

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 anhand vorliegender Gutachten (Hamburger Bauwerke aus den 20er Jahren August 2010 Seite 3 und weitere) sowie anhand von Aussagen des mit der Planung beauftragten Architekten Annahmen getroffen. Der Schichtenaufbau wurde wie folgt angesetzt.

Wandstärke	48 cm	36 cm
Innenputz	1 cm	1 cm
Kalksandstein	9 cm	10 cm
Kalksandstein + (glasierte) Ziegel	23 cm	10 cm
Hohlraum teils lose mit Mörtel / Schutt verfüllt	3 cm	3 cm
Ziegel (Klinker) als Außenschale	12 cm	12 cm

Abbildung 31 *Wandaufbau gemäß Annahmen und vorliegenden Gutachten*

Im März 2013 erfolgten im Auftrag des Gebäudeeigentümers an nahezu allen Fassadenbereichen umfangreiche Aufschlüsse zur Beurteilung des Wandaufbaus (Schichtenaufbau, Materialien, Mauerwerksverbund). Die erstellten Mauerwerksöffnungen wurden im Sinne der begleitenden Bestandsaufnahme begutachtet und dokumentiert.



Abbildung 32 *Ansicht Mauerwerksaufschluss im Bereich Passierzettel 1 – links: Lüftungsöffnung, rechts: direkter Anschluss des Hintermauerwerks an die Außenschale*



Abbildung 33 *Ansicht Mauerwerksaufschluss im Bereich Passierzettel 4 – im linken Foto erkennbar sind regelmäßig angeordnete Binder zur Verbindung von Hintermauerwerk und Außenschale erkennbar, auch hier schließen beide Schalen nahtlos aneinander an (Foto rechts)*



Abbildung 34 *Ansicht Mauerwerksaufschluss im Bereich Passierzettel 9 – Der Mauerwerksaufbau entspricht im Wesentlichen dem der vorangegangenen Beispiele*

Unter Beachtung der vorangestellten Aussagen ist der Schichtenaufbau als Grundlage für die weiteren Betrachtungen dahingehend zu korrigieren, dass eine echte Schalenfuge zwischen Hintermauerwerk und Ziegelschale nicht vorhanden ist (der Abstand zwischen den Schichten ist in der Regel nicht größer als eine Mörtelfuge und nahezu vollständig mit Mörtel verfüllt).

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.

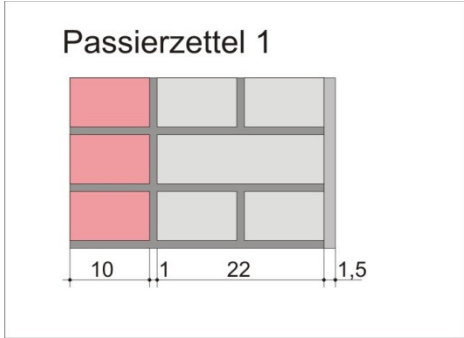
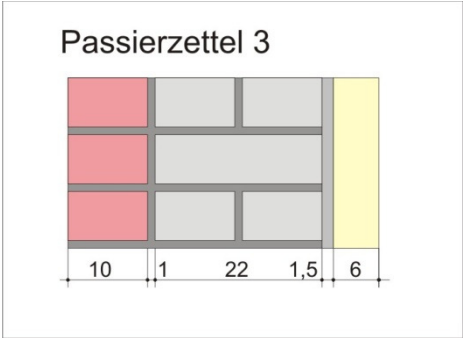
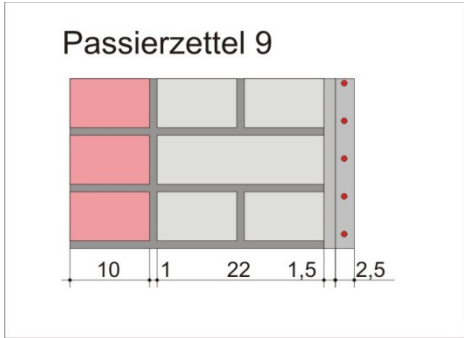
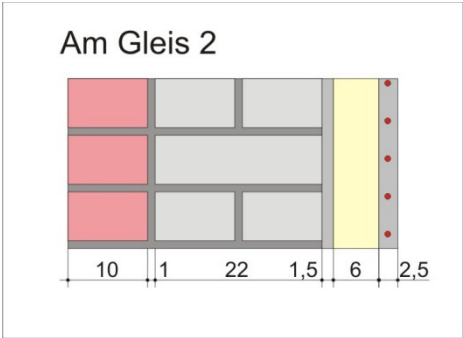
	Ungedämmte Konstruktionen	Gedämmte Konstruktionen
Konvektionsheizung	<p>Passierzettel 1</p> 	<p>Passierzettel 3</p> 
Wandflächentemp.	<p>Passierzettel 9</p> 	<p>Am Gleis 2</p> 

Abbildung 35 *Beschreibung der Konstruktionen auf der Grundlage der Begutachtung vor Ort*

Um im Rahmen der Simulationsrechnungen auch den Einfluss der Bindersteine zwischen der Außenschale und dem Hintermauerwerk berücksichtigen zu können, wurde jeweils eine Modellalternative betrachtet, in der ein Binder enthalten ist (siehe Abbildung 36). Wichtig ist bei dieser Betrachtung, dass es sich bei dem Simulationsmodell um ein 2D-Modell handelt. Das heißt, dass genau genommen nicht ein einzelner Binderstein sondern eine hintereinander liegende Reihe von Bindersteinen modelliert ist. Für den einen vorgefundenen Fall auf der Gebäuderückseite (Zugang Wilhelmsburger Straße) entspricht der Modellansatz sogar der Realität (vgl. Abbildung 37).

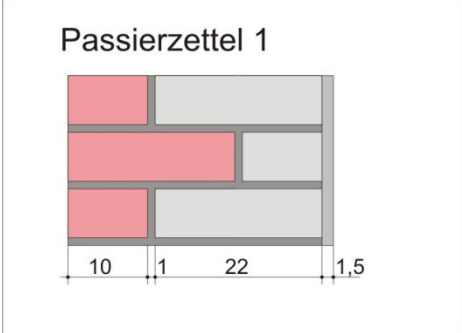
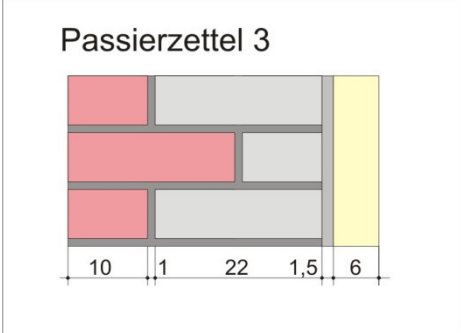
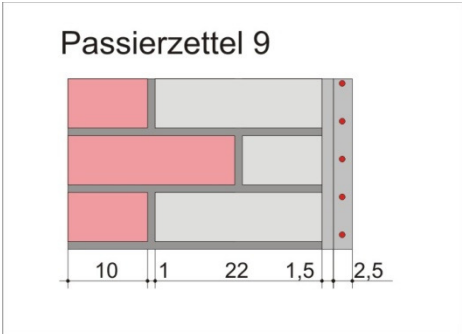
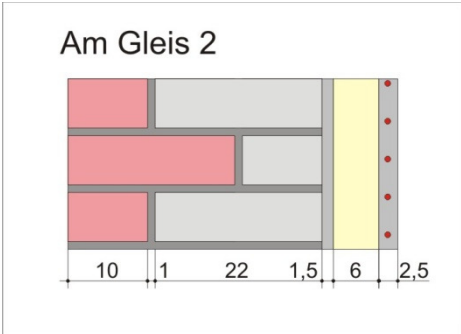
	Ungedämmte Konstruktionen	Gedämmte Konstruktionen
Konvektionsheizung	<p>Passierzettel 1</p>  <p style="font-size: 0.8em;">10 1 22 1,5</p>	<p>Passierzettel 3</p>  <p style="font-size: 0.8em;">10 1 22 1,5 6</p>
Wandflächentemp.	<p>Passierzettel 9</p>  <p style="font-size: 0.8em;">10 1 22 1,5 2,5</p>	<p>Am Gleis 2</p>  <p style="font-size: 0.8em;">10 1 22 1,5 6 2,5</p>

Abbildung 36 *Alternative Modellansätze unter Berücksichtigung der Bindersteine zwischen Außenschale und Hintermauerwerk*

Die vergleichende Betrachtung beider Modellansätze ergab nur marginale Unterschiede hinsichtlich der Berechnungsergebnisse, so dass in den wesentlich komplexeren Modellen, bei denen der Einfluss des Wärmetransports durch die ungedämmte Fensterlaibung berücksichtigt wird (Horizontalschnitt mit Abbildung der Laibungsgeometrie), prinzipiell von einer Modellgeometrie gemäß Abbildung 35 ausgegangen wird.



Abbildung 37 *Mauwerksaufschluss auf der Rückseite des Gebäudes (Zugang Wilhelmsburger Straße – hier wurde eine komplette Binderschicht für den Verbund zwischen Außenschale und Hintermauerwerk eingefügt.*

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. Erste Aussagen bezüglich der Materialeigenschaften des Kalksandsteins und der Außenmauerziegel konnte aus den beim AG vorliegenden Gutachten (Hamburger Bauwerke aus den 20er Jahren etc.) entnommen werden. Für die numerische Simulation der Transportvorgänge mittels Delphin 5 sind jedoch wesentlich genauere Angaben notwendig.



Abbildung 38 *Analyseeinrichtungen im F&E-Labor des IBK an der TU Dresden*

Im Rahmen der Vor-Ort-Analyse wurden im März 2013 umfangreiche Proben entnommen und im bauphysikalischen Labor der TU Dresden eingehend analysiert. Neben den Basisparametern wie der Trockenrohdichte, 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	ρ	1.788 kg/m ³	1.704 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	λ_{dry}	0,811 W/mK	1,188 W/mK
Spezifische Wärmekapazität	c	800 J/kgK	891 J/kgK
Porosität	O_{Por}	0,325 m ³ /m ³	0,357 m ³ /m ³
Kapillare Sättigung	O_{cap}	0,106 m ³ /m ³	0,177 m ³ /m ³
Wasserdampfdiffusionswiderstand	μ_{dry}	28,0	18,65
Wasseraufnahmekoeffizient	aw	0,0312 kg/m ² s ^{0.5}	0,3109 kg/m ² s ^{0.5}

Abbildung 39 *Materialparameter des Bestandsmauerwerks*

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.

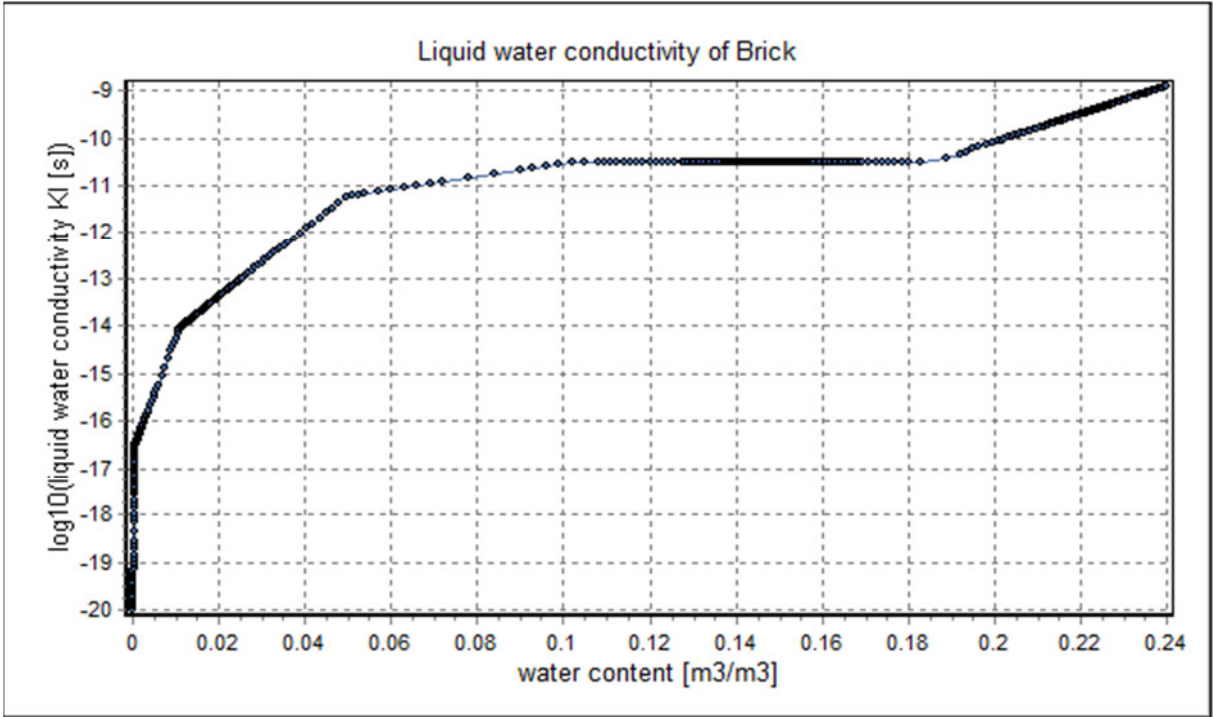


Abbildung 40 *Beispiel für eine Materialfunktion – hier die Flüssigwasserleitfähigkeit des Außenziegels in Abhängigkeit des Wassergehalts*

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.

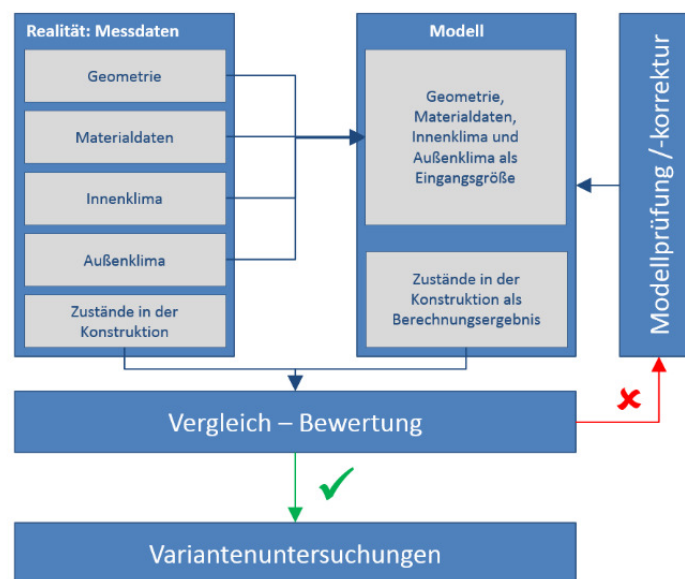


Abbildung 41 *Prinzipieller Ansatz zur Modellierung und Modellkalibrierung*

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.

