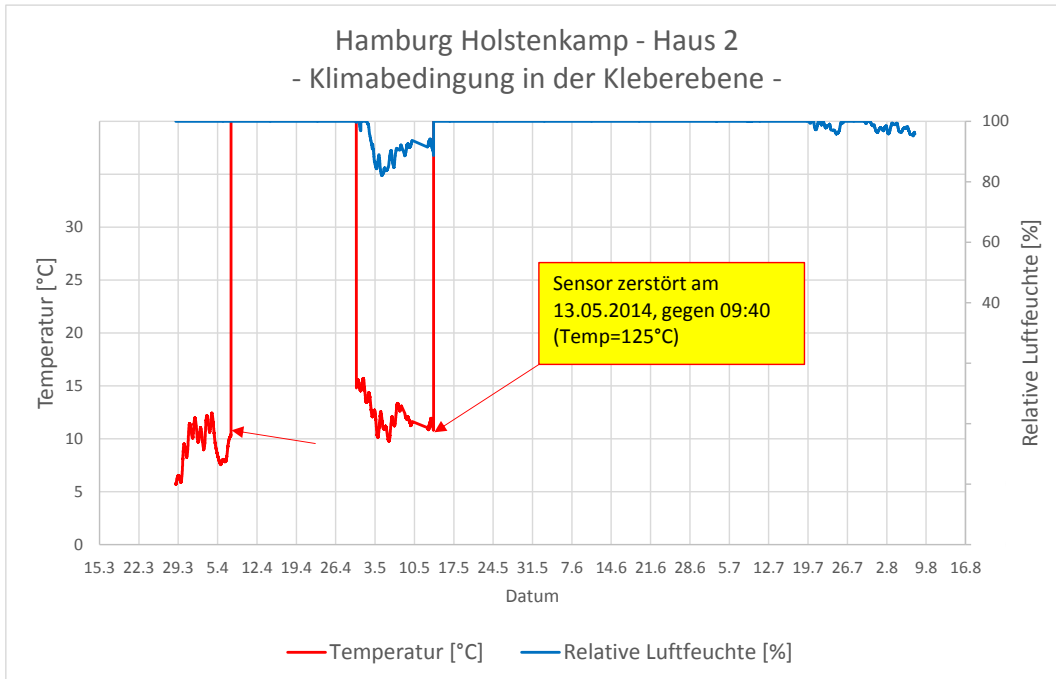


Abbildung 15 *Temperatur und relative Luftfeuchte in der Kleberebene Haus 2 WE 3*

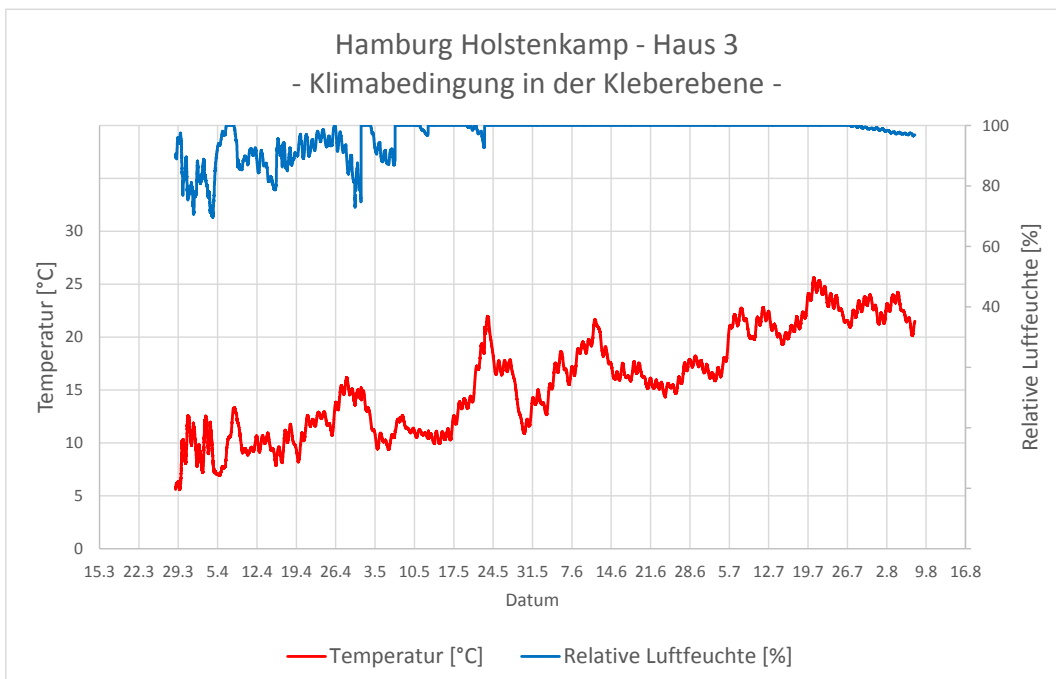


Abbildung 16 *Temperatur und relative Luftfeuchte hinter der Dämmputzebene Haus 3 WE 3*

Bei der vergleichenden Betrachtung der raum- und außenseitigen Klimarandbedingungen mit den innerhalb der Konstruktion gemessenen Werten wird deutlich, dass die Schwankungen der Temperaturen und der relativen Luftfeuchten in der Konstruktion weit geringer ausfallen, als in der Raum- bzw. Außenluft. Die Trägheit der Konstruktion bewirkt, dass kurzzeitige Änderungen der äußeren Randbedingungen kaum Auswirkungen auf den hygrothermischen Zustand innerhalb der Konstruktion haben (dies gilt insbesondere für schwere Bauwerke).

Die getroffene Aussage bezieht nicht nur auf den Einfluss der Temperaturen sondern ebenso auf den Einfluss auftretender Strahlung (diffus, direkt). Nachstehende Abbildung 17 zeigt den Verlauf der Temperaturen an und innerhalb der Konstruktion an einen Wintertag (Datenquelle: Untersuchung Hamburg Passierzettel – Messdaten und Simulationsdaten). Im Modell wurde die tatsächlich vorhandene Konstruktion abgebildet (Nordfassade). Als Klimarandbedingungen wurden die gemessenen Temperaturen und die vom DWD übermittelten Strahlungsdaten verwendet. Mittels numerischer Simulation können so die resultierenden Temperaturen in den oberflächennahen Schichten des Mauerwerks berechnet werden. Entsprechende virtuelle Sensoren wurden beginnend an der Außenoberfläche im Abstand von je einem Zentimeter angeordnet.

Die Strahlung (im Diagramm grün gestrichelt dargestellt) steigt beginnend um 8.00 Uhr an, erreicht gegen 11.00 Uhr ihren Maximalwert und fällt gegen 16.00 Uhr auf 0 zurück. Die Außenluft erwärmt sich zeitversetzt beginnend um 10.00 Uhr, erreicht gegen 15.00 Uhr ihr Maximum und fällt anschließend bis ca. 19.00 Uhr auf den Ausgangszustand zurück.

Oberflächennah bewirken die Temperatur- und Strahlungsänderungen auf der Südfassade (Abbildung 18) einen Temperaturanstieg von ca. 6 – 7 Kelvin (im Diagramm durch die stärkere rote Linie mit der Beschriftung „0 cm Tiefe“ dargestellt). Im Inneren der Konstruktion resultieren bereits in einem Abstand von ca. 10 cm von der äußeren Wandoberfläche kaum mehr Temperaturänderungen (im Diagramm durch die stärkere blaue Linie mit der Beschriftung „10 cm Tiefe“ dargestellt).

Sofort mit Abfall der Strahlungsintensität beginnen sich auch die Temperaturen innerhalb der Konstruktion wieder dem Vorniveau anzugleichen. Bereits gegen 17.00 Uhr ist der Ausgangszustand nahezu wieder erreicht.

Es kann somit davon ausgegangen werden, dass durch die beschriebenen äußeren Einwirkungen keine signifikanten Veränderungen der hygrothermischen Verhältnisse bewirkt werden. Eine Erwärmung und damit verbundene Austrocknung der Konstruktion durch Sonneneinstrahlung im Winter kann allenfalls die obersten Schichten betreffen und ist keinesfalls für das Innenklima relevant.



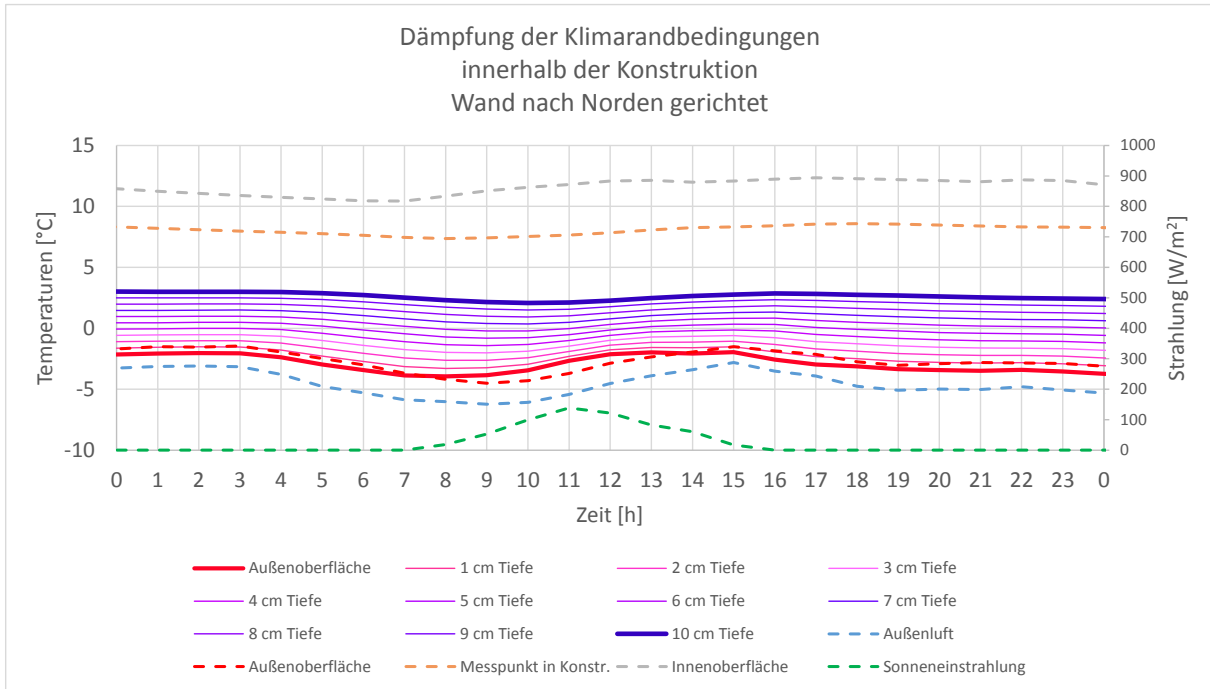


Abbildung 17 *Betrachtung des kurzzeitigen Einflusses der äußeren Klimarandbedingungen auf das thermische Verhalten der Konstruktion. Gemessene Daten sind getrichelt dargestellt, berechnete Daten mit durchgezogenen Linien*

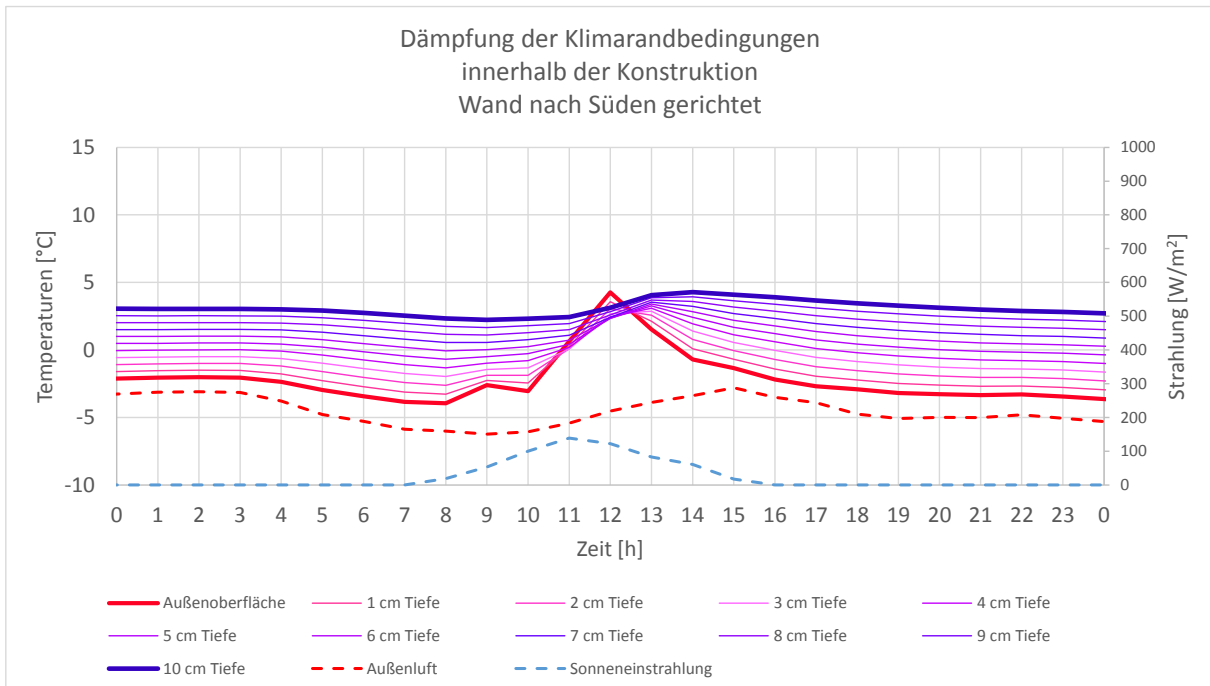


Abbildung 18 *Vergleichsbetrachtung für eine nach Süden ausgerichtete Fassade*

## 5.5 Darstellung abgeleiteter Größen

Da ein direkter Vergleich der Messdaten in einigen Fällen nicht oder nur eingeschränkt möglich ist (z.B. Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur), wurden indirekte Größen rechnerisch abgeleitet. Die nachfolgende Grafik zeigt die ermittelten Wassergehalte in der Außen- und Raumluf.

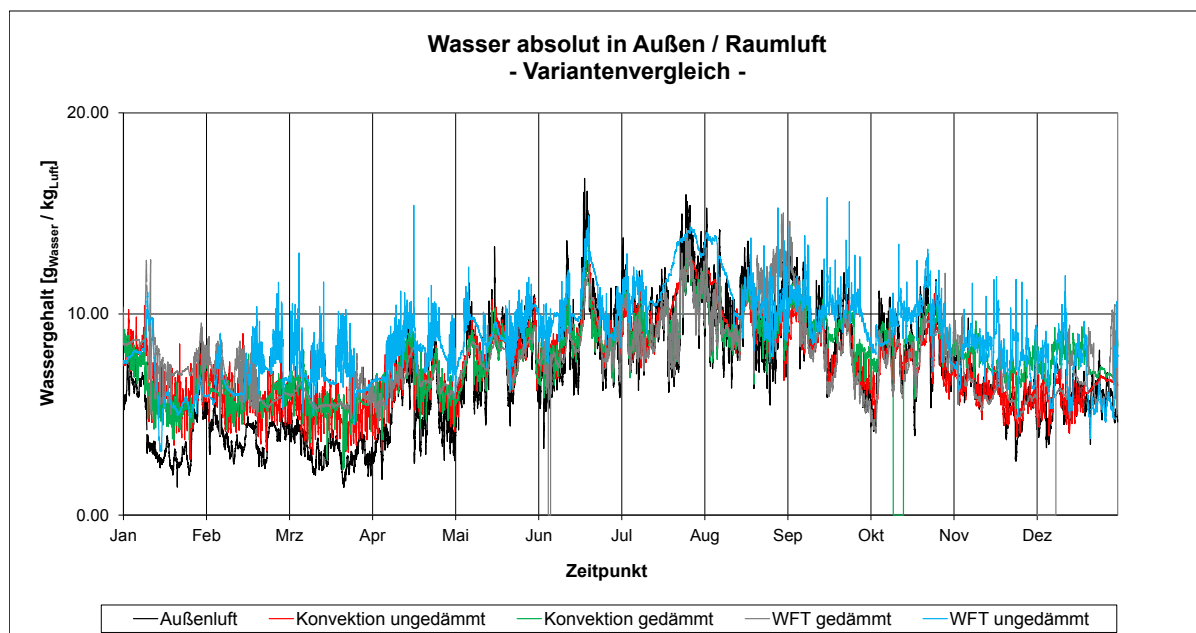


Abbildung 19 *Vergleich der Wassermengen in der Außenluft und in der Raumluf (Außensensor an Haus 2, Innenraumsensoren in Haus 2 und 3)<sup>1)</sup>*

Zur Gewährleistung des Feuchteschutzes und zur Vermeidung von Schimmelbildung auf der raumseitigen Wandoberfläche ist sicher zu stellen, dass die Taupunkttemperatur der Raumluf – also die Temperatur bei der das Wasser in der Raumluf als Kondensat ausfallen würde – stets geringer ist als die Oberflächentemperatur der Konstruktion. Anderenfalls könnte sich Kondensat an der Bauteiloberfläche absetzen, in die Konstruktion eindringen und zu einer zunehmenden Durchfeuchtung der Konstruktion führen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Vergleich der Taupunkttemperaturen der Raumluf mit den gemessenen Wandoberflächentemperaturen.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

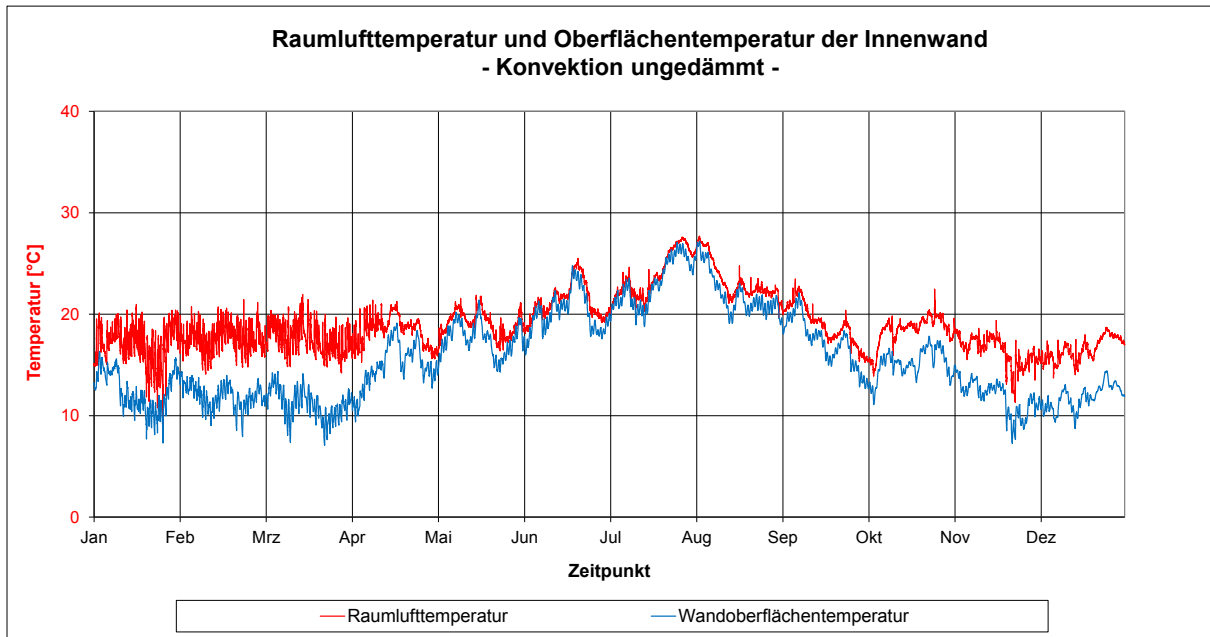


Abbildung 20 *Vergleich Taupunkttemperatur der Raumlufthemperatur / raumseitige Oberflächentemperatur – Haus 2<sup>1)</sup>*

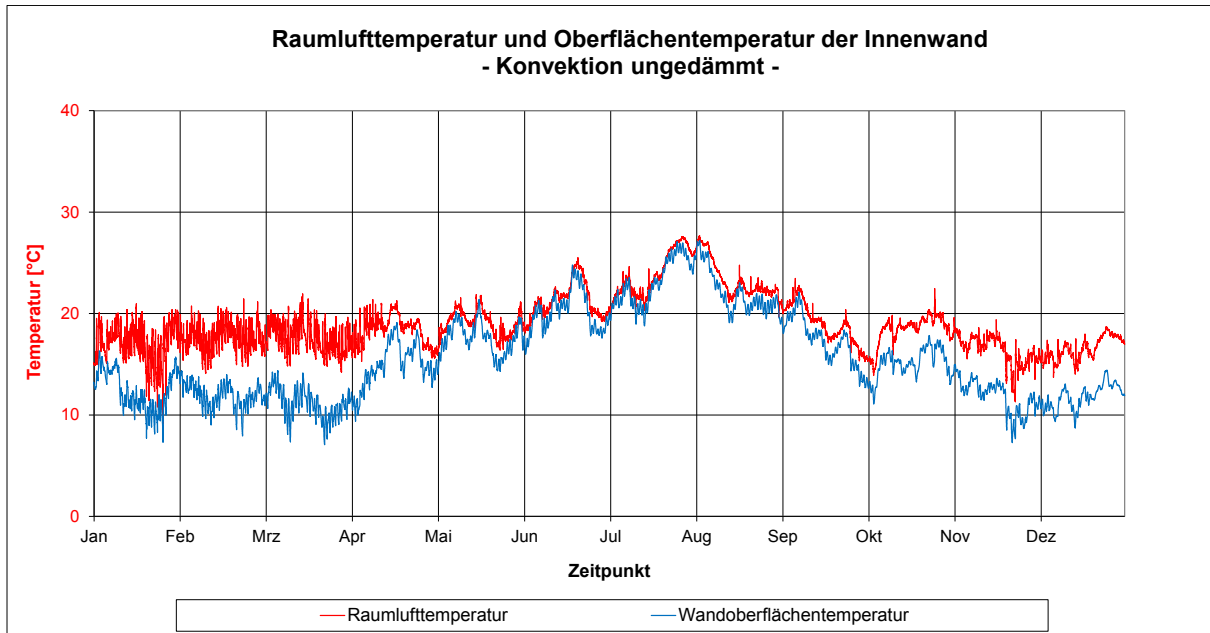


Abbildung 21 *Vergleich Taupunkttemperatur der Raumlufthemperatur / raumseitige oberflächentemperatur – Haus 3<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

## 5.6 Energieverbrauchswerte der untersuchten Wohneinheiten

Die nachfolgenden Grafiken zeigen die ermittelten Energieverbrauchswerte der betrachteten Wohneinheiten. Die Aufzeichnung erfolgt monatsweise durch Ableseung der entsprechenden Erfassungsgeräte.

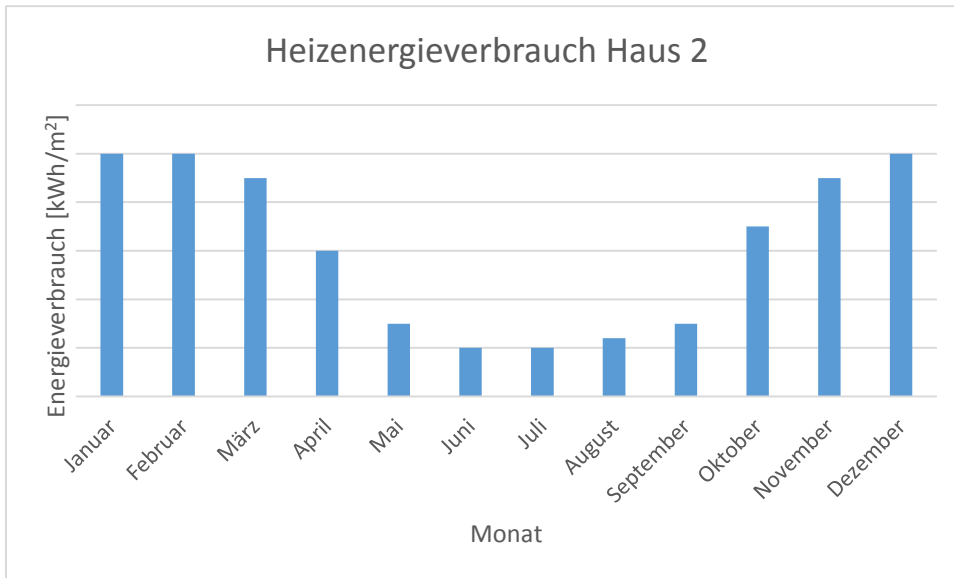


Abbildung 22 Heizenergieverbrauch Haus 2<sup>2)</sup>

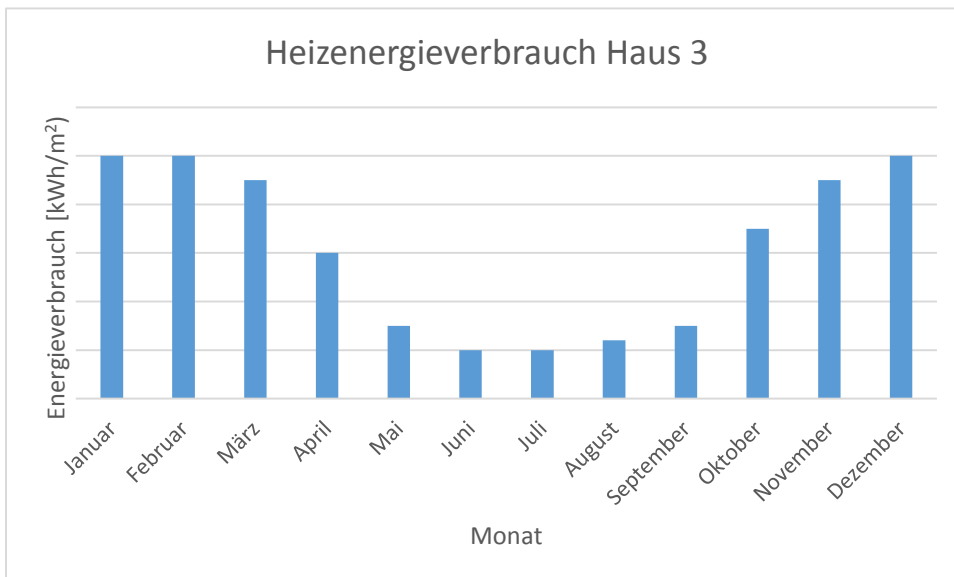


Abbildung 23 Heizenergieverbrauch Haus 3<sup>2)</sup>

<sup>2)</sup> Die Grafik ist ein Schaubild zur Verdeutlichung der vorgesehenen Darstellung

## 5.7 Ergänzende Daten des DWD

Da als Eingangsgröße für die Simulationsrechnungen wie auch zur Bewertung der Messergebnisse am Standort Holstenkamp wird geplant, weitere Daten vom Deutschen Wetterdienst zu akquirieren. Die übermittelten Daten von der Wetterstation Hamburg Fuhlsbüttel (Luftlinienentfernung ca. 13 km) beinhalten die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte, die Windrichtung und –geschwindigkeit, die Niederschlagsmenge sowie die Globalstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung (siehe folgende Abbildungen).

Die Strahlungskomponenten sowie die Wind- und Niederschlagsdaten werden entsprechend plausibilisiert und als Klimadateien für die Verwendung im Simulationsmodell aufbereitet. Die Angaben des DWD zur Lufttemperatur und zur relativen Luftfeuchte werden nur informativ betrachtet (Vergleich mit den am Standort Holstenkamp erfassten Daten) – für die Simulationsrechnungen werden die direkt am Standort erfassten Daten verwendet, da diese die Situation vor Ort besser widerspiegeln.

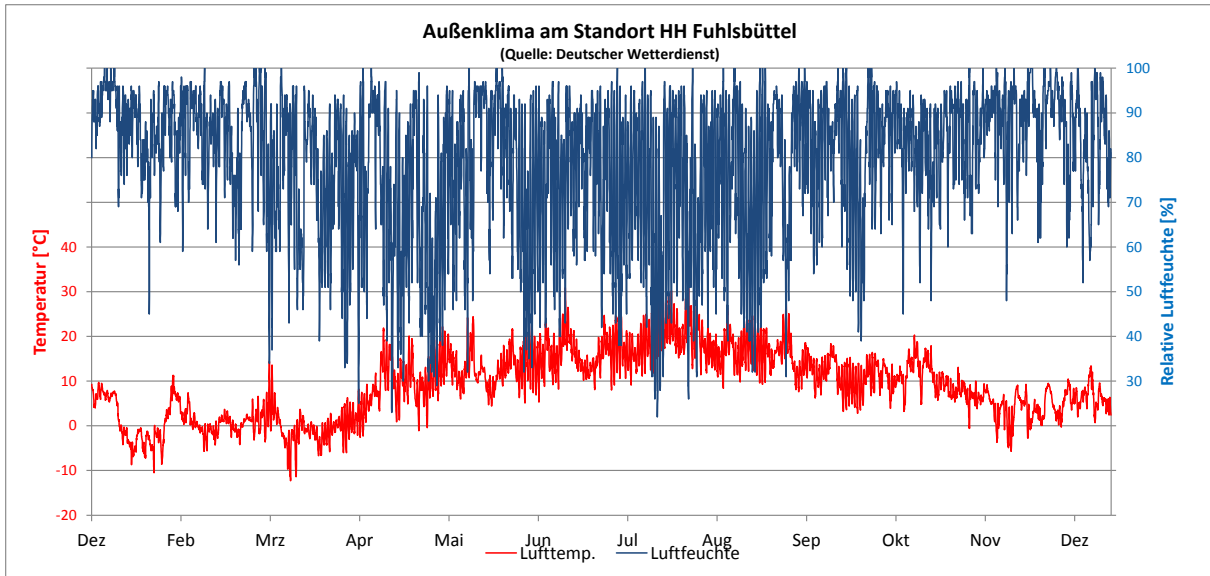


Abbildung 24 Außenklima am Standort Hamburg Fuhlsbüttel (Quelle: DWD) <sup>1)</sup>

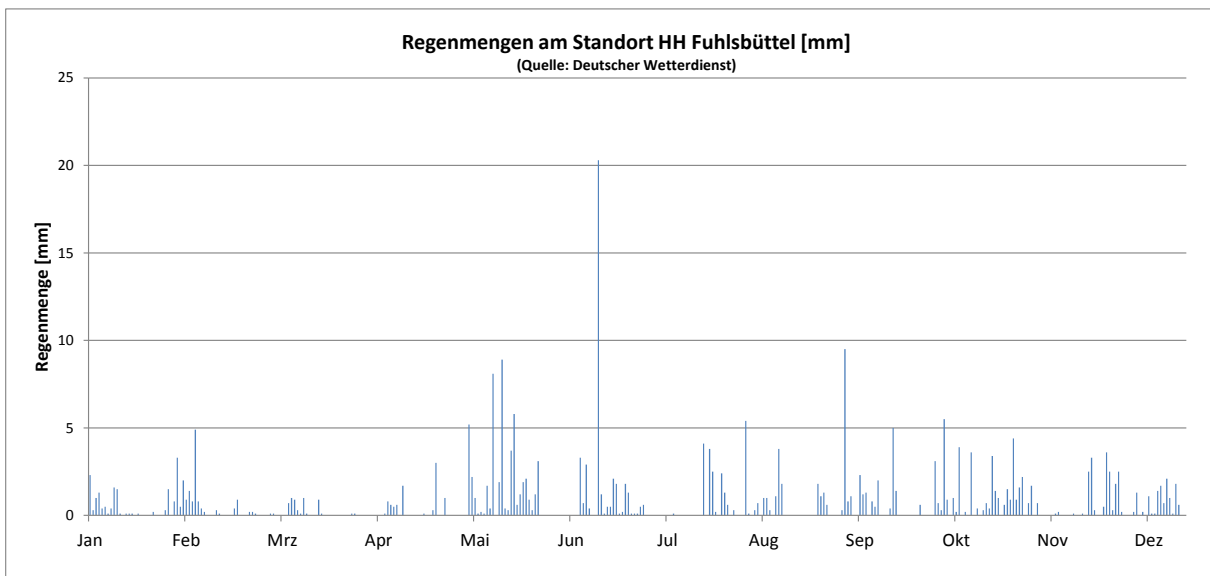


Abbildung 25 Niederschlagsmengen am Standort Hamburg Fuhlsbüttel (Quelle: DWD) <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

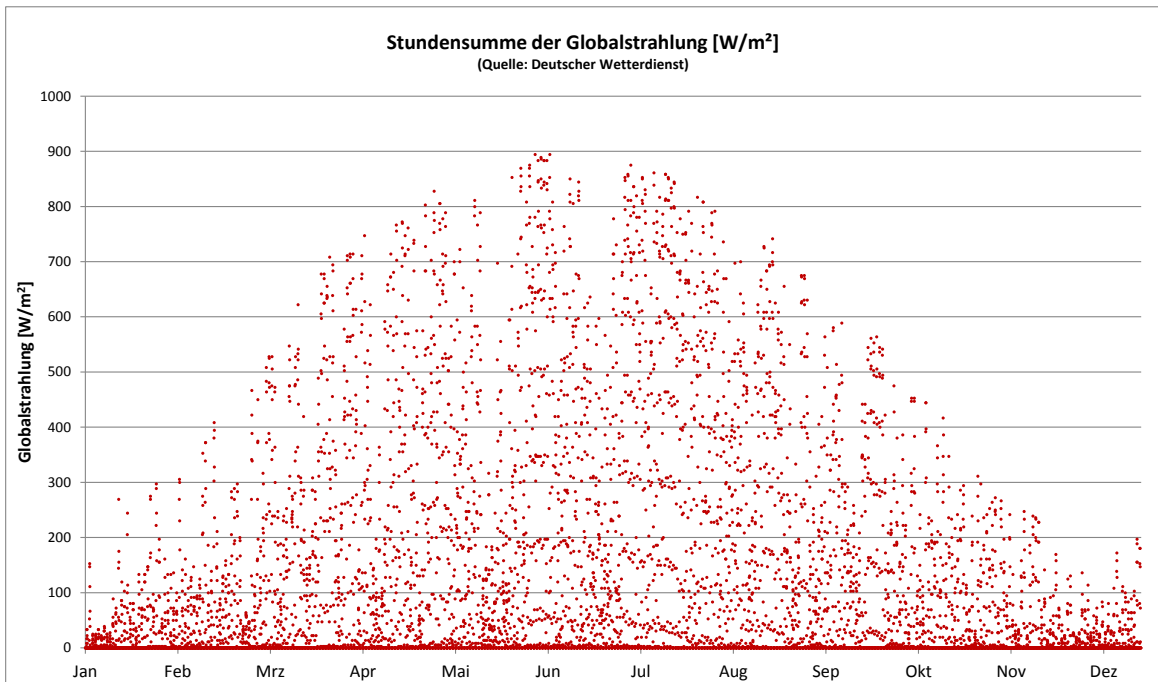


Abbildung 26 Stundensummen der Globalstrahlung am Standort Hamburg Fuhlsbüttel (Quelle: DWD) <sup>1)</sup>

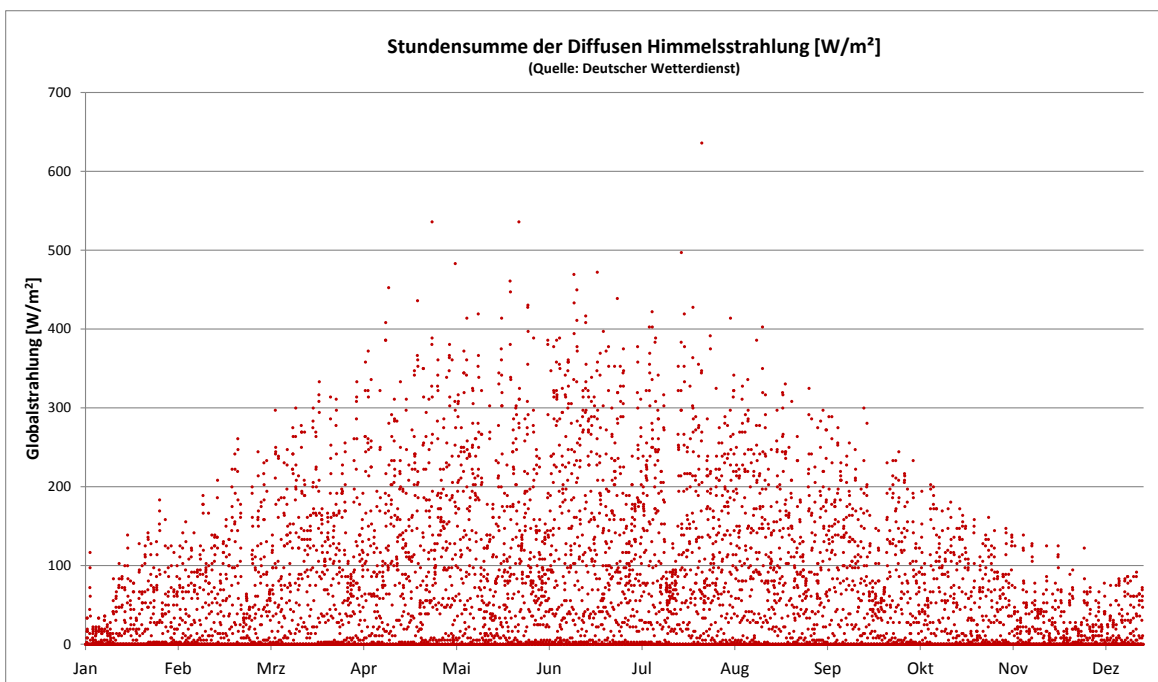


Abbildung 27 Stundensummen der diffusen Himmelstrahlung am Standort Hamburg Fuhlsbüttel (Quelle: DWD) <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

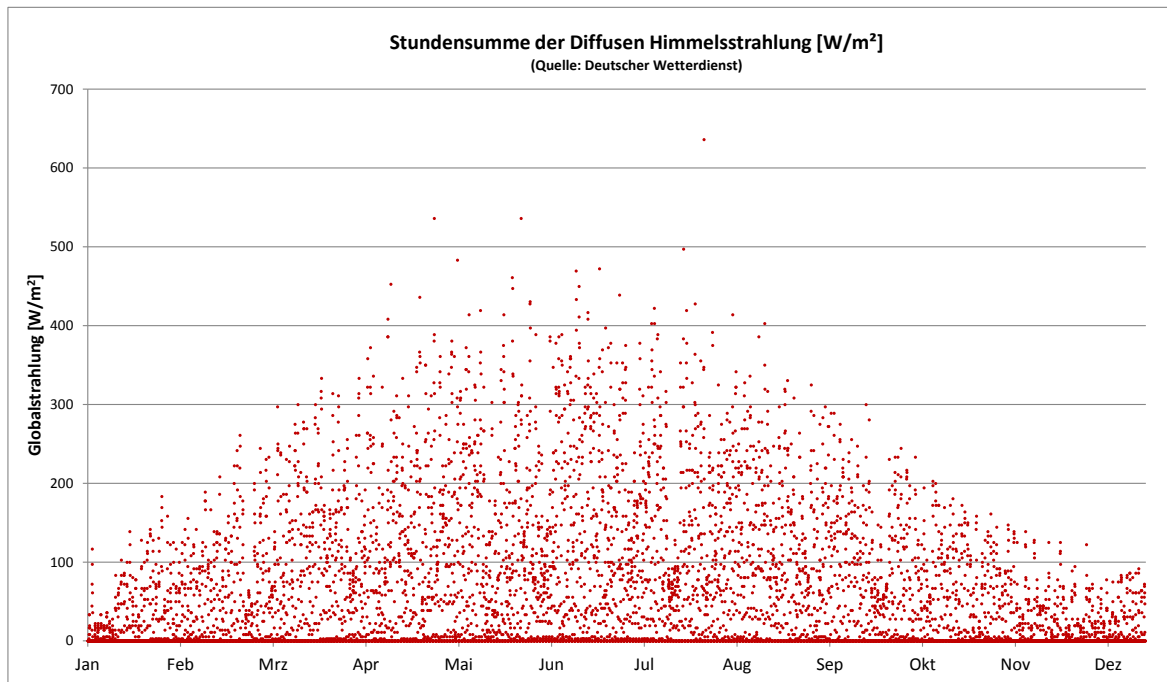


Abbildung 28 *Stundensummen der Direktstrahlung am Standort Hamburg Fuhlsbüttel (Berechnet auf Grundlage der Angaben des DWD) <sup>1)</sup>*

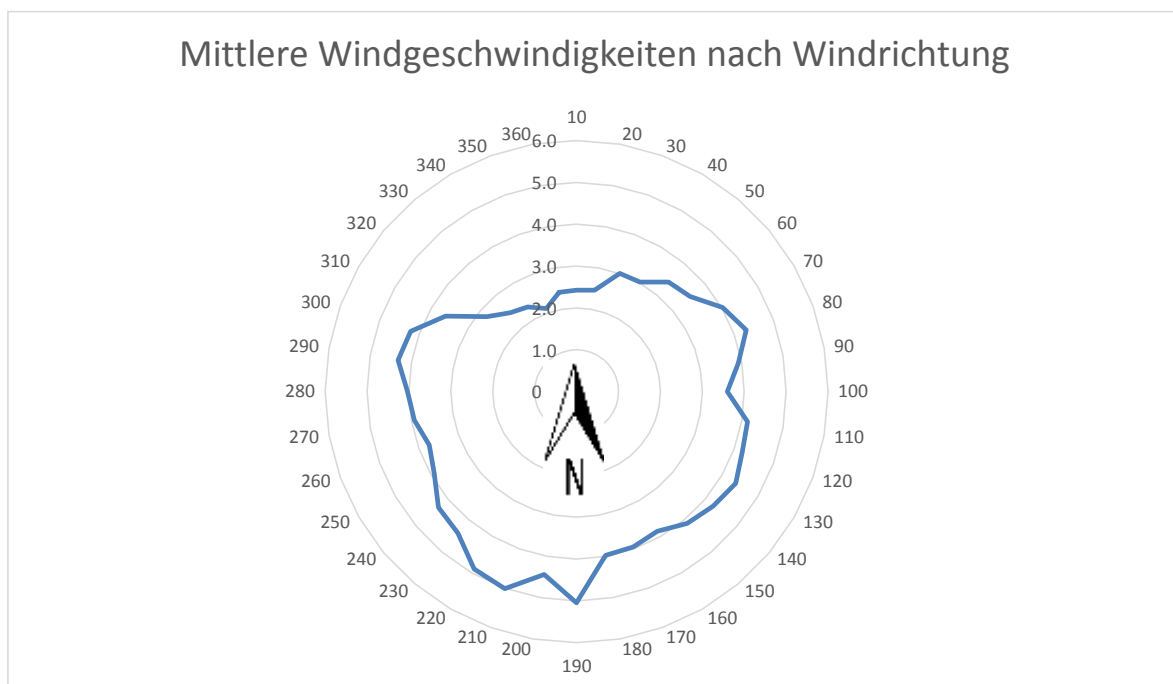


Abbildung 29 *Mittlere Windgeschwindigkeiten [m/s] nach Himmelsrichtung am Standort Hamburg Fuhlsbüttel (Berechnet auf Grundlage DWD) <sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.



Um eine Aussage zur Schlagregenbelastung der messtechnisch untersuchten Fassade treffen zu können, erfolgt eine Verschneidung der Regendaten mit den Windgeschwindigkeiten. Die nachfolgende Grafik zeigt die Summe des Produktes aus Niederschlagsmenge und Windgeschwindigkeit über den gesamten Betrachtungszeitraum nach Windrichtungen.

Die Darstellung verdeutlicht, dass bei den meisten Regenereignissen Wind aus westlicher Richtung herrscht, so dass von einer eher entsprechenden Schlagregenlast für die betrachtete Fassade ausgegangen werden kann.

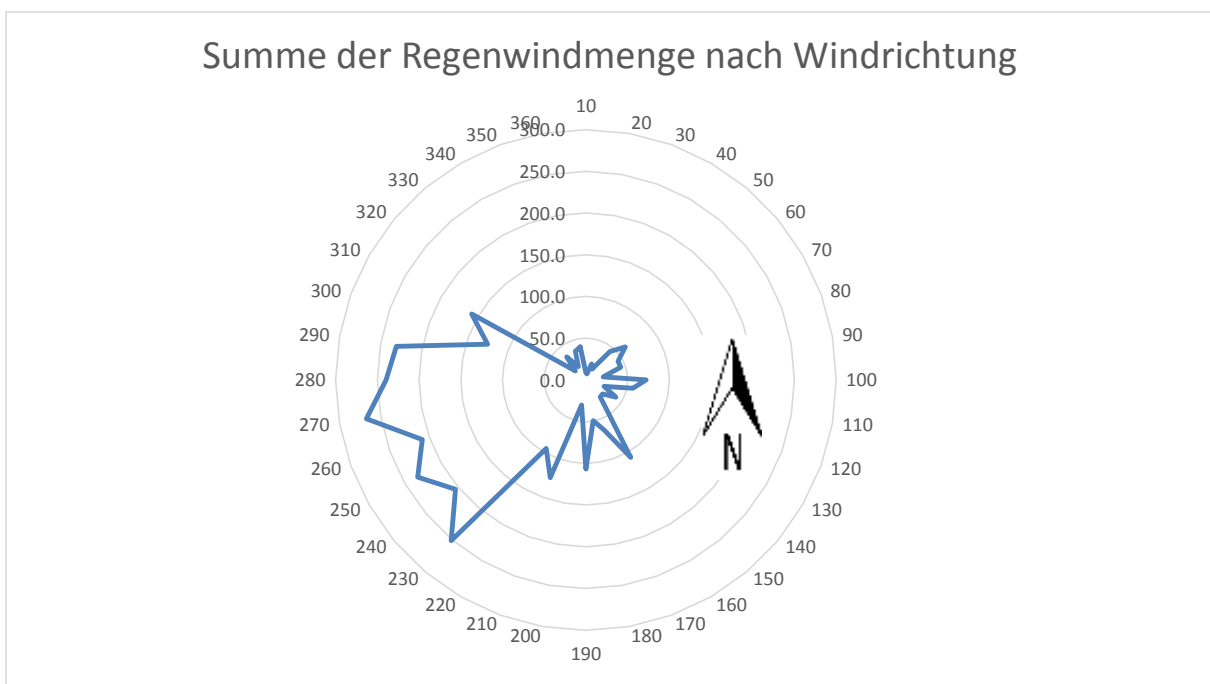


Abbildung 30 *Produkt aus Regenmenge und Windgeschwindigkeit nach Himmelsrichtung am Standort Hamburg Fuhlsbüttel (Berechnet auf Grundlage der Angaben des DWD) <sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

## 6 Modellbildung und Simulation

### 6.1 Beschreibung der Konstruktion und Umsetzung im Modell

#### 6.1.1 Geometrische Eigenschaften / Wandaufbau

Erste Annahmen hinsichtlich des Wandaufbaus der Außenfassade wurden im Rahmen der Gutachten zur Gebäudesimulation und zur hygrothermischen Berechnung konstruktiver Details aus den Planungen der Architekten übernommen und später – nach erfolgter Entkernung der Gebäude am Objekt verifiziert. Der Schichtenaufbau der Bestandskonstruktion wurde wie folgt festgestellt.

Wandstärke	ca. 33 cm
Innenputz	1,5 cm
Kalksandstein	21 cm
Ziegel (Klinker) als Außenschale	10,5 cm

Abbildung 31 *Wandaufbau der Bestandskonstruktion*



Abbildung 32 *Ansicht Mauerwerk nach Entkernung und Einbringen der Öffnung für die künftigen Terrassentüren*

Aus den vorliegenden Informationen wurde ein Modell für Bestandskonstruktion für die hygrothermische Simulation mit Delphin abgeleitet. Neben den gewonnenen Erkenntnissen hinsichtlich des geometrischen Aufbaus des Mauerwerks wurde anhand der gewonnenen Steinproben (Außenziegel und Hintermauerwerk) eine vollständige Laboranalyse durchgeführt, so dass belastbare Annahmen (Materialparameter und Materialfunktionen) für die Modellierung bereitgestellt werden konnten.

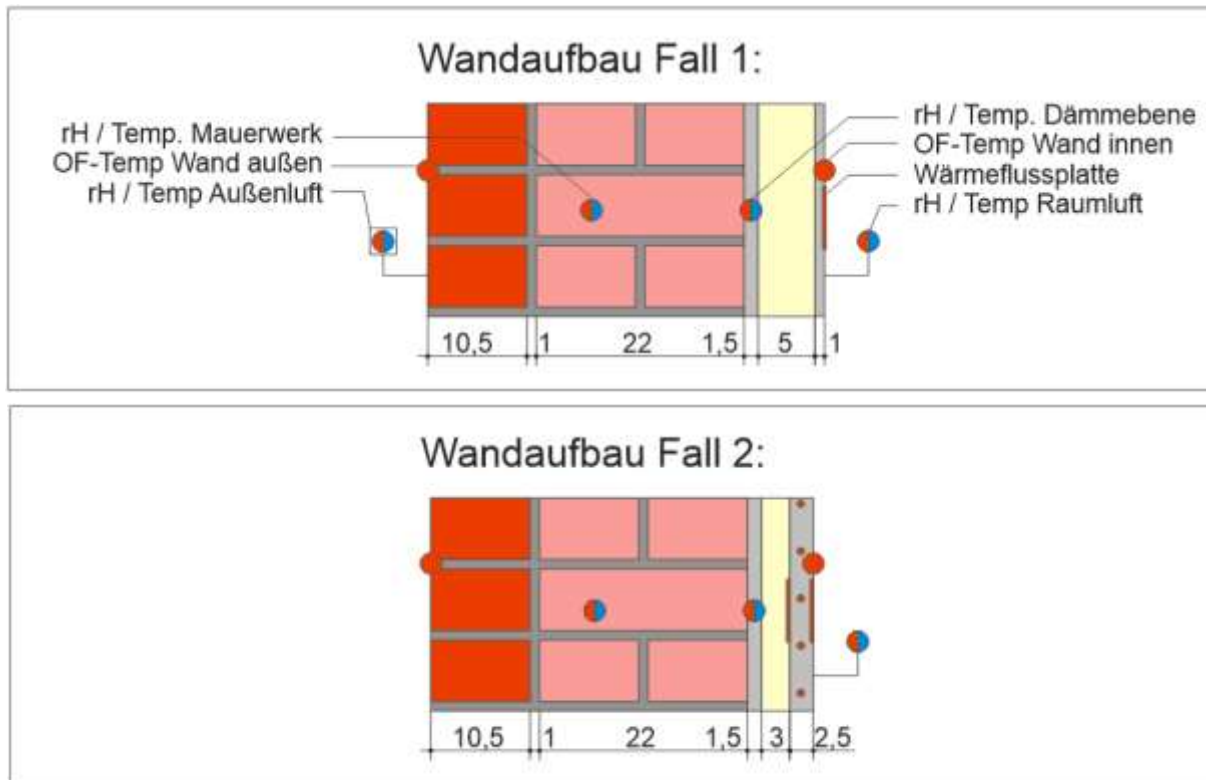


Abbildung 33 *Beschreibung der Konstruktionen auf der Grundlage der Planunterlagen bestätigt durch die Begutachtung vor Ort*

### 6.1.2 Materialdaten

Zur korrekten Abbildung der am Bauwerk vorhandenen Verhältnisse in einem Simulationsmodell sind neben den geometrischen Informationen umfassende Kenntnisse hinsichtlich der im Bestand befindlichen Baumaterialien erforderlich. Überschlägliche Annahmen zu den Materialeigenschaften können anhand der räumlichen Einordnung der Gebäude sowie anhand des Alters der Bestandkonstruktion angenommen werden. Für die numerische Simulation der Transportvorgänge mittels Delphin 5 sind jedoch wesentlich genauere Angaben notwendig.



Abbildung 34 Analyseeinrichtungen im F&E-Labor des IBK an der TU Dresden

Im Rahmen der Vor-Ort-Analyse wurden im Sommer 2013 umfangreiche Proben entnommen und im bauphysikalischen Labor der TU Dresden eingehend analysiert. Neben den Basisparametern wie der Trockenrohddichte, der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität wurden unter anderem die Wasseraufnahmekoeffizienten sowie die Wasserdampfdiffusionswiderstände unter verschiedenen Bedingungen gemessen und entsprechende Materialfunktionen abgeleitet. Die nachfolgende Abbildung beinhaltet eine Auflistung der Materialparameter für die Außenziegel und das Hintermauerwerk.

Parameter	Symbol	Außenziegel (Backstein)	Hintermauerwerk (Kalksandstein)
Trockenrohddichte	$\rho$	2.000 kg/m <sup>3</sup>	1.750 kg/m <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda_{\text{dry}}$	1,1 W/mK	0,7 W/mK
Spezifische Wärmekapazität	c	1.590 J/kgK	1.460 J/kgK
Porosität	$O_{\text{Por}}$	0,32 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,35 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Kapillare Sättigung	$O_{\text{cap}}$	0,169 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,357 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Wasserdampfdiffusionswiderstand	$\mu_{\text{dry}}$	25,0	19
Wasseraufnahmekoeffizient	$a_w$	0,006 kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup>	0,227 kg/m <sup>2</sup> s <sup>0.5</sup>

Abbildung 35 *Materialparameter des Bestandsmauerwerks*

Auffallend ist die geringe Wasseraufnahme des Außenziegels, welche auf sehr gute Materialeigenschaften schließen lässt (gut durchgebrannte Klinker – nicht nur eine dünne äußere Klinkerschale).

Die Materialparameter und die abgeleiteten Materialfunktionen (siehe Beispiel hierfür in nachstehender Grafik) wurden zu Materialdatenfiles für die Simulation mit DELPHIN aufbereitet und stehen so als Grundlage für die Modellierung beliebiger Details zur Verfügung.

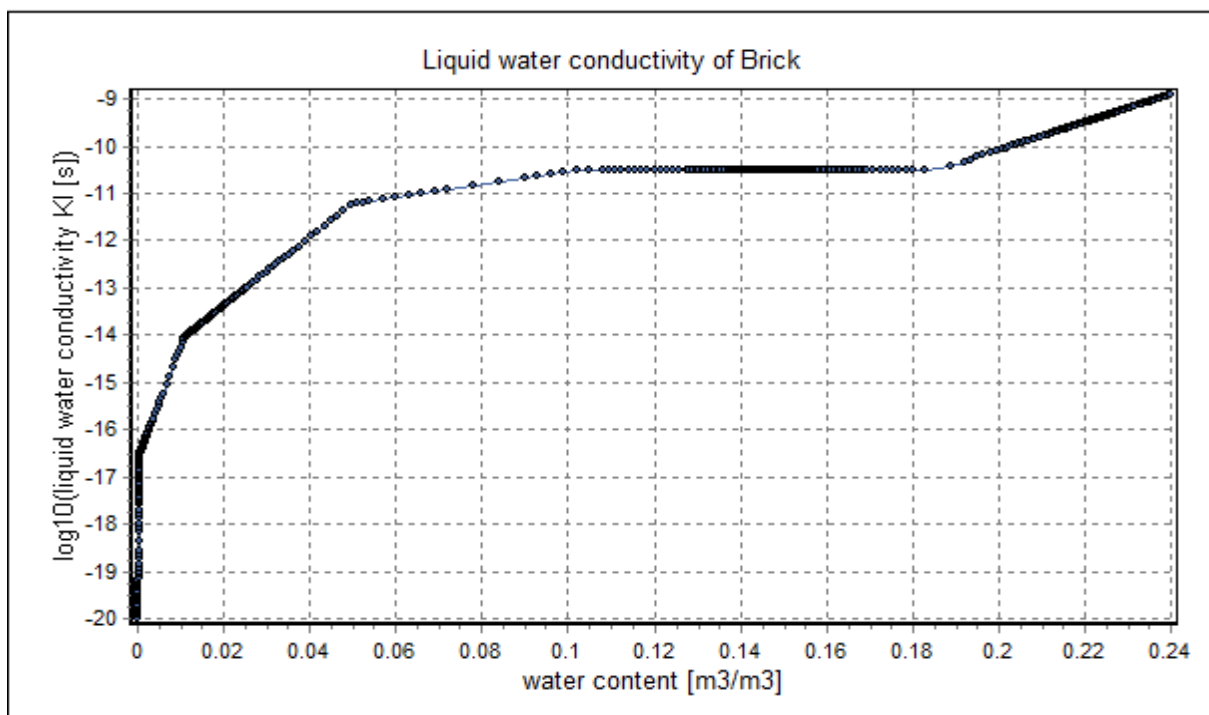


Abbildung 36 *Beispiel für eine Materialfunktion – hier die Flüssigwasserleitfähigkeit des Außenziegels in Abhängigkeit des Wassergehalts*

## 6.2 Darstellung der Simulationsergebnisse

### 6.2.1 Modellkalibrierung zur Qualifikation der Simulationsergebnisse

#### 6.2.1.1 Grundlegendes Vorgehen zur Modellkalibrierung

Ein Kernbestandteil der Untersuchungen besteht in der Verknüpfung von Monitoring und Modellsimulationen. Die im Monitoring eingebrachten Sensoren liefern kontinuierlich Informationen über die am Bauwerk jeweils herrschenden Klimarandbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte im Raum und außerhalb des Gebäudes) sowie über die Zustände, die sich infolge der äußeren Einflüsse im Inneren des Wandquerschnitts einstellen (beispielweise hinter der Innendämmung bzw. in der Ziegelschale – hier werden ebenfalls Temperaturen und relative Luftfeuchten gemessen).

Bei der Erstellung der Simulationsmodelle als Abbild der real vorhandenen Situation werden analog zum Messkonzept virtuelle Sensoren im Modell integriert. Nach erfolgter Simulationsrechnung kann dann der direkte Vergleich des Verlaufes gemessener und berechneter Werte vorgenommen werden. Dieser Vergleich dient als Bewertungskriterium für die Genauigkeit der Simulationsergebnisse (bzw. die Realitätsnähe der Simulationsmodelle).

Bei Erreichen einer möglichst guten Übereinstimmung kann auf dem Weg der Simulation später nahezu jede beliebige Sanierungsvariante berechnet und hinsichtlich ihrer Eignung für die konkrete Simulation bewertet werden. Nachfolgende Grafik gibt einen Überblick über den Vorgang der Modellkalibrierung.



Abbildung 37 Prinzipieller Ansatz zur Modellierung und Modellkalibrierung

### 6.2.1.2 Bewertung der Modellqualität anhand des Vergleiches von simulierten Zustandsgrößen mit realen Messwerten

Mit dem Ziel, beliebige konstruktive Aufbauten abbilden und mit der notwendigen Sicherheit als Sanierungsalternative beurteilen zu können, erfolgte die Abbildung der am Messobjekt vorgefundenen realen Verhältnisse als Simulationsmodell. Zur Bewertung der Modellqualität werden die Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Zustandsgrößen verglichen. Ein Vergleich der Messdaten mit berechneten Zustandsgrößen erfolgt in den folgenden Abbildungen.

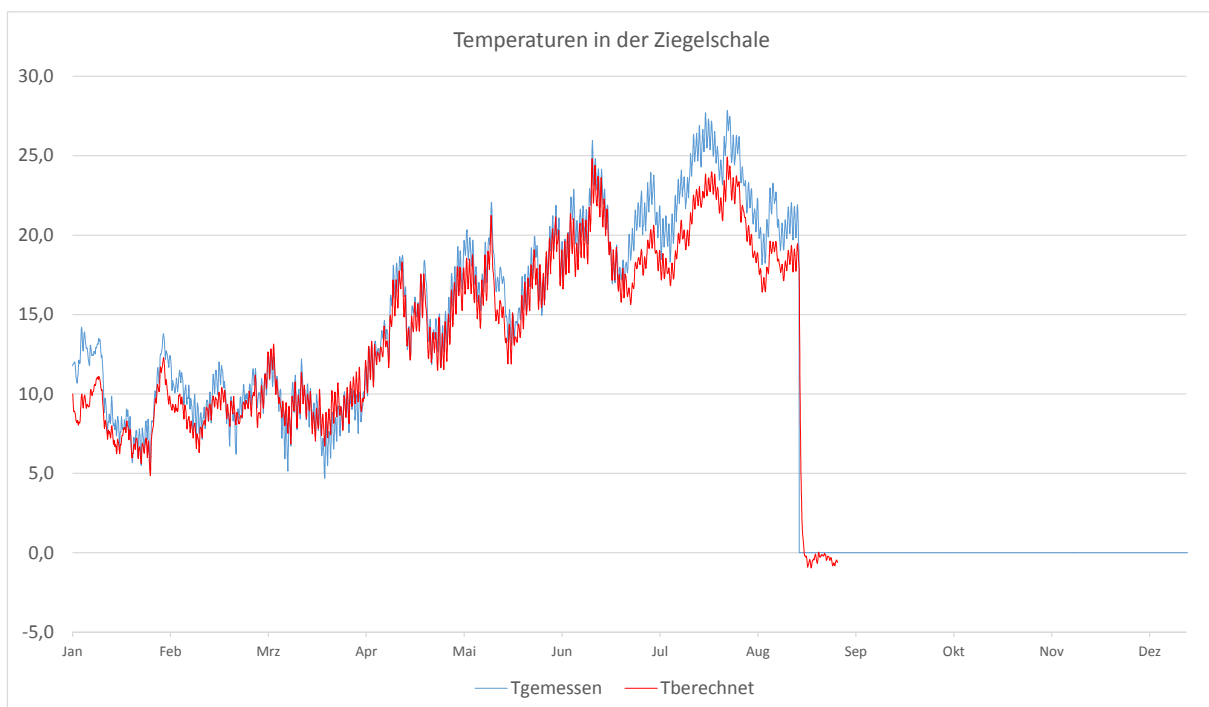


Abbildung 38 Modellvalidierung: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverlaufes in der Ziegelschale Haus 2 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

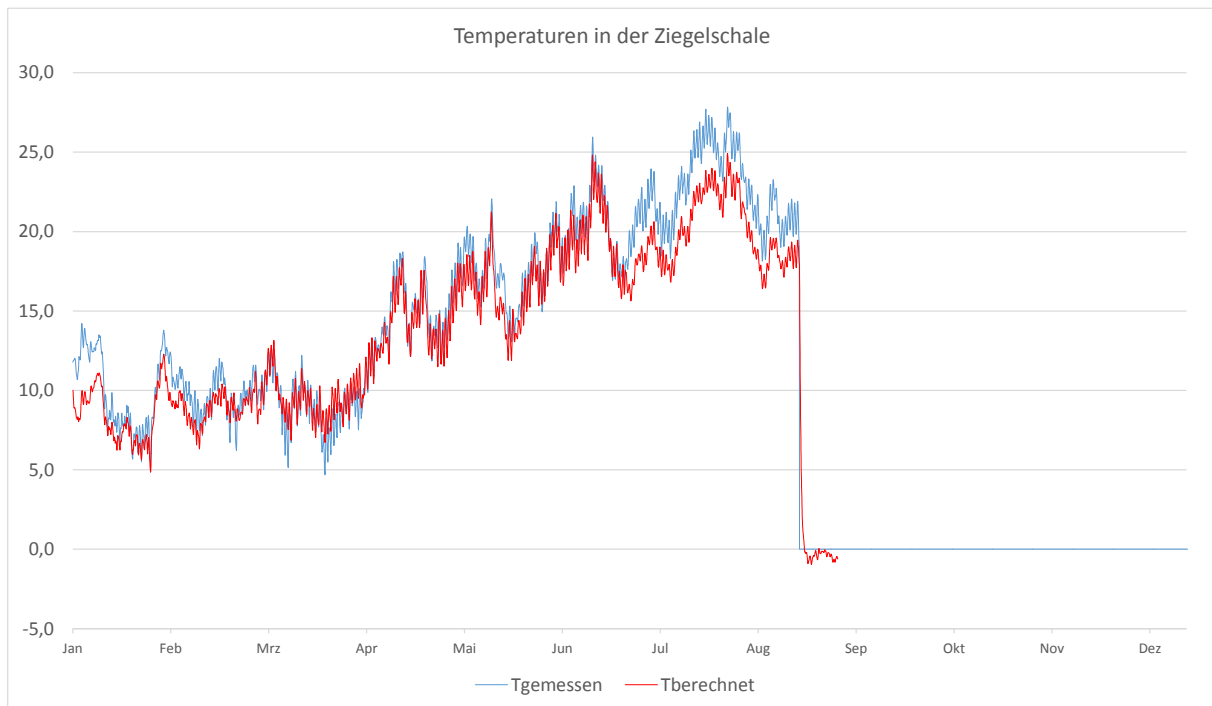


Abbildung 39 Modellvalidierung: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverlaufes in der Ziegelschale – Haus 3<sup>1)</sup>

Im Ergebnis der vorgestellten Modellkalibrierung und Auswertung kann das erstellte Simulationssystem als valide bezeichnet und als Grundlage für die vorgesehenen Variantenbetrachtungen verwendet werden.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.



## 6.2.2 Betrachtung der U-Werte der verschiedenen Konstruktionen

Die U-Werte für die verschiedenen Konstruktionen sollen zunächst rechnerisch bestimmt und miteinander verglichen werden. Anschließend soll anhand der Messdaten ein näherungsweise U-Wert für die jeweilige Konstruktion ermittelt und mit dem rechnerisch bestimmten Wert verglichen werden.

### 6.2.2.1 Grundlegende Aussagen zur Bewertung der U-Werte

Nachfolgend sollen die komplexen Vorgänge beim Wärmetransport durch eine Konstruktion kurz erläutert werden. Der Wärmestrom – gemessen an der Oberfläche einer Konstruktion – ist stets abhängig von den Bedingungen innerhalb der Konstruktion sowie von den herrschenden Randbedingungen. In einer ersten Beispielrechnung wurden folgende Randbedingungen angenommen:

- Es handelt sich um eine ungedämmte Ziegelkonstruktion (Klinkerschale mit Hintermauerwerk aus Kalksandstein mit einer Gesamtstärke von 36 cm).
- Die Temperatur der Konstruktion zu Beginn der Betrachtung liegt bei exakt 10 °C.
- Die Temperatur auf der Außenseite der Konstruktion liegt bei -5 °C,
- Die Temperatur auf der Innenseite der Konstruktion liegt bei 20 °C.

Die Betrachtung der Feuchte wird für diesen ersten Teil der Betrachtung vernachlässigt – auf den Einfluss der Feuchte des Bauteils wird im nächsten Schritt eingegangen. Die nachfolgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf des Wärmestroms ab dem Beginn der Einwirkung der genannten Randbedingungen. Der Verlauf lässt sich in drei verschiedene Phasen gliedern:

- Phase 1: Die innenseitige Temperatur liegt anfangs 10 Kelvin über der Temperatur der Konstruktion. Daraus folgt, dass sich die Temperatur der Konstruktion zunächst an die raumseitigen Bedingungen angleichen muss. Es resultiert anfangs ein sehr hoher Wärmestrom auf der raumseitigen Wandoberfläche, der im weiteren Verlauf rasch abnimmt.
- Phase 2: Der innere Bereich der Konstruktion befindet sich mit der im Raum herrschenden Temperaturrendbedingung im Gleichgewicht. Die auf der Außenseite der Konstruktion wirkende Temperatur ist im innenliegenden Bereich der Konstruktion noch nicht vollständig wirksam. Der Wärmestrom erreicht ein Minimum und nimmt mit zunehmendem Einfluss der Außentemperatur wieder zu.

- Phase 3: Die Konstruktion befindet sich vollständig im Gleichgewicht. Der Wärmestrom bleibt konstant. Anhand dieser Größe soll im nächsten Schritt ein Vergleich der Ergebnisse für unterschiedlich stark durchfeuchtete Konstruktionen erfolgen.

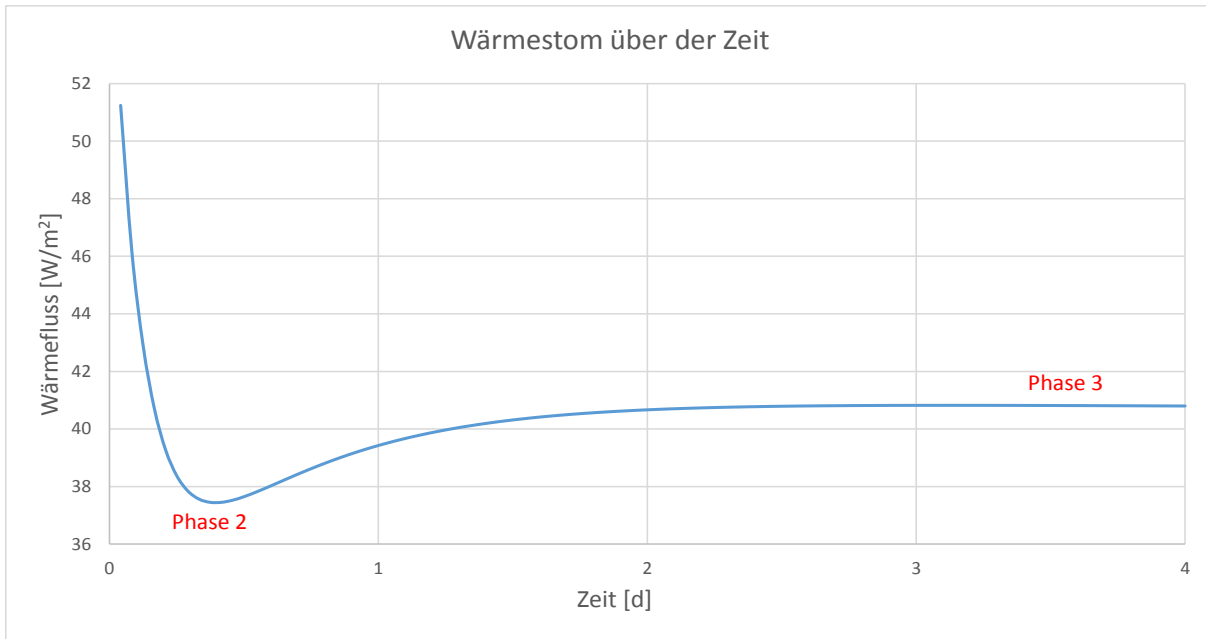


Abbildung 40 Darstellung des Wärmestroms über der Zeit

Im nächsten Schritt wird das Modell verändert, indem zunehmende Bauteilfeuchten unterstellt werden. Dazu wird die relative Luftfeuchte im Porenraum der Konstruktion in [%] als Initialbedingung angesetzt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die resultierenden U-Werte der Konstruktion in Abhängigkeit des Durchfeuchtungsgrades. In Abbildung 42 ist der Einfluss der Durchfeuchtung auf das Wärmedurchlassverhalten einer massiven (ungedämmten) Konstruktion grafisch dargestellt.

Da die Veränderung des Wärmedurchlasswiderstandes nicht kontinuierlich erfolgt, wurden im Bereich ab 90 % Anfangsluftfeuchte kleinere Feuchteschritte verwendet.

Die Darstellung zeigt, dass im normalen hygroskopischen Bereich kaum nennenswerte Veränderungen des U-Wertes zu beobachten sind. Lediglich bei sehr hohen Anfangsluftfeuchten im Porenraum der Konstruktion sind spürbare Effekte sichtbar.

$\theta_{\text{au\ss en}}$	$\theta_{\text{innen}}$	$\Phi_{\text{initial (const)}}$	Wärmestrom	$\Delta\theta$	U-Wert
[°C]	[°C]	[%]	[W/m <sup>2</sup> ]	[K]	[W/m <sup>2</sup> K]
-5	20	1,0	41,23	25	1,65
-5	20	10,0	41,28	25	1,65
-5	20	20,0	41,32	25	1,65
-5	20	30,0	41,35	25	1,65
-5	20	40,0	41,42	25	1,66
-5	20	50,0	41,50	25	1,66
-5	20	60,0	41,59	25	1,66
-5	20	70,0	41,65	25	1,67
-5	20	80,0	41,71	25	1,67
-5	20	90,0	41,80	25	1,67
-5	20	92,0	41,83	25	1,67
-5	20	94,0	41,90	25	1,68
-5	20	96,0	42,07	25	1,68
-5	20	98,0	42,60	25	1,70
-5	20	99,0	42,95	25	1,72

Abbildung 41 Wärmestrom und U-Wert einer ungedämmten Konstruktion in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte (tabellarisch)<sup>1)</sup>

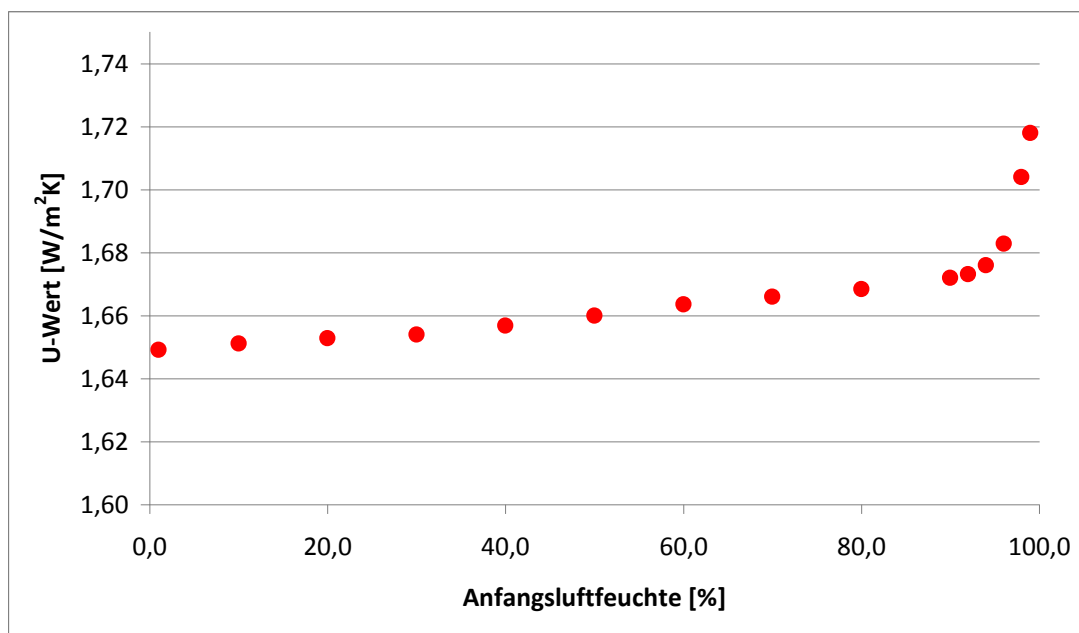


Abbildung 42 U-Wert einer ungedämmten Konstruktion in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte (grafisch)<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

Um einen Vergleich zwischen ungedämmten und gedämmten Konstruktionen zu ermöglichen, wurde die Betrachtung mit analogen Randbedingungen für eine gedämmte Konstruktion wiederholt (Bestand plus Innendämmung mit 50 mm Calziumsilikat). Das Ergebnis ist in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

$\theta_{\text{außen}}$	$\theta_{\text{innen}}$	$\varphi_{\text{initial (const)}}$	Wärmestrom	$\Delta\theta$	U-Wert
[°C]	[°C]	[%]	[W/m <sup>2</sup> ]	[K]	[W/m <sup>2</sup> ]
-5	20	1,0	18,62	25	0,74
-5	20	10,0	18,66	25	0,75
-5	20	20,0	18,73	25	0,75
-5	20	30,0	18,78	25	0,75
-5	20	40,0	18,82	25	0,75
-5	20	50,0	18,86	25	0,75
-5	20	60,0	18,94	25	0,76
-5	20	70,0	19,56	25	0,78
-5	20	80,0	20,05	25	0,80
-5	20	90,0	20,63	25	0,83
-5	20	92,0	20,78	25	0,83
-5	20	94,0	20,92	25	0,84
-5	20	96,0	21,07	25	0,84
-5	20	97,0	21,27	25	0,85
-5	20	97,5	22,39	25	0,90
-5	20	98,0	27,16	25	1,09
-5	20	98,5	31,71	25	1,27
-5	20	99,0	32,47	25	1,30

Abbildung 43 *Wärmestrom und U-Wert einer gedämmten Konstruktion in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte (tabellarisch)<sup>1)</sup>*

Wie die Auswertung zeigt, hat auch in diesem Fall die Anfangsluftfeuchte im Bereich bis zu 80 % nur marginale Auswirkungen auf die Wärmedämmeigenschaften der Wand. Bei höheren Durchfeuchtungsgraden (ab ca. 95 %) tritt dann ein massiver Verlust der Dämmwirkung ein – so dass die Konstruktion unbrauchbar würde.

Zu beachten ist das Verhältnis der Veränderungen. Während beim ungedämmten System lediglich ein Dämmverlust von 4 % eintritt (Vergleich völlig trockene mit stark durchfeuchteter Konstruktion), nimmt der Wärmestrom bei der gedämmten Konstruktion um 75 % zu. Das bedeutet auch, dass allein durch die Trocknung der ungedämmten Bestandskonstruktion keine nennenswerte Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften zu erwarten ist.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

Bei der Betrachtung der gedämmten Konstruktion muss beachtet werden, dass der genaue Verlauf der Funktion von den hygrothermischen Eigenschaften des Dämmstoffes abhängt – das bedeutet, bei anderen Materialien als Calciumsilikat werden auch andere Veränderungen in Abhängigkeit der Feuchte zu erwarten sein.

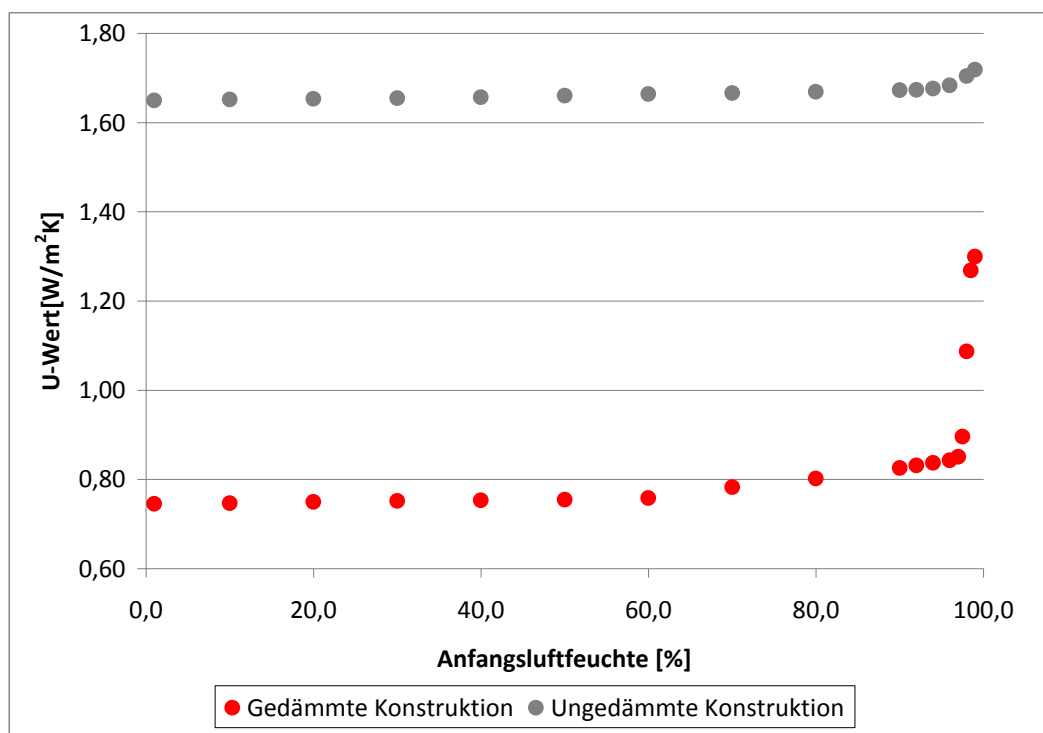


Abbildung 44 *U-Wert einer gedämmten Konstruktion in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte (grafisch) – zum Vergleich sind die Ergebnisse für die ungedämmte Konstruktion grau eingeblendet<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

### 6.2.2.2 Rechnerische U-Wert-Ermittlung

Die rechnerische Bestimmung der U-Werte erfolgte mit der Simulationssoftware DELPHIN 5.8. Der modellierte Wandaufbau ist in der Abbildung 45 grafisch dargestellt. Es werden prinzipiell gleiche Bestandskonstruktionen unterstellt – die Wandaufbauten unterscheiden sich demnach lediglich im Aufbau der Sanierungslösung.

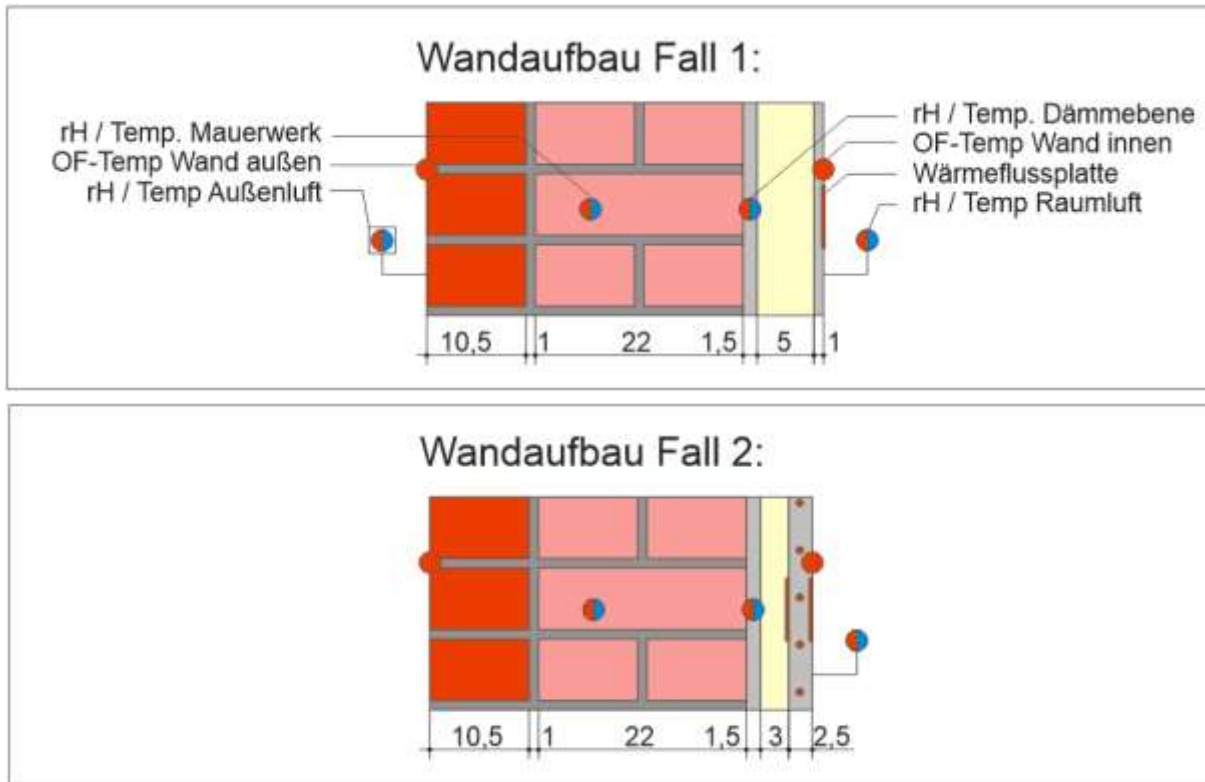


Abbildung 45 Beschreibung der Konstruktionen als Simulationsmodell für die U-Wert-Berechnung

Für die Beschreibung des Modells Haus 2 wurde eine 6 cm starke Dämmschicht (5 cm XELLA Multopor zzgl. Kleber und Oberflächenfinish) angesetzt. Für Haus 3 (System mit Wandflächenheizung ist auf dem Grundputz eine ca. 3 cm starke Dämmputzschicht vorzusehen. Darauf aufbauend wird eine zusätzliche Putzschicht (Wärmeverteilungsschicht, in der die Heizelemente eingebracht werden) mit einer Stärke von 2,5 cm auf der Raumseite modelliert. Die Heizrohre werden bei der U-Wert-Berechnung nicht im Modell abgebildet.

Abbildung 46 zeigt die Simulationsergebnisse. Der Einfluss der Putzschicht für die Aufnahme der Wandflächentemperierung wirkt sich nur unwesentlich auf das thermische Verhalten der Wandkonstruktion aus.

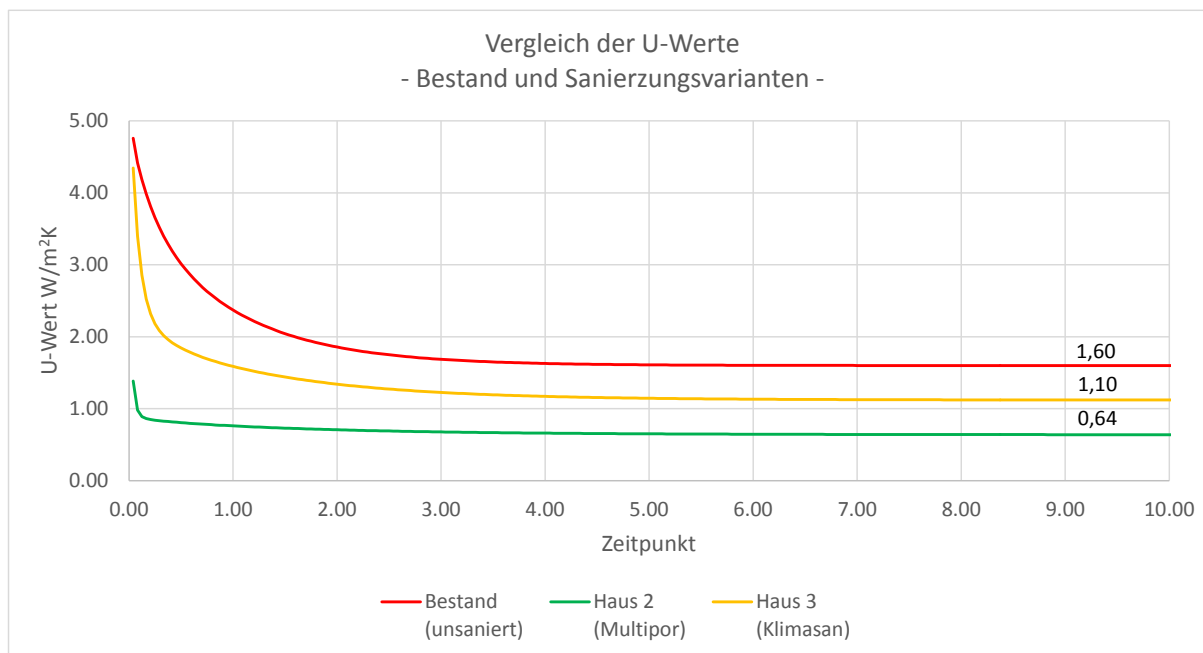


Abbildung 46 Rechnerisch ermittelte U-Werte für die Vergleichsfälle (nach Erreichen des stationären Zustandes) <sup>1)</sup>

### 6.2.2.3 Ableitung der U-Werte anhand der erfassten Messdaten

Die Bestimmung von U-Werten anhand von erfassten Messdaten erfordert folgende Voraussetzungen, welche nur unter bestimmten Randbedingungen in der Realität näherungsweise anzutreffen sind:

- Der Temperaturunterschied zwischen der Innenluft und der Außenluft sollte mindestens 15 Kelvin betragen und
- die Temperaturschwankungen (Innen wie Außen) sollten über einen längeren Zeitraum möglichst gering sein – es sollten keine nennenswerten Temperaturänderungen stattfinden.

Sind beide Bedingungen erfüllt kann nach einiger Zeit (mehrere Tage) von einem nahezu stationären Zustand ausgegangen werden.

In der Realität wird ein solcher Zustand de facto nie erreicht. Dennoch kann hilfsweise eine Mittelung des U-Wertes über einen sehr langen Zeitraum (Winterfall) als Näherungslösung herangezogen werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die ermittelten U-Werte erläutert.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

Zur Ermittlung der **U-Werte für Haus 2 (konvektiv beheizt)** kann näherungsweise eine langfristige Mittelwertbildung der einzeln errechneten U-Werte herangezogen werden. Bei dieser Mittelung gleichen sich verschiedene zu beobachtende Effekte einigermaßen aus:

- Die Konstruktion ist kalt. Die Heizphase beginnt. Der Wärmestrom ist sehr hoch, da das kalte Mauerwerk bis zum Erreichen seiner Speicherkapazität Wärme aufnimmt und in tiefere Schichten der Konstruktion weiterleitet (dieser Fall tritt beispielsweise ein, wenn die Mieter nach Abwesenheit heimkehren und die Heizung stark gedrosselt bzw. ganz abgestellt war). **Der Wärmestrom auf der raumseitigen Wandoberfläche steigt extrem an – der U-Wert liegt erheblich über dem tatsächlich für die Konstruktion anzusetzenden Wert.**
- Die Konstruktion befindet sich aus thermischer Sicht nahezu im Gleichgewicht. Die Raumtemperatur ist ebenso wie die Außentemperatur konstant. Es findet keine Lüftung statt, die Heizung läuft auf konstantem Niveau. **Der Wärmestrom auf der raumseitigen Wandoberfläche ist fast konstant – der U-Wert entspricht dem tatsächlich der Konstruktion zuzuordnenden Wert – dieser Fall tritt so gut wie nie ein.**
- Die Konstruktion ist erwärmt. Der Raum wird gelüftet oder die Heizung abgeschaltet / stark gedrosselt (der Mieter verlässt beispielsweise zum Wochenende die Wohnung). **Der Wärmestrom nach außen nimmt rapide ab und kann sich bei schweren Konstruktionen sogar umkehren (die Wand gibt Energie an die kühlere Raumluft ab). Der ermittelte U-Wert ist sehr gering und kann ggf. sogar negativ werden.**

Werden die Zustandsgrößen (Raumtemperatur, Außentemperatur und Wärmestrom) über den gesamten Zeitraum zur Berechnung diskreter U-Werte herangezogen und die berechneten U-Werte zu einem Mittelwert zusammengefasst, wird eine näherungsweise Übereinstimmung mit den rechnerisch bestimmten Größen festgestellt.



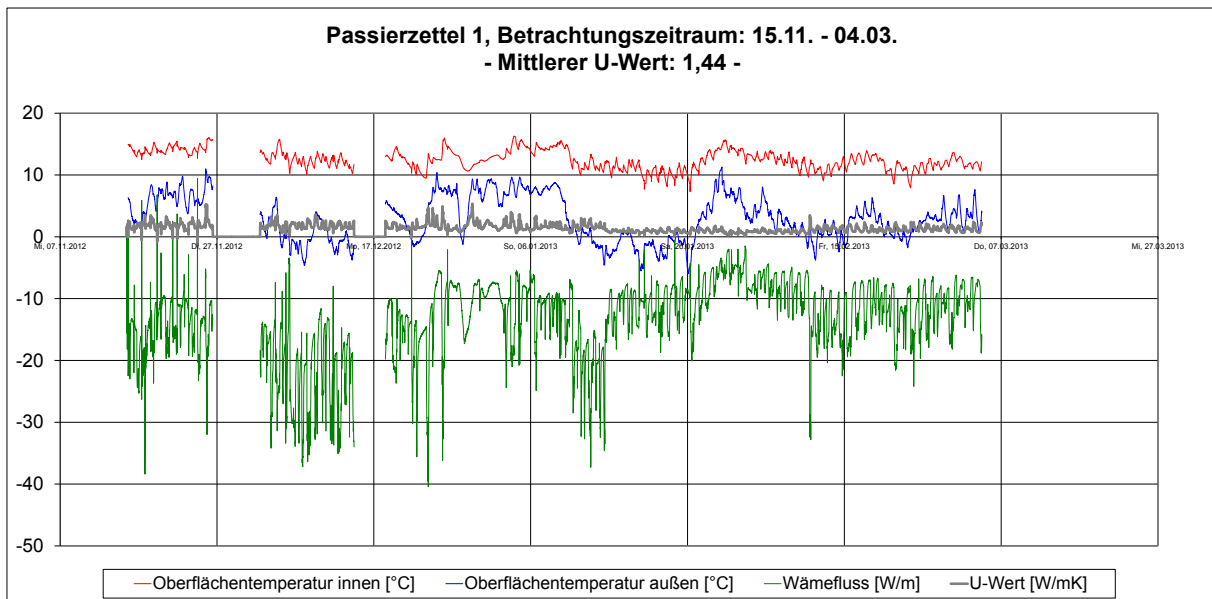


Abbildung 47 *Ganglinie der relevanten Zustandsgrößen zur U-Wert-Berechnung* <sup>1)</sup>

Die beschriebene Bandbreite möglicher instationärer Effekte macht deutlich, dass für eine messtechnische Erfassung von U-Werten unbedingt Langzeitmessungen durchgeführt und die Messergebnisse detailliert beurteilt werden müssen. Numerisch berechnete Werte sollten bei vergleichenden Betrachtungen unterschiedlicher Konstruktionen stets ergänzend hinzugezogen werden.

Bei der Beurteilung der **U-Werte für ein System mit Wandflächentemperierung (Haus 3)** muss grundsätzlich zwischen drei Fällen unterschieden werden:

Für **Fall 1 „Wandflächentemperierung (nahezu) vollständig abgeschaltet“** muss davon ausgegangen werden, dass die Erwärmung des Raumes ausschließlich durch innere Gewinne (elektrische Verbraucher, anwesende Personen), solare Gewinne (Sonneneinstrahlung durch die Fenster auf der Südseite des Gebäudes) und – sofern vorhanden – über die Innenwände sowie die Decken und Böden von den jeweils angrenzenden Nachbarwohnungen erfolgt.

Der gemessene Wärmestrom beider Wärmestromplatten (jeweils auf der Raumseite und auf der Außenseite der Wandflächentemperierung) müssten dann nach außen gerichtet und der Betrag der Messwerte vergleichbar sein. Abbildung 48 zeigt beispielhaft die Zustandskurven für die maßgebenden Messwerte für einen solchen Fall.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

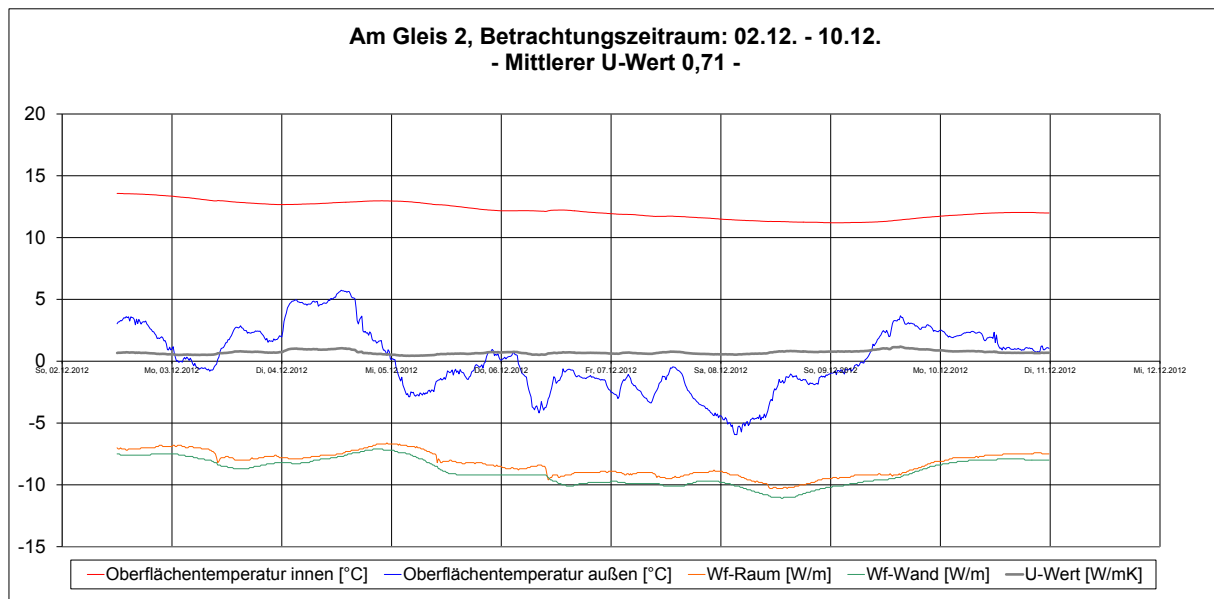


Abbildung 48 Ausschnitt eines „quasistationären“ Falls zur U-Wert-Bestimmung <sup>1)</sup>

Es ist erkennbar, dass die Raumlufftemperaturen nahezu konstant sind, die Außentemperaturen schwanken leicht. Der als Mittelwert bestimmte U-Wert beträgt  $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$  und ist mit dem simulierten Wert vergleichbar.

Ein weiterer möglicher Betriebszustand wird durch **Fall 2 „Wandflächentemperatur minimal betrieben“** beschrieben. Hier wird der Konstruktion zwar Wärme zugeführt – allerdings nur in geringem Maße, so dass der erfasste Wärmestrom beider Wärmestromplatten dennoch nach außen gerichtet ist. Abbildung 49 verdeutlicht diesen Fall anhand einer Datensequenz.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

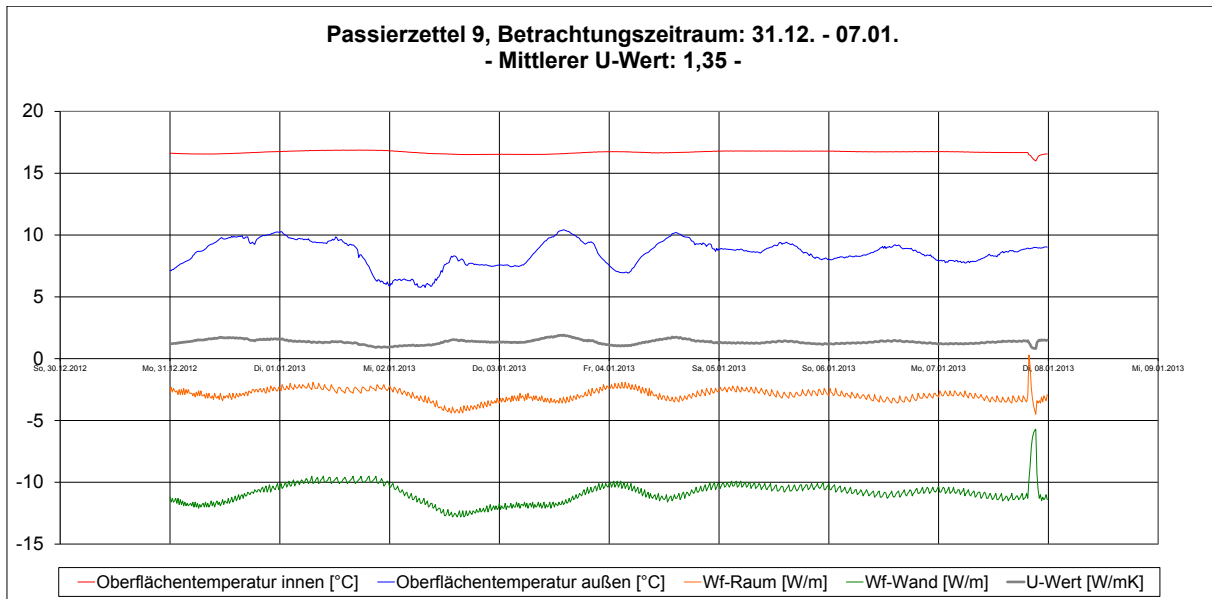


Abbildung 49 *Fall 2 – Wärmeströme nach außen gerichtet – mittlerer U-Wert ...<sup>1)</sup>*

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

### **6.2.3 Vergleichsrechnungen zur Bewertung verschiedener Sanierungsoptionen**

Nachdem die Berechnungsqualität anhand des Vergleiches der Simulationsergebnisse mit den Messdaten erfolgreich nachgewiesen wurde, besteht nun die Möglichkeit beliebige konstruktive Situationen nachzustellen und mittels Modellsimulationen in ein komplexes Bild einzuordnen. Ziel der Vergleichsrechnungen ist es, die Ergebnisse auf vergleichbare Konstruktionen (Geometrie und Materialeigenschaften sowie Bauart) übertragbar zu machen. In den nachfolgenden Abschnitten werden unterschiedliche Szenarien mit teils flexiblen Randbedingungen analysiert und dokumentiert.

#### **6.2.3.1 Konvektiv beheizte Systeme – Untersuchungsansatz**

Als Grundlage für die Untersuchung wurden die am Standort Hamburg Veddel vorgefundenen Wandaufbauten und Materialkennwerte verwendet. Das heißt, die nachfolgend formulierten Aussagen sind auf ähnliche Gebäude in diesem Bereich in gewissen Grenzen übertragbar.

In einem ersten Schritt wurde von einem konvektiv beheizten Fall ausgegangen. Um den Einfluss verschiedener Dämmstärken auf die Temperaturverteilung in der Wandkonstruktion beurteilen zu können wurden Dämmstärken in einem 10 mm-Raster im Bereich von 0 mm (ungedämmter Fall) bis 70 mm angesetzt. Die Bestandskonstruktion wurde analog zur Außenwandkonstruktion am Standort Holstenkamp mit einer Wandstärke von ca. 32 cm angesetzt (vgl. Abbildung 45).

Die Klimarandbedingungen wurden gemäß DIN 4108 angesetzt – d.h. es wird von einem Innenklima von 20°C und 50 % relativer Luftfeuchte sowie von einem Außenklima von -5°C und 80 % relativer Luftfeuchte ausgegangen.

Die nachfolgenden Grafiken zeigen die berechneten Temperaturen auf der außen und raumseitigen Wandoberfläche, die Temperaturen in der Ziegelkonstruktion und – für die gedämmten Konstruktionen die Temperaturen in der Klebeebene (unmittelbar hinter der eingebrachten Wärmedämmung).

Erwartungsgemäß steigt die Temperatur auf der raumseitigen Wandoberfläche mit zunehmende Dämmstärke weniger stark an. Gleiches gilt für den negativen Anstieg der Temperaturkurven hinter der Dämmung, in der Bestandskonstruktion sowie auf der Außenwandoberfläche. Zu beachten ist, dass bereits ab Dämmstärken von 30 bis 40 mm nur noch geringe Veränderungen erzielt werden.

Bei der Betrachtung der Temperaturen auf der raumseitigen Wandoberfläche ist zu berücksichtigen, dass der Mindestwärmeschutz für die ungedämmte Wandkonstruk-

tion zwar erfüllt ist, im Bereich konstruktiver Details und geometrischer Wärmebrücken jedoch sehr wahrscheinlich nicht gewährleistet werden kann.

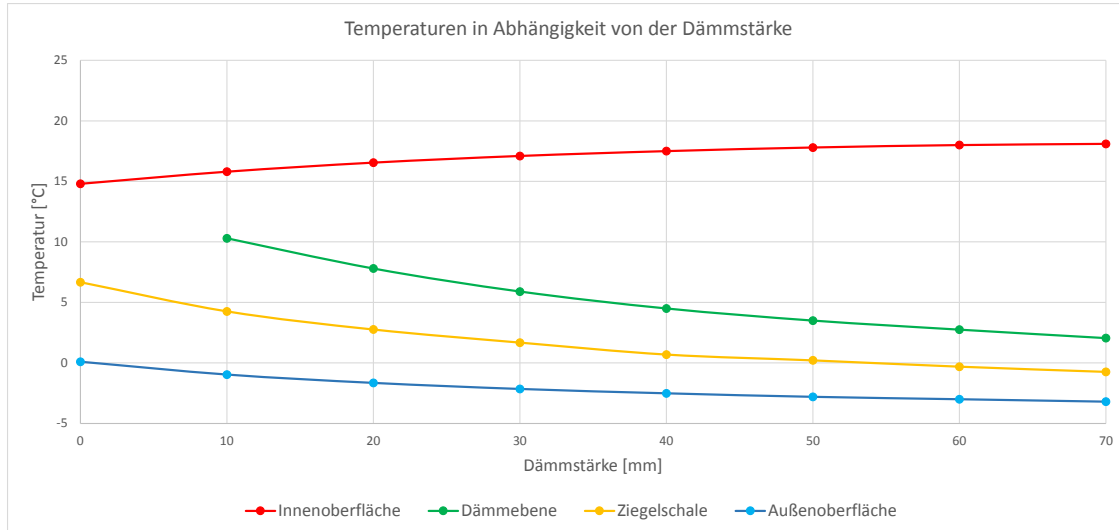


Abbildung 50 Temperaturverhalten der Konstruktion bei Konvektionsheizung in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 36 cm)<sup>1)</sup>

Abbildung 51 zeigt die entsprechenden U-Werte bei den unterschiedlich angesetzten Dämmstärken. Hier ist erkennbar, dass die energetischen Vorgaben der Energieeinsparverordnung (Referenzwerte für Neubauten) bei geringen Dämmstärken für die vorhandene Bestandskonstruktion nicht erfüllt werden können.

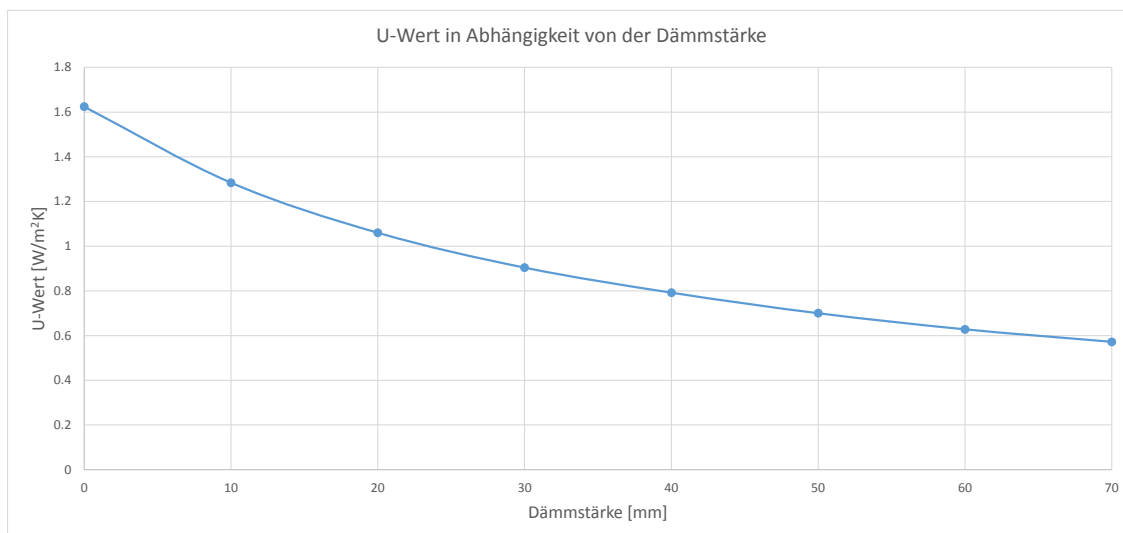


Abbildung 51 U-Wert der Konstruktion in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 36 cm)<sup>1)</sup>

1) Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

In einem zweiten Schritt wurde ein schwächeres Bestandsmauerwerk von nur 24 cm unterstellt, um auch für diese Mauerwerksstärken den Einfluss der Dämmstärken auf die Temperaturen innerhalb der Konstruktion zu bewerten. Die Ergebnisse sind analog zum oben beschriebenen Ansatz in den nachfolgenden Grafiken dargestellt.

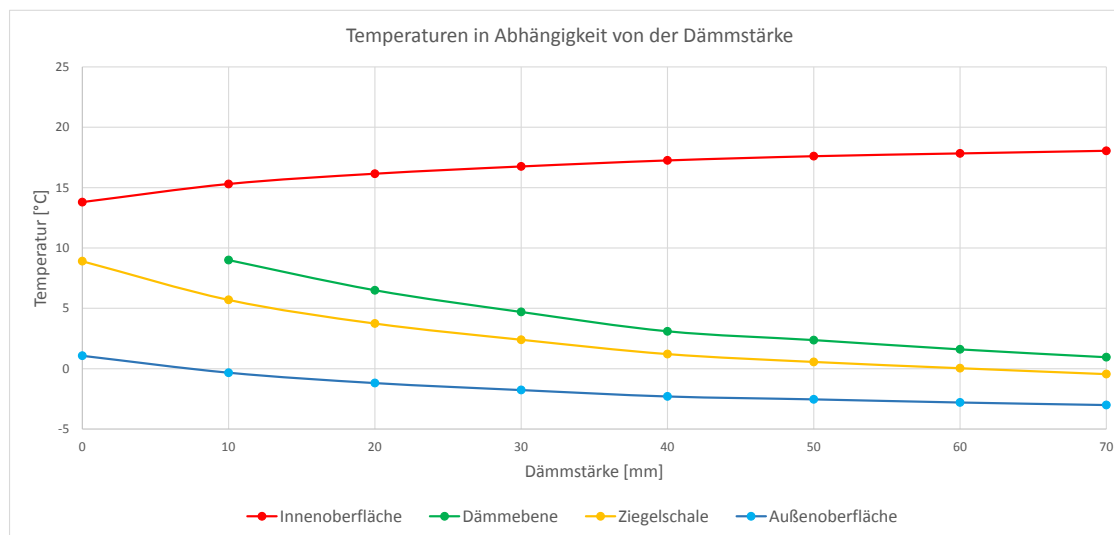


Abbildung 52 Temperaturverhalten der Konstruktion bei Konvektionsheizung in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 24 cm)<sup>1)</sup>

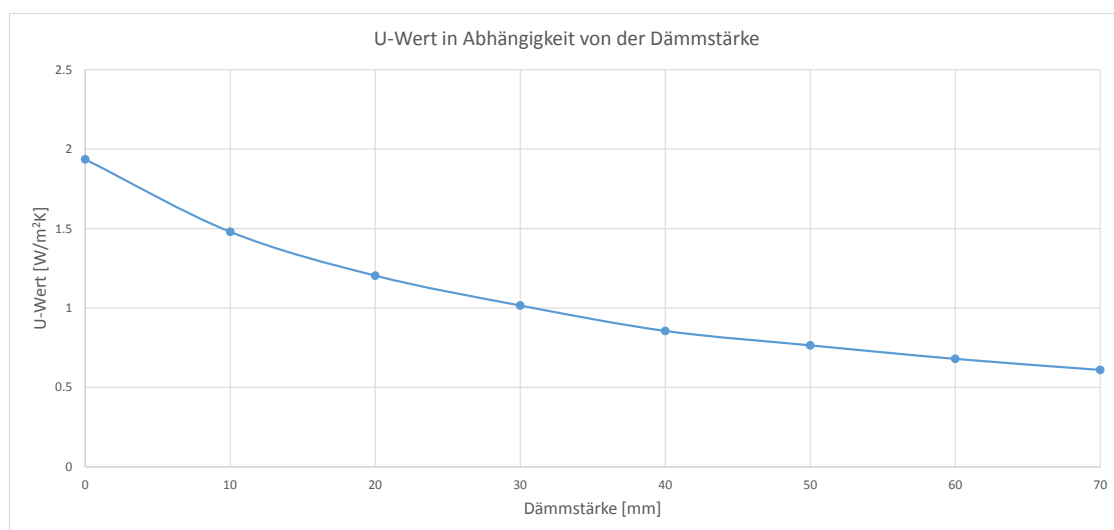


Abbildung 53 U-Wert der Konstruktion in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 24 cm)<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

Ein Vergleich der Temperaturzustände bei gleichen Dämmstärken und unterschiedlich starken Bestandskonstruktionen macht deutlich, dass schwächere Konstruktionen bei gleicher Dämmstärke stärker abkühlen – das bedeutet, dass mit zunehmender Dämmstärke im Grenzbereich zwischen Innendämmung und Bestandskonstruktion häufiger Kondensat anfallen kann – in Extremsituationen kann hier eine Frostgefährdung nicht ausgeschlossen werden.

Bei der Betrachtung der U-Werte für die Sanierung einer Bestandswand mit unterschiedlichen Dämmstoffstärken sind grundsätzlich ähnliche U-Werte für die jeweils verschiedenen Heizungssysteme festzustellen. Für die Systeme mit der Wandflächentemperierung liegen die U-Werte geringfügig besser, da die Wärmeverteilschicht (ein ca. 2 – 3 cm starker Putz zur Aufnahme des WFT-Systems) mit in die U-Wert-Berechnung einfließt.

Bei der energetischen Bewertung ist vor allem zu beachten, dass bei den konvektiv beheizten Varianten die Oberflächentemperaturen auf der innenliegenden Wandoberfläche (ca. 16 – 17°C) in der Regel geringer sein werden als bei den Systemen mit Wandflächentemperierung (hier ca. 17 – 19 °C). Als Folge ergibt sich bei gleicher Dämmstoffstärke ein höherer Energieverlust über die Wandfläche mit der Wandflächentemperierung, dem durch eine geeignete Dämmstoffauswahl (-stärke) entgegengewirkt werden muss.

Ein Vergleich der U-Werte für Bestandskonstruktionen mit unterschiedlichen Wandstärken zeigt, dass (bezogen auf die im Bestand vorhandene Situation) insbesondere bei dünnwandigen Konstruktionen bereits mit geringen Dämmstoffstärken erhebliche Verbesserungen in der energetischen Qualität erzielt werden können. Allerdings sind in diesen Fällen auch der Erhöhung der Dämmstoffstärken Grenzen gesetzt, da die Konstruktionen mit geringer Mächtigkeit vergleichsweise schnell auskühlen (Abbau des verbleibenden Temperaturgradienten über eine kürzere Strecke), was insbesondere den verstärkten Tauwasseranfall sowie niedrige Temperaturen in der Kleberebene begünstigt und damit eine höhere Gefährdung durch Frostschäden zur Folge hat.

#### *6.2.3.2 Systeme mit Wandflächentemperierung – Untersuchungsansatz*

Mit dem Ziel, einen Vergleich der konvektiv beheizten Systeme mit den Sanierungsvarianten, welche mit einer Wandflächentemperierung ausgestattet werden zu ermöglichen, wurden Außenwandkonstruktionen mit einer Wandflächentemperierung (WFT) erstellt. Die WFT wurde idealisiert abgebildet (es wurde eine Randbedingung mit einer vorgegebenen Temperatur angesetzt). Die Berechnungen erfolgten mit zwei verschiedenen Heiztemperaturen (20°C und 25°C), um die Unterschiede variierender Vorlauftemperaturen herauszuarbeiten. Die nachfolgenden Abbildungen bein-



halten analog zu Punkt 6.2.3.1 die berechneten Temperaturen auf der außenseitigen und der raumseitigen Wandoberfläche, in der Bestandskonstruktion (Ziegelschale und in der Kleberebene. Darüber hinaus werden die Wärmeströme für die beiden angesetzten Bestandskonstruktionen (24 cm und 36 cm stark) für die Konvektionsheizung denen der Wandflächentemperierung (Oberflächentemperatur 20/25°C) gegenübergestellt.

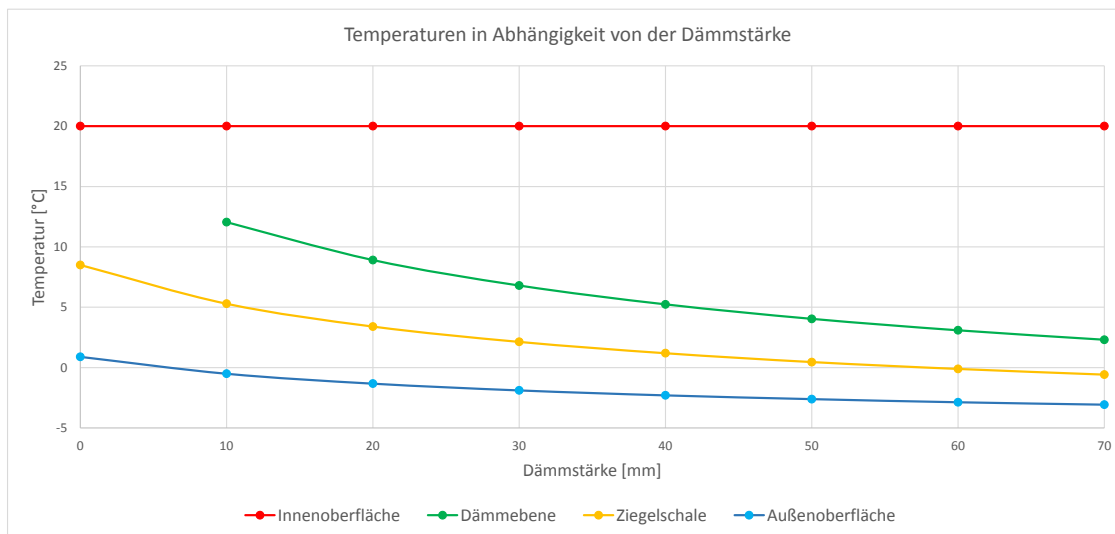


Abbildung 54 Temperaturverhalten der Konstruktion mit WFT (20°C) in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 36 cm)<sup>1)</sup>

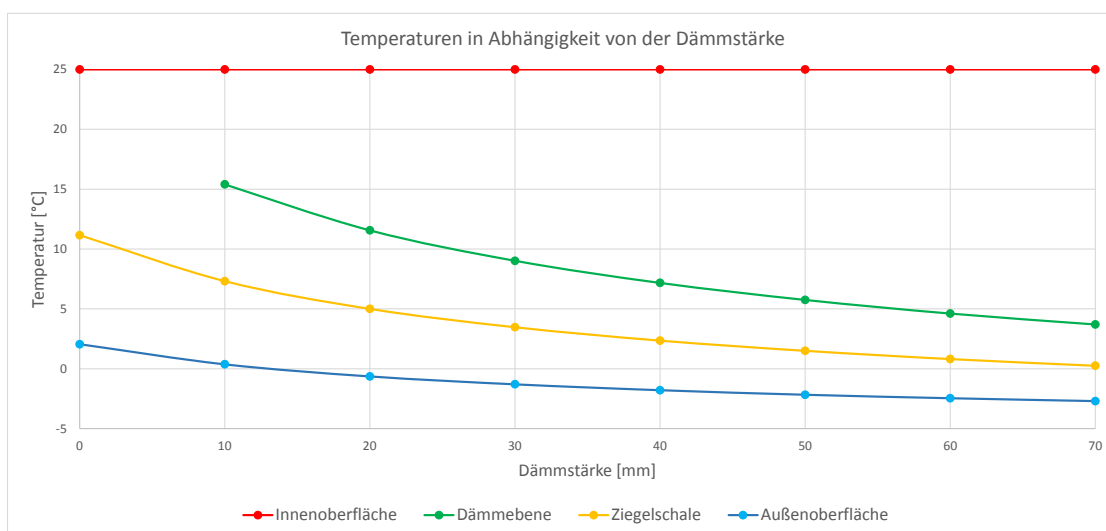


Abbildung 55 Temperaturverhalten der Konstruktion mit WFT (25°C) in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 36 cm)<sup>1)</sup>

1) Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

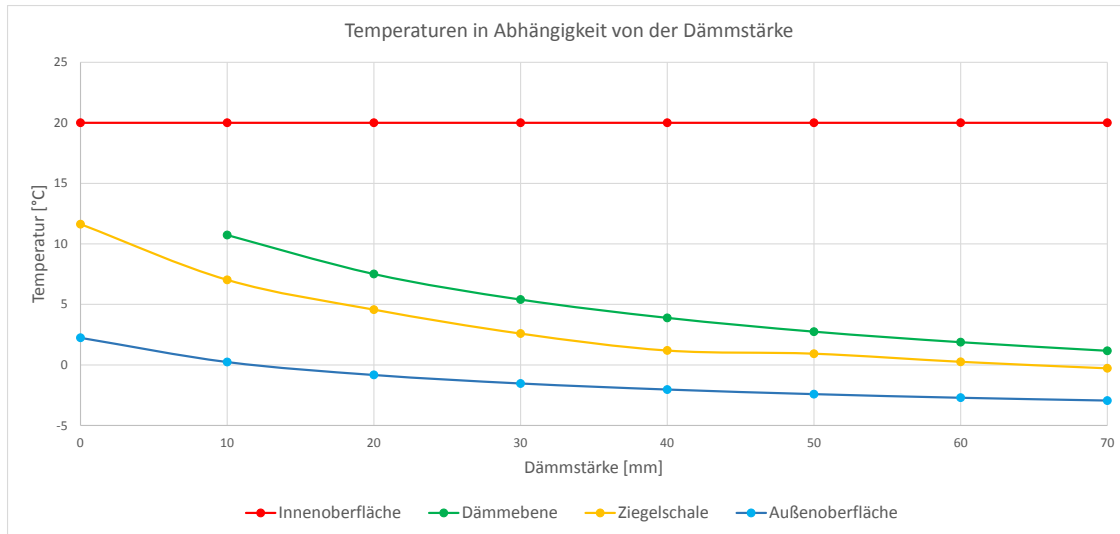


Abbildung 56 Temperaturverhalten der Konstruktion mit WFT (20°C) in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 24 cm)<sup>1)</sup>

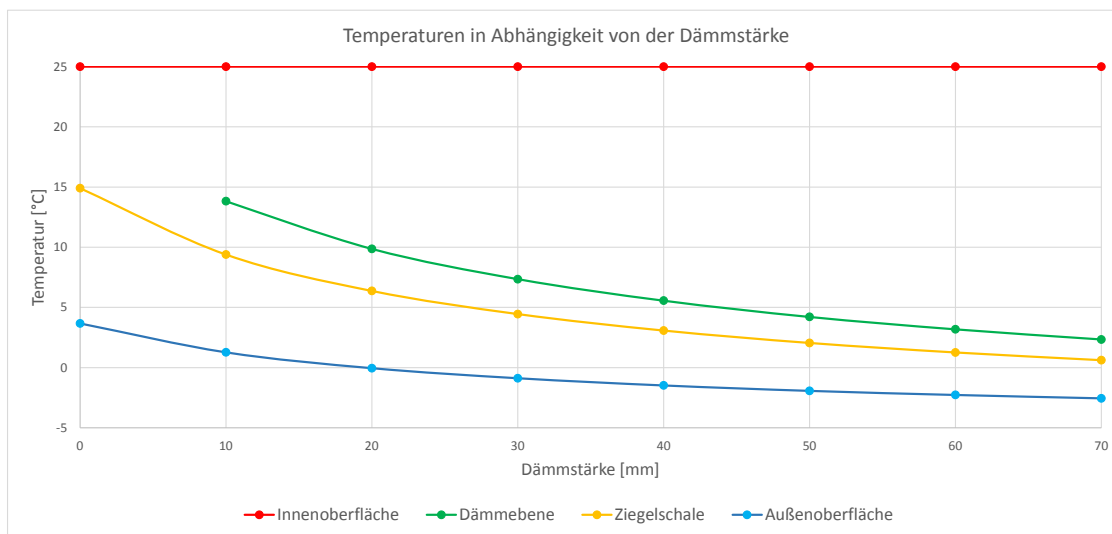


Abbildung 57 Temperaturverhalten der Konstruktion mit WFT (25°C) in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 24 cm)<sup>1)</sup>

Beim Einsatz von Wandflächentemperierungen sind vor allem Wandkonstruktionen mit geringer Stärke durch entsprechende (Innen-) Dämmmaßnahmen zu ertüchtigen, um den Energieverlust durch die Wandkonstruktion zu begrenzen.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

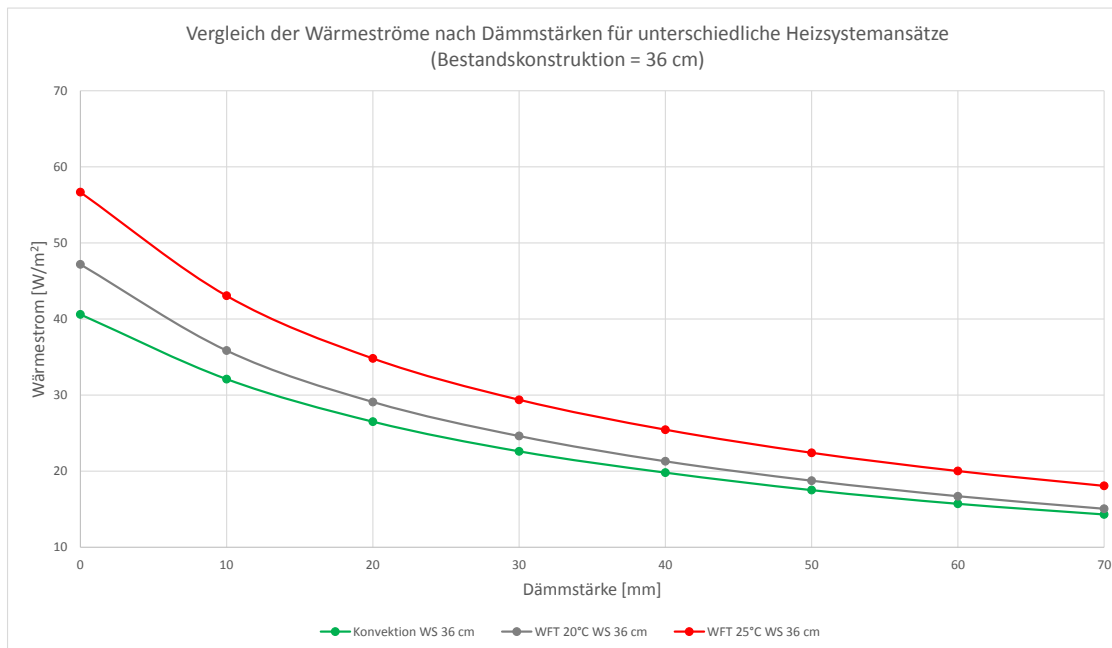


Abbildung 58 Vergleich der Wärmeströme durch eine 36 cm starke Bestandskonstruktion für die verschiedenen Lösungen zur Raumheizung<sup>1)</sup>

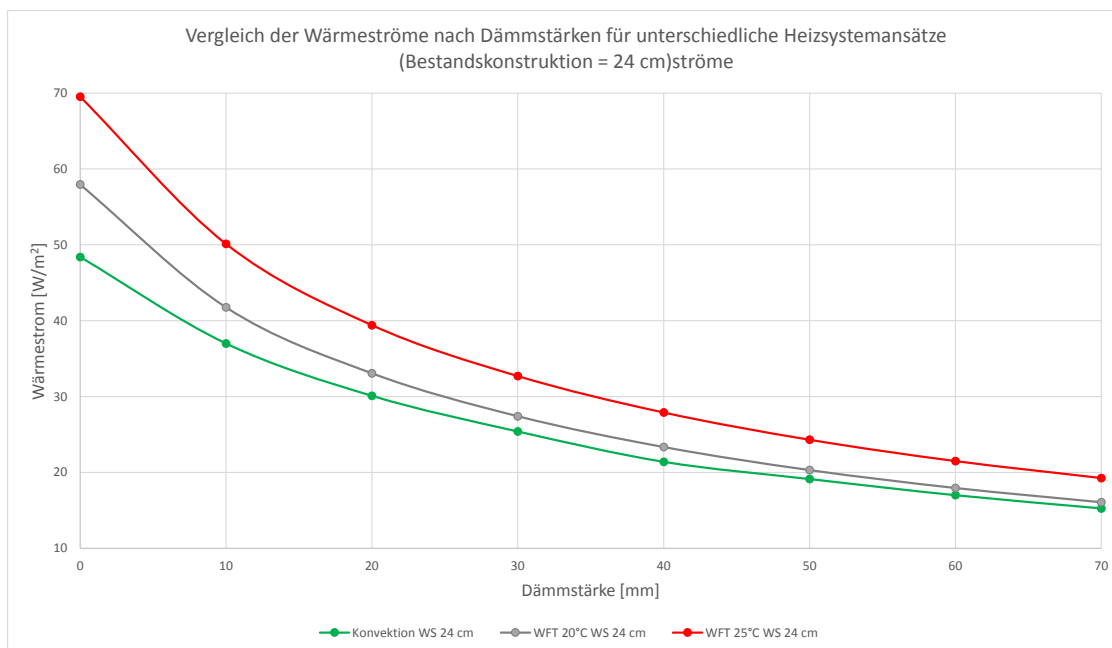


Abbildung 59 Vergleich der Wärmeströme durch eine 24 cm starke Bestandskonstruktion für die verschiedenen Lösungen zur Raumheizung<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

Bei der Betrachtung der vorgestellten Grafiken ist stets zu beachten, dass es sich bei den Berechnungen in allen Fällen um stationär angesetzte Randbedingungen gemäß DIN 4108 handelt, um eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu sichern. Eine Aussage zum Energieverlust über die Wandfläche pro Jahr für den konkreten Standort Hamburg wird im nächsten Abschnitt herausgearbeitet.

#### 6.2.4 Vergleich der Transmissionswärmeverluste über die Außenwandkonstruktion bei verschiedenen Sanierungsoptionen

Für die Bilanzierung der Transmissionswärmeverluste über die Bestandteile der Gebäudehülle erfolgt die Berechnung der Wärmeströme pro m<sup>2</sup> anhand des für das jeweilige Bauteil ermittelten U-Wertes, einer angesetzten mittleren Monats-Außentemperatur und einer fest vorgegebenen Innentemperatur. Über die Multiplikation des Verlustes pro m<sup>2</sup> mit der im Rahmen der Flächenermittlung bestimmten Flächenanteile an der Gebäudehülle kann dann der Gesamtenergieverlust für die einzelnen Bauteilarten bestimmt und bilanziert werden.

Im nachfolgenden Abschnitt wird ein ähnlicher Ansatz verfolgt. Als Randbedingung für die Außentemperatur wird jedoch anstelle konstanter Monatsmittelwerte mit Daten des TRY (TestReferenzYear) des DWD gearbeitet (vgl. Abbildung 60). Da die Berechnung instationär mit Ausgangsdaten in Stundenintervallen erfolgt, können Speichereffekte besser abgebildet werden. Die vergleichenden Betrachtungen erfolgen im vorliegenden Fall thermisch, so dass auf die (sehr zeitintensive) Berechnung einer Feuchtemassenbilanz verzichtet werden kann.

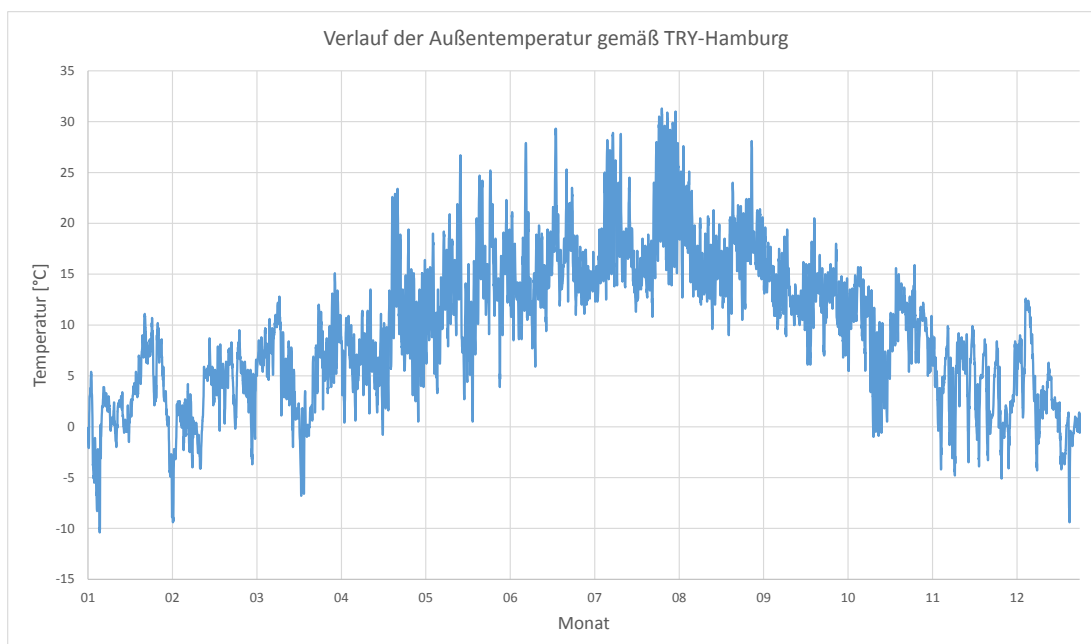


Abbildung 60 Jahresganglinie der Außentemperatur gemäß Testreferenzjahr  
(Quelle: DWD)

Um auch für die Raumlufttemperaturen einen instationären Ansatz zu erzeugen, wurden diese gemäß DIN 15026 (vgl. Abbildung 61) auf der Grundlage der jeweils herrschenden Außentemperatur berechnet. Der Verlauf der resultierenden Raumlufttemperatur ist in Abbildung 62 grafisch dargestellt.

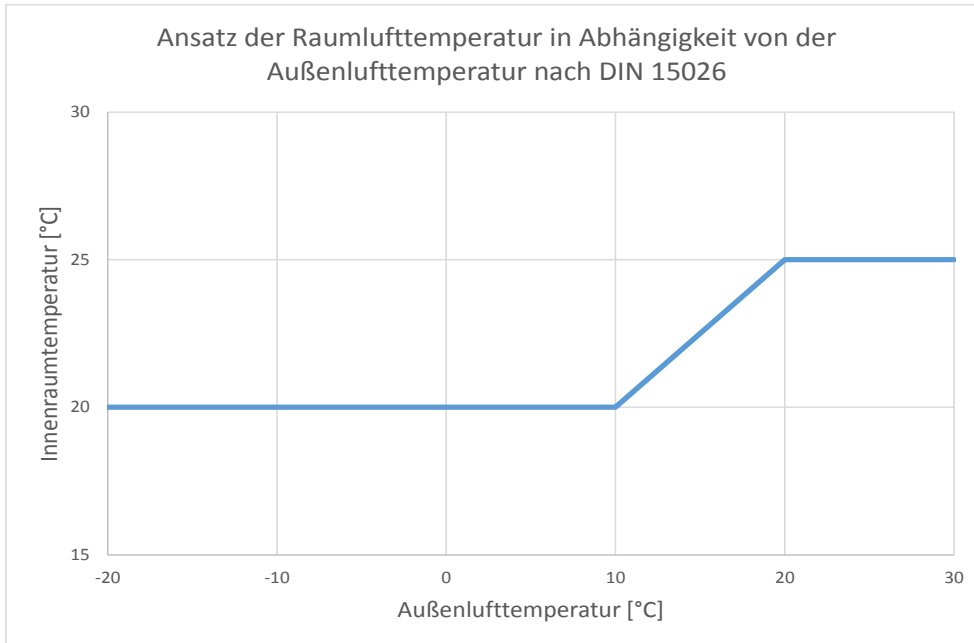


Abbildung 61 *Temperatur der Raumluft in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur gemäß DIN 15026*

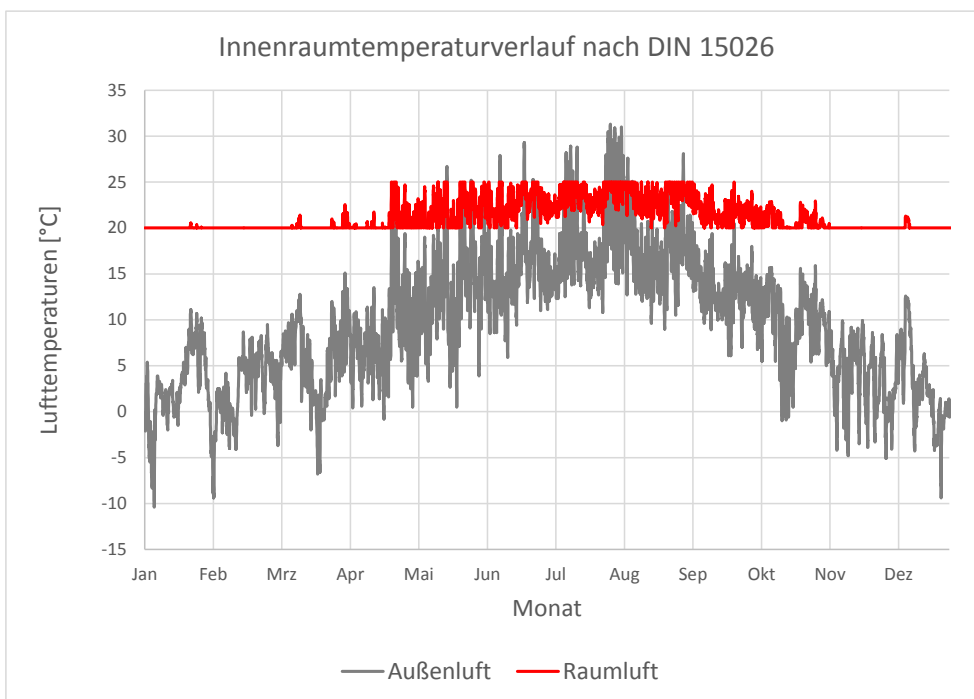


Abbildung 62 *Raumlufttemperaturen nach DIN in Abhängigkeit von den Außenlufttemperaturen gemäß TRY*

Unter Ansatz der Temperaturrendbedingungen nach TRY / DIN (vgl. Abbildung 62) wurde mittels Simulationsrechnungen für die verschiedenen Außenwandkonstruktionen zunächst die Wandoberflächentemperaturen auf der raumseitigen Wandoberfläche berechnet. Das Ergebnis dieser Simulationsrechnungen ist in Abbildung 63 dargestellt.

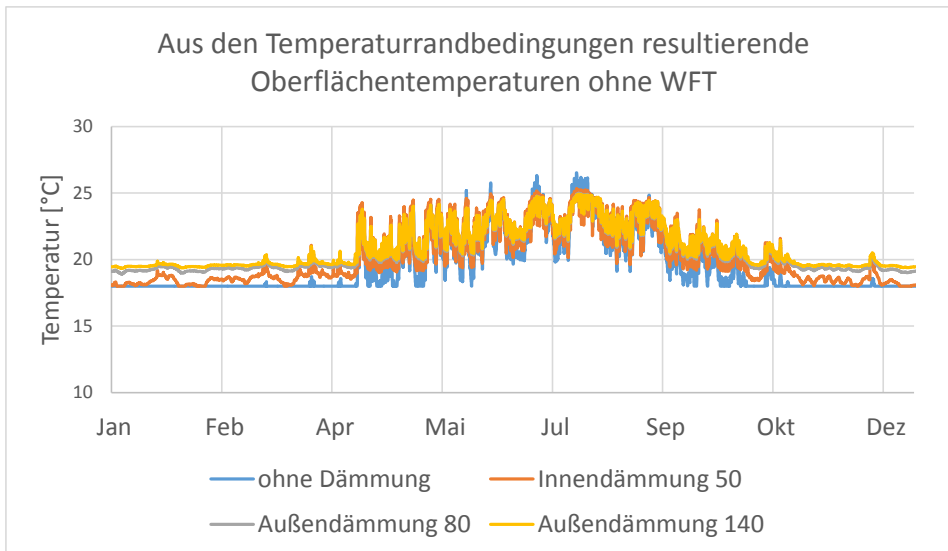


Abbildung 63 *Wandoberflächentemperaturen einer Konstruktion ohne WFT*<sup>1)</sup>

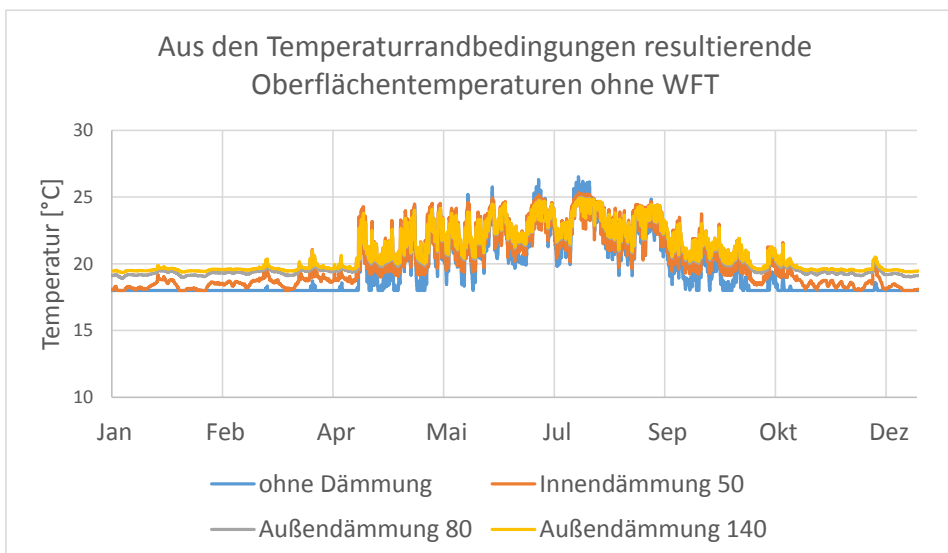


Abbildung 64 *Wandoberflächentemperaturen einer Konstruktion mit WFT – die Temperaturvorgabe von 18°C wird in keinem Fall unterschritten*<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

Der Verlauf der raumseitigen Oberflächentemperaturen (Abbildung 63) kann für die Berechnung der Transmissionswärmeverluste der jeweils konvektiv beheizten Systeme zu Grunde gelegt werden. Für die Systeme, welche über eine Wandflächentemperierung verfügen, muss die Temperatur entsprechende den getroffenen Vorgaben angehoben werden. Ein entsprechend angepasster Verlauf der Oberflächentemperaturen zeigt Abbildung 64.

Um zu berücksichtigen, dass eine Wandflächentemperierung in den Sommermonaten prinzipiell ausgeschaltet sein wird, wurde eine weitere Veränderung dahin gehend vorgenommen, dass eine Temperaturanhebung nur im Zeitraum vom 01.10. eines Jahres bis zum 30.04. des Folgejahres erfolgt. Das Resultat ist in Abbildung 65 ersichtlich und dient in den nachfolgenden Berechnungen als Vorgabe für die raumseitige Wandoberflächentemperatur.

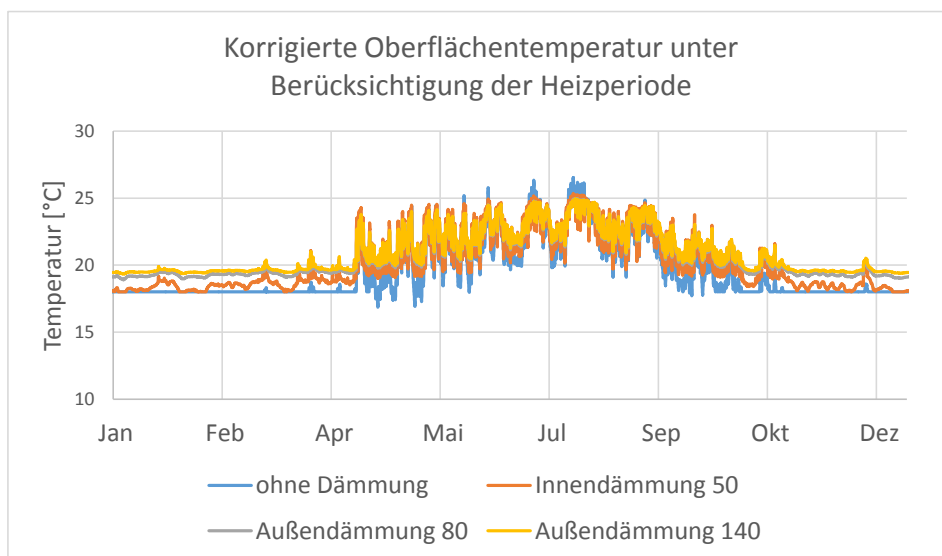


Abbildung 65 *Raumseitige Wandoberflächentemperaturen (hier  $T_{Vorgabe} = 18^{\circ}\text{C}$ ) als Grundlage für die vergleichende Betrachtung der Transmissionswärmeverluste <sup>1)</sup>*

Unter Ansatz der instationären Wandoberflächentemperaturen (Abbildung 65) als Randbedingung (Kontaktbedingung) kann nun der Vergleich unterschiedlicher Außenwandkonstruktionen bei verschiedenen Regimen zur Wandflächentemperierung vorgenommen werden. Für die konvektiv beheizten Fälle erfolgt der Ansatz der Wandoberflächentemperaturen gemäß Abbildung 63.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.



Als Berechnungsmodelle werden zunächst wieder die bereits in den vorhergehenden Abschnitten erstellten Modellvarianten herangezogen:

- ungedämmte Außenwandkonstruktion mit Konvektionsheizung
- gedämmte Außenwandkonstruktion mit Konvektionsheizung
- ungedämmte Außenwandkonstruktion mit Wandflächentemperierung
- gedämmte Außenwandkonstruktion mit Wandflächentemperierung

Um die Ergebnisse auch mit einer WDVS-basierten Sanierungslösung unter Verwendung einer Außendämmung vergleichen zu können, werden vier weitere Varianten eingeführt:

- Verwendung eines WDVS (14 cm Außendämmung WLG 032) bei konvektiv beheizten Räumen
- Verwendung eines WDVS (14 cm Außendämmung WLG 032) bei Verwendung einer Wandflächentemperierung
- Verwendung eines WDVS (8 cm Außendämmung WLG 032) bei konvektiv beheizten Räumen
- Verwendung eines WDVS (8 cm Außendämmung WLG 032) bei Verwendung einer Wandflächentemperierung

Die beiden letztgenannten Varianten sollen einen Vergleich der Außendämmung mit verschiedenen Dämmstärken ermöglichen.

Für alle betrachteten Varianten wird eine Mauerwerksstärke der Bestandskonstruktion von 36 cm unterstellt, wie sie im Gebäude am Passierzettel in den Obergeschossen regelmäßig vorgefunden wurde.

Als Grundlage für die Bilanzierung der Wärmeverluste der verschiedenen Systeme wurden in jedem Modell die Wärmeströme an drei Wandebenen gemessen:

- auf der Außenoberfläche
- innerhalb der Konstruktion (Ziegelschale)
- auf der Innenseite der thermischen Hülle (bei den Systemen mit Wandflächentemperierung befindet sich diese zwischen der Wärmeverteilschicht und der übrigen Konstruktion)

Die nachfolgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau der Vergleichsvarianten – die „virtuellen Wärmeflussplatten“ sind rot eingezeichnet.

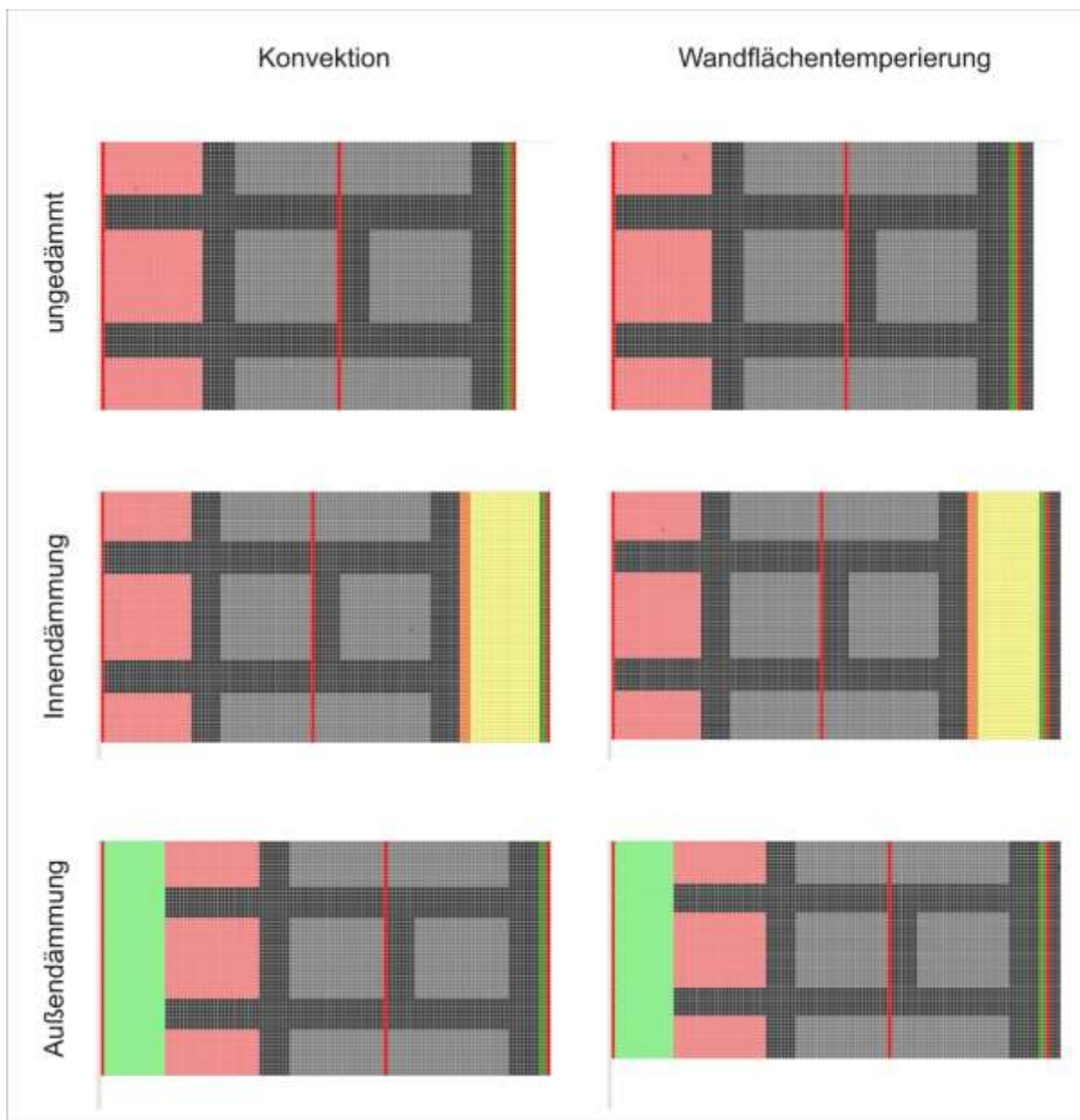


Abbildung 66 *Modellaufbauten und Ebenen zur Darstellung der Wärmeströme für die vergleichende energetische Betrachtung*

Bei Ansatz identischer Randbedingungen können die Wärmeströme durch die verschiedenen Konstruktionen direkt miteinander verglichen werden. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die Transmissionswärmeverluste pro m<sup>2</sup> Wandfläche über den Zeitraum einer Heizperiode.

01.10 - 30.04.	ungedämmt	Innendämmung 50 mm $\lambda=0,058$	Außendämmung 80 mm, $\lambda = 032$	Außendämmung 140 mm, $\lambda = 032$
Konvektion - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 70	-145.1	-56.8	-24.4	-15.1
WFT - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 72 (Vorgabe 20°C)	-184.6	-61.8	-25.2	-15.3
WFT - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 72 (Vorgabe 22°C)	-209.4	-69.9	-28.6	-17.3
01.10 - 30.04.	ungedämmt	Innendämmung 50 mm $\lambda=0,058$	Außendämmung 80 mm, $\lambda = 032$	Außendämmung 140 mm, $\lambda = 032$
Konvektion - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 70	100%	39%	17%	10%
WFT - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 72 (Vorgabe 20°C)	127%	43%	17%	11%
WFT - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 72 (Vorgabe 22°C)	144%	48%	20%	12%

Abbildung 67 *Transmissionwärmeverluste in kWh pro m<sup>2</sup> Außenwandfläche über den Zeitraum einer Heizperiode - der untere Bereich der Tabelle zeigt die Veränderung der verschiedenen Berechnungsansätze gegenüber dem (Referenz-) Fall „Konvektionsheizung ungedämmt“.*<sup>1)</sup>

Die Gegenüberstellung macht deutlich, dass bereits mit dem Einbringen einer relativ moderaten Innendämmung eine Reduzierung der Energieverluste auf ca. 40 % des Bestandes erreicht werden kann. Selbstverständlich liegen die Einsparpotenziale für die 80 – 140 mm mächtigen Außendämmungen noch höher – dem steht allerdings auch ein deutlich größeres Materialvolumen gegenüber.

Um die Energieverluste auf das konkrete Bestandssituation zu verdeutlichen, erfolgte anhand der Außenwandfläche und der Wohnfläche des Apartments die Umrechnung in [kWh/m<sup>2</sup><sub>Wohnfläche</sub>].

$$\text{Transmissionswärmeverlust pro m}^2 \text{ Wohnfläche} = \text{Transmissionswärmeverlust pro m}^2 \text{ Außenwandfläche} \times \frac{\text{Außenwandfläche}}{\text{Wohnfläche}}$$

Die nachfolgende Abbildung 68 zeigt die entsprechenden Ergebnisse der wohnflächenbezogenen Betrachtung.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

01.10 - 30.04.	ungedämmt	Innendämmung 50 mm $\lambda=0,058$	Außendämmung 80 mm, $\lambda = 032$	Außendämmung 140 mm, $\lambda = 032$
Konvektion - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 70	-64.4	-25.2	-10.8	-6.7
WFT - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 72 (Vorgabe 20°C)	-82.0	-27.4	-11.2	-6.8
WFT - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 72 (Vorgabe 22°C)	-93.0	-31.0	-12.7	-7.7
01.10 - 30.04.	ungedämmt	Innendämmung 50 mm $\lambda=0,058$	Außendämmung 80 mm, $\lambda = 032$	Außendämmung 140 mm, $\lambda = 032$
Konvektion - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 70	100%	39%	17%	10%
WFT - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 72 (Vorgabe 20°C)	127%	43%	17%	11%
WFT - $T_{WandOF}$ gemäß Abb. 72 (Vorgabe 22°C)	144%	48%	20%	12%

Abbildung 68 *Transmissionwärmeverluste in kWh pro m<sup>2</sup> Wohnfläche über den Zeitraum einer Heizperiode - der untere Bereich der Tabelle zeigt die Veränderung der verschiedenen Berechnungsansätze gegenüber dem (Referenz-) Fall „Konvektionsheizung ungedämmt“.*<sup>1)</sup>

### 6.2.5 Vergleich der Lüftungswärmeverluste für unterschiedliche Raumlufttemperaturen und Luftwechselraten

Einen weiteren Einfluss auf die Energiebilanz eines Gebäudes hat der Energieverlust infolge der Raumlüftung. Dieser wird berechnet mittels der Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der Raumluft, der Masse der ausgetauschten Luft (ermittelt aus der Luftwechselrate und dem Raumvolumen) und der spezifischen Wärmekapazität von Luft.

Bei den nachfolgenden Betrachtungen wurde eine Raumlufttemperatur von 20°C für den konvektiv beheizten Fall sowie 17°C für die Varianten mit Wandflächentemperierung ( $T_{OF,Wand} = 20^\circ\text{C}$ ) angesetzt (die Temperaturdifferenz zwischen Wandoberflächen und Raumlufttemperatur sollte in der Regel 3K nicht übersteigen, um eine angemessene Behaglichkeit zu gewährleisten).

Die folgenden Abbildungen zeigen die auftretenden Lüftungswärmeverluste nach Monaten und in Summe für das Gesamtjahr bzw. die Heizperiode. In Abbildung 69 Sind die Werte absolut pro Apartment dargestellt, Abbildung 70 enthält die Verlustwerte bezogen auf einen Quadratmeter Wohnfläche.

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

Monat	Konvektion	WFT	Δ
Januar	304.1	250.3	53.9
Februar	270.4	221.7	48.7
März	259.0	205.1	53.9
April	181.5	129.4	52.1
Mai	105.3	51.5	53.9
Juni	57.7	5.6	52.1
Juli	17.1	-36.8	53.9
August	18.6	-35.3	53.9
September	85.0	32.9	52.1
Oktober	165.1	111.2	53.9
November	242.5	190.3	52.1
Dezember	304.0	250.1	53.9
<b>Jahr</b>	<b>2010.4</b>	<b>1376.0</b>	<b>634.5</b>
<b>Heizperiode</b>	<b>1726.6</b>	<b>1358.1</b>	<b>368.5</b>

Abbildung 69 Lüftungswärmeverluste in kWh / Heizperiode und Apartment (Raumvolumen ca. 130 m<sup>3</sup>) für unterschiedliche Heizsysteme <sup>1)</sup>

Monat	Konvektion	WFT	Δ
Januar	6.1	5.0	1.1
Februar	5.4	4.4	1.0
März	5.2	4.1	1.1
April	3.6	2.6	1.0
Mai	2.1	1.0	1.1
Juni	1.2	0.1	1.0
Juli	0.3	-0.7	1.1
August	0.4	-0.7	1.1
September	1.7	0.7	1.0
Oktober	3.3	2.2	1.1
November	4.8	3.8	1.0
Dezember	6.1	5.0	1.1
<b>Jahr</b>	<b>40.2</b>	<b>27.5</b>	<b>12.7</b>
<b>Heizperiode</b>	<b>34.5</b>	<b>27.2</b>	<b>7.4</b>

Abbildung 70 Lüftungswärmeverluste in kWh/m<sup>2</sup> (bezogen auf einen Quadratmeter Wohnfläche) - Umrechnungsfaktor: 1/50 m<sup>2</sup><sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.

### 6.3 Integrierter Vergleich verschiedener Systemansätze

Anhand der berechneten Eckdaten soll abschließend ein integrierter Vergleich unterschiedlicher Handlungsoptionen anhand einer konkreten Darstellung erfolgen. Es wird dazu ein Apartment ausgewählt, welches für die Flächenberechnung verwendet wird. Die Darstellung der Flächenermittlung ist in der nachfolgenden Abbildung enthalten.

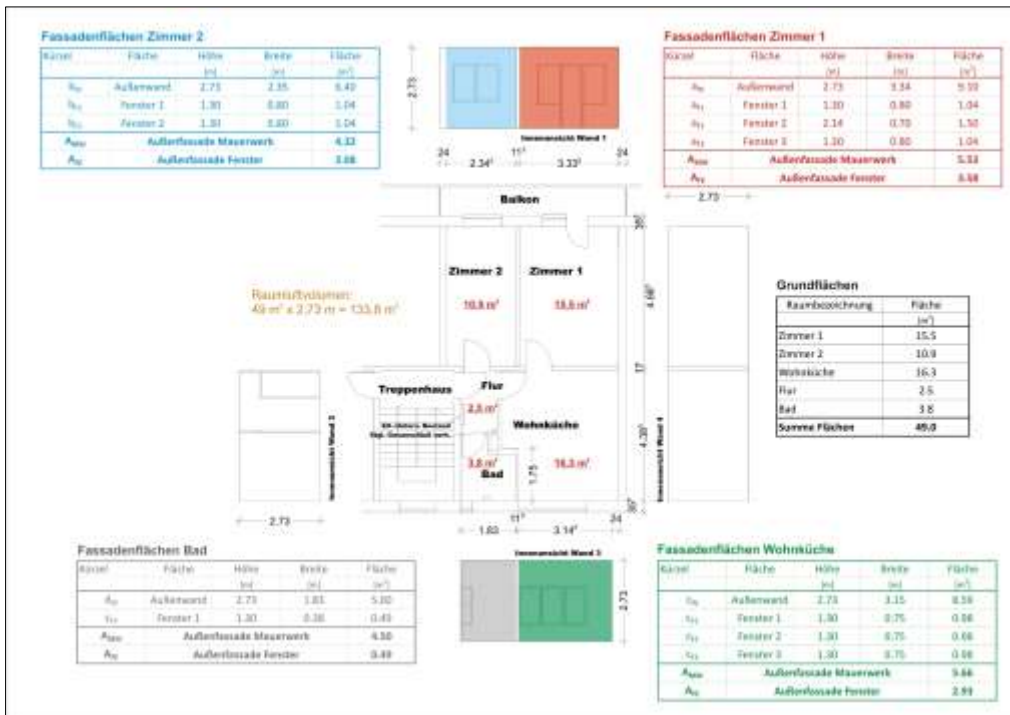


Abbildung 71 Flächenermittlung für die vergleichende Betrachtung verschiedener Systemansätze<sup>1)</sup>

Anhand der hier dargestellten Flächen und unter Zuhilfenahme der unter Abschnitt 6.2.4 und 6.2.5 berechneten Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten können die Verlustgrößen zusammengefasst und gegenübergestellt werden. Für die Berechnung der Verlustwerte über die Fenster wurde ein U-Wert  $U_{\text{Fenster}}$  so angesetzt, dass sich ein Transmissionswärmeverlust über die Fenster von ca.  $100 \text{ kWh/m}^2$  Fensterfläche und Heizperiode ergeben. Die Ergebnisse der Auswertung sind in den folgenden Abbildungen enthalten. Während in die Darstellung der Absolutwerte einen sofortigen Vergleich der Gesamtverlusten der verschiedenen Varianten ermöglicht, soll die Anteile und somit die vorhandenen Potenziale für weitere energetische Maßnahmen gemessen am Gesamtpotenzial verdeutlichen.

1) Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach

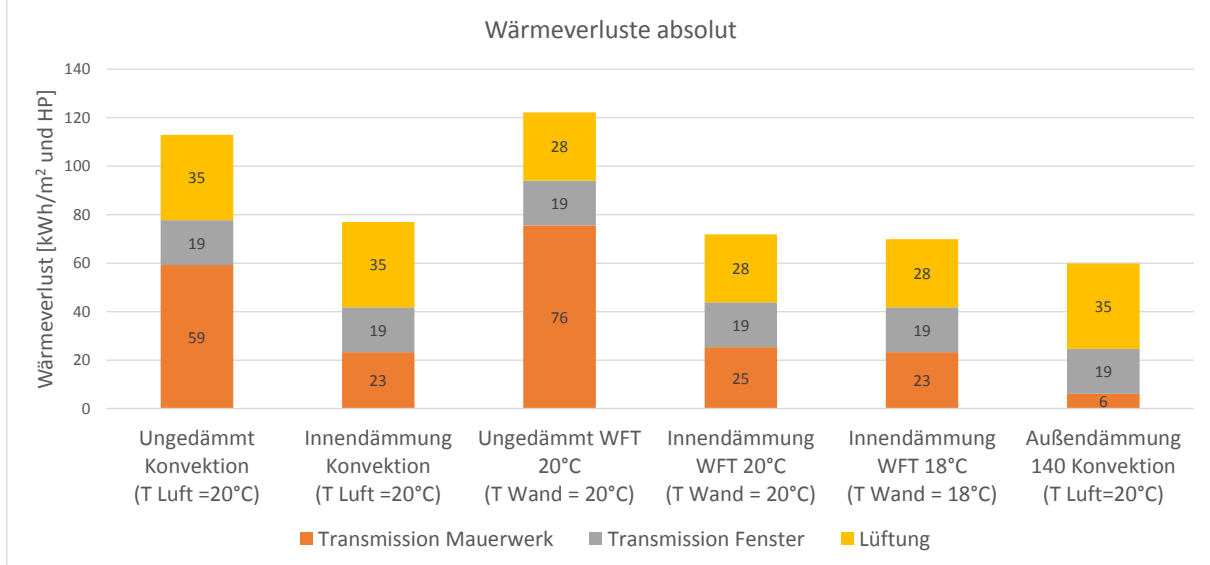


Abbildung 72 Absolute Wärmeverluste der betrachteten Varianten Summe aus Transmission und Lüftung<sup>1)</sup>

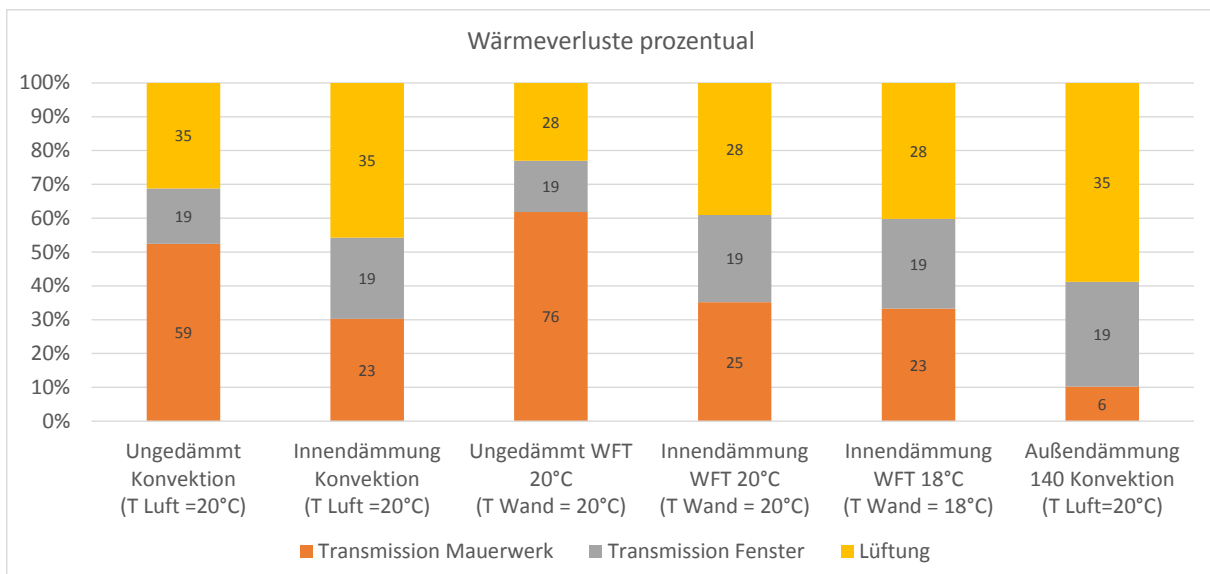


Abbildung 73 Prozentualer Anteil der Verlustarten am jeweils vorhandenen Gesamtverlust – die eingetragenen Zahlen entsprechen den Absolutwerten<sup>1)</sup>

Es wird deutlich, dass mit zunehmender Reduzierung der Transmissionswärmeverluste durch das Mauerwerk die Bedeutung der übrigen Komponenten (Lüftungswärmeverluste und Transmission durch Fenster) zunimmt.

1) Die dargestellte Grafik wurde beispielhaft aus der Untersuchung Passierzettel Hamburg entnommen, da im vorliegenden Projekt noch nicht genügend verwertbare Daten verfügbar sind. Eine Überarbeitung erfolgt nach Erfassung der Daten für die erste Heizperiode.



## 7 Schlussfolgerungen

Die im vorliegenden Bericht vorgestellte Studie soll eine umfassende Analyse der zu beachtenden Gegebenheiten, Randbedingungen und Wirkmechanismen bei der Entwicklung und Umsetzung unterschiedlicher Sanierungsstrategien ermöglichen. Dazu wurden zunächst Extremsituationen in der Realität abgebildet und messtechnisch umfassend analysiert. Aufbauend auf den Messdaten und den erfassten Randbedingungen wurde die vorgefundene Realität im Modell abgebildet. Die Wärme- und Feuchtetransportvorgänge wurden mittels hygrothermischer Simulation (DELPHIN 5.8) nachempfunden. Der direkte Vergleich der real gemessenen Zustandsgrößen mit den messtechnisch erfassten Werten führte zur Bestätigung der Modellansätze.

Auf dieser Grundlage wurden anschließend wesentliche Zusammenhänge, die bei der Planung und Umsetzung energetischer Sanierungsmaßnahmen besonderer Berücksichtigung bedürfen, im Rahmen umfangreicher Fallstudien (weitere Simulationen) aufgearbeitet und die entsprechenden Kernaussagen abgeleitet. Nachfolgend sollen die wesentlichen Aussagen noch einmal zusammengefasst dargestellt werden.

### 7.1 Vorzüge und Nachteile der betrachteten Grundsystemansätze

#### 7.1.1 Konvektiv beheizte Systeme

##### 7.1.1.1 Systemrisiken

##### 7.1.1.2 Oberflächentemperaturen / Transmissionswärmeverluste

##### 7.1.1.3 Raumlufttemperaturen und Lüftungswärmeverluste

##### 7.1.1.4 Sommerlicher Wärmeschutz

#### 7.1.2 Systeme mit Wandflächentemperierung

##### 7.1.2.1 Systemrisiken

##### 7.1.2.2 Oberflächentemperaturen / Transmissionswärmeverluste

##### 7.1.2.3 Raumlufttemperaturen und Lüftungswärmeverluste

##### 7.1.2.4 Sommerlicher Wärmeschutz

## 7.2 Ableitung einer Hybridlösung

Im Sinne einer Optimierung soll der Versuch unternommen werden, aus den untersuchten Extremfällen und auf der Grundlage der angestellten Vergleichsrechnungen Hybridlösungen abzuleiten, welche die Vorteile beider Systemansätze in sich vereinen:

- **Optimierte Wandflächentemperierung**
- **Angepasste Innendämmung**

## 8 Glossar

### 8.1 Absolute Luftfeuchtigkeit

Als absolute Luftfeuchtigkeit wird der Wasserdampfgehalt der Luft bezogen auf 1 kg oder 1 m<sup>3</sup> Trockenluft bezeichnet. Als Maßeinheit wird g/kg bzw. g/m<sup>3</sup> verwendet.

### 8.2 Ausgleichsfeuchte $w_{80}$ und Sättigungsfeuchtegehalt $w_{\text{sat}}$

Die Ausgleichsfeuchte  $w_{80}$  beschreibt den Feuchtegehalt eines Baustoffes bei einer relativen Luftfeuchte von 80%. Man bezeichnet  $w_{80}$  auch als praktischen Feuchtegehalt. Der Wert  $w_{\text{cap}}$  beziffert den Wassergehalt bei freier Sättigung, bzw. die Porosität, die dem Feuchtetransport zur Verfügung steht. Dieser Wassergehalt wird bei direktem Kontakt des Baustoffes mit flüssigem Wasser erreicht (kapillares Saugen). Beide Kennwerte werden in der Einheit m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> dargestellt.

### 8.3 Dampfdiffusion

Als Dampfdiffusion bezeichnet man den Ausgleich unterschiedlicher Konzentrationen von Wasserdampf durch ein Material. Dieser erfolgt stets von der wärmeren zur kälteren Seite des Materials – bei einem Gebäude im Winter also von innen nach außen. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Materials ist um den Faktor  $\mu$  größer als der von ruhender Luft.

### 8.4 Heizwärmebedarf (Qh)

Wärme, die das Heizsystem für die Gesamtheit der beheizten Räume in einem Jahr bereitzustellen hat. Für die Berechnung wird nicht die gesamte Fläche des Hauses, sondern nur die Grundfläche der beheizten Räume zugrunde gelegt.

### 8.5 Konvektion

Bei der Konvektion wird Wärme von einem Ort zum anderen übertragen. Dies ist stets mit einem Stofftransport verbunden. Transportiert werden dabei Teilchen von Gasen oder Flüssigkeiten auf Grund von Temperaturunterschieden. Von baupraktischer Bedeutung sind Wärmetransportprozesse durch Luftkonvektion in Räumen und in Bauteilen (luftdurchströmte Wände und Dächer bei großem Temperaturunterschied).

### 8.6 Lüftungswärmeverlust

Durch den Austausch der Raumluft mit der Außenwelt (mechanische Lüftung / Fensterlüftung und Infiltration) wird dem Raum kalte Außenluft zugeführt, welche anschließend auf das Temperaturniveau der Raumluft erwärmt werden muss. Die dazu benötigte Energie bezeichnet den Lüftungswärmeverlust.

## 8.7 Relative Luftfeuchtigkeit

Das Verhältnis aus tatsächlich vorhandenem und maximal möglichem Wasserdampfgehalt in der Luft bezeichnet man als relative Luftfeuchtigkeit. Sie wird in Prozent angegeben und ist u.a. abhängig von der Lufttemperatur sowie dem Luftdruck. Um das Auftreten von Schimmelpilzen zu vermeiden, sollte die relative Luftfeuchtigkeit an den Wandoberflächen 70 % nicht übersteigen.

## 8.8 Rohdichte

Die Rohdichte eines Körpers (Materials) ist der Quotient aus seiner Masse und seinem Volumen. Je geringer der Porenanteil am Volumen ist, um so größer wird die Dichte.

## 8.9 Spezifische Wärmekapazität c

Die spezifische Wärmekapazität c beschreibt, welche Energiemenge pro Kilogramm Masse und pro Kelvin Temperaturänderung durch einen Stoff aufgenommen werden kann. Gemessen wird sie in kJ / kgK.

## 8.10 Strömung

Im Gegensatz zur Konvektion ist die Ursache der Strömung ein Druckunterschied. Strömen können Flüssigkeiten und Gase. Durch Strömung wird ebenfalls Wärme von einem Ort zum anderen übertragen.

## 8.11 Taupunkttemperatur

Sinkt die Temperatur der Luft, sinkt damit auch ihre Wasseraufnahmefähigkeit. Die relative Luftfeuchtigkeit steigt an, bis die Luft mit Wasserdampf vollständig gesättigt ist und beträgt dann 100 %, wobei flüssiges Kondensat als Tauwasser ausfällt. Findet der Vorgang im Material statt, wird dieses auch als überhygroskopische Feuchte bezeichnet.

## 8.12 Transmissionswärme

Wärmestrom, der aufgrund von Temperaturunterschieden durch die Außenbauteile eines Gebäudes fließt. Die dabei entstehenden Verluste werden Transmissionswärmeverlust genannt.

## 8.13 Wärmebrücke

Örtlich begrenzte Schwachstellen in den Außenbauteilen, an denen mehr Wärme nach außen gelangt (Transmission) als bei angrenzenden Flächen oder Bauteilen. Eine Wärmebrücke entsteht geometrisch bedingt (z.B. an Kanten, Ecken) aber auch aufgrund von Anschlüssen und Durchdringungen oder durch ungedämmte Betonpfei-

ler, Ringanker, Betonsturztträger oder Balkonplatten, die meist Mängel in der Planung und Bauausführung darstellen. Die Folge der Wärmebrücken sind höhere Wärmeverluste und somit eine niedrigere Oberflächentemperatur auf der Rauminnenseite, wodurch die Gefahr von Tauwasserausfall und Schimmelbildung besteht. Neben den hygienischen Problemen besteht gleichzeitig die Gefahr von Bauschäden durch Schwitzwasserbildung.

#### **8.14 Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)**

Der Wärmedurchgangskoeffizient (auch U-Wert genannt) beschreibt den Wärmestromdurchgang durch die gesamte Wandkonstruktion wenn sich die Temperatur auf der Innenseite um 1 Grad Kelvin von der auf der Außenseite unterscheidet. Er hängt im Wesentlichen von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der Dicke des Stoffes ab. Je kleiner der U-Wert eines Stoffes ist, umso höher ist die Dämmwirkung.

#### **8.15 Wärmedurchgangswiderstand R**

Der Wärmedurchgangswiderstand R ist der Kehrwert des Wärmedurchgangskoeffizienten. Ähnlich wie bei einem elektrischen Widerstand gilt: je größer der Widerstand umso geringer ist der Strom (hier also Wärmestrom) der durch das Bauteil fließen kann. Das bedeutet je größer der Wärmedurchgangswiderstand ist, umso weniger Wärme geht verloren.

#### **8.16 Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ -Wert)**

Angabe des Wärmestroms, der durch eine Fläche von einem Quadratmeter eines Materials mit einer Stärke von einem Meter strömt, wenn die Temperaturdifferenz der Oberfläche in Richtung des Wärmestromes ein Kelvin beträgt. Sie hängt im Wesentlichen vom Porenvolumen, vom Gefügebau, der Rohdichte, der Temperatur und der Feuchtigkeit eines Stoffes ab.

#### **8.17 Wärmeleitfähigkeitsgruppe (WLG)**

Der Begriff Wärmeleitfähigkeitsgruppe wurde zwischenzeitlich durch die Wärmeleitfähigkeitsstufe abgelöst.

#### **8.18 Wärmeleitfähigkeitsstufe (WLS)**

Wärmeleitfähigkeitsstufe oder auch Wärmeleitstufe (WLS) gibt die Dämmwirkung von Dämmstoffen an. Sie dient der besseren Klassifizierung anhand ihrer Wärmeleitfähigkeit. Je niedriger der Wert, desto besser dämmt ein Dämmstoff. Die WLS erlaubt im Gegensatz zur älteren WLG die Unterteilung in 1er-Schritten. Der Wert errechnet sich aus dem Wert der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ . Von diesem sind es die letzten drei Ziffern nach dem Komma (z.B. WLS 033).

### 8.19 Wärmespeicherfähigkeit $\rho \cdot c$

Die Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils entspricht dem Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität  $c$  und der Einbaudichte des Stoffes  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Von großer Bedeutung ist diese Kennzahl für den sommerlichen Wärmeschutz. Je größer die Wärmekapazität und die Masse eines Bauteils sind, umso länger benötigt es um sich aufzuheizen – der Raum bleibt länger kühl.

### 8.20 Wasseraufnahmekoeffizient $A_W$

Der Wasseraufnahmekoeffizient  $A_W$  kennzeichnet die durch kapillare Kräfte bedingte flächenbezogene Wasseraufnahme des Baustoffes. Je nach Wasseraufnahmefähigkeit werden die Eigenschaften von Materialien wie folgt bezeichnet:

- wassersaugend mit  $A_W \geq 2,0 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$
- wasserhemmend mit  $A_W \geq 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$
- wasserabweisend mit  $A_W \leq 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2\text{h}^{0,5}$

Als Außendämmung werden Materialien mit einem sehr niedrigen  $A_W$ -Wert eingesetzt, als Innendämmmaterial sollten Materialien mit einem hohen  $A_W$ -Wert verwendet werden.

### 8.21 Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl $\mu$

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  ist eine der wichtigsten Stoffgrößen für das Verhalten von Dämmstoffen. Sie charakterisiert den Widerstand, den ein Baustoff der Dampfdiffusion entgegensetzt.