

# Messtechnische Bestimmung der Wärmeverlustkoeffizienten von Passivhaus-Wohngebäuden



Abschlussbericht im Forschungsvorhaben  
„Erarbeitung von Prüfverfahren zur Vereinheitlichung der  
energetischen Bewertung von großformatigen, transparenten  
Bausystemen unter in situ Randbedingungen“

Kurztitel: In situ Prüfverfahren, Vorhaben: 03ET1144C

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  
über den Projektträger Jülich (PTJ) im Unterauftrag der Fachhochschule Rosenheim.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

<p><b>Autoren:</b>  Dr. Oliver Ottinger<sup>#</sup>  Dr. Jürgen Schnieders<sup>#</sup>  Dipl.-Ing. Wolfgang Hasper<sup>#</sup>  Prof. Dr. Wolfgang Feist<sup>#,*</sup></p> <p><b>Unter Mitarbeit von:</b>  Dipl.-Ing. Soeren Peper<sup>#</sup></p> <p><sup>#</sup>Passivhaus Institut, Darmstadt  <sup>*</sup>Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften der Universität Innsbruck</p> <p><b>Herausgeber:</b>  PASSIVHAUS INSTITUT  Dr. Wolfgang Feist  Rheinstr. 44/46  D-64283 Darmstadt  Tel: 06151 / 82699-0  Fax: 06151 / 82699-11  E-Mail: mail@passiv.de  www.passiv.de  <b>Darmstadt, Juni 2016</b></p> <p>Titelbild: Innenaufnahme der Passivhausscheibe während der Messung bei Beheizung mit Glühbirnen</p> <p>Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.</p>	<p><b>Kurzzusammenfassung</b></p> <p>Gegenstand des Vorhabens war die messtechnische Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten ganzer Gebäude als charakteristische Größe für die thermische Qualität der Gebäudehülle. Der entwickelte Messzyklus wurde auf zwei Passivhäuser unterschiedlicher Bauweise angewandt und daraus über die Anwendung des Co-Heating- und QUB-Tests (Quick U-value of buildings) die Wärmeverlustkoeffizienten ermittelt. Diese wurden mit den aus den Planungsgrößen berechneten, Werten verglichen. Es ergaben sich dabei je nach Verfahren sehr gute Übereinstimmungen mit Abweichungen von lediglich 5 – 20 %.</p> <p>Im Rahmen der Messungen wurde daneben das Feuchtemodell der dynamischen Gebäudesimulationssoftware DYNBIL validiert.</p> <p><b>Danksagung</b></p> <p>Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die finanzielle Förderung der Verbundforschungsprojekts In situ Prüfverfahren (FKZ: 03ET1144C), abgewickelt über den Projektträger Jülich (PTJ). Ein weiterer Dank geht an die Hochschule Rosenheim, in deren Unterauftrag die Arbeiten ausgeführt wurden.</p> <p>Günter Lang sei für die Bereitschaft gedankt, eine Messung in seinem Haus zu ermöglichen. Für die sehr gute Zusammenarbeit im Projekt gilt ein besonderer Dank Frau Bauer, Prof. Feldmeier und Prof. Wellisch von der Hochschule Rosenheim sowie Herrn Kersken und Herrn Sinnesbichler vom Fraunhofer Institut für Bauphysik.</p> <p>Einen herzlichen Dank an das gesamte Konsortium des internationalen IEA EBC Annex 58, „Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurements“. für die sehr gute und offene Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank gilt hier Herrn Pandraud für die Diskussionen über die Anwendung des QUB-Tests.</p>
---	--



<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>Wärmeverluste der Gebäudehülle .....</b>	<b>5</b>
1.1.1	Normative Definition des Wärmeverlustkoeffizienten .....	6
1.1.2	Messung des Wärmeverlustkoeffizienten zur Qualitätssicherung.....	8
<b>1.2</b>	<b>Überblick Methoden zur Gebäudecharakterisierung .....</b>	<b>9</b>
1.2.1	Co-Heating Test .....	9
1.2.2	QUB-Methode .....	10
<b>1.3</b>	<b>Feuchtespeichervorgänge in Gebäuden .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4</b>	<b>Modellierung.....</b>	<b>14</b>
1.4.1	Dynamische Gebäudesimulation: DYNBIL .....	15
<b>2</b>	<b>Entwicklung des Messverfahrens.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Vorüberlegungen.....</b>	<b>17</b>
2.1.1	Besonderheiten bei Passivhäusern .....	17
2.1.2	Einflussgrößen .....	19
2.1.3	Temperaturabhängigkeit des Wärmeverlustkoeffizienten .....	21
<b>2.2</b>	<b>Parameteridentifikation .....</b>	<b>23</b>
2.2.1	Parameteridentifikation mit LORD .....	23
2.2.2	Round-Robin Experiment: Auswertung.....	25
<b>2.3</b>	<b>Virtuelle Experimente .....</b>	<b>29</b>
2.3.1	Sensitivitätsanalyse mit dynamischen Simulationen .....	31
2.3.1.1	Sensitivität bzgl. $H_{T,a}$ .....	31
2.3.1.2	Sensitivität bzgl. Erdreich.....	31
2.3.1.3	Sensitivität bzgl. Nachbargebäuden .....	31
2.3.1.4	Erforderliche Heizleistung .....	32
2.3.1.5	Neubauten.....	32
2.3.2	Messdauer.....	32
2.3.3	Kontrolle der solaren Gewinne - Abkleben der Fenster.....	34
2.3.4	Temperaturprofil.....	35
2.3.4.1	Wirkung von Temperaturänderungen.....	35
2.3.4.2	Wärmekapazität und wirksame Wärmekapazität .....	35
2.3.5	Simulationsrechnungen zum QUB-Test .....	37
2.3.5.1	Konstante Außenbedingungen.....	38
<b>2.4</b>	<b>Erstellung des Messzyklus.....</b>	<b>39</b>
2.4.1	Installierte Leistung.....	39
2.4.2	Beheizung mit Glühbirnen.....	41
2.4.3	Feuchteexperiment .....	43
2.4.4	Zeitprogramm für Messung .....	43
<b>2.5</b>	<b>Eingesetzte Messtechnik.....</b>	<b>47</b>
<b>3</b>	<b>Messung an verschiedenen Objekten.....</b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Klimakammer .....</b>	<b>53</b>
3.1.1	Objektbeschreibung .....	53
3.1.2	Messergebnisse.....	54
3.1.3	Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten der Klimakammer .....	54
<b>3.2</b>	<b>Passivhausscheibe .....</b>	<b>58</b>
3.2.1	Objektbeschreibung .....	58
3.2.2	Messergebnisse.....	59



3.2.2.1	Außenbedingungen .....	60
3.2.2.2	Innenbedingungen .....	61
3.2.2.3	Abschätzung der Erdreichtemperatur .....	63
3.2.3	Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten der Passivhaus Scheibe.....	65
3.2.3.1	Co-Heating Methode .....	65
3.2.3.2	QUB Methode.....	66
3.2.4	Vergleich der Messdaten mit dynamischen Gebäudesimulationen .....	67
3.2.4.1	Beschreibung des Simulationsmodells .....	67
3.2.4.2	Simulationsergebnisse Referenzfall.....	69
3.2.4.3	Einflüsse auf die Übereinstimmung von Messung und Simulation .....	73
3.2.5	Theoretischer Wärmeverlustkoeffizient nach PHPP .....	86
3.2.5.1	Transmission.....	86
3.2.5.2	Infiltration.....	87
3.2.5.3	Gesamt-Wärmeverlustkoeffizient .....	87
3.2.5.4	Fehlerbetrachtungen für theoretischen Wärmeverlustkoeffizienten .....	87
3.2.6	Vergleich von gemessenem und erwartetem Wärmeverlustkoeffizienten .....	89
<b>3.3</b>	<b>Reihenendhaus.....</b>	<b>92</b>
3.3.1	Objektbeschreibung .....	92
3.3.2	Messergebnisse.....	97
3.3.2.1	Außenbedingungen .....	97
3.3.2.2	Innenbedingungen .....	97
3.3.3	Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten des Reihenendhauses .....	100
3.3.3.1	Co-Heating Methode .....	101
3.3.3.2	QUB-Methode .....	101
3.3.4	Vergleich der Messdaten mit Gebäudesimulationsrechnungen .....	103
3.3.4.1	Beschreibung des Simulationsmodells .....	103
3.3.4.2	Simulationsergebnisse Referenzfall.....	105
3.3.4.3	Einflüsse auf die Übereinstimmung von Messung und Simulation .....	112
3.3.5	Theoretischer Wärmeverlustkoeffizient nach PHPP .....	122
3.3.6	Vergleich von erwarteten und gemessenen Wärmeverlustkoeffizienten .....	123
<b>3.4</b>	<b>Diskussion der Erkenntnisse aus den Gebäudesimulationen.....</b>	<b>124</b>
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>126</b>
<b>5</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>128</b>
<b>6</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>131</b>
6.1	Bilder Passivhausscheibe .....	131
6.2	Passivhausscheibe: Wärmebrückenberechnungen zum Erdreichtemperatur.....	133
6.3	Bilder Reihenendhaus .....	137
6.4	Free Paper at Annex 58 Meeting, Prague, April 2015.....	140



# 1 Einleitung

Für die Umsetzung der Energiewende ist eine Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz ein entscheidender Baustein. Hier spielt die Gebäudehülle eine sehr wichtige Rolle. Die Luftdichtheit wird heute regelmäßig durch einen Drucktest überprüft und fließt in die Energiebilanz mit ein. Die Bewertung der Transmissionsverluste basiert dagegen ausschließlich auf Planungswerten. Treten im Betrieb Differenzen zwischen Energiebedarfsberechnung und real verbrauchter Energie auf, so gestaltet sich die Ursachensuche in der Regel schwierig. Denn neben der Qualität der thermischen Hülle haben auch die Haustechnik und die Nutzung einen großen Einfluss. Zur Reduktion der Unsicherheiten ist eine messtechnische Bestimmung der thermischen Qualität der Gebäudehülle in Form des Wärmeverlustkoeffizienten wünschenswert. Innerhalb dieses Projekts sollte daher ein praktikables Verfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten von hochgedämmten Gebäuden entwickelt und getestet werden. Daneben erfolgte im Rahmen der Messung eine Validierung und Verbesserung des Feuchtemodells der dynamischen Gebäudesimulationssoftware DYNBIL.

Zur Identifikation des Wärmeverlustkoeffizienten standen verschiedene Verfahren, angefangen beim Einsatz dynamischer Verfahren wie Gebäudesimulationen über die Parameteridentifikation an Hand von RC-Modellen und dem dynamischen QUB-Test (Quick U-value of Buildings) bis hin zum statischen Co-Heating-Test zur Verfügung. Bereits bei ersten Vorstudien zeigte sich, dass eine experimentelle Bestimmung der Wärmekapazität des Gebäudes kaum möglich ist, weil die effektiv wirksame Wärmekapazität stark von der Anregungsfrequenz abhängt. Auch eine Parameteridentifikation anhand von dynamischen Zeitreihen – über den gesamten Wärmeverlustkoeffizienten hinaus – erwies sich als wenig praktikabel. Zum einen aufgrund der schwer eingrenzbaren Wärmekapazität, zum anderen aufgrund der starken Korrelationen einzelner Parameter in hinreichend detaillierten Modellen. Der Co-Heating-Test als statisches Verfahren erschien dagegen als besonders gut für die Bestimmung des statischen Wärmeverlustkoeffizienten geeignet. Allerdings ist der notwendige Zeitaufwand für die Messung mit 2-4 Wochen [Wingfield2013] verhältnismäßig groß. Deutlich kürzere Messdauern von lediglich 1-3 Tagen weist der QUB-Test auf. Der zeitliche Messaufwand für den Vergleich von dynamischen Simulationen mit Messdaten und Parameteridentifikationen liegt in der Regel zwischen dem von QUB-Test und Co-Heating-Verfahren. Für ein praktikables Verfahren galt es nun einen Kompromiss aus geringem Zeitaufwand und hoher Genauigkeit bei möglichst geringem Aufwand und großem Informationsgewinn zu finden.

Beim Co-Heating-Verfahren sind über den einfachen Wärmeverlustkoeffizienten und eventuell noch die Apertur der Fenster hinaus keine weiteren Informationen bestimmbar. Anders sieht dies bei den dynamischen Verfahren aus, die daneben z.B. die Bestimmung der wirksamen Wärmekapazität erlauben. Im Rahmen der



Parameteridentifikation für anzusetzende Widerstands-Kapazitäten-Netzwerke können theoretisch, je nach Modell, theoretisch auch weitere Details bis hin zu einzelnen Leitwerten durch Wände, Fenster etc. extrahiert werden. Bei der Anwendung dieser Methode auf die Messwerte einer Testbox im Rahmen der Common Exercise 3 des internationalen IEA EBC Annex 58 Konsortiums wurden allerdings je nach Betriebsmodus der Box sehr stark schwankende Ergebnisse gewonnen. Die Anwendung für simulierte Daten ganzer Gebäude ließ noch größere Unsicherheiten erwarten. Da das Projektziel aber die Entwicklung eines zuverlässigen und praktikablen Verfahrens war, wurde die Parameteridentifikation zu Gunsten eines modifizierten Co-Heating-Tests und des ebenfalls dynamischen QUB-Tests verworfen.

Für die Durchführung der Messungen wurde ein Messzyklus, bestehend aus einer Kombination aus QUB-Test, Co-Heating-Test und einem Feuchteexperiment, entwickelt (Kapitel 2). Dieser Zyklus wurde auf drei Objekte angewandt: eine Klimakammer und zwei gebaute Passivhäuser (die Passivhausscheibe, ein rundes eingeschossiges Gebäude in Holzbauweise und ein massiv gebautes Reihenendhaus im Passivhaus-Standard) im eingeschwungenen Zustand (vgl. Kapitel 3). Der eingeschwungene Zustand war insofern wichtig, als das Effekte der Bautrocknung oder die noch nicht erfolgte Einstellung einer quasistationären Erdreichtemperatur einen deutlichen Einfluss auf die Messung gehabt hätten. Beide Methoden zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten zeigten gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den erwarteten Werten, bestimmt aus den Energiebilanzen sowie dynamischen Gebäudesimulationen.







Der Wärmeverlustkoeffizient (für die Transmissionswärmeverluste) lässt sich im Rahmen der Planung leicht aus Geometriedaten und den wärmeschutztechnischen Eigenschaften der Komponenten bestimmen. Dazu werden die UA-Werte mit den je nach Temperatur im angrenzenden Bereich entsprechenden Temperaturgewichtungsfaktoren multipliziert und aufsummiert. Im gebauten Zustand stellt sich die Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten aus verschiedenen Gründen als wesentlich schwieriger dar. So ist in den allermeisten Fällen (außer der Innentemperatur) mehr als ein Temperaturniveau beteiligt. In der Regel gibt es neben der Temperatur der Außenluft die Temperatur des Erdreichs bzw. eines beheizten oder unbeheizten Kellers unterhalb des Gebäudes, und Wände können an weitere beheizte bzw. nicht beheizte Gebäudeteile grenzen. Für einen Vergleich mit dem berechneten Wert müssten die herrschenden Temperaturen entsprechend berücksichtigt werden. Die Einzelwärmeströme nach außen, ins Erdreich etc. können allerdings kaum getrennt gemessen werden (s. auch Kap. 2). Eine weitere Fehlerquelle liegt darin, dass die Messung selten bei konstanten Temperaturen stattfindet, da diese zumindest tageszeitlich schwanken und so kapazitive Effekte die Messung beeinflussen. Diese können über kurze Zeiträume hohe Leistungswerte annehmen, spielen aber für das Dauerverhalten im Jahresverlauf eine keine Rolle, da sich kapazitive Effekte bei Be- und Entladevorgänge im Zeitmittel stets herausheben.

### 1.1.1 Normative Definition des Wärmeverlustkoeffizienten

Eine normative Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten erfolgt z.B. in der DIN EN 12831:2003 (Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Normheizlast) bzw. auch in der DIN EN ISO 13789:2007 (Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren). Diese stellen eine Anleitung zur Auslegung der Heizleistung zur Sicherstellung der Norminnentemperatur bzw. des Jahresheizwärmebedarfs dar.

In der DIN EN 12831 wird der Wärmeverlustkoeffizient (Wärmestromkoeffizient)  $H$  [W/K] als Wärmestrom  $\Phi$  [W] pro Kelvin Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur definiert.

Dazu werden folgende Temperaturen definiert:

- Normaußenlufttemperatur  $T_{\text{ext}}$  (Bsp. Berlin: -14 °C, s. Beiblatt 1)
- Jahresmittlere Außenlufttemperatur  $T_{\text{m,g}}$  = Erdreichtemperatur (Bsp. Berlin: 9,5 °C, s. Beiblatt 1)
- Norminnentemperatur  $T_{\text{int}}$  für Wohnräume: 20 °C.





Der Gesamt-Normwärmeverlust  $\Phi_i$  des beheizten Raumes  $i$  setzt sich aus dem Transmissionswärmeverlust  $\Phi_{T,i}$  und dem Ventilationswärmeverlust  $\Phi_{V,i}$  zusammen:

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i}$$

### Transmissionswärmeverluste

Der Transmissionswärmeverlust [W] ergibt sich aus dem Produkt aus Transmissionswärmeverlustkoeffizient [W/K] und der Differenz zwischen Norminnentemperatur und Normaußenlufttemperatur:

$$\Phi_{T,i} = H_{T,i} \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

Der Transmissionswärmeverlustkoeffizient setzt sich zu  $H_{T,i} = H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}$  aus folgenden Komponenten zusammen:

- $H_{T,ie}$ : Direkter Wärmeverlust an die äußere Umgebung
- $H_{T,iue}$ : Wärmeverlust an unbeheizte Nebenräume
- $H_{T,ig}$ : Stationäre Wärmeverluste ans Erdreich
- $H_{T,ij}$ : Wärmeverluste von beheiztem Raum  $i$  an den beheizten Raum  $j$  (bei unterschiedlichen  $T_i$ ).

Der direkte Wärmeverlust an die äußere Umgebung ergibt sich aus dem Produkt aus UA-Wert (der Summe über die Produkte alle Flächen, die an die äußere Umgebung angrenzen, und deren jeweiligen U-Werten sowie eventuell vorhandenen linearen und punktförmigen Wärmebrücken:

$$H_{T,ie} = \sum_k A_k \cdot U_k + \sum_l l_l \cdot \psi_l + \sum_m \chi_m$$

Da der Normtransmissionswärmeverlustkoeffizient auf die Differenz zwischen Norminnen- und Normaußentemperatur bezogen ist, muss bei anderen Temperaturniveaus der Wärmesenken eine entsprechende Korrektur über Temperaturgewichtungen vorgesehen werden. Für den Fall von unbeheizten Nebenräumen mit der Temperatur  $T_u$  lautet der Korrekturfaktor

$$b_u = \frac{T_{int} - T_u}{T_{int} - T_{ext}}$$

Der Wärmeverlust an unbeheizte Nebenräume durch die reguläre Fläche ergibt sich damit zu

$$H_{T,iue} = \sum_k A_k \cdot U_k \cdot b_u$$



Entsprechendes gilt für beheizte Nebenräume, die andere Norminnentemperaturen aufweisen.

Der Transmissionswärmeverlust  $H_{T,ig}$  ans Erdreich ist definiert über:

$$H_{T,ig} = f_{g1} \cdot f_{g2} \cdot G_W \cdot \sum_k A_k \cdot U_{k,equiv.}$$

Dabei ist  $U_{k,equiv.}$  der effektive, äquivalente Wärmedurchgangskoeffizient, der sich aus der Dämmwirkung der ans Erdreich angrenzenden Bauteile in Kombination mit der des Erdreichs. Weitere Parameter sind

$$f_{g1} = 1,45, \quad \text{Korrekturfaktor für jährliche Außentemperaturschwankungen}$$

$f_{g2} = \frac{T_{int} - T_{m,g}}{T_{int} - T_{ext}}$ , Reduktionsfaktor für die Temperaturdifferenz zw. Normaußentemperatur und dem Jahresmittel der Außentemperatur

$$G_W = 1, \text{ wenn der Abstand zum Grundwasser 1 m übersteigt.}$$

## Ventilationswärmeverluste

Die Normlüftungswärmeverluste [W] betragen

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (T_{int} - T_{ext})$$

mit dem Normlüftungswärmeverlustkoeffizienten  $H_{V,i} = \dot{V}_i \cdot \rho \cdot c_p \approx 0,33 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3\text{K}} \cdot \dot{V}_i$ ,

wobei der Luftvolumenstrom  $\dot{V}_i$  in [m<sup>3</sup>/h] angegeben wird und daneben die Dichte  $\rho$  von Luft sowie die spez. Wärmekapazität  $c_p$  eingehen.

Das Vorgehen aus der Norm bietet die einfache Möglichkeit, aus gebäudespezifischen Angaben einen Gesamtwärmeverlustkoeffizienten bzw. für anzusetzende Temperaturen einen Wärmeverluststrom [W] zu berechnen. Dies ist für Bedarfsberechnung oder die Heizungsauslegung zielführend. Als Vergleichsgröße für Messungen der thermischen Gebäudequalität ist das Vorgehen mit dem Ansatz von Normtemperaturen dagegen weniger sinnvoll, da in der Realität die Temperaturen abweichen.

### 1.1.2 Messung des Wärmeverlustkoeffizienten zur Qualitätssicherung

Die Überprüfung der Luftdichtheit der Gebäudehülle durch einen Drucktest gehört zum Alltag bei der Qualitätssicherung von Gebäuden. Bei der Qualität der thermischen Hülle verlässt man sich dagegen meist darauf, dass die Ausführung mit der Planung übereinstimmt. Im Rahmen dieses Projekts wurden Ansätze zur Messung des Wärmeverlustkoeffizienten als Maß für die Qualität der thermischen Gebäudehülle am Beispiel von Messungen an realen Gebäuden und einer Klimakammer getestet. Ziel war



es, Anwendbarkeit und Grenzen speziell im Zusammenhang mit hoch wärmegeprägten Gebäuden als Maßnahme zur erweiterten Qualitätssicherung zu untersuchen.

Wichtig ist, dass, wenn nicht alle Wärmeströme zumindest für verschiedene Temperaturniveaus (z.B. Außenluft und Erdreich) getrennt gemessen werden können, ein direkter Vergleich der gemessenen Wärmeströme mit den Berechnungen nicht möglich ist.

Weiter weichen die vorherrschenden Temperaturen in der Regel von den Normtemperaturen ab. Somit der Wärmeverlustkoeffizient  $H$  nicht direkt messbar, da dieser auf die Normtemperaturen bezogen ist. Zur Abgrenzung vom normativ geregelten Wärmeverlustkoeffizienten wird der gemessene Wärmeverlustkoeffizient mit  $HLC$  (=engl. Heat loss coefficient) bezeichnet. Im Unterschied zu  $H$  bzw.  $H_r$  wird  $HLC$  auf gemessene (bzw. abgeschätzte) mittlere Temperaturniveaus während des Messzeitraums bezogen. Somit ist ein Vergleich des gemessenen und des berechneten  $HLC$  für die Messbedingungen zur Überprüfung der Übereinstimmung von gebauter und realisierter Qualität möglich.

## 1.2 Überblick Methoden zur Gebäudecharakterisierung

### 1.2.1 Co-Heating Test

Eine experimentelle Methode zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten eines Gebäudes im gebauten Zustand ist der Co-Heating-Test. Dazu wird das Gebäude elektrisch auf eine konstante Innentemperatur meist deutlich oberhalb der Außentemperatur geheizt und die Leistungsaufnahme gemessen. Erfasst werden auf diese Weise die gesamten Wärmeströme durch die Gebäudehülle – also die Transmissionswärmeverluste durch Außenwände, Dach, Boden(platte) bzw. Keller sowie zu anderen angrenzenden Zonen sowie auftretende Ventilationswärmeverluste. Die Innentemperatur wird durch geregelte Heizgeräte erzeugt, deren Stromverbrauch gemessen wird [Sonderegger1979a, Sonderegger1979b, Subbaro1988]. In der Regel wird eine homogene Innentemperatur durch den Einsatz von Ventilatoren sichergestellt [Johnston2012, Butler2013].

Während der Messung werden alle Wärmequellen außer den Heizgeräten soweit möglich ausgeschaltet. Das Gebäude muss im Messzeitraum unbewohnt sein, um Einflüsse der Nutzer auszuschließen. Damit Wärmeströme zu angrenzenden Gebäudeteilen, die nicht im Co-Heating-Test eingeschlossen sind (z.B.: Reihennachbarhäuser, umliegende Wohnungen in Mehrfamiliengebäuden etc.) das Ergebnis nicht verfälschen, erfolgt optimaler Weise eine Beheizung dieser Zonen auf identische Temperaturen oder zumindest eine Temperaturmessung. Damit sich ein Gleichgewichtszustand einstellen kann, werden für den Co-Heating-Test üblicherweise Messzeiträume von zwei Wochen angesetzt. Einen nennenswerten Einfluss haben so-

lare Gewinne, die die benötigte Heizleistung reduzieren. Diese müssen in der Energiebilanz zur Ermittlung des HLC abgeschätzt werden. Der HLC [W/K] ergibt sich in der Auftragung der tagesmittleren Heizleistungen [W] (korrigiert um die solaren Gewinne) über den tagesmittleren Temperaturdifferenzen [K] zwischen innen und außen aus der Steigung der Regressionsgeraden. Um die reinen Transmissionswärmeverluste ermitteln zu können, ist eine parallele Tracergasmessung zur Bestimmung der Ventilationsströme und damit -wärmeverluste während der Messung möglich. Für eine Abschätzung kann aber auch das Ergebnis eines Luftdichtheitstest herangezogen werden.

Durch den Vergleich mit dem zu erwartenden Wärmeverlustkoeffizienten, der sich aus den Designparametern der Gebäudehülle und den Messbedingungen (Temperaturniveaus) ergibt, können Abweichungen zwischen realisierter und geplanter Qualität der thermischen Gebäudehülle bestimmt werden. Hierdurch können Abweichungen von der Planung festgestellt werden, die anders kaum zugänglich sind. Unterstützend können Luftdichtheitsmessungen vorgenommen und Thermografieaufnahmen durchgeführt werden, um die Aussagekraft der Messung zu erhöhen. Einen wichtigen Einfluss auf die Aussagekraft des Co-Heating-Tests haben die Außentemperaturen, die möglichst niedrig sein sollten, damit die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen groß ist. Am besten geeignet sind bewölkte kalte Wintertage, an denen die Solarstrahlung gering und die Temperaturschwankungen der Außenluft klein sind.

Der Co-Heating-Test ist vom Ansatz her sehr gut geeignet, um die statischen Wärmeverluste eines Gebäudes im gebauten Zustand zu bestimmen. Nachteilig sind der hohe zeitliche Aufwand und damit hohe Kosten für die Messung sowie die Tatsache, dass während des langen Messzeitraums das Gebäude nicht genutzt werden kann.

### 1.2.2 QUB-Methode

Die Kurzform QUB steht für "Quick measurements of energy efficiency of buildings" und wurde von Mangematin et al. [Mangematin2012] entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein dynamisches Messverfahren, bei dem neben dem Wärmeverlustkoeffizienten auch Informationen über die Wärmekapazität ermittelt werden können. Der Ansatz, der dabei verfolgt wird, ist es, die Wärmeverluste eines Gebäudes in möglichst kurzer Zeit zu bestimmen. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Gebäude als eine Zone mit nur einer Temperatur  $T$  beschreiben lässt und der Wärmestrom durch einen Widerstand  $R$  bzw. Leitwert  $L$  nach außen bestimmt ist. Daneben wird davon ausgegangen, dass das Objekt in guter Näherung mit einem Modell mit nur einer Wärmekapazität abgebildet werden kann (vgl. Abschnitt 2.3.4.2). Das dynamische Verhalten eines einfachen RC-Modells, das durch seine effektive Wärmekapazität  $C_{\text{eff}}$ , den Wärmeverlustkoeffizienten des Gebäudes  $L = 1/R$  sowie eine eventuell vorliegende Heizleistung  $P$  bestimmt wird, lässt sich durch folgende Differentialgleichung beschreiben:



$$C_{eff} \cdot dT = (P - L\Delta T)dt$$

Dabei ist  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Wird dem Gebäude die Heizleistung  $P$  (inklusive solarer Gewinne) zugeführt, so ändert sich die Temperaturdifferenz mit der Zeit entsprechend

$$\Delta T^h = \left( \Delta T_0^h - \frac{P}{L} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{P}{L}.$$

Dabei sind  $\tau = \frac{C_{eff}}{L} = R \cdot C_{eff}$  die effektive Zeitkonstante des Gebäudes und  $\Delta T_0^h$  die Temperaturdifferenz zu Beginn des Prozesses. Bestehen keinerlei Wärmegewinne für das Gebäude ( $P=0$ ), so vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\Delta T^c = \Delta T_0^c \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Die Indizes  $h$  und  $c$  stehen für die Aufheiz- bzw. Abkühlphase. Für die kurze Messzeit von nur zwei Tagen nehmen Mangematin et al. eine konstante Außentemperatur an. Dies gilt sicher, besonders bei sonnigem Wetter, wenn die Außentemperaturen zwischen Tag und Nacht deutlich schwanken, lediglich im Mittel. Die Idee ist nun, dass, wenn man die Temperaturverläufe linearisiert (Taylor-Entwicklung), aus den Steigungen der Innentemperaturverläufe eine Bestimmung des Leitwerts  $L$  nach außen möglich wird. Die Taylorentwicklung um den Startpunkt  $t = 0$  ergibt

$$\Delta T^c = \Delta T_0^c - \alpha_c t$$

$$\Delta T^h = \Delta T_0^h + \alpha_h t$$

mit den Steigungen  $\alpha_c = \Delta T_0^c \cdot L / C_{eff}$  bzw.  $\alpha_h = \frac{P}{C_{eff}} - \Delta T_0^h \cdot L / C_{eff}$  (vgl. Abbildung 2).

Der Wärmeverlustkoeffizient bestimmt sich damit zu

$$L = \frac{P}{\Delta T_0^h + \Delta T_0^c \alpha_h / \alpha_c}.$$

Prinzipiell kann dies für jeden Zeitpunkt der Heiz- oder Kühlphase durchgeführt werden. Es wird empfohlen, die Auswertung nach einer möglichst großen Messzeit (am Ende der Aufheiz- und Abkühlphasen) durchzuführen. Liegen diese Zeitpunkte am frühen Morgen, so bedeutet dies, dass für einen längeren Zeitraum davor keine solaren Gewinne die Bilanz beeinflussen konnten. Da die Kapazität, die hier angesetzt wird, eine effektive Kapazität ist, die vom Fortschritt des Einschwingvorgangs abhängt, sollten die Steigungen beide nach derselben Zeit nach Phasenbeginn ausgewertet werden.

Nun ist die Annahme, dass einem Gebäude keinerlei Heizwärme zugeführt wird, schwer in der Realität umsetzbar. Zum einen müssten die solaren Gewinne dafür auf



null reduziert werden, was am Tag nur durch sehr gute Verschattung, wie das Schließen der Rollläden, näherungsweise erfüllbar ist. Weiter ist während der Messung zumindest das Messequipment in Betrieb, das mit seinem Stromverbrauch zu einer gewissen Wärmeentwicklung beiträgt. Bei der Messung eines Passivhauses waren dies immerhin fast 10 % der Heizleistung während der Heizphase. Wird diese Heizleistung während der Abkühlphase vernachlässigt, so ist der Verlauf der Innentemperatur flacher als erwartet und damit der ermittelte Wärmeverlustkoeffizient zu klein. Setzt man für die Aufheizphase die Heizleistung  $P_1$  und für die Abkühlphase die Heizleistung  $P_2$  an, so ergibt sich folgender Zusammenhang für den Wärmeverlustkoeffizienten:

$$L = \frac{P_1 \alpha_2^h + P_2 \alpha_1^h}{\Delta T_0^1 \alpha_2^h + \Delta T_0^2 \alpha_1^h}$$

Verschwindet  $P_2 (=P_c)$  so erhält man wieder die ursprüngliche Gleichung. Um in der Nomenklatur zu bleiben, wie sie von Mangematin et al. eingeführt wurde, wird hier der Betrag der Steigungen verwendet.

Neben dem Wärmeverlustkoeffizienten erlaubt die QUB-Methode auch die Bestimmung der effektiven Wärmekapazität des Gebäudes. Diese ergibt sich zu

$$C = \frac{P_1 \Delta T_0^2 + P_2 \Delta T_0^1}{\Delta T_0^1 \alpha_2^h + \Delta T_0^2 \alpha_1^h}$$

[Pandraud2014] und hat die Einheit [Ws/K]. Wie an Hand von Simulationsergebnissen in Abschnitt 2.3.4.2 diskutiert werden wird, handelt es sich bei der Kapazität aus der QUB-Methode um eine effektive Wärmekapazität, die von den Randbedingungen abhängt und kleiner als die gesamte Wärmekapazität aller Massen ist.

Eine wichtige Erkenntnis von Mangematin et al. war, dass die Änderung der Innentemperatur in Aufheiz- und Abkühlphase möglichst symmetrisch verlaufen sollte. Bei starken Asymmetrien kommt es leicht zu Überschätzungen des Wärmeverlustkoeffizienten. Damit der Temperaturanstieg genauso groß ist wie der Abfall, ist eine Heizleistung erforderlich, die der doppelten Verlustleistung entspricht. Weil durch die Messung gerade die Verlustleistung bestimmt werden soll, bestehen hier große Unsicherheiten, zumal die mittleren Außenbedingungen während der Messung prinzipiell erst nach der Messung feststehen.

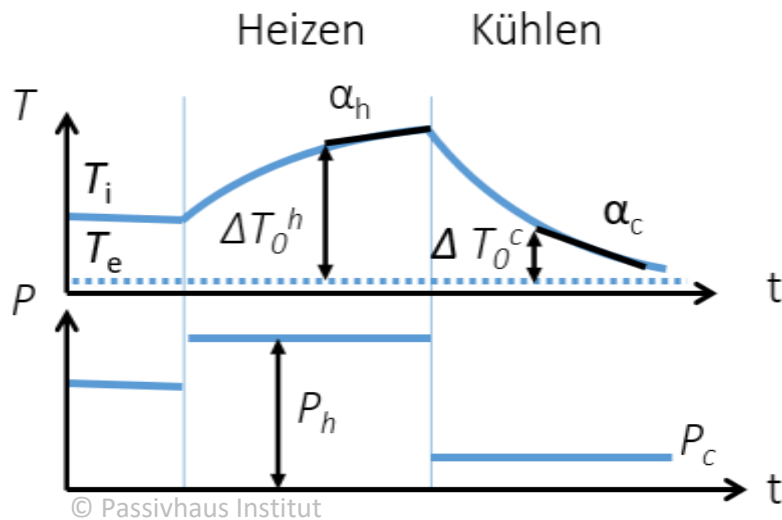


Abbildung 2: Verlauf von Heizleistungen und Temperatur für die Auswertung der QUB-Methode mit angedeuteten Steigungen  $\alpha_h$  und  $\alpha_c$  am Ende der Aufheiz- und Abkühlphasen.

### 1.3 Feuchtespeichervorgänge in Gebäuden

Unter Komfort-, Gesundheits- und Hygienegesichtspunkten gewinnt die Gebäudesimulation unter Berücksichtigung der Feuchtebilanz für Mitteleuropa, aber auch für Nordeuropa zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig kommen Standorte außerhalb Mitteleuropas zunehmend in den Blick, wenn es um die Adaptierung hoch energieeffizienter Bauweisen an ausgeprägt kalte oder auch warme, zum Teil humide, Klimate geht.

Verfahren zur Kopplung mit der thermischen Gebäudesimulation und Berücksichtigung von Latentwärmeeinflüssen sowie der hygri-schen Kapazität von Bauteilen wurden entwickelt und erfolgreich in DYNBIL (vgl. Abschnitt 1.4.1) eingesetzt, ein Beispiel hierfür gibt [Schnieders2008]. In kalten Klimaten besteht je nach Randbedingungen im sehr kalten Kernwinter das Risiko von zu trockener Raumluft [Rojas-Kopeinig 2015]. Die Feuchte-Puffer-Kapazität der Bauteile kann jedoch nach der praktischen Erfahrung der letzten 20 Jahre Phasen mit potentiell trockener Zuluft im Kernwinter überbrücken, sodass in typischen Gebäuden kein Problem mit besonders trockener Raumluft besteht, solange die Frischluftmengen nicht unangemessen hoch ausgelegt werden. Ziel der Arbeit innerhalb des Projekts war es, eine empirische Validierung des Simulationsmodells in DYNBIL anhand von Sprungantworten auf einen Feuchtepeak zu erzielen und bei Abweichungen Verbesserungen in den Algorithmen zu erzielen.



## 1.4 Modellierung

Hinter den vorgestellten Methoden (Co-Heating und QUB) stehen sehr einfache Modellannahmen (R bzw. RC-Modell). Auf Grundlage von komplexeren Modellansätzen sind weitergehende Erkenntnisse möglich. Grundsätzlich stellt ein Modell ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit dar, mit dem Zweck, Vorhersagen bezüglich spezifischer Aspekte treffen zu können. Die Vereinfachung bezieht sich im Allgemeinen sowohl auf den Umfang des abzubildenden Systems (z.B. einzelner Raum, Gebäude oder Stadtteil) als auch auf die Detailtiefe der Vorgänge (z.B. thermisches oder hygri-sches Verhalten basierend auf Einflüssen von Haustechnik, Solarstrahlung, Nutzer etc.). Welches Modell verwendet werden kann, hängt stets von der Fragestellung ab: So genügt zur Erstellung von zuverlässigen Jahresenergiebilanzen eine monatliche Betrachtung, wie sie im PHPP (Passivhaus-Projektierungspaket) zum Einsatz kommt. Sollen die Temperaturverläufe in einem einzelnen Raum eines Gebäudes untersucht werden, so sind dynamische Gebäudesimulationen z.B. mit DYNBIL (s. auch Abschnitt 1.4.1) mit einer deutlich höheren Zeitauflösung (Stunden oder kürzer) nötig.

Bei der Detailtiefe bezüglich der physikalischen Genauigkeit unterscheidet man zwischen den Extremfällen White- und Black-Box-Modell. Bei einem Black-Box-Modell handelt es sich um ein vom physikalischen Aufbau her als völlig unbekannt angesehene System, das nur indirekt über das Verhalten bzw. die Interaktion des Systems (Eingangs- und Ausgangsgrößen) beobachtet bzw. modelliert werden kann. Bei einem White-Box-Modell wird dagegen von einem physikalisch grundlegend bekannten Systemaufbau ausgegangen, das durch Abstraktion, Modifikation und Reduktion so vereinfacht wird, dass die relevant erscheinenden Eigenschaften ausreichend genau abgebildet werden.

Soll, wie im Fall der Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten, aus einer Messung auf eine Modelleigenschaft (den Wärmeverlustkoeffizienten) geschlossen werden, so können verschiedene Modelle herangezogen werden. So kann das Verhalten durch eine dynamische Gebäudesimulation unter Berücksichtigung aller bekannten Einflussgrößen (White-Box-Modell) erstellt und ausgewertet werden. Grundsätzlich können für jedes untersuchte Gebäude bestimmte Informationen ermittelt werden. Dazu zählt zumindest die Geometrie, außerdem lassen sich bei einer Begehung Größen wie etwa die U-Werte der Verglasungen bis etwa auf einen Faktor 2 abschätzen. Auch die Luft-dichtheit kann einfach durch einen Drucktest ermittelt und damit die Infiltrationswärme-verluste abgeschätzt werden. Mit etwas größerem Aufwand kann durch Tracer-Gas-Messungen sogar die Infiltration selber oder, z.B. durch den in [Feist 2016] beschriebenen Messapparat der U-Wert der Verglasung im Feldversuch auf ca. 5% genau gemessen werden. Diese Informationen helfen, um bei Abweichungen zwischen erwartetem und gemessenem HLC die Eingrenzung der Diskrepanzen zu vereinfachen.

Da der Aufwand für die Erstellung und Durchführung von dynamischen Gebäudesimulationen vergleichsweise hoch ist, kommen häufig Grey-Box-Modellansätze zum Einsatz. Dabei werden Annahmen über das physikalische Verhalten z.B. in Form von Widerstands-Kapazitäten-(RC)-Netzwerken angenommen und die gesuchte Größe daraus abgeleitet. Das Wissen über das untersuchte Objekt geht dann im Wesentlichen bei der Auswahl des RC-Netzwerks und der Definition der zulässigen Parameterbereiche ein. Das einfachste Grey-Box-Modell ist ein einfaches RC-Glied mit nur einem Widerstand bzw. Leitwert und einer Kapazität. Ein weiterer Ansatz ist der Einsatz von statistischen Modellen, bei denen keine oder zumindest nur sehr wenige Informationen verwandt werden. Diese Verfahren sind am ehesten im Bereich der Black-Box-Modelle einzuordnen. Im Rahmen dieses Projekts wurden vor allem dynamische Gebäudesimulationen und Algorithmen unter Verwendung von Grey-Box-Modellen verwendet. Daher wird hier auf die statistischen Verfahren nicht weiter eingegangen.

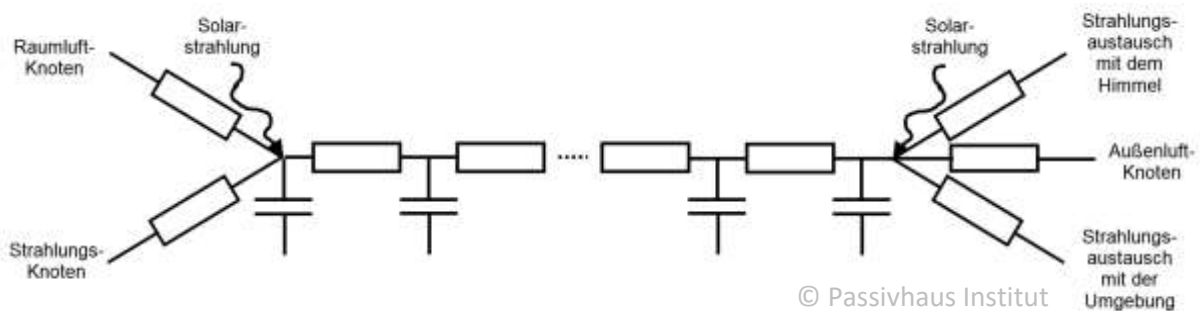
#### **1.4.1 Dynamische Gebäudesimulation: DYNBIL**

In der (thermischen) dynamischen Gebäudesimulation wird das thermische Verhalten eines Gebäudes rechnerisch nachgebildet. Durch den Einsatz von Programmen zur dynamischen Gebäudesimulation lassen sich Vorhersagen über das Gebäudeverhalten ableiten sowie Optimierungen oder wissenschaftliche Untersuchungen durchführen. Die Simulationsrechnungen innerhalb dieses Projekts wurden mit dem dynamischen, hygrothermischen Gebäudesimulationsprogramm DYNBIL durchgeführt.

DYNBIL wurde in den 1980er-Jahren von Wolfgang Feist erstellt und seither vielfach ergänzt und erweitert. Das Raummodell des Programms besitzt zwei klar getrennte Temperaturknoten für Luft- und Strahlungstemperatur. Die inneren konvektiven und radiativen Wärmeübergänge werden abhängig von den Temperaturen und ggf. der Lage der Fläche im Raum berechnet. Auf den Außenoberflächen werden die Einflüsse von Windgeschwindigkeit, Solarstrahlung und infrarotem Strahlungsaustausch mit dem Himmel und der Umgebung berücksichtigt. Wärmedurchlasskoeffizienten und Energiedurchlassgrade der Verglasungen werden ebenfalls abhängig von der jeweiligen Temperatur und der Solarstrahlung (insbesondere der Richtung) in jedem Zeitschritt neu ermittelt.

Die thermischen Algorithmen und ihre Implementierung wurden in der Vergangenheit bereits in verschiedenen Forschungsprojekten anhand von Messdaten aus realisierten Gebäuden validiert (z.B. [Kaufmann 2001], [Schneider 2003]). Auch im Rahmen des internationalen Annex 58 Projekts beim Vergleich der gemessenen Zwillingshäuser (Holzkirchen) durch Rojas-Kopeinig et al. [Rojas-Kopeinig2016] wurde Dynbil eingesetzt. Die Software wurde dabei vom Passivhaus Institut zur Verfügung gestellt und der Mess-Sim-Vergleich diskutiert.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen erwies sich insbesondere das Modell für die opaken Bauteile als relevant. Es handelt sich um ein Widerstands-Kapazitäten-Modell, ein sogenanntes Beuken-Modell, in dem das Bauteil in einzelne Wärmekapazitäten diskretisiert wird, zwischen denen sich jeweils Wärmedurchlasswiderstände befinden (Abbildung 3). An den Enden der Wand befinden sich Wärmekapazitäten, keine Wärmedurchlasswiderstände (sog.  $\pi$ -Modell). Die Wand ist an beiden Seiten mit Wärmeübergangswiderständen an die entsprechenden Luft- und Strahlungsknoten angeschlossen.



**Abbildung 3: Skizze des DYNBIL-Modells für opake Bauteile am Beispiel einer Außenwand**

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung innerhalb der Wand erfolgt über ein Vorwärts-Differenzen-Verfahren, das auch über lange Zeiträume die Energieerhaltung sicher stellt und eine korrekte Berechnung hochgedämmter Bauteile inklusive langfristiger Speichervorgänge erlaubt. Details zum Verfahren und seiner Genauigkeit sind in [Feist1994] zu finden.

Der Feuchtetransport im Bauteil wird analog zum Wärmetransport abgebildet. Dabei werden Diffusion und Sorptionsleitung mit den jeweils treibenden Kräften separat behandelt, die Widerstände und Kapazitäten sind zum Teil feuchteabhängig. Saugender Flüssigwassertransport und der Einfluss von Schlagregen werden nicht berücksichtigt, da sie für die Feuchteverhältnisse im Gebäude im Normalbetrieb nicht relevant sind. Die übrige Berechnung folgt weitgehend den in [Künzel1994] vorgeschlagenen Verfahren. Ein Aspekt des Vergleichs von dynamischen Gebäudesimulationen mit gemessenen Daten in diesem Projekt war die Validierung und Verbesserung des Feuchtemodells von DYNBIL.

## 2 Entwicklung des Messverfahrens

In diesem Kapitel wird diskutiert, wie das Messverfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten eines hoch gedämmten Gebäudes aussehen soll. Ziel ist es, mit möglichst geringem Aufwand in kurzer Zeit und mit hoher Genauigkeit den Wärmeverlustkoeffizienten zu bestimmen. Daneben soll auch eine Untersuchung der Feuchtepufferung im Gebäude stattfinden. Da sich thermische und hygrische Effekte gegenseitig beeinflussen, wird ein zweiphasiges Verfahren (1. HLC-Messung, 2. Feuchteexperiment) angestrebt. Für das Feuchteexperiment soll eine größere Menge Wasserdampf in das Gebäude eingebracht werden und der Verlauf der Luftfeuchte verfolgt und mit dynamischen Simulationen verglichen wird. Das genaue Vorgehen wird im Rahmen von virtuellen Experimenten getestet. Im Folgenden wird die Frage diskutiert, wie der Wärmeverlustkoeffizient gemessen werden soll.

Auf welche Weise – genauer: mit welchem experimentellen Vorgehen – lässt sich der Gebäudeleitwert am besten bestimmen? Wie bereits in Kapitel 1 dargestellt gibt es verschiedene Ansätze wie Co-Heating oder die QUB-Methode, in diesem Kapitel soll nun eine Messsequenz zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten eines Passivhauses entwickelt werden. Für eine erste Orientierung wurden einfache Überlegungen an Hand von Gebäudegrunddaten mit Hilfe des PHPP angestellt. Weitergehende Erkenntnisse wurden durch dynamische Gebäudesimulationen gewonnen. Schrittweise werden in diesem Kapitel Aspekte für die Messung des Gebäudeleitwerts erarbeitet und daraus ein Verfahren für die Messung abgeleitet und kritische Punkte herausgestellt. Begonnen wird mit der Diskussion von Besonderheiten bei hochgedämmten Gebäuden, wie es Passivhäuser sind. Anschließend werden grundlegende Punkte bei der Messung diskutiert. Darauf aufbauend wird eine Möglichkeit zur Auswertung von Messungen – die Parameteridentifikation vorgestellt und auf Messdaten angewendet. Schließlich wird durch virtuelle Experimente an Hand von dynamischen Gebäudesimulationen ein Messzyklus abgeleitet und getestet, der sowohl für die Bestimmung des Gebäudeleitwerts als auch für die Untersuchung des Feuchtepufferhaltens von Gebäuden geeignet ist.

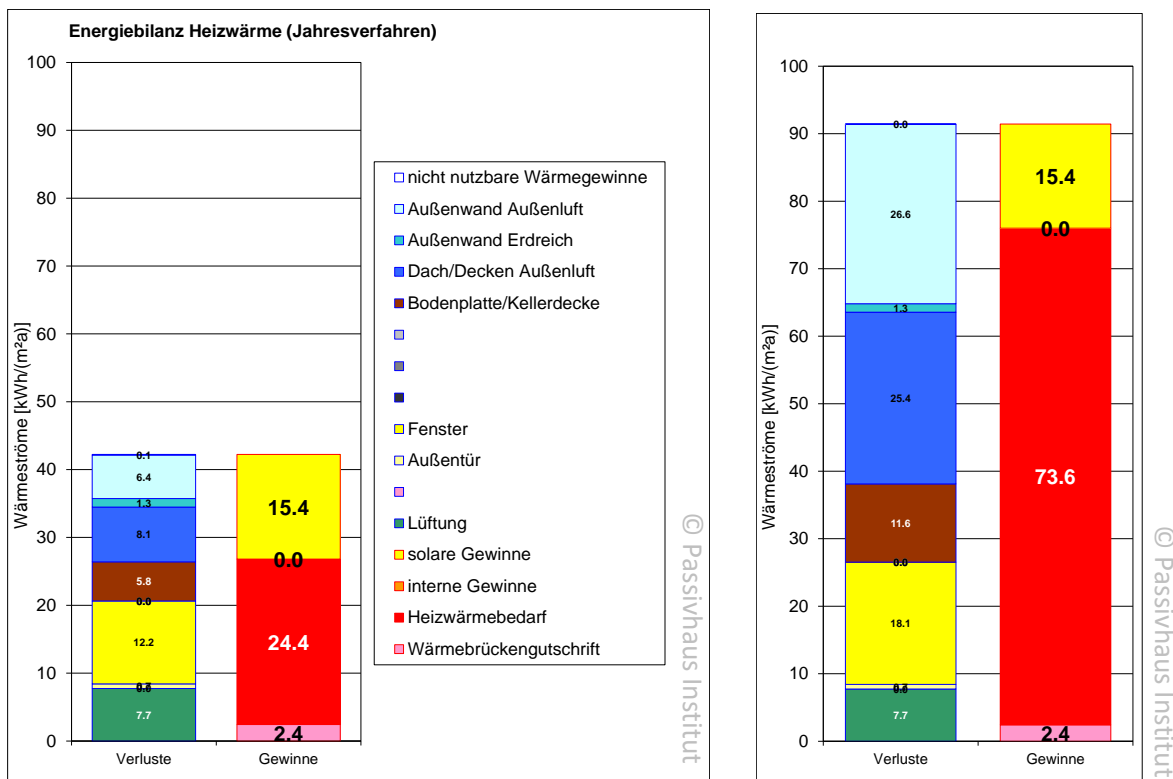
### 2.1 Vorüberlegungen

#### 2.1.1 Besonderheiten bei Passivhäusern

Passivhäuser in mitteleuropäischem Klima sind hochgedämmte Gebäude mit guter Luftdichtheit und mechanischer Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Der Jahresheizwärmebedarf wird so um rund einen Faktor von etwa 10 kleiner sein als in Altbauten. Solare Gewinne sind dagegen von vergleichbarer Größenordnung wie im Altbau, bei offensiv solarer Architektur können sie sogar größer sein. Die raumseitig verfügbare Wärmekapazität und der Leitwert zu Nachbarwohnungen sind in der Regel ähnlich hoch wie bei Altbauten.

Um zu verdeutlichen, wie sich das Verhältnis von solaren Gewinnen und Heizwärmebedarf bei veränderter Dämmung verschiebt, ist in Abbildung 4 die Energiebilanz für die Heizwärme aus dem PHPP-Blatt Heizjahr für ein Passivhaus (unter Vernachlässigung interner Wärmegewinne, links) dargestellt. Durch Erhöhung des Leitwerts um einen Faktor von 2,5 bleiben die solaren Gewinne fast unverändert, der Anteil des Heizwärmebedarfs allerdings steigt deutlich von gut 50 % auf über 80 %.

Die Gesamtwärmegewinne im Gebäude während einer Messung setzen sich aus der vergleichsweise leicht messbaren Heizleistung, aber auch solaren Gewinnen und kapazitiven Effekten zusammen. Die Heizleistung zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Temperatur ist bei Passivhäusern deutlich geringer als in weniger gedämmten Gebäuden. Daher ist es im Passivhaus entsprechend schwieriger, den Leitwert nach außen mit akzeptabler relativer Genauigkeit aus der Heizleistung zu bestimmen.



**Abbildung 4: Heizwärme Energiebilanz für ein Passivhaus (Auszug aus PHPP-Blatt Heizjahr der Passivhausscheibe) im gebauten Zustand (links) und mit einem um einen Faktor 2,5 erhöhten Leitwert (rechts). Aus Gründen der Transparenz wurden in dieser Darstellung die internen Wärmegewinne auf null reduziert.**

## 2.1.2 Einflussgrößen

Der Wärmeverlustkoeffizient  $HLC$  bzw. der Leitwert  $L$  ist eine nur indirekt messbare Größe. Eine hohe Sensitivität bezüglich der Messgrößen ist Voraussetzung dafür, dass sich der zu bestimmende Parameter mit hoher Genauigkeit identifizieren lässt. Dies spiegelt sich beim Co-Heating-Test in einer hohen Sensitivität des Gebäudeleitwerts bzw. des Wärmeverlustkoeffizienten bezüglich der benötigten Heizleistung  $P$ , also einen großen  $dP/dL$ , wider. Anders ausgedrückt: eine kleine Änderung in  $L$  soll beim gewählten Messverfahren eine möglichst große Änderung in  $P$  zur Folge haben.