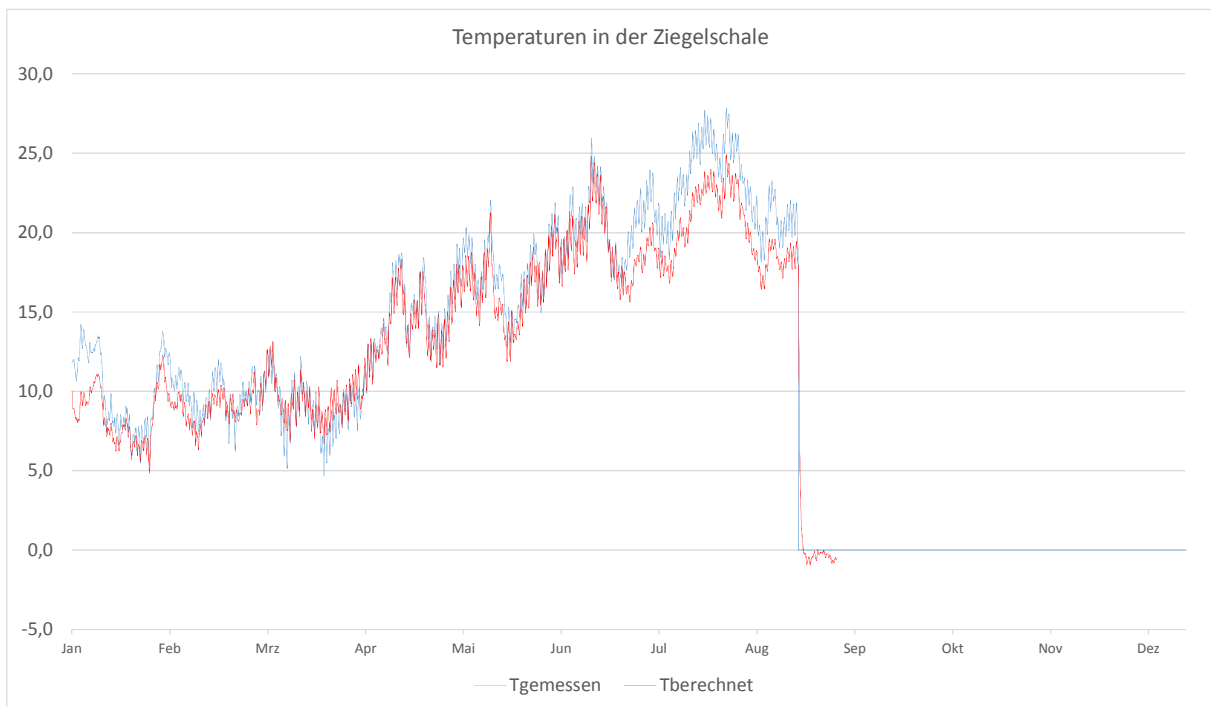


Abbildung 42 *Modellvalidierung: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverlaufes in der Ziegelschale – konvektiv beheizte WE ohne Dämmung*

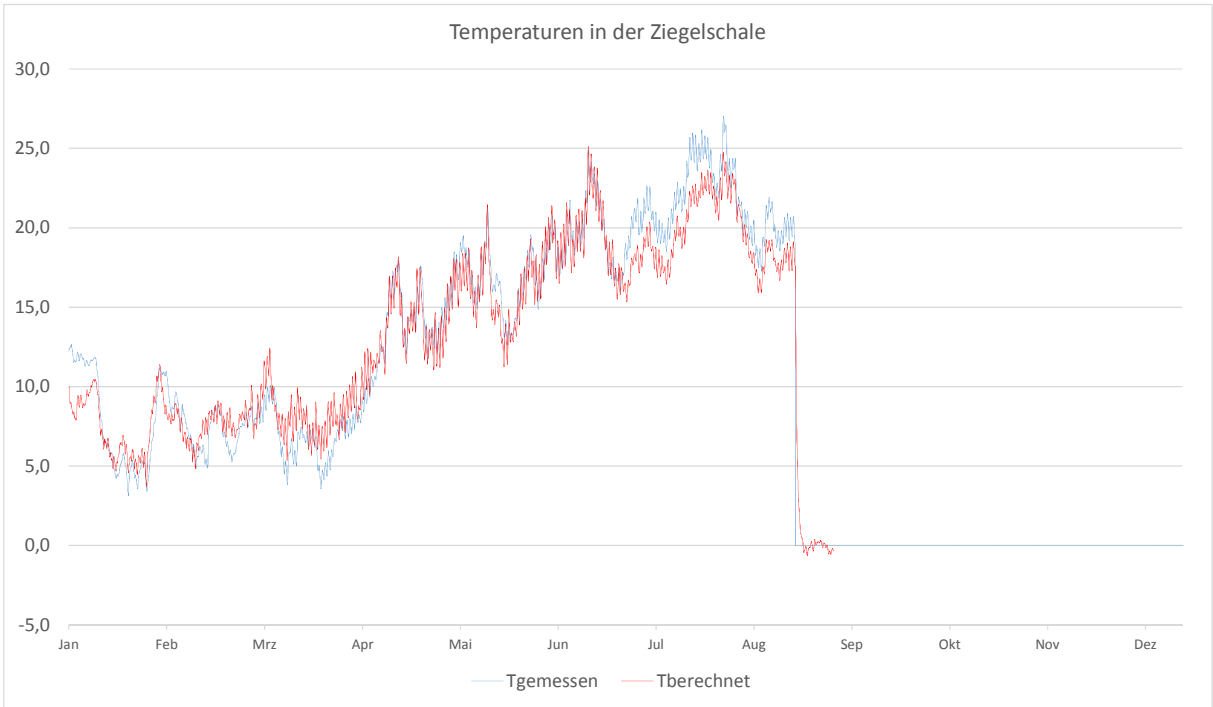


Abbildung 43 *Modellvalidierung: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverlaufes in der Ziegelschale – konvektiv beheizte WE mit innen gedämmter Fassade*

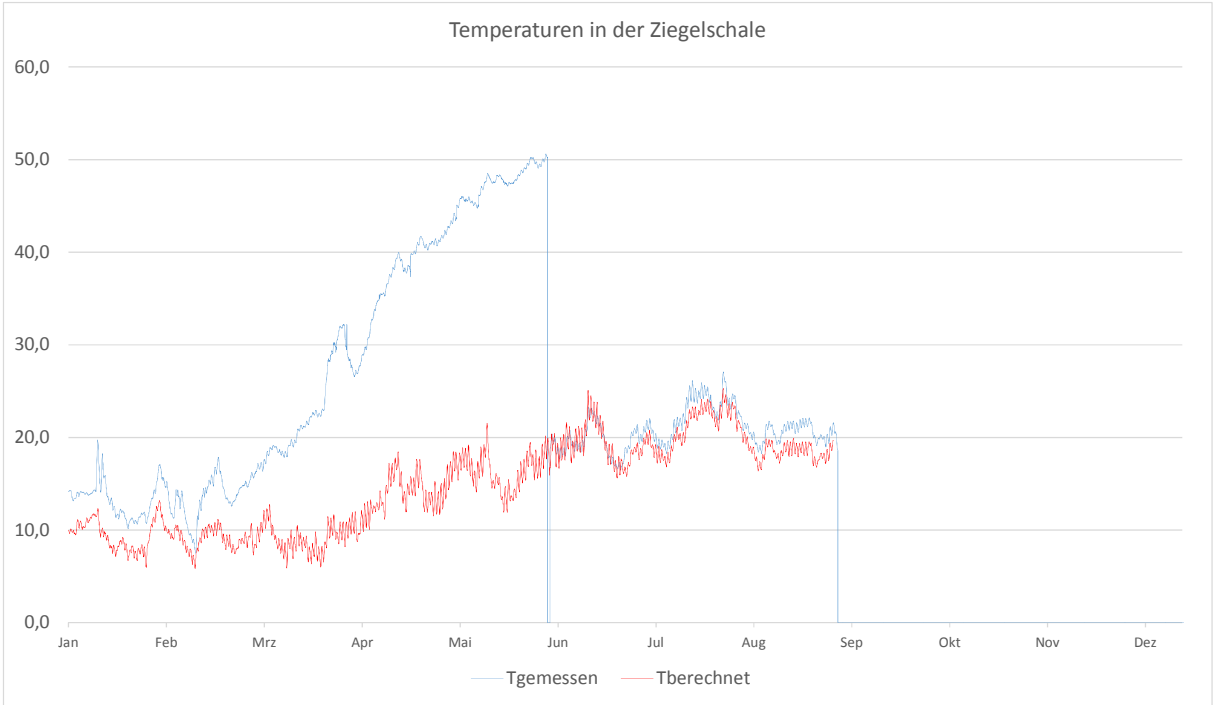


Abbildung 44 *Modellvalidierung: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverlaufes in der Ziegelschale – WE mit Wandflächentemperierung und ungedämmter Fassade*

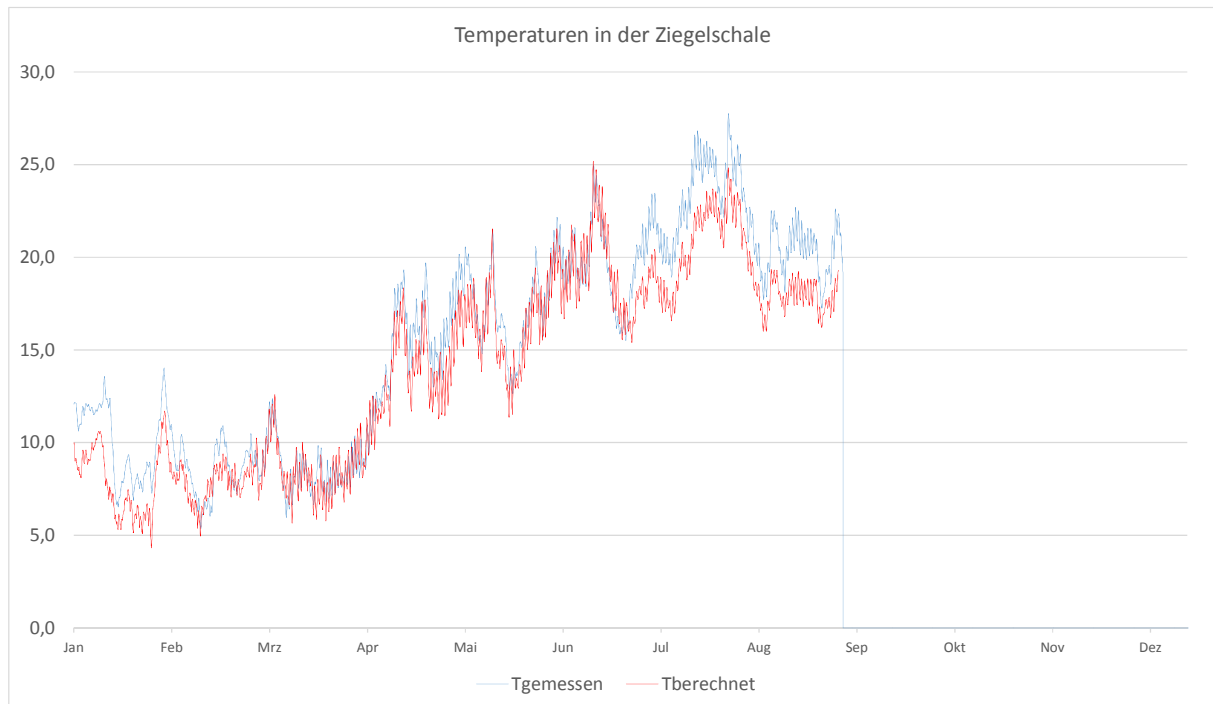


Abbildung 45 *Modellvalidierung: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverlaufes in der Ziegelschale – WE mit Wandflächentemperierung und innen gedämmter Fassade*

Bei der Betrachtung der Abbildung 44 ist das Abdriften eines defekten Temperatur-/feuchtefühlers deutlich zu erkennen. Der Sensor wurde im Juni 2013 vor Ort ausgetauscht. Die nachfolgend erfassten Messwerte sind mit den berechneten Werten vergleichbar.

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

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 Temperaturrandbedingung 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.

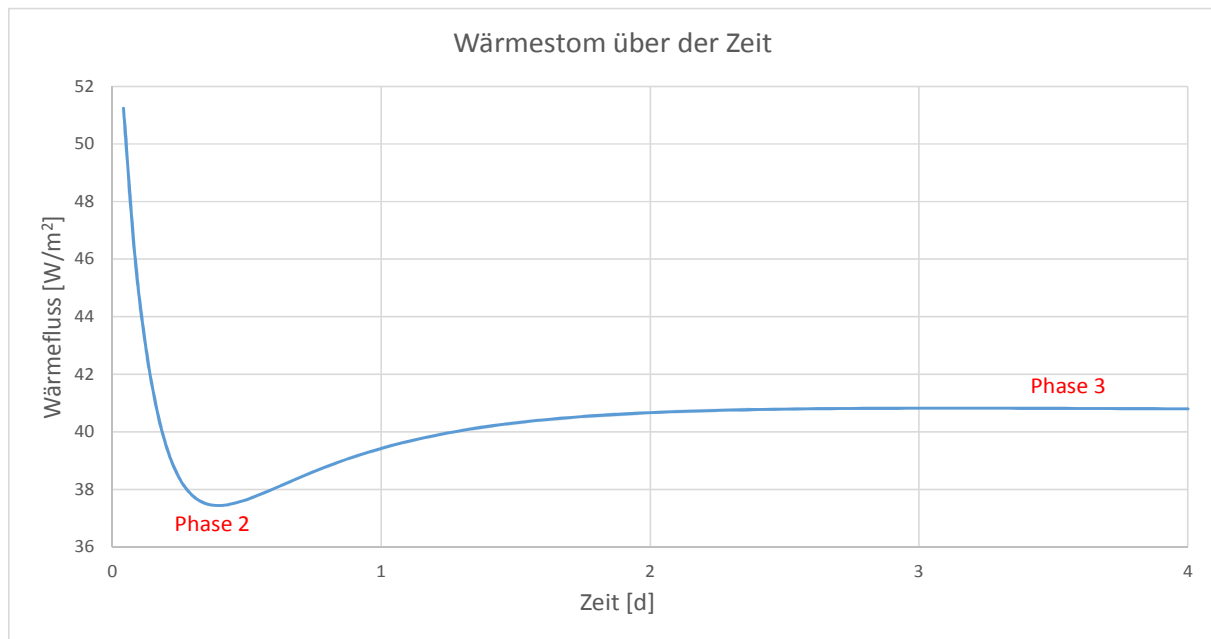


Abbildung 46 Darstellung des Wärmestroms über der Zeit

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 48 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.

$\theta_{\text{au\ss en}}$	θ_{innen}	$\Phi_{\text{initial (const)}}$	Wärmestrom	$\Delta\theta$	U-Wert
[°C]	[°C]	[%]	[W/m ²]	[K]	[W/m ² 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 47 *Wärmestrom und U-Wert einer ungedämmten Konstruktion in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte (tabellarisch)*

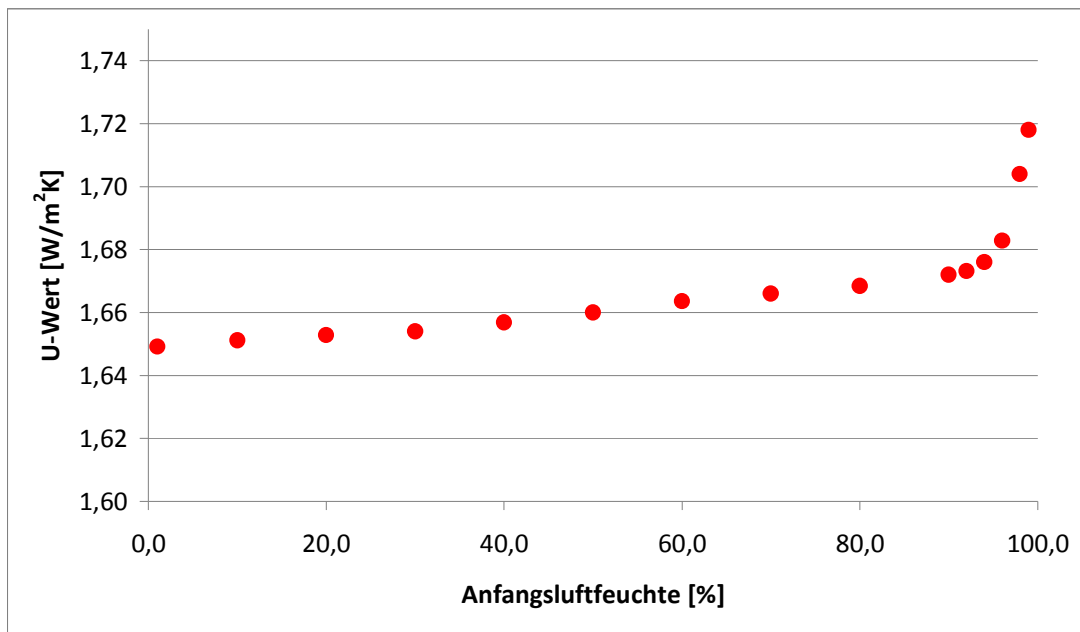


Abbildung 48 *U-Wert einer ungedämmten Konstruktion in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte (grafisch)*

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 Calciumsilikat). Das Ergebnis ist in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

$\theta_{\text{außen}}$	θ_{innen}	$\varphi_{\text{initial (const)}}$	Wärmestrom	$\Delta\theta$	U-Wert
[°C]	[°C]	[%]	[W/m ²]	[K]	[W/m ²]
-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 49 *Wärmestrom und U-Wert einer gedämmten Konstruktion in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte (tabellarisch)*

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.

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 Calziumsilikat werden auch andere Veränderungen in Abhängigkeit der Feuchte zu erwarten sein.

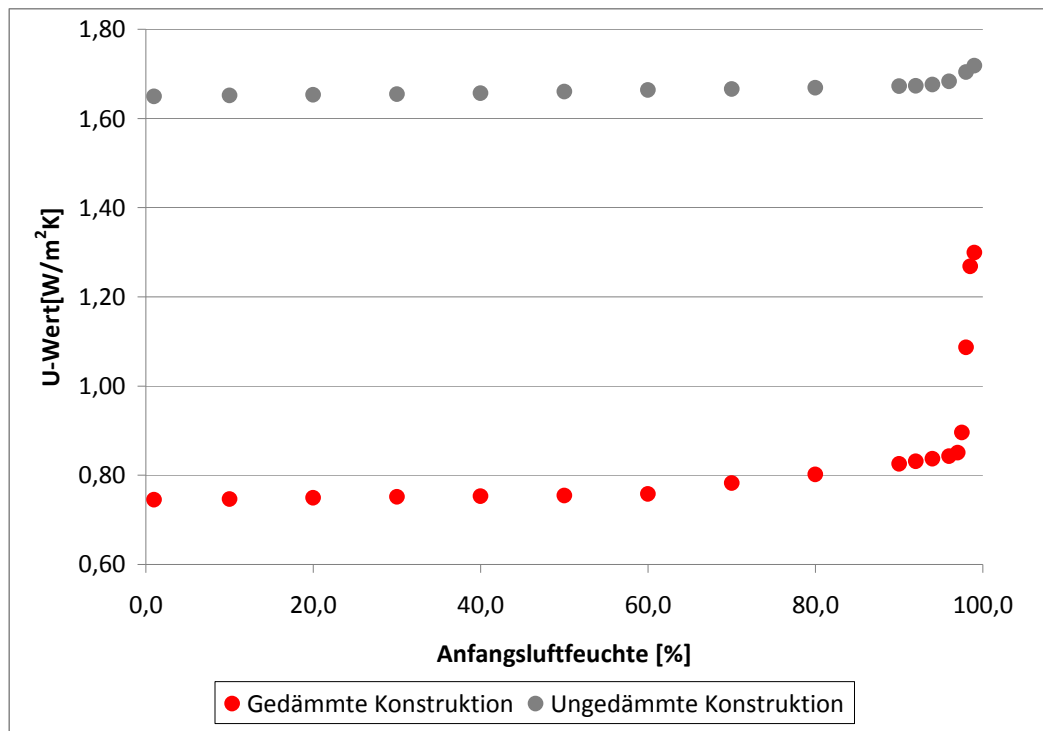


Abbildung 50 *U-Wert einer gedämmten Konstruktion in Abhängigkeit der Bauteilfeuchte (grafisch) – zum Vergleich sind die Ergebnisse für die ungedämmte Konstruktion grau eingeblendet*

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 51 grafisch dargestellt. Es werden prinzipiell gleiche Bestandskonstruktionen unterstellt – die Wandaufbauten unterscheiden sich demnach lediglich im Aufbau der Sanierungslösung.

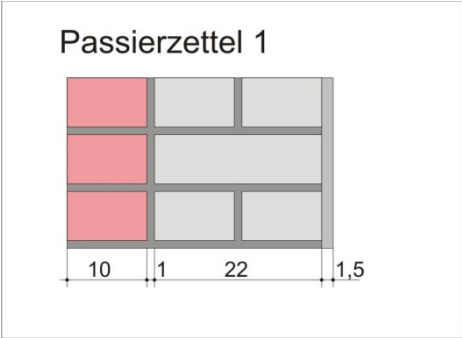
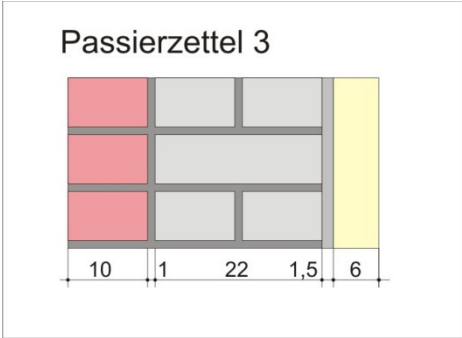
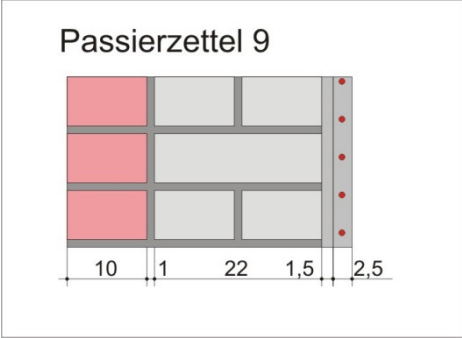
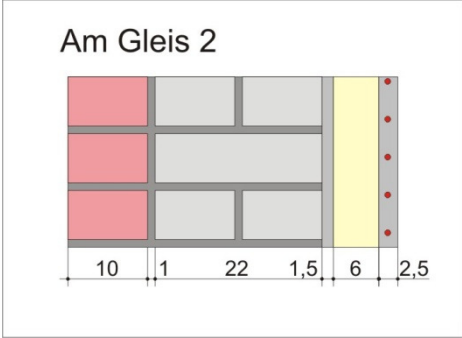
	Ungedämmte Konstruktionen	Gedämmte Konstruktionen
Konvektionsheizung	<p>Passierzettel 1</p>  <p style="font-size: 10px;">10 1 22 1,5</p>	<p>Passierzettel 3</p>  <p style="font-size: 10px;">10 1 22 1,5 6</p>
Wandflächentemp.	<p>Passierzettel 9</p>  <p style="font-size: 10px;">10 1 22 1,5 2,5</p>	<p>Am Gleis 2</p>  <p style="font-size: 10px;">10 1 22 1,5 6 2,5</p>

Abbildung 51 Beschreibung der Konstruktionen als Simulationsmodell für die U-Wert-Berechnung

Die ursprünglich angenommene ca. 2,5 cm starke Fuge zwischen Klinkerschale und Hintermauerwerk wurde nicht berücksichtigt, da der Mauerwerksaufschluss vor Ort keine Schalenfuge erkennen ließ. Für die gedämmten Modellvarianten wurde jeweils eine 6 cm starke Dämmschicht (5 cm Klimaplatte von CALSITHERM zzgl. KP-Kleber und Oberflächenfinish) angesetzt. Bei den Systemen mit Wandflächentemperierung wurde eine zusätzliche Putzschicht mit einer Stärke von 2,5 cm auf der Raumseite modelliert. Die Heizrohre werden bei der U-Wert-Berechnung zunächst im Modell nicht abgebildet.

Abbildung 52 zeigt die Simulationsergebnisse. Die U-Werte der gedämmten Konstruktionen (0,75 – 0,76 W/m²K) unterscheiden sich deutlich von den Werten der ungedämmten Konstruktionen (1,54 – 1,62 W/m²K). Der Einfluss der Putzschicht für die Aufnahme der Wandflächentemperatur wirkt sich hingegen nur unwesentlich auf das thermische Verhalten der Wandkonstruktion aus.

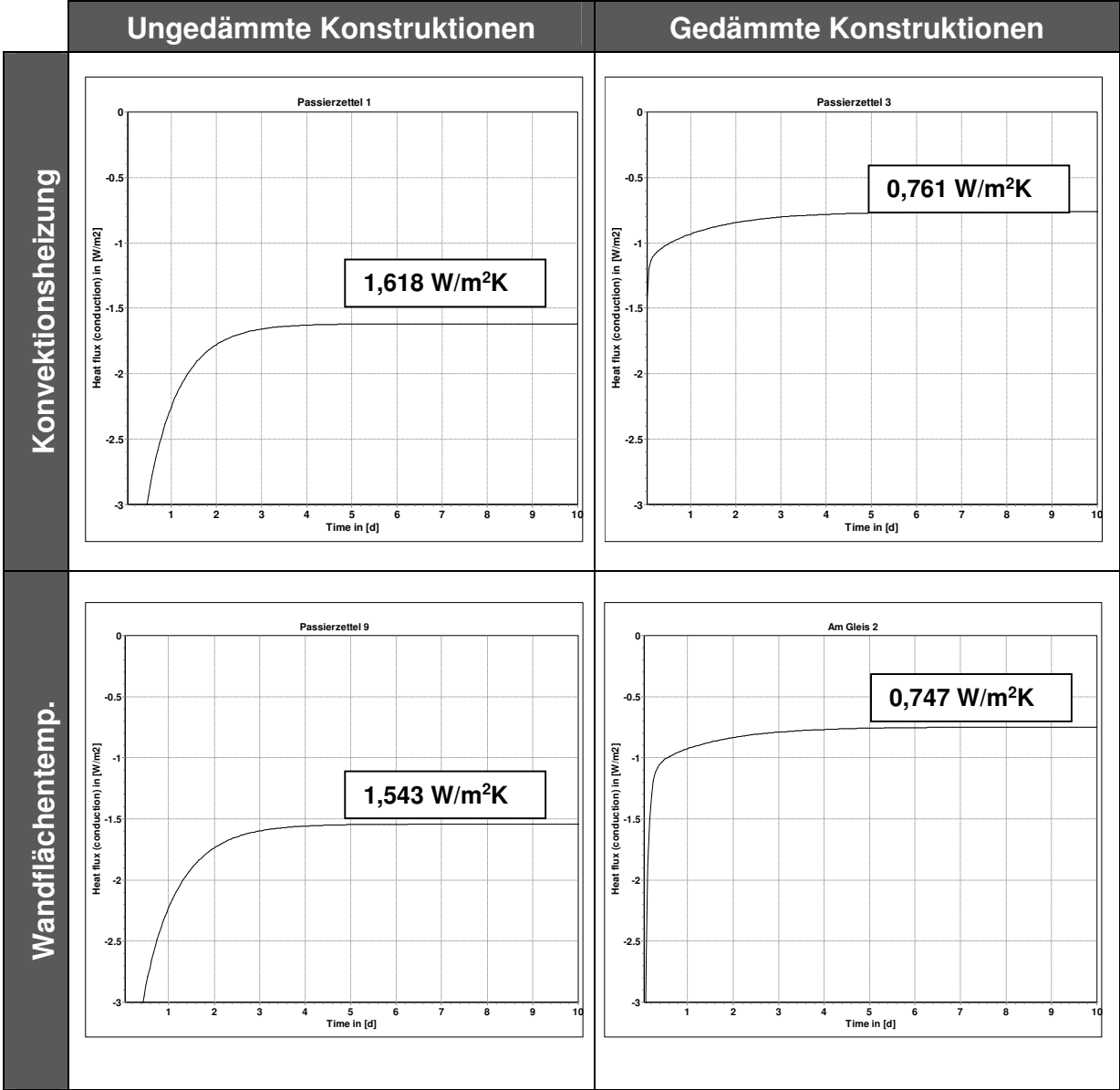


Abbildung 52 Rechnerisch ermittelte U-Werte für die Vergleichsfälle (nach Erreichen des stationären Zustandes)

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 von einem „quasistationären“ Zustand ausgegangen werden.

Insbesondere bei den konvektiv beheizten Systemen wird ein solcher Zustand de facto nie erreicht. In diesen Fällen kann hilfsweise eine Mittelung des U-Wertes über einen sehr langen Zeitraum (Winterfall) als Näherungslösung herangezogen werden. Bei den beiden Sanierungsvarianten, bei denen eine Wandflächentemperierung auch im Bereich der Außenwand zum Einsatz kommt, konnten die o.g. (fast-) stationären Zustände zumindest ansatzweise herausgefiltert werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die ermittelten U-Werte erläutert.

Zur Ermittlung der **U-Werte für die Konstruktionen in den konvektiv beheizten WE** 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 werden die so berechneten U-Werte zu einem Mittelwert zusammengefasst, kann nur eine qualitative Übereinstimmung mit den zuvor rein rechnerisch bestimmten Zielgrößen festgestellt werden (siehe nachfolgende Grafik).

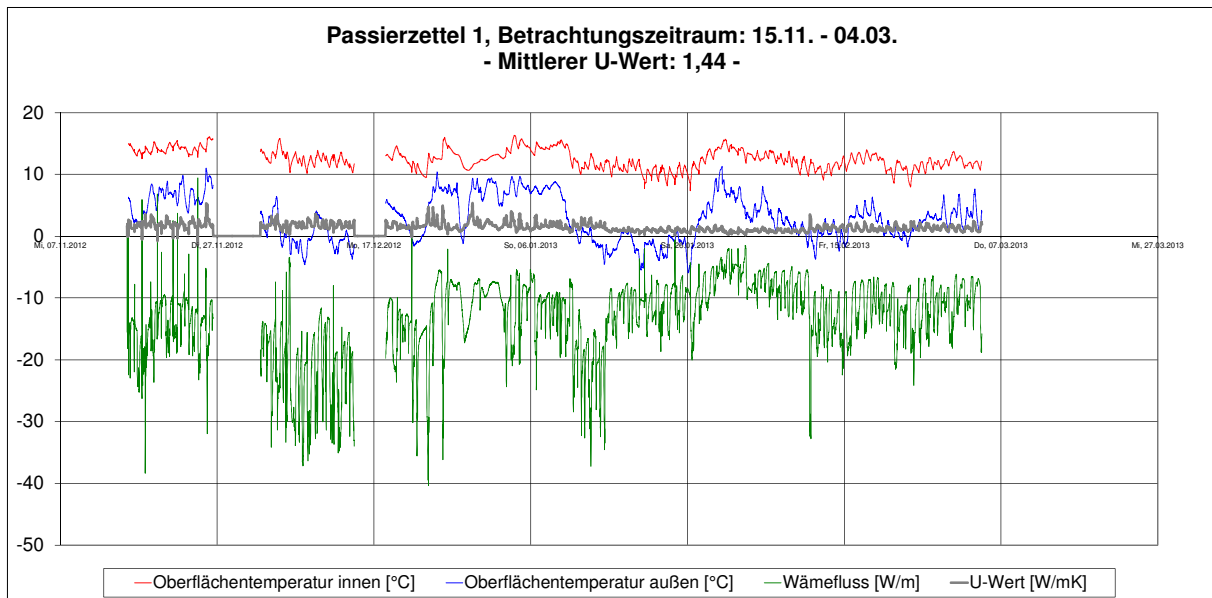


Abbildung 53 *Ganglinie der relevanten Zustandsgrößen zur U-Wert-Berechnung – der mittlere U-Wert (Näherungslösung) liegt bei 1,44 W/m²K – der rechnerische Vergleichswert beträgt 1,52 W/m²K)*

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 die WE mit Wandflächentemperierung** 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 – zu einem nicht unerheblichen Teil – über die Innenwände sowie die Decken und Böden von den jeweils angrenzenden Nachbarwohnungen erfolgt. In diesem Fall müsste der U-Wert der Konstruktion unter Berücksichtigung der zusätzlich eingebrachten Bauteilschichten – also der Wärmedämmung (Am Gleis 2) sowie der Putzschicht zur Aufnahme der Wandflächentemperierung (Passierzettel 9 und Am Gleis 2) jeweils geringfügig besser ausfallen, als in den vergleichbaren Lösungen mit der Konvektionsheizung (siehe hierzu auch Punkt 0).

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 54 zeigt beispielhaft die Zustandskurven für die maßgebenden Messwerte für einen solchen Fall.

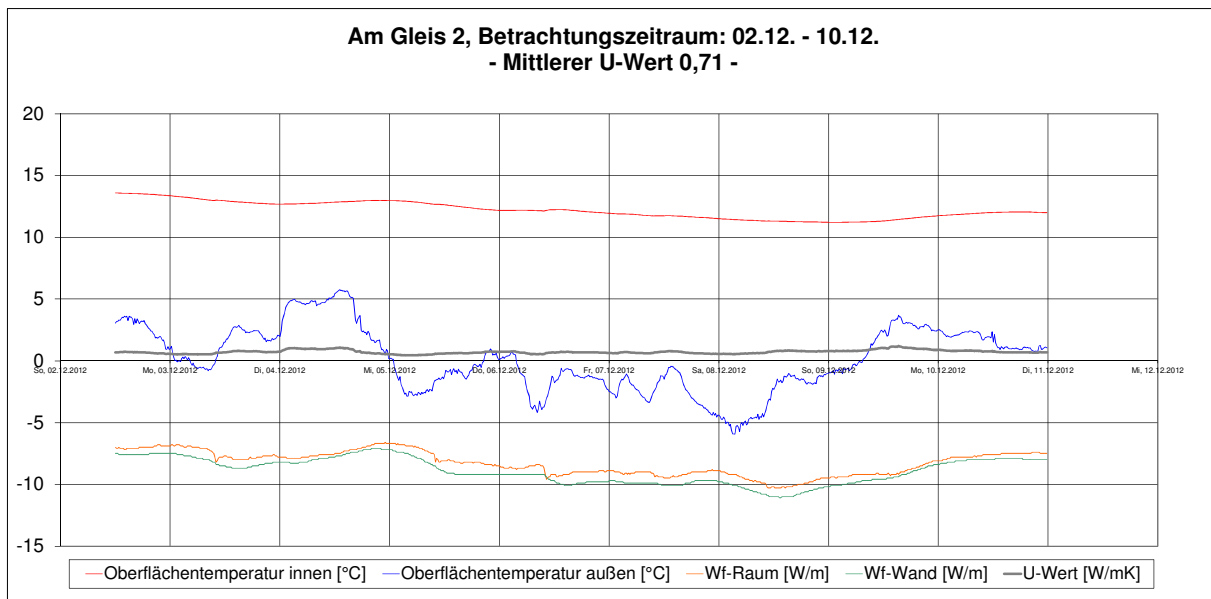


Abbildung 54 Ausschnitt eines „quasistationären“ Falls zur U-Wert-Bestimmung

Es ist erkennbar, dass die Raumlufthtemperaturen nahezu konstant sind, die Außentemperaturen schwanken leicht. Der als Mittelwert bestimmte U-Wert beträgt 0,71 W/m²K 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 55 verdeutlicht diesen Fall anhand einer Datensequenz (erfasst am Passierzettel 9).

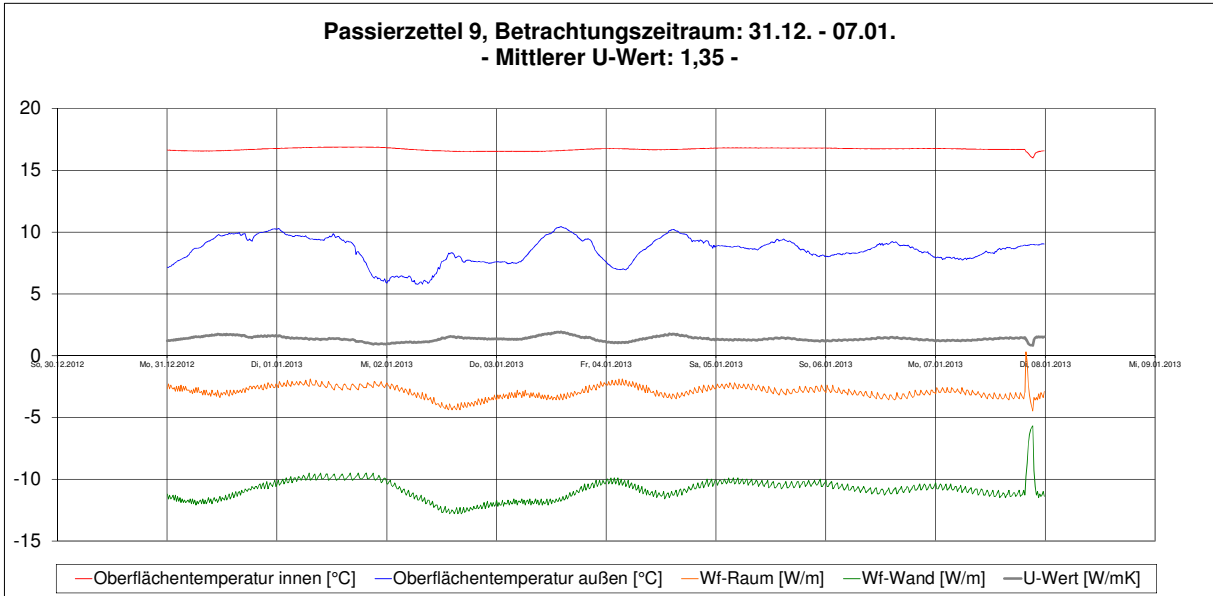


Abbildung 55 Fall 2 – Wärmeströme nach außen gerichtet – mittlerer U-Wert 1,35

Abbildung 56 zeigt für die gleiche Konstruktion (Passierzettel 9) die Situation bei ausgeschalteter Wandheizung. Hier kann ein U-Wert von 1,51 W/m²K festgestellt werden, welcher dem unter Punkt 0 ermittelten Wert entspricht.

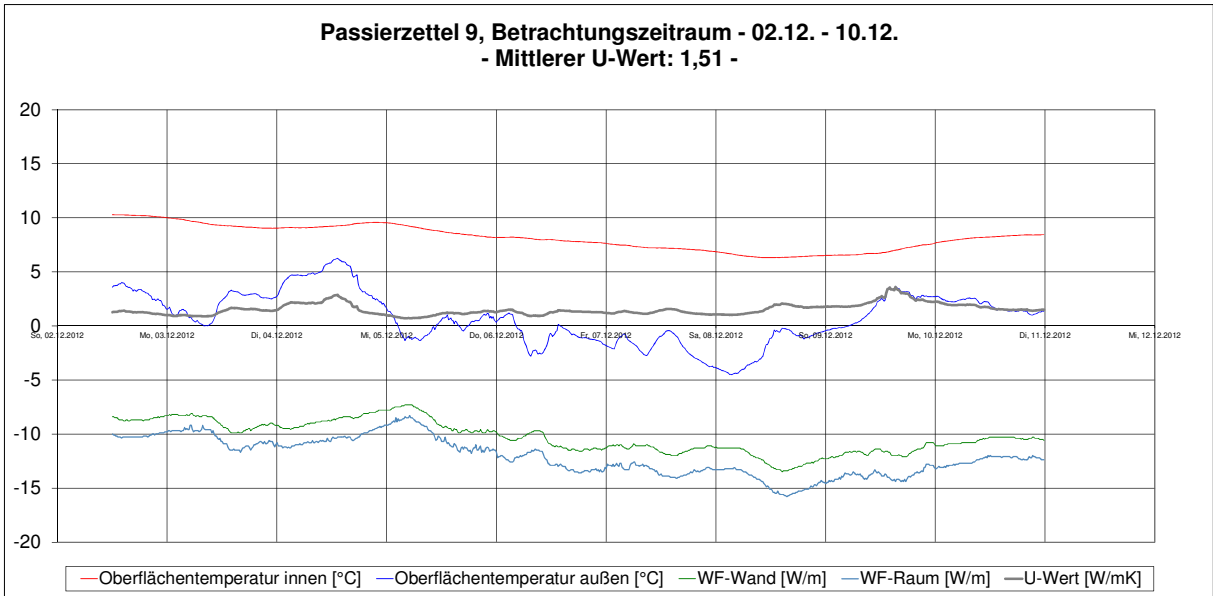


Abbildung 56 Fall 1 – Wärmeströme nach außen gerichtet – mittlerer U-Wert 1,51

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 Veddel mit einer Wandstärke von ca. 36 cm angesetzt (vgl. Abbildung 51).

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

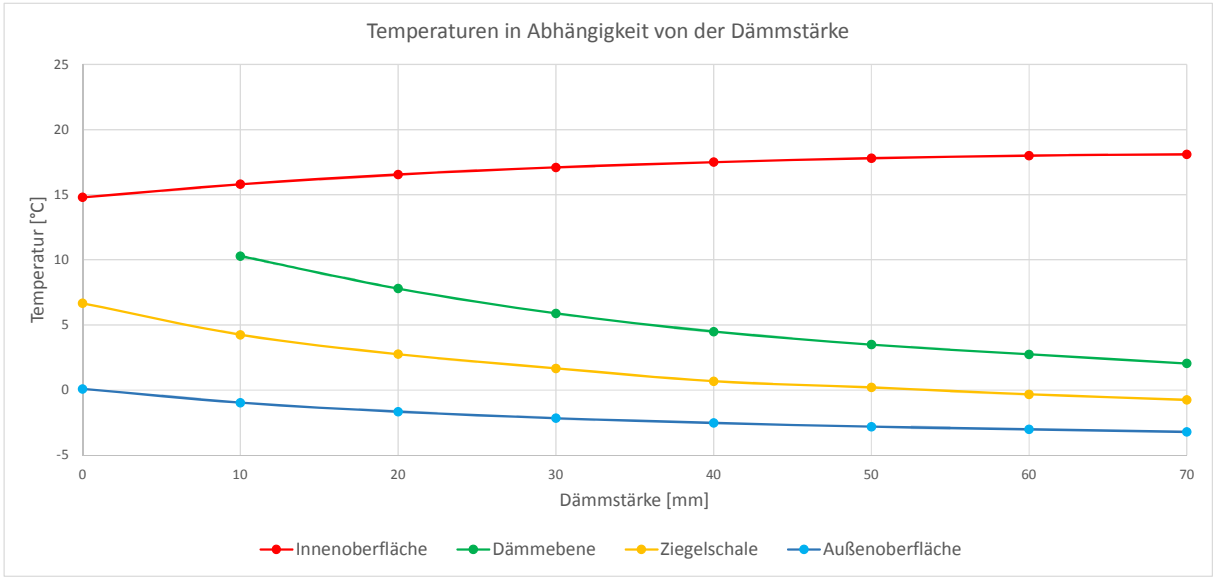


Abbildung 57 Temperaturverhalten der Konstruktion bei Konvektionsheizung in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 36 cm)

Abbildung 58 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.

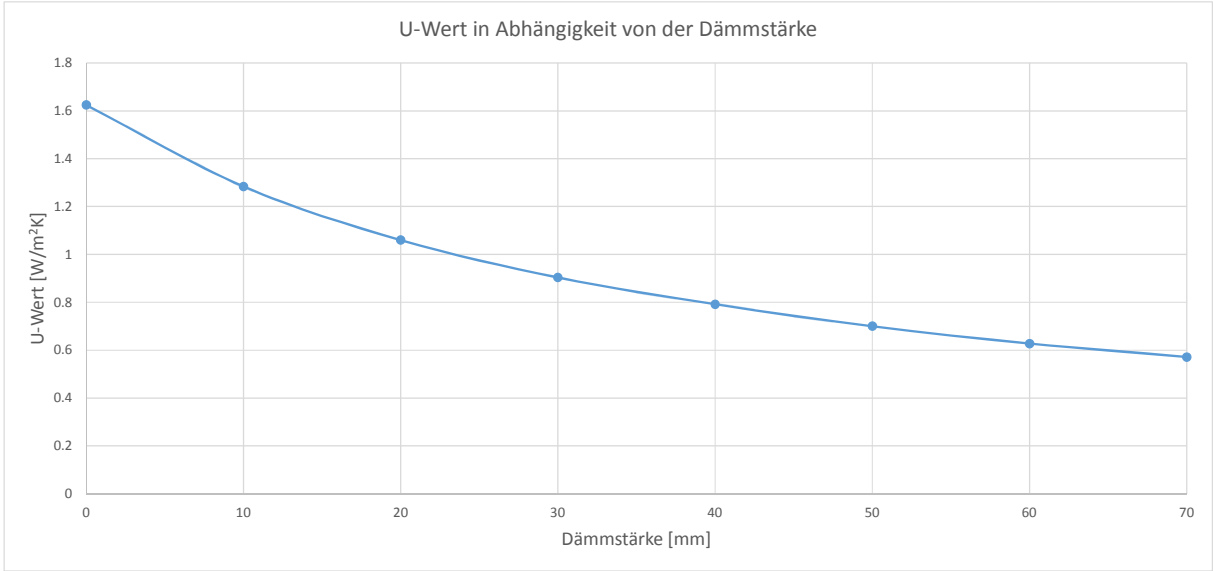


Abbildung 58 U-Wert der Konstruktion in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 36 cm)

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.

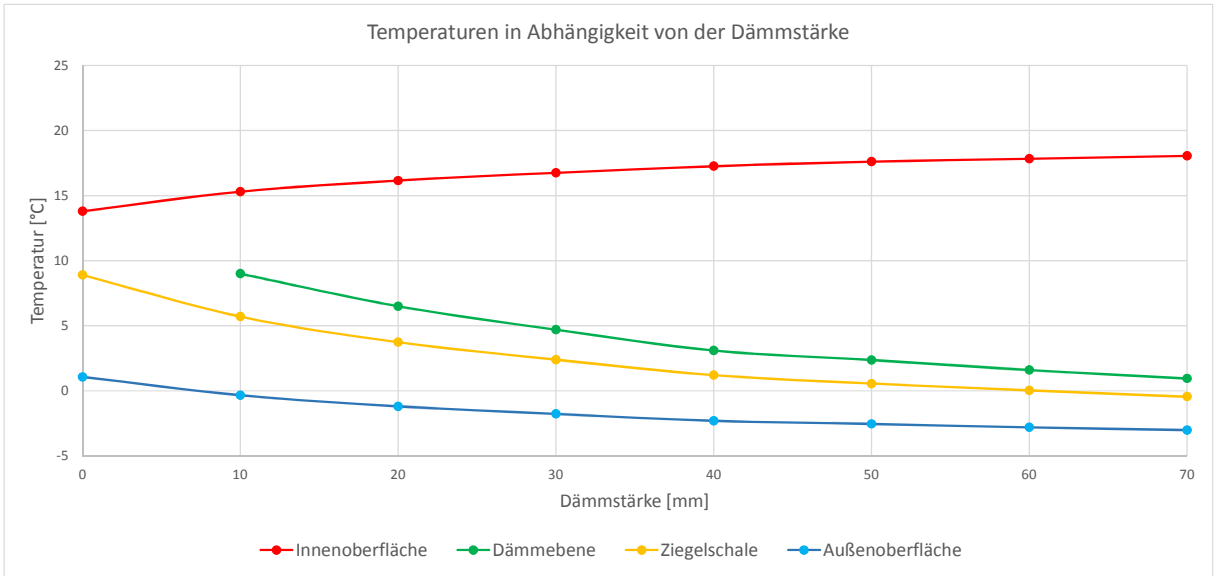


Abbildung 59 Temperaturverhalten der Konstruktion bei Konvektionsheizung in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 24 cm)

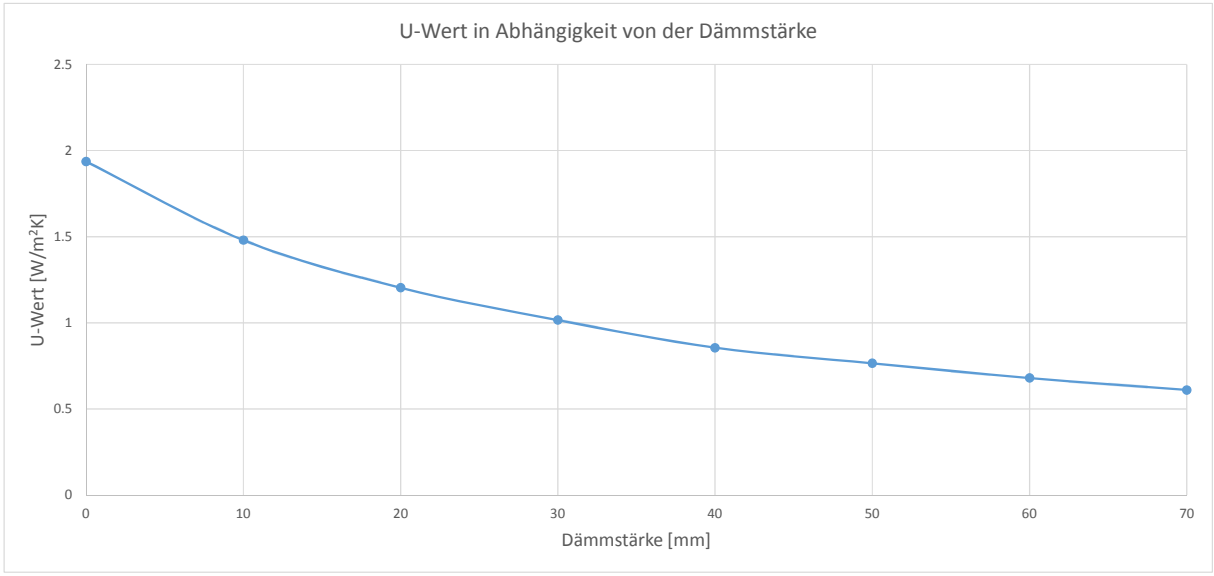


Abbildung 60 U-Wert der Konstruktion in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 24 cm)

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) entgegen gewirkt 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 Kleber Ebene 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 beinhalten analog zu Punkt 6.2.3.1 die berechneten Temperaturen auf der außenseitigen und der raumsei-

tigen Wandoberfläche, in der Bestandskonstruktion (Ziegelschale und in der Kleber-ebene. 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.

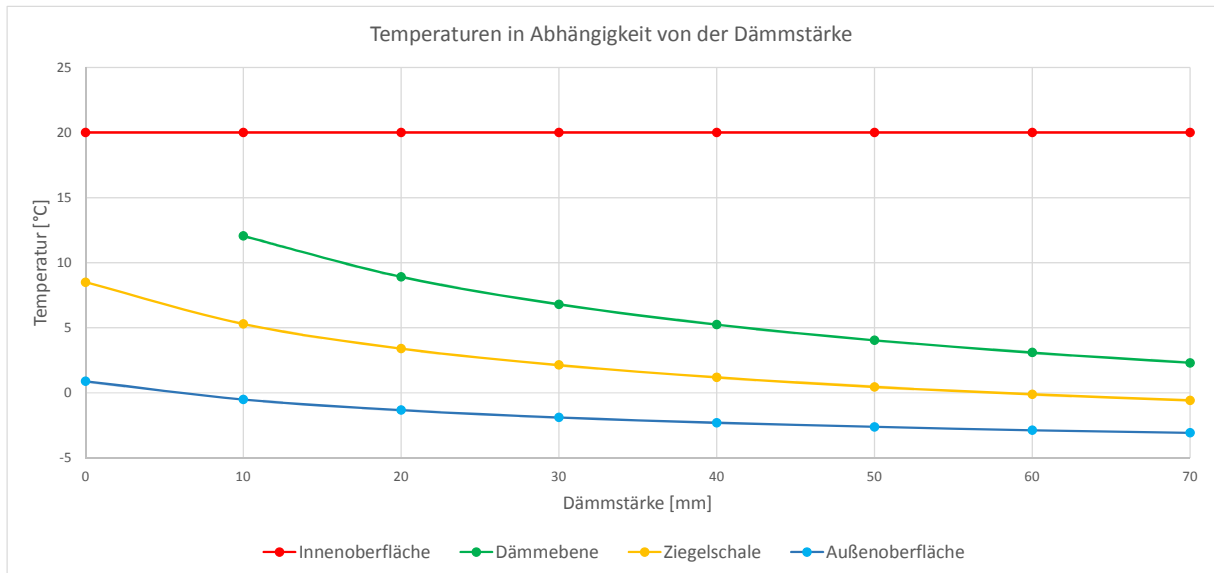


Abbildung 61 Temperaturverhalten der Konstruktion mit WFT (20°C) in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 36 cm)

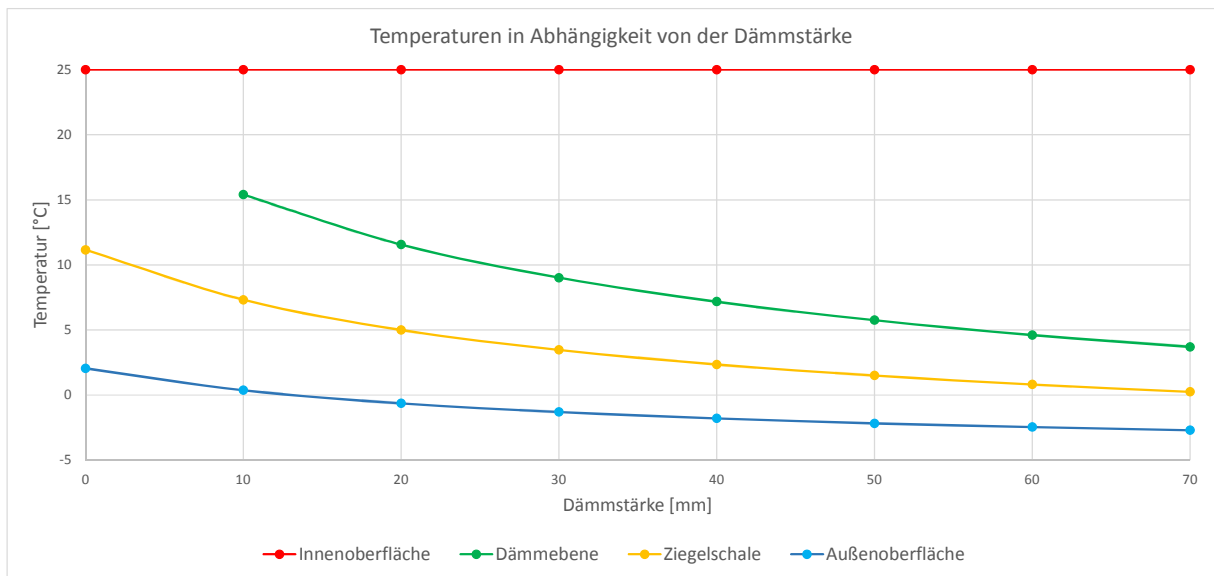


Abbildung 62 Temperaturverhalten der Konstruktion mit WFT (25°C) in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 36 cm)

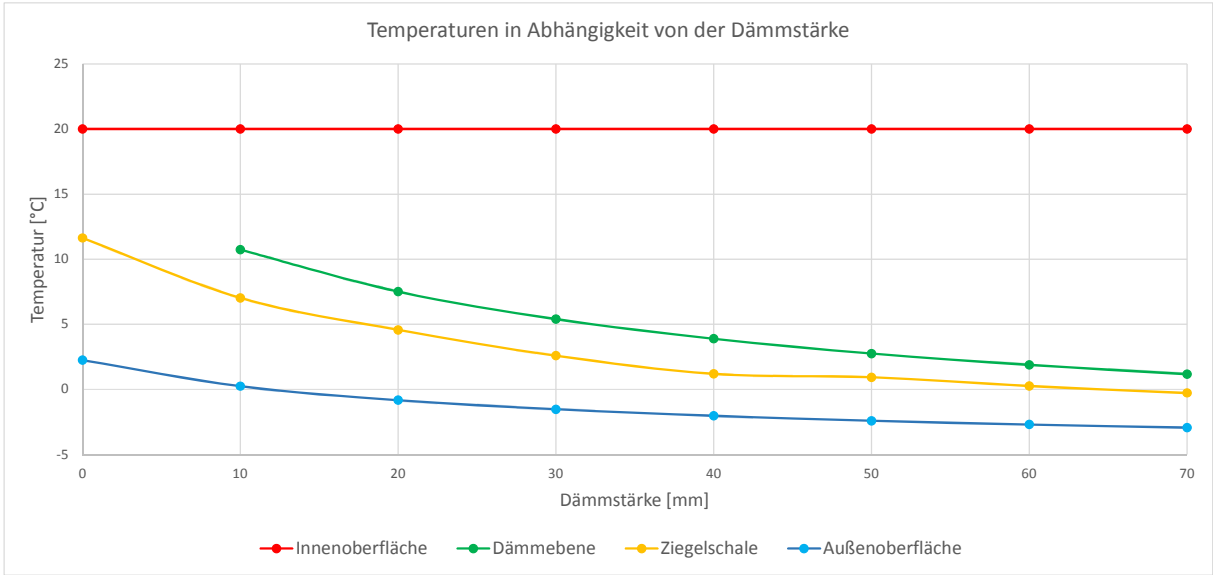


Abbildung 63 Temperaturverhalten der Konstruktion mit WFT (20°C) in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 24 cm)

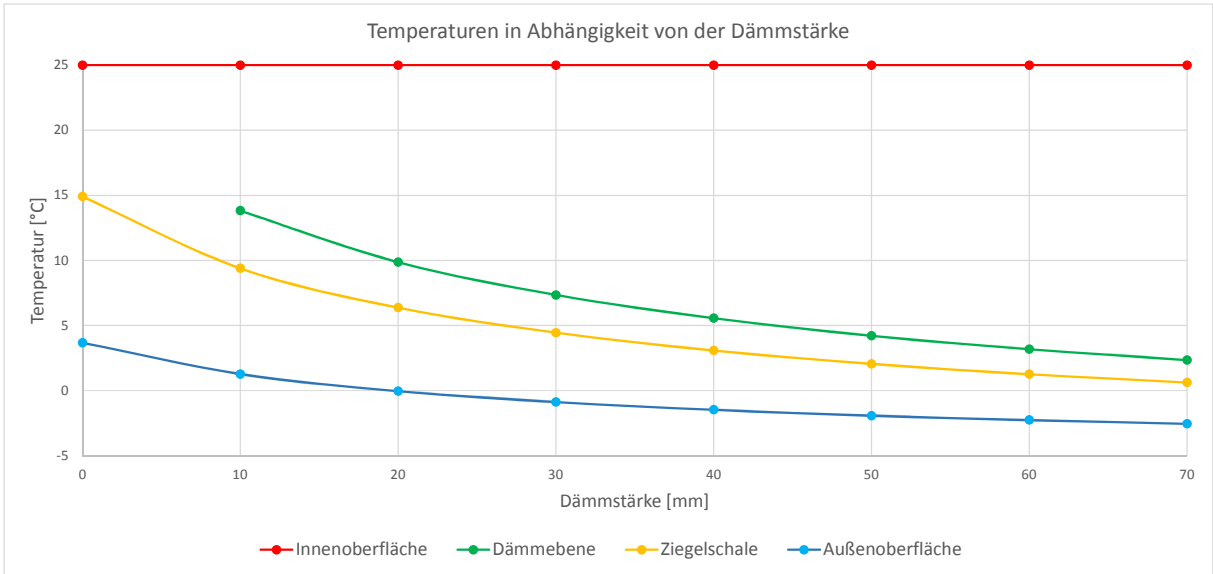


Abbildung 64 Temperaturverhalten der Konstruktion mit WFT (25°C) in Abhängigkeit von der Innendämmstärke (Mauerwerk = 24 cm)

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.

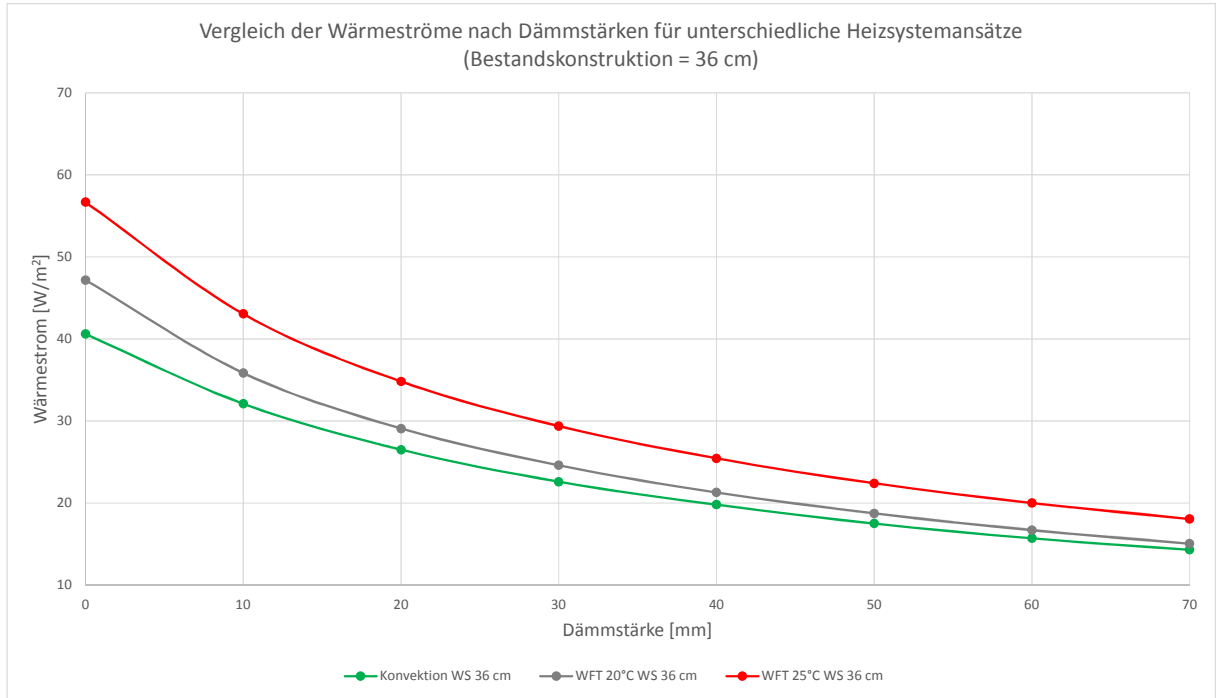


Abbildung 65 Vergleich der Wärmeströme durch eine 36 cm starke Bestandskonstruktion für die verschiedenen Lösungen zur Raumheizung

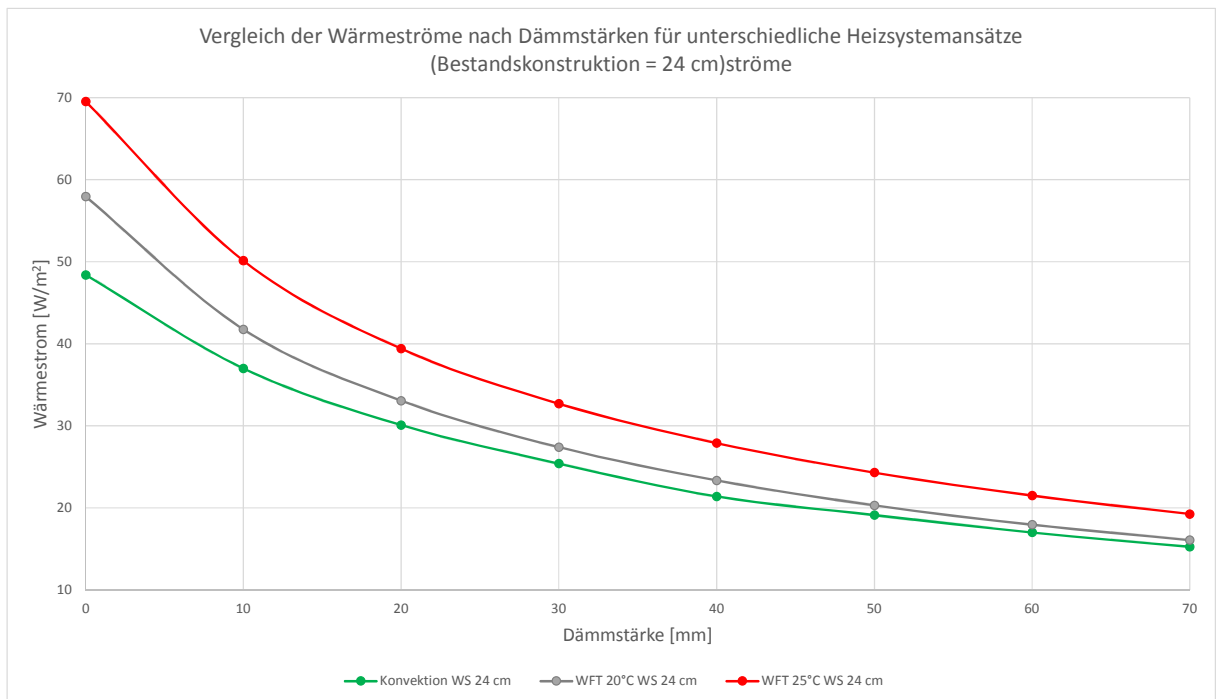


Abbildung 66 Vergleich der Wärmeströme durch eine 24 cm starke Bestandskonstruktion für die verschiedenen Lösungen zur Raumheizung

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 m² 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 m² 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 67). 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.

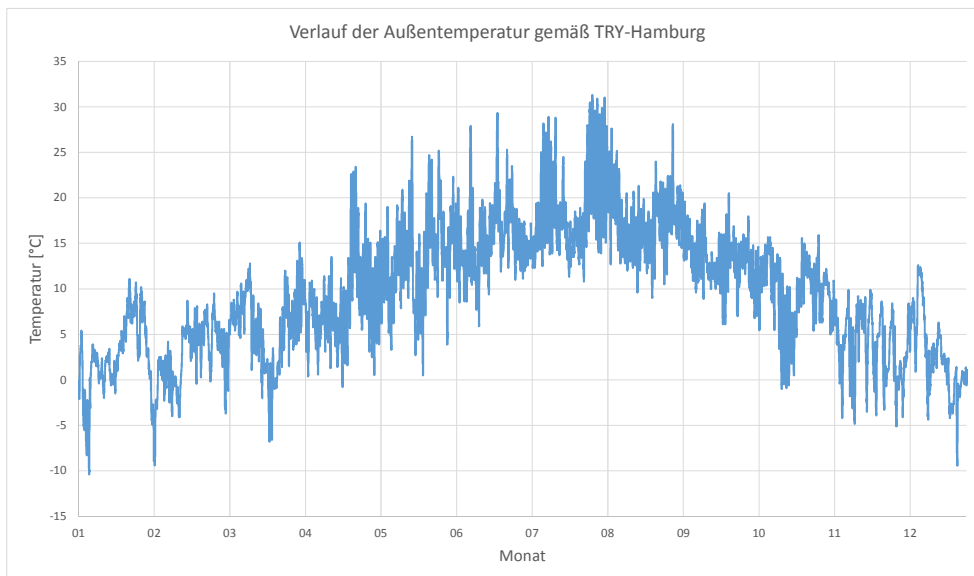


Abbildung 67 Jahresganglinie der Außentemperatur gemäß Testreferenzjahr
(Quelle: DWD)

Um auch für die Raumlufttemperaturen einen instationären Ansatz zu erzeugen, wurden diese gemäß DIN 15026 (vgl. Abbildung 68) auf der Grundlage der jeweils herrschenden Außentemperatur berechnet. Der Verlauf der resultierenden Raumlufttemperatur ist in Abbildung 69 grafisch dargestellt.

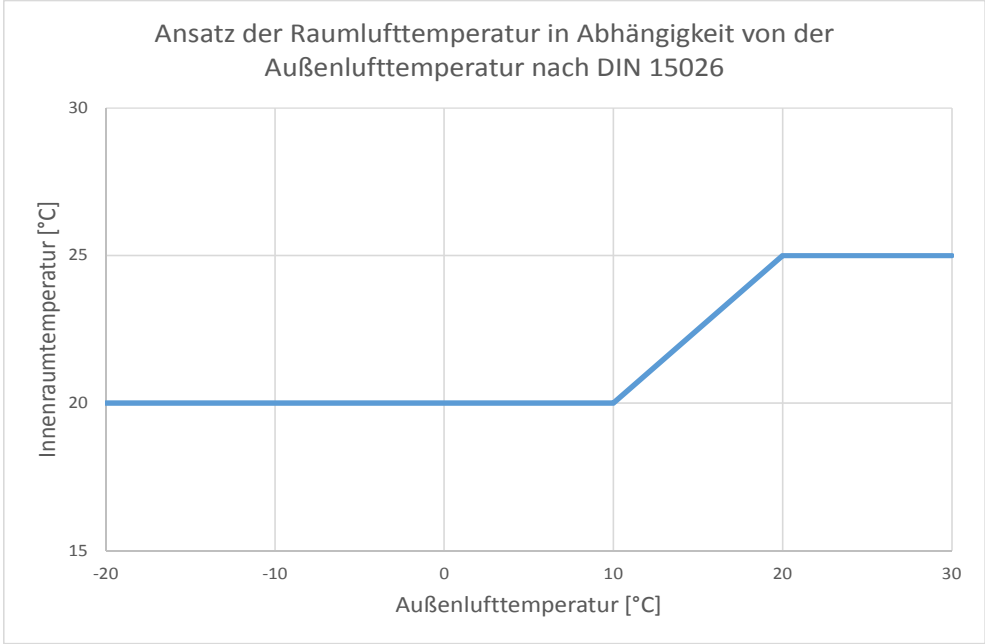


Abbildung 68 *Temperatur der Raumluft in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur gemäß DIN 15026*

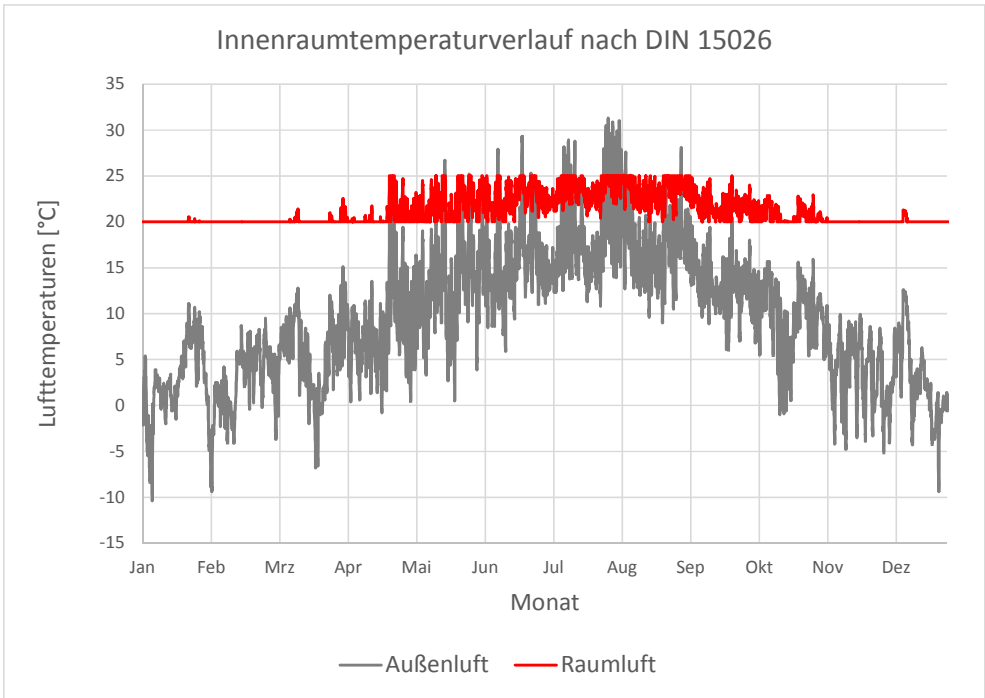


Abbildung 69 *Raumlufttemperaturen nach DIN in Abhängigkeit von den Außenlufttemperaturen gemäß TRY*

Unter Ansatz der Temperaturrandbedingungen nach TRY / DIN (vgl. Abbildung 69) wurde mittels Simulationsrechnungen für die verschiedenen Außenwandkonstruktionen zunächst die Wandoberflächentemperaturen auf der raumseitigen Wandoberfläche berechnet. Das Ergebnis dieser Simulationsrechnungen ist in Abbildung 70 dargestellt.

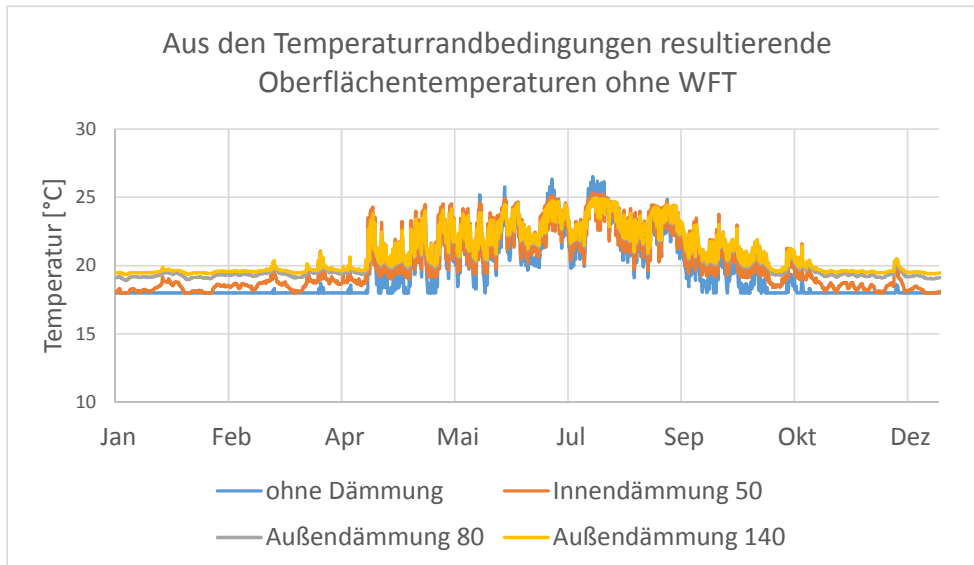


Abbildung 70 *Wandoberflächentemperaturen der Konstruktionsvarianten ohne Einfluss der WFT*

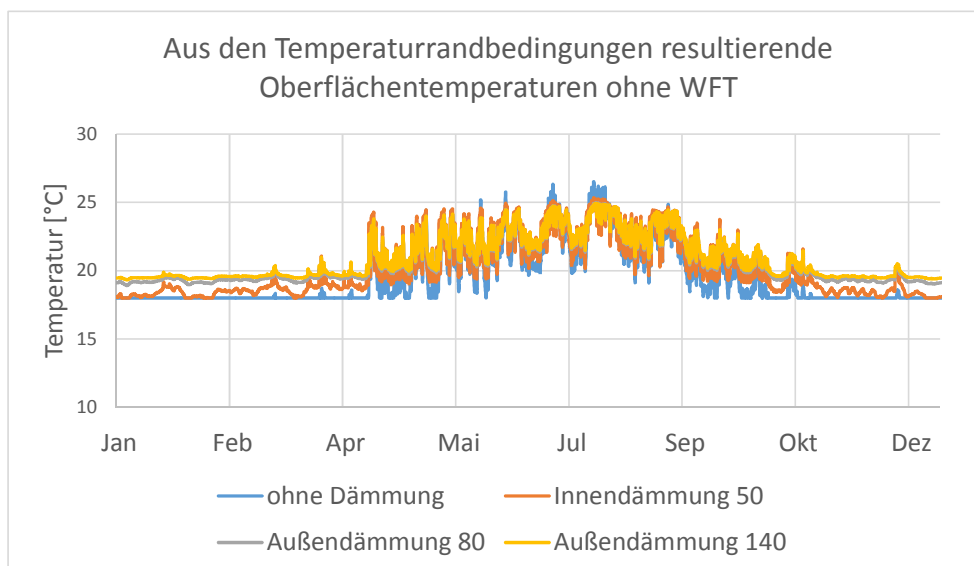


Abbildung 71 *Wandoberflächentemperaturen bei den Systemen mit Wandflächentemperierung – die Temperaturvorgabe von 18°C wird in keinem Fall unterschritten*

Der Verlauf der raumseitigen Oberflächentemperaturen (Abbildung 70) 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 71.

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 72 ersichtlich und dient in den nachfolgenden Berechnungen als Vorgabe für die raumseitige Wandoberflächentemperatur.

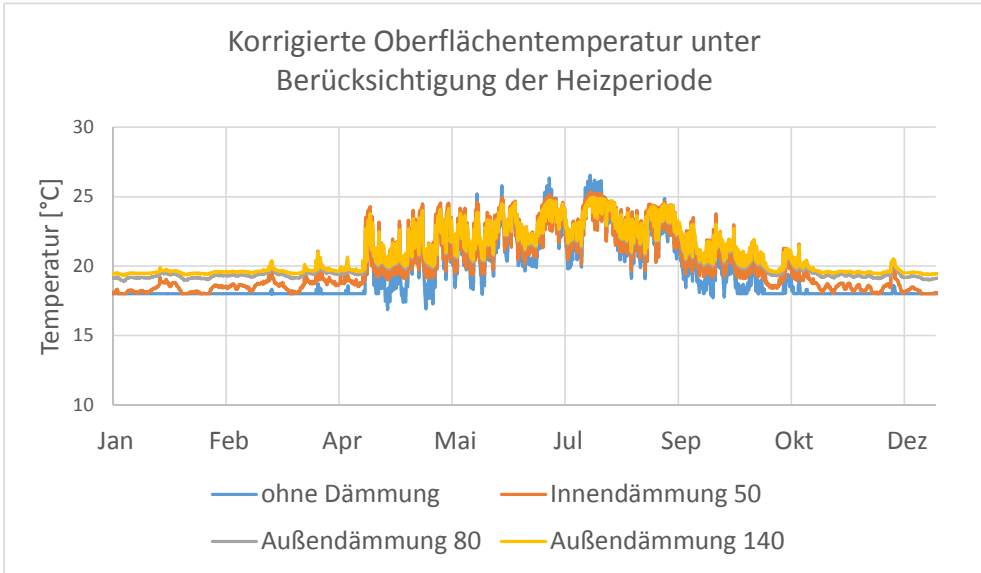


Abbildung 72 *Raumseitige Wandoberflächentemperaturen (hier $T_{Vorgabe} = 18^{\circ}C$) als Grundlage für die vergleichende Betrachtung der Transmissionswärmeverluste*

Unter Ansatz der instationären Wandoberflächentemperaturen (Abbildung 72) 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 70.

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.

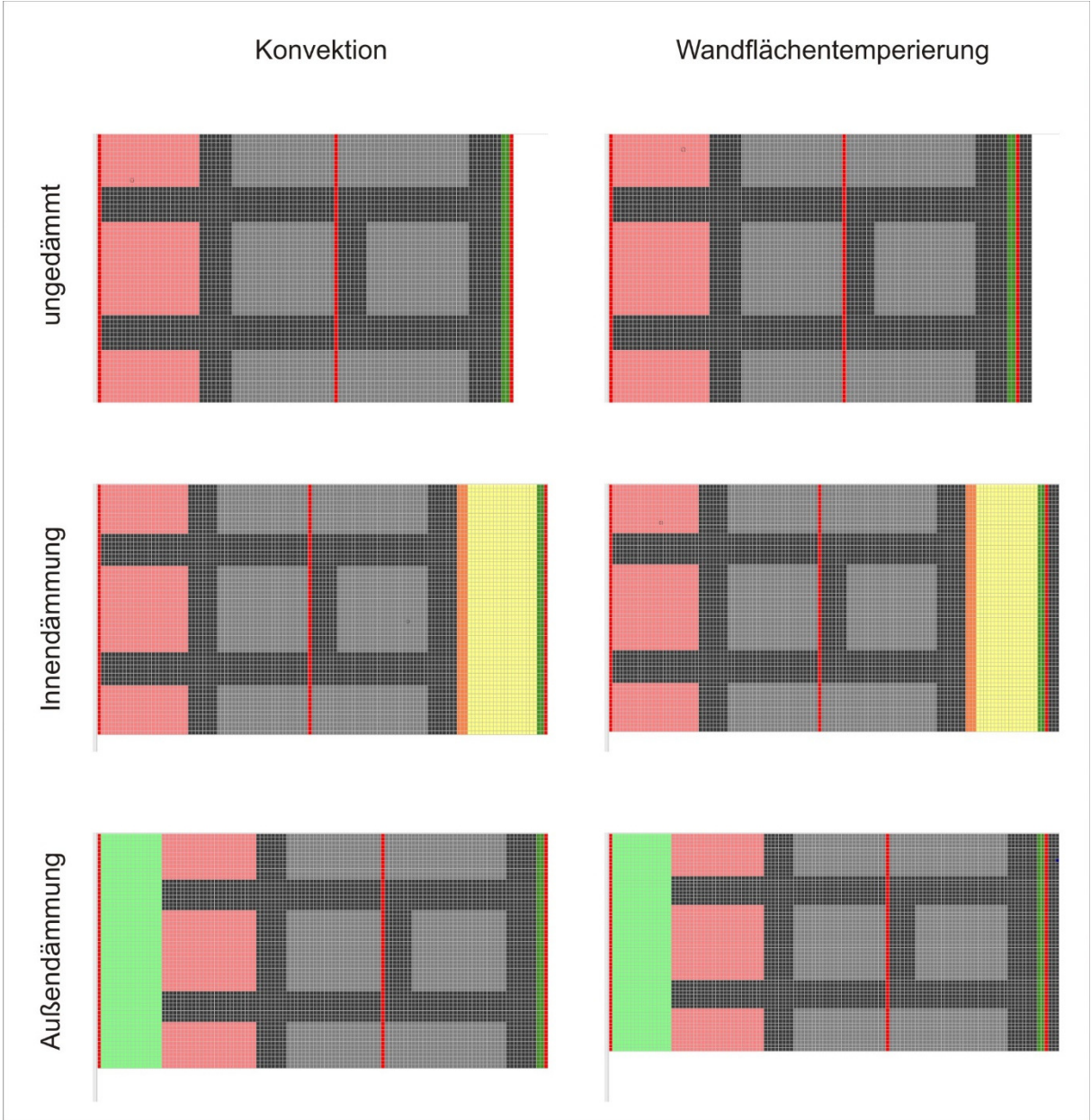


Abbildung 73 *Modellaufbauten und Ebenen zur Darstellung der Wärmeströme für die vergleichende energetische Betrachtung*

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 m² 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 74 *Transmissionwärmeverluste in kWh pro m² Außenwandfläche über den Zeitraum einer Heizperiode - der untere Bereich der Tabelle zeigt die Veränderung der verschiedenen Berechnungsansätze gegenüber dem (Referenz-) Fall „Konvektionsheizung ungedämmt“.*

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/m²Wohnfläche].

$$\begin{matrix} \text{Transmissionwärmeverlust} \\ \text{pro m}^2 \text{ Wohnfläche} \end{matrix} = \begin{matrix} \text{Transmissionwärmeverlust} \\ \text{pro m}^2 \text{ Außenwandfläche} \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{Außenwandfläche} / \\ \text{Wohnfläche} \end{matrix}$$

Die nachfolgende Abbildung 75 zeigt die entsprechenden Ergebnisse der wohnflächenbezogenen Betrachtung.

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 75 *Transmissionwärmeverluste in kWh pro m² Wohnfläche über den Zeitraum einer Heizperiode - der untere Bereich der Tabelle zeigt die Veränderung der verschiedenen Berechnungsansätze gegenüber dem (Referenz-) Fall „Konvektionsheizung ungedämmt“.*

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 ($T_{\text{OF,Wand}} = 20^\circ\text{C}$) 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 76 Sind die Werte absolut pro Apartment dargestellt, Abbildung 77 enthält die Verlustwerte bezogen auf einen Quadratmeter Wohnfläche.

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
Jahr	2010.4	1376.0	634.5
Heizperiode	1726.6	1358.1	368.5

Abbildung 76 Lüftungswärmeverluste in kWh / Heizperiode und Apartment
(Raumvolumen ca. 130 m³) für unterschiedliche Heizsysteme

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
Jahr	40.2	27.5	12.7
Heizperiode	34.5	27.2	7.4

Abbildung 77 Lüftungswärmeverluste in kWh/m² (bezogen auf einen Quadratmeter
Wohnfläche) - Umrechnungsfaktor: 1/50 m²

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.

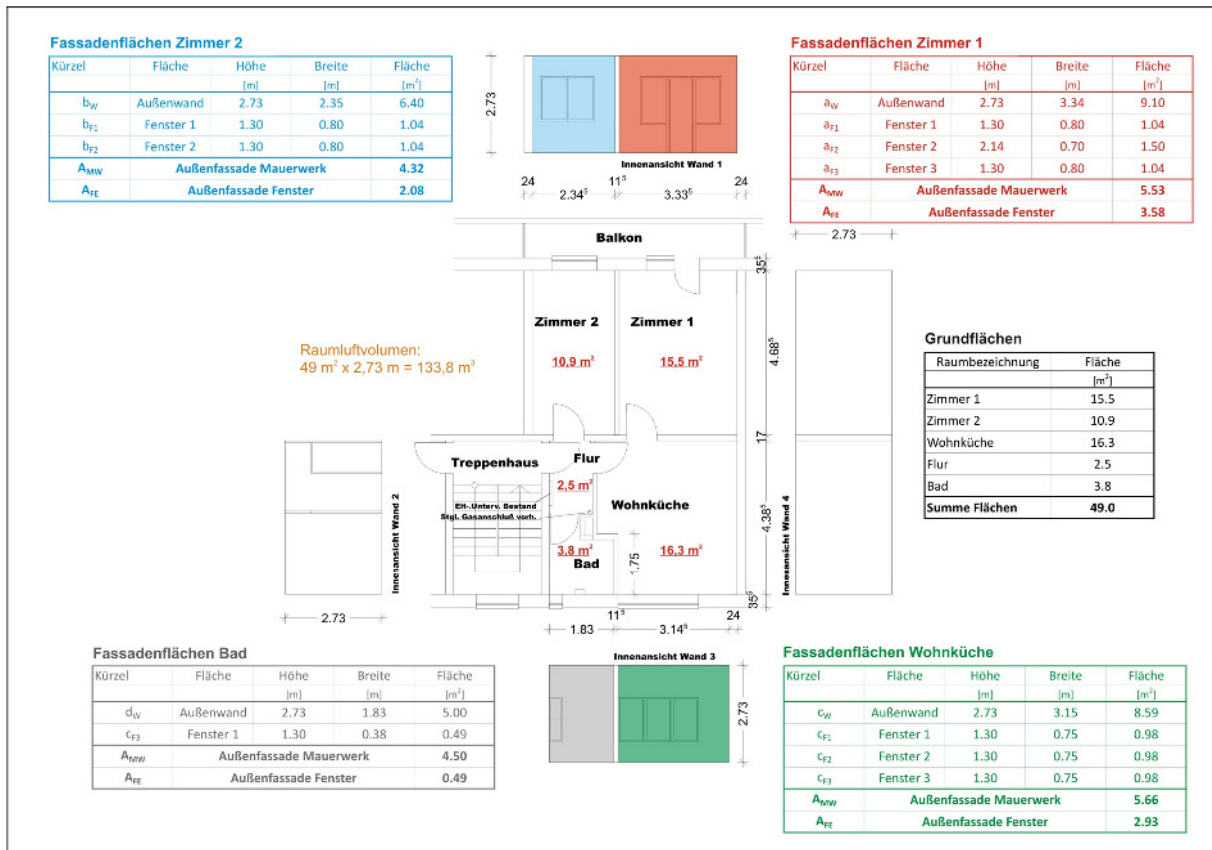


Abbildung 78 Flächenermittlung für die vergleichende Betrachtung verschiedener Systemansätze

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_{Fenster} so angesetzt, dass sich ein Transmissionswärmeverlust über die Fenster von ca. 100 kWh/m² 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.

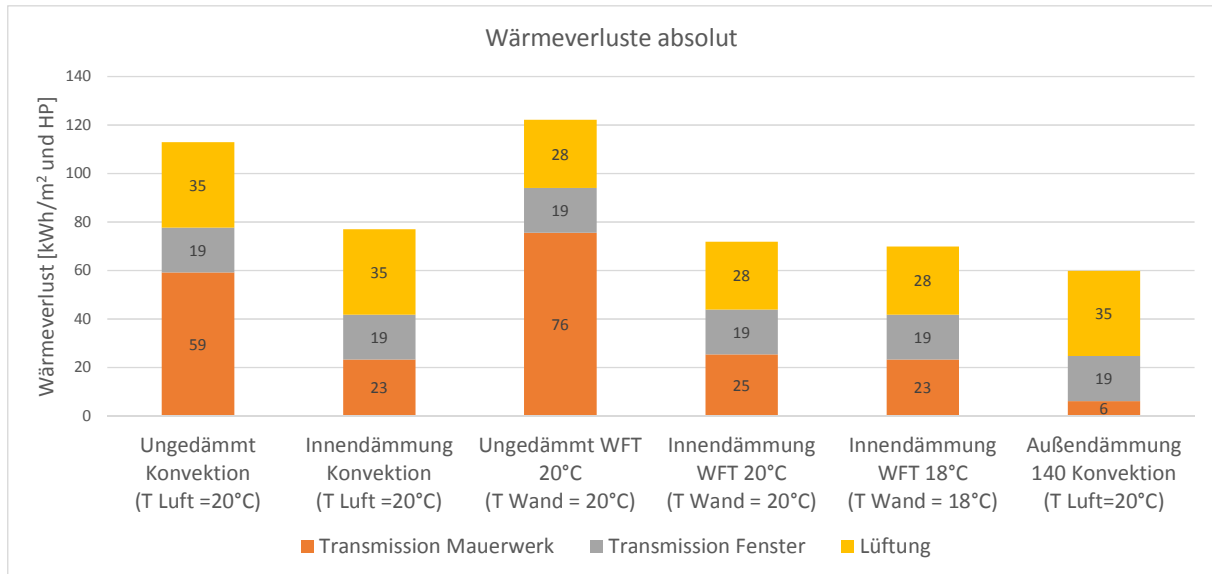


Abbildung 79 Absolute Wärmeverluste der betrachteten Varianten Summe aus Transmission und Lüftung

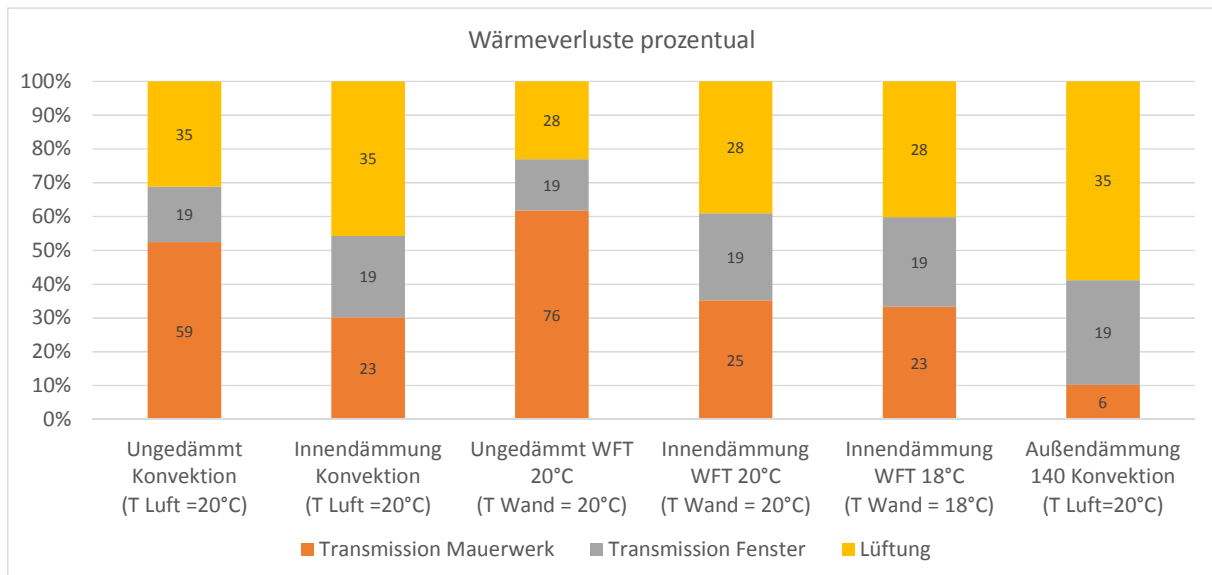


Abbildung 80 Prozentualer Anteil der Verlustarten am jeweils vorhandenen Gesamtverlust – die eingetragenen Zahlen entsprechen den Absolutwerten

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

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 Feuchte-transportvorgänge 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

Bei der Überarbeitung konvektiv beheizter Systeme mittels Innendämmung besteht bei mangelhafter Planung stets die Gefahr, dass die Bestandskonstruktion (hinter der Dämmung) zu stark abkühlt (vor allem bei leichten Bestandskonstruktionen oder bei sehr starken Dämmstoffstärken). Somit können Feuchteakkumulationen im Mauerwerk und ggf. Frostschäden verursacht werden. Vor allem konstruktive und geometrische Wärmebrücken (einbindende Innenwände und Decken, Fensterlaibungen, Stürze und Brüstungen) sind sorgfältig zu beurteilen und zu planen, um Schäden an der Konstruktion zu vermeiden.

7.1.1.2 Oberflächentemperaturen / Transmissionswärmeverluste

Die Oberflächentemperaturen auf der Innenseite der Außenwand liegen nach dem Einbringen einer Innendämmung naturgemäß höher als bei unsanierten (im Bestand befindlichen) Konstruktionen. Bei sachgerechter Planung wird der Mindestwärmeschutz ebenso wie die Vorgaben der EnEV zur energetischen Qualität der Bauteile gewährleistet. Im Vergleich zu den Systemen mit einer Wandflächentemperierung liegen die Oberflächentemperaturen jedoch im Regelfall deutlich niedriger, so dass der Energieverlust durch den Außenwandquerschnitt (Transmission) geringer ausfällt.

7.1.1.3 Raumlufftemperaturen und Lüftungswärmeverluste

Die Raumlufftemperaturen liegen bei konvektiv beheizten Räumen in der Regel über denen in Räumen mit Flächenheizungen / Wandflächentemperierungen. Somit fallen die Energieverluste, die durch freie Lüftung (Fensterlüftung) eintreten, höher aus. Erfolgt die Ausstattung der Räume mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, lässt sich der Lüftungswärmeverlust weitgehend minimieren. Der dazu erforderliche technische Aufwand sowie die notwendigen Investition und die laufenden Kosten für Wartung und Instandhaltung dürfen allerdings bei der Planung nicht vernachlässigt werden.

7.1.1.4 Sommerlicher Wärmeschutz

Ein häufig genannter – und zutreffender – Kritikpunkt bei reinen Innendämmlösungen ist die damit einhergehende Verschlechterung des sommerlichen Wärmeschutzes. Die im Bestand vorhandene Bauwerksmasse (meist Ziegelmauerwerk) mit ihrer entsprechend hohen spezifischen Wärmekapazität wird von der Raumluff abgekoppelt und steht als passives Kühlelement im Sommerfall nicht mehr zur Verfügung. Besonders betroffen davon sind Gebäude, die im Inneren nur über leichte Konstruktionen verfügen – die Außenwände sind dann meist die einzigen passiven Kühlelemente.

7.1.2 Systeme mit Wandflächentemperierung

7.1.2.1 Systemrisiken

Beim Einsatz von Wandflächentemperierungen als Heizungssystem muss – ebenso wie bei den konvektiv beheizten Systemen – die wärmeübertragende Hüllfläche so ausgebildet sein, dass der Mindestwärmeschutz unter allen Umständen gewährleistet ist. Dies kann sichergestellt werden, indem das Heizsystem so ausgelegt wird, dass der Wand immer (unabhängig vom Nutzereinfluss) so viel Energie zugeführt wird, dass die raumseitige Oberfläche nicht zu stark abkühlt. Fällt das Heizsystem vollständig aus, so fallen die Oberflächentemperaturen in kurzer Zeit unter den vorgeschriebenen Mindestwert, sofern die Konstruktion nicht einen gewissen U-Wert aufweist.

7.1.2.2 Oberflächentemperaturen / Transmissionswärmeverluste

Die Oberflächentemperaturen von Außenwänden mit Wandflächentemperierungen liegen im Regelfall (Heizsystem eingeschaltet) über denen konvektiv beheizter Räume. Eine Gefährdung der Wände durch Kondensat bzw. Schimmelwachstum kann so weitgehend ausgeschlossen werden.

Wegen der größeren Temperaturdifferenz zwischen der inneren und der äußeren Wandoberfläche liegen die Transmissionswärmeverluste bei gleichem U-Wert (gleiche

Dämmstoffstärke und gleiche Bestandskonstruktion) höher als bei konvektiv beheizten Systemen.

Für die Gestaltung konstruktiver Details gelten ähnliche Aussagen wie für konvektiv beheizte Systeme. Auch hier muss der Mindestwärmeschutz gewährleistet werden (i.d.R. Dämmung – in Ausnahmefällen auch durch Bauteiltemperierung).

7.1.2.3 Raumluffttemperaturen und Lüftungswärmeverluste

Da die Raumluffttemperaturen bei Räumen, die mittels einer Wandflächentemperierung beheizt werden i.d.R. niedriger liegen als bei konvektiv beheizten Lösungen, fallen die Lüftungswärmeverluste bei gleichem Lüftungsverhalten geringer aus. Für die energetische Bewertung der Lüftungswärmeverluste wird auf den Abschnitt 7.1.1.3 verwiesen.

Hinzu kommt die Tatsache, dass wegen der eher ausgeglichenen Strahlungsbilanz der dem Raum zugewandten Wandoberflächen (geringe Strahlungsasymmetrie) sowie der geringeren Temperaturdifferenzen zwischen Außenwandoberfläche und Raumlufft eine höhere Behaglichkeit im Raum erzielt werden kann.

7.1.2.4 Sommerlicher Wärmeschutz

Bei der Umsetzung von Wandflächentemperierungen wird der sommerliche Wärmeschutz meist nur unwesentlich verändert – bei einem direkten Aufbringen der Wärmeverteilschicht auf das Bestandsmauerwerk fast überhaupt nicht. In speziellen Fällen kann der Fluidkreislauf im Sommer auch als Kühlung eingesetzt werden. Die dafür notwendigen technischen Voraussetzungen – Kälteerzeuger, Betriebsstrom etc. – müssen bei der Planung / Finanzierung berücksichtigt werden.

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:

- Geringere Raumlufftemperatur – resultierend: geringere Lüftungswärmeverluste,
- Höhere Oberflächentemperatur auf der Innenseite der Außenwände, geringe Strahlungsasymmetrie, geringe Differenzen zur Raumlufftemperatur – resultierend: bessere Behaglichkeitsbedingungen

Angepasste Innendämmung:

- Reduzierung der Transmissionswärmeverluste gegenüber der reinen Wandflächentemperierung, durch Verbesserung des U-Wertes zwischen der Bestandskonstruktion und der Wärmeverteilschicht in einem moderaten Rahmen
- Absicherung des Gesamtsystems zur Gewährleistung des Mindestwärmeschutzes bei Ausfall des Heizsystems über einen kurzen Zeitraum
- Gleichzeitig: Verhinderung der zu starken Abkühlung der Bestandskonstruktion infolge zu starker Innendämmung

Der nachfolgend vorgestellte Ansatz zur Entwicklung von Lösungsansätzen, welche die Vorteile verschiedener Elemente ausnutzen, basiert vor allem auf der Überlegung, die zweifellos notwendige Wärmedämmung auf ein moderates Maß zu reduzieren und dennoch den Schutz der Konstruktion in kritischen Witterungssituationen durch technische Maßnahmen abzusichern. Ausgangspunkt der Überlegungen soll daher ein Vergleich der Bemessungskriterien (DIN vs. Testreferenzjahr sowie stationäre vs. instationäre Betrachtung) sein.

Der Nachweis zur Gewährleistung des Mindestwärmeschutzes wird in Deutschland gemäß DIN 4108 mit stationären Klimarandbedingungen geführt. Nachfolgende Abbildung zeigt die anzusetzenden Temperaturen und relativen Luftfeuchten.

	innen	außen
Temperatur θ [°C]	20	-5
Relative Luftfeuchte ϕ [%]	50	80

Abbildung 81 Stationäre Klimarandbedingungen für den Nachweis des Mindestwärmeschutzes gemäß DIN 4108

Für die instationäre Betrachtung (numerische Simulation) werden Klimarandbedingungen vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt. Das sogenannte Testreferenzjahr (TRY) repräsentiert einen gebietstypischen Klimaverlauf für die jeweils in Deutschland anzunehmende Region. Die nachfolgende Grafik zeigt die beiden Ansätze für die Außentemperatur für den Verlauf über der Heizperiode vom ersten Oktober bis zum 30. April des Folgejahres. Deutlich erkennbar ist, dass für den hier betrachteten Fall Hamburg nur in sehr seltenen Fällen mit kurzer Dauer kritische Außentemperaturen, die dem DIN-Ansatz nahe kommen auftreten.

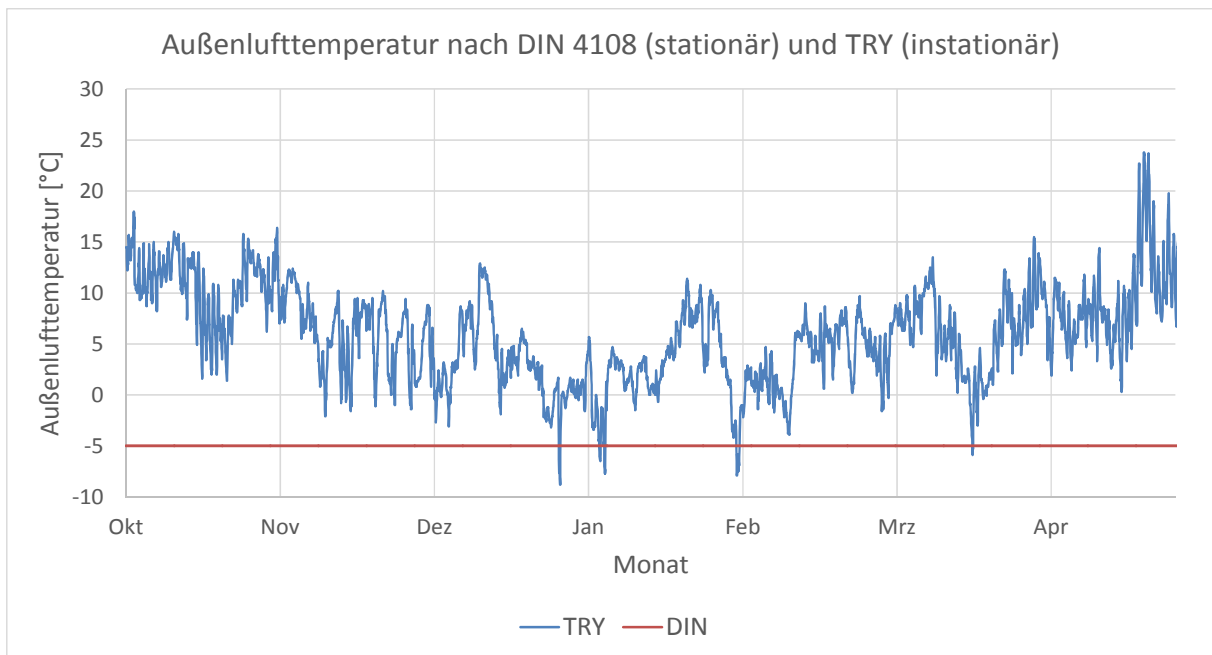


Abbildung 82 Verlauf der Außenlufttemperatur gemäß Testreferenzjahr (TRY) vs. stationärem Temperaturansatz gemäß DIN 4108

In beiden Fällen wird die Temperatur der dem Raum zugewandten Bauteiloberflächen als Beurteilungskriterium verwendet. Diese darf einen Wert von 12,6 °C nicht unterschreiten, da anderenfalls die relative Luftfeuchte im Bereich der Oberflächen Schimmelwachstum begünstigt.

Bei stationärem Ansatz nach DIN werden Oberflächentemperaturen unter Vernachlässigung der Speichereffekte der Konstruktion berechnet – lediglich der Wärmedurchgangswiderstand entscheidet über die Temperaturverteilung.

Die numerische Simulation – in ihrer räumlichen Diskretisierung mit der Finite-Elemente-Methode aus der Statik vergleichbar – bietet hingegen die Gelegenheit, Speichereffekte in allen Bereichen der Konstruktion in kurzen Zeitschritten nachzubilden und so ein vollständig dynamisch reagierendes Modell zu erstellen und zu simulieren.

Verdeutlicht wird dieser Unterschied durch die nachfolgende Grafik. Sie zeigt die Oberflächentemperaturen auf der Raumseite für beide genannten Ansätze.

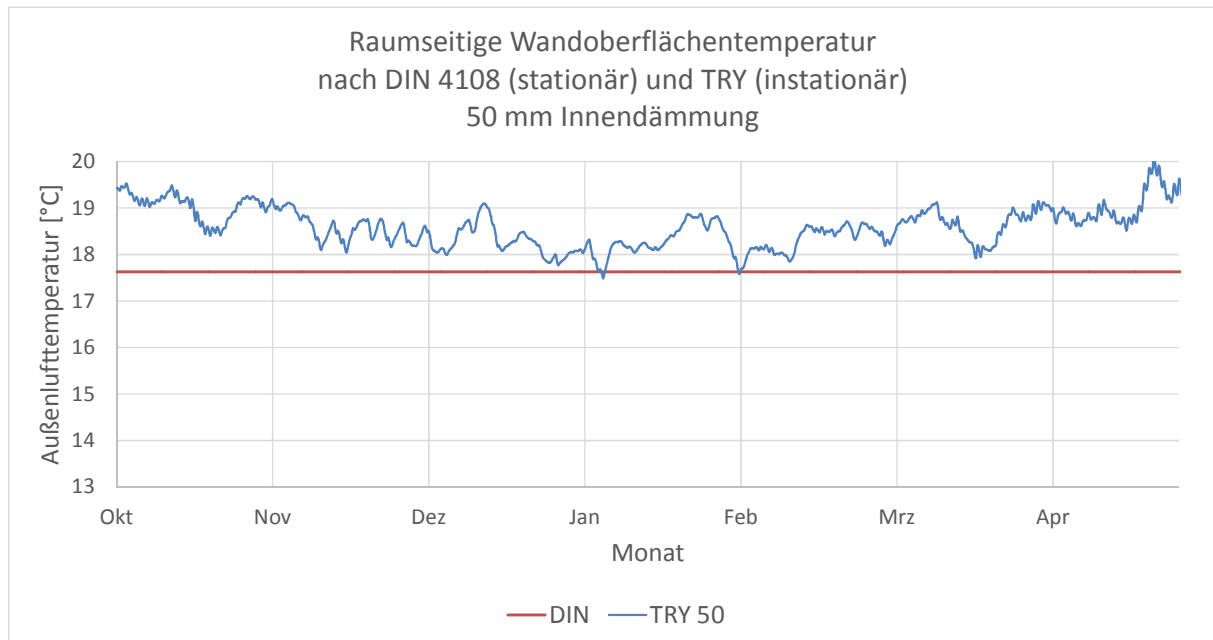


Abbildung 83 Verlauf der raumseitigen Wandoberflächentemperatur für die beiden Nachweisansätze am Beispiel TRY Hamburg, die Bestandskonstruktion hat eine Stärke von 36 cm und ist mit einer Innendämmung (Calciumsilikat) mit einer Stärke von 50 mm versehen.

In der folgenden Grafik werden die Oberflächentemperaturen für unterschiedliche Dämmstärken (ungedämmt, 25 mm und 50 mm Calciumsilikat) dargestellt.

Deutlich wird, dass sich die Oberflächentemperaturen bereits bei einer Stärke von 25 mm deutlich verbessern. Der Komfortgewinn bei einer Erhöhung der Dämmstoffstärke um weitere 25 mm fällt hingegen bereits etwas geringer aus.

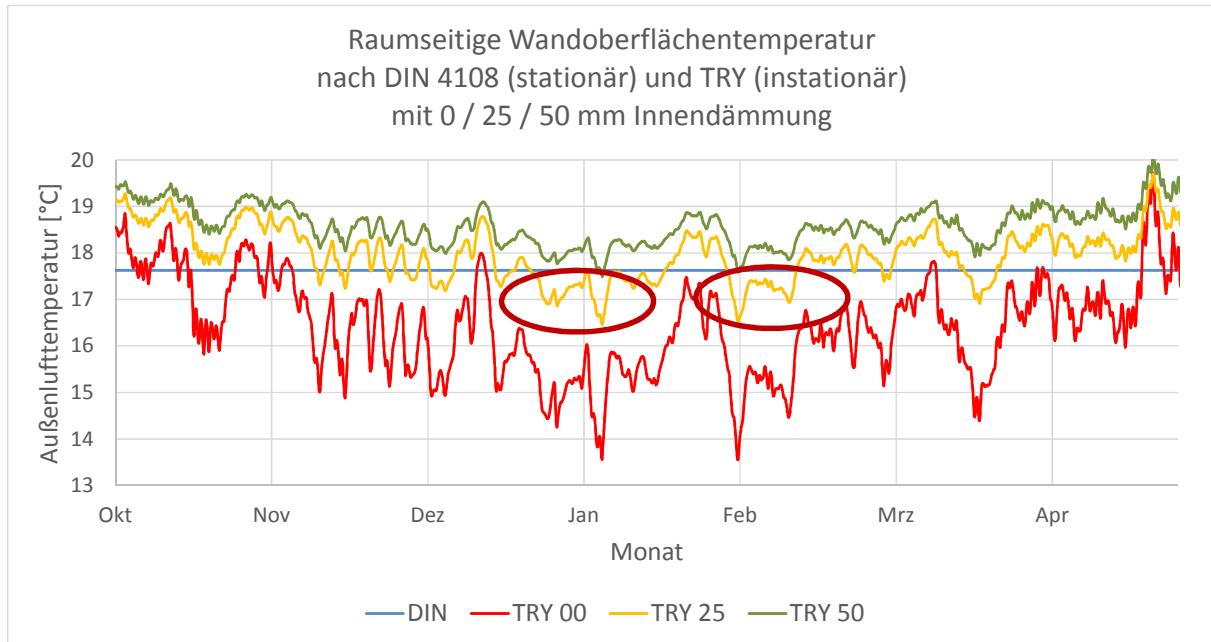


Abbildung 84 *Raumseitige Wandoberflächentemperaturen nach DIN bzw. TRY für eine ungedämmte Konstruktion sowie für Innendämmlösungen mit unterschiedlichen Dämmstärken*

Aufbauend auf den voranstehenden Aussagen kann folgende Argumentation abgeleitet werden:

1) Mit zunehmender Dämmstärke:

- kühlt die Bestandskonstruktion stärker aus,
- gestaltet sich die Ausbildung konstruktiver Details bei Innendämmmaßnahmen zunehmend kompliziert und
- entstehen zum Teil neue Konfliktpotentiale (z.B. einbindende Innenwand)

2) Daraus folgt:

- Die Stärke der Innendämmung hängt stets von der Bestandskonstruktion (Material, Mächtigkeit) und den physikalischen Randbedingungen ab und ist über instationäre hygrothermische Simulationen zu optimieren
- In extremen Witterungsfällen (Kälteperioden) werden die zulässigen Oberflächentemperaturen dann ggf. geringfügig unterschritten. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, kann eine Wandflächentemperierung auf der raumseitigen Oberfläche eingesetzt werden.

3) Dabei ist zu beachten:

- Diese Art der Temperierung dient primär nicht der Raumheizung sondern dem Bauteilschutz. Hier ist eine Systemtrennung notwendig – die Raumheizung ist dann über Flächenheizsysteme auf den Innenwänden der Appartements zu realisieren.
- Die Systemtechnik ist so auszulegen, dass gelegentlich auftretende Temperaturminima ausgeglichen werden können.
- Der Lösungsansatz ist prädestiniert für Wärmeversorgungskonzepte, welche als Niedertemperaturheizsystem betrieben werden.
- Die Verwendung regenerativer Energien für die Wärmeerzeugung bei gleichzeitigem Einsatz einer CO₂-neutralen Wärmespeichertechnik bietet sich als ideale Ergänzung für ein nachhaltiges System (CO₂-neutral) an.

4) Weitere Überlegungen sollten geführt werden:

- hinsichtlich der Wärmeverteilschicht und deren hygrothermischen Verhaltens
- hinsichtlich der anlagentechnischen Parameter

In vielen Fällen wird ein solcher Ansatz den Anforderungen der EnEV nicht gerecht werden. Ausnahmen dürfen jedoch gemacht werden, wenn entsprechend Maßnahmen zur Kompensation getroffen werden. Beispielsweise könnten solche Maßnahmen die höhere Qualifizierung anderer Bauteilbereiche, die Verwendung von mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder auch der konsequente Einsatz erneuerbarer Energien sein. Vor allem die letztgenannte Möglichkeit scheint vor dem Hintergrund der Verwendung eines Niedertemperaturheizsystems (Flächenheizung /-temperierung) erfolversprechend und sollte als weitere Zielrichtung verfolgt werden.

8 Glossar

8.1 Absolute Luftfeuchtigkeit

Als absolute Luftfeuchtigkeit wird der Wasserdampfgehalt der Luft bezogen auf 1 kg oder 1 m³ Trockenluft bezeichnet. Als Maßeinheit wird g/kg bzw. g/m³ verwendet.

8.2 Ausgleichsfeuchte w_{80} und Sättigungsfeuchtegehalt w_{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_{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 m³/m³ 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 μ größer als der von ruhender Luft.

8.4 Heizwärmebedarf (Q_h)

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 Betonpfeiler, Ringanker, Betonsturzträger 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 λ 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 (λ -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 λ . 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 ρ [kg/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 μ

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