Eine besondere Herausforderung liegt vor, wenn die Messung einer Zielgröße (hier der Wärmeverlustkoeffizient) stark durch Störgrößen bestimmt wird. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die Sensitivität bezüglich dieser Störgröße hoch ist. Ein Beispiel sind solare Gewinne. In der Übergangsjahreszeit kann es vorkommen, dass ein Gebäude auf Grund der solaren Gewinne kaum noch geheizt werden muss, so dass die Heizleistung klein wird. Durch alle nicht bekannten oder schlecht messbaren Wärmeströme entstehen zusätzliche Unsicherheiten für den Heizwärmebedarf. Der Einfluss der Störgrößen kann durch das Design des Experiments beeinflusst werden. So können Wärmeströme durch eine Trennwand zum Nachbargebäude reduziert werden, indem die Temperaturen auf beiden Seiten gleich gehalten werden.

Direkte Auswirkungen auf die Messung haben zum einen die Temperaturen (innen und außen) und alle Wärmeströme in das Gebäude hinein und hinaus. Die zu bestimmenden Wärmeverluste

$$Q_{Verlust} = Q_{Außenwand} + Q_{Fenster} + Q_{Dach} + Q_{Bodenplatte} + Q_{Nachbargelände} + Q_{Ventilation}$$

setzen sich aus Wärmeströmen durch die Außenwand, durch Fenster, das Dach, die Bodenplatte bzw. die Kellerdecke zu Nachbargebäuden oder unbeheizten Zonen und Ventilationswärmeverlusten zusammen. Wärmegewinne

$$Q_{Gewinn} = Q_{Heiz} + Q_{Solar} + Q_{IWQ} + Q_C$$

entstehen zum einen durch gezieltes Heizen, aber auch durch solare Gewinne und interne Wärmequellen (IWQ). Daneben können durch kapazitive Effekte zusätzliche Wärmeströme  $Q_C$  auftreten. Grundsätzlich wird angenommen, dass die Wärmegewinne den Wärmeverlusten entsprechen:

$$\dot{Q}_{Verlust} = \dot{Q}_{Gewinn}$$

Wird nur die Heizleistung  $P = Q_{Heiz}$  gemessen, so stellen alle übrigen Wärmegewinne unbekannte Störgrößen dar. Für deren Behandlung gibt es immer zwei Strategien: Ex-





perimentell dafür sorgen, dass die Störung klein bleibt (meist durch praktische Bedingungen erschwert) oder Messung der Größe der Störung zum Zweck der Anbringung einer Korrektur.

Wichtige Punkte für die Messung sind:

- Temperatur im Nachbargebäude
- Leitwert zwischen Gebäude und Nachbar
- Solarstrahlung vor und während des Experiments
- Gebäudetemperatur vor Beginn des Experiments
- Wärmekapazität des Gebäudes und ihre Verteilung
- Temperatur des Erdreichs
- Interne Wärmequellen oder -senken

Um zu erkennen, wie sich Fehler in den Messgrößen auf die Zielgröße auswirken, ist eine Fehlerfortpflanzungsrechnung hilfreich. Der statische Wärmeverlustkoeffizient

$HLC = \frac{Q_{\text{Gewinn}}}{\Delta T}$  bestimmt sich aus den Wärmegewinnen  $Q_{\text{Gewinn}}$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_i - T_e$ .

Als Fehler für den Wärmeverlustkoeffizienten ergibt sich

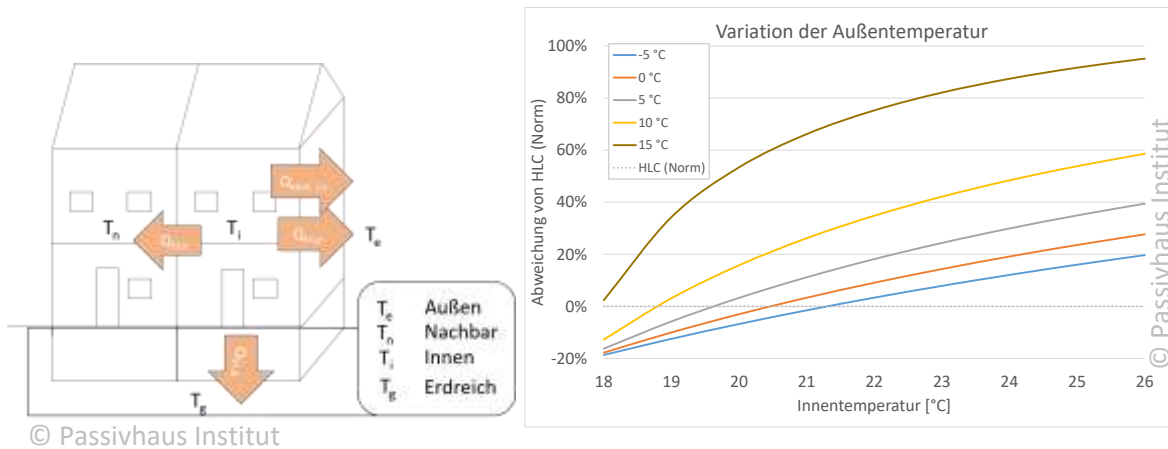
$$\delta HLC = \frac{\delta Q_{\text{Gewinn}}}{\Delta T} + \frac{Q_{\text{Gewinn}}}{(\Delta T)^2} (\delta T_i + \delta T_e)$$

mit dem Fehler der Innentemperaturen  $\delta T_i$  und der Außentemperatur  $\delta T_e$  und dem der Wärmegewinne  $\delta Q_{\text{Gewinn}}$ . Um den Wärmeverlustkoeffizienten mit hoher Genauigkeit zu messen ist daher zum einen auf einen kleinen Fehler der Messwerte, zusätzlich aber auch auf eine große Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zu achten.

Im besten Fall könnten durch eine Messmethode alle Wärmeströme getrennt oder zumindest die nach außen, zum Erdreich und z.B. in Nachbargebäude sowie Ventilationswärmeverluste unterschieden werden. Weitere Größen, die im Prinzip aus einer zeitaufgelösten Messung extrahierbar sind, wären die Solaraperturen, aufgelöst für die verschiedenen Himmelsrichtungen, sowie die wirksame Wärmekapazität. Der separaten Bestimmung der einzelnen Wärmeströme steht die starke Korrelation dieser Größen entgegen. Theoretisch wäre allerdings zumindest eine Separation der Wärmeströme zu verschiedenen Temperaturniveaus (Außenluft, Erdreich, Nachbar,...) möglich, wenn Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden. Eine Änderung der Temperatur im Gebäude hat allerdings immer auch kapa-



zitive Effekte zur Folge - es muss jedes Mal abgewartet werden, bis wieder ein eingeschwungener Zustand vorliegt -, so dass dadurch die Messdauer deutlich vergrößert würde. Somit wird dieser Ansatz zunächst nicht weiter verfolgt.

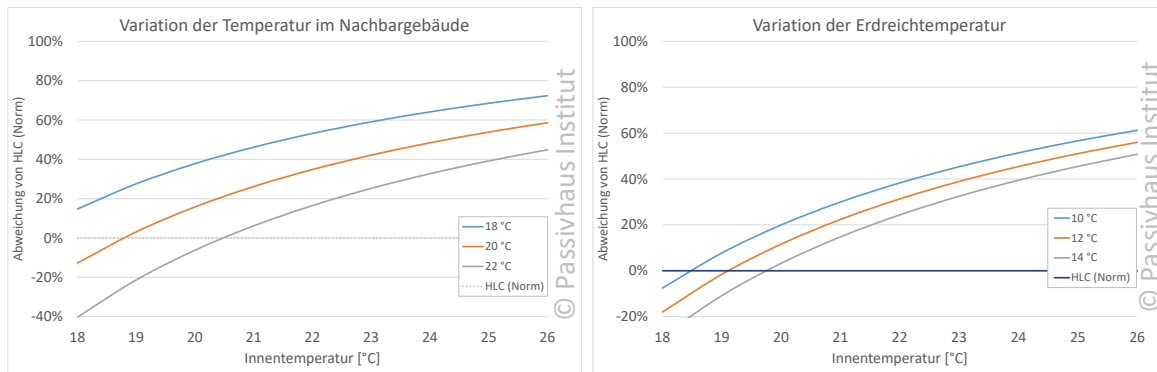


**Abbildung 5: Abweichung des zu erwartenden  $HLC$  für das Beispiel des in Kapitel 3 behandelten Reihenendhauses vom mit Normkorrekturfaktoren berechneten  $HLC(\text{Norm}) = H$  in Abhängigkeit von der Innentemperatur für verschiedene Außentemperaturen ( $T_g = 11^\circ\text{C}$ ).**

### 2.1.3 Temperaturabhängigkeit des Wärmeverlustkoeffizienten

Im Folgenden werden exemplarisch für das vermessene Reihenendhaus im Passivhaus-Standard die Einflüsse von Innen-, Außen- und Erdreichtemperatur sowie der Temperatur im Nachbargebäude auf den zu erwartenden Wärmeverlustkoeffizienten ( $HLC$ ) aufgezeigt. Dazu wurden die  $UA$ -Werte für alle an Außenluft, an das Erdreich sowie an den Nachbarn angrenzenden Bauteile addiert und die Gesamtwärmeströme entsprechend der jeweiligen Verhältnisse berechnet. Der resultierende  $HLC$  ergibt sich dann durch Division des Gesamtwärmestroms durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Da hier besonders die relativen Einflüsse aufgezeigt werden sollen, wird die relative Abweichung zu  $HLC(\text{Norm})$ , der Summe der mit den Temperaturkorrekturfaktoren  $f_t$  gewichteten  $UA$ -Werte jeweils in Abhängigkeit von der Innentemperatur dargestellt. Die Abweichungen verschwinden gerade dann, wenn die Messbedingungen den normativ festgelegten mittleren klimatischen Randbedingungen entsprechen. Da die Wärmeströme allerdings nicht unabhängig voneinander sind, gibt es beliebig viele weitere mögliche Kombinationen, die keine Abweichung ergeben. In Abbildung 5 sind die Abweichungen des  $HLC$  von  $HLC(\text{Norm})$  für verschiedene Außentemperaturen in Abhängigkeit von der Innentemperatur aufgetragen. Es wird hier deutlich, dass sowohl bei hohen Innen- als auch bei hohen Außentemperaturen der  $HLC(\text{Norm})$  deutlich überschätzt wird. Gerade bei erhöhten Innentemperaturen, wie sie typischerweise für Co-Heating-Messungen hergestellt werden ( $25^\circ\text{C}$ ), sind Abweichungen nach oben von bis zu 100 % zu erwarten. Hauptgrund für die große Elastizität der  $HLC$ s ( $\sim 40..100\%$  Änderung des  $HLC$  mit der Innentemperatur) sind die Wärmeströme durch die nur wenig gedämmte Zwischenwand zum Nachbargebäude. Würde

das Nachbargebäude isotherm betrieben, so würde die Abweichung des HLC in Abhängigkeit der Innentemperatur lediglich um weniger als 10 % schwanken. Dies zeigt, wie wichtig ein sorgfältiges Vorgehen bei der Wahl der Messprozedur ist.



**Abbildung 6: Abweichung des zu erwartenden HLC vom mit Normkorrekturfaktoren berechneten HLC (HLC(Norm)) in Abhängigkeit von der Innentemperatur für verschiedene Temperaturen im Nachbargebäude (links,  $T_g = 11 \text{ °C}$ ,  $T_e = 10 \text{ °C}$ ) und Erdreichtemperaturen (rechts,  $T_n = 20 \text{ °C}$ ,  $T_e = 10 \text{ °C}$ ).**

Wie groß der Einfluss durch das Nachbargebäude auf den zu erwartenden  $HLC$  ist, wird in Abbildung 6 links deutlich. Der  $HLC$  ändert sich um über 10 % pro Kelvin Temperaturänderung im Nachbargebäude. Wird die Temperatur im Nachbargebäude nicht kontrolliert, so sind Abweichungen von einigen Kelvin leicht möglich und selbst durch Messung kann die mittlere Temperatur im Nachbargebäude vermutlich nicht wesentlich genauer als auf 0,5 K bestimmt werden.

Einen deutlich geringeren Einfluss auf  $HLC$  hat dagegen die Erdreichtemperatur (vgl. Abbildung 6, rechts). Die monatlichen Erdreichtemperaturen, die im PHPP in Anlehnung an die DIN 13370 bestimmt werden, sind messtechnisch kaum zugänglich. Hier wurden im PHPP verschiedene Bodenmaterialien (trockener bzw. feuchter Sand/Kies und Lehm) sowie unterschiedliche Innentemperaturen angesetzt und die Auswirkungen auf  $T_g$  untersucht. Es ergab sich eine parameterabhängige Schwankungsbreite von ca. 2 K und eine jährliche Schwankung von ca. 4 K. Wird für die Erdreichtemperatur eine Unsicherheit von 2 K angenommen, so beträgt die Unsicherheit für den  $HLC$  nach Abbildung 6 rechts, knapp 5 %.

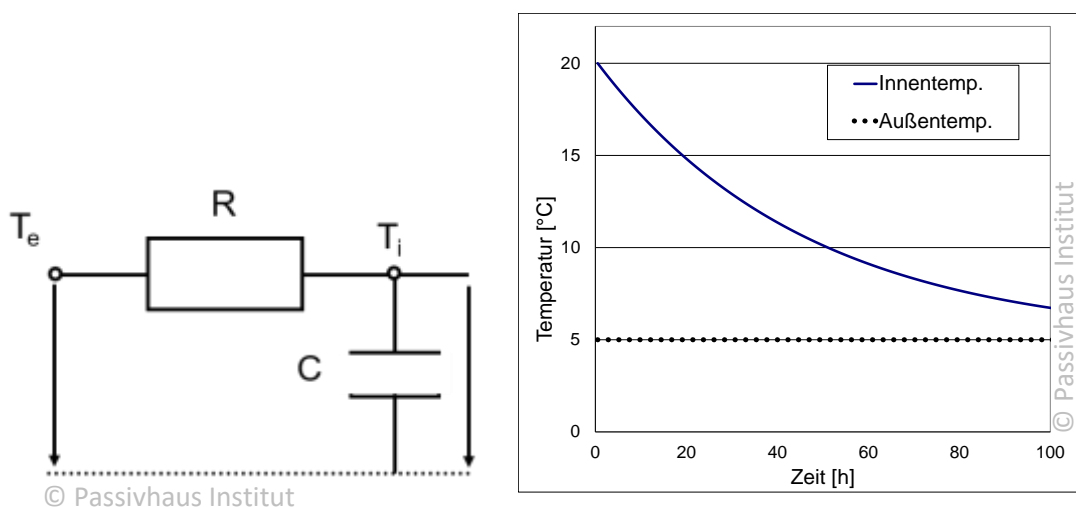
Der Wärmeverlustkoeffizient entsprechend der Normbedingungen kann nur mit hohen Unsicherheiten bestimmt werden. Abweichungen zwischen geplanter und ausgeführter energetischer Qualität können trotzdem durch Vergleich vom gemessenen HLC mit dem aus den während der Messung vorliegenden Randbedingungen bestimmten HLC (z.B. aus PHPP) erfolgen. Aus den Darstellungen der Abweichungen des HLC vom normativen Wert in Abhängigkeit der Innentemperatur können auch die prozentualen Abweichungen für bestimmte Messbedingungen (Temperaturen) in Abhängigkeit des zu erwartenden Fehlers abgeschätzt werden.

## 2.2 Parameteridentifikation

Da zumindest die Außentemperatur in der Regel nicht als konstant angenommen werden kann, ist die Einbeziehung dynamischer kapazitiver Effekte naheliegend. Dies ist mit Widerstands-Kapazitäten-Modellen (analog zur Elektrotechnik) möglich. Das Ziel bei der Parameteridentifikation ist es, die Bestimmungsstücke des RC-Netzwerks, d.h. die Werte für die R's und C's, aus einer Zeitreihe von Messwerten zu bestimmen. Je mehr Parameter das Modell hat, umso flexibler ist eine Anpassung möglich, umso mathematisch aufwändiger ist allerdings auch die Parameterbestimmung (Suche eines Minimums in einem multidimensionalen Raum). Die zwei wichtigsten Punkte bei der Parameteridentifikation sind zum einen die Identifikation eines passenden RC-Modells und zum anderen die Suche nach den optimalen Parametern, die ein rein mathematisches Problem darstellt. Ein im Bereich thermischer Systeme verbreitetes Softwaretool zur Parameteridentifikation ist LORD (LOGical R-Determination) [Gutschker2005, Gutschker2012]. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Softwarepakete "MRQT/PASTA". Für die in diesem Abschnitt beschriebene Parameterbestimmung wurde LORD eingesetzt.

### 2.2.1 Parameteridentifikation mit LORD

Die Modelle, die mit LORD abgebildet werden können, sind RC-Netzwerke, die aus den einzelnen Widerstands- und Kapazitätselementen sowie Knoten zwischen ihnen bestehen. Randbedingungen wie Temperaturen und Wärmeströme an einzelnen Knoten können vorgegeben werden. Alle unbekanntene Eigenschaften können durch Parameteridentifikation bestimmt werden. Anschließend können auch globale Eigenschaften wie die UA-Werte des Systems oder, unter Berücksichtigung der Solarstrahlung, auch gA-Werte abgeleitet werden.



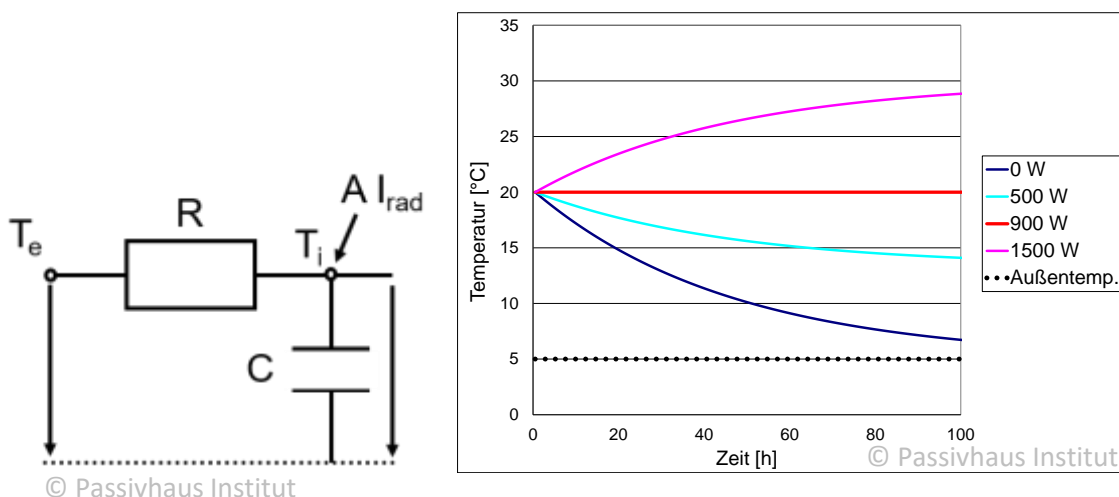
**Abbildung 7:** RC-Glied zwischen innen ( $T_i$ ) und außen ( $T_e$ ) (links) sowie das zugehörige Temperaturprofil für die Innentemperatur bei konstanter Außentemperatur (rechts).

Das einfachstmögliche Modell, abgesehen von einem einzelnen Widerstand oder einer einzelnen Kapazität, ist ein RC-Glied, wie es in Abbildung 7 dargestellt ist. Wenn man von dem Gebäudeleitwert oder der Wärmekapazität eines Gebäudes spricht, steckt in der Regel genau dieses Modell dahinter. Dass es sich hierbei nur um eine grobe Vereinfachung handeln kann, ist offensichtlich (z.B. frequenzabhängige Wärmekapazität s. später). Mathematisch lässt sich der Verlauf der Innentemperatur in dem Fall durch die Differentialgleichung

$$\frac{dT_i}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot (T_i - T_e) + \frac{P}{C}$$

mit der Heizleistung  $P$  beschreiben. Im Beispiel in Abbildung 7 wurde von einem „free floating“ Zustand ( $P = 0$ ) ausgegangen. Dadurch fällt der letzte Summand weg. Anhand des Verlaufs der Innentemperatur kann daher keine Information über den Widerstand bzw. Leitwert oder die Kapazität gewonnen, sondern nur noch das Produkt  $RC = \tau$ , die Zeitkonstante des Netzwerks, bestimmt werden. Hieraus lässt sich bereits ableiten, dass für eine statische Messung des HLC eine bekannte Heizleistung oder Solarstrahlung zwingend erforderlich ist.

Daher wurde dasselbe Modell noch einmal mit Heizleistungen zwischen 500 W und 1500 W ( $1/R = 60 \text{ W/K}$ ) berechnet und die Temperaturverläufe in Abbildung 8 dargestellt. Um eine konstante Innentemperatur von 20 °C zu halten, sind in diesem Fall gerade 900 W nötig. Ist die Heizleistung höher, so steigt die Temperatur. Für ein solch einfaches Modell bestimmt LORD genau die Parameter ( $R$  &  $C$ ), die in die Rechnung hineingesteckt wurden.



**Abbildung 8:** RC-Glied zwischen innen ( $T_i$ ) und außen ( $T_e$ ) unter Berücksichtigung solarer Gewinne  $A I_{rad}$  mit der Apertur  $A$  und der Solarstrahlung  $I_{rad}$  (links). Rechts ist das entsprechende Temperaturprofil mit konstanter Außentemperatur von 5 °C bei effektiven Heizleistungen bzw. solaren Gewinnen  $A I_{rad}$  zwischen 0 und 1500 W dargestellt.

Da die Temperaturverteilung selbst in einer monolithischen Wand nicht homogen ist, sind in den meisten Fällen selbst für einzelne Bauteile (z.B. eine Wand) die anzusetzenden RC-Modelle eigentlich deutlich komplexer. Ein Ansatz zur detaillierteren Beschreibung einer Wand ist die Verwendung einer Kette von RC-Elementen. Je nach Aufbau sind in den meisten Fällen für eine realistische Wiedergabe des physikalischen Verhaltens 3-10 RC-Elemente notwendig. Soll ein Raum bzw. ein ganzes Gebäude beschrieben werden, müssen die verschiedenen Pfade für Wärmeströme durch z.B. Außenwände, Dach, Boden, Fenster und Infiltration durch eine Zusammenschaltung verschiedener Ketten erfolgen. Im Endeffekt wird ein solch detailliertes Modell bei der dynamischen Gebäudesimulation mit DYNBIL erstellt und berechnet, allerdings mit dem Unterschied, dass dies lediglich für einen einzigen vorgegebenen Parametersatz erfolgt. Selbst mit dem sehr effizienten Rechenverfahren von DYNBIL dauert eine Berechnung über einen Zeitraum von mehreren Monaten einige 10 s bis Minuten. Damit wäre eine Parameteridentifikation für alle einzelnen Eingabegrößen einer dynamischen Gebäudesimulation extrem zeitaufwändig. Daneben wären die vielen Parameter dennoch nur sehr ungenau bestimmbar (Korrelation). Daher werden für die Parameteridentifikation deutlich einfachere Modelle verwendet. Kramer hat in einer Vergleichsstudie das Verhalten von verschiedenen thermischen und hygrischen RC-Modellen mit Messungen verglichen und herausbekommen, dass ein Modell mit vier Knoten (wie es in Abbildung 11 verwendet wurde) in vielen Fällen schon gute Ergebnisse liefert. Für die Validierung von Programmen wie Dynbil muss daher auch ein anderer Weg eingeschlagen werden: Dieser hat viele Einzelschritte, zu denen u.a. die Einzelvalidierung von Teilmodellen anhand von Detailstudien gehört (z.B. Vergleich des Modells zur instationären Wärmeleitung in Außenbauteilen, vgl. [Feist 1994]). Die Parameteridentifikation wird im folgenden Abschnitt zur Auswertung der Messung einer Testbox angewendet.

## 2.2.2 Round-Robin Experiment: Auswertung

Im Rahmen der Tätigkeiten des internationalen IEA EBC Annex 58 Konsortiums wurde eine Testbox gebaut und an verschiedenen Standorten in Europa aufgestellt und betrieben. Die gemessenen Temperaturen (Außen- und Innenlufttemperatur, die Oberflächentemperaturen sowie Heizleistungen) wurden im Rahmen der Common Exercise 3 zugänglich gemacht. Aufgabe war es, daraus unter anderem den Wärmeverlustkoeffizienten zu bestimmen. Die Daten der Messung in Leuven wurden mit dem Programm LORD evaluiert und verschiedene Modelle angepasst.

Bei der Box (vgl. Abbildung 9) handelt es sich um einen  $1,2 \times 1,2 \times 1,2 \text{ m}^3$  großen Kubus mit einem Fenster ( $52 \text{ cm} \times 52 \text{ cm} = 0,27 \text{ m}^2$ ). Die Wandstärke beträgt ca. 12 cm. Über die genauen Wandaufbauten und die konstruktiven Eigenschaften der Box wurden zunächst keine weiteren Details bekannt gegeben. Die Box wurde sowohl im Co-Heating-Modus bei konstanter Innentemperatur als auch Free-floating betrieben. Gemessen wurden alle Oberflächentemperaturen an den Innen- und Außenseiten (Abbildung 10)

sowie die Heizleistungen und Wärmeströme durch reguläre Flächen und die Solarstrahlung (lang- & kurzweilig).



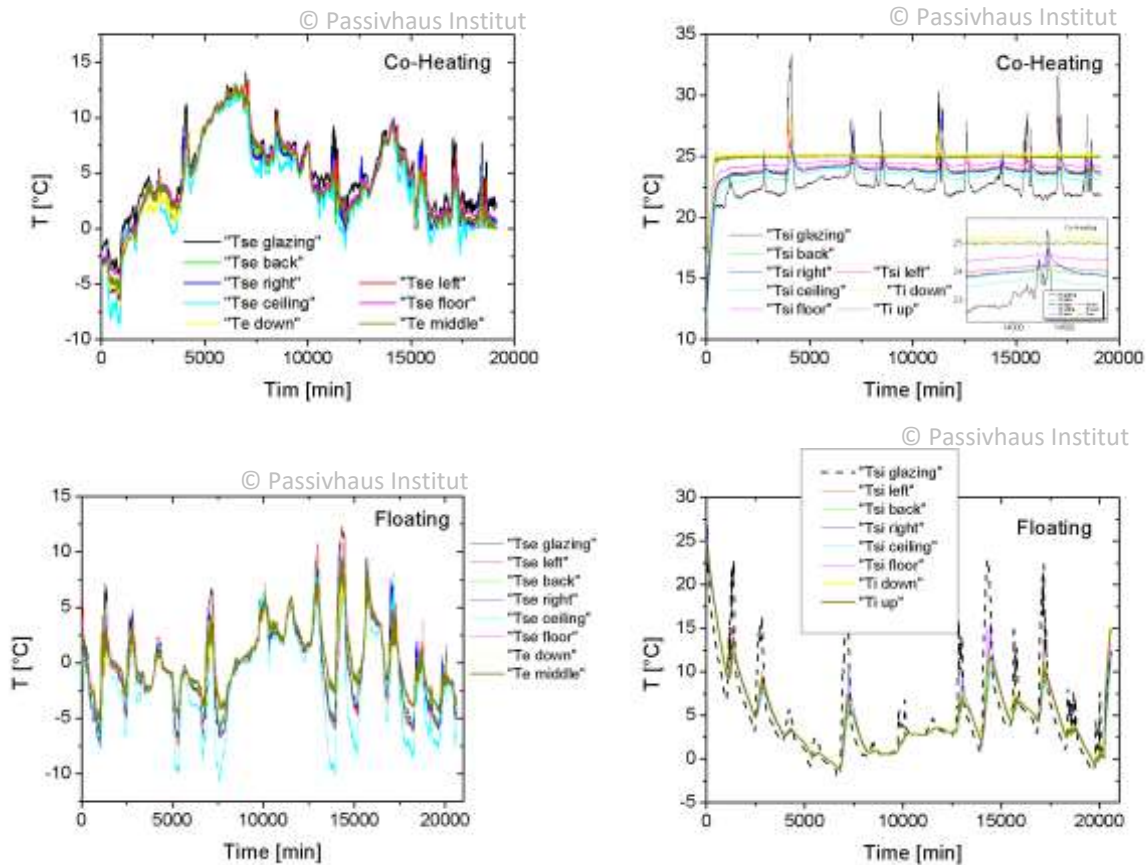
**Abbildung 9:** Foto der Round-Robin-Testbox während der Messung im Januar/Februar 2013 (Bild: KU Leuven)

Zur Parameteridentifikation wurden verschiedene Modelle getestet. Als gut passend hat sich das in Abbildung 11 dargestellte RC-Modell herausgestellt, welches insgesamt 8 Parameter (vier Widerstände, drei Kapazitäten und eine Apertur) enthält. Es wird von einem Modell mit 4 Knoten ausgegangen, bei denen es sich um die Außentemperatur, die (mittlere) Oberflächentemperatur in der Box und die (mittlere) Lufttemperatur in der Box sowie einen Knoten in der Kapazitätsbehafteten Wand handelt. Die Wände werden durch zwei Widerstände ( $H_{12}$  und  $H_{23}$ ) mit der dazwischen liegenden Kapazität  $C_2$  repräsentiert. Der Oberflächentemperaturknoten hat die Kapazität  $C_3$  und die Lufttemperatur die Kapazität  $C_4$ . Zwischen innen und außen gibt es noch eine kapazitätslose Verbindung, das Fenster, oder auch für Wärmeströme durch Ventilation. Es wird angenommen, dass die Solarstrahlung reduziert durch die Apertur  $A$  auf die Oberflächentemperatur wirkt. Die Heizleistung koppelt dagegen direkt an die Lufttemperatur an.

Ausgewertet wurden eine Co-Heating- und eine Free-Floating-Phase der Messung. Es wurde jeweils das Residuum der Innenlufttemperatur, also die Differenz zwischen gemessener Innenlufttemperatur und der des Modells, minimiert. Dargestellt sind in Abbildung 11 jeweils die Abweichungen zwischen gemessener und berechneter



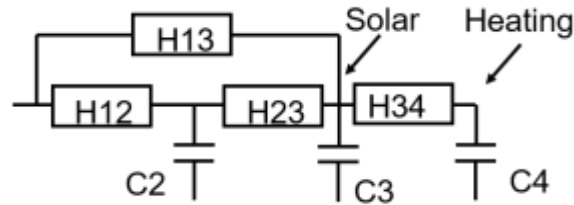
Innentemperatur und die jeweiligen Verläufe. Daneben sind die entsprechenden Parameter sowie deren abgeschätzte Fehler und das Residuum und der UA-Wert aufgeführt.



**Abbildung 10:** Temperaturprofile der Außen- (links) und Innenoberflächentemperaturen (rechts) für den Co-Heating- (oben) und free floating Betrieb (unten) je für alle 6 Seiten. Zusätzlich sind zwei Innenlufttemperaturen  $T_i$  (down & up) und zwei Außenlufttemperaturen  $T_e$  in der Nähe der Box und unter der Box (middle & down) aufgetragen.

Bei der Verwendung des Datensatzes der gesamten Co-Heating-Phase inklusive des Aufheizvorgangs (Co-Heating (I)) ergab sich ein Residuum von 0,25 K, was einer mittleren Abweichung um 0,25 K entspricht. Der resultierende HLC nach außen beträgt 4,03 W/K und weist nur einen sehr geringen Fehler auf. Den identifizierten Parametern nach ist der Anteil des Wärmestroms durch die kapazitätslose Verbindung (H13) sehr gering und Wärmeverluste treten im Wesentlichen durch H12 und H23 auf. Der größte Fehler von über 100 % der Einzelparameter wird für den Leitwert zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur festgestellt. Der hohe Leitwert spricht für eine erwartungsgemäß starke Kopplung zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur. Grundsätzlich sind die erhaltenen Werte für Widerstände und Kapazitäten plausibel. Auch die Apertur passt zur vorhandenen Glasfläche und einem g-Wert von 0,5.



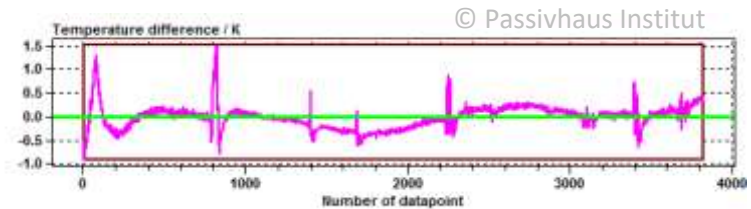


© Passivhaus Institut

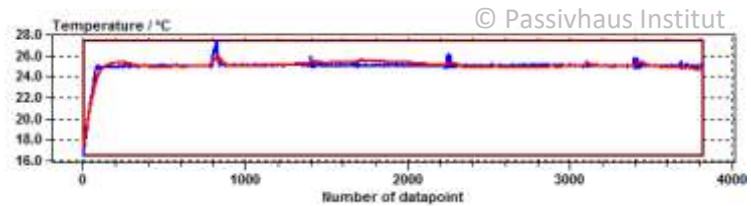
## Co-Heating (I)

Parameter	Wert	Fehler
Residual	0.25 K	
UA-Wert	4.03 W/K	0.3%
H03-02	5.2 W/K	0.6%
H04-03	1976 W/K	> 100 %
H01-02	15.5 W/K	1.8%
H01-03	0.13 W/K	14.2%
C2	0.28 MJ/K	18.2%
C3	0.11 MJ/K	35.4%
C4	0.42 MJ/K	5.4%
A	0.145	5.2%

© Passivhaus Institut



© Passivhaus Institut

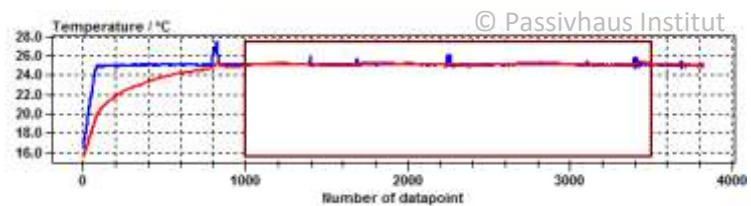


© Passivhaus Institut

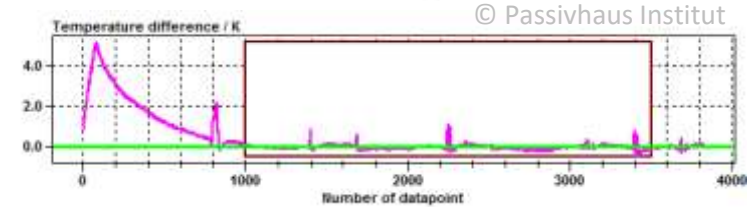
## Co-Heating (II)

Parameter	Wert	Fehler
Residual	0.12 K	
UA-Wert	4.04 W/K	0.1%
H03-02	0.715 W/K	0.9%
H04-03	456.3 W/K	13.3%
H01-02	6.35 W/K	3.9%
H01-03	3.44 W/K	0.1%
C2	3.0 MJ/K	5.5%
C3	0.71 MJ/K	2.2%
C4	3e-4 MJ/K	>100 %
A	0.135	1.5%

© Passivhaus Institut



© Passivhaus Institut

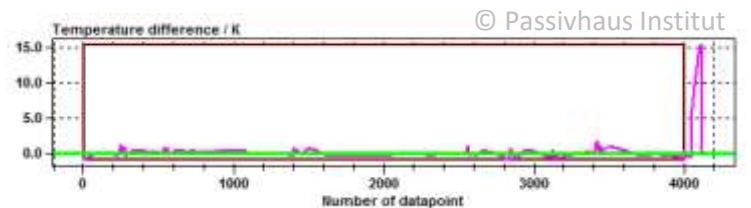


© Passivhaus Institut

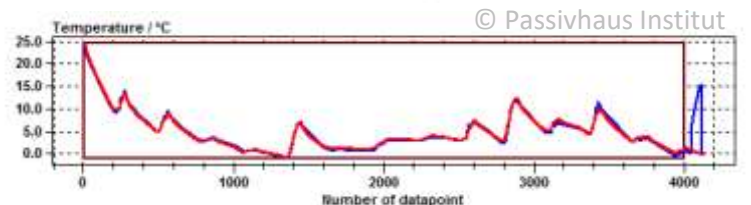
## Free-Floating

Parameter	Wert	Fehler
Residual	0.36 K	
UA-Wert	10.4 W/K	1.5%
H03-02	48.3 W/K	>50 %
H04-03	1993 W/K	>100 %
H01-02	2.4 W/K	20.1%
H01-03	8.2 W/K	5.7%
C2	0.52 MJ/K	11.8%
C3	0.31 MJ/K	17.3%
C4	3e-4 MJ/K	>100 %
A	0.361	6.7%

© Passivhaus Institut



© Passivhaus Institut



© Passivhaus Institut

Abbildung 11: Für die Parameteridentifikation verwendetes RC-Netzwerk (oben) und resultierende Parameter mit Fehlerangaben sowie Innentemperaturen und Abweichungen der Innentemperaturen für Co-Heating- und Free-Floating-Phasen. Die Kästen in den Diagrammen kennzeichnen die ausgewerteten Zeiträume.

Da bei der ersten Auswertung der Temperaturanstieg am Anfang mit ausgewertet wurde, der nicht der Idee des Co-Heatings entspricht und durch kapazitive Effekte beeinflusst wird, wurde derselbe Datensatz erneut mit einem verkürzten Zeitraum ausgewertet (CoHeating(II)). Erwartungsgemäß wird das Residuum kleiner. Der UA-Wert bleibt allerdings nahezu unverändert. Auffällig ist, dass sich die einzelnen Parameter sehr deutlich ändern. So erhöht sich beispielsweise der kapazitätslose Leitwert zwischen innen und außen von 0,13 W/K auf 3,44 W/K.

Die Auswertung der Free-Floating-Phase weist bei deutlich höheren Schwankungen der Innentemperatur ein größeres Residuum auf als die Auswertung der Co-Heating-Phase. Die Übereinstimmung von gemessener und angepasster Innentemperatur sieht optisch sehr gut aus. Trotzdem ist der Gesamtleitwert mit 10,4 W/K etwa 2,5-mal größer als bei der Parameteridentifikation für die Co-Heating-Phase. Dies würde zu massiven Fehlern führen, wenn ein so angepasstes Modell für die Auswertung des Jahresheizwärmebedarfs verwendet würde.

Um die Ergebnisse der Parameteridentifikationen besser einordnen zu können, wurde zunächst der UA-Wert grob abgeschätzt. Ein Fenster-U-Wert von 1 W/(m<sup>2</sup>K) und eine 60 mm Dämmung der WLG 040 ergeben einen Wärmeverlustkoeffizienten von 4,2 W/K. Wärmebrücken sind hier allerdings nicht einbezogen. Bei einer später erfolgten Analyse der Box durch die KU Leuven wurde ein HLC von 3,91 W/K mit asymmetrischen Unsicherheiten von +0,3 W/K und -0,7 W/K ermittelt. Die Gesamtleitwerte aus den Co-Heating-Tests stimmen sehr gut mit dem gemessenen überein. Dagegen stellt sich das Ergebnis der Free-Floating-Phase im Vergleich zur Messung als deutlich zu hoch heraus. Der Betrieb bei konstanter Temperatur (Co-Heating) scheint hier zu deutlich besseren Ergebnissen für den Gesamtleitwert zu führen als eine schwankende Innentemperatur.

Festzuhalten gilt es, dass die enthaltenen Parameter aus den Co-Heating Tests sehr unterschiedlich sind und damit der Aussagegehalt für einzelne Parameter in Frage gestellt wird. Die Methode der Parameteridentifikation für ganze Gebäude scheint daher nur brauchbar, wenn ein geeignetes Lastprofil angelegt wurde und dann auch nur für manche Parameter. Der Wunsch, die Leitwerte einzelner Bauteile getrennt bestimmen zu können, scheint damit nur schwer erfüllbar zu sein.

## 2.3 Virtuelle Experimente

Aufbauend auf den Vorüberlegungen wurden virtuelle Experimente an Hand von dynamischen Simulationen mit [DYNBIL] durchgeführt. Ziel war zum einen die Untersuchung der Bestimmbarkeit des Wärmeverlustkoeffizienten unter verschiedenen Randbedingungen und zum anderen die Ableitung eines geeigneten Messzyklus. Ausgangspunkt war das detaillierte Modell eines Reihenhauses des Modellprojekts Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg [Kaufmann 2001]. Das Modell (vgl. Abbildung 12) besteht aus 13 Zonen, wobei die Zonen 1-10 die verschiedenen Räume darstellen

und die Zonen 11-13 die Haustechnik abbilden. Für den Betrieb des Gebäudes mit elektrischen Heizmitteln und ohne Betrieb der Lüftungsanlage können die Zonen 11-13 ignoriert werden können. Der Vorteil der virtuellen Experimente ist, dass mit vergleichsweise geringem Aufwand Vereinfachungen durchgeführt und Einflüsse einzelner Parameter untersucht werden können. So konnten zunächst konstante Außentemperaturen angesetzt und Solarstrahlung eliminiert werden. Unter diesen Bedingungen wurden auch die zu erwartenden Wärmeverlustkoeffizienten bestimmt.

Eine wichtige Erkenntnis aus den virtuellen Vorexperimenten war, dass der Einschwingvorgang bei Temperaturänderungen bedeutend schneller erfolgt, wenn die Strahlungstemperatur anstelle der Lufttemperatur auf einen konstanten Sollwert geregelt wird. Unabhängig davon ist durchaus eine Beheizung der Raumluft möglich.

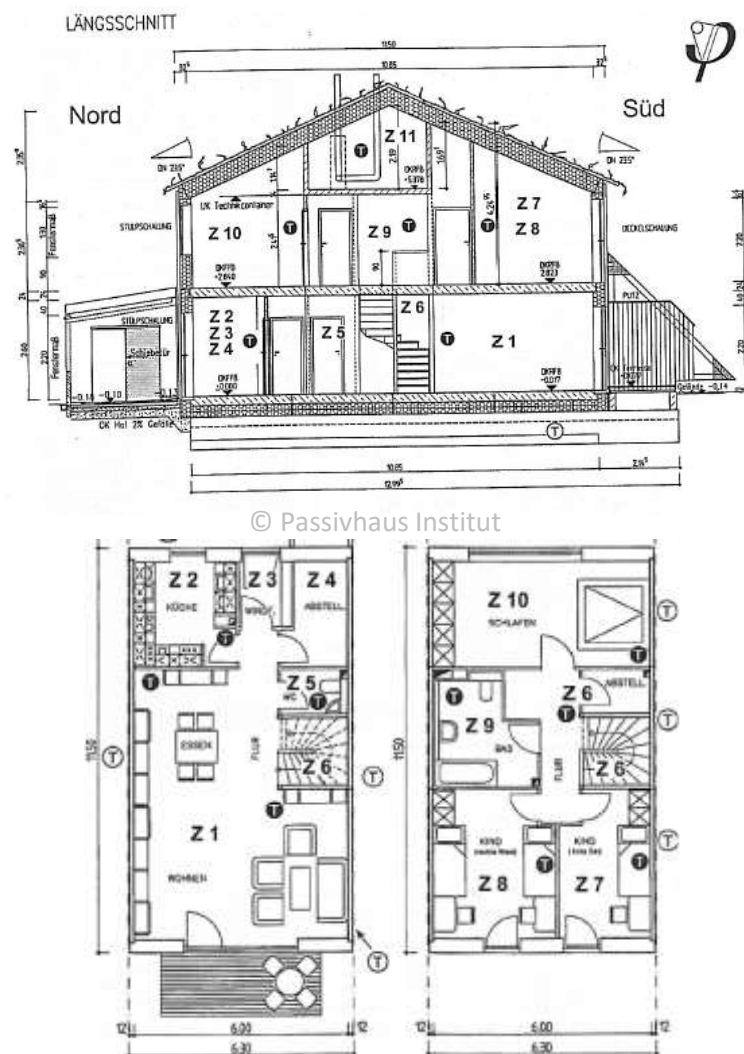


Abbildung 12: Ansicht und Grundrisssskizzen mit Zonenzuordnungen des Reihenhauses in Hannover Kronsberg.

### 2.3.1 Sensitivitätsanalyse mit dynamischen Simulationen

Zunächst wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Temperaturen in einem evtl. vorhandenen Nachbarhaus identisch sind, also eine adiabate Anschlussbedingung zum Nachbarn vorliegt. Außerdem wird angenommen, dass keine Wärmeströme ins Erdreich auftreten ( $H_{t,g} = 0$  durch adiabate Randbedingung bzw. Reduktion der Fläche auf null).

#### 2.3.1.1 Sensitivität bzgl. $H_{t,a}$

Der Wärmeverlustkoeffizient für Transmission durch die Hülle beträgt 35 W/K. Der Wärmestrom durch die Hülle beträgt bei 12 K Innentemperaturdifferenz 420 W. Eine Messgenauigkeit von 10% erfordert also eine Bestimmung der mittleren Leistung auf 40 W genau.

#### 2.3.1.2 Sensitivität bzgl. Erdreich

Wird das Erdreich zusätzlich angekoppelt, mit einer Temperatur von ca. 13 °C unterhalb der Bodenplatte, so wächst die mittlere Leistung um 104 W. Die oben genannte Fehlermarge wird also im Beispielobjekt schon ausgeschöpft, wenn die Erdreichtemperatur sich um  $\pm 3$  K ändert.

Der Leitwert durch die Bodenplatte an die Erdoberfläche kann im Prinzip gut rechnerisch ermittelt werden (vgl. [AkkP-27]), allerdings sind die Erdreischeigenschaften oder etwaige Grundwasserströmungen i.a. nicht genau bekannt. Im Rahmen einer Messkampagne von maximal 2 Wochen können sich im Erdreich keine quasi-stationären Verhältnisse einstellen. Man wird annehmen dürfen, dass sich die Temperatur unter einer gut gedämmten Bodenplatte während des Experiments nur wenig ändert, auch wenn die Raumtemperaturen für einige Tage deutlich erhöht werden sollten. Problematisch ist vor allem bei Neubauten die Tatsache, dass die Erdreichtemperatur noch nicht eingeschwungen ist und daher auch einer rechnerischen Abschätzung nur begrenzt zugänglich ist.

Je nach Gebäude stellen die Unsicherheiten im Wärmeverlust durch das Erdreich eine gravierende Störgröße dar.

#### 2.3.1.3 Sensitivität bzgl. Nachbargebäuden

Das untersuchte Reihenendhaus grenzt auf einer Fläche von ca. 87 m<sup>2</sup> ans benachbarte Reihenhaus bzw. an einen Technikraum. Die Temperaturen in den angrenzenden Räumen liegen um etwa 1 K über den Sollwerten für die Raumtemperatur, die Trennwand ist aus Schallschutzgründen mit 6 cm Mineralwolle gedämmt und besitzt einen U-Wert von 0,53 W/(m<sup>2</sup>K).

Werden die Trennwände zu den Nachbargebäuden in der Simulation berücksichtigt, so sinkt die mittlere Leistung um 20 W. Bleiben die Temperaturen in den angrenzenden Räumen während der Messung weitgehend konstant und wird die Raumtemperatur im untersuchten Gebäude möglichst nah an der Temperatur in den Nachbarräumen gehalten (und/oder kann der U-Wert der Wand zum Nachbarn als bekannt betrachtet werden), so kann die durch diesen Einfluss entstehende Unsicherheit auf ein akzeptables Maß reduziert werden. Die Ergebnisse aus den virtuellen Experimenten stimmen sowohl für Wärmeströme zu Erdreich als auch zu Nachbarn sehr gut mit der Vorüberlegung in Abschnitt 2.1.3 überein.

#### 2.3.1.4 Erforderliche Heizleistung

Welche Leistung für das Experiment installiert sein muss, hängt natürlich zum einen vom Gebäude ab, zum anderen aber auch von der Art und Weise, in der die Raumtemperaturen gehalten werden sollen. Ist lediglich eine konstante Raumtemperatur erforderlich und bleiben die Innentüren geöffnet, so kommt man gerade im Passivhaus mit kleinen Leistungen aus, die ohne weiteres über das vorhandene Niederspannungsnetz transportiert werden können. Bei einer Absicherung mit 16 A an 240 V stehen ca. 3000 W je Stromkreis zur Verfügung. Bei Gebäuden mit geringerem Dämmstandard ist auf eine ausreichende Absicherung der Stromkreise verstärkt zu achten.

#### 2.3.1.5 Neubauten

Bei Neubauten können deutlich abweichende Erdreichtemperaturen auftreten. Wenn z.B. das Gebäude zuvor nicht oder erst kurz beheizt wurde, kann die Erdreichtemperatur deutlich unterhalb derjenigen für ein eingeschwungenes Gebäude liegen. In diesem Fall sind genauere Vorbetrachtungen notwendig. Über diesen Punkt hinaus besteht bei Neubauten ein erhöhter Heizwärmebedarf, da für das Trocknen der Baufeuchte zusätzliche Energie notwendig ist.

#### 2.3.2 Messdauer

Die Dauer der Messung, in der das Gebäude der normalen Nutzung nicht zugänglich ist und in der die Messung überwacht werden muss, stellt ein wesentliches Hemmnis für den breiten Einsatz solcher Verfahren zur Qualitätssicherung dar. Für die aus England bekannte Co-Heating-Methode sind typische Zeiträume von 2-4 Wochen für den gesamten Messzyklus bzw. 1-2 Wochen nach Einstellen einer konstanten Temperatur vorgesehen [Johnston2012]. Für Passivhäuser ist auf Grund der geringeren Leitwerte eher von größeren Zeitkonstanten auszugehen. Daher erscheint die Frage nach der Messdauer als eine sehr zentrale. Testweise wurde das Reihenendhaus bei konstanten Außenbedingungen und mit adiabatisch gehaltener Trennwand zum Nachbarn im Co-Heating-Modus bei konstanter Innenoberflächentemperatur betrieben und die Heizleistung berechnet. Das Ergebnis der so jeweils erhaltenen, zeitaufgelösten Wärmeverlustkoeffizienten  $\frac{Q(t)}{\Delta T(t)}$  ist in Abbildung 13 aufgetragen.



Auffällig sind die starken zeitlichen Schwankungen, die im Wesentlichen auf die schwankende Solarstrahlung zurückzuführen sind. Um zu sehen, welche minimale Messdauer für die Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten sinnvoll ist, wurde zusätzlich der gleitende Zeitmittelwert aufgetragen. Unter der Annahme, dass die solaren Gewinne exakt gemessen werden können, scheint hier eine Messdauer von 2 Tagen, nach der der Mittelwert die 10 % Marke oberhalb des erwarteten HLC nicht mehr verlässt, zu genügen -. Betont werden sollte an dieser Stelle, dass die Außentemperatur hier konstant gehalten wurde. Bei realen Außenbedingungen mit schwankenden Außentemperaturen wird sich die notwendige Messdauer daher noch einmal verlängern. Eine wichtige Erkenntnis aus dieser Betrachtung ist außerdem, dass die solaren Gewinne nennenswert die Messung stören bzw. die Messdauer verlängern. Es ist daher darüber nachzudenken, wie der Einfluss der Solarstrahlung während der Messung reduziert werden könnte.

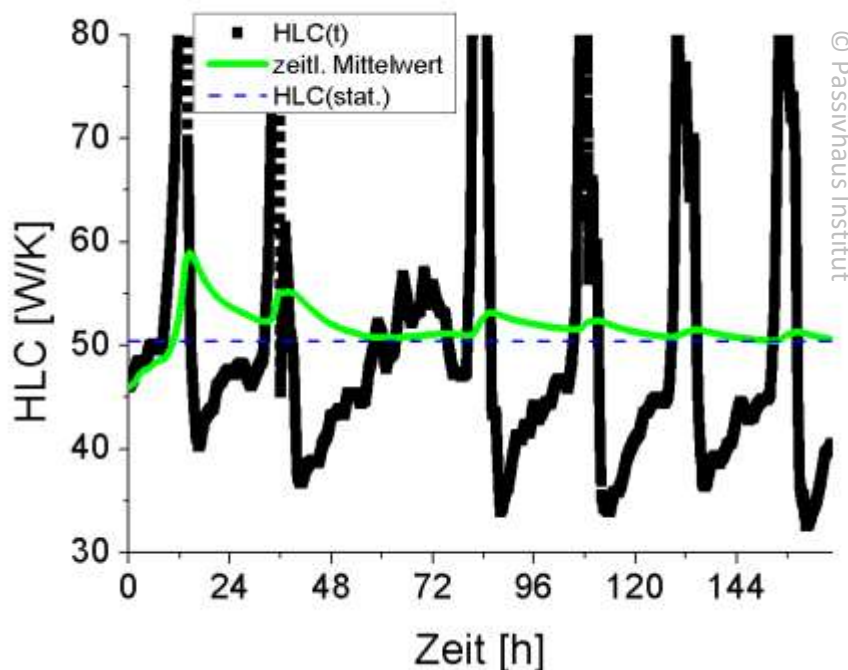


Abbildung 13: Zeitabhängiger Wärmeverlustkoeffizient  $HLC(t)$ , bestimmt aus der jeweiligen Momentanleistung (Heizung + Solarstrahlung) und der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen für das Reihenendhaus Kronsberg. Daneben sind der Mittelwert des HLC (berechnet mit den Mittelwerten von Temperaturdifferenz und Leistung bis zum jeweiligen Zeitpunkt) in grün und der zu erwartende statische HLC (gestrichelt) aufgetragen.

### 2.3.3 Kontrolle der solaren Gewinne - Abkleben der Fenster

Die solaren Gewinne durch die Fenster können ein wesentlicher Teil der Energiebilanz werden (vgl. auch Abbildung 4). Sie sind jedoch nur schwer genau zu bestimmen. Die durch die Scheibe transmittierte Solarstrahlung wäre möglicherweise einer direkten Messung zugänglich; zu beachten wäre dabei die Verschiebung des Spektrums aufgrund unterschiedlicher Absorption der Verglasung bei verschiedenen Wellenlängen. Einen großen Anteil an den solaren Gewinnen stellen jedoch die sogenannten sekundären Wärmegewinne dar, d.h. derjenige Teil der in der Verglasung absorbierten Solarstrahlung, der als Wärmestrahlung in den Raum gelangt. Dieser hängt von den thermischen und strahlungsphysikalischen Eigenschaften der eingebauten Verglasung ab, die jedoch nicht als sicher bekannt angenommen werden können.

Wie in Abbildung 13 gezeigt, stellen die solaren Gewinne eine Störgröße dar, die idealerweise weitgehend eliminiert wird. Hierzu könnte eine reflektierende Folie, z.B. eine Rettungsdecke, vollflächig auf der Außenseite der Verglasung angebracht werden. Die genauen Eigenschaften solcher Rettungsdecken sind allerdings nicht bekannt. Wir gehen zunächst pessimistisch von einem solaren Reflexionsgrad von 90%, einer solaren Transmission von 10% und einer Emissivität im thermischen Infrarot von ebenfalls 90% aus.

Die solaren Gewinne im untersuchten Zeitraum betragen für das Beispielobjekt im Mittel 127 W. Mit abgeklebten Fenstern verbleiben noch 16 W, allerdings reduziert sich die Abstrahlung an den Himmel und an die Umgebung, so dass die mittlere Heizleistung gegenüber dem hypothetischen Fall ohne Solarstrahlung um 27 W sinkt. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass sich das untersuchte Objekt in einer Reihenhaussiedlung befindet, relativ kleine Fenster besitzen und die Simulationsrechnungen für den Monat Dezember durchgeführt wurden. All diese Faktoren führen dazu, dass die solaren Wärmegewinne relativ gering sind und in anderen Fällen einen noch größeren Einfluss besitzen würden.

Das Abkleben der Fenster mit Rettungsdecken erscheint daher als aussichtsreiche Methode. Für die reduzierte Abstrahlung an Umgebung und Himmel ist eine Korrekturrechnung möglich. Wenn die verbleibende Transmission beispielsweise nur 1% statt 10% beträgt, sei es aufgrund der Eigenschaften der Rettungsdecke, oder eine zusätzliche opake Schicht, lässt sich der Einfluss der solaren Gewinne so ausreichend weit verringern, dass sie vernachlässigbar werden. Als opake Schicht wurden in der Folge XPS-Platten eingesetzt. Diese haben den Vorteil, dass durch die Dämmwirkung neben der Transmission von Solarstrahlung auch die sekundären Gewinne minimiert werden und damit solare Gewinn vernachlässigbar werden. Dies zeigt sich auch an den Heizleistungen, die keine nennenswerten Tag-Nacht-Schwankungen aufweisen. Dies muss allerdings auf Grund der zusätzlichen Dämmung mit einer geringeren Sensitivität auf die Glas U-Werte erkaufte werden. Dies erscheint akzeptabel, da eine separate Glas U-Wert Messung im Zweifelsfall möglich ist (vgl. [Feist 2016]).



## 2.3.4 Temperaturprofil

### 2.3.4.1 Wirkung von Temperaturänderungen

Es ist am einfachsten, das Gebäude etwa bei der Temperatur weiterzutreiben, die vor Beginn des Tests bereits eingestellt war. Liegt die Solltemperatur beispielsweise um 4 K unter der Temperatur vor Beginn des Tests, so benötigt das Beispielgebäude aus der Simulation 8 Tage, bis die Solltemperatur erreicht ist. Die Temperaturen im Bauteilinnern stimmen zu diesem Zeitpunkt immer noch nicht mit denjenigen überein, die sich bei niedrigeren Temperaturen in der Vorlaufphase ergeben würden. Daher dauert es weitere 7 Tage, bis die Heizleistungen beider Fälle wieder synchron verlaufen. Eine Temperaturabsenkung führt also zu sehr langen Messzeiten. Da die Wärmeströme während Aufheizvorgängen deutlich größer als beim freien Abkühlen auf Grund der Temperaturdifferenz sein können, sind hier beim Aufheizen schnellere Temperaturänderungen möglich (vgl. Diskussion der Leistungsverteilungen für Messobjekte in Abschnitt 3.2 und 3.3). Um Einschwingzeiten möglichst kurz zu halten, sollte daher bei der Messung am besten die Ausgangstemperatur beibehalten oder im Vorfeld der Messung vorgeheizt werden (was bedingt auch im bewohnten Zustand möglich ist). Sollen unterschiedliche Temperaturen eingestellt werden, so ist es sinnvoll, von niedrigeren zu höheren Temperaturen zu messen.

### 2.3.4.2 Wärmekapazität und wirksame Wärmekapazität

Die Wärmekapazität eines Gebäudes wird durch die eingesetzten Materialien, insbesondere deren Masse sowie die spezifischen Wärmekapazitäten  $[J/(kgK)]$  bestimmt. Die Wärmekapazität gibt an, welche Energie notwendig ist, um die Temperatur des Gebäudes um ein Kelvin zu erhöhen. Insbesondere bei Außenwänden wird allerdings bei einer Temperaturänderung der Innentemperatur um ein Kelvin nicht die gesamte Wand entsprechend erwärmt. Dies liegt zum einen daran, dass bei konstanter Außentemperatur sich das Temperaturprofil in der Wand ändert. Außerdem ist die Wärmekapazität der Bauteile nur vergleichsweise schwach an die Raumlufthtemperatur angekoppelt. Dementsprechend folgt die Temperatur der Bauteile Schwankungen der Raumlufthtemperatur nur verzögert und mit reduzierter Amplitude. Häufig wird versucht, diese Tatsache mit einer „wirksamen Wärmekapazität“ abzubilden. Eine solche wirksame Wärmekapazität könnte idealerweise in vereinfachten Modellen eingesetzt werden und würde damit zu einem realistischen Temperaturverlauf führen.

In einem Vorversuch wurde die wirksame Wärmekapazität anhand von dynamischen Simulationsrechnungen bestimmt. Zu diesem Zweck wurde das Simulationsmodell des beschriebenen Reihenendhauses vom angrenzenden Haus und vom Erdreich entkoppelt (Fläche von Wand zum Nachbargebäude bzw. Bodenplatte = 0). Die Raumlufthtemperatur wurde mit sinusförmigen Temperaturschwankungen verschiedener Periodendauern zwischen 1 und 168 (= 1 Woche) Stunden variiert und der zugehörige Verlauf der Heizleistungen ermittelt. Unter diesen Bedingungen lassen sich Widerstand und Kapazität

eines einfachen RC-Modells so anfitzen, dass Mittelwert und Amplitude des Temperaturverlaufs korrekt wiedergegeben werden. Die so ermittelten wirksamen Wärmekapazitäten hängen stark von der Frequenz der Anregung ab. Abbildung 14 zeigt den Zusammenhang im Detail.

Die Summe aller Wärmekapazitäten des Simulationsmodells (einschließlich Außenputz etc., wobei die Wärmekapazitäten großteils innerhalb der thermischen Hülle liegen) beträgt 88 MJ/K, sie ist ebenfalls in Abbildung 14 eingetragen. Man sieht, dass diese Kapazität auch bei sehr großen Periodendauern nicht vollständig ausgenutzt wird. Der Grund ist, dass Außenwände auch an die Außentemperatur gekoppelt sind und daher nicht vollständig erwärmt werden.

Bei genauerer Betrachtung der Temperaturverläufe fällt außerdem auf, dass Lufttemperatur und Heizleistung vor allem für kurze Periodendauern fast gleichphasig verlaufen. Für ein RC-Modell würde man dagegen erwarten, dass die maximale Heizleistung näherungsweise dem maximalen Temperaturgradienten entspricht, also eine Phasenverschiebung von etwa  $\pi/2$  entsteht. Dass dies nicht der Fall ist, erklärt sich daraus, dass die Kapazitäten durch den konvektiven Wärmeübergangswiderstand relativ stark von der Raumluft entkoppelt sind. Die Kapazitäten ändern daher ihre Temperatur nur wenig; bliebe die Temperatur der Kapazitäten konstant, wäre der Wärmestrom von der Raumluft an die Kapazitäten etwa proportional zur Temperaturdifferenz Raumluft – Kapazität. Genau dies beobachtet man hier.

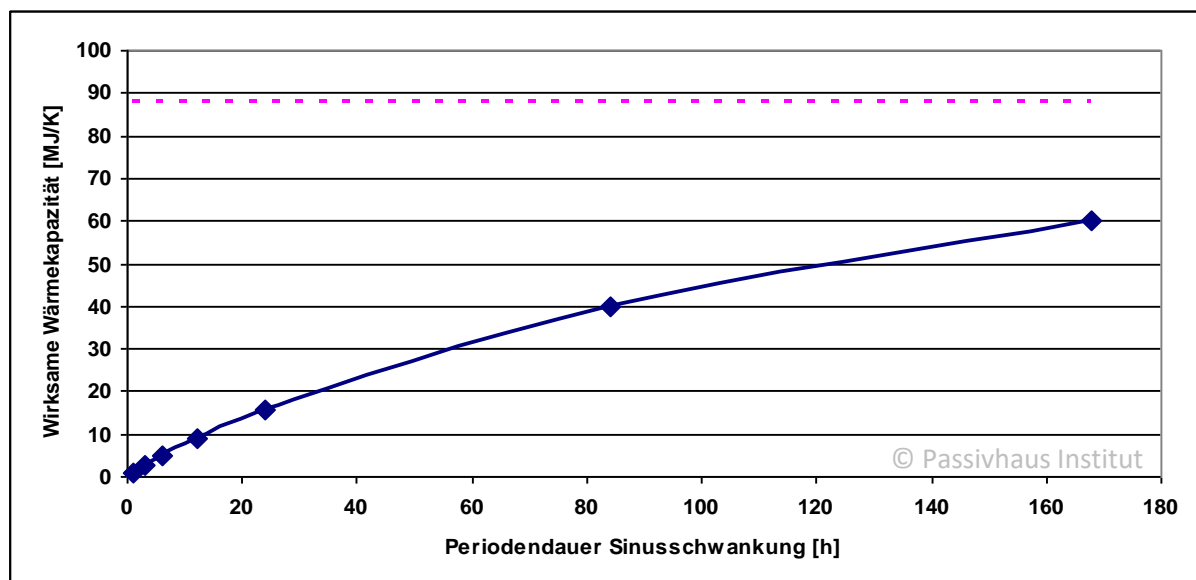


Abbildung 14: Wirksame Wärmekapazität (Rauten) als Funktion der Frequenz der Anregung (Bezug: Lufttemperatur) und Gesamtwärmekapazität des Gebäudes (gestrichelt).

Eine schnellere Änderung von Temperaturniveaus ist durch Regelung der Strahlungs- bzw. Oberflächentemperaturen möglich. Daher wurde selbiges Experiment für die Strahlungstemperaturen wiederholt. Im Beispielgebäude ist das nur näherungsweise möglich, da in einzelnen Räumen die Wärmeverluste nach außen nicht groß genug sind, um ein ausreichend schnelles Abkühlen zu gewährleisten. Dennoch führt dieses Vorgehen zu einer geringeren Abhängigkeit der wirksamen Wärmekapazität von der Periodendauer (Abbildung 15). Im Umkehrschluss ist dies genau der Grund, weshalb die Regelung über die Strahlungstemperatur direkter ist.

Sehr deutlich wird hier, dass es nicht sinnvoll ist, von *einer* einzigen wirksamen Wärmekapazität zu reden. Das Konzept der wirksamen Wärmekapazität ist immer nur für sehr beschränkte Bereiche gültig und hängt von den Innen- und Außentemperaturen und den betrachteten Zeitskalen ab.

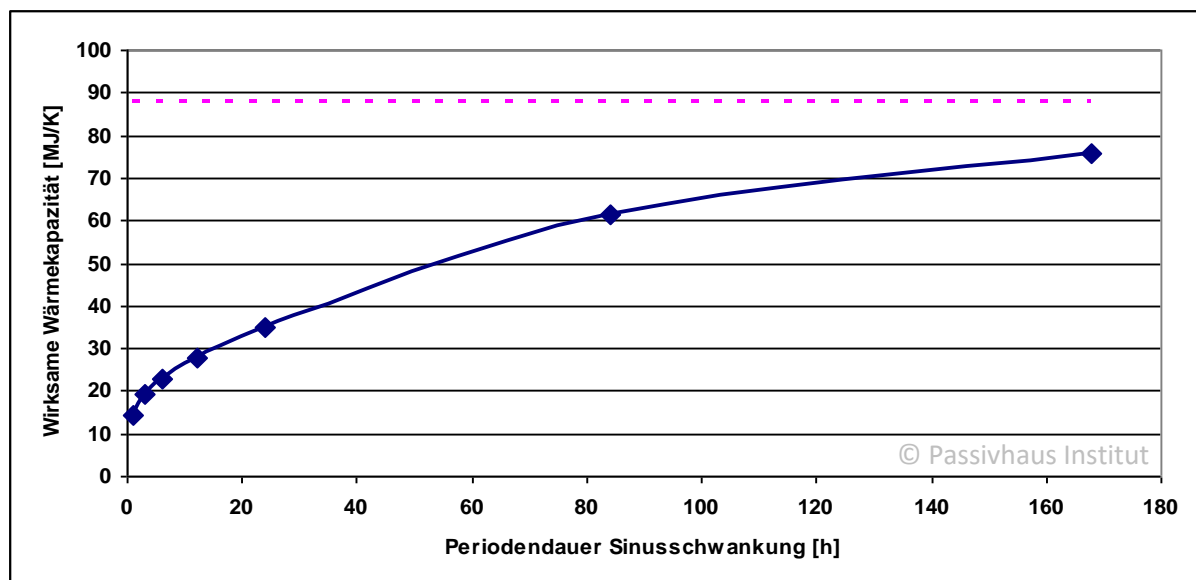


Abbildung 15: Wirksame Wärmekapazität (Rauten) als Funktion der Frequenz der Anregung (Bezug: Strahlungstemperatur) und Gesamtwärmekapazität des Gebäudes (gestrichelt).

### 2.3.5 Simulationsrechnungen zum QUB-Test

Die Idee des QUB-Test ist es, Wärmeverlustkoeffizienten und wirksame Wärmekapazität aus dem Temperaturverlauf beim Betrieb mit zwei unterschiedlichen Heizleistungen zu bestimmen. Dabei wird zunächst eine konstante, möglichst gleichmäßig verteilte Leistung über einen Zeitraum von einigen Stunden ins Gebäude eingebracht. Das so erwärmte Gebäude kühlt anschließend ohne weitere Wärmezufuhr wieder ab. Für weitere Details s. Abschnitt 1.2.2. Die prinzipielle Anwendbarkeit dieses Verfahrens auf Passivhäuser wird im Folgenden analysiert.

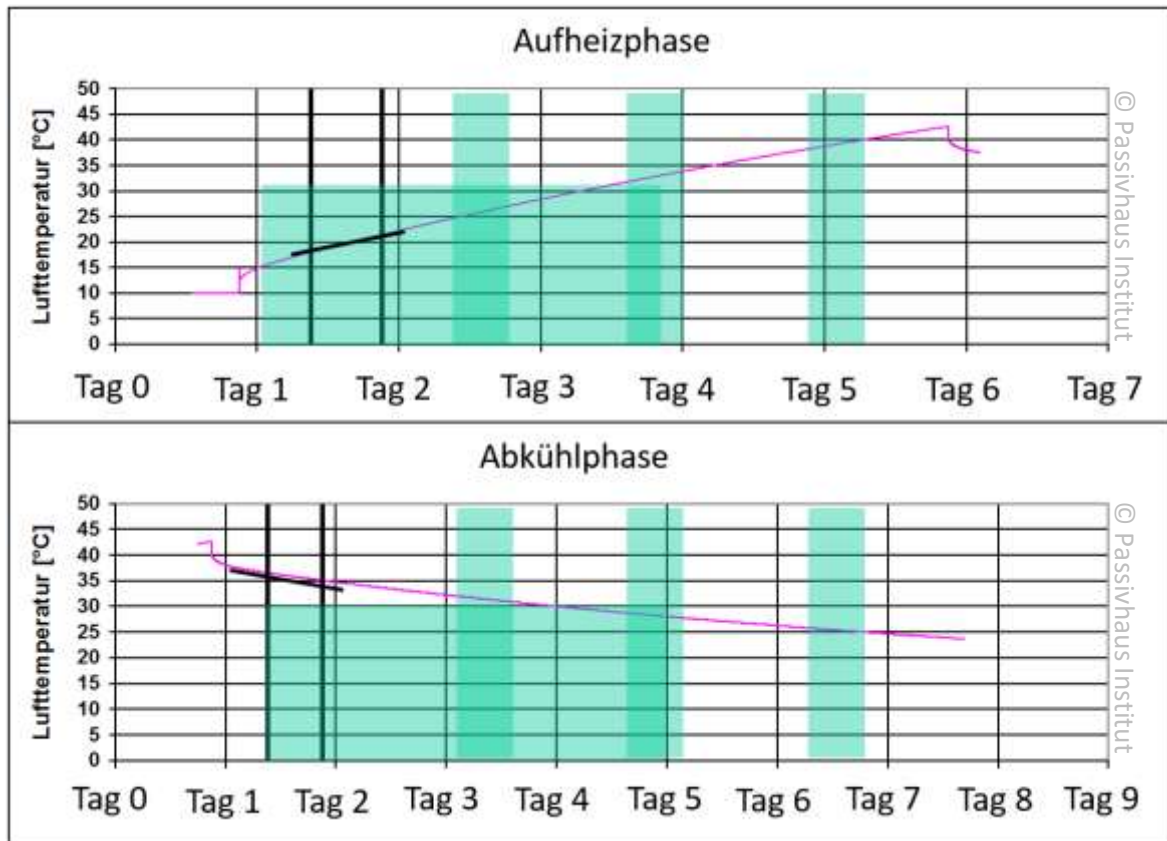


Abbildung 16: Temperaturverläufe der mittleren Lufttemperaturen während Aufheiz- und Abkühlphase des Beispielobjekts resultierend aus einer dynamischen Gebäudesimulation bei konstanten Außentemperaturen. In grün sind die Intervalle der verschiedenen Auswerteperioden angedeutet.

### 2.3.5.1 Konstante Außenbedingungen

Zunächst werden alle Wetter-Randbedingungen als konstant angesetzt und das Gebäude wird während einer Periode von 10 Tagen einer konstanten Heizleistung ausgesetzt, anschließend kann es wieder abkühlen. Die Temperaturverläufe für Aufheiz- und Abkühlphase sind in Abbildung 16 dargestellt. Um den Einfluss der sich ändernden wirksamen Wärmekapazität besser untersuchen zu können, wurde das QUB-Verfahren hier für Aufheiz- und Abkühlphasen von je 10 Tagen angewendet.

Ausgewertet wurden die simulierten Temperaturverläufe entsprechend der QUB-Methode für verschieden lange Intervalle, die zu verschiedenen Zeitpunkten begannen. Diese sind in Abbildung 16 durch Rechtecke jeweils bei gleichem Abstand zum Beginn der Aufheiz- bzw. Abkühlphase. Die resultierenden Leitwerte haben weniger als 10 % Abweichung zu dem erwarteten Leitwert nach außen. Dabei ist der größte Einflussfaktor der Wärmestrom zum Nachbarn. Dieses Ergebnis erscheint sehr vielversprechend. Daher wurden weitere Varianten mit kürzeren Messperioden und realen Außenbedingungen gerechnet. Dabei hat sich allerdings herausgestellt, dass leicht Fehler in der Größenordnung von 50 % auftreten können. Ein möglicher Grund ist, dass die lineare

Näherung der Temperaturprofile bei Kopplung an die verschiedenen Temperaturniveaus und variablen Außentemperatur bei unter 24 h deutlich schlechter ist. Auf Grund der ersten vielversprechenden Ergebnisse sollte der QUB-Test aber trotzdem in den zu planenden Messzyklus eingehen.

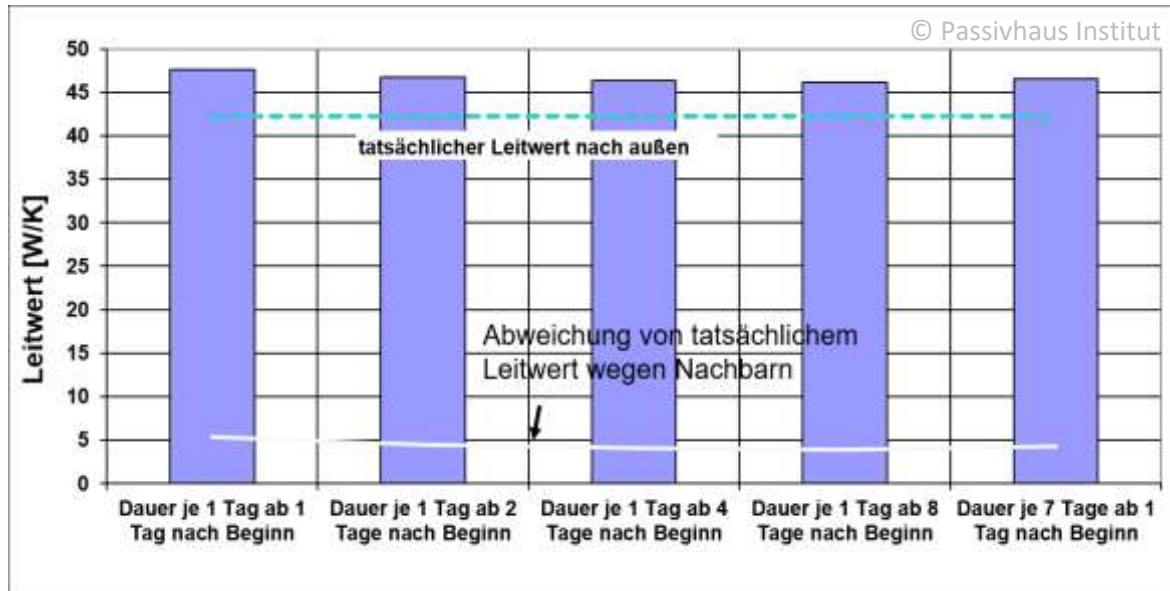


Abbildung 17: Wärmeverlustkoeffizienten bestimmt aus den dynamischen Simulationsdaten nach dem QUB-Verfahren.

## 2.4 Erstellung des Messzyklus

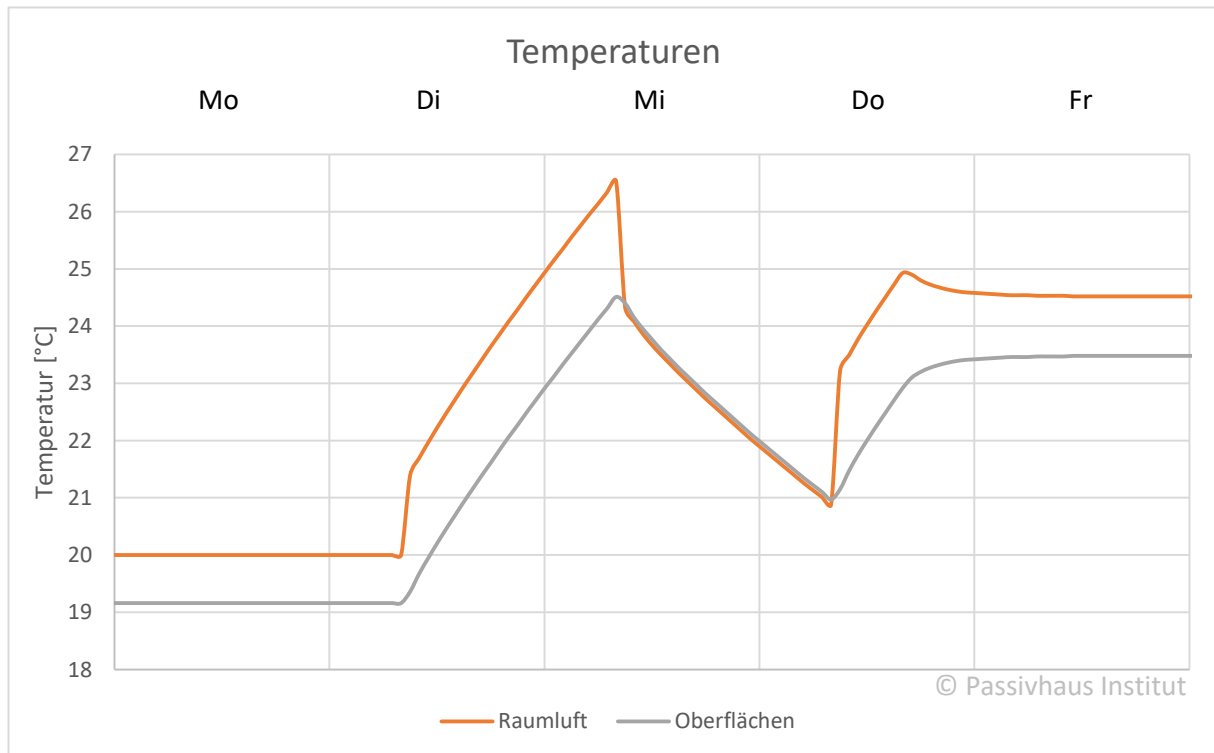
Zur Ableitung des Messverfahrens wurde die Passivhausscheibe (vgl. Abschnitt 3.2) als grobes Simulationsmodell mit nur einer thermischen Zone in DYNBIL abgebildet. Diese Simulation diente zur Festlegung der verschiedenen Zustände und deren ihrer Abfolge während der Messung sowie zur Klärung einiger Fragen bezüglich des praktischen Vorgehens.

Die Außenbedingungen wurden zunächst als konstant angesetzt: 0 °C, 50% relative Feuchte, keine Solarstrahlung. Dadurch werden die relevanten Effekte besser sichtbar als bei schwankenden Außenbedingungen. Als Ausgangspunkt wurden die allgemeinen Empfehlungen zum Co-Heating-Test von der Leeds University [Wingfield2013].

### 2.4.1 Installierte Leistung

Als zu installierende Heizleistung für solche Tests hat sich das Doppelte der für Passivhäuser zulässigen Heizleistung von 10 W/m<sup>2</sup> als sinnvoll erwiesen. Für die PH-Scheibe entsprechen 20 W/m<sup>2</sup> einer Gesamtheizleistung von ca. 3500 W. Damit lassen sich bei Passivhäusern ausreichende Temperaturen halten. Auch für die Durchführung eines QUB-Tests, bei dem das Gebäude innerhalb eines Tages messbar aufgeheizt werden muss, reicht diese Heizleistung aus: in der Simulation steigt die

Raumtemperatur innerhalb eines Tages um ca. 6 K (Abbildung 18). Das Signal/Rausch-Verhältnis der Innentemperaturen dürfte damit ausreichend groß sein. Nach Pandraud et al. [Pandraud2014] liefert ein symmetrischer Hub und Abfall der Innentemperaturen die besten Ergebnisse, so dass die Heizleistung je nach vorherrschenden Außenbedingungen eher noch kleiner gewählt werden sollte.



**Abbildung 18:** Temperaturanstieg bei einer Heizleistung von 3,5 kW, Temperaturabfall ohne Heizung und anschließendes Einpendeln auf 24 °C operative Temperatur im Gebäudemodell bei 0 °C Außentemperatur.

Nebenbemerkung: Für Massivbauten würde eine solche Leistungserhöhung möglicherweise nicht ausreichen. In Abbildung 19 ist zu erkennen, dass in diesem Fall der Temperaturanstieg des Strahlungsknotens in 24 Stunden gerade 1,5 K beträgt. Bei einer Auflösung der Temperaturmessung von 0,01 K und einer Messgenauigkeit für die Temperatur von 0,2 °C könnte man damit eventuell gerade noch verwertbare Ergebnisse erzielen. Störungen etwa durch Solarstrahlung wären dann allerdings bestmöglich abzuschirmen, Aufheizung und Abkühlung auf dieselbe Tageszeit zu legen (24 h Aufheizen, 24 h Abkühlen wie hier dargestellt) würde den Einfluss täglich wiederkehrender Störungen (Solarstrahlung durch opake Bauteile, tageszeitliche Schwankungen der Außentemperatur usw.) minimieren.

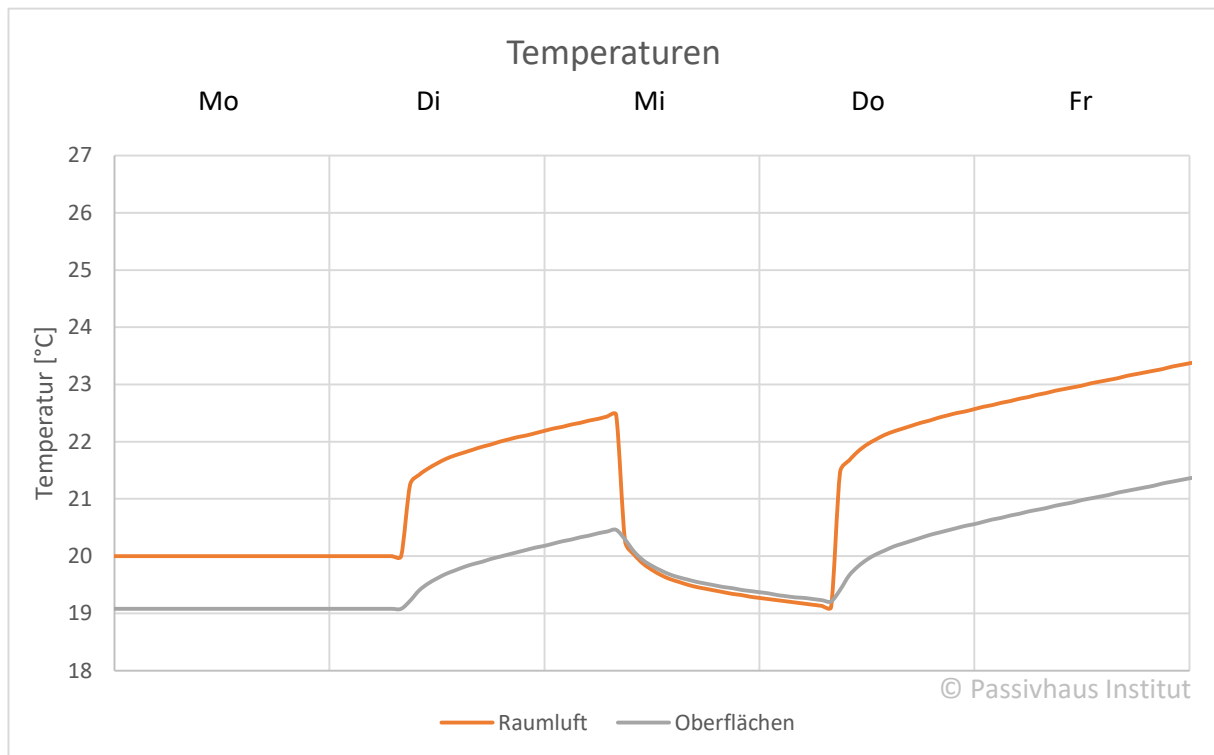


Abbildung 19: Wie Abbildung 18, jedoch für einen Massivbau

## 2.4.2 Beheizung mit Glühbirnen

Aus experimenteller Sicht erschien eine Beheizung des Raumes mit Lichterketten, bestückt mit konventionellen Glühbirnen, als kostengünstigste und am einfachsten handhabbare Lösung. Insbesondere lassen sich bei dieser Methode die Leistungen für den QUB-Test leicht an die Größe der verschiedenen Räume anpassen. Die Beheizung durch Glühbirnen erfolgt sowohl konvektiv als auch durch Strahlung – die genauen Anteile sind allerdings nicht bekannt. Für die Auswertung wäre es bei einer rein konvektiven Beheizung, etwa mit leistungsgeregelten Heizlüftern, leichter, die tatsächlichen Vorgänge in der Simulation nachzubilden. Daher wurden in der Simulation zwei Varianten untersucht: rein konvektive Beheizung und Beheizung mit 80% Strahlungsanteil. Die Unterschiede im Zeitverlauf der Heizleistung und Strahlungstemperatur sind gering, auch die erforderliche Heizwärme im stationären Zustand unterscheidet sich nur um etwas mehr als 1%. Achtet man also darauf, die Strahlungs- und nicht die Lufttemperaturen zu messen und auszuwerten, ist die Beheizung mit Glühbirnen oder einer beliebigen anderen Wärmequelle zulässig.



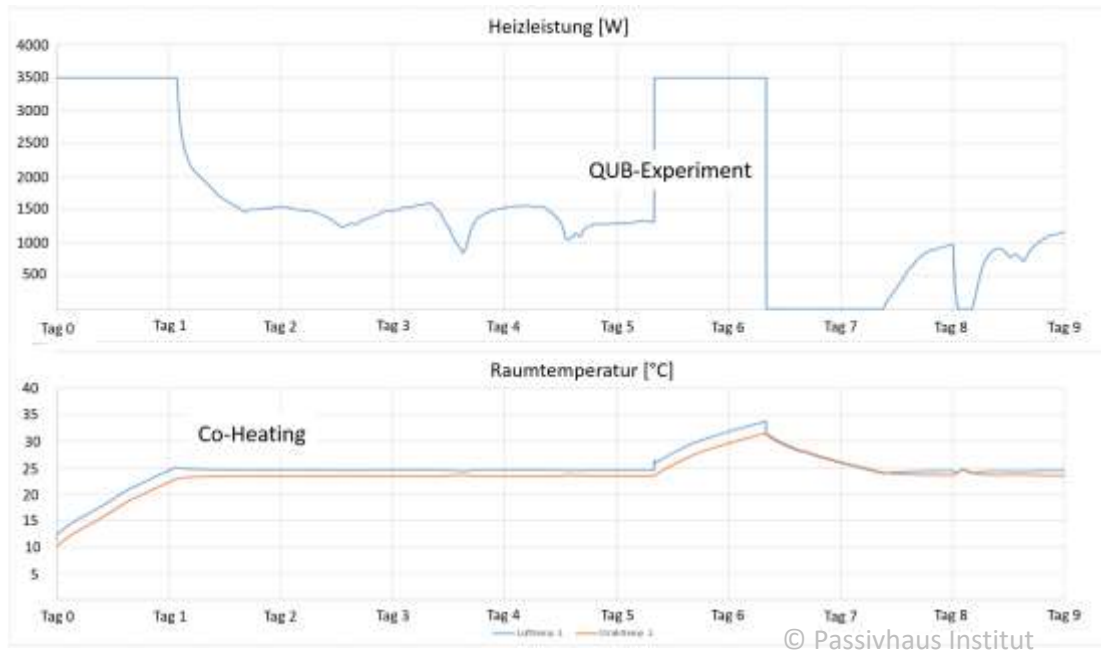
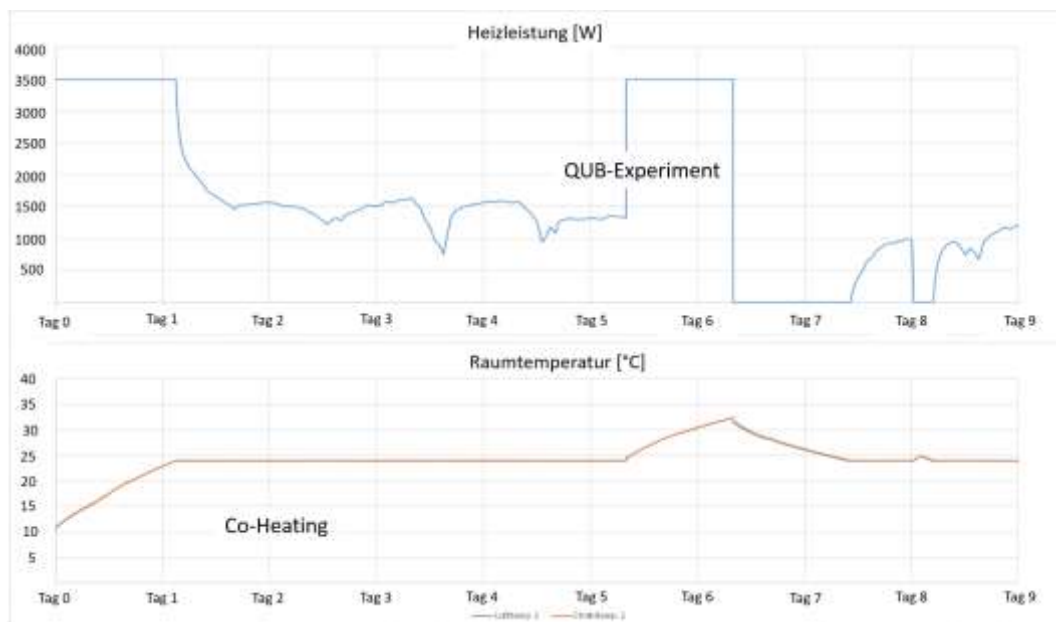


Abbildung 20: Zeitverlauf von Heizleistung und Raumtemperaturen bei rein konvektiver Beheizung



© Passivhaus Institut

Abbildung 21: Zeitverlauf von Heizleistung und Raumtemperaturen, Beheizung mit 80 % Strahlungs- und 20 % konvektivem Anteil

### 2.4.3 Feuchteexperiment

Ein Teil der Messungen diente dazu, die Reaktion des Gebäudes auf einen Feuchtepeak zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde am Ende des Co-Heating-Tests, nachdem ein thermisch stabiler Zustand erreicht war, während einiger Stunden eine hohe Feuchtelast (Verdampfung von Wasser) ins Gebäude eingebracht und die Sprungantwort der Temperaturen und Raumlufffeuchten analysiert. Die zentrale Fragestellung in diesem Zusammenhang lautete: Werden die thermischen und hygrischen Vorgänge im Gebäude, insbesondere die Feuchtespeicherung, durch das Simulationsprogramm DYNBIL ausreichend genau abgebildet, und wo sind evtl. noch Modellanpassungen erforderlich?

### 2.4.4 Zeitprogramm für Messung

Auf Grundlage der durchgeführten Voruntersuchungen wurde das folgende Zeitprogramm für die Messung der Passivhausscheibe festgelegt.

- Zustand vor der Messung: Lüftungsanlage läuft vor Beginn der Messung bereits einige Wochen (auch wenn das Gebäude unbewohnt ist) durch und hält das Gebäude auf einem Sollwert von 20 °C. Das Gebäude ist in dieser Zeit nicht in Benutzung und die Rollläden sind geschlossen („Normalzustand“ bei Abwesenheit). Die Solltemperatur kann bei niedrigen Temperaturen allerdings mangels solarer Gewinne nicht immer gehalten werden. Somit ist damit zu rechnen, dass die Gebäudetemperatur zu Beginn der Messung leicht unter 20 °C liegt. Zumindest sollte sich das Gebäude zu Messbeginn in einem quasistationären Zustand befinden. Ohne wesentliche Feuchtequellen ist die Raumlufffeuchte bei Beginn der Messung relativ gering.
- Aufbau der Messausrüstung am Nachmittag des 1.12. (Montag). Die Lüftungsanlage bleibt unverändert eingeschaltet. Die Gebäudeheizung bleibt eingeschaltet, bis am nächsten Morgen die Steuerung der temporären Glühbirnenheizung aktiv wird. Dadurch bleibt das Gebäude bis zum Beginn der Messung in einem definierten Zustand, der durch das Öffnen der Haustür und die Anwesenheit des Messpersonals nur wenig beeinflusst wird.
- 2.12. (Dienstag) 9:00 Uhr: Die Lüftungsanlage wird abgeschaltet und Außen- und Fortluftöffnungen mit Ballons verschlossen. Die maximale, installierte Heizleistung wird eingeschaltet (Beginn QUB-Aufheizphase).
- 3.12. (Mittwoch) 9:00 Uhr: Lichterketten werden ausgeschaltet. Das Gebäude kühlt sich wieder ab (Beginn QUB-Abkühlphase).



- 4.12. (Donnerstag) 9:00 Uhr: Heizungssteuerung wird auf einen Sollwert von 24 °C eingestellt und die Lichterketten damit in 10 s Schritten geregelt Beginn Co-Heating-Test).
- 10.12. (Mittwoch) 9:00: Alle Umwälz-Ventilatoren werden ausgeschaltet, um den Feuchteübergang im Innenraum nicht künstlich zu erhöhen. Es wird auf einer Herdplatte so lange Wasser verkocht, bis die Raumlufffeuchte auf ca. 70 % relative Feuchte angestiegen ist. Die verdampfte Wassermenge und deren zeitlicher Verlauf werden durch Wägung ermittelt. Es sollte möglichst kein heißes Wasser übrig bleiben, um eine verzögerte Verdunstung gering zu halten. Der Aufenthalt einer Person im Gebäude während dieser Zeit ist auf Grund der hohen Feuchte- und Wärmeleistung vernachlässigbar. Die Lichterkettenheizung bleibt weiterhin auf einer Solltemperatur von 24 °C.
- 11.12. (Donnerstag): Nachmittags wird die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung wieder eingeschaltet. Die Heizung erfolgt weiterhin über die Lichterketten bei einem Sollwert 24 °C. Zu- & Abluftmengen werden mit einem Flowfinder gemessen.
- Ende der Messung und Abbau am Montag den 15.12.

Der Verlauf von Temperatur, Heizleistung und absoluter Feuchte könnte dann idealisiert (Simulation bei konstant 0 °C Außentemperatur und ohne Solarstrahlung), entsprechend Abbildung 22 und Abbildung 23 aussehen.

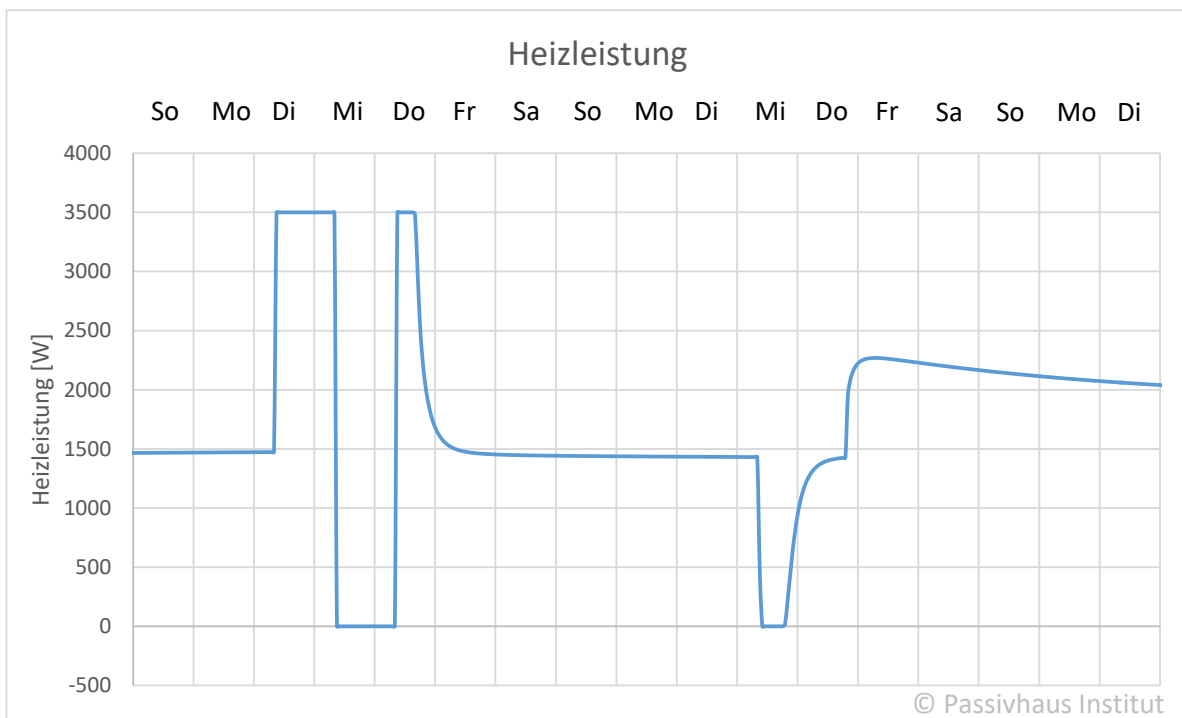
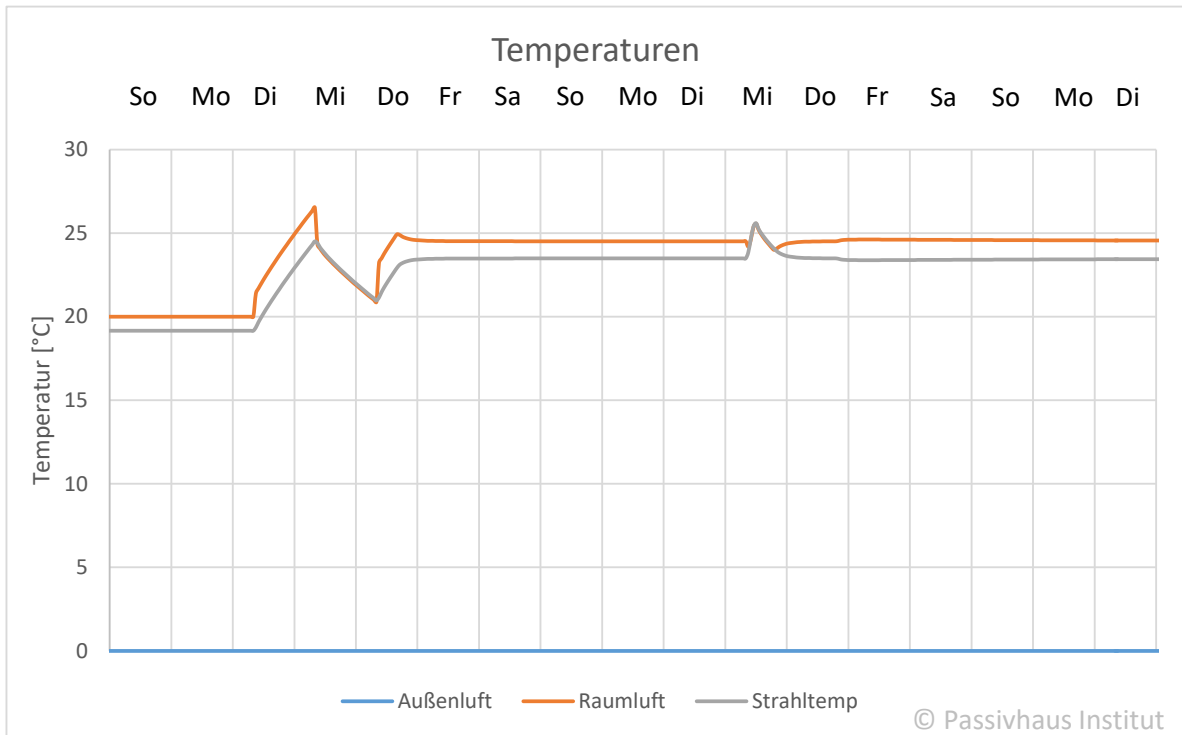


Abbildung 22: Temperaturen und Heizleistungen bei konstanten Außenbedingungen

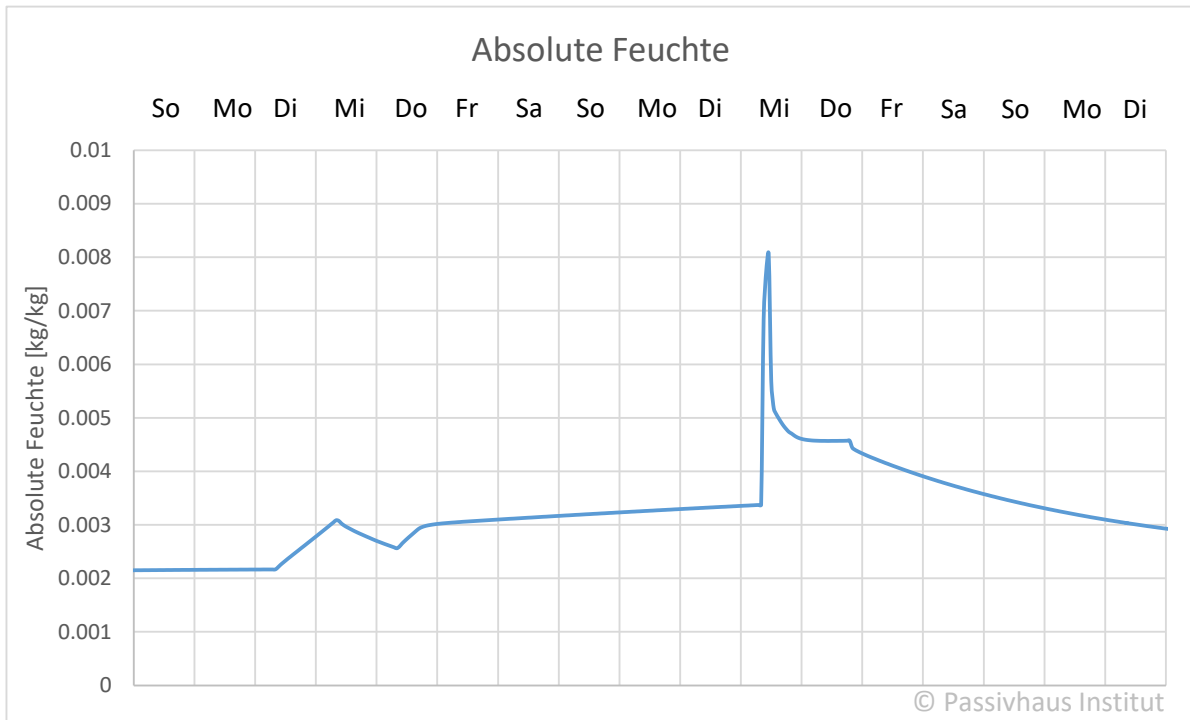


Abbildung 23: Verlauf der erwarteten absoluten Feuchte bei konstanten Außenbedingungen.

## 2.5 Eingesetzte Messtechnik

Die eingesetzte Mess- und Regelungstechnik hatte praktischen und wissenschaftlichen Anforderungen zu genügen. Im wissenschaftlichen Sinn galt es, eine hinreichend geringe Messunsicherheit zu realisieren. Die praktische Handhabung wiederum musste einen effizienten Aufbau und Betrieb der Mess- und Regeleinrichtungen sicherstellen. Da zugleich Flexibilität verlangt war, um unterschiedliche Objekte untersuchen zu können, fiel die Wahl auf einen modularen Ansatz, bei dem in jeder Gebäudezone eine eigene Mess- und Regeleinheit zugleich als Datenlogger fungierte und die Heizleistung nach Vorgabe des geplanten Versuchsverlaufs auf Basis der aktuellen Messwerte regelte. Um die Verkabelung zu vereinfachen, wurden die Einheiten zentral über ein Power-over-Ethernet (PoE) Switch angebunden und mit Elektrizität versorgt.

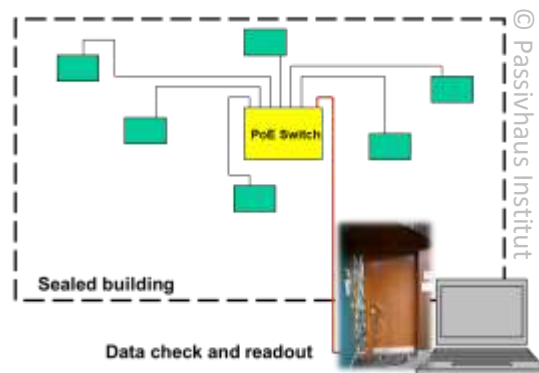


Abbildung 24: Schema des Mess- und Regelkonzeptes.

Für den Prozessor wurde ein einfaches Programm entwickelt, das Datenerfassung, nichtflüchtige Speicherung der Messdaten und die Heizungssteuerung in jeder Zone unabhängig ermöglichte. Es basierte auf einem 10-Sekunden-Intervall, das der einfachen Ein/Aus-Regelung der Heizung und den Logeinträgen zu Grunde lag. Zur besseren Übersicht wurden Datenfiles getrennt für jeden Kalendertag geschrieben. Der jeweils letzte Logeintrag stand fortlaufend über einen Webserver zur Kontrolle der Funktion und Überwachung der Messung zur Verfügung. Da jede Einheit über eine separate IP-Adresse angesprochen werden konnte, musste nur ein einziges Ethernetkabel aus dem Gebäude herausgeführt werden, wofür sich Flachbandkabel hervorragend bewährten. Der PoE-Switch samt seiner Verlustleistung blieb als konstante Wärmelast innerhalb des Gebäudes und wurde über die zentrale Energiemessung erfasst.



Bezeichnung	Produkt	Spezifikation	Signal
Datenlogger/ Steuereinheit	Arduino Mega (AT-mega2560)  Ethernet shield (SD card slot + PoE-Unit)	Power-over-Ethernet, Webserver zeigt aktuelle Werte, Datenaufzeichnung als ASCII-File auf SD-Karte	Logeinträge: ID, Zeitstempel, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Oberflächentemperatur, Schaltzustand Heizung, (Energiezähler)
Lufttemperatur & Luftfeuchte	Sensirion SHT75	$\pm 1.8\%$ rF, $\pm 0.3$ K, nachkalibriert	Digital, ähnlich I <sup>2</sup> C
Oberflächentemperatur	Sensirion STS21	$\pm 0.3$ K, nachkalibriert	Digital, I <sup>2</sup> C
Echtzeituhr	MAXIM DS3231M	$\pm 0.432$ Sekunden/Tag	Digital, I <sup>2</sup> C
Schalteneinheit Heizung	Halbleiterrelais Celduc SO943460	12-280 V AC, max. 35 A, auf Kühlkörper	5 V (ca. 10mA), direkt über GPIO
Energiezähler	EMH CheckMeter 2.3	Arbeitsnormal, dreiphasig, Klasse 0.2	ASCII String über RS232

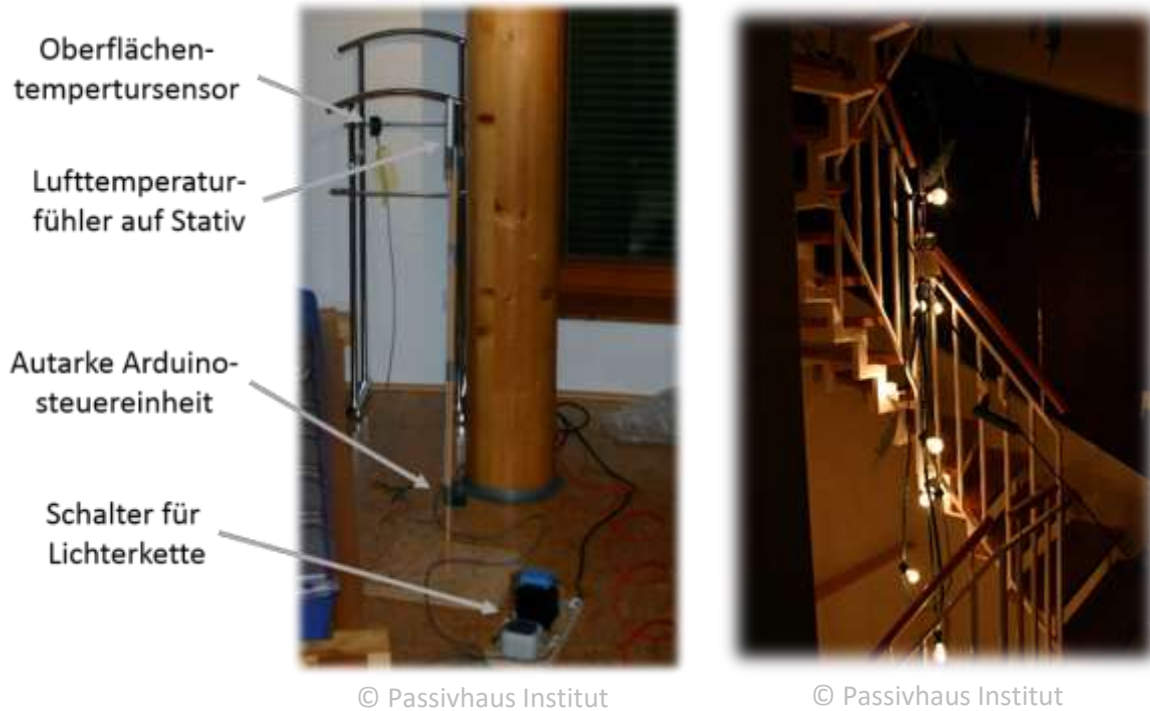
**Tabelle 1: Übersicht der gebäudeintern eingesetzten Messtechnikkomponenten.**

Die zentrale Energiezählung selbst erfolgte über ein hochgenaues Arbeitsnormal, wie es zur Überprüfung von Zähleinrichtungen verwendet wird. An allen drei Phasen der elektrischen Hauptverteilung wurden die Ströme mittels kalibrierter Stromzangen gemessen, der Spannungsabgriff erfolgte mittels temporärer Kontakte. Das allgemeine 10-Sekunden-Intervall zur Datenspeicherung fand auch hier Anwendung. Durch die Wahl dieses Vorgehens war einerseits eine quasi-kontinuierliche Erfassung des Energieumsatzes gewährleistet, zum anderen wurde sichergestellt, dass jegliche Verbraucher im Gebäude vollständig erfasst wurden (dies schließt verborgene Geräte und solche, die nicht vollständig vom Netz getrennt werden dürfen (z.B. Kühlgeräte), ein).

Indem die Schaltzustände der lokalen Heizelemente als Logeintrag geführt wurden und die installierte Leistung mit hinreichender Genauigkeit bekannt war, konnte in der Auswertung auch die räumliche Verteilung der Leistung zu jedem Zeitpunkt rekonstruiert werden.

Dem modularen Ansatz entsprechend wurden primär Lichterketten als Heizelemente eingesetzt. Hier standen je 10 Fassungen E27 mit max. 40 W Belastbarkeit zur Verfügung, mithin 400 W/Kette. Auf diese Weise war eine einfache Anpassung der installierten Leistung an die Raumgröße gewährleistet. Bei Bedarf wurden zwei oder mehr Ketten je Raum verwendet. Insbesondere für die QUB-Versuche war eine gleichmäßige wohnflächen-spezifische Heizleistung gewünscht. In allen Räumen wurden zur Vergleichmäßigung des Temperaturfeldes zusätzlich Ventilatoren angeordnet.





**Abbildung 25: Messaufbau mit Beschriftung der einzelnen Elemente (links) und Lichterkettenheizung während der Messung (rechts).**



© Passivhaus Institut

**Abbildung 26: Wetterstation während der Messung am Reihenendhaus (Arheilgen). Links Pyranometer, rechts Aspirator/Strahlungsschutz für Lufttemperatur/-feuchte Messung. Das Pyrgeometer befindet sich in der Mitte (nur Rand erkennbar).**



Zur Erfassung der Wetterbedingungen während der Experimente wurde eine temporäre Wetterstation auf dem Dach der Gebäude angebracht. Primär wurden Minuten-Mittelwerte von Außenlufttemperatur und –feuchte erfasst. Orientierend wurden Globalstrahlung und langwellige Strahlungsbilanz mit gemessen, um ggfs. Hinweise bei der Auswertung zu erhalten.

Bezeichnung	Produkt	Spezifikation	Signal/Bemerkung
Datenlogger	Ahlborn MRT, Almemo 2890-9		Minuten-Mittelwerte aller Größen auf externer SD Karte
Lufttemperatur & Luftfeuchte	Ahlborn MRT, FH A646-E1, #11050340	$\pm 1.5\%$ rF, $\pm 0.3$ K, kalibriert 11/2014	Analog, ADC integriert, mit Strahlungsschutz und Aspirator
Globalstrahlung	Kipp&Zonen CM11 #935099	310 bis 2800 nm, kalibriert 08/2010	Analog, Spannung, <i>orientierende Messung</i>
Langwelliger Strahlungsaustausch	Eppley PIR, #2616733	3.5 bis 50 $\mu\text{m}$ , kalibriert 12/2006	Analog, Spannung, <i>orientierende Messung</i>

**Tabelle 2: Übersicht der extern eingesetzten Messtechnikkomponenten**

Um die Infiltration von Außenluft während der Experimente am zweiten Objekt in Arheilgen abzubilden, wurde Kohlendioxid als Indikatorgas ausgebracht und der Konzentrationsabfall in dem geschlossenen Gebäude bestimmt. Hierzu wurde ein hochwertiger CO<sub>2</sub>-Sensor an zentraler Stelle positioniert.



© Passivhaus Institut

**Abbildung 27: Erfassung der CO<sub>2</sub>-Konzentration an zentraler Stelle im Objekt Arheilgen**

Bezeichnung	Produkt	Spezifikation	Signal/Bemerkung
Datenlogger	Ahlborn MRT, Almemo 2690		Minuten-Mittelwerte aller Größen auf externer SD Karte
CO <sub>2</sub> -Konzentration	Vaisala GMP343, #E0420010	0...3000 ppm, ± 35 ppm	Analog 4...20 mA

Beim Feuchteexperiment sollte innerhalb kurzer Zeit eine größere Menge Feuchtigkeit freigesetzt werden, um die Sprungantwort der Raumlufffeuchte messen zu können. Zur Erzeugung der Feuchtigkeit kamen entweder thermisches Verdampfen oder ein Ultraschallverdampfer in Frage. Aus Kostengründen wurde die erste Variante gewählt. Die dabei eingebrachte Wärme sollte gleichzeitig dafür sorgen, dass der Wasserdampf sich konvektiv gut verteilt. Dabei wurde eine Induktionskochplatte samt Topf auf eine Waage gestellt. Zur Erhöhung der Leistung der Kochplatte wurde zusätzlich ein Tauch-



sieder verwendet. Über die Waage konnte so die Menge an verdampftem Wasser beobachtet werden. Um eine möglichst kontinuierliche Verdampfungs menge zu erhalten, wurde Wasser, das nachgefüllt werden musste mit einem Wasserkocher vorerwärmt und die Menge entsprechend mit der Waage auch erfasst. Die Raumluftfeuchte während der Erzeugung wurde mit einem zusätzlichen Hygrometer überwacht, um Feuchten über 70 % zu vermeiden.



**Abbildung 28: Messaufbau zur Verdampfung von Wasser für das Feuchteexperiment. Mit der Waage wurde die Menge des verdampften Wasser gemessen.**

### 3 Messung an verschiedenen Objekten

Es wurden Messungen an drei Objekten durchgeführt: An einer Klimakammer im Labor und an zwei Passivhaus-Wohngebäuden. Für die Messungen wurde jeweils der Messzyklus verwandt, der in Kapitel 2.4 entwickelt wurde. Die Messphase lässt sich bezüglich der Heizmodi in zwei Bereiche, einen QUB-Test und einen Co-Heating-Test, unterteilen (s. Abbildung 29). Die Messungen beginnen jeweils mit zwei Tagen Anwendung des QUB-Tests (1. Tag heizen mit konstanter Leistung, 2. Tag abkühlen lassen, bei abgeschalteter Heizung). Im Anschluss wird die Heizleistung ab  $t_2$  so geregelt, dass die Oberflächentemperaturen in allen Räumen konstant bleiben. Lediglich während des Feuchteexperiments zum Zeitpunkt  $t_3$  wurde durch den Betrieb einer Kochplatte zum Verdunsten von Wasser die Solltemperatur überschritten.

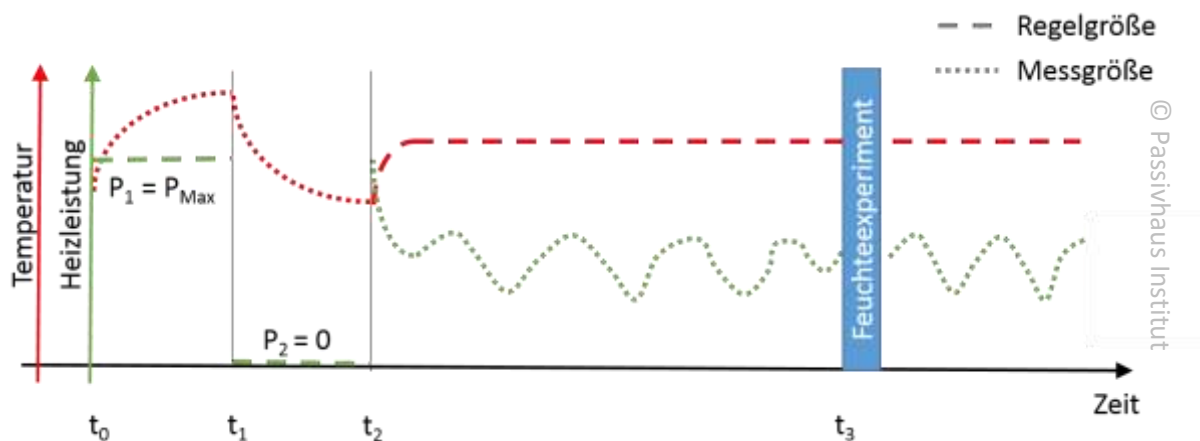


Abbildung 29: Messprogramm für die Passivhausscheibe. QUB-Methode zwischen  $t_0$  und  $t_2$  mit Heizphase konstanter Leistung bis  $t_1$  und ausgeschalteter Heizung bis  $t_2$ . Danach wird das Gebäude auf konstanter Temperatur gehalten. Zum Zeitpunkt  $t_3$  werden mehrere Liter Wasser verdampft; damit wird zusätzliche Leistung eingebracht.

#### 3.1 Klimakammer

##### 3.1.1 Objektbeschreibung

Als erstes Messobjekt bot sich die Klimakammer im Labor des Passivhaus Instituts der Firma Lintek Labor Technik (vgl. Abbildung 30) an. Sie besteht aus zwei voneinander abtrennbaren Räumen, die einzeln klimatisiert werden können. Ziel des Experiments war es, die Messtechnik zu prüfen und den Wärmeverlustkoeffizienten der Klimakammer zu bestimmen. Die einzelnen Teile der Klimakammer wurden während der Messung durch Glühbirnen beheizt, die Tür zwischen den Kammerteilen war geöffnet. Gemessen wurden die Luft- und Oberflächentemperaturen in beiden Kammerhälften. Für die Auswertung wurde im Anschluss der Mittelwert dieser Temperaturen gebildet. Die Umgebungstemperatur war die Lufttemperatur im Labor.





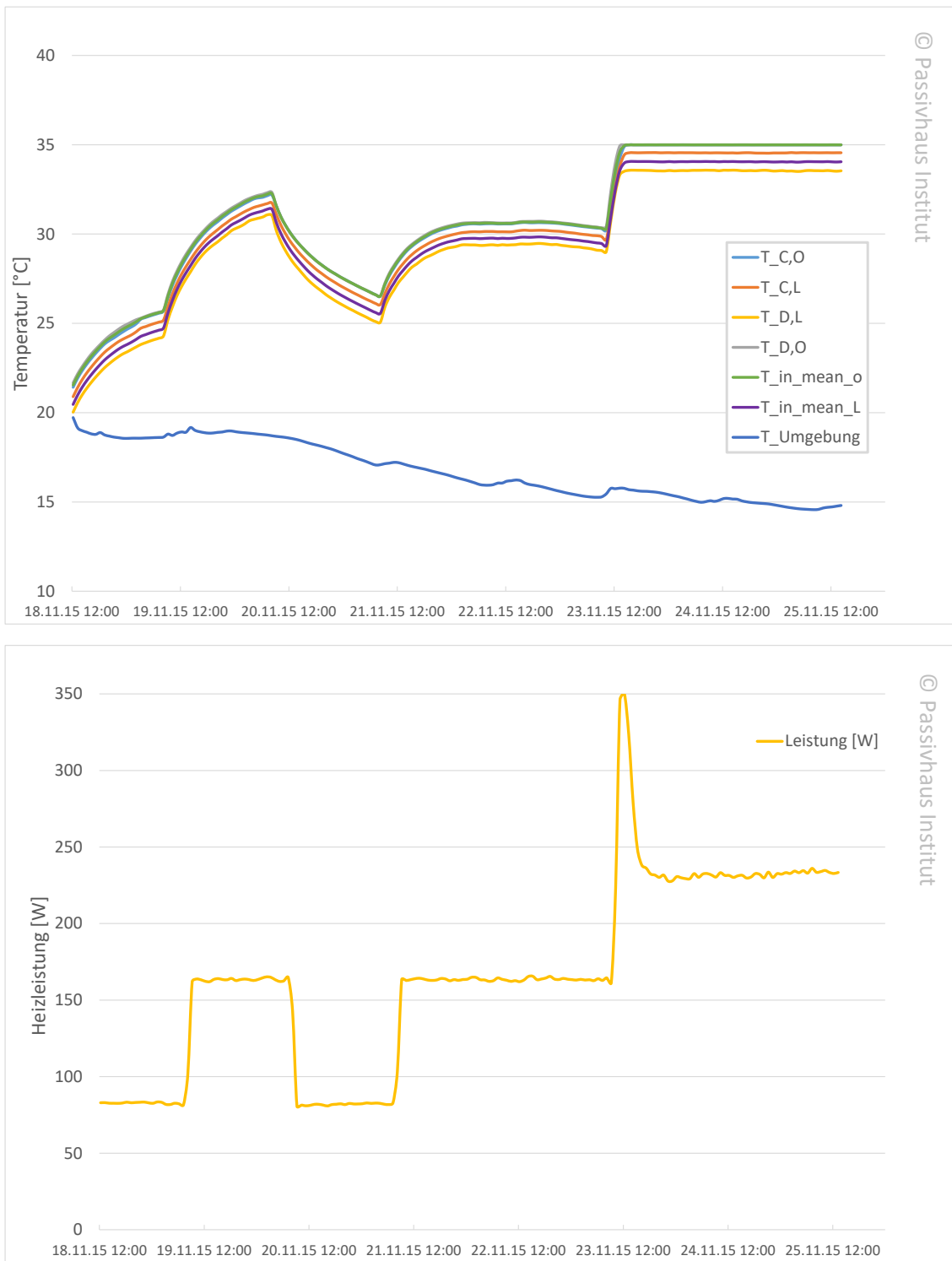
© Passivhaus Institut © Passivhaus Institut  
**Abbildung 30: Außen- (links) und Innenansicht der Klimakammer während der Messung mit eingeschalteten Heizelementen.**

### 3.1.2 Messergebnisse

Die Temperaturverläufe von Oberflächen- und Lufttemperaturen in den einzelnen Kammern, die jeweiligen Mittelwerte und die Außentemperatur im Labor sind in Abbildung 31 aufgetragen. Durch Abdrehen der Heizung sank diese während des Experiments merklich von 20 °C auf unter 15°C. Der Messzyklus begann mit einer Einschwingphase, in der bereits eine deutliche Erhöhung der Kammertemperatur von ca. 20 °C auf ca. 25 °C auftrat, ohne dass die Glühlampen eingeschaltet waren. Die Erklärung hierfür ist, dass die Leistungsaufnahme von Ventilatoren und Messgeräten in der kleinen Kammer einen sehr deutlichen Einfluss haben. Die Standby-Heizleistung betrug 82 W. Während des QUB-Tests wird zunächst mit ca. 80 W Glühlampenleistung geheizt, so dass die mittlere Leistungsaufnahme während der Heizphase 163 W beträgt. Der Wärmeverlustkoeffizient wird aus den Steigungen der Temperaturverläufe am Ende der Heiz- und der Kühlphase sowie den jeweiligen Heizleistungen unter Annahme einer konstanten Umgebungstemperatur bestimmt (vgl. Abschnitt 1.2.2).

### 3.1.3 Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten der Klimakammer

Es sollte hier noch darauf hingewiesen werden, dass die Annahme einer konstanten Außentemperatur in diesem Fall nur bedingt zutrifft: sie sank während des QUB-Experiments um ca. 2 K. Im Vergleich zu typischen Außentemperaturschwankungen war die Schwankung allerdings gering. Der resultierende Wärmeverlustkoeffizient, bezogen auf die Lufttemperatur, beträgt  $HLC_{QUB,L} = 13,7 \text{ W/K}$ .



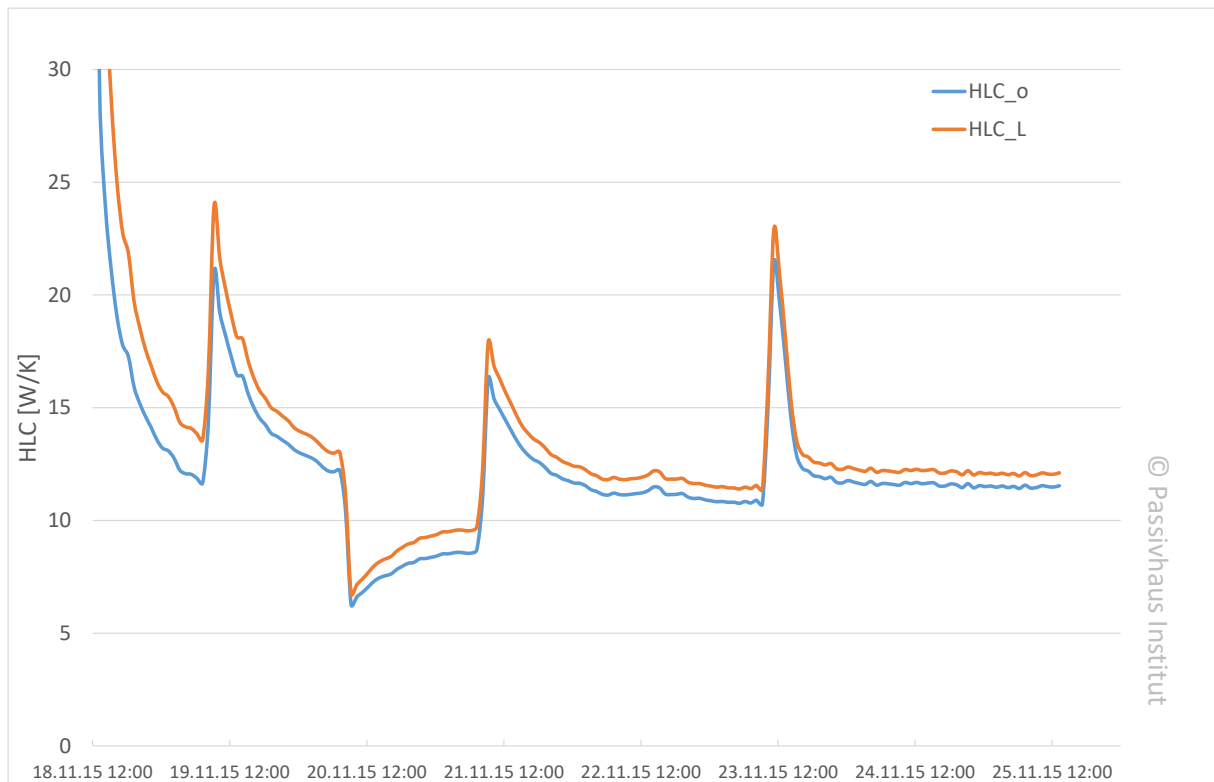
**Abbildung 31: Temperaturverläufe in der Klimakammer: Oberflächen- und Lufttemperaturen in den zwei Hälften und die entsprechenden Mittelwerte für die Klimakammer und die Umgebungstemperatur im Laborraum (oben). Unten ist der Verlauf der Heizleistung dargestellt.**





Im Anschluss an den QUB-Test wurde ein Co-Heating-Test durchgeführt. Allerdings konnte der Sollwert von 35 °C Oberflächentemperatur mit der zunächst installierten Leistung nicht erreicht werden (Anstieg der Temperatur nach QUB-Test lediglich auf gut 30 °C). Daher wurden zusätzliche Glühbirnen installiert und die Gesamtleistung auf 350 W erhöht. An dem Verlauf der Heizleistung sieht man das schnelle Herunterregeln der Heizleistung nach einigen Stunden bei Erreichen der Solltemperatur. Der leichte Leistungsanstieg vom 24.11. bis zum 25.11. ist durch die sinkende Außentemperatur begründet. Der Wärmeverlustkoeffizient wird klassisch aus den Tagesmittelwerten der Heizleistungen dividiert durch den Tagesmittelwert der Temperaturdifferenz ermittelt. Da in diesem Fall keine größeren tageszeitlichen Schwankungen der Temperaturen und keine solaren Gewinne (geschlossene Jalousie des Laborraums) zu erwarten waren, kann auch der kontinuierliche Verlauf des Wärmeverlustkoeffizienten z.B. für die Stundenmittelwerte berechnet werden. Diese sind für den gesamten Messzyklus in Abbildung 32 aufgetragen. Die Indizes „o“ und „L“ stehen für Oberflächen- und Lufttemperatur. Da die Lufttemperatur im Vergleich zur Oberflächentemperatur leicht erhöht ist, ist der  $HLC_L$  größer als  $HLC_o$ . Während der Aufwärmphasen sind deutlich erhöhte Werte zu erwarten. Während der QUB-Abkühlphase ist das Gegenteil zu erwarten. Ein linearer Fit des stündlichen HLC-Wertes für die letzten 30 h der Co-Heating-Phase ergibt einen Wert von  $12,13 \pm 0,02$  W/K (bezogen auf die Lufttemperatur). Selbiges Vorgehen wurde der Vollständigkeit halber auch für die Oberflächentemperatur durchgeführt und ergab  $11,55 \pm 0,01$  W/K.

Da der Wärmeverlustkoeffizient der Klimakammer sowie deren genauer Aufbau nicht bekannt sind, kann hier kein Vergleich mit einem Erwartungswert erfolgen. Die Differenz zwischen dem Ergebnis aus QUB- und Co-Heating-Test beträgt 1,5 W/K bzw. 12 %, was im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit liegt. Sowohl die Messverfahren als auch die Messtechnik haben sich bei diesem Experiment bewährt.



**Abbildung 32: Wärmeverlustkoeffizient der Klimakammer aus den Stundenwerten von elektrischer Leistungsaufnahme und Temperaturdifferenz zwischen Kammerinnenraum und der Umgebungsluft bezogen auf die Luft- (L) bzw. Oberflächentemperatur (o) der Klimakammer.**

## 3.2 Passivhausscheibe

### 3.2.1 Objektbeschreibung

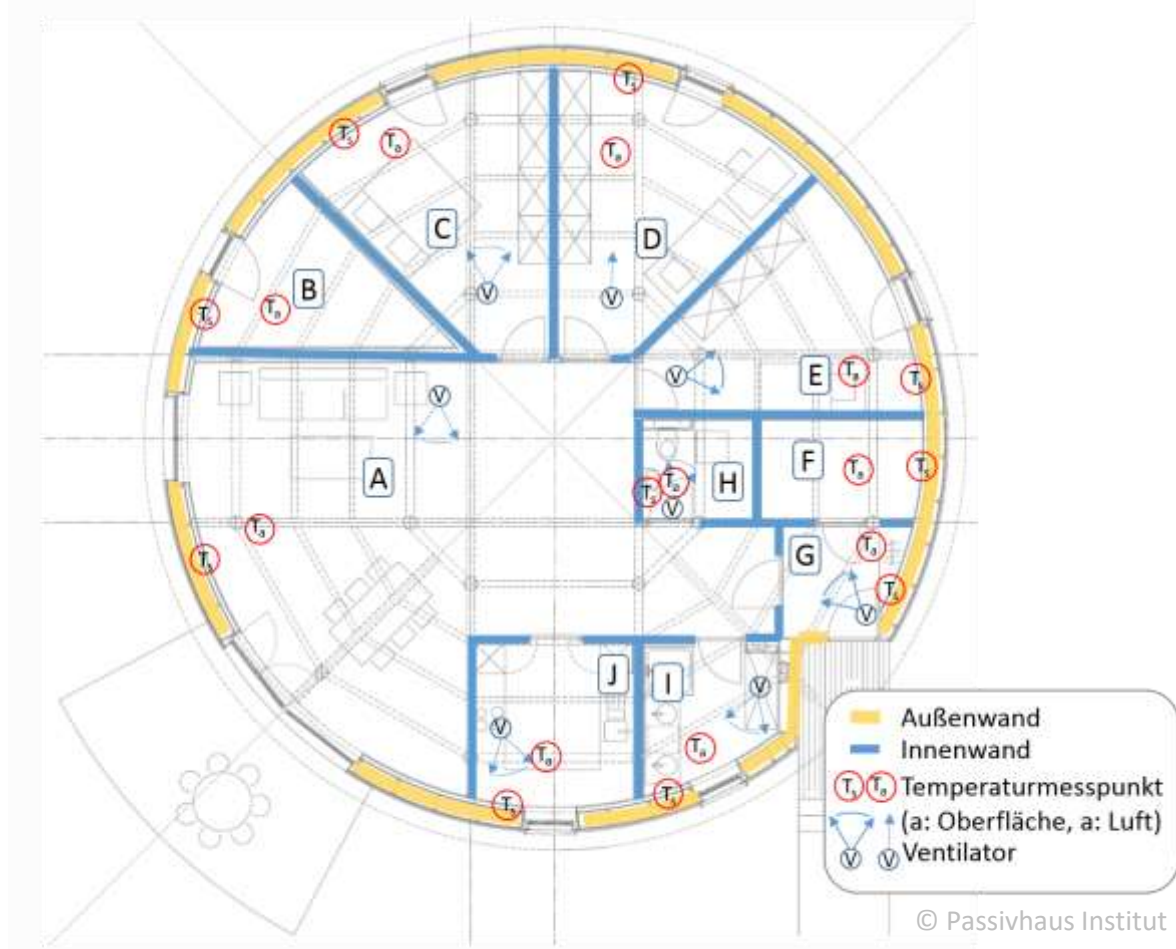
Für die Messung wurde ein Passivhaus für einen Messzeitraum von mindestens zwei Wochen benötigt. Es bot sich daher ein Ferienhaus und damit zeitweise ungenutztes Gebäude an. Ein solches ist die Passivhausscheibe (s. Abbildung 33) im österreichischen Salzkammergut. Hierbei handelt es sich um ein eingeschossiges Gebäude mit kreisförmiger Grundfläche und einer Wohnfläche von 142 m<sup>2</sup>. Die Aufteilung des im Jahr 2000 fertig gestellten Gebäudes ist im Grundriss in Abbildung 34 zu sehen. Für das zertifizierte Passivhaus wurde mit dem Passivhaus-Projektierungspaket ein Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) bestimmt. Die Dämmstärken betragen 38 cm für die Wände, 30 cm für die Bodenplatte und 48 cm für das Dach, deren Dämmlagen jeweils Wärmeleitfähigkeiten von 0,04 W/mK aufweisen. Beheizt wird das Gebäude mit einem Wärmepumpenkompaktgerät. Das Gebäude besteht aus einem Holzskelett und weist, neben der sehr guten Dämmung, eine sehr gute Luftdichtheit auf. So liegt der  $n_{50}$ -Wert mit 0,4 h<sup>-1</sup> deutlich unter dem Kriterium für Passivhäuser ( $n_{50} \leq 0,6$  h<sup>-1</sup>). Durch die Leichtbauweise hat das Gebäude eine sehr geringe thermische Masse und damit auch bei der guten Dämmung eine Zeitkonstante, die die Messung innerhalb der vorgesehenen zwei Wochen zuließ.



**Abbildung 33: Außenansicht des Messobjektes Passivhausscheibe, im Salzkammergut in Österreich (Foto: Günter Lang).**

### 3.2.2 Messergebnisse

Vom 1.12.2014 bis zum 15.12.2014 fand die Messung in der Passivhausscheibe in Roitham statt. Zuvor war das Haus für mehr als eine Woche unbenutzt gewesen, die Lüftungsanlage und die Wärmepumpe sind durchgängig gelaufen. Die Rollläden waren in dieser Zeit verschlossen. Die mittlere Raumlufttemperatur betrug zu Beginn der Messung 18,5 °C. Am 1.12. wurden die Temperatur- und Feuchtesensoren im Gebäude in den einzelnen Räumen, wie in Abbildung 34 dargestellt, verteilt. Diese haben ab 19:50 Uhr über den gesamten Messzeitraum alle 10 s Messwerte für Temperatur und relative Feuchte gespeichert. Außerdem wurden für eine bessere Durchmischung der Luft und Homogenisierung der Temperatur Ventilatoren aufgestellt. Diese sind mit ihrer Strömungsrichtung und z.T. mit dem Schwenkbereich der Ventilatoren im Grundriss in Abbildung 34 eingezeichnet. Die Heizleistungen in den verschiedenen Räumen wurden an die Grundfläche und zu erwartende Wärmeverluste angepasst und sind in Tabelle 3 zusammen mit den Grundflächen der Räume und den flächenspezifischen Heizleistungen aufgelistet.



**Abbildung 34: Grundriss mit eingezeichneten Positionen von Temperatursensoren (Index s: Oberflächentemperatur, Index a: Lufttemperatur) und den Ventilatoren und deren Strömungsrichtung und soweit vorhanden ihr Schwenkbereich.**



Raum		Fläche	Heizleistung	spez. Leistung
Abkürzung	Bezeichnung	[m <sup>2</sup> ]	[W]	[W/m <sup>2</sup> ]
A	Wohnzimmer	56.3	1120	19.9
B	Außenabstellkammer	8.1	200	24.7
C	Schlafzimmer	17.0	480	28.2
D	Kinderzimmer 1	17.2	480	27.9
E	Kinderzimmer 2	14.6	440	30.1
F	Kammer	5.6	120	21.4
G	Eingangsbereich	4.3	120	27.9
H	Gäste-WC	4.0	80	20.0
I	Bad	6.1	160	26.2
J	Küche	9.8	200	20.4
<b>Gesamt</b>		<b>143.0</b>	<b>3400</b>	<b>23.8</b>

**Tabelle 3:** Raumbezeichnungen und Abkürzungen sowie die jeweiligen Flächen und installierten Heizleistungen und die spezifischen Heizleistungen [W/m<sup>2</sup>]

### 3.2.2.1 Außenbedingungen

Die mittlere Außentemperatur (vgl. Abbildung 35) während der Messung betrug 2,9 °C mit einem Minimum bei -1,7 °C und Maximum bei 12,1 °C. Es war in der ersten Hälfte der Messung bei zeitweisem Nieselregen überwiegend stark bewölkt. Einen Eindruck von der Wetterlage liefert das Foto vom Dach des Geländes (siehe Abbildung 55). Erst ab dem 10.12. gab es vermehrt Sonnenschein. Die Folge waren deutlichere Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht und ein genereller Anstieg der Außentemperatur.

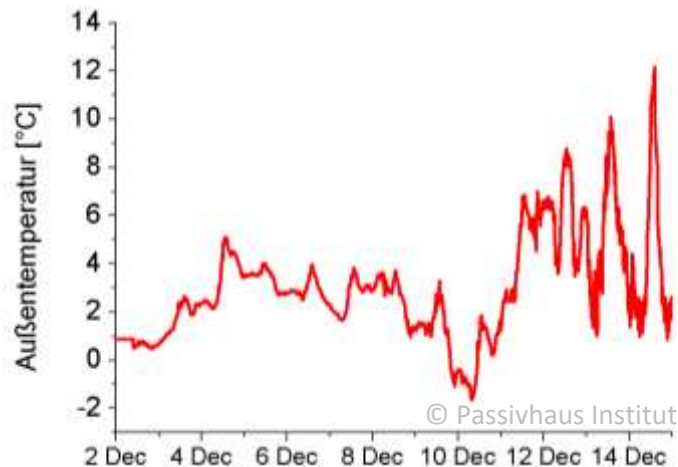


Abbildung 35: Verlauf der Außentemperatur während des Messzeitraums.

### 3.2.2.2 Innenbedingungen

Die aufgenommenen Messdaten (10 Sekunden Werte) der einzelnen Sensoren in den unterschiedlichen Räumen wurden zunächst auf der Zeitachse in Einklang gebracht. Während der Messzeit waren einzelne Uhren um mehrere Minuten gedriftet. Die Korrektur erfolgte mit der Annahme, dass über den Messzeitraum eine konstante Drift vorlag. Weiter erfolgte eine Kalibration der Temperatursensoren in einem Wasserbad mit einem Referenzsensor. Aus diesen kalibrierten 10 s Messwerten wurden dann zur weiteren Verarbeitung 10 Minuten-Mittelwerte errechnet. Diese werden im Weiteren, wenn nicht speziell darauf hingewiesen wird, verwendet.

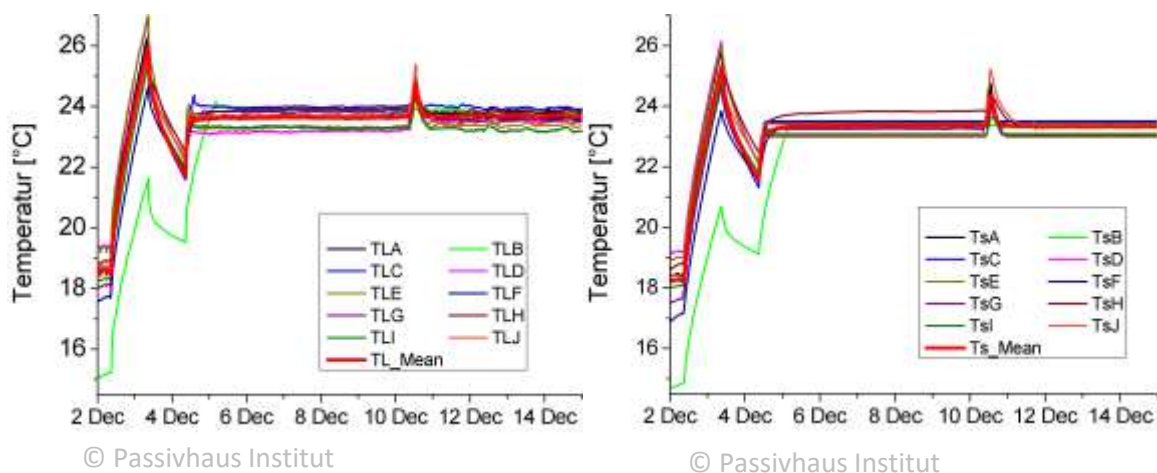
Der Verlauf der gemessenen Luft- und Strahlungstemperaturen in den einzelnen Räumen sowie deren grundflächengewichteter Mittelwert sind in Abbildung 36 dargestellt. Auffällig ist der Verlauf in Raum B, dem nur von außen zugänglichen Abstellraum. Dieser hatte eine deutlich niedrigere Ausgangstemperatur von lediglich 15 °C, die sich erst in der Co-Heating-Phase ab dem dritten Messtag an die Solltemperatur von 24 °C annäherte. Die übrigen Räume weisen Unterschiede in den gemessenen Temperaturen von weniger als 1 K auf. Wie erwartet kommt es während des QUB-Betriebs zunächst zu einem Temperaturanstieg, der im Mittel ca. 7 K beträgt. Der anschließende Temperaturabfall fällt mit 4,3 bzw. 4 K in der Luft- bzw. Oberflächentemperatur deutlich geringer aus. Am 10.12. kann während der Durchführung des Feuchteexperiments ein weiterer Anstieg der Temperaturen beobachtet werden. Er ist auf die zugeführte Energie zum Verdampfen des Wassers zurückzuführen.

Der Sollwert der Oberflächentemperatur betrug 24,5 °C. Bei der Kalibration, die erst im Anschluss an die Messung durchgeführt werden konnte, wurden allerdings Korrekturen für die einzelnen Temperatursensoren von fast -1 K bestimmt. Somit war die Oberflächentemperatur deutlich geringer als angestrebt. Auffällig ist der Verlauf der Oberflächentemperatur im Raum H (braune Kurve im rechten Teil der Abbildung), die



in der ersten Hälfte des Co-Heating-Betriebs zunimmt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass das Licht im Raum H (Gäste-WC) während dieser Zeit eingeschaltet war.

Die in das Gebäude eingebrachte Wärmemenge in Form von elektrischer Energie während des Experiments wurde durch eine hochgenaue Messung des Gesamtstromverbrauchs im Zählerkasten gemessen. Hier ist zu beachten, dass neben der gezielt und gesteuert eingebrachten Heizleistung durch Ein- und Ausschalten der Glühbirnen weitere elektrische Verbraucher während der gesamten Messzeit in Betrieb waren. Dabei handelt es sich zum einen um die Messtechnik (Ventilatoren, Switch und Arduino-Einheiten) und zum anderen um nicht ausgeschaltete elektrische Geräte wie den Kühlschrank.



**Abbildung 36:** Verlauf der Lufttemperaturen (links) und Oberflächentemperaturen (rechts) während der Messperiode in den einzelnen Räumen (A-J) sowie die flächengewichtete mittlere Temperatur des Gebäudes. Raum B (grüne Kurve) ist der gefangene Abstellraum, der vor der Messperiode unbeheizt war.



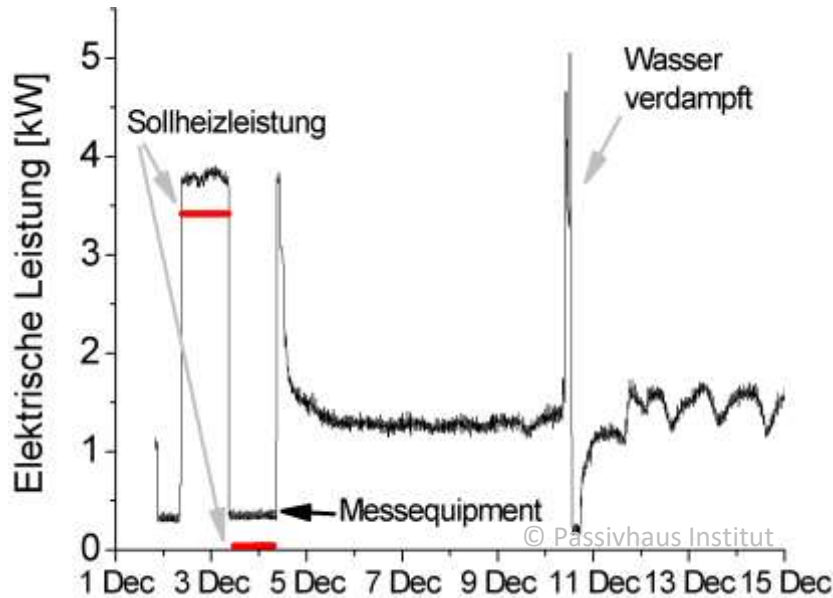


Abbildung 37: Verlauf der im Gebäude verbrauchten elektrischen Energie während der Messung.

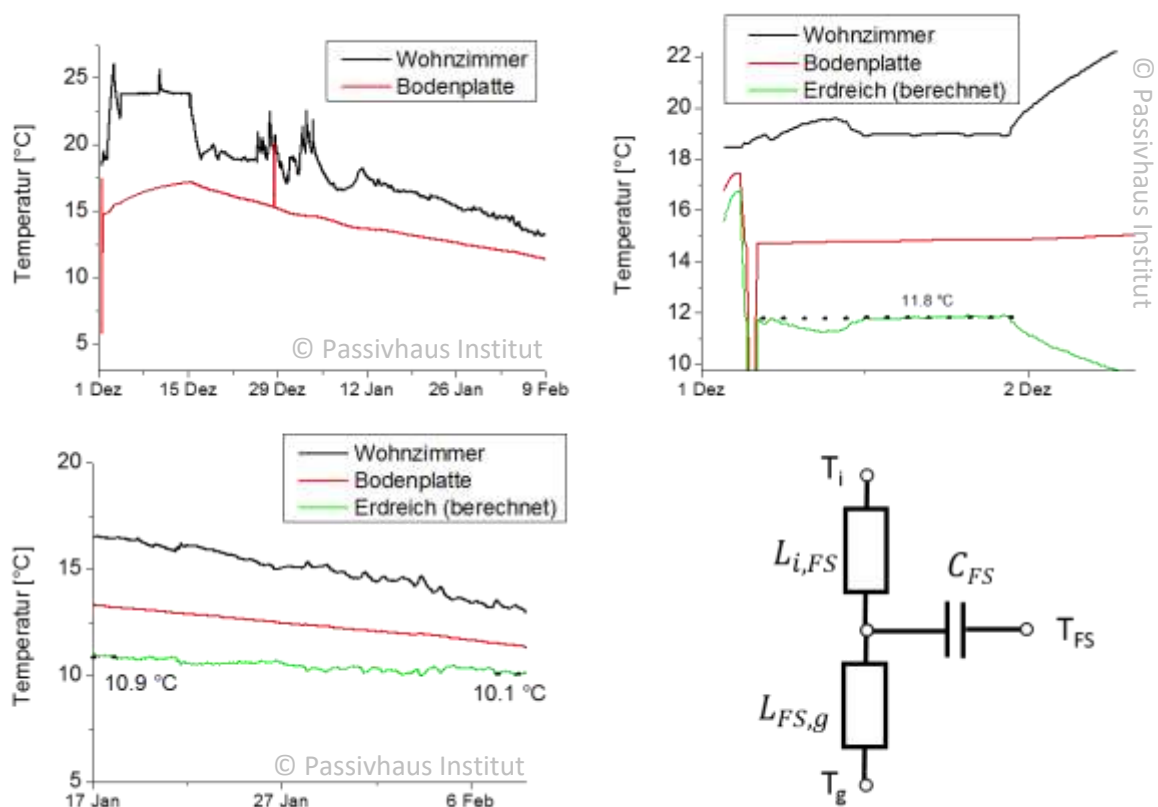
### 3.2.2.3 Abschätzung der Erdreichtemperatur

In einem Versorgungsschacht im Eingangsbereich (Raum G) konnte die Temperatur an der Oberseite der Bodenplatte, unter der darüber liegenden Dämmlage, gemessen werden. Hierdurch ist eine grobe Abschätzung der Erdreichtemperatur möglich. Im statischen Gleichgewicht wird der Temperaturabfall zwischen Innenlufttemperatur und Bodenplatte durch das Verhältnis der Leitwerte von innen bis zur Bodenplatte  $L_{i,FS} = 35 \text{ W/K}$  (FS = Floor Slab) und von der Oberseite der Bodenplatte bis zum Erdreich  $L_{FS,G} = 49,1 \text{ W/K}$  bestimmt. Der U-Wert der Bodenplatte von  $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ergibt einen Leitwert von  $20,4 \text{ W/K}$  für die gesamte Bodenplatte.

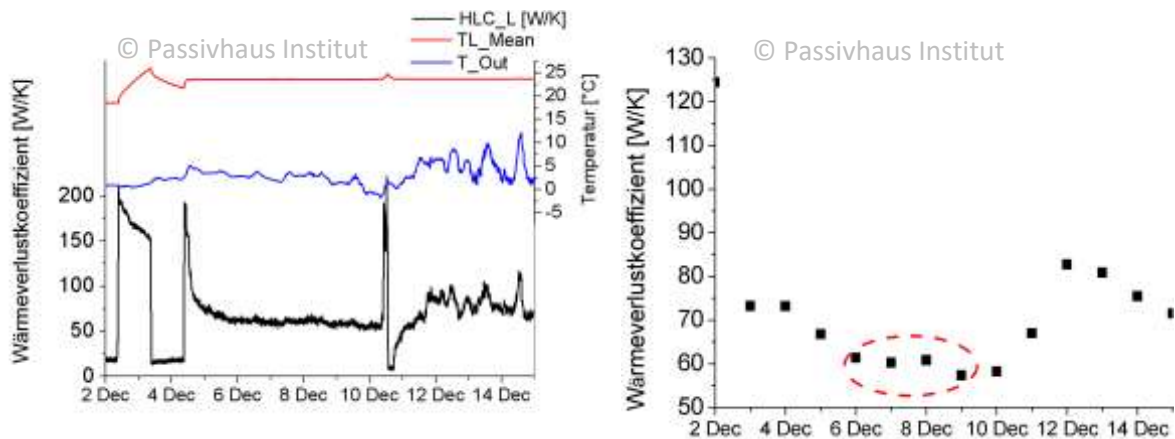
Die gemessenen Temperaturen oberhalb der Bodenplatte bis ca. 2 Monate nach dem Experiment sind in Abbildung 38 oben links dargestellt. Nach dem Experiment Anfang Dezember sinkt die Innentemperatur zunächst deutlich auf knapp unter  $20 \text{ °C}$ . Die Schwankungen um den Jahreswechsel sind auf die Anwesenheit von Personen und solare Gewinne durch geöffnete Rollläden zurückzuführen. Danach sinkt die Raumtemperatur noch einmal deutlich auf unter  $15 \text{ °C}$  ab. In dieser Zeit war das Haus ungenutzt, die Rollläden waren verschlossen und die Kompaktwärmepumpe nur auf einer kleinen Stufe eingestellt. Ein vereinfachtes thermisches Modell zur Beschreibung der Prozesse in der Bodenplatte ist unten rechts dargestellt. Die sehr große Kapazität der Bodenplatte  $C_{FS}$  ist besonders bei dynamischen Änderungen der Temperaturen relevant. Sie kann näherungsweise vernachlässigt werden, wenn die Innentemperatur konstant ist. Dies trifft am ehesten auf den Zustand zu Beginn der Messung zu. Aus dem Verhältnis der Leitwerte ergibt sich dann eine Erdreichtemperatur von  $11,8 \text{ °C}$  (Eine physikalisch sinnvolle Auswertung ist nur bis zum Beginn der Heizphase des QUB-Test möglich). Würde die Annahme, dass die Wärmekapazität vernachlässigbar

ist (die aber in der Realität nicht zutreffend ist), auch am Ende der Messung angewandt, so ergaben sich Temperaturen zwischen 10,9 und 10,1 °C (Abbildung 38 links unten). Durch das Absinken der Temperaturen ist allerdings davon auszugehen, dass hier die Wärmekapazität der Bodenplatte entladen wird und somit eine zu hohe Erdreichtemperatur ermittelt wurde.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Faktoren, die zu Unsicherheiten bei dieser Messung führen. So liegt der Sensor lediglich 20 – 30 cm von dem Versorgungsschacht entfernt, so dass hier noch Randeffekte durch verstärkte Kopplung der Bodenplatte an die Lufttemperatur auftreten können. Weiter liegt eine Wärmebrücke der im äußeren Bereich vor der Haustür ungedämmten Bodenplatte vor, die eher zu niedrigen Bodenplattentemperaturen bewirkt. Zum Vergleich mit dem Monatsmittelwert der Erdreichtemperatur im dem PHPP (für Dezember 12,3 °C) ist die Messstelle gut geeignet, da sie sich etwa auf halbem Weg zwischen Mittelpunkt und Rand der Bodenplatte befindet. Aufgrund dieser Überlegungen lässt sich die Erdreichtemperatur auf 12 °C ± 1 K schätzen.



**Abbildung 38:** Temperatur auf der Bodenplatte an einem Versorgungsschacht und Innenraumtemperatur (oben links). Daraus wird mit dem Widerstandsmodell (unten rechts) die Erdreichtemperatur unter Vernachlässigung der Wärmekapazität der Bodenplatte abgeschätzt: zu Beginn der Messung ergeben sich 11,8 °C (oben rechts). Nach der Messung sinkt die Raumtemperatur deutlich. In Folge ergeben sich Erdreichtemperaturen von 10,1 °C - 10,9 °C (unten links).



**Abbildung 39:** Übersicht über Verlauf von Innentemperatur (rot) und Außentemperatur (blau) über die Messzeit sowie des gleitenden Wärmeverlustkoeffizienten (schwarz) (links) und die tageweisen Wärmeverlustkoeffizienten (rechts).

### 3.2.3 Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten der Passivhaus Scheibe

Im Folgenden werden verschiedene Verfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten angewendet. Dadurch wird ein direkter Vergleich der Verfahren für ein Gebäude möglich. Die Ergebnisse werden dann mit der Abschätzung für den erwarteten Wert verglichen.

#### 3.2.3.1 Co-Heating Methode

Bei der klassischen Auswertung eines Co-Heating Tests werden die tagesmittleren elektrischen Leistungen zum Aufrechterhalten einer konstanten, meist erhöhten Innentemperatur gegen die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen für einen Zeitraum von 1-2 Wochen aufgetragen. Man kann sich nun die Frage stellen, ob alle gemessenen Tageswerte gleichermaßen berücksichtigt werden sollten. Die Tageswerte während des QUB-Tests und beim Verdampfen von Wasser sicherlich nicht. Im linken Teil von Abbildung 39 ist ein Annähern an einen konstanten Wert der Momentanwerte des gleitenden Wärmeverlustkoeffizienten zwischen QUB-Test und Feuchteexperiment (4.-10.12.) zu sehen. In diesem Bereich ist die Innentemperatur konstant auf 24 °C gehalten worden und auch die Außentemperatur ändert sich nur wenig. Es handelt sich also um optimale Bedingungen für die Bestimmung des statischen HLC. Daher wurden lediglich die vier Messpunkte vom 6.-9.12. für die Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten verwendet. Nach dem Verdampfen gibt es zwar eine erneute Co-Heating-Phase, aber hier spielen Feuchtespeichereffekte eine Rolle und die Außenbedingungen sind deutlich instabiler und daher für die Auswertung ungünstig.

Werden diese Tagesmittelwerte der elektrischen Leistung in Abhängigkeit von den Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen aufgetragen, so ergibt sich, wie in Abbildung 40 zu sehen, ein Wärmeverlustkoeffizient von  $59,9 \pm 0,9$  W/K. Betont werden muss an dieser Stelle, dass es sich beim hier angegebenen Fehler nur um den

rein statistischen Fehler handelt. Hinzu kommen die akkumulierten Messfehler für Temperatur und Heizleistungsbestimmung, die für die Spezifikation der Sensoren ( $\pm 0,3$  K) bei  $1,8$  W/K liegen. Durch die Nachkalibration wird davon ausgegangen, dass der Fehler der Temperatursensoren auf  $0,2$  K reduziert werden kann und somit der zu erwartende Fehler des HLC sich auf  $1,2$  W/K reduziert.

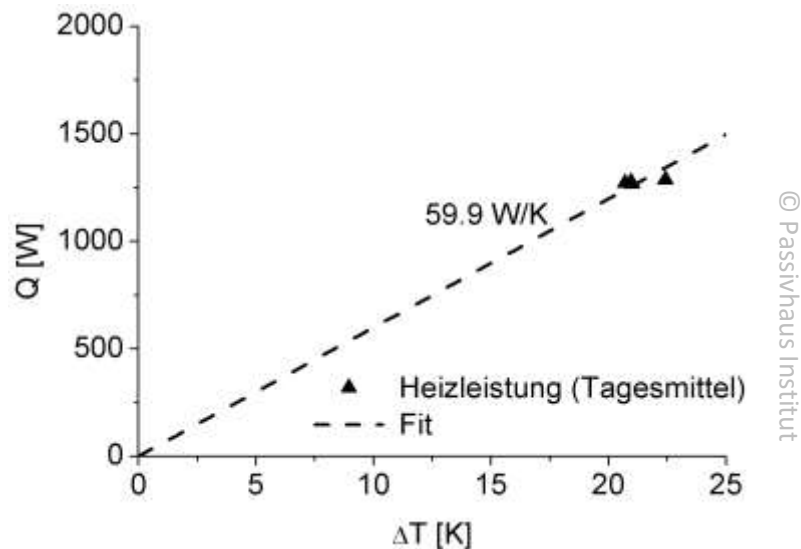


Abbildung 40: Co-Heating-Auswertung der Messdaten für den eingeschränkten Zeitbereich vom 6.-9.12.

### 3.2.3.2 QUB Methode

Zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten nach der QUB-Methode werden die Verläufe der Innentemperaturen am Ende von Heiz- und Kühlphase ausgewertet. Die Steigungen am Ende der Heiz- und Kühlphasen in der Oberflächentemperatur wurden ermittelt (vgl. Abbildung 41). Die Heizleistung in der Heizphase lag im Mittel bei ca.  $3800$  W und die Außentemperatur bei  $3$  °C. Die elektrische Leistung, die in der Passivhausscheibe auch während der Kühlphase verbraucht wurde, liegt bei ca.  $350$  W, also etwa  $10$  % der Heizleistung. Es ergibt sich nach der QUB-Methode (vgl. Abschnitt 1.2.2) ein Wärmeverlustkoeffizient von  $HLC_{QUB} = 73,0$  W/K.

Der Temperaturverlauf während Heiz- und Kühlphase ist in der Passivhausscheibe nicht symmetrisch, da eine zu hohe Heizleistung eingebracht wurde. Dies könnte einen Grund dafür darstellen, dass ein zu hoher Wärmeverlustkoeffizient bei der Auswertung bestimmt wird [Pandraud2014]. Eine Fehlerquelle bei der Auswertung der QUB-Messung ist die Vernachlässigung der Heizleistung während der Kühlphase, die einen Wärmeverlustkoeffizienten von lediglich  $60,6$  W/K zur Folge hätte nur zufällig in guter Übereinstimmung mit dem Co-Heating Test. Neben dem Wärmeverlustkoeffizienten kann aus der QUB-Messung auch die effektive Wärmekapazität entsprechend Ab-

schnitt 1.2.2 bestimmt werden. Für die Passivhausscheibe ergab sich eine Wärmekapazität von 78 Wh/K pro m<sup>2</sup> Wohnfläche. Dieser Wert liegt im zu erwartenden Bereich für Leichtbauten [PHPP2013].

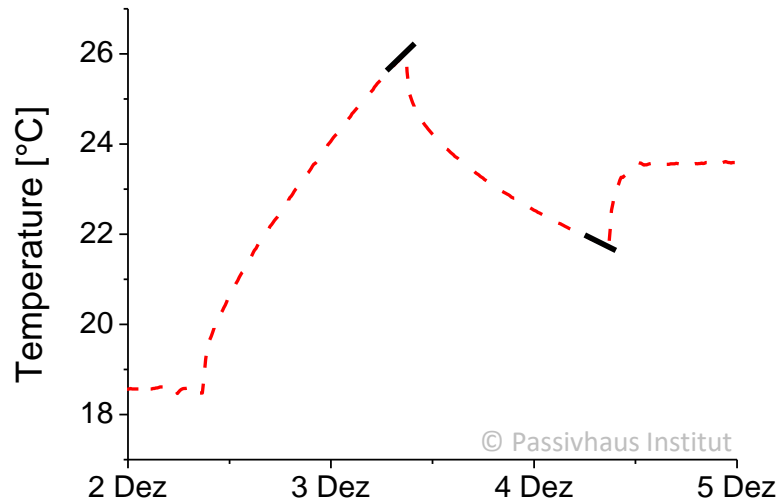


Abbildung 41: Verlauf der Innentemperatur und Tangenten am Ende der Heiz- bzw. Abkühlphase.

### 3.2.4 Vergleich der Messdaten mit dynamischen Gebäudesimulationen

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dynamischen Gebäudesimulationen der Passivhausscheibe mit DYNBIL dargestellt und mit den Messwerten verglichen. Dabei wurde das Simulationsmodell, soweit möglich, an das reale Gebäude und die während der Messung herrschenden Randbedingungen angepasst. Zum einen sollten im Vergleich die Planungswerte aus der Energiebilanzberechnung überprüft werden, die die Grundlage für den Erwartungswert des HLC bilden. Zum anderen sollte das Feuchtemodul von DYNBIL durch Abgleich mit den Messwerten verbessert und validiert werden.

#### 3.2.4.1 Beschreibung des Simulationsmodells

Die Simulationsrechnungen wurden mit dem dynamischen, hygrothermischen Gebäudesimulationsprogramm DYNBIL (vgl. Abschnitt 1.4.1) durchgeführt.

#### Gebäudemodell

Die Messungen in der Passivhausscheibe wurden bei offenen Innentüren und mit Ventilatoren in den Räumen durchgeführt, sodass fast überall ähnliche Raumtemperaturen zu erwarten sind. In der Tat zeigt Abbildung 36, dass die gemessenen Oberflächentemperaturen sich gewöhnlich in einer Bandbreite von  $\pm 1$  K bewegen, in der Co-Heating-Phase eher um  $\pm 0,2$  K liegen.

Eine Ausnahme stellt der nur von außen her zugängliche, unbeheizte Abstellraum für Gartenutensilien u.ä. dar, der nicht im Luftaustausch mit den übrigen Räumen steht. Hier ist es vor allem vor Beginn der Co-Heating-Phase deutlich kühler.

Daher erschien es angemessen, den gesamten Wohnbereich als eine einzelne thermische Zone abzubilden. Eine zweite Zone wurde für den Abstellraum benötigt. Es ergibt sich damit die Zonierung gemäß Abbildung 42.

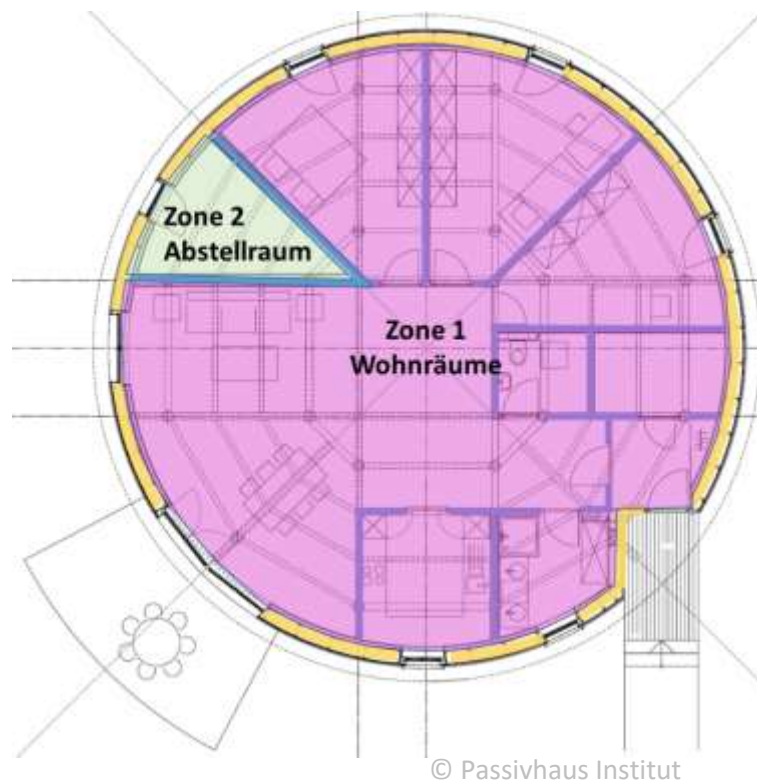


Abbildung 42: Zonierung des Gebäudes für die dynamische Simulation

### Gebäudedaten

Die Eigenschaften der Gebäudehülle richten sich weitgehend nach den aus dem PHPP verfügbaren Daten. Im Gebäude wurde zeitweise die CO<sub>2</sub>-Konzentration gemessen. Da keine relevanten CO<sub>2</sub>-Quellen oder -Senken im Innern vorhanden sind, ließ sich nach der Konzentrationsabfallmethode die tatsächliche Infiltration ermitteln. Es ergab sich, bezogen auf eine Raumhöhe von 2,50 m, ein Luftwechsel von 0,0052 h<sup>-1</sup>.

Gemäß PHPP würde man im offenen Gelände aufgrund des bei Fertigstellung des Gebäudes gemessenen Drucktestluftwechsels von  $n_{50}=0,41 \text{ h}^{-1}$  einen mittleren Luftwechsel von  $0,033 \text{ h}^{-1}$  erwarten. Die sehr geringen Windgeschwindigkeiten während der Messung und der in dem eingeschossigen Gebäude stark unterdurchschnittliche Stack-Effekt machen sich hier bemerkbar. Für die Messungen und deren Auswertung ist es günstig, wenn die Störung durch Infiltration nur gering ist.



### **Randbedingungen**

Wetterdaten für Außenlufttemperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung wurden während der Messperiode mit einer eigenen Wetterstation aufgenommen. Aus diesen Daten konnte ein Wetterdatensatz für DYNBIL generiert werden. Die Solarstrahlung wird zwar in der Simulation mitgeführt, sie hat aber keinen bedeutenden Einfluss, da die Rollläden während der gesamten Messperiode geschlossen blieben und die opake Gebäudehülle U-Werte unter  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  besitzt.

Mit begrenzter Genauigkeit konnte auch die Temperatur der Bodenplatte ermittelt werden. In einem Schacht im Eingangsbereich war es möglich, einen Temperatursensor unter der Bodenplattendämmung oberhalb der Bodenplatte zu platzieren (vgl. Abschnitt 3.2.2.3). Die dort gemessene Temperatur stieg während der 14 Tage dauernden Messung von  $14,9$  auf  $17,2 \text{ °C}$ . Dies wurde in der Simulation berücksichtigt. Es sollte hier angemerkt werden, dass es sich hierbei nicht um die Erdreichtemperatur handelt, da sich unterhalb der Bodenplatte eine weitere Dämmschicht mit  $120\text{mm}$  (WLG 040) befindet.

Der gesamte Stromverbrauch und damit die gesamten internen Wärmequellen wurden mit hoher Genauigkeit gemessen und gemäß der ebenfalls, aber nur näherungsweise gemessenen Heizleistungen (An- /Auszustände der Glühbirnen) in den einzelnen Räumen, auf die thermischen Zonen aufgeteilt.

### **Durchführung der Simulation**

Der in der Simulation abgebildete Zeitraum beginnt bereits einen Monat vor dem Messzeitraum, um ein Einschwingen des Modells zu ermöglichen. Die Randbedingungen (Wetterdaten, Nutzung, Raumtemperatur und -feuchte, Luftwechsel, Stellung von Fenstern und Verschattung, interne Wärmegegewinne etc.) während dieser Einschwingphase sind nicht bekannt; hier wurden plausible konstante Randbedingungen gewählt, unter denen sich die Bedingungen zu Beginn der Messung wie auch während der eigentlichen Messperiode möglichst gut einstellen.

Ein Vergleich von Messung und Simulation ist dann ab Dienstag, 2.12.2014, 8:00 Uhr sinnvoll möglich, d.h. beginnend mit dem ersten Temperaturanstieg in Abbildung 36 bzw. Abbildung 43.

#### **3.2.4.2 Simulationsergebnisse Referenzfall**

Sowohl für die Temperaturen als auch für die Feuchte konnte eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten erzielt werden. Abbildung 43 zeigt den gesamten Verlauf des Experiments in der Übersicht.



Der Temperaturanstieg und -abfall während des QUB-Tests wird realistisch wiedergegeben, in der Co-Heating-Phase ergeben sich analog zur Messung weitgehend konstante Temperaturen. Die Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen beträgt stets unter 0,7 K. Der Root Mean Square Error RMS, d.h.

$$\sqrt{\frac{\sum_n (T_{mess} - T_{sim})^2}{n}}, \text{ n... Zahl der Messpunkte}$$

beträgt für die Lufttemperaturen 0,25 K, für die Strahlungtemperaturen 0,13 K und liegt damit im Bereich der Messunsicherheiten von ca. 0,2 K.

Abweichungen sind vor allem am Ende des Messzeitraums, bei Betrieb der Lüftungsanlage und größeren Schwankungen der Außenlufttemperatur, zu erkennen. In den letzten drei Tagen stieg die simulierte Temperatur gegenüber der gemessenen jeweils um die Mittagszeit um einige Zehntel Kelvin an, um danach wieder abzufallen.

Der Zeitverlauf der Raumlufftfeuchte wird vom Grundsatz her ebenfalls gut wiedergegeben. Die größten Abweichungen mit bis zu 0,7 g/kg absoluter Feuchte bzw. 4 Prozentpunkten relativer Feuchte gibt es beim Feuchteabfall im Anschluss an den Feuchtepeak sowie erneut nach Einschalten der Lüftungsanlage.

Der erste Feuchteabfall im Zeitraum ab Mi, 10.12., 12:00 Uhr ist durch Feuchtespeichereffekte bestimmt; die Lüftungsanlage war in diesem Zeitraum noch ausgeschaltet. Augenscheinlich erfolgt die Einspeicherung der Raumlufftfeuchte in die Bauteile im Modell etwas zu langsam, möglicherweise aufgrund eines zu gering angesetzten Feuchtetransports im Material.

Auch der weitere Feuchteabfall nach Einschalten der Lüftungsanlage am Donnerstagnachmittag, 11.12., erfolgt im Modell anfangs zu langsam. Ein zu langsamer Feuchtetransport im Material könnte sich auch in dieser Phase noch auswirken. Dagegen ist ein zu gering angesetzter Luftwechsel vermutlich nicht für die Abweichung verantwortlich, denn am Ende des Messzeitraums hat die simulierte Raumlufftfeuchte den gemessenen Wert wieder erreicht und sogar geringfügig unterschritten.

Für den Abstellraum wird der Temperaturverlauf etwas schlechter wiedergegeben als für die Wohnräume (Abbildung 44). Die simulierten Temperaturen weichen um bis zu 1,1 K von den gemessenen ab, der RMS beträgt 0,4 K (Luft) bzw. 0,3 K (Oberflächen). Aufgrund des fehlenden Feuchtepeaks stimmen die Feuchtwerte etwas besser überein, die maximale Abweichung beträgt 0,4 g/kg bzw. 2 Prozentpunkte.

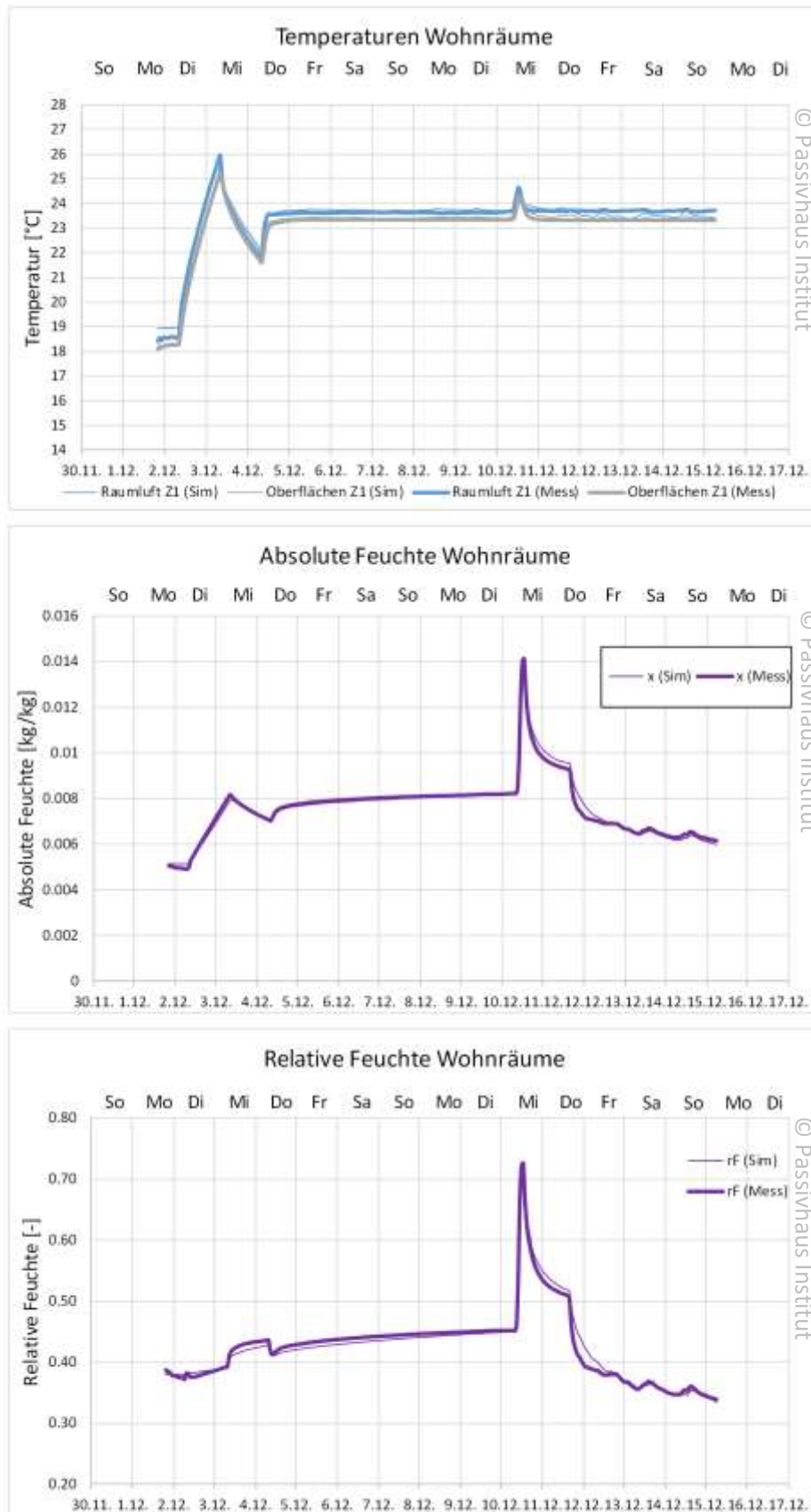


Abbildung 43: Zeitverlauf von Raumtemperatur und -feuchte in den Wohnräumen, Messung vs. Simulation, Referenzfall.

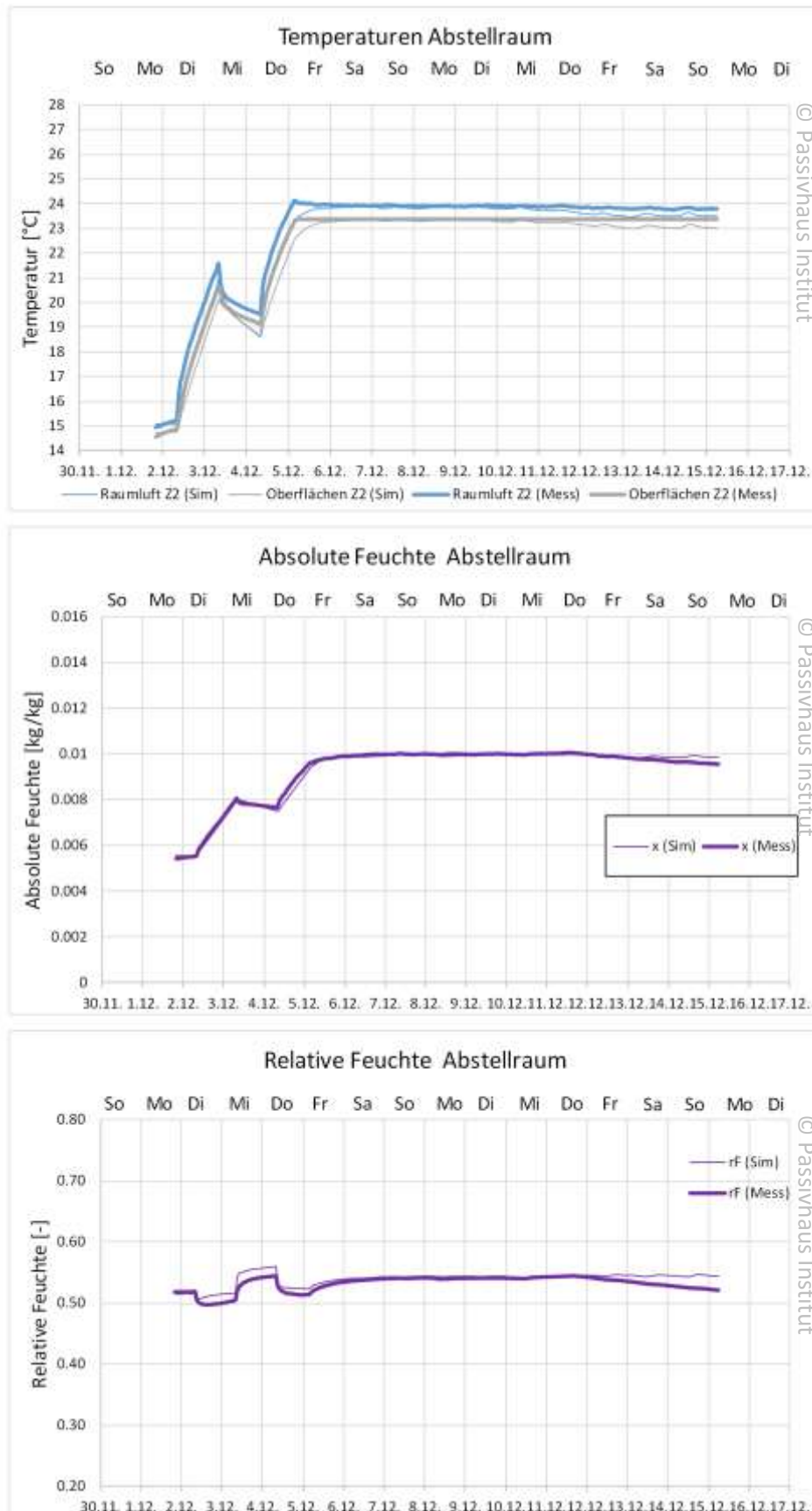


Abbildung 44: Zeitverlauf von mittlerer Raumtemperatur und -feuchte im Abstellraum, Messung vs. Simulation, Referenzfall.

Diese Ergebnisse sind verträglich mit folgenden Aussagen:

- Das im PHPP (auf dem das Simulationsmodell basiert) projektierte Wärmeschutzniveau wurde in der Realität im Rahmen der hier erzielbaren Genauigkeit erreicht. Es kann somit davon ausgehen werden, dass der projektierte Wärmeschutz in der Praxis funktioniert. Eine spürbare Abweichung der Messergebnisse von den Simulationswerten gibt es nicht - zumindest von der Gebäudehülle her gibt es somit keinen Beitrag zu einem "Performance Gap".
- DYNBIL bildet den Wärmeverlust des Gebäudes korrekt ab.
- Auch bezüglich der Dynamik sind keine Schwächen des Simulationsprogramms zu erkennen.
- Feuchtetransport und -speicherung im Gebäudeinnern werden durch DYNBIL ebenfalls korrekt wiedergegeben.

### 3.2.4.3 Einflüsse auf die Übereinstimmung von Messung und Simulation

Ein dynamisches Gebäudemodell wird durch eine Vielzahl von Parametern beschrieben, die erst in ihrer Gesamtheit das Simulationsergebnis bestimmen. Im hier untersuchten Beispiel wurden diese Größen mit einer Genauigkeit erfasst, die nur in unbewohnten Gebäuden möglich ist. Es verbleiben jedoch Einflussgrößen, die mit vertretbarem Aufwand nicht genau erfasst werden können. Diese wurden für die Modellierung so abgeschätzt, dass sich eine möglichst gute Übereinstimmung von Simulation und Messung ergab, ohne dabei den Bereich der Plausibilität zu verlassen. Nur auf diese Weise war es möglich, potenzielle Schwächen des Modells überhaupt zu identifizieren.

Die so erzielte, oben dargestellte gute Übereinstimmung von Messung und Simulation deutet zunächst darauf hin, dass die Messdaten, das Simulationsmodell und auch DYNBIL selbst keine relevanten Fehler enthalten. Ein Beweis der Korrektheit im mathematischen Sinne ist aber kaum möglich, dazu sind zu viele Einflussgrößen involviert, die potenziell sich kompensierende Fehler verursachen können. Dieser Zusammenhang wird in den nachfolgenden Parametervariationen näher illustriert. Außerdem sollen so für einige Einflussgrößen die Auswirkungen anderer Annahmen auf den Temperatur- bzw. Feuchteverlauf quantifiziert werden.

Die beschriebene Problematik hat auch zur Folge, dass eine eindeutige Identifikation eines bestimmten Parameters, z.B. auch des Wärmeverlustkoeffizienten des Gebäudes, auf dieser Basis kaum möglich ist.

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der verschiedenen Varianten zu gewährleisten, sind alle in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse mit einer Startausgleichsfeuchte in allen Bauteilen von durchgehend 80% berechnet. Der Rechenzeitschritt beträgt durchgehend 10 Sekunden.

## Temperatur unter der Bodenplatte

Energiebilanzen und dynamische Simulationsrechnungen verwenden als Randbedingung in aller Regel eine mittlere Temperatur unter der Bodenplatte, um den Wärmebedarf zu einem bestimmten Zeitpunkt zu ermitteln. Diese Temperatur wird bestimmt durch

- den U-Wert der Bodenplatte
- die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Erdreichs
- die geometrischen Verhältnisse
- die Innen- und Außentemperaturen der vergangenen Jahre

Die thermischen Vorgänge im Erdreich sind sehr träge, Einschwingphasen dauern in der Regel einige Jahre. Ein wärmeres Gebäude wird im Mittel höhere Temperaturen unter der Bodenplatte aufweisen als ein kälteres, ein Einfluss, der während eines wenige Tage dauernden Tests nicht kompensiert werden kann.

Unsicherheiten entstehen auch dadurch, dass die Eigenschaften des Erdreichs und etwaige Grundwasserströmungen nur mit begrenzter Genauigkeit bekannt sind.

Die Temperatur unter der Bodenplattendämmung oberhalb der Bodenplatte konnte in hier exemplarisch an einer Stelle gemessen werden (vgl. oben), die Temperaturverteilung insbesondere im Randbereich war jedoch nicht bekannt.

Setzt man statt der gemessenen Temperatur oberhalb der Bodenplatte, die von 14 auf 17 °C ansteigt, die konstante Erdreichtemperatur von 12,3 °C unter der Bodenplatte an, wie sie sich aus der PHPP-Berechnung für den Dezember ergibt, sinken die simulierten Temperaturen während der Messperiode deutlich ab (Abbildung 45).

In den Perioden mit abgeschalteter Lüftungsanlage (bis 12.12.) führt die niedrigere Temperatur auch zu niedrigerer absoluter Luftfeuchte. Grund ist die Tatsache, dass die relative Feuchte im Bauteil (genauer: die Wasseraktivität im Material) über die Sorptionsisotherme an den Wassergehalt des Materials gebunden ist. Da der Wassergehalt an den Bauteiloberflächen sich kaum ändert, bleibt die Wasseraktivität dort konstant; bei fehlendem Luftwechsel bestimmt die Wasseraktivität auch die relative Feuchte der Raumluft. Eine höhere Bauteiltemperatur führt damit zu höherer absoluter Feuchte der Raumluft und umgekehrt.

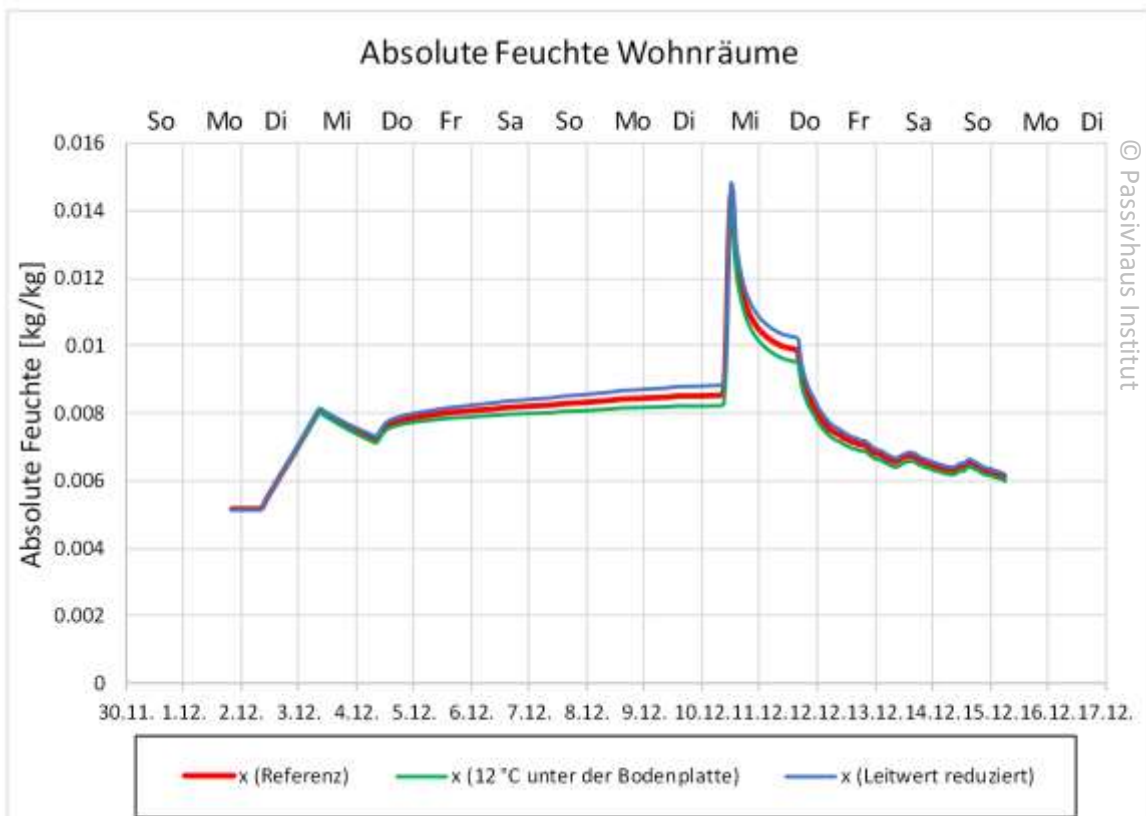
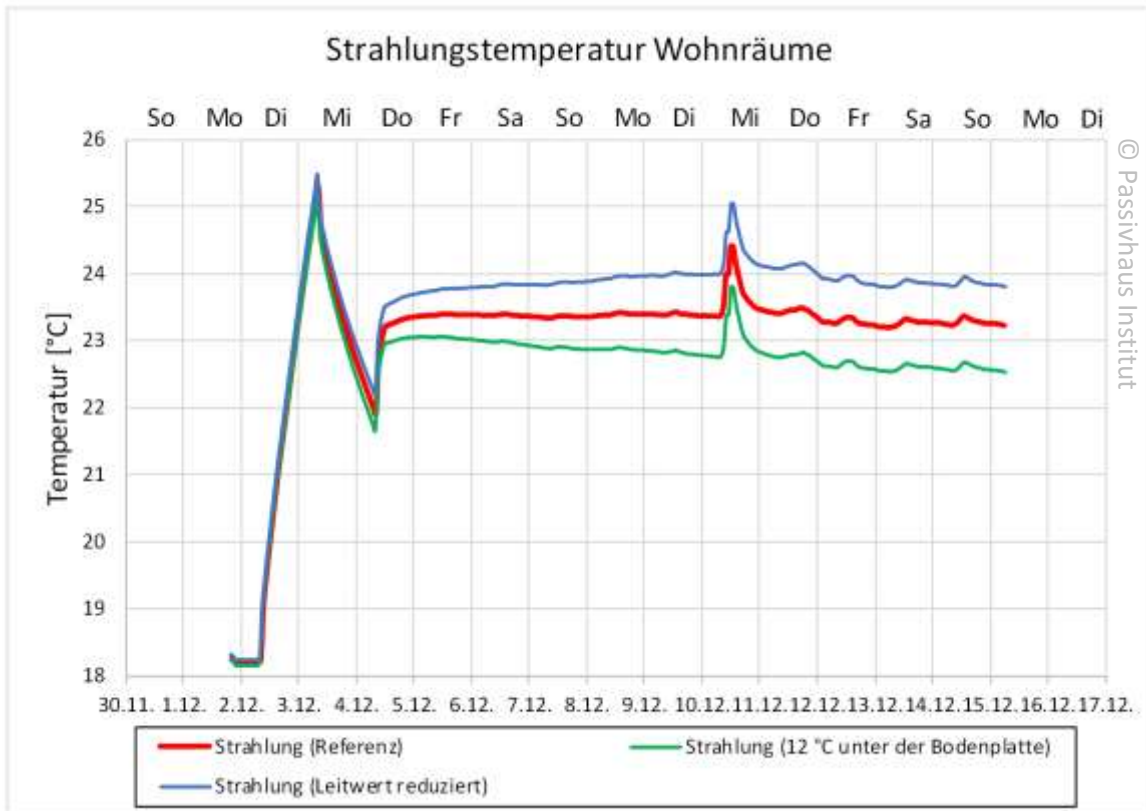


Abbildung 45: Einfluss der Temperatur unter der Bodenplatte und eines verringerten Leitwertes gegen Außenluft auf die Simulationsergebnisse



### **Leitwert der Gebäudehülle**

Die Prüfung der tatsächlichen Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe sowie der Qualität der Bauausführung, d.h. letztlich des thermischen Leitwerts der Gebäudehülle, war eines der Ziele des Experiments. Daher ist die Sensitivität der Simulationsergebnisse gegenüber Änderungen des Leitwerts von besonderem Interesse. Mit den spezifischen Transmissionsverlusten aus dem vorliegenden PHPP in Verbindung mit der gemessenen Infiltration ergab sich die beste Übereinstimmung von Messung und Simulation.

Die blauen Linien in Abbildung 45 zeigen, wie sich eine Reduzierung des thermischen Leitwerts zwischen Innenraum und Außenluft um 5% auswirkt. Die Raumtemperatur steigt dann im Laufe des Messzeitraums allmählich um ca. 1K an. Der Einfluss ist von ähnlicher Größenordnung wie der im letzten Abschnitt beschriebene Einfluss der Temperatur unter der Bodenplatte. Mit den Messungen verträglich wäre folglich auch eine niedrigere Temperatur unter der Bodenplatte in Verbindung mit einem insgesamt etwas höheren Transmissionsleitwert.

### **Temperaturen und Luftfeuchtigkeit im Gebäude vor Beginn der Messung**

Zu Beginn des Experiments sind die Temperatur und relative Feuchte im innern der Bauteile nicht bekannt. Allenfalls sind Abschätzungen dieser Werte möglich. Nach ausreichend langer Zeit klingt der Einfluss der Anfangsbedingungen zwar ab, insbesondere die Feuchte in der Tiefe der Bauteile, verändert sich aber nur auf Zeitskalen von Monaten spürbar.

Die Simulationen wurden für eine Anfangsfeuchte von 80% und mit einem Monat Vorlauf durchgeführt, d.h. sie beginnen jeweils am 1. November. Allerdings lagen aus dem November keine Messungen der Randbedingungen vor, so dass auch für die Randbedingungen nur Schätzungen verwendet werden konnten. Trotzdem darf erwartet werden, dass dieses Vorgehen zur bestmöglichen Voreinstellung der Bauteilzustände am Beginn des Messzeitraums führt.

Den Einfluss einer anderen Vorkonditionierung im Monat November zeigt Abbildung 46. Im Referenzfall (rot) wurden die Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten, wie sie zu Beginn der Messung ermittelt wurden, durch entsprechende Heizung und Entfeuchtung durch Einstellen einer konstanten Raumlufffeuchte für den gesamten November eingestellt.

Die grünen Linien stellen die Simulationsergebnisse für den Fall dar, dass im November keine Entfeuchtung auf eine konstante relative Luftfeuchte, wohl aber eine Beheizung stattfindet. Dies führt dazu, dass die gespeicherte Feuchte zu Beginn der Messung deutlich höher ist. Erst ab 1. Dezember werden die Startbedingungen der Messung eingestellt. Auf diese Weise stimmen Temperatur und Feuchte zu Beginn der Messung mit dem Referenzfall überein. Die Feuchte steigt aber rasch um etwa 3





g/kg über den Wert im Referenzfall an, weil mehr Feuchtigkeit aus den Bauteilen in die Raumluft gelangt.

Nach Einschalten der Lüftungsanlage gleichen sich die Luftfeuchten tendenziell an. Die höhere Feuchte in den Bauteilen führt allerdings zu stärkerer Verdunstung in die Raumluft, so dass die Raumtemperatur nun um nahezu 1 K unter den Wert im Referenzfall sinkt.

Wird das Gebäude im November nicht beheizt (blaue Linien), so stellen sich in dieser Phase Raumtemperaturen um 3 °C (keine solaren Gewinne) ein. Diese werden durch die Heizung ab dem 1. Dezember etwa auf den Wert im Referenzfall angehoben. Aufgrund der niedrigen Temperaturen im Innern der Bauteile sinken die Raumtemperaturen jedoch wieder bis auf 1,5 K unter die Werte im Referenzfall ab. Die Raumluftfeuchte bleibt dabei weitgehend unbeeinflusst.

### **Möbel**

Das vorhandene Mobiliar ist zwar grundsätzlich bekannt, da es unmittelbar sichtbar ist. Eine detaillierte Abbildung der Möbel im Modell wäre jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden. Die Möbel wurden daher vereinfacht als senkrecht stehende Spanplatten von 50 mm Dicke mit einer Gesamtfläche von 60 m<sup>2</sup> in den Wohnräumen und 15 m<sup>2</sup> im Abstellraum modelliert.

Verdoppelt man die Fläche der Möbel bzw. entfernt man die Möbel aus den Räumen, so ergeben sich die Temperatur- und Feuchteverläufe aus Abbildung 47. Erwartungsgemäß führen geringere Wärmekapazitäten zu stärkeren Temperatur- und Feuchteschwankungen und umgekehrt.

Insgesamt ist der Einfluss der Möbel zwar nicht vernachlässigbar, aber gering genug, dass pauschale Ansätze vertretbar sind.

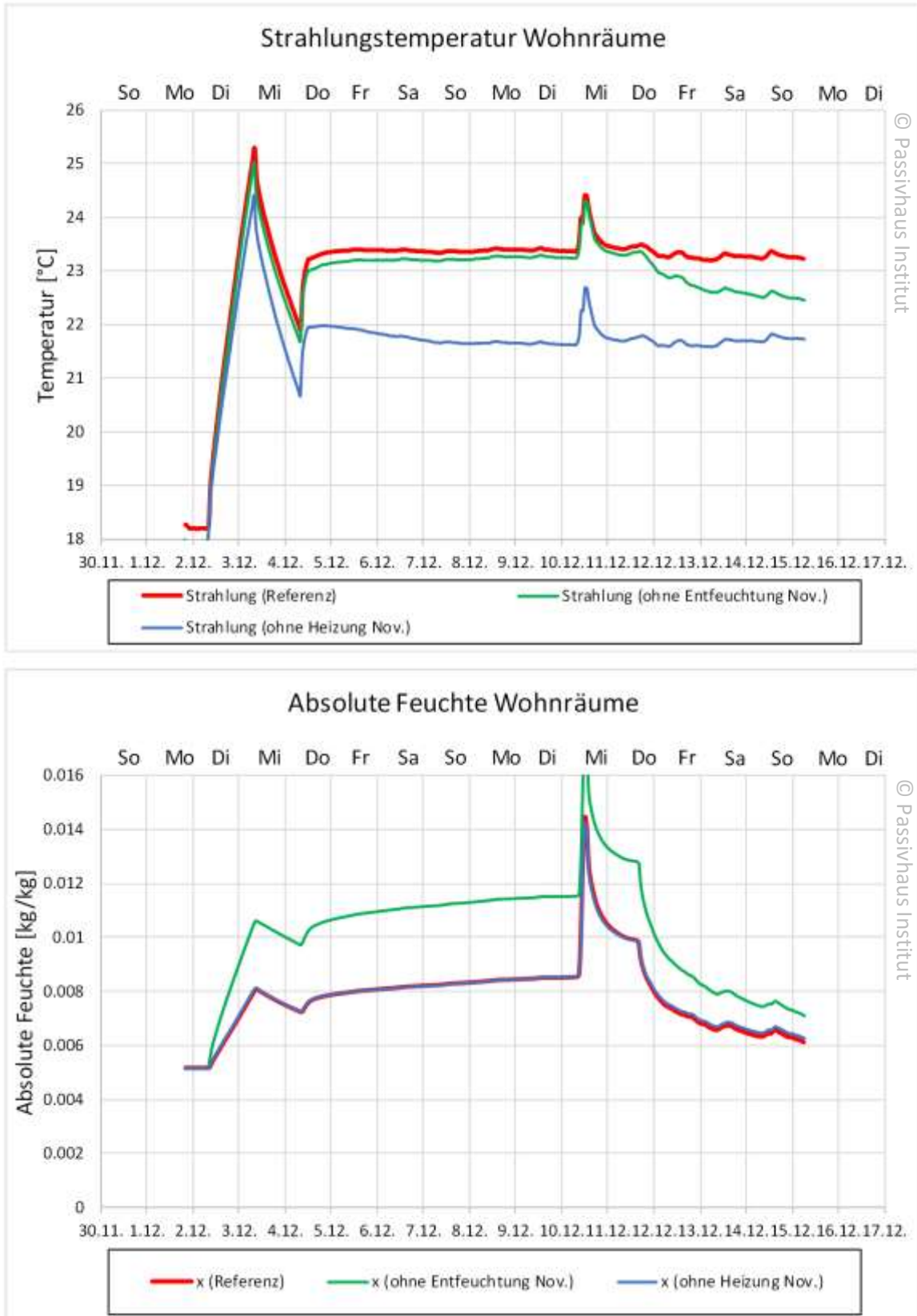


Abbildung 46: Einfluss der Temperatur und Feuchte im Monat vor Beginn der Simulation auf die Simulationsergebnisse

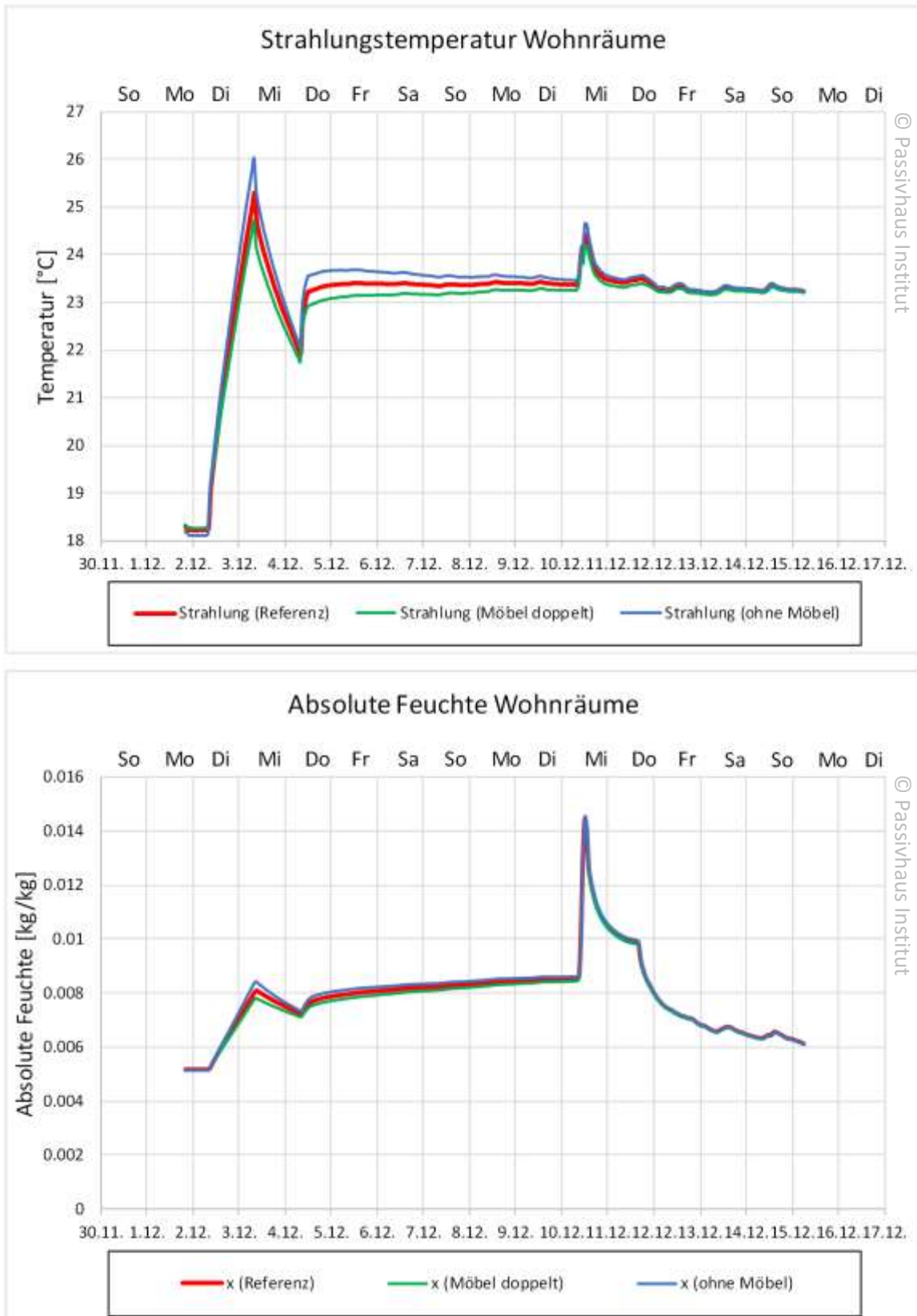


Abbildung 47: Einfluss des Ansatzes für die Möbel auf die Simulationsergebnisse

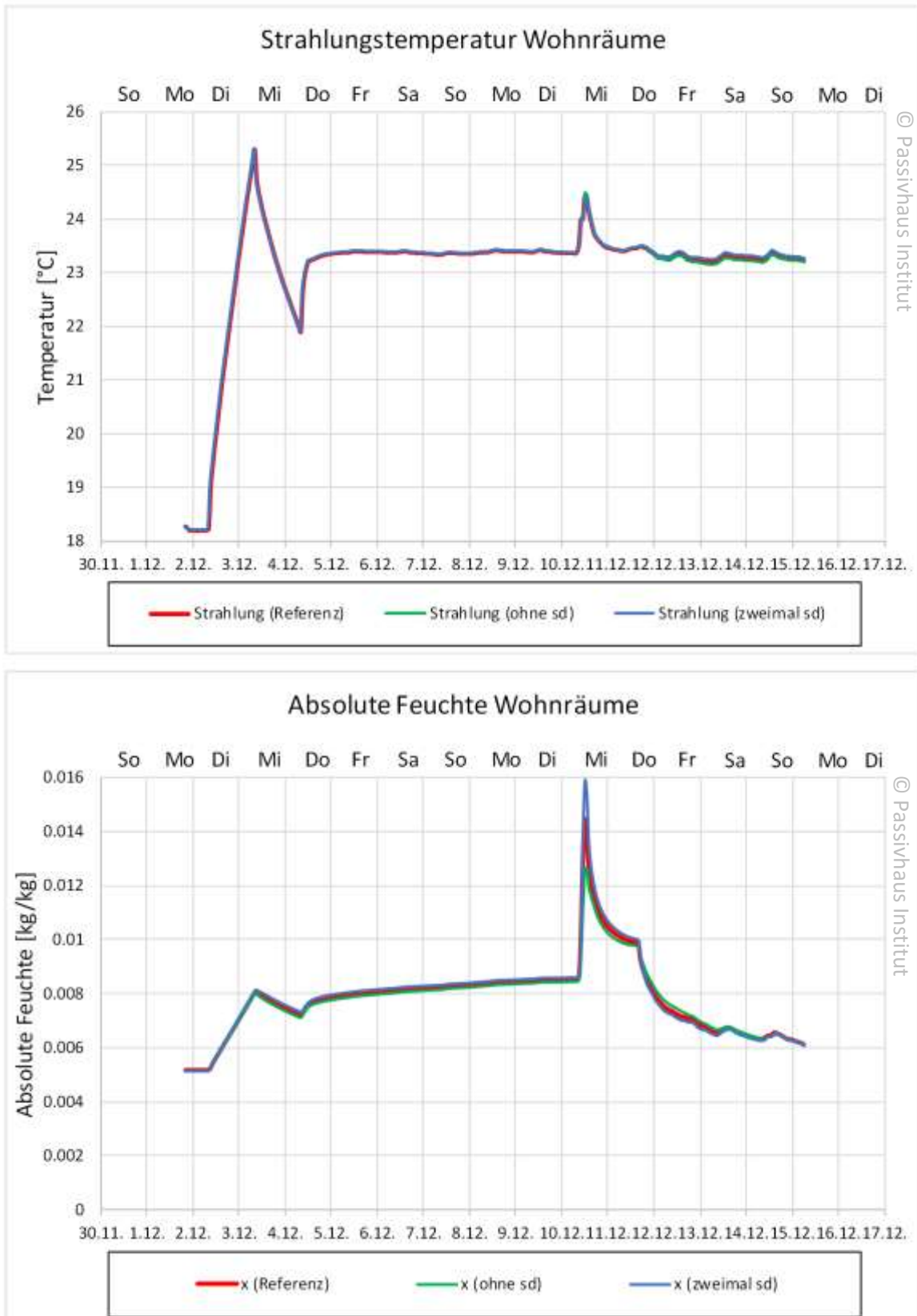


Abbildung 48: Einfluss des Ansatzes für den Diffusionswiderstand auf den Bauteiloberflächen auf die Simulationsergebnisse

## **Diffusionswiderstand an den Oberflächen**

Der Feuchteaustausch zwischen Raumluft und Bauteilen wird durch Oberflächenbeschichtungen, Lacke u.ä. beeinflusst. Deren Eigenschaften sind in der Regel allerdings nicht näher bekannt. Im Referenzfall hat ein zusätzlicher  $s_d$ -Wert von 0,062 m zu guter Übereinstimmung mit den Messwerten geführt. Ein Vergleich mit anderen Diffusionswiderständen aus [Reichel2004] zeigt, dass dies durchaus ein sehr realistischer Ansatzwert ist.

Abbildung 48 zeigt die Auswirkungen eines fehlenden bzw. eines verdoppelten  $s_d$ -Wertes auf den Oberflächen. Wie man sieht, wirken sich unterschiedliche  $s_d$ -Werte primär auf die Höhe des Feuchtepeaks aus. Langsamere Änderungen der Raumluftfeuchte, wie sie z.B. zu Beginn der Messungen oder nach Einschalten der Lüftungsanlage stattfinden, werden dagegen durch den  $s_d$ -Wert kaum beeinflusst.

Daraus lässt sich auch folgern, dass die genauen Werte der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an den Innenoberflächen – die über die Lewis-Relation mit den Feuchteübergangskoeffizienten gekoppelt sind – keine dominierende Rolle für die korrekte Abbildung der Feuchtespeichervorgänge im Gebäude spielen. Eine ausreichend feine Diskretisierung in Oberflächennähe erscheint wichtiger (vgl. Abschnitt 0).

## **Zum Einfluss der Diskretisierung**

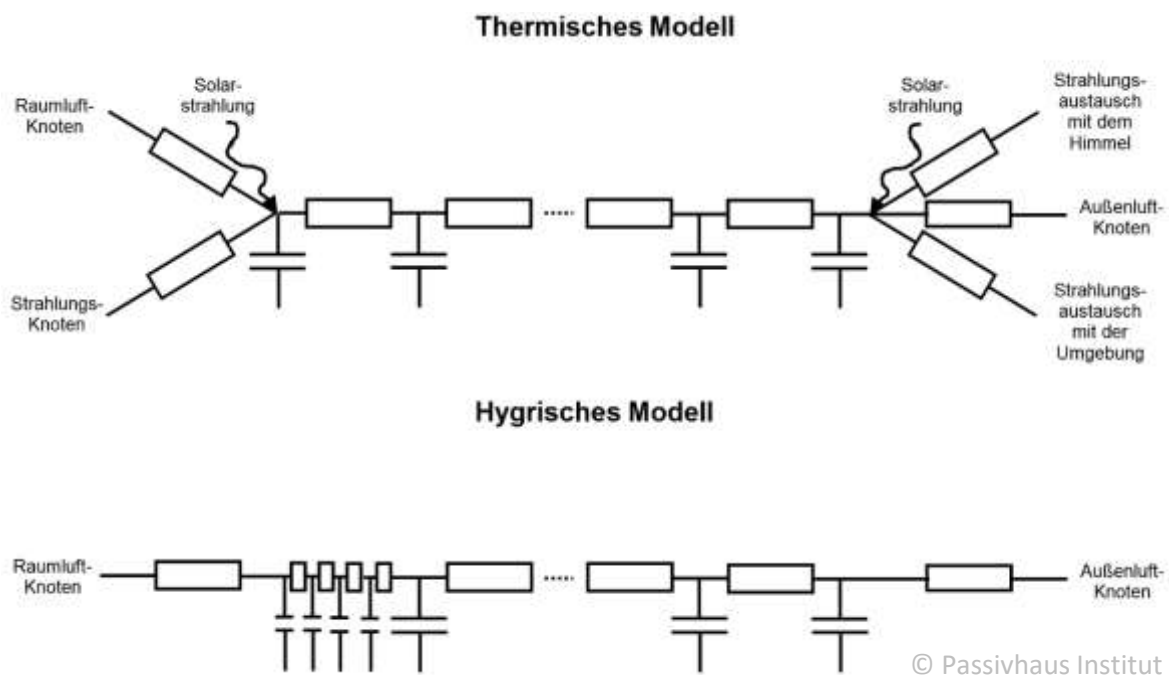
Während thermische Prozesse in Bauteilen sich auf Zeitskalen von Stunden bis Tagen abspielen, können Feuchtetransport und -speicherung Monate bis Jahre in Anspruch nehmen. Insbesondere bei Bauteilen aus Beton oder Mauerwerk können mehrere Jahre vergehen, bis der Wassergehalt im Innern des Bauteils quasistationär wird, d.h. von den jahreszeitlichen Schwankungen dominiert wird.

Auch das Eindringen von Feuchte ins Bauteil nimmt dementsprechend mehr Zeit in Anspruch als eine Erwärmung bzw. Abkühlung. Ein Beispiel zeigt Abbildung 50: Die Oberfläche einer Betonwand wird für drei Stunden einer erhöhten Temperatur (oben) bzw. Feuchte (unten) ausgesetzt. Der oberflächennächste Zentimeter der Wand ist dabei in zehn gleiche Knoten diskretisiert. Während die Temperaturen im ersten Zentimeter des Bauteils fast identisch sind (maximale Differenz: 0,4 K), sind die Zeitverläufe des Wassergehalts in den verschiedenen Tiefen sehr unterschiedlich. Der Wassergehalt in einem Zentimeter Tiefe erreicht sein Maximum erst mehr als zwei Tage nach der Anregung.

Demnach ist für hygrothermische Berechnungen eine deutlich feinere Diskretisierung erforderlich als für rein thermische Berechnungen. Mit feinerer Diskretisierung sinkt aber die Zeitkonstante der einzelnen Knoten, so dass beim in DYNBIL verwendeten Lösungsverfahren mit kleineren Zeitschritten gerechnet werden muss, um Instabilitä-

ten zu vermeiden. Das führt zu hohen Rechenzeiten: Während für rein thermische Gebäudemodelle mit mehreren Zonen in DYNBIL typischerweise Jahressimulationen in weniger als 30 Sekunden durchgeführt werden können, benötigt eine hygrothermische Jahressimulation der einzelnen Betonwand aus Abbildung 50 bereits fast eine Stunde Rechenzeit.

Um die Simulationsrechnungen für den Annex 58 überhaupt sinnvoll durchführen zu können, wurde ausgenutzt, dass die feinere Diskretisierung nur für die hygrischen Teile der Berechnung benötigt wird, die kleinen Zeitkonstanten aber nur im thermischen Teil auftreten. Das Simulationsmodell wurde daher so modifiziert, dass sich einzelne thermische Knoten in mehrere hygrische Knoten unterteilen lassen. Allen hygrischen Knoten wird dann dieselbe Temperatur zugeordnet, umgekehrt wirken die thermischen Effekte des Wassertransports aus all diesen hygrischen Knoten auf denselben thermischen Knoten.



**Abbildung 49:** Skizze des erweiterten Dynbil-Modells für opake Bauteile am Beispiel einer Außenwand. Der raumnächste thermische Knoten ist in vier hygrische Knoten aufgelöst. Die übrige Wand kann aus mehr als den hier dargestellten Knoten bestehen.

Das so modifizierte Simulationsmodell wurde für die Referenzfälle der hygrothermischen Simulationen verwendet. Die raumnächste Schicht wurde dabei im hygrischen Modell so fein diskretisiert, dass die oberflächennächste Schicht eine Dicke von lediglich einem Millimeter besitzt. Das thermische Modell wurde gröber diskretisiert, so dass insgesamt mit einem Rechenzeitschritt von einer Minute gearbeitet werden konnte.

Abbildung 51 belegt, dass dieser Ansatz gerechtfertigt ist: Das für Feuchte und Temperatur unterschiedlich diskretisierte Referenzmodell (rot) liefert nahezu denselben Feuchte- und Temperaturverlauf wie ein durchgehend fein diskretisiertes Modell (grün).

Die grobe Diskretisierung auch für die Feuchte (blau) führt dagegen zu einem grundsätzlich anderen Feuchteverlauf. Insbesondere wird die Höhe des Feuchtepeaks unterschätzt und die Geschwindigkeit, in der die Raumlufffeuchte wieder abfällt, überschätzt. Nach Einschalten der Lüftungsanlage sinkt die Raumlufffeuchte bei grober Diskretisierung etwas langsamer ab, da die Raumluff an größere Feuchtekapazitäten gekoppelt ist.

Mit dem so angepassten und verbesserten Feuchtemodell ist es nun interessant zu untersuchen, welchen Einfluss der Feuchteübergang auf den Feuchtegehalt der Raumluff hat. Ohne Speicherung von Feuchte in den Wandaufbauten wird die relative Luftfeuchte im Innenraum ausschließlich durch den aktuellen Luftwechsel und die momentanen Feuchtequellen bestimmt. Ist der Feuchteübergang dagegen endlich, so spielt Feuchtespeicherung eine Rolle. Hier sind besonders die langfristigen Effekte interessant, wenn es um den Feuchtegehalt der Raumluff in der kalten Jahreszeit geht, in der durch die sehr trockene Außenluft grenzwertig geringe Raumlufffeuchten auftreten können. Hierzu wurde das Modell der Passivhausscheibe für einen Zeitraum von zwei Jahren im bewohnten Zustand simuliert. Dabei wurde eine konstante Feuchtequelle von 163 g/h bzw. 279 g/h entsprechend einem 2 und einem 4 Personenhaushalt angesetzt. Da es hier um eine rein jahreszeitliche Betrachtung geht, sind kurzzeitige Vorgänge mit hoher Feuchtefreisetzung wie Duschen oder Kochen von untergeordneter Relevanz. Es ergeben sich durch Berücksichtigung der Feuchtespeicherung für die Passivhausscheibe höhere Feuchten in der kalten und niedrigere Feuchtwerte in der warmen Jahreszeit. Die Differenz beträgt bis zu 6 %. Im Sommer tritt ein gegenteiliger Effekt auf: Durch die Feuchtespeicherung bleibt die Raumluff im Mittel trockener also ohne Speichereffekte. Dies ist allerdings für das deutsche Heizklima von untergeordneter Bedeutung.



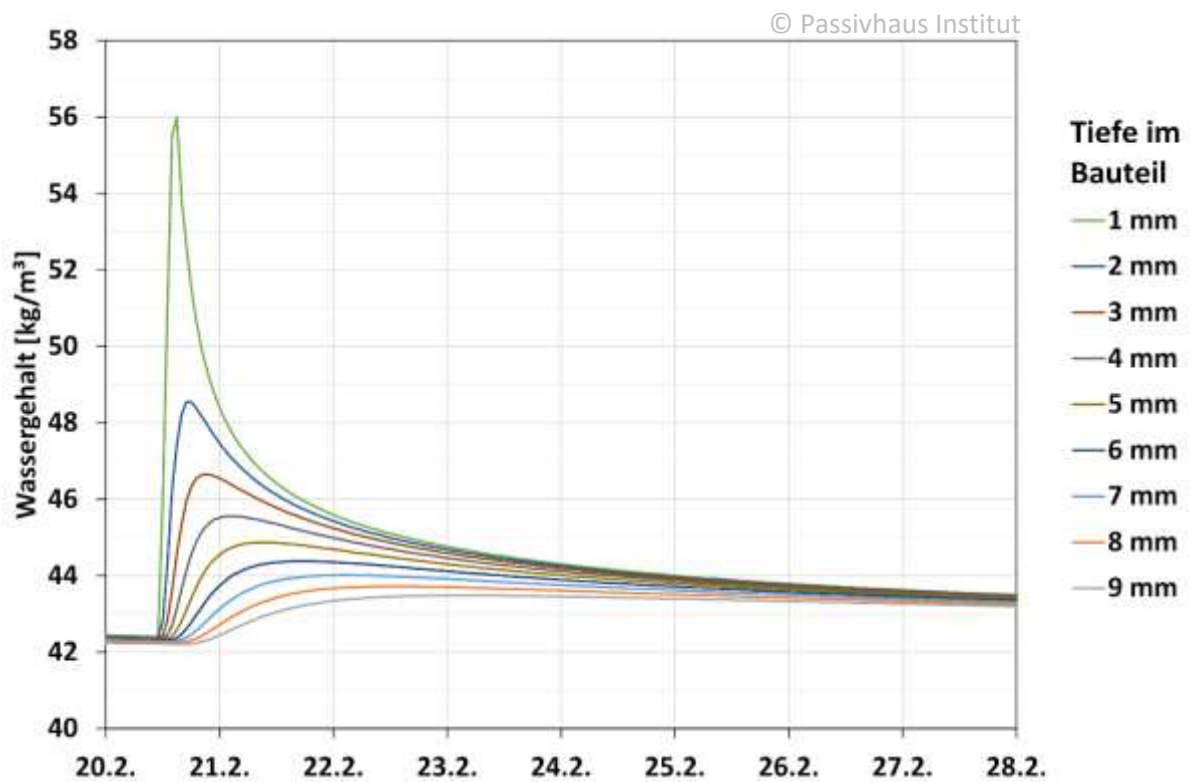
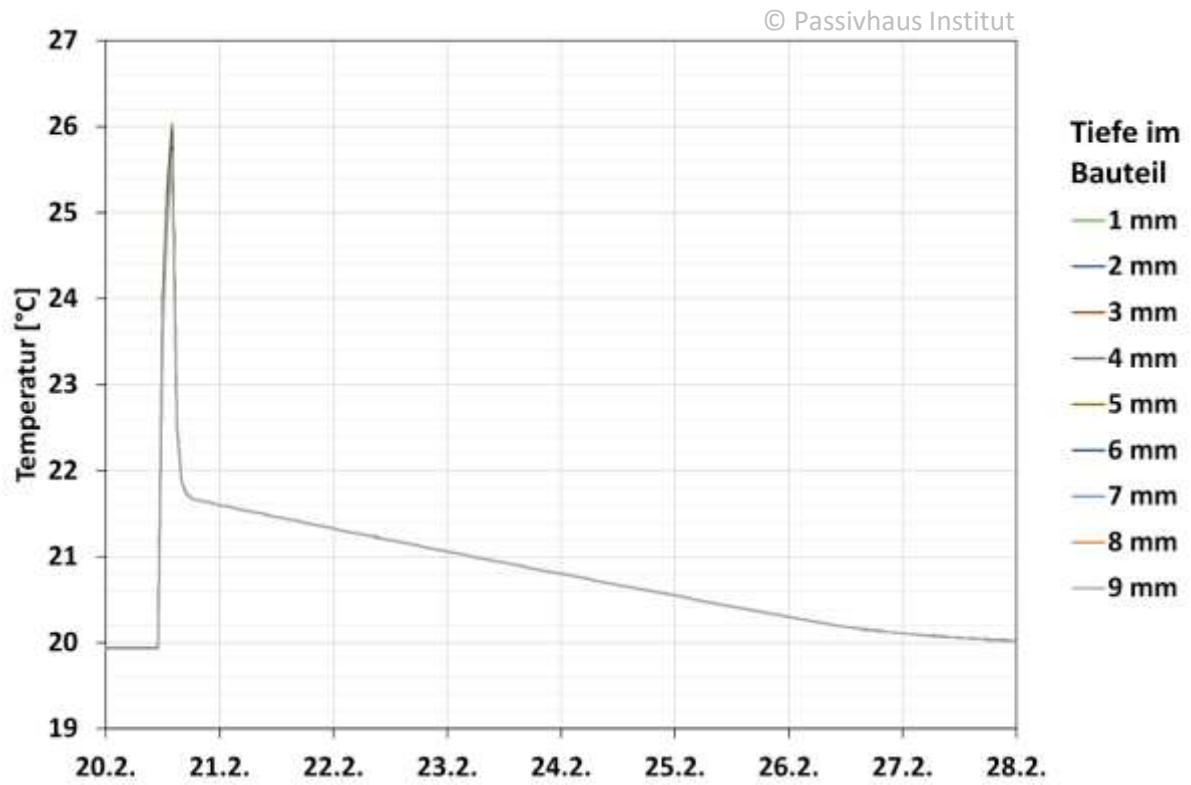


Abbildung 50: Temperatur und Wassergehalt in verschiedenen Tiefen in einer Betonwand nach Anregung durch einen drei Stunden dauernden Temperatur- bzw. Feuchtepeak

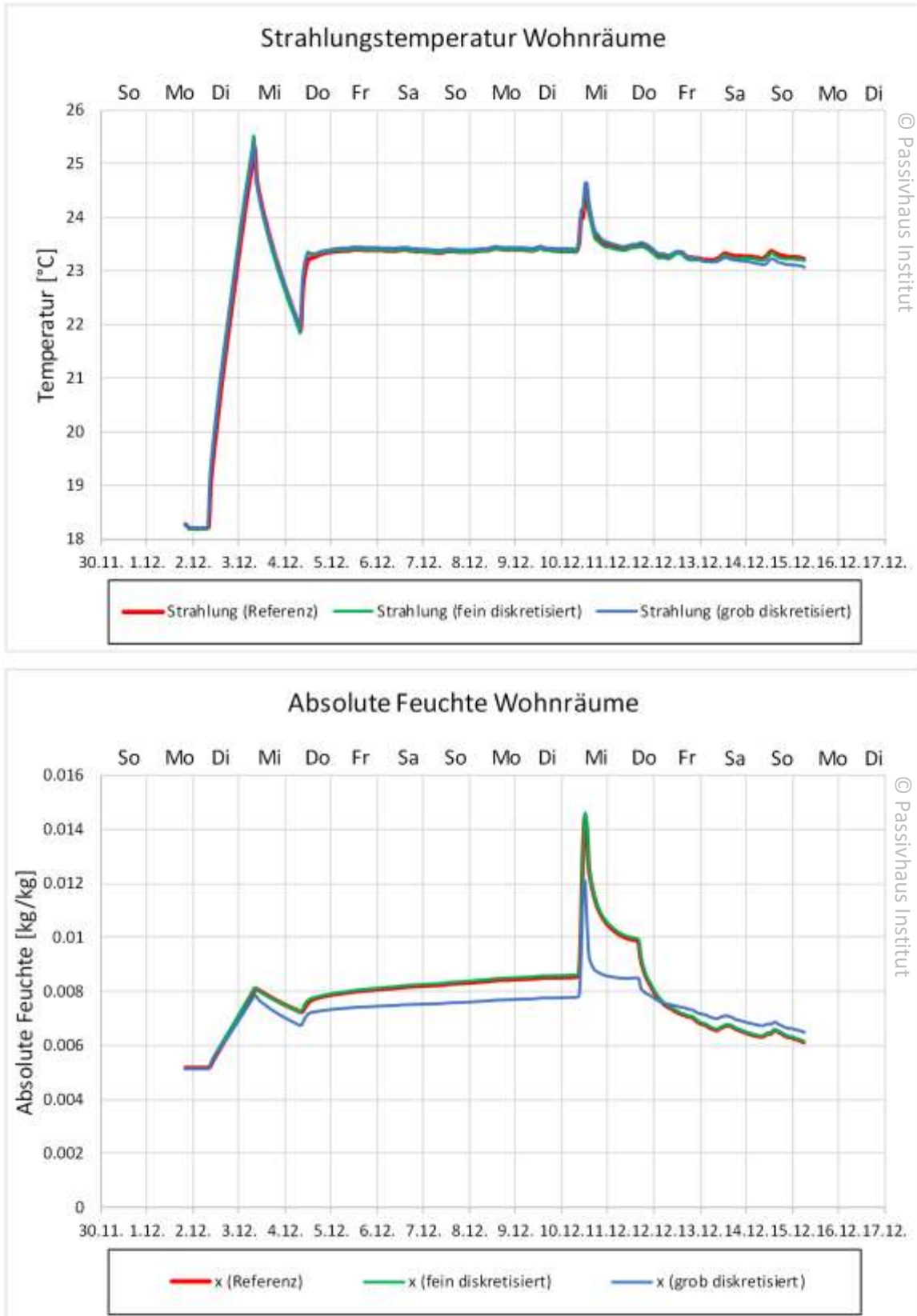


Abbildung 51: Einfluss der Diskretisierung auf die Simulationsergebnisse

### 3.2.5 Theoretischer Wärmeverlustkoeffizient nach PHPP

#### 3.2.5.1 Transmission

Die energetische Planung der Passivhausscheibe erfolgte im Jahr 2000 bereits mit dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP). Für die Zertifizierung und Berechnungen für die Bestimmung des theoretischen Wärmeverlustkoeffizienten wurden die Daten in die aktuelle Version 8.4 übernommen und zum Teil aus den Plänen ergänzt. Informationen über die Transmissionswärmeverluste der Gebäudehülle für das Gebäude sind im PHPP-Flächenblatt (vgl. Abbildung 52) enthalten. Hier sind Angaben zu Flächen und entsprechenden (mittleren) U-Werten der Fenster, Außenwände, Dach und Bodenplatte sowie zu Wärmebrücken zu finden. Wegen des verwendeten Außenmaßbezugs liegen an den Kanten geometrische Wärmebrücken mit negativem Vorzeichen vor, die eine Reduktion der Wärmeverluste bedeuten. Soll ein spezifischer Wärmeverlustkoeffizient unter Messbedingungen berechnet werden, so ist dieser auf die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft zu beziehen. So werden die Wärmeströme ans Erdreich, welches in der Regel eine von der Außenluft abweichende Temperatur aufweist, zunächst getrennt bestimmt und dann entsprechend umgerechnet. Der Transmissionswärmeverlust ans Erdreich wird durch die Summe der UA-Werte aller erdberührten Bauteile bestimmt und beträgt in diesem Beispiel  $UA_{ig} = 17,9 \text{ W/K}$ . Die mittlere Erdreichtemperatur im Dezember beträgt nach der Berechnung im PHPP für die gemessene Innentemperatur von  $18,5 \text{ °C}$  gerade  $12,3 \text{ °C}$ . Der Wärmestrom ins Erdreich beträgt für die mittlere Erdreichtemperatur im Messmonat Dezember und  $24 \text{ °C}$  Innentemperatur während der Konstantheizphasen ca.  $210 \text{ W}$ . Bezieht man diesen Wärmestrom auf die mittlere Temperaturdifferenz während der Messung zwischen innen ( $24 \text{ °C}$ ) und außen ( $3 \text{ °C}$ ), so ergibt sich ein spezifischer, auf die Außenluft bezogener Verlustkoeffizient von

$$H_{T,ige} = UA_{ig} \cdot \frac{(T_i - T_G)}{T_i - T_e} = 10,1 \text{ W/K.}$$

Der Index „ige“ steht hier für den Bezug des Wärmeverlustkoeffizienten vom Innenraum zum Erdreich bezogen auf die mittlere Außentemperaturdifferenz (zwischen innen und außen).

Der Wärmeverlust-Koeffizient für alle direkten Wärmeverluste von innen nach außen  $H_{T,ie}$  beträgt in Summe  $47,3 \text{ W/K}$ . Der gesamte Transmissionswärmeverlust-Koeffizient bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur beträgt damit  $57,4 \text{ W/K}$ .

Der entsprechende Wert mit Temperaturgewichtungsfaktoren  $f_i$  beträgt nach der PHPP-Berechnung  $55,8 \text{ W/K}$ . Da während der Messung die Rollläden geschlossen waren, ist der reduzierte U-Wert der Fenster bei dem Vergleich mit den Messungen zu berücksichtigen. Korrigiert man die U-Werte für Glas und Rahmen nach der ISO 15099

um einen ca. 8 cm vor den Fenstern liegenden Rollladen, so reduzieren sich die Wärmeverluste durch die Fenster um ca. 2 W/K. Damit ergibt sich ein Transmissionswärmeverlust-Koeffizient der gesamten Gebäudehülle unter Messbedingungen von  $H_{T,M} = 55,4 \text{ W/K}$ .

### 3.2.5.2 Infiltration

Neben den Wärmeströmen durch die Hülle treten während der Messung Infiltrationswärmeverluste auf. Sie sind umso kleiner, je besser die Luftdichtheit ist. Im PHPP wird für den Infiltrationsluftwechsel ein Wert von  $0,033 \text{ h}^{-1}$  ausgewiesen. Für das Gebäudevolumen von  $418 \text{ m}^3$  ergibt sich für den Infiltrationsluftwechsel ein spezifischer Wärmeverlustkoeffizient von  $H_{Inf} = 4,6 \text{ W/K}$ .

Zusammenstellung					U-Mittel-Wert [W/(m²K)]	H-Wert: U × A [W/K]	Temperatur- gewichts- faktor $f_t$	H-gewichtet-Wert $f_t \times U \times A$ [W/K]
Gruppe Nr.	Flächengruppe	Temp.- zone	Fläche	Ein- heit				
1	Energiebezugsfläche		142.10	m²				
2	Fenster Nord	A	4.23	m²	0.900	3.8	1.000	3.8
3	Fenster Ost	A	2.18	m²	0.894	2.0	1.000	2.0
4	Fenster Süd	A	7.29	m²	0.916	6.7	1.000	6.7
5	Fenster West	A	9.44	m²	0.872	8.2	1.000	8.2
6	Fenster horizontal	A	0.00	m²		0.0	1.000	0.0
7	Außentür	A	2.52	m²	0.450	1.1	1.000	1.1
8	Außenwand Außenluft	A	135.47	m²	0.104	14.2	1.000	14.2
9	Außenwand Erdrreich	B	0.00	m²		0.0	0.472	0.0
10	Dach/Decken Außenluft	A	169.90	m²	0.080	13.6	1.000	13.6
11	Bodenplatte/Kellerdecke	B	169.90	m²	0.130	22.1	0.472	10.4
12			0.00	m²		0.0	1.000	0.0
13			0.00	m²		0.0	1.000	0.0
14		X	0.00	m²		0.0	0.750	0.0
					$\Psi$ [W/(mK)]	$\Psi \cdot \ell$ [W/K]	$f_t$	$f_t \cdot \Psi \cdot \ell$ [W/K]
15	Wärmebrücken Außenluft	A	46.20	m	-0.049	-2.3	1.000	-2.3
16	Wärmebrücken Perimeter	P	46.20	m	-0.090	-4.2	0.472	-2.0
17	Wärmebrücken BP/KD	B	0.00	m		0.0	0.472	0.0
18	Wand zum Nachbarn	I	0.00	m²		0.0		
Summe thermische Hülle			500.94	m²	0.130	65.3	Hülle	55.8

© Passivhaus Institut

Abbildung 52: Auszug aus dem PHPP-Flächenblatt der Passivhausscheibe.

### 3.2.5.3 Gesamt-Wärmeverlustkoeffizient

Zusammen mit den Wärmeverlusten durch die Gebäudehülle direkt an die Außenluft ergibt sich damit ein spezifischer Wärmeverlustkoeffizient von  $HLC = 60,0 \text{ W/K}$ . Dieser Wert ist der Wert, mit dem die aus der Messung bestimmten Wärmeverlustkoeffizienten verglichen werden müssen.<sup>1</sup>

### 3.2.5.4 Fehlerbetrachtungen für theoretischen Wärmeverlustkoeffizienten

Die Frage, die sich bei der Angabe des Wärmeverlustkoeffizienten sofort aufdrängt, ist, wie genau dieser überhaupt theoretisch bekannt ist. Direkt daran schließt sich die

<sup>1</sup> Dieser Wert entspricht nicht dem in EN 12831 definierten Wärmeverlustkoeffizienten.

Frage an, wie genau er messtechnisch bestimmt werden kann. Auf letzteres wird erst im Rahmen der Messdatenauswertung weiter eingegangen. Davon ausgehend, dass die Eingaben im PHPP vollständig den umgesetzten Ausführungen entsprechen, bleiben trotzdem zahlreiche Unsicherheiten bezüglich der Genauigkeit der resultierenden Wärmeverluste. Zu nennen sind Abweichungen von Dämmdicken, Unsicherheiten bei der Messung des  $n_{50}$ -Wertes, bei der Abschätzung der Infiltrationsverluste, bei Wärmebrücken durch Außenmaßbezug und viele weitere.

### **Abweichungen bei Dämmdicken und Wärmeleitfähigkeiten**

Die mittlere Dämmdicke kann bei einem Passivhaus-Bauteil, verursacht durch Maßtoleranzen, Abweichungen im Befestigungsabstand etc., bis ca.  $\pm 10$  mm abweichen. Die Bemessungswerte für die Wärmeleitfähigkeiten von Dämmstoffen liegen i.a. deutlich über den Messwerten. Nur z.B. durch deutlich überhöhte Feuchte können auch Abweichungen nach oben auftreten. Insgesamt können nach Feist et al. [Feist2001] die effektiven Variationen der Dämmstoffdicke mit  $\pm 15$  mm abgeschätzt werden. Dies entspricht im Fall der Passivhausscheibe einer Variation des H-Werts um 3-3,4 % bzw. als absolute Größe von ca. 0,4 W/K für Wände, Dach und Bodenplatte.

### **Genauigkeit der Abschätzung der Infiltrationsverluste**

Die Infiltrationsverluste werden im PHPP aus dem Messwert des Drucktests und Windschutzkoeffizienten abgeschätzt. Die Messgenauigkeit beim Drucktest ( $n_{50}$ -Wert) liegt in der Größenordnung von  $\pm 0,05$  h<sup>-1</sup>. Im Fall der Passivhausscheibe kommen hierdurch Unsicherheiten bezüglich der Infiltrationsverluste von über 10 % bzw. 0,55 W/K zustande. Berücksichtigt man zusätzlich die Bandbreite, die aus der Variation des Windschutzkoeffizienten entsteht, so bestehen bei der Infiltration Unsicherheiten von 2,5 W/K. Die Passivhausscheibe steht zwar auf einer Seite offen zum Feld, die anderen drei Seiten sind aber von Gebäuden umgeben, wobei hier Abstände von über 10 m vorliegen. Damit wäre sowohl die Annahme eines Windschutzkoeffizienten für ein völlig frei stehendes als auch für ein gut abgeschirmtes Gebäude falsch. Daher werden als Fehler lediglich 50 % der gesamten Unsicherheiten, also lediglich 1,25 W/K, angesetzt.

In die Überlegungen sollte allerdings auch einbezogen werden, dass sich aus den dynamischen Simulationen und dem Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration ein deutlich geringerer Infiltrationsluftwechsel von 0,0052 h<sup>-1</sup> ergeben hat. Dieser führt im Gegensatz zu dem PHPP-Ansatz zu einem Wärmeverlust von lediglich 0,7 W/K anstelle der angesetzten 4,6 W/K aus dem PHPP. Diese große Abweichung kommt vermutlich durch die sehr windstille Wetterlage in Kombination mit dem Vorhandensein eines lediglich eingeschossigen Gebäudes zustande. Hier sind die Druckdifferenzen durch Auftrieb deutlich weniger relevant als in mehrgeschossigen Gebäuden, für die der gleiche Ansatz zur Abschätzung der Infiltration verwendet wird.

## Abweichungen des Wärmeschutzes von Fenstern

Auch die U-Werte von Fenstern können nur mit begrenzter Genauigkeit bestimmt werden. Fehlerquellen sind alle Einflussgrößen für die Berechnung des Fenster-U-Wertes: U-Wert des Glases (Variationen des Gasfüllgrades im Scheibenzwischenraum) und des Rahmens (Maßtoleranzen) sowie die Wärmebrücken des Glasrandes und für den Einbau in die Rohbauöffnung (Variationen beim Einbau). Nach [Feist2001] können für die U-Werte von Glas und Rahmen Ungenauigkeiten von 0,05 W/(m<sup>2</sup>K) bzw. 0,02 W/(m<sup>2</sup>K) angesetzt werden. Für die Wärmebrücken wurden 0,005 W/(mK) sowohl für den Glasrand als auch den Einbau angesetzt. Damit ergibt sich in der Passivhaus-scheibe ein Fehler der spezifischen Wärmeströme durch die Fenster von 0,97 W/K.

## Gesamtfehler

Die zuvor diskutierten Fehlereinflüsse sind voneinander unabhängig, weshalb zur Berechnung des Gesamtfehlers die quadratische Fehlerfortpflanzung angesetzt werden darf. Der Gesamtfehler ergibt sich damit aus der Summe der partiellen Ableitungen der Wärmeverlustkoeffizienten nach den einzelnen Einflussgrößen  $x_i$ , multipliziert mit deren Fehlern  $\Delta x_i$  zu

$$\Delta H = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial H}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} = 1,75 \text{ W/K.}$$

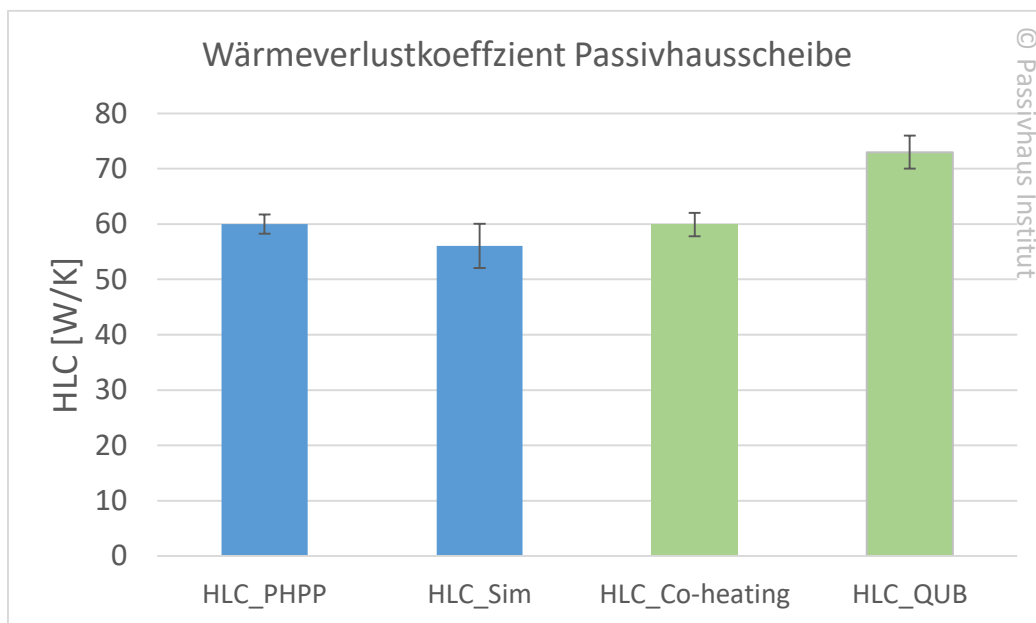
Damit beträgt der zu erwartende Wärmeverlustkoeffizient  $60 \pm 2 \text{ W/K}$  mit einem relativen Fehler von lediglich 3,5 %. Dabei unterliegen nach den Infiltrationsverlusten die Fenster den größten Unsicherheiten. Wird der aus der CO<sub>2</sub>-Messung ermittelte Wert für die Infiltration angesetzt, so sinkt der Wärmeverlustkoeffizient auf 56,1 W/K. Wird die gesamte Abweichung durch den geringeren Infiltrationsluftwechsel als Fehler angesetzt, so erhöht sich der Gesamtfehler auf ca. 2,5 W/K. Der immer noch kleine Fehler lässt bei entsprechend kleinem Fehler der Messung eine hohe Aussagekraft der Messung für Realisierung der Planung zu. Wäre der Fehler des Planungswertes dagegen deutlich größer, so würden die Gesamtaussagekraft und damit der Sinn der Messung des Wärmeverlustkoeffizienten deutlich reduziert. Nicht inbegriffen sind hier allerdings die Unsicherheiten bezüglich der Erdreichtemperatur (s. Abschnitt 3.2.2.3), die zu einer entsprechenden Vergrößerung des Fehlers führen, aber eher dem Messfehler zuzuordnen sind.

### **3.2.6 Vergleich von gemessenem und erwartetem Wärmeverlustkoeffizienten**

Für die Passivhaus-scheibe wurden mit dem Co-Heating-Test und der QUB-Methode experimentell die Wärmeverlustkoeffizienten bestimmt. Diese gilt es mit dem zu erwartenden Wert aus dem PHPP bzw. dem aus den dynamischen Simulationen gewonnenen Wert zu vergleichen. Der Wärmeverlustkoeffizient, der sich aus den PHPP-Berechnungen ergibt,  $HLC_{\text{PHPP}} = 60,0 \text{ W/K}$ , liegt sehr nah an dem Co-Heating-Ergebnis mit



$HLC_{Co-Heating} = 59,9 \text{ W/K}$ . Allerdings hat sich aus den dynamischen Simulationen ergeben, dass ein deutlich geringerer Luftwechsel vorgelegen haben muss. Somit reduziert sich der zu erwartende  $HLC$  auf  $56 \text{ W/K}$ , der mit  $HLC_{Sim}$  bezeichnet werden soll. Das Ergebnis aus der Auswertung der QUB-Methode liegt im Vergleich zu den übrigen Werten mit  $HLC_{QUB} = 73,0 \text{ W/K}$  deutlich höher. Die Abweichung von  $HLC_{Co-Heating}$  vom  $HLC_{Sim}$  beträgt  $6,5 \%$ , der zu  $HLC_{QUB}$  immerhin über  $20 \%$ . Der Messfehler beträgt unter den Messbedingungen entsprechend der Abschätzung aus Abschnitt 2.1 lediglich  $1,2 \text{ W/K}$ . Hinzu kommen Fehler bei den Fits. Inklusive der angesetzten Fehler stimmt das Ergebnisse aus dem Co-Heating-Test und der Erwartungswerte überein. Das Ergebnis aus der QUB-Methode liegt dagegen etwas hoch (s. Abbildung 53). Ein Grund für die Überschätzung des Wärmeverlustkoeffizienten mit der QUB-Methode könnte die Asymmetrie im Temperaturverlauf zwischen Aufheiz- und Abkühlphase sein.



**Abbildung 53: Vergleich der unterschiedlichen Wärmeverlustkoeffizienten mit ihren abgeschätzten Fehlern.**

Zusammengefasst kann aus den Ergebnissen festgestellt werden:

1) Auch bei sorgfältiger Erhebung der Eingabedaten ist der Wärmeverlustkoeffizient schon bei der theoretischen Ermittlung mit einem Fehler im Bereich von ca.  $5\%$  behaftet. Da die Fehlerquellen für diese Streuung statistisch verteilt sind, kann davon ausgegangen werden, dass sich diese Abweichungen in großen Gesamtheiten von Objekten herausmitteln (d.h. mit Wurzel  $N$ , wenn  $N$  die Zahl der Objekte ist, abnehmen).



2) Zusätzlich eingebrachte Modellparameter (wie z.B. eine Aufteilung der Wärmekapazitäten) erhöhen i.a. die Unsicherheit bei der Bestimmung der entscheidenden Parameter (wie dem HLC). Sie führen somit u.U. nicht zu der erhofften verbesserten Genauigkeit.

3) Mittels eines sorgfältig durchgeführten Co-Heating-Tests lässt sich der HLC auf Messunsicherheit von etwa 5% ermitteln. Dazu müssen allerdings insbesondere die Vorgeschichte des Objektes dokumentiert sein und eine ausreichend genaue Messung der Umgebungstemperaturen (außen, Nachbar, Erdreich) vorliegen.

4) Im hier betrachteten Einfamilienhaus wurde der in der Planung angestrebte sehr geringe Wärmeverlustkoeffizient von um 60 W/K im Rahmen der Messgenauigkeit tatsächlich erreicht.

Der Coheating-Test ist somit auch auf Objekte mit sehr gutem Wärmeschutzstandard anwendbar. Im vorliegenden Fall zeigt sich, dass das Objekt in der Praxis einen innerhalb der Messgenauigkeit liegenden und damit jedenfalls sehr gering vom Projektierungswert abweichenden Wärmeverlustkoeffizienten aufweist.

### 3.3 Reihenendhaus

#### 3.3.1 Objektbeschreibung

Als Kontrapunkt zu der eingeschossigen, freistehenden Passivhaus­scheibe wurde für eine weitere Messung ein dreigeschossiges, massives Reihenendhaus mit Keller ausgewählt (s. Abbildung 54). Das 2009 in Arheilgen bei Darmstadt gebaute Wohnhaus mit einer Energiebezugsfläche von 196 m<sup>2</sup> weist einen Heizwärmebedarf nach PHPP von 13 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf und hatte beim Luftdichtheitstest einen n<sub>50</sub>-Wert von 0,22 h<sup>-1</sup>. Diese und weitere energetische Daten sind im PHPP-Auszug in Abbildung 55 aufgelistet. Die Außenwände bestehen aus Kalksandsteinmauerwerk mit 300 mm Neopor Dämmung ( $\lambda = 0,33 \text{ W/mK}$ ) und haben einen U-Wert von 0,105 W/(m<sup>2</sup>K). Die Satteldachkonstruktion mit Mineralfaserdämmung weist einen U-Wert von 0,107 W/(m<sup>2</sup>K) auf. Der Betonkeller ist von außen mit 240 mm Styrodur gedämmt und weist einen U-Wert von 0,165 W/(m<sup>2</sup>K) auf. Für Heizung und Warmwasserbereitung wird ein Gas-Brennwert-Gerät eingesetzt, das sich im Bad im Dachgeschoss befindet. Die Schnitte, Ansichten und Grundrisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.



© Passivhaus Institut



© Passivhaus Institut

**Abbildung 54: Östliche Vorder- (links) und westliche Rückansicht (rechts) des Reihenendhauses während der Messung. Die Jalousien an Ost- und Westseite sind geschlossen. Alle übrigen Fenster sind mit einer XPS-Platte abgedeckt.**

Bei dem untersuchten Reihenendhaus kommen im Vergleich zu der Passivhaus­scheibe mehrere Effekte hinzu, die sich auf die Messung des Wärmeverlustkoeffizienten störend auswirken: Zum einen Wärmeströme zum Nachbargebäude, in dem Temperaturen nicht in allen angrenzenden Räumen gemessen werden konnten. Weiter hatte der Massivbau eine wesentlich größere Zeitkonstante. Außerdem waren im Gegensatz zum eingeschossigen ersten Objekt nun drei Obergeschosse und ein war-

mer Keller vorhanden. Damit sind durch Temperaturschichtung und den Auftrieb deutlich größere Temperaturabweichungen zwischen den Zonen zu erwarten. Wegen der wesentlich größeren Wärmekapazität mussten zum schnellen Erreichen der konstanten Co-Heating-Temperatur deutlich höhere Heizleistungen eingebracht werden. Die Verteilung der Heizleistungen auf die einzelnen Zonen, wie sie in dynamischen Simulationen im Vorfeld der Messung ermittelt wurden, sind in Tabelle 4 aufgeführt. Auch für den QUB-Test, bei dem im Idealfall ein konstanter Temperaturanstieg erfolgt, wurde die adäquate Verteilung der Heizleistungen im Vorfeld durch Simulationen ermittelt. Ein Vorheizen des sonst unbeheizten Kellers war notwendig, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung zu erzielen.

Insgesamt war also bei dem Reihenendhaus mit deutlich größeren Unsicherheiten für das Ergebnis zu rechnen. Dies wurde bewusst in Kauf genommen, um auch die Grenzen der Messmethoden zu evaluieren.

Kennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche			
Energiebezugsfläche:	196.3	m <sup>2</sup>	
	Verwendet:	Monatsverfahren	
<b>Energiekennwert Heizwärme:</b>	<b>13</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	
<b>Drucktest-Ergebnis:</b>	<b>0.22</b>	<b>h<sup>-1</sup></b>	
<b>Primärenergie-Kennwert</b> (WW, Heizung, Kühlung, Hilfs- u. Haushalts-Strom):	<b>91</b>	<b>kWh/(m<sup>2</sup>a)</b>	
Primärenergie-Kennwert (WW, Heizung und Hilfsstrom):	48	kWh/(m <sup>2</sup> a)	
Primärenergie-Kennwert Einsparung durch solar erzeugten Strom:		kWh/(m <sup>2</sup> a)	
<b>Heizlast:</b>	<b>9</b>	<b>W/m<sup>2</sup></b>	
Übertemperaturhäufigkeit:	0	%	
Energiekennwert Nutzkälte:		kWh/(m <sup>2</sup> a)	
Kühllast:	10	W/m <sup>2</sup>	

© Passivhaus Institut

Abbildung 55: Ausschnitt aus dem PHPP-Nachweisblatt des Reihenendhauses.

Die Messung in Arheilgen folgt demselben Schema wie in Roitham. Auch hier wurde nach einer längeren Co-Heating-Phase ein Feuchtepeak erzeugt, dessen Auswirkungen allmählich wieder abklingen. Die wichtigsten Unterschiede bestehen darin, dass es sich in Arheilgen um einen Massivbau mit wesentlich höheren Zeitkonstanten handelt, ein angebautes Nachbargebäude die Temperaturen beeinflusst, und dass mehrere Geschosse vorhanden sind. Die Verschattung erfolgte hier auf Ost- und Westseite, soweit vorhanden, mit Jalousien und bei allen übrigen Fenstern, insbesondere auf der Nordseite und bei Dachflächenfenstern, mit XPS-Platten, beschichtet mit Rettungsdeckenfolien.

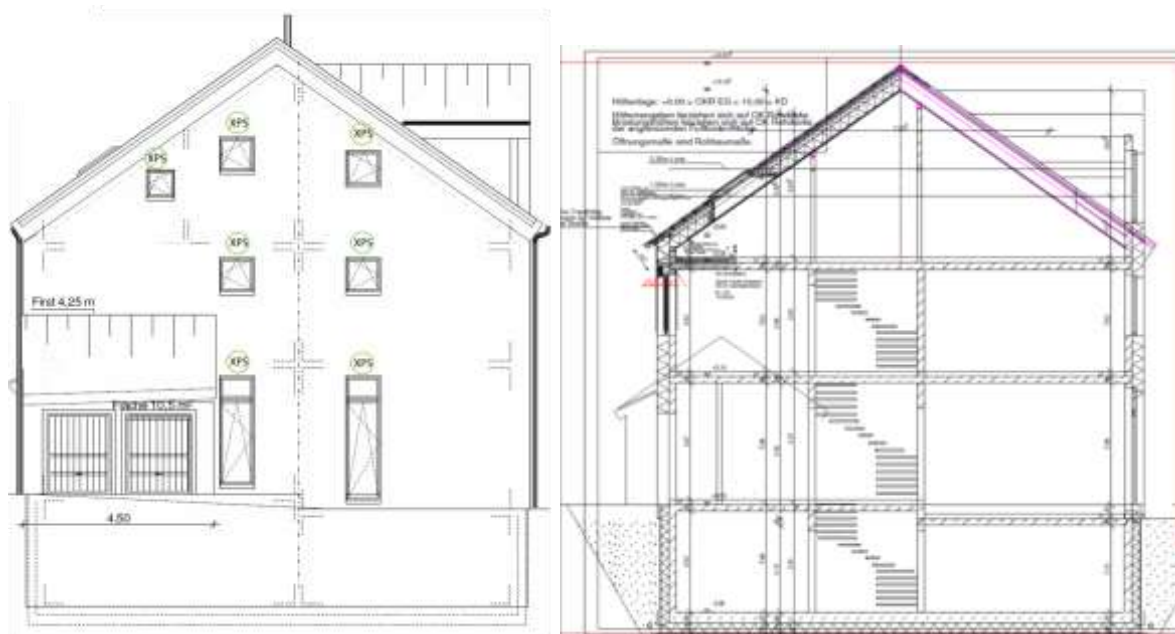


Abbildung 56: Westliche, östliche (oben) und nördliche (unten links) Außenansicht des Reihenendhauses sowie der Schnitt (unten rechts).



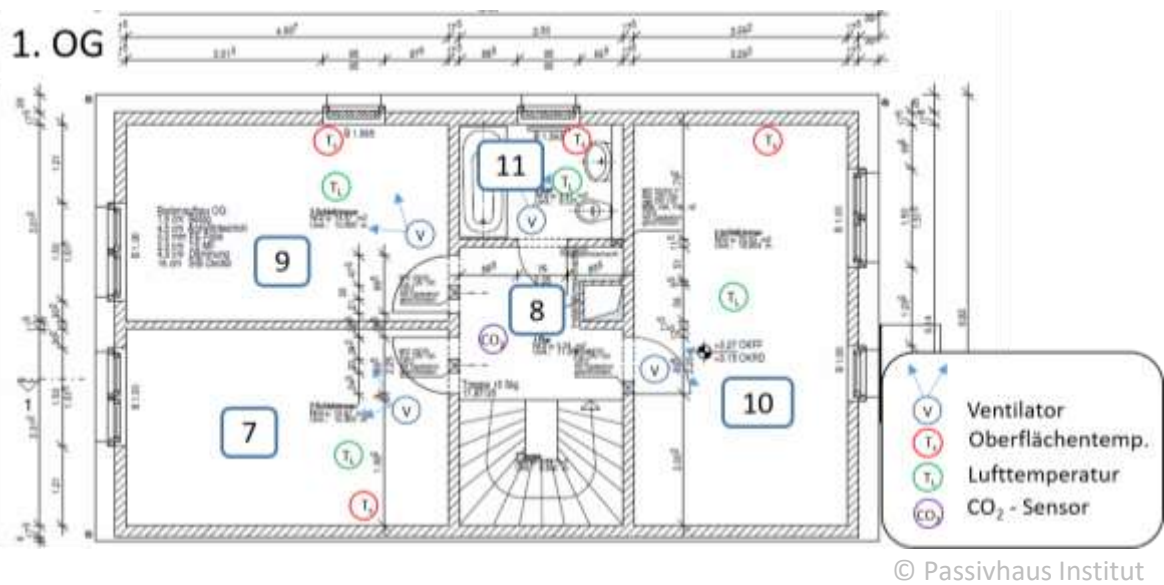
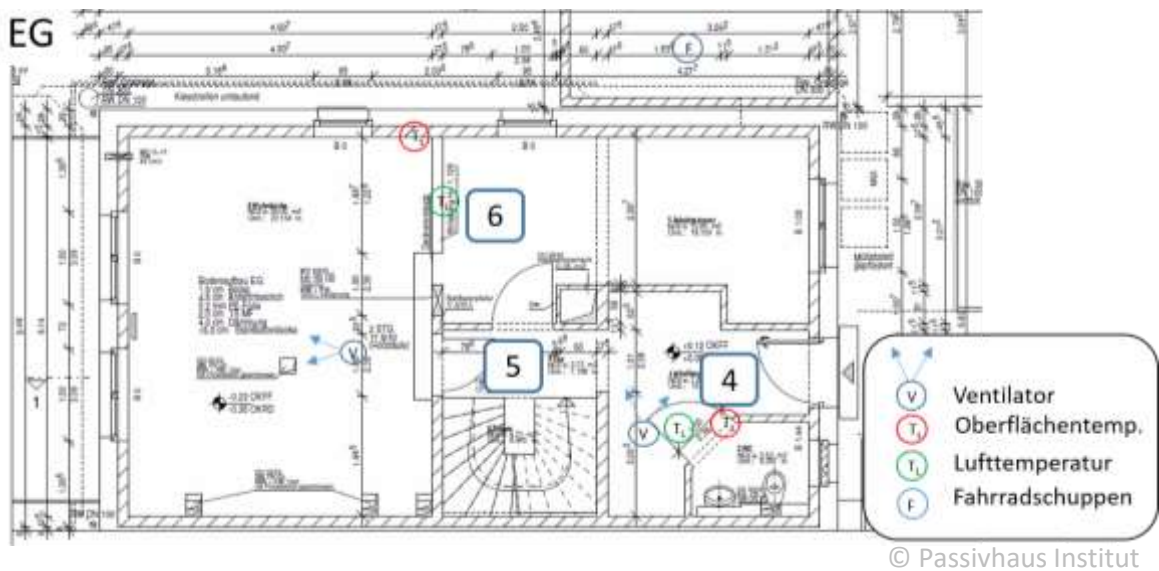
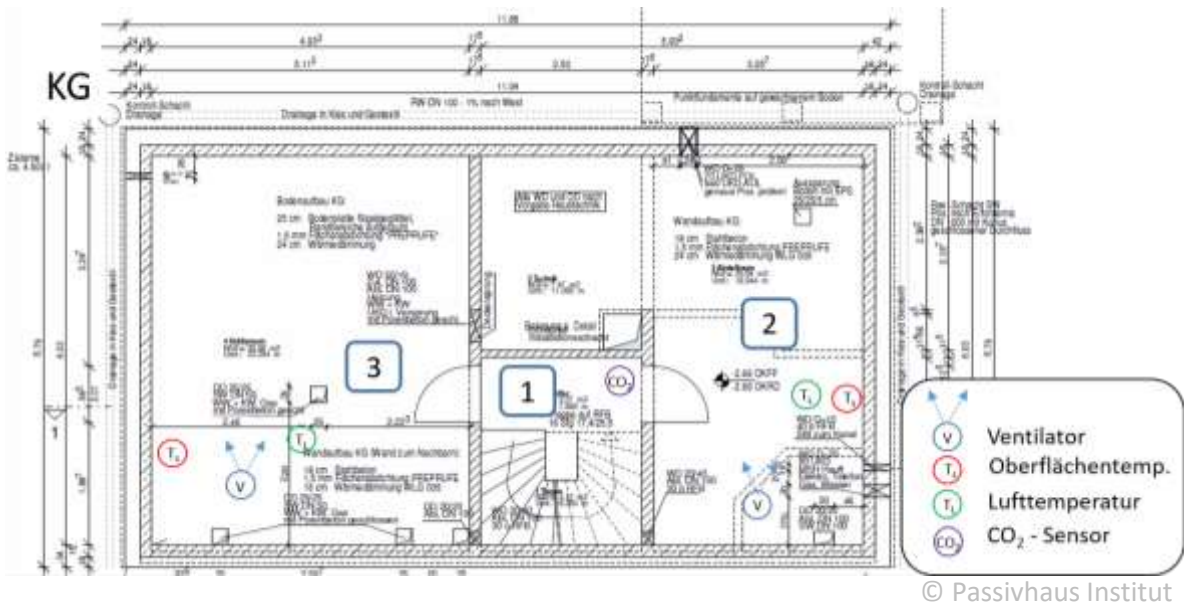


Abbildung 25: Grundrisse mit Zonenzuordnung und Sensorpositionen für KG, EG und 1. OG.



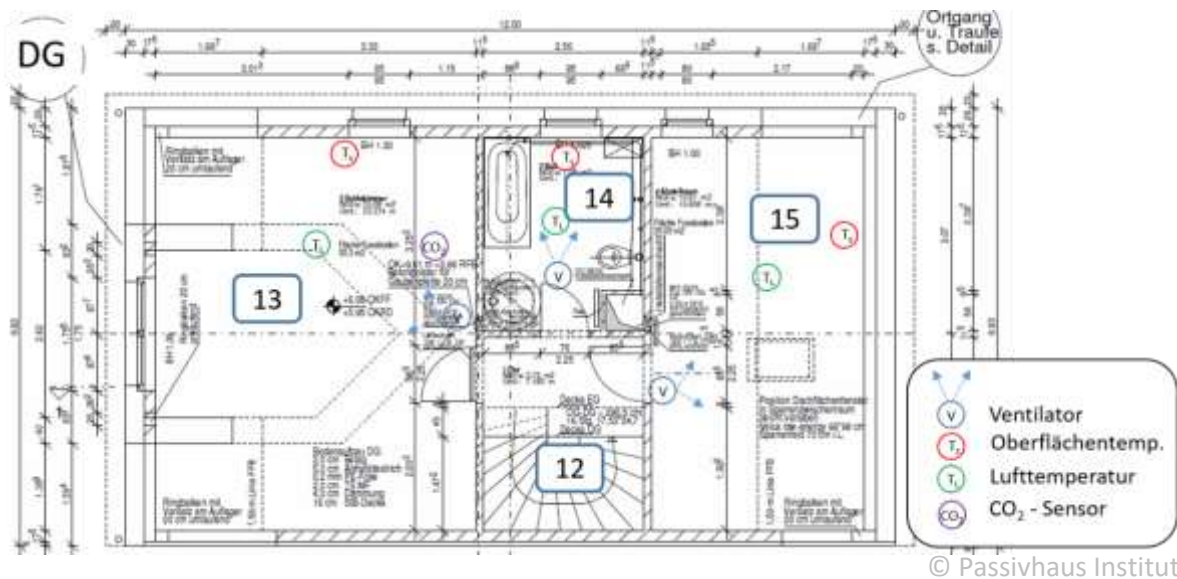


Abbildung 25: Grundriss mit Zonenzuordnung und Sensorpositionen für das Dachgeschoss (DG).

Raum		Energiebezugs- fläche	Heizleistung QUB	Heizleistung Co-Heating	spez. Leistung QUB	spez. Leistung Co-Heating
Bezeichnung	Bezeichnung	[m <sup>2</sup> ]	[W]	[W]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]
1	KG Flur (Treppenhaus)	2.0	40	400	20	202
2	KG Technik & Abstellraum	15.7	320	800	20	51
3	KG Hobbyraum	18.0	320	800	18	44
4	EG Windfang & Gäste-WC	10.3	80	400	8	39
5	EG Flur & Treppenhaus	2.7	0	400	0	150
6	EG Wohnküche & Arbeitszimmer	45.4	400	850	9	19
7	OG Kinderzimmer 1	14.7	80	400	5	27
8	OG Flur & Treppenhaus	5.2	0	200	0	38
9	OG Kinderzimmer 2	14.7	160	400	11	27
10	OG Kinderzimmer 3	19.8	160	400	8	20
11	OG Bad	4.3	80	160	18	37
12	DG Flur & Treppenhaus	2.7	0	0	0	0
13	DG Schlafzimmer	24.2	240	400	10	17
14	DG Bad	7.0	40	200	6	29
15	DG Gästezimmer	9.7	160	200	17	21
<b>Gesamt</b>		<b>196.3</b>	<b>2080</b>	<b>6010</b>	<b>11</b>	<b>31</b>

Tabelle 4: Bezeichnungen der Räume mit Angaben zu den jeweiligen Energiebezugsflächen und den eingebrachten Heizleistungen während QUB und Co-Heating-Experiment.

### 3.3.2 Messergebnisse

#### 3.3.2.1 Außenbedingungen

Die Außenlufttemperatur während der Messperiode sowie die jeweiligen Mittelwerte von Luft- und Oberflächentemperatur sind in Abbildung 57 aufgetragen. Die mittlere Außentemperatur während der QUB-Messung beträgt  $9,4 \pm 0,13$  °C. Die Schwankungsbreite war dabei 8 K (5 °C bis 13 °C). Die Innentemperaturen änderten sich auf Grund der großen Wärmekapazitäten kaum. Zwar hätten größere Heizleistungen eingesetzt werden können. Allerdings wäre dies zu Lasten einer symmetrischen Aufwärm- und Abkühlphase gegangen. Die mittlere Innentemperatur während der Co-Heating-Phase ist gegenüber der QUB-Phase fast 4 K höher. Die in Abbildung 57 eingezeichneten Mittelwerte der Außentemperatur für QUB- und Co-Heating-Phase werden später für die Bestimmung des zu erwartenden Wärmeverlustkoeffizienten in Abschnitt 3.3.5 verwendet.

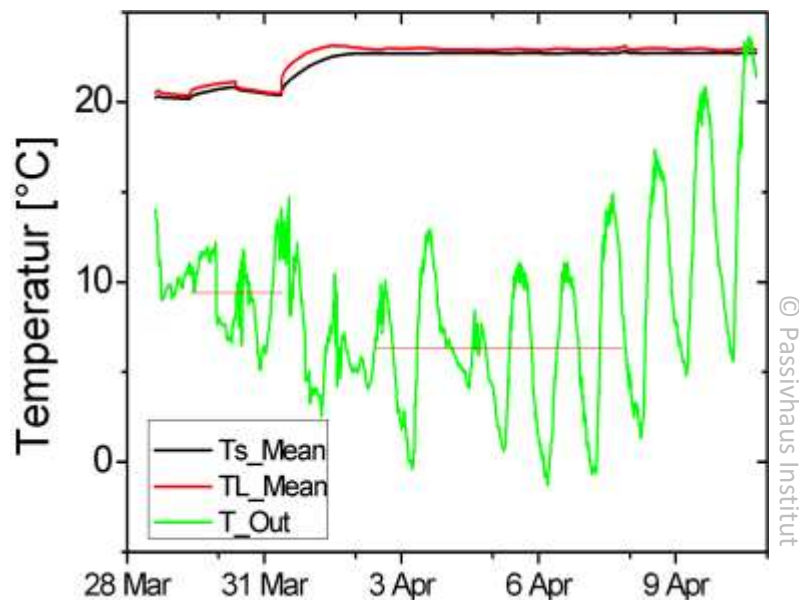


Abbildung 57: Mittlere Innentemperaturen (Oberflächentemperatur  $T_s$  und Lufttemperatur  $T_L$  sowie die und Außentemperatur  $T_{Out}$  mit den Mittelwerten während QUB- und Co-Heating-Phasen

#### 3.3.2.2 Innenbedingungen

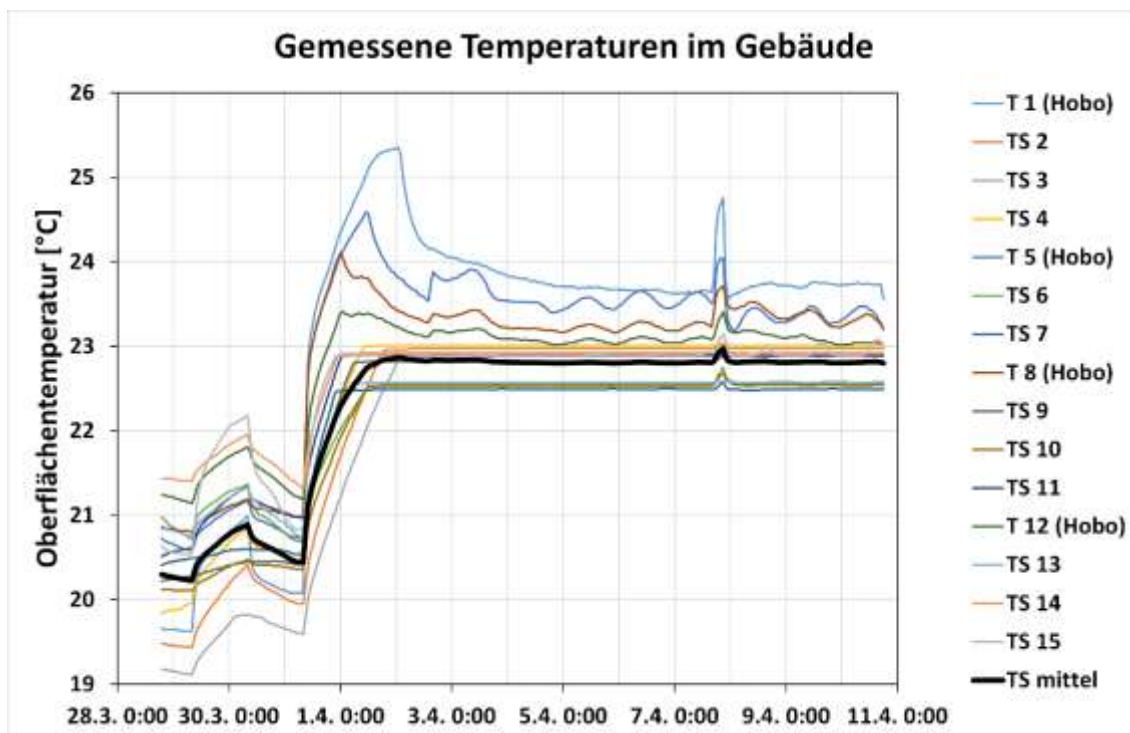
Die gemessenen Oberflächentemperaturen und relativen Luftfeuchten in den 15 verschiedenen Räumen (vgl. Tabelle 4) im Gebäude sind in Abbildung 58 und Abbildung 59 dargestellt. Die jeweiligen Mittelwerte von Luft- und Oberflächentemperatur sind in Abbildung 57 aufgetragen.

Das Gebäude, speziell der Keller, wurde vor Beginn der Messung vorkonditioniert. Dies war nötig, da die Temperaturen im Keller – der innerhalb der thermischen Hülle

liegt, aber nicht beheizt wird - um einige Kelvin unter der in den Wohnräumen lag. Die Temperaturen im Keller und zum Vergleich auch die im Keller des Nachbargebäudes sind in Abbildung 60 dargestellt.

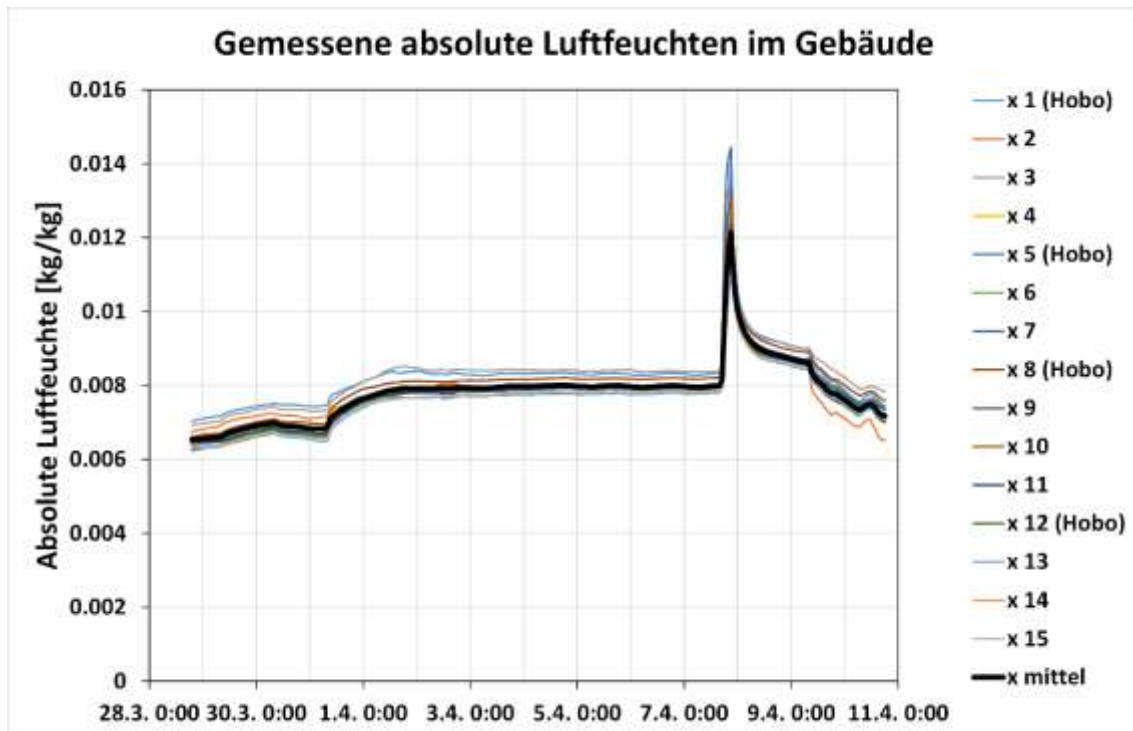
Trotz der Vorerwärmung des Kellers war zu Beginn der QUB-Phase eine Temperaturdifferenz von 2,5 K zwischen der niedrigsten und der höchsten Temperatur im Gebäude festzustellen. Am kältesten ist es in den Kellerräumen, am wärmsten im Bad im Dachgeschoss, wo sich der Heizkessel und der Warmwasserspeicher befinden. Bei der Interpretation von Abbildung 58 ist zu beachten, dass für die im Treppenhaus gelegenen Zonen 1, 5, 8 und 12 nicht mit separaten Luft- und Oberflächentempersensoren gemessen wurde, sondern zusätzliche Stand-alone-Datenlogger zum Einsatz kamen, die überwiegend die Lufttemperatur messen.

Die absoluten Raumlufffeuchten der verschiedenen Räume liegen in der Regel in einer Bandbreite von 1 g/kg. Lediglich in der Phase des eigentlichen Feuchteexperiments, wo hohe Feuchtelasten in Zone 1 eingebracht werden, treten höhere Differenzen auf.



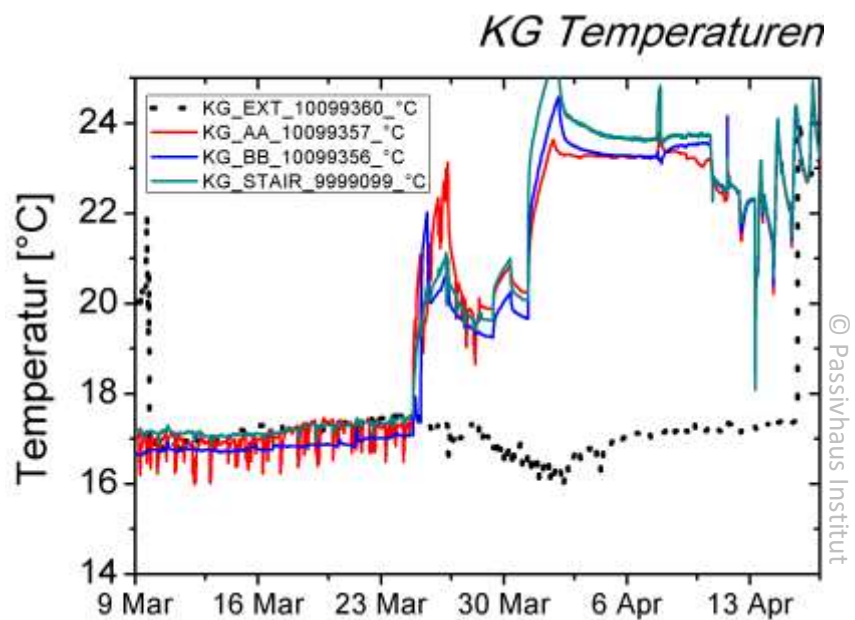
© Passivhaus Institut

**Abbildung 58:** Die gemessenen Oberflächentemperaturen unterscheiden sich vor allem zu Beginn der Messung. Im Treppenhaus (Zone 1, 5, 8, 12) wurden keine Oberflächentemperaturen gemessen, hier sind gemessene Lufttemperaturen dargestellt.



© Passivhaus Institut

Abbildung 59: Die absoluten Luftfeuchten der verschiedenen Räume sowie der Mittelwert.



© Passivhaus Institut

Abbildung 60: Angleichung der Raumtemperaturen im Keller vor der Messung auf ca. 20 °C (in den Kellerräumen und im Kellertreppenhaus (blau, rot, grün). Gepunktet ist die Temperatur im Keller des Nachbargebäudes aufgetragen.

### 3.3.3 Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten des Reihenendhauses

Die eingebrachte Heizleistung (vgl. Abbildung 61), gemessen am Stromzähler, zeigt einen ähnlichen Verlauf wie für die Passivhausscheibe. Sehr deutlich sind die Stufen beim Ein- und Ausschalten der Lichterketten während der QUB-Messung zu erkennen. Die Untergrundleistung durch Messtechnik, Ventilatoren und sonstige, nicht abgeschaltete Geräte (Kühlschrank, Wecker, etc.) beträgt ca. 440 W. Dies entspricht etwa 20% der Glühbirnenleistung während der Heizphase. Um den Aufheizvorgang für die Co-Heating-Messung zu verkürzen, wurden nach der QUB-Messung zusätzliche Glühbirnen mit einer Leistung von knapp 4000 W installiert. Unter anderem weil nicht alle Räume gleichzeitig die Solltemperatur erreichten, sank die Heizleistung über 2-3 Tage langsam ab, bis sie sich im Mittel auf ca. 1,5 kW einpendelt. Im Gegensatz zur Messung an der Passivhausscheibe sind hier in der Co-Heating-Phase deutlich tageszeitliche Schwankungen zu erkennen. Diese sind vermutlich im Wesentlichen auf die Schwankungen der Außentemperaturen um bis über 10 K zurückzuführen. Da hier keine Rollläden, sondern Jalousien an den Ost- und Westseiten angebracht waren und die XPS-Platte auf dem Dachflächenfenster ein wenig verrutscht war, wäre zu vermuten, dass auch solare Gewinne zu den tageszeitlichen Schwankungen der Heizleistung beigetragen haben. Die späteren Simulationen ergaben aber, dass solare Gewinne kaum einen Einfluss hatten.

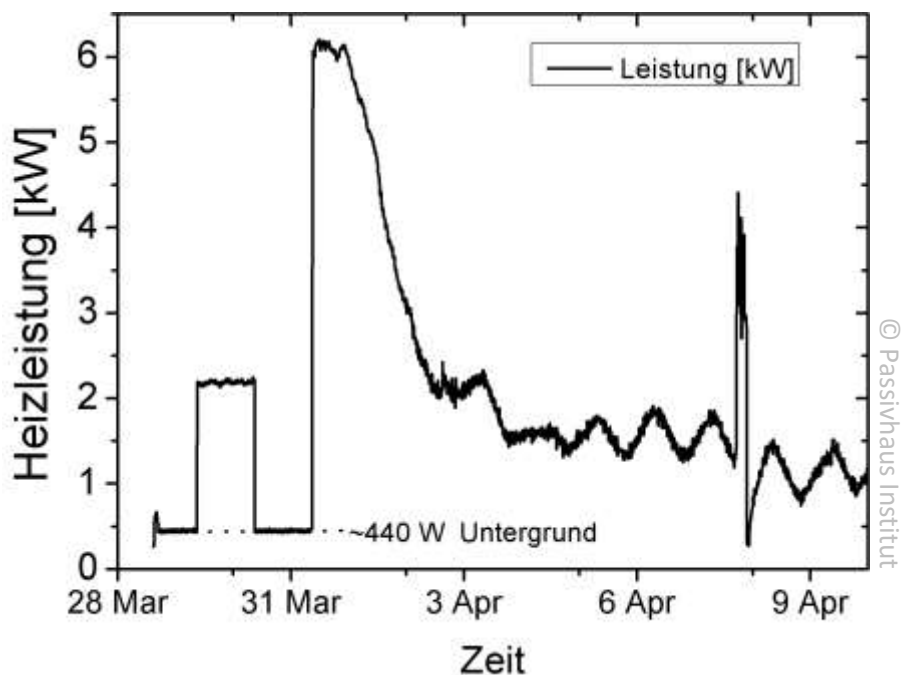
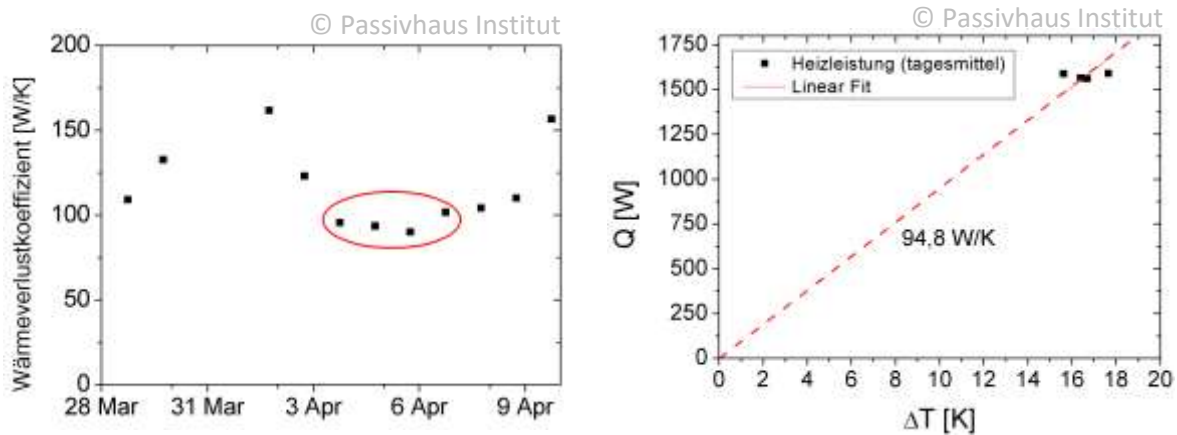


Abbildung 61: Summe der Heizleistung (gesamter Stromverbrauch) während der Messung.





**Abbildung 62:** Auswertung der Co-Heating Phase vom 3. bis 7. April ergibt einen Wärmeverlustkoeffizienten von  $HLC_{\text{Co-Heating}} = 94,8 \pm 2,4 \text{ W/K}$ .

### 3.3.3.1 Co-Heating Methode

Nicht alle Tage der Messung sind zur Auswertung mit der Co-Heating-Methode geeignet. So sind lediglich die vier Tage nach dem Erreichen der konstanten Solltemperatur und vor dem Feuchteexperiment sinnvoll auszuwerten. Diese in Abbildung 62, links, markiert. Der lineare Fit in der  $Q(\Delta T)$  Darstellung ergibt einen Wärmeverlustkoeffizienten für den Co-Heating-Test von  $HLC_{\text{Co-Heating}} = 94,8 \pm 2,4 \text{ W/K}$ . Der im Vergleich zur Auswertung bei der Passivhausscheibe deutlich größere Fehler kommt vermutlich im Wesentlichen durch die schlechteren Messbedingungen (höhere Außentemperatur und stärkere Schwankungen derselben) zustande. Mit unter 3 % des Messwertes ist aber weiter von einer hohen Aussagekraft des Messwerts auszugehen.

### 3.3.3.2 QUB-Methode

Zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten nach der QUB-Methode (vgl. Abschnitt 1.2.2) werden die Verläufe der Innentemperaturen am Ende von Aufheiz- und Abkühlphase ausgewertet. Die mittlere Leistung während der Aufheizphase betrug 2,185 kW und die während der Abkühlphase 440 W. Mit einer Oberflächentemperatur zu Beginn der Auswertung in der Aufheizphase von 20,8 °C und 20,4 °C zu Beginn der Abkühlphasenauswertung und einer mittleren Außentemperatur von 9,4 °C ergibt sich ein Wärmeverlustkoeffizient von 123,7 W/K. Wird für die Auswertung statt der Oberflächen- die Lufttemperatur verwendet, so reduziert sich der Wärmeverlustkoeffizient auf 108,5 W/K. Bei der Bestimmung der Steigungen besteht besonders für die Kühlphase ein großer Interpretationsspielraum bei der Wahl des Auswertungsbereichs. Dies führt dazu, dass hier vergleichsweise große Unsicherheiten bestehen.

Als Ergebnis für die Wärmekapazität ergibt sich aus dem QUB-Test ein Wert von 218 MWs/K bzw. 206 MWs/K aus Oberflächen- und Lufttemperaturen. Umgerechnet auf den Quadratmeter ergibt sich so eine effektive Wärmekapazität von 300 Wh/K. Dieser Wert liegt fast 50 % über dem typischen Ansatz für Massivbauten [PHPP2013].



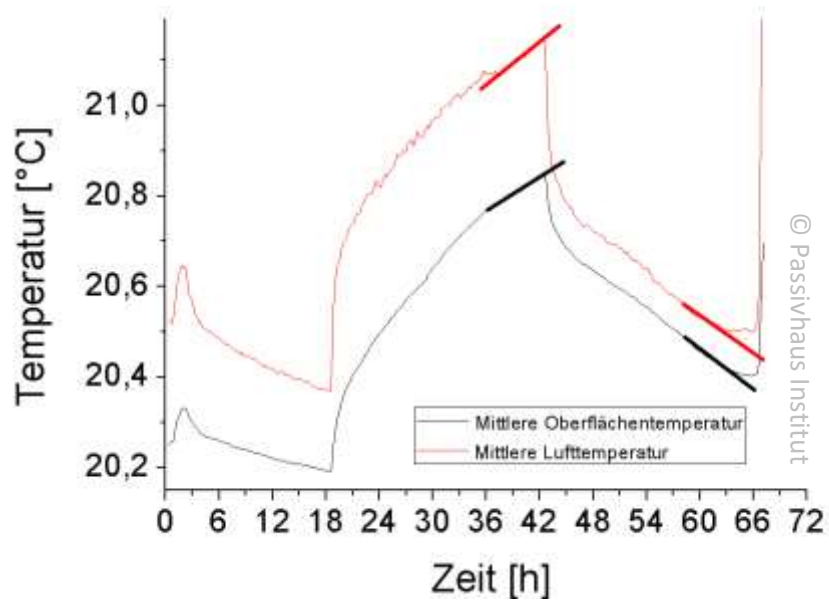


Abbildung 63: Die Auswertung der Oberflächentemperaturen während der QUB-Phase ergibt einen Wärmeverlustkoeffizienten von 123,7 W/K bzw. 108,5 W/K bei Auswertung von Strahlungs- bzw. Lufttemperatur.

### 3.3.4 Vergleich der Messdaten mit Gebäudesimulationsrechnungen

#### 3.3.4.1 Beschreibung des Simulationsmodells

##### Simulationsprogramm

Die Simulationen erfolgen auch hier mit dem Programm DYNBIL, vgl. Abschnitt 1.4.1. Dabei wird wie oben die feinere Feuchtediskretisierung gemäß Abschnitt 3.2.4.3 verwendet.

##### Gebäudemodell

Um untersuchen zu können, wie sich die erhöhte Luftfeuchte aus Zone 1 in die übrigen Räume verteilt, wurde das Gebäude in 15 thermische Zonen aufgeteilt. Jeder Raum und jedes Geschoss des Treppenhauses stellt eine eigene Zone dar.

Wie bei der Passivhausscheibe mussten zunächst die Startbedingungen eingestellt werden. Die verwendete Einschwingzeit für das Gebäude beträgt 55 Tage, die Temperatur und Feuchte in den Räumen während der Einschwingzeit wurden so eingestellt, dass zu Beginn des Experiments insgesamt eine gute Übereinstimmung der gemessenen Strahlungstemperaturen und absoluten Luftfeuchten vorlag.

##### Gebäudedaten

Die Eigenschaften der Gebäudehülle richten sich weitgehend nach den im PHPP verfügbaren Daten. Um eine gute Übereinstimmung der Simulation mit den Messdaten zu erreichen, waren einige kleinere Anpassungen erforderlich. Insbesondere wurden die Erdreichtemperaturen um 2 K reduziert. Ferner wurden die XPS-Platten vor den Nordfenstern und dem Dachflächenfenster berücksichtigt. Ferner wurde im EG und 1. OG der Leitwert nach außen um 8,6 W/K erhöht, entsprechend 15% des berechneten Gebäude-Leitwerts nach außen, um die Übereinstimmung von Messung und Simulation zu verbessern. An den Innenoberflächen wurde ein zusätzlicher  $s_d$ -Wert von 0,6 m, verursacht durch Anstriche, Tapeten etc., angenommen.

Zur Bestimmung der Infiltration wurde zu verschiedenen Zeitpunkten während der Messung aus Gasflaschen  $\text{CO}_2$  in die Raumluft eingebracht und so die  $\text{CO}_2$ -Konzentration erhöht. Aus der gemessenen Abklingkurve lässt sich der mittlere Luftwechsel im betreffenden Zeitraum abschätzen. Diese Messung hatte lediglich orientierenden Charakter: die Experimentatoren achteten zwar auf eine gute Verteilung des Tracers im Gebäude, auf eine Kalibrierung der Sensoren und eine parallele Messung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Außenluft wurde aber verzichtet. Gemessen wurde an zentraler Stelle im Treppenhausflur des 1. OG.

Für 4 Zeiträume konnte auf diese Weise der Luftwechsel bestimmt werden. Diese Zeiträume und die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 64 angegeben. Teilweise

eignen sich die gemessenen Verläufe der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nicht für eine Auswertung: Zwischen dem 3. und 8.4. ist beispielsweise kein exponentieller Abfall mehr zu erkennen, teilweise steigt die Konzentration sogar leicht an. Ähnliches gilt für den Zeitraum ab 10.4. mit eingeschalteter Lüftungsanlage; hier fällt die Konzentration nicht unter 400 ppm, obwohl zuvor (unkalibrierte) 270 ppm gemessen wurden. Der ermittelte Luftwechsel mit Lüftungsanlage kann somit lediglich als grobe Orientierung dienen.

Die Unterschiede in den Luftwechseln der ersten drei ausgewerteten Zeiträume lassen sich nicht ohne weiteres erklären. Im dritten Zeitraum ist die Windgeschwindigkeit deutlich kleiner als in den ersten beiden, während die Temperaturdifferenz vergleichbar ist. Trotzdem liefert die Messung im dritten Zeitraum eine fast doppelt so große Infiltration. Möglicherweise spielen thermische Spannungen, bedingt durch die größeren tageszeitlichen Temperaturschwankungen und die höhere Solarstrahlung in diesem Zeitraum, hierfür eine Rolle. Eine mögliche Ursache sind auch Schwankungen der Außenkonzentration, die sich in dicht besiedelten Regionen innerhalb weniger Stunden um 50 ppm verändern kann.

Aus der PHPP-Berechnung ergibt sich aufgrund des vorliegenden  $n_{50}$ -Wertes von  $0,22 \text{ h}^{-1}$  ein Infiltrationsluftwechsel von  $0,0154 \text{ h}^{-1}$ . Dieser Wert ist verträglich mit den gemessenen Außenluftwechseln für die Zeiträume ohne mechanische Lüftung. Er wurde daher in der Simulation verwendet.

Für den Zeitraum mit mechanischer Lüftung wird ein Wert von  $0,15 \text{ h}^{-1}$  gemessen. Nach Abzug der Infiltration ergibt sich darauf für die Lüftungsanlage ein Luftvolumenstrom von  $90 \text{ m}^3/\text{h}$ . Der Feuchteabfall nach Einschalten der Lüftungsanlage wird allerdings besser mit einem Volumenstrom von  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  wiedergegeben. Dieser Wert wird im Referenzfall verwendet.

### **Randbedingungen**

Wetterdaten für Außenlufttemperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung wurden während der Messperiode mit einer eigenen Wetterstation aufgenommen. Daraus konnte ein Wetterdatensatz für DYNBIL generiert werden. Die Solarstrahlung wird zwar in der Simulation mitgeführt, sie hat aber keinen bedeutenden Einfluss, da kaum solare Gewinne vorhanden sind. Die vorhandenen Lamellenstores blieben während der gesamten Messperiode geschlossen. An den Nordfenstern und dem Dachflächenfenster, die keine Verschattung besitzen, waren außenseitig reflektierende Dämmstoffplatten angebracht. Die opake Gebäudehülle besitzt U-Werte um  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , so dass auch durch Dach und Wände kaum solare Gewinne ins Gebäude gelangen.

Die mittlere Temperatur unter der Bodenplatte konnte nur anhand des vorliegenden PHPP-Modells ermittelt werden. Das Ergebnis hängt vom Ansatz für die Raumtemperatur im Keller ab. Diese beträgt in den Wintermonaten gewöhnlich um  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation wurde durch eine gegenüber der

PHPP-Berechnung mit 20 °C Raumtemperatur um 2 K reduzierte Erdreichtemperatur erzielt (vgl. auch Abschnitt).

Der gesamte Stromverbrauch und damit die gesamten internen Wärmequellen wurden mit hoher Genauigkeit gemessen und gemäß der ebenfalls gemessenen Heizleistungen in den einzelnen Räumen auf die Zonen aufgeteilt.

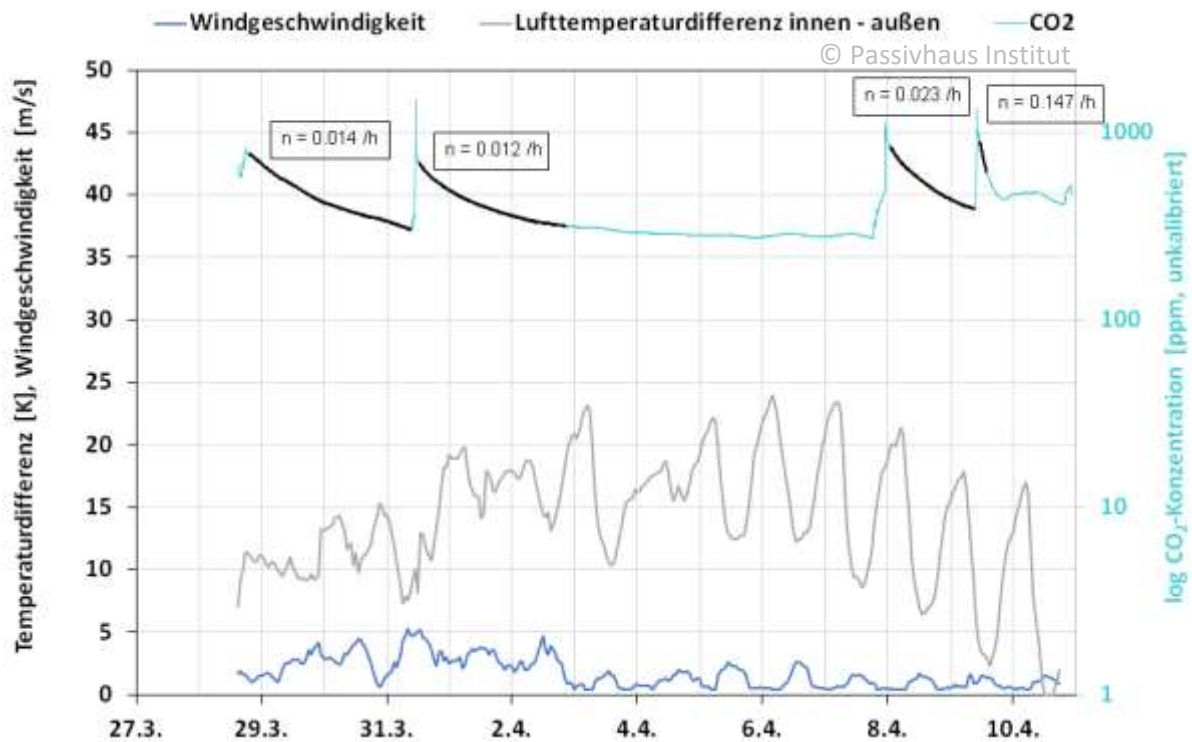


Abbildung 64: Verlauf von CO<sub>2</sub>-Konzentration, Temperaturdifferenz zur Außenluft und Windgeschwindigkeit (gemessen an der ca. 5 km südlich gelegenen Wetterstation Woog) während der Messung. Die angegebenen Luftwechsel beziehen sich jeweils auf die schwarz hinterlegten Zeiträume.

### 3.3.4.2 Simulationsergebnisse Referenzfall

Sowohl für die Temperaturen als auch für die Feuchte konnte eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten erzielt werden. Abbildung 65 zeigt den gesamten Verlauf des Experiments zunächst für flächengewichtete Mittelwerte der gemessenen Größen in der Übersicht.

Der Temperaturanstieg während des QUB-Tests wird durch die Simulation zwar in seiner Größe, nicht aber in der Form gut abgebildet. Dagegen werden der anschließende Temperaturabfall sowie der Temperaturanstieg hin zur Co-Heating-Phase realistisch wiedergegeben. In der Co-Heating-Phase ergeben sich weitgehend konstante Temperaturen, die maximale Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Temperaturen beträgt unter 0,25 K. Der Root Mean Square Error RMS beträgt für die Lufttemperaturen 0,09 K, für die Strahlungstemperaturen 0,12 K.

Ähnlich wie im Fall Roitham sind tageszeitliche Schwankungen erkennbar: die simulierte Temperatur steigt gegenüber der gemessenen jeweils um die Mittagszeit um einige Zehntel Kelvin an, um danach wieder abzufallen. Grund hierfür könnte die Messmethode sein: Damit die Oberflächentemperatursensoren nicht durch die Raumluft beeinflusst werden, sind sie zum Raum hin mit einem Dämmstoffstreifen versehen. Das führt in der Tendenz dazu, dass Schwankungen der Strahlungstemperatur im Raum am Sensor nur verzögert und gedämpft wirksam werden. Dadurch schwankt die Strahlungstemperatur im Raum stärker als die gemessene Oberflächentemperatur.

Der Zeitverlauf der Raumluftfeuchte wird während des gesamten Experiments ausgezeichnet wiedergegeben. Die größte Abweichung beträgt 0,21 g/kg absoluter Feuchte.

Hieraus lässt sich folgern:

- Die Transmissionswärmeverluste des Gebäudes werden durch das angepasste Modell recht genau wiedergegeben.
- Der Feuchteverlauf wird ebenfalls gut wiedergegeben.
- Die Dynamik während der QUB-Phase kann durch das Modell nur näherungsweise wiedergegeben werden. Die Gründe konnten nicht identifiziert werden. Möglicherweise handelt es sich um Auswirkungen des Temperaturverlaufs vor Beginn des Experiments, die sich in dem thermisch sehr trägen Gebäude noch längere Zeit bemerkbar machen.

Abbildung 66 und Abbildung 67 stellen den Zeitverlauf der Temperaturen zonenweise dar. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass in den Zonen 1, 5, 8 und 12 keine separate Messung von Luft- und Strahlungstemperatur erfolgte, sondern lediglich mit Stand-alone-Datenloggern die Lufttemperatur gemessen wurde. Hier sind auch Messfehler durch direkte Abstrahlung der elektrischen Heizung denkbar. Die Daten werden in den Diagrammen lediglich der Vollständigkeit halber als grober Vergleichsmaßstab mitgeführt.

Die Diagramme zeigen, dass die mäßige Wiedergabe des Temperaturanstiegs im QUB-Test durch die Simulation nicht auf einzelne Zonen zurückzuführen ist, die Abweichungen finden sich in unterschiedlicher, regellos verteilter Form im ganzen Gebäude. Am besten stimmen Messung und Simulation in den Kellerräumen (Zone 2 und 3) überein. In den Zonen 7 und 9 war während des QUB-Tests die Heizung ausgefallen, dadurch ist nur ein geringer, durch die Nachbarräume induzierter Temperaturanstieg im QUB-Test zu erkennen. Auch in Zone 10 ist der gemessene Anstieg verhältnismäßig gering, hierfür ist jedoch keine Ursache bekannt.

Die erwähnten Temperaturanstiege um die Mittagszeit gibt es nur in den oberirdischen Räumen. Dies deutet auf einen Strahlungseinfluss oder Schwankungen der Außenlufttemperatur als Ursache hin.

Den Temperaturanstieg zur Co-Heating-Phase gibt die Simulation in allen Zonen akzeptabel genau wieder, mit Ausnahme von Zone 15, in der der Temperaturanstieg in der Simulation deutlich zu langsam erfolgt. Verschiedene Ursachen sind denkbar: Eventuell sind nicht alle Kapazitäten so gut zugänglich wie angenommen, denn es handelt sich um einen sehr kleinen Raum, in dem an den schweren Wänden viele Möbel stehen. Eher unwahrscheinlich erscheint es, dass die Wärmeverluste deutlich kleiner sind als berechnet. Möglich wäre dagegen, dass während der Messung im angrenzenden Nachbarhaus höhere Temperaturen als in der Simulation angenommen herrschten; dort grenzt ein Raum mit großer Gaube und entsprechenden solaren Wärmegewinnen an. Zwar wurden die Temperaturen im DG des Nachbargebäudes gemessen, jedoch nicht notwendig im betreffenden Raum.

Bezüglich des Feuchteverlaufs stimmen Messung und Simulation in allen Zonen gut überein (bbildung 68). Das gilt insbesondere für die Höhen der einzelnen Feuchtepeaks, vgl. hierzu auch Abbildung 76. Unterschätzungen sind vor allem in Zone 2, mit Einschränkungen auch in Zone 3 zu erkennen.

Die zusätzliche Feuchte und die entsprechende Wärme wurden in der Mitte von Zone 1, im Treppenhaus im KG, eingebracht, Feuchteanstieg und -abfall verteilten sich daraufhin konvektiv im Gebäude. Die gute Übereinstimmung deutet vor allem darauf hin, dass realistische Ansätze für den Luftaustausch zwischen den Zonen gewählt wurden. Selbst die zu geringen Feuchteanstiege in Zone 2 und 3 sind damit verträglich: Die Kochplatte, die als Feuchte- und Wärmequelle diente, erzeugte eine aufsteigende Dampf Wolke, so dass die im Simulationsmodell angenommene vollständige Durchmischung nicht vollständig gegeben war und die Feuchte schneller als im Modell angenommen in die oberen Geschosse aufstieg.

Ein solcher Effekt könnte auch erklären, warum relativ hohe Luftwechsel durch die horizontalen Öffnungen angesetzt werden mussten, um gute Ergebnisse zu erzielen.



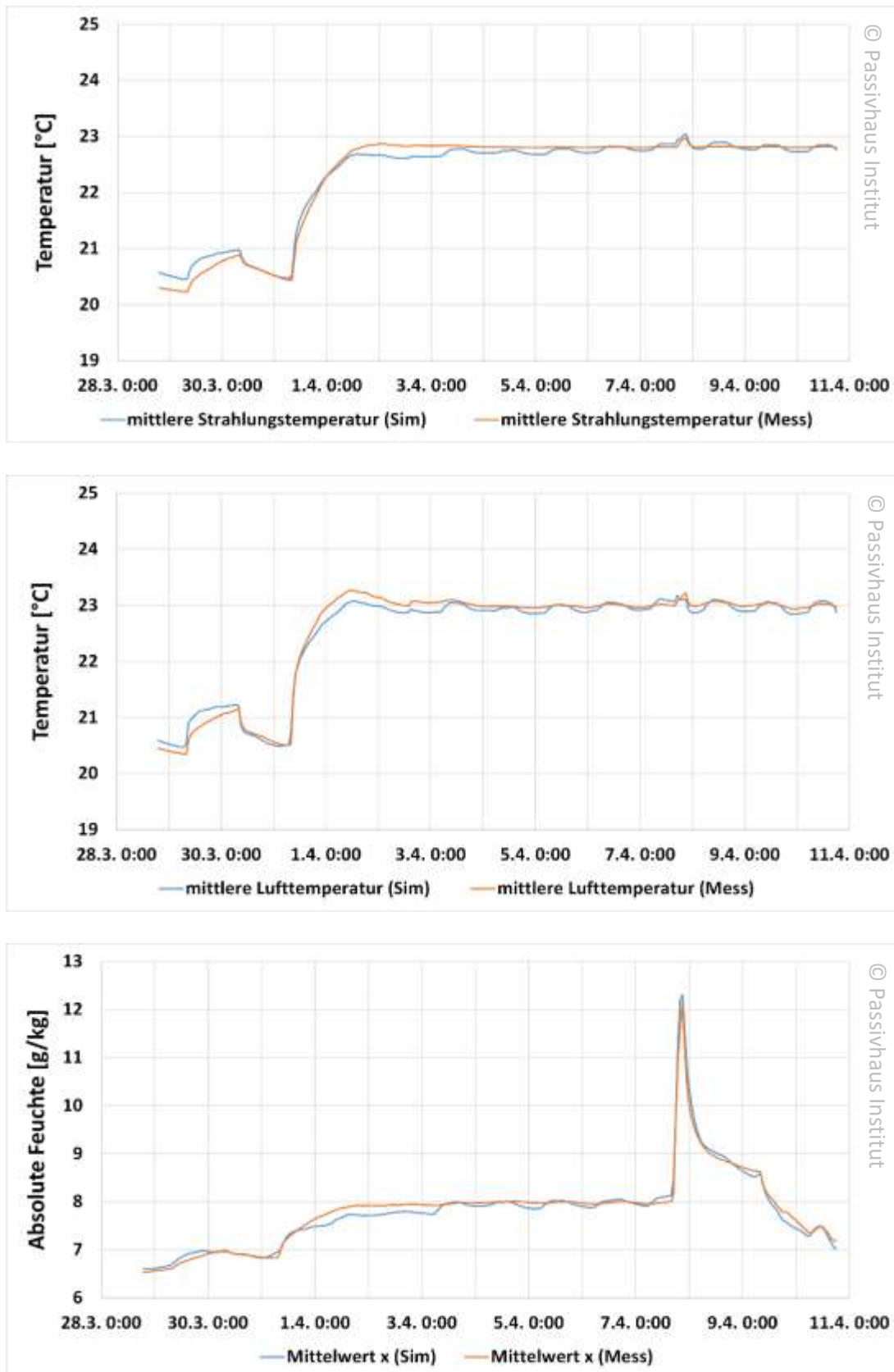


Abbildung 65: Messergebnisse und Simulation von Innentemperaturen und absoluten Feuchten im Vergleich (flächengewichtete Mittelwerte aller Zonen).

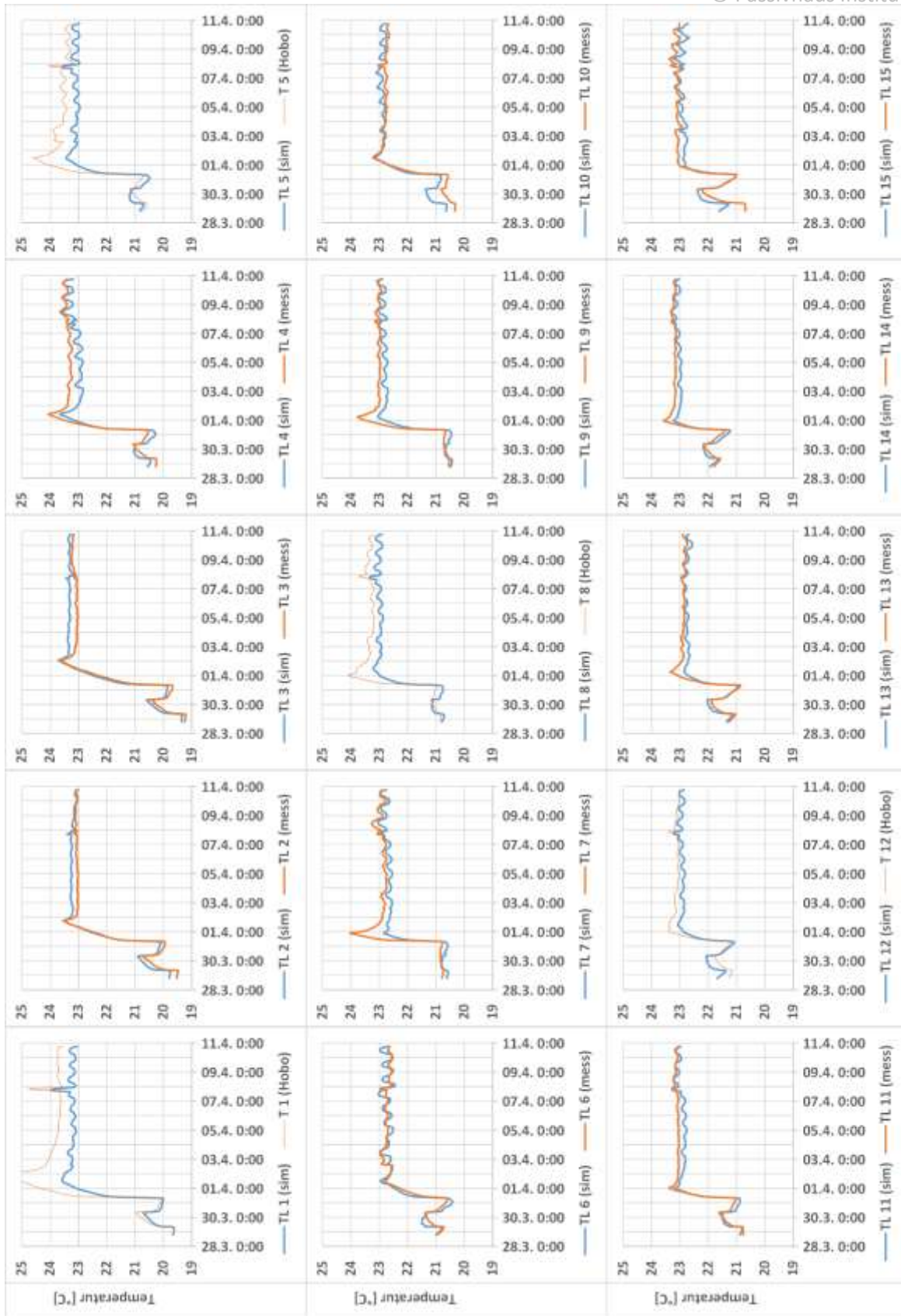


Abbildung 66: Lufttemperaturen in allen Zonen

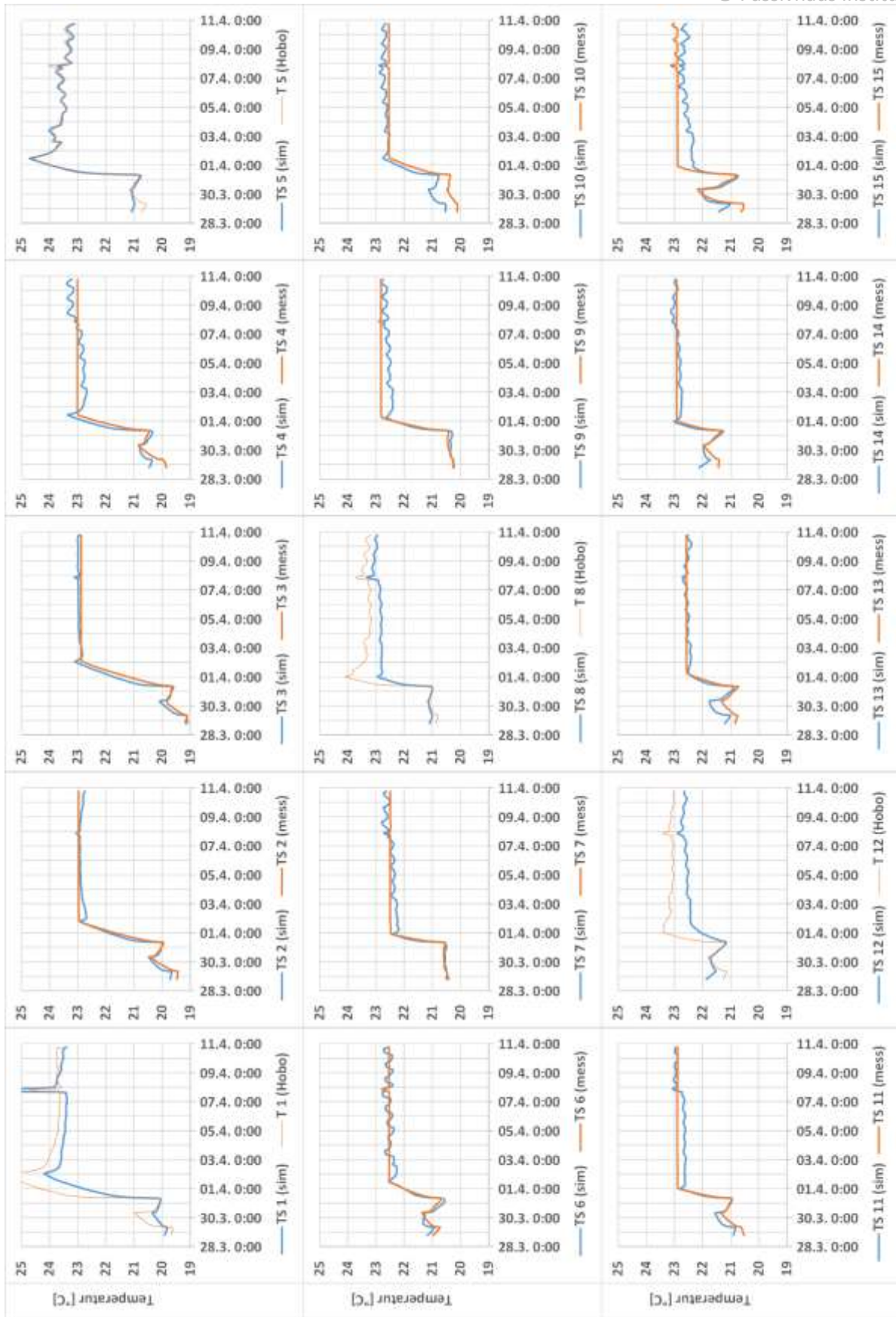


Abbildung 67: Strahlungstemperaturen in allen Zonen.



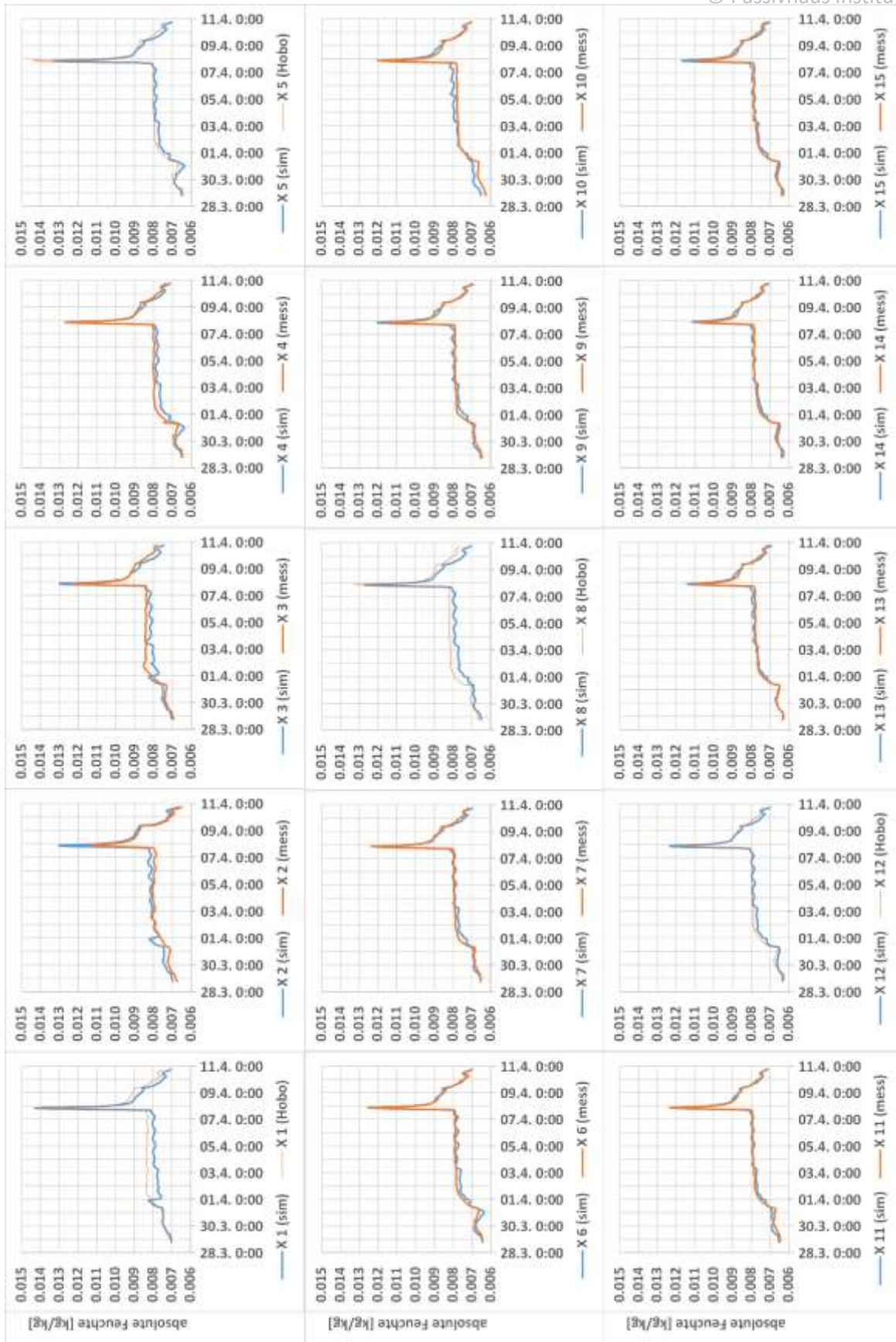


Abbildung 68: Absolute Feuchten in allen Zonen

### 3.3.4.3 Einflüsse auf die Übereinstimmung von Messung und Simulation

#### Temperatur unter der Bodenplatte

Auch im Fall Arheilgen beeinflusst die Temperatur unter der Bodenplatte, die sich nur mit geringer Genauigkeit feststellen lässt, das Simulationsergebnis. Abbildung 69 zeigt den Verlauf der mittleren Strahlungstemperatur im Gebäude für den Referenzfall, für 2 K höhere Temperaturen unter der Bodenplatte, wie sie bei einer ganzjährigen Kellertemperatur von 20 °C zu erwarten wären, sowie für eine um 2 K niedrigere Temperatur.

#### Temperaturen und Luftfeuchtigkeit im Gebäude vor Beginn der Messung

Den Einfluss einer anderen Vorkonditionierung zeigt Abbildung 70. Im Referenzfall (rot) wurden die Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten, wie sie zu Beginn der Messung ermittelt wurden, durch entsprechende Heizung und Entfeuchtung vor dem 28.3.2015 eingestellt.

Die grünen Linien stellen die Simulationsergebnisse dar für den Fall, dass bis zum 15.3.2015 keine Entfeuchtung (wohl aber eine Beheizung) stattfindet. Danach wird bis zum 28.3., 0 Uhr, dieselbe Ausgangsfeuchte wie im Referenzfall gehalten. Anschließend stellt sich die Feuchte entsprechend den gegebenen Randbedingungen ein.

Durch die höhere Feuchte des Gebäudes in der Zeit bis zwei Wochen vor dem Experiment entsteht auch während des Messzeitraums eine um bis zu 1 g/kg höhere absolute Feuchte. Interessant ist, dass die Differenz zum Referenzfall auch während des Messzeitraums zunächst noch zunimmt. Unterschiedliche Feuchteverhältnisse wirken sich also auch nach mehreren Wochen noch in relevantem Umfang aus.

Gut zu erkennen ist auch die Wechselwirkung von Feuchte und Temperatur. Das feuchtere Gebäude gibt während des Experiments mehr Feuchte ab, dadurch sinkt die Temperatur. Eine relevante Größenordnung erreicht dieser Effekt allerdings erst nach Einschalten der Lüftungsanlage, wenn größere Feuchtemengen abgeführt werden. Insgesamt fällt der thermische Effekt, gemessen in Kelvin, im Massivbau geringer aus als im Beispiel Roitham.

Wird das Gebäude bis zum 15.3.2015 nicht beheizt (blaue Linien), so stellen sich Temperaturen um 9 °C ein. Bis zum Beginn des Messzeitraums sind die Temperaturdifferenzen zum Referenzfall bereits wieder weitgehend verschwunden. Die zu Beginn der Vorkonditionierung geringere Entfeuchtung – bei niedrigeren Temperaturen ist die absolute Luftfeuchte und damit die durch Infiltration abtransportierte Feuchtemenge geringer – wirkt sich dagegen auch noch während des Messzeitraums aus, das Gebäude ist um ca. 0,5 g/kg feuchter als im Referenzfall.

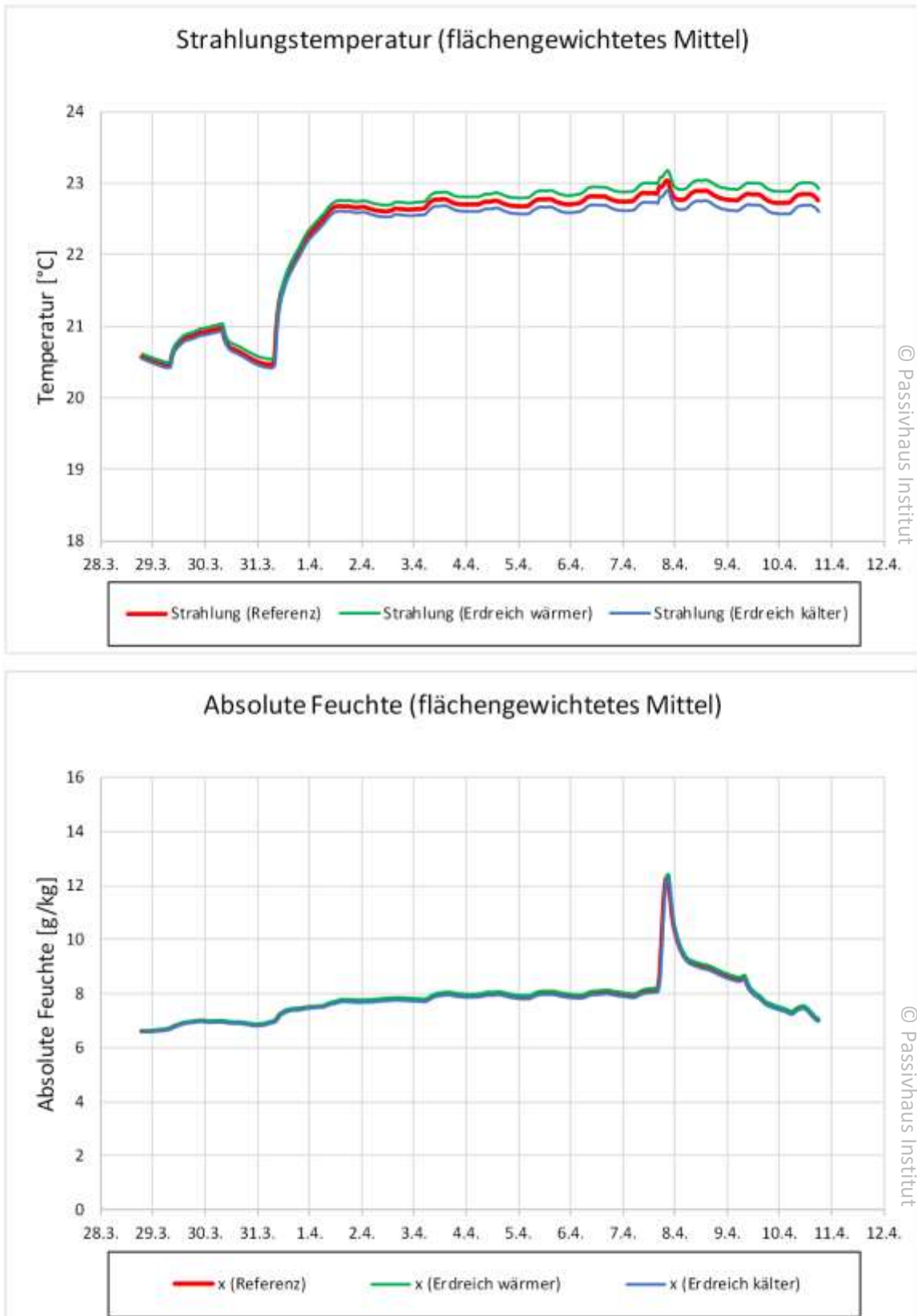


Abbildung 69: Einfluss der Temperatur unter der Bodenplatte auf die Simulationsergebnisse



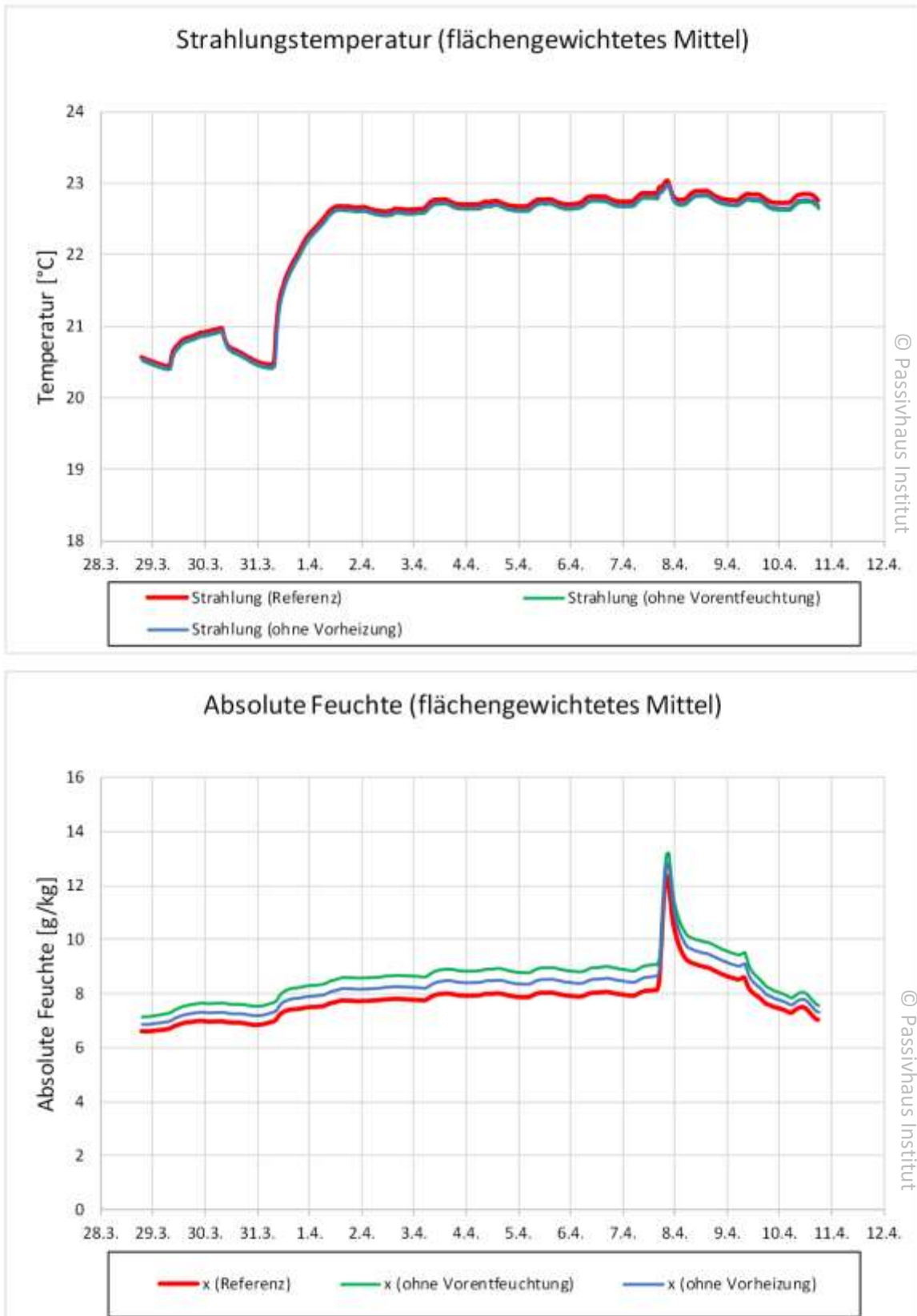


Abbildung 70: Einfluss der Vorkonditionierung auf die Simulationsergebnisse

### **Diffusionswiderstand an den Oberflächen**

Für die Innenoberflächen der Bauteile wurde im Referenzfall ein zusätzlicher  $s_d$ -Wert von 0,6 m angenommen. Mit diesem Wert konnte der gemessene Feuchtepeak am besten wiedergegeben werden. Dispersionsfarben, wie sie häufig als Innenbeschichtung auf Bauteile aufgebracht werden, gehören in der Regel zur Klasse  $V_2$  oder  $V_3$  nach DIN EN 1062-1, besitzen also eine mittlere bzw. niedrige Wasserdampfdiffusion. Das bedeutet, dass die  $s_d$ -Werte der Oberflächen durchaus in der Größenordnung von 0,5 m liegen können. Eine unabhängige messtechnische Ermittlung der relevanten Feuchteübergangswiderstände auf den gestrichenen, tapezierten und geölten Oberflächen im Gebäude war im Rahmen des Projekts nicht möglich.

Der Feuchteübergangswiderstand an den Innenoberflächen verändert primär die Reaktion des Gebäudes auf die konzentrierte Feuchtelast. Wird der zusätzliche  $s_d$ -Wert auf den Innenoberflächen von 0,6 m im Referenzfall auf 0,062 m (entsprechend Roitham) bzw. auf 0 reduziert, so können die Bauteile den Feuchteanstieg besser puffern, die maximal erreichte Feuchte wird geringer. Umgekehrt führen sie zu einer langsameren Feuchteabnahme nach Einschalten der Lüftung.

Beide Einflüsse lassen sich in Abbildung 71 erkennen. Sowohl der Anstieg der Raumluftfeuchte als Reaktion auf die eingebrachte Feuchtemenge als auch der Abfall nach Einschalten der Lüftungsanlage fallen bei Vernachlässigung der Oberflächeneffekte nur etwa halb so groß aus wie im Experiment.

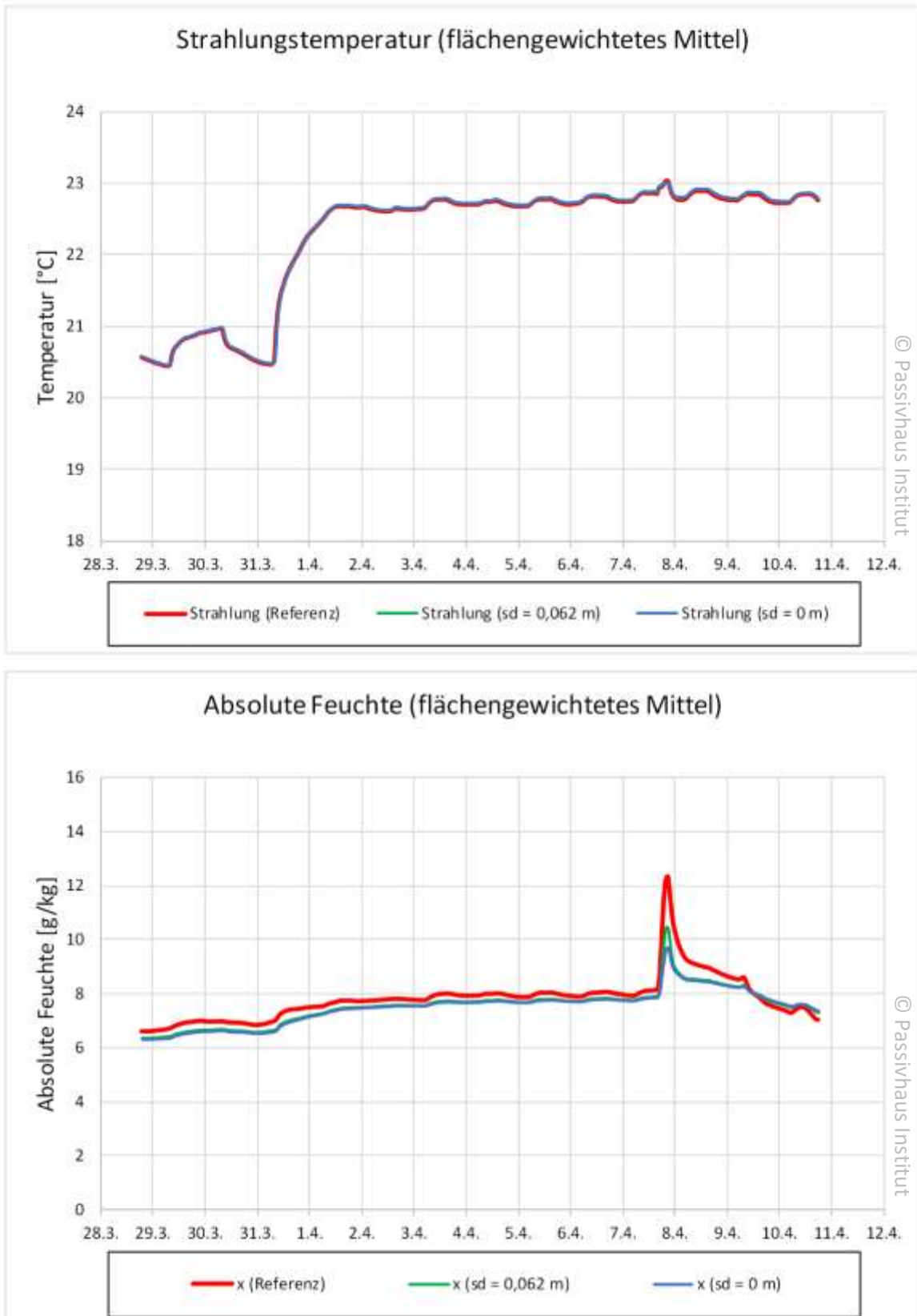


Abbildung 71: Einfluss des Feuchteübergangs auf den Innenoberflächen auf die Simulationsergebnisse

## Materialeigenschaften

Im Referenzfall wurden für den Beton der Kellerwände und -böden Werte angesetzt, die sich an Beton mittlerer Rohdichte gemäß DIN 206 orientieren ( $\lambda=1 \text{ W/(mK)}$ ,  $\rho c=1,8 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ ). Verwendet man stattdessen fälschlich Werte aus der Norm für armierten Beton ( $\lambda=2,3 \text{ W/(mK)}$ ,  $\rho c=2,6 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ ), so ergibt sich die grüne Linie in Abbildung 73. Die höhere und besser verfügbare Wärmekapazität des Materials wirkt sich vor allem im Keller so aus, dass der simulierte Temperaturanstieg erheblich hinter dem gemessenen zurückbleibt (Abbildung 72).

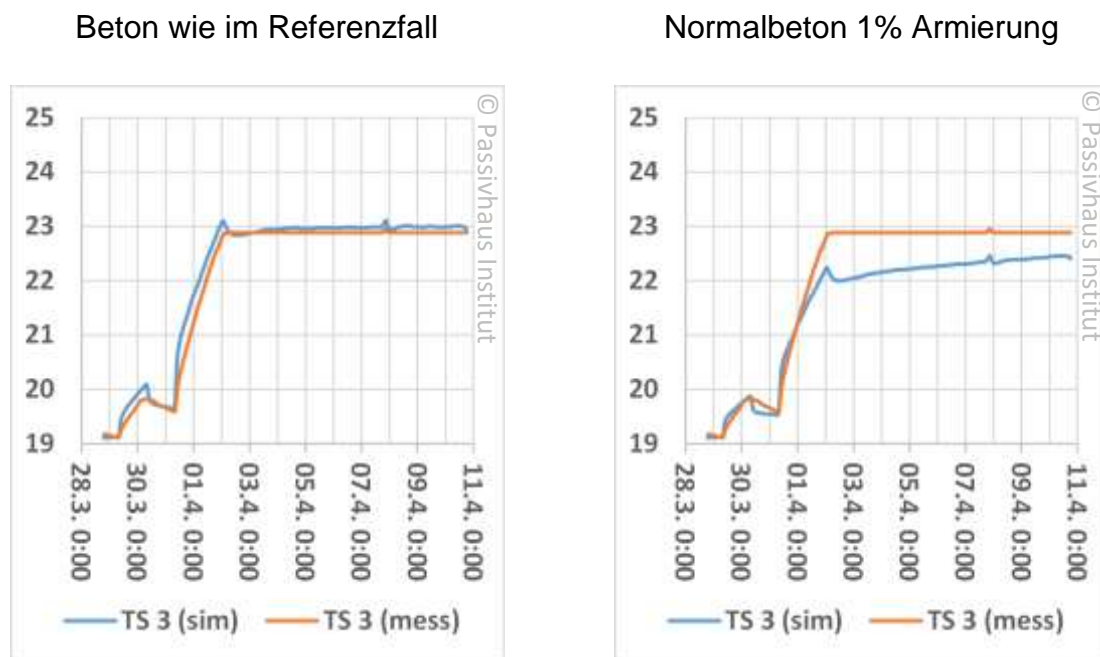


Abbildung 72: Einfluss des Materials von Kellerwänden und -böden auf die Strahlungstemperatur in Zone 3 (Keller West)

## Leitwert der Gebäudehülle

Wie zuvor bereits erwähnt, wurde der Leitwert zwischen Innen- und Außentemperatur in der Simulation gegenüber der ursprünglichen PHPP-Berechnung um 15% erhöht. Ohne diese Anpassung würde sich ein Temperaturverlauf entsprechend der grünen Linie in Abbildung 74 ergeben. Der Abstand zur Referenztemperatur wächst während der Messung weitgehend kontinuierlich bis auf 0,4 K an. Leitwertdifferenzen in dieser Größenordnung wären somit für sich allein problemlos zu detektieren. Allerdings ist es schwierig, andere Ursachen der Abweichung, z.B. niedrigere Wärmekapazitäten, hiervon zu unterscheiden.

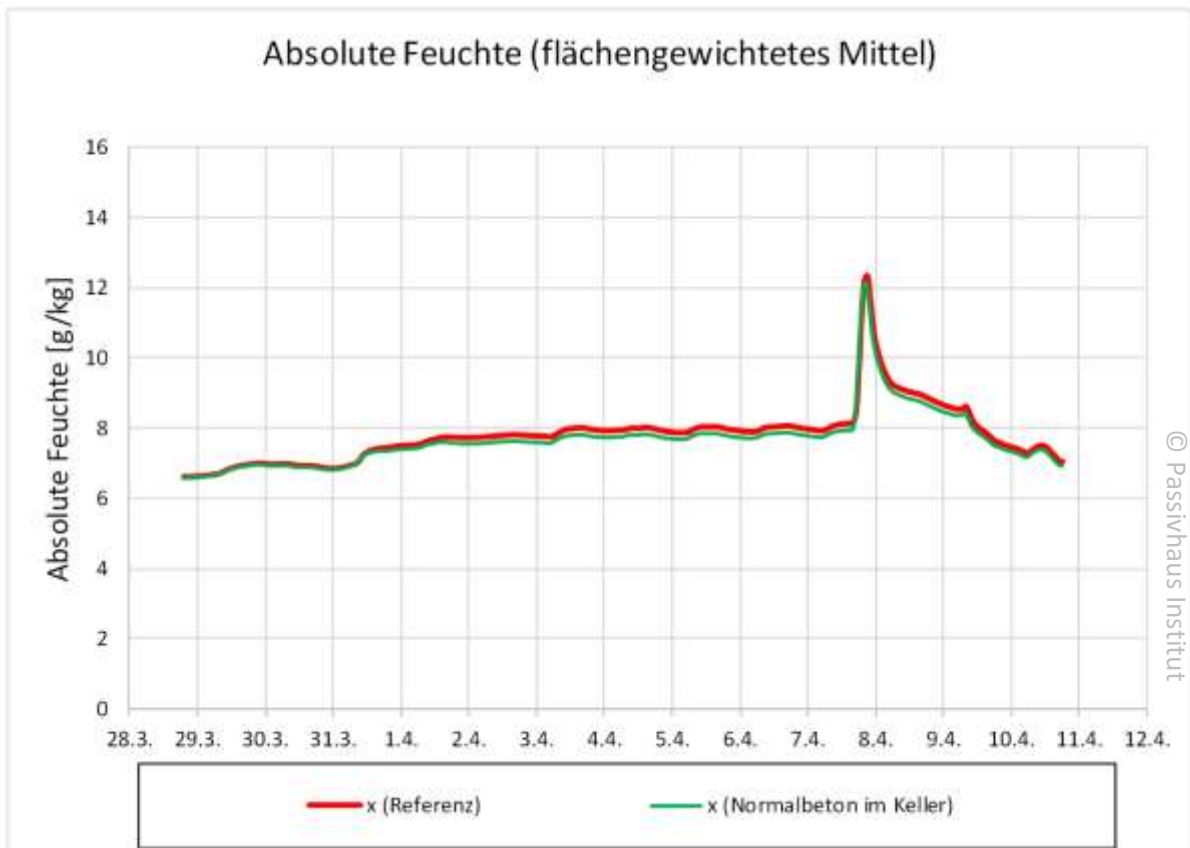
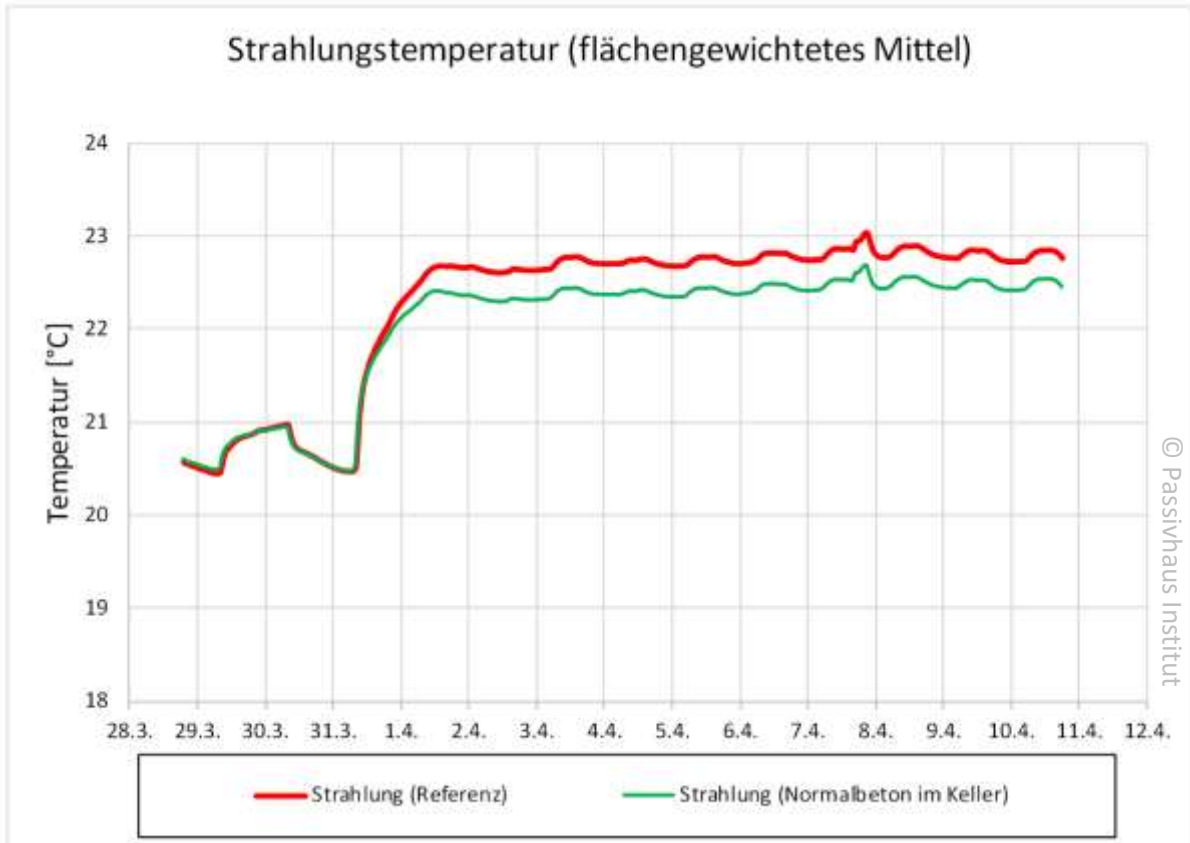


Abbildung 73: Einfluss des Materials von Kellerwänden und -boden auf die Simulationsergebnisse

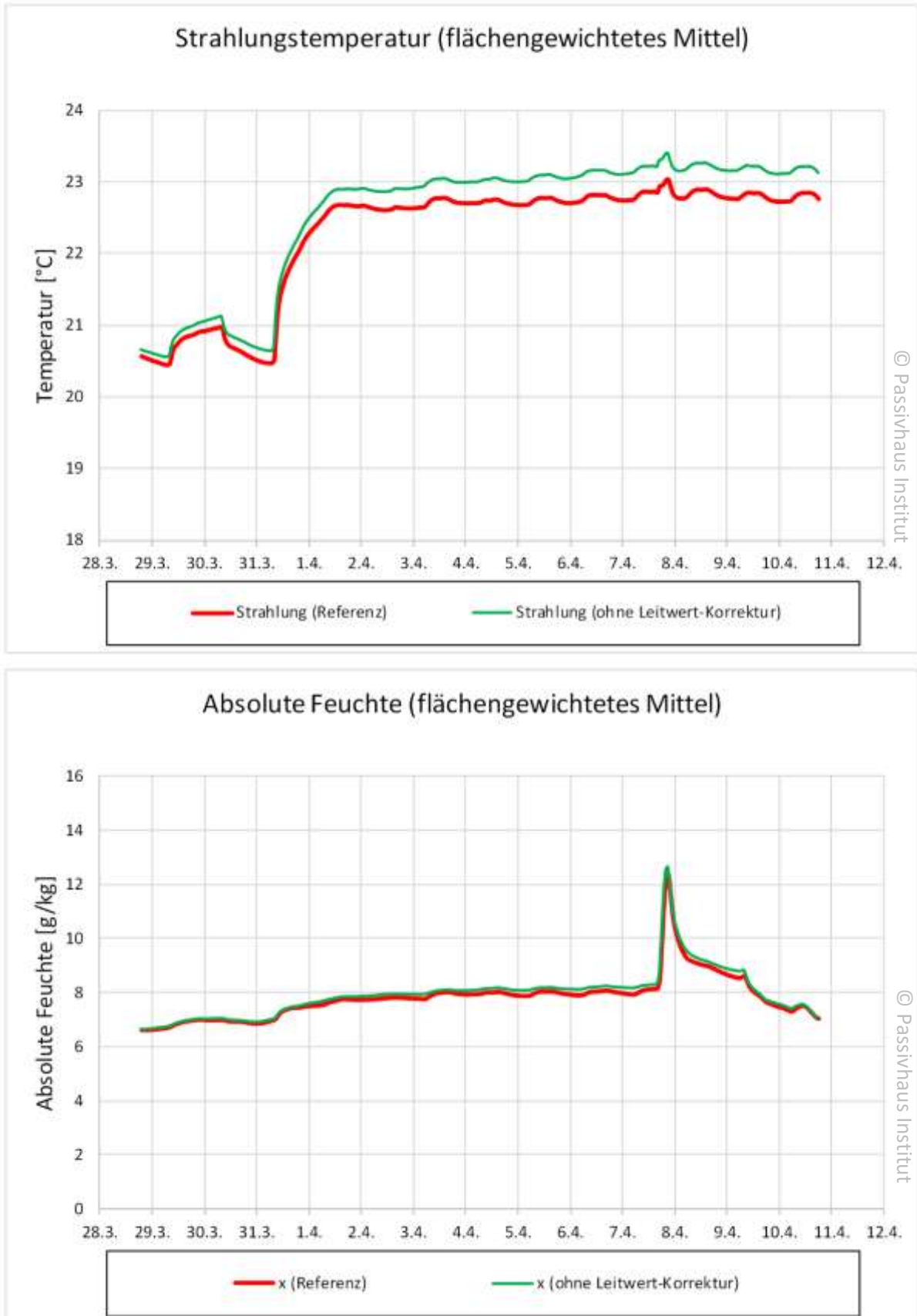


Abbildung 74: Einfluss eines reduzierten Leitwerts auf die Simulationsergebnisse



## Luftaustausch zwischen den Geschossen

Die Ausbreitung der Feuchte von Zone 1, wo sich die Feuchtequelle befand, in die übrigen Räume kann im Referenzfall gut wiedergegeben werden. Relevant ist hierfür der Luftaustausch zwischen den Zonen, der durch Temperatur- und daraus resultierende Dichteunterschiede zustande kommt. Bei solchen thermisch angetriebenen, turbulenten Strömungen ist der Volumenstrom proportional zur Wurzel aus der Temperaturdifferenz.

Der Volumenstrom durch senkrechte Öffnungen (hier: die geöffneten Innentüren) ist auf Grundlage von empirischen Korrelationsformeln, wie sie z.B. im PHPP angegeben sind, leicht abzuschätzen. Bei einer Temperaturdifferenz von 1 K beträgt er etwa 300 m<sup>3</sup>/h. Für den Luftaustausch durch die horizontalen Öffnungen führte ein Wert von 3500 m<sup>3</sup>/h bei 1 K zu einer guten Übereinstimmung von Messung und Simulation; hier gibt es nur dann einen Luftaustausch zwischen den Zonen, wenn die Luft in der oberen Zone kälter ist als in der unteren. Aus der Literatur, z.B. nach [Großklos2011] und [Pepper2001], ergeben sich für eine Öffnungsfläche von 4 m<sup>2</sup> und eine Deckenhöhe von 30 cm eher Werte von 250 bis 500 m<sup>3</sup>/h.

Eine Berechnung mit 350 m<sup>3</sup>/h Luftaustausch bei 1 K Temperaturdifferenz verändert die Mittelwerte der Temperatur und Feuchte im Gebäude nicht relevant (Abbildung 75). Die Verteilung der Feuchte auf die einzelnen Zonen ändert sich jedoch deutlich sichtbar, wie Abbildung 76 zeigt. Im Referenzfall stimmt die Höhe der einzelnen Feuchtepeaks im Rahmen der erzielbaren Genauigkeit mit den Messwerten überein. Die Literaturwerte für den Luftaustausch führen dagegen zu Abweichungen von ca. 50%. Hierfür könnte auch die spezielle Situation im Experiment eine Rolle spielen: Es herrscht in Zone 1 keine vollständige Durchmischung, sondern der von der Feuchte- und Wärmequelle aufsteigende Schwaden kann im Treppenhaus direkt nach oben steigen, wodurch sich ein anderes Strömungsmuster mit höherem Luftaustausch ergibt. Der Ansatz aus dem Referenzfall ist daher nicht auf typische Fragestellungen der dynamischen Gebäudesimulation übertragbar.

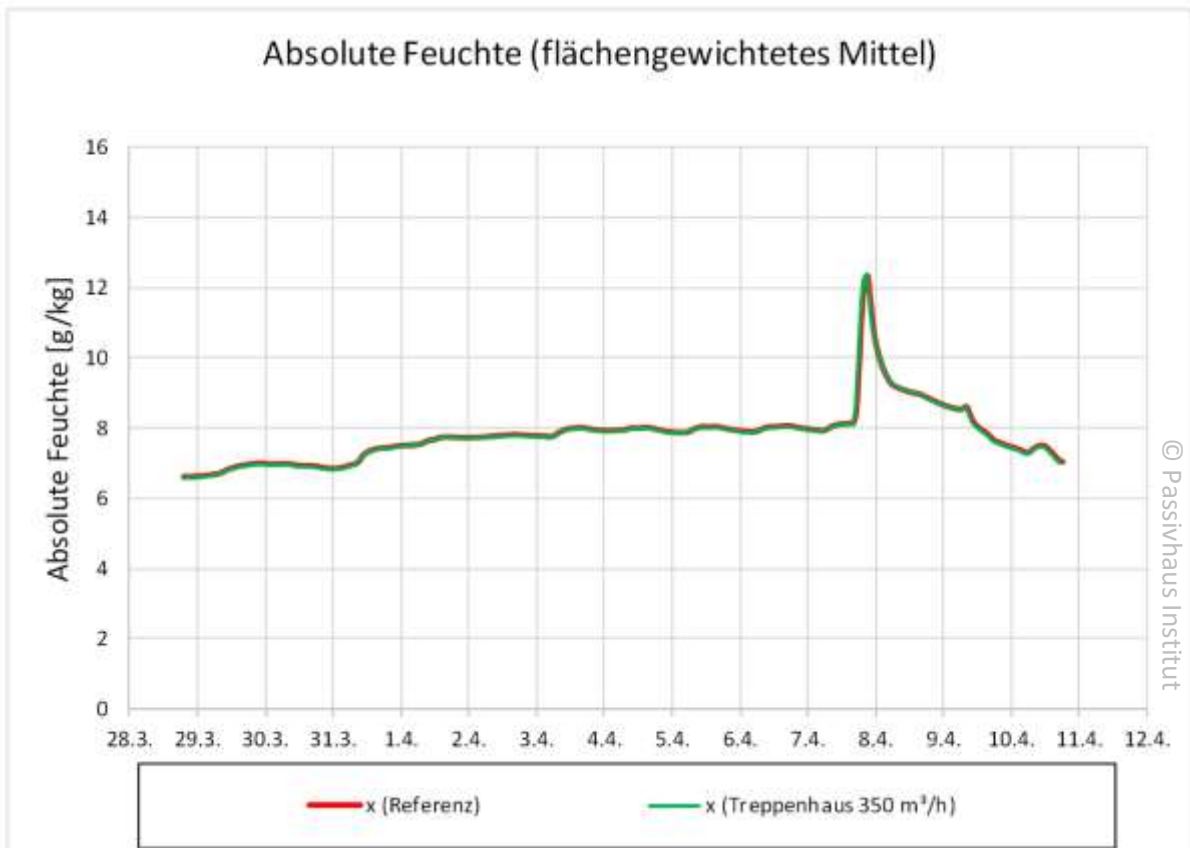
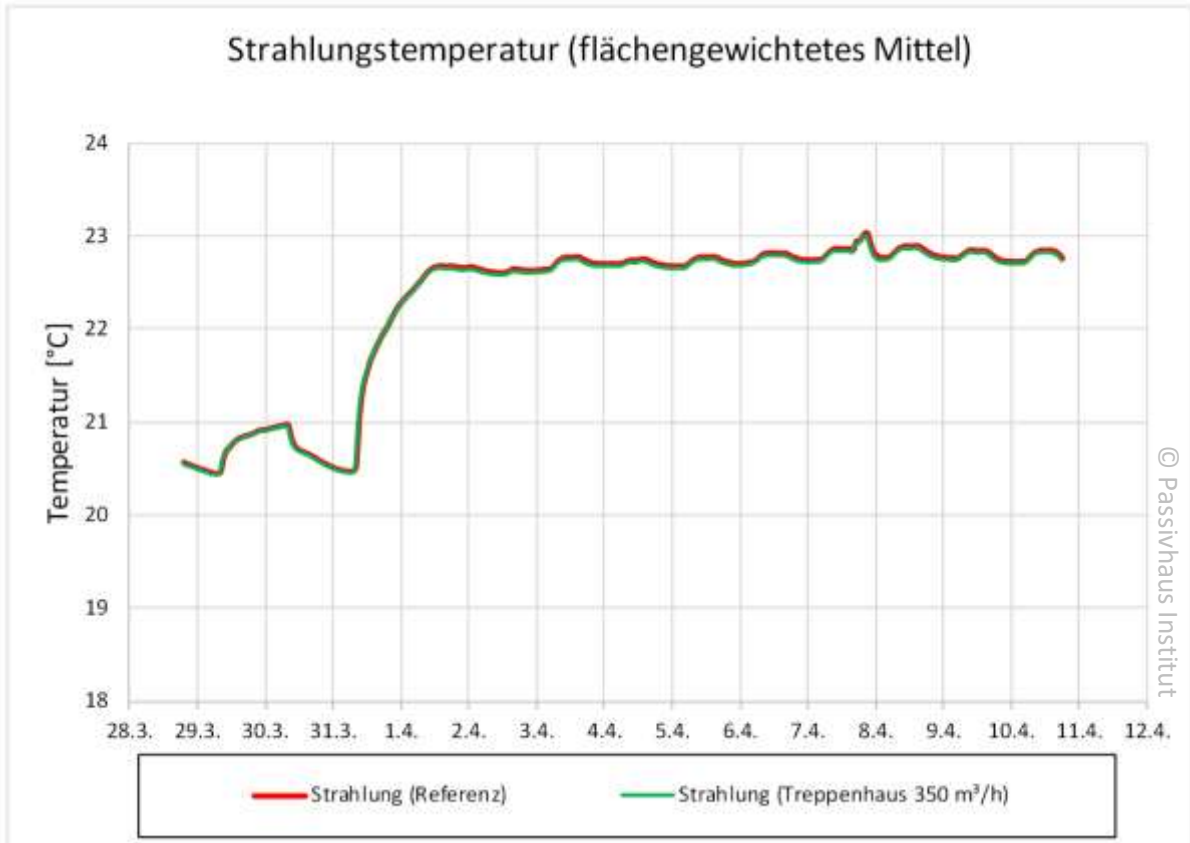


Abbildung 75: Einfluss des Ansatzes für den Volumenstrom durch horizontale Öffnungen auf die Simulationsergebnisse

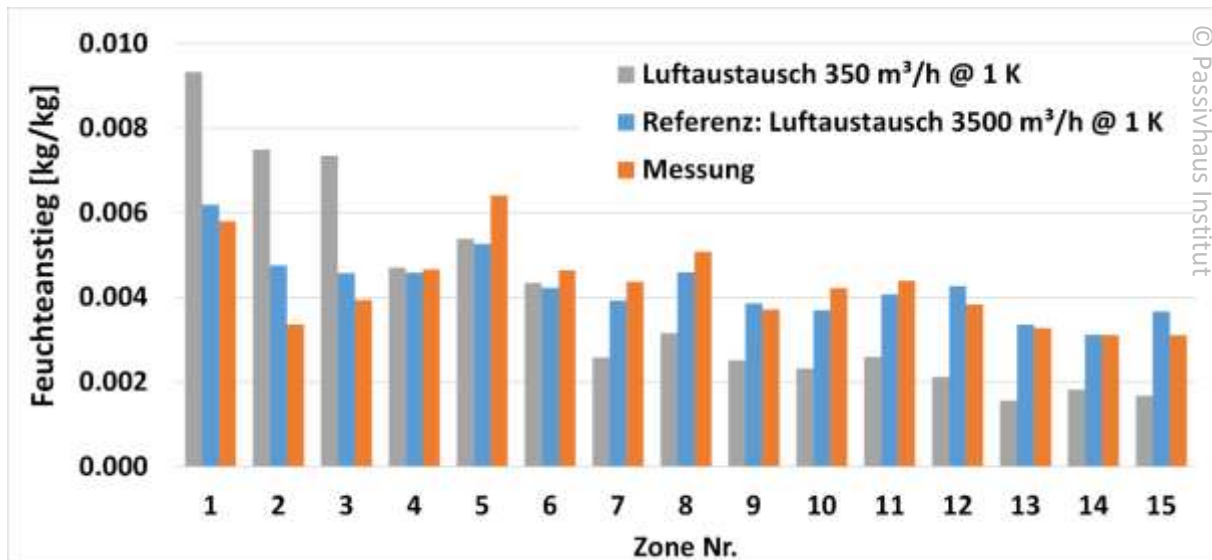


Abbildung 76: Einfluss des Ansatzes für den Volumenstrom durch horizontale Öffnungen auf die Höhe des Feuchtepeaks in den verschiedenen Zonen.

### 3.3.5 Theoretischer Wärmeverlustkoeffizient nach PHPP

Die energetische Planung des vermessenen Reihenendhauses erfolgte mit dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP). Der zu erwartende HLC-Wert (spezifischer Wärmeverlust unter Messbedingungen [W/K]) ergibt sich aus den Transmissions- und Ventilationswärmeverlusten analog zu dem Vorgehen in Abschnitt 0. Die Transmissionswärmeverluste sind im PHPP-Blatt Flächen zusammengeführt. Hier sind Angaben zu Flächen und entsprechende mittlere U-Werte von den verschiedenen Aufbauten sowie Wärmebrücken zu finden. Im Gegensatz zur Ursprungsversion wurden die Einflüsse von Jalousien bzw. XPS-Dämmplatten vor den Fenstern berücksichtigt. Dadurch werden die Wärmeverluste um 2,1 W/K auf 50,9 W/K reduziert. Der Transmissionsleitwert berechnet mit Normtemperaturkorrekturfaktoren beträgt dann 65,1 W/K.

Die Erdreichtemperatur (PHPP-Blatt Erdreich) beträgt für eine Innentemperatur von 20 °C im März 11 °C. Die Innentemperatur während des QUB-Tests betrug ca. 20,5 °C. Die mittlere Außentemperatur in dem Zeitraum betrug 9,4 °C. Während des Co-Heating-Betriebs betrug die Innentemperatur knapp 23 °C, und die Außentemperatur schwankte deutlich stärker zwischen 0 und 15 °C bei einem Mittelwert von 6,5 °C. Daraus resultiert ein effektiver, auf die Außenlufttemperatur bezogener Wärmeverlustkoeffizient für das Erdreich (bezogen auf die Außenluft)  $H_{T,GA} = H_{T,G} \cdot \frac{(T_i - T_g)}{(T_i - T_e)}$  von 23,3 W/K (QUB) bzw. 19,8 W/K (Co-Heating).

Ein analoges Vorgehen für die Wärmeströme zum Nachbarn ergibt auf die Außenlufttemperatur bezogene Transmissionskoeffizienten von 6,5 W/K bzw. 17,25 W/K.

Der theoretische Wärmeverlustkoeffizient ergibt sich damit aus den Infiltrationsverlusten von 3,4 W/K (PHPP-Abschätzung mit  $n_{50} = 0,022 \text{ h}^{-1}$ ) und den Wärmeverlustkoeffizienten für Außenluft, Erdreich und Nachbar entsprechend der jeweiligen Temperaturniveaus (innen und außen). Dieser beträgt während der QUB-Messung 84,1 W/K und während des Co-Heating-Betriebs 91,4 W/K. Mit diesen Werten sind die Ergebnisse aus der Messung zu vergleichen. Betont werden soll an dieser Stelle noch einmal, dass die unterschiedlichen Werte lediglich aus den verschiedenen Innen- und Außentemperaturen resultieren, nicht aber aus den unterschiedlichen Methoden.

© Passivhaus Institut

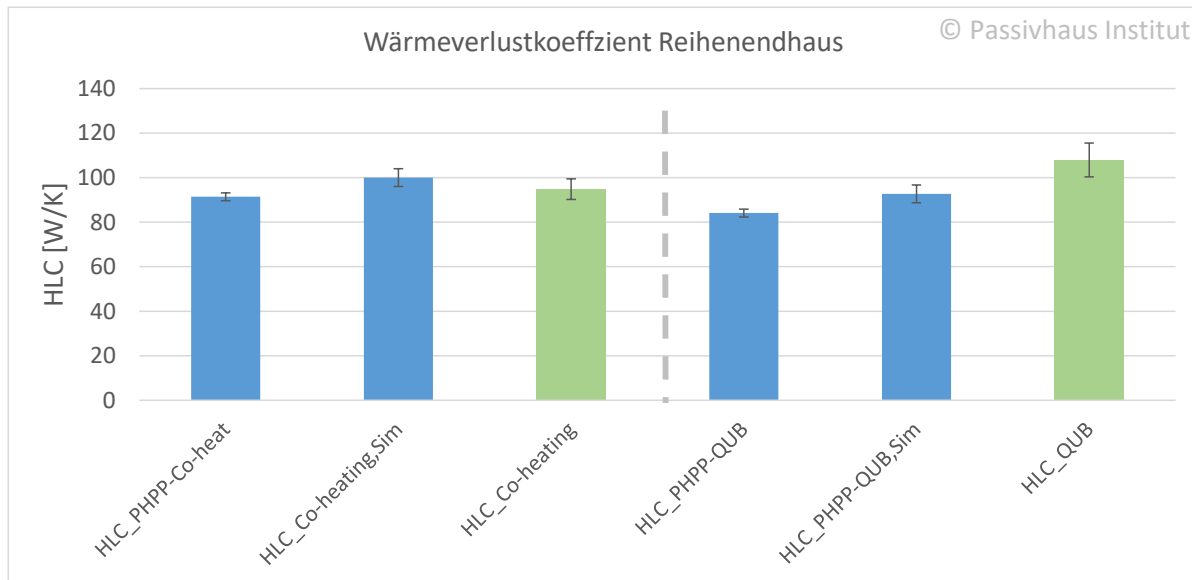
Zusammenstellung					U-Mittelwert [W/(m²K)]	H-Wert: U × A [W/K]	Temperaturgewichtungsfaktor $f_t$	H-gewichtet-Wert $f_t \times U \times A$ [W/K]	Anteil am Transmissions-Wärmeverlust
Gruppe Nr.	Flächengruppe	Temperaturzone	Fläche	Einheit					
1	Energiebezugsfläche		196.26	m²					
2	Fenster Nord	A	9.56	m²	0.603	5.8	1.000	5.8	9%
3	Fenster Ost	A	7.36	m²	0.725	5.3	1.000	5.3	8%
4	Fenster Süd	A	0.00	m²		0.0	1.000	0.0	
5	Fenster West	A	16.56	m²	0.622	10.3	1.000	10.3	16%
6	Fenster horizontal	A	0.00	m²		0.0	1.000	0.0	
7	Außentür	A	2.52	m²	0.563	1.4	1.000	1.4	2%
8	Außenwand Außenluft	A	186.74	m²	0.105	19.6	1.000	19.6	30%
9	Außenwand Erdreich	B	109.78	m²	0.165	18.1	0.521	9.4	15%
10	Dach/Decken Außenluft	A	99.28	m²	0.107	10.6	1.000	10.6	16%
11	Bodenplatte	B	81.96	m²	0.163	13.4	0.521	7.0	11%
					$\Psi$ [W/(mK)]	$\Psi \times A$ [W/K]	$f_t$	$f_t \times \Psi \times A$ [W/K]	Anteil
15	Wärmebrücken Außenluft	A	74.35	m	-0.028	-2.1	1.000	-2.1	-3%
16	Wärmebrücken Perimeter	P	49.32	m	-0.086	-4.3	0.521	-2.2	-3%
17	Wärmebrücken Bodenplatte	B	0.00	m		0.0	0.521	0.0	
18	Wand zum Nachbarn	I	137.36	m²	0.521	71.6			
Summe thermische Hülle			513.75	m²	0.152	78.2		65.1	100%

Abbildung 77: Auszug aus dem PHPP-Flächenblatt mit Informationen zu Flächen, U- und UA-Werten des Reihenendhauses.

### 3.3.6 Vergleich von erwarteten und gemessenen Wärmeverlustkoeffizienten

Für das Reihenendhaus wurden aus der Messung über zwei Verfahren Wärmeverlustkoeffizienten bestimmt. Das Ergebnis aus der QUB-Methode lautet:  $HLC_{QUB} = 108,5 \text{ W/K}$  bzw.  $123,7 \text{ W/K}$  je nachdem, ob die Luft- oder die Strahlungstemperatur für die Auswertung verwendet wird. Beim Co-Heating-Test wurde ein wesentlich kleinerer Wärmeverlustkoeffizient von  $HLC_{Co-heating} = 94,8 \text{ W/K}$  bestimmt. Da die Außenbedingungen während der Messung in der QUB-Phase und der Co-Heating-Phase deutlich unterschiedlich waren, wurden hier separate Abschätzungen für die erwarteten Werte vorgenommen. Zum Vergleich wurden zum einen die unveränderten PHPP-Daten herangezogen  $HLC_{PHPP} = 84,1 \text{ W/K}$  für den QUB-Test und  $HLC_{PHPP} = 91,4 \text{ W/K}$  während der Co-Heating-Phase, je nach herrschenden Temperaturen. Daneben wurde alternativ der HLC mit um 8,6 W/K erhöhtem Leitwert für die Obergeschosse, der sich aus den dynamischen Simulationen ergeben hatte, berücksichtigt ( $HLC_{Co-Heating, Sim}$  und  $HLC_{PHPP-QUB, Sim}$ ). Es zeigt sich bei der graphischen Darstellung in Abbildung 78, dass Messergebnis und Erwartungswert beim Co-Heating-Test innerhalb der Fehler gut übereinstimmen. Dagegen gibt es eine deutliche Diskrepanz zwischen  $HLC_{QUB}$  für die Lufttemperatur und den entsprechenden zu erwartenden Werten aus dem

PHPP von 17 bzw. 29 %. Das noch höhere Ergebnis aus der Strahlungstemperatur liegt noch deutlich weiter zu hoch. Auf Grund der sehr großen Abweichung und weil üblicher Weise die Lufttemperatur verwendet wird, wurde es hier erst gar nicht mit aufgetragen. Wie bei dem Experiment an der Passivhausscheibe scheint hier der Co-Heating-Test die zuverlässigere Methode zu sein.



**Abbildung 78:** Vergleich der unterschiedlichen Wärmeverlustkoeffizienten für das Reihenendhaus mit ihren jeweils abgeschätzten Fehlern. Da die Außenbedingungen während der Messung in der QUB-Phase und der Co-Heating-Phase deutlich unterschiedlich waren, wurden hier separate Abschätzungen für die Erwartungswerte vorgenommen.

### 3.4 Diskussion der Erkenntnisse aus den Gebäudesimulationen

Für die beiden untersuchten Passivhäuser wurden Modelle auf Basis der Baupläne und der Energiebilanz mit dem PHPP in Dynbil erstellt. Die Ergebnisse aus den dynamischen Gebäudesimulationen wurden mit den gemessenen Temperatur- und Feuchteverläufen in den Abschnitten 3.2.4 und 3.3.4 verglichen. Die Verläufe von Temperatur und Luftfeuchte konnten für die beiden untersuchten Objekte durch die Simulation gut wiedergegeben werden. Dabei waren nur geringfügige Anpassungen der Gebäude-Kenngrößen erforderlich. Man kann daher davon ausgehen, dass

- die Wärmeverluste der Gebäude weitgehend der Planung entsprechen
- das Simulationsprogramm das thermische und hygrische Verhalten der Gebäude korrekt abbilden kann



Einige Details erwiesen sich als besonders relevant für realitätsnahe Simulationsergebnisse:

- Der Feuchteverlauf wird nur dann richtig wiedergegeben, wenn die Diskretisierung in Oberflächennähe auf eine Schichtdicke von ca. 1 mm aufweist und geeignete Werte für den Wasserdampfdiffusionswiderstand der Oberflächen angesetzt werden. Ein sinnvoller Wertebereich für diesen zusätzlichen  $s_d$ -Wert liegt je nach Oberfläche zwischen 0,05 und 0,5 m.
- Ein ausreichend langer Vorlauf zur Vorkonditionierung des Gebäudes vor dem interessierenden Zeitraum ist erforderlich. Für thermische Simulationen ist ein Monat vollkommen ausreichend, bei Feuchtesimulationen sind mehrere Monate zweckmäßig.
- Zahlreiche Einflussgrößen bestimmen das Ergebnis mit, die im Zuge der Messung oft nur schwierig zu ermitteln sind. Hierzu zählen z.B. die Infiltration, die Temperatur im Erdreich unter dem Gebäude und die Temperatur in angrenzenden Räumen.

Damit ergeben sich Hinweise für die Durchführung von Co-Heating-Tests und ähnlichen Gebäudeprüfungen:

- Das Verhältnis von Infiltrationsluftwechsel und Drucktestluftwechsel kann je nach Gebäude und Witterung in sehr weiten Grenzen schwanken. Da Infiltrations- und Transmissionsverluste anhand der Messdaten kaum zu separieren sind, empfiehlt sich eine simultane Messung der Infiltration.
- Insbesondere in Massivbauten ist eine hohe Mess- und Regelgenauigkeit für die Temperaturen erforderlich. Beispielsweise beträgt im Objekt Arheilgen der typische Verlustwärmestrom nach außen 500 W. Um mit dieser Leistung die gesamte Gebäudekapazität von 350 MJ/K um 1 K aufzuheizen, benötigt man mehr als eine Woche. Gerade bei unbekannter Wärmekapazität ist daher darauf zu achten, dass sich die Temperaturen der Bauteile zu Beginn und am Ende des Experiments nur minimal unterscheiden.
- Am besten sollte die Oberflächentemperatur einer unbesonnten Innenwand als Referenz dienen. Diese erlaubt es am ehesten, die Temperatur der Bauteile konstant zu halten.
- Der Einfluss von Störgrößen, wie der Erdreichtemperatur oder der Temperatur in benachbarten Räumen, hängt von den Umständen des Einzelfalls ab. Die Analyse der Experimente erfordert somit stets Sorgfalt und Fachkenntnis.



## 4 Zusammenfassung

Ziel der im vorliegenden Bericht dokumentierten Arbeiten war die Entwicklung eines praktikablen Messverfahrens zur Evaluierung der thermischen Qualität der Gebäudehülle, das besonders auch für hochgedämmte Gebäude anwendbar ist. Dazu wurde auf Basis von zahlreichen dynamischen Gebäudesimulationen ein Messzyklus abgeleitet und die notwendige Messtechnik entwickelt. Die Anwendung erfolgte für drei verschiedene Objekte: eine Klimakammer, ein freistehendes, eingeschossiges Passivhaus und ein dreigeschossiges Passivhaus als Reihenendhaus mit Keller. Die Wärmeverlustkoeffizienten konnten so auf verschiedenen Wegen bestimmt werden.

Mehrere Aspekte des entwickelten Messverfahrens (vgl. Abschnitt 2.3) sind wichtig für die Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten mit hoher Genauigkeit innerhalb kurzer Messdauern: Zum einen die Regelung der Heizung nach der Oberflächentemperatur, welche eine wesentlich bessere Kopplung an die Gebäudemasse aufweist als die Lufttemperatur. Zum anderen wurden Verschattungen für alle transparenten Bauteile zur Reduktion der solaren Gewinne installiert. Dies war insofern hilfreich, als dass bei hoch gedämmten Gebäuden störende Einflüsse durch Solarstrahlung (solare Gewinne) einen sehr großen Effekt haben können. Zur Verschattung wurden entweder vorhandene Verschattungselemente (Jalousien, Rollläden) oder vorübergehend opake Elemente (mit reflektierenden Rettungsdecken beschichtete XPS-Platten) angebracht. Dadurch konnten die sonst nur schwer quantifizierbaren solaren Gewinne soweit reduziert werden, dass ihr Einfluss während der Messungen vernachlässigt werden konnte.

Als Verfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustkoeffizienten haben sich der Co-Heating-Test und die QUB-Methode als am besten geeignet herausgestellt. Für beide Gebäude stimmten die Wärmeverlustkoeffizienten, die aus jeweils lediglich vier Tagesmittelwerten nach dem Co-Heating-Verfahren bestimmt wurden, innerhalb der abgeschätzten Fehlergrenzen von ca. 10 % mit den erwarteten Werten überein. Die Ergebnisse aus der QUB-Methode lagen dagegen um über 20 % oberhalb der zu erwartenden Werte. Dafür erlaubt die QUB-Methode zusätzlich die Bestimmung der wirksamen Wärmekapazität, und der Messzyklus ist kürzer. Dass beim QUB-Verfahren im Gegensatz zum Co-Heating-Test erhöhte Wärmeverlustkoeffizienten ermittelt wurden, könnte in der leichten Asymmetrie von Aufheiz- und Abkühlkurve begründet gewesen sein. Diese lässt sich allerdings nur unter Kenntnis des zu erwartenden Wetters und des Wärmeverlustkoeffizienten, der ja gerade gemessen werden soll, vermeiden.

Beide eingesetzten Verfahren haben sich mit einem Messintervall von 2-3 bzw. 4-5 Tagen bei Fehlern in der Größenordnung von 20 % bzw. 10 % als sehr praktikabel erwiesen. Gegen einen regelmäßigen Einsatz für jedes Gebäude spricht allerdings die Einschränkung, dass eine ausreichende Temperaturdifferenz vorliegen sollte. Bei sommerlichen Temperaturen wäre eine Differenz von 10 K nur bei von der normalen

Nutzung deutlich abweichenden Innentemperaturen möglich. In Fällen mit fraglichen Qualitäten der Gebäudehülle sind beide Verfahren allerdings eine gute Möglichkeit zur Klärung.

Die zunächst auch in Betracht gezogene Parameteridentifikation für RC-Netzwerke wurde z.B. für die Messwerte einer Testbox im Rahmen der Common Exercise 3 des internationalen IEA EBC Annex 58 Konsortiums angewandt. Die Ergebnisse des Programms LORD ergaben je nach Betriebsmodus der Box allerdings sehr stark schwankende Resultate für den Wärmeverlustkoeffizienten. Daneben zeigte sich, dass für komplette Gebäude zu große Korrelationen der ermittelten Modellparameter vorlagen, als dass Leitwerte für einzelne Bauteile zuverlässig hätten gewonnen werden können. Da ein möglichst robustes Verfahren entwickelt werden sollte, wurde auf Grund dieser Tatsachen die Parameteridentifikation zu Gunsten der auch deutlich einfacher auswertbaren Co-Heating- und QUB-Verfahren nicht weiter verfolgt.

Bezüglich der Messunsicherheiten hat sich grundsätzlich ergeben, dass die Erdreichtemperatur, die im besten Fall auf ca.  $\pm 1$  K abgeschätzt werden kann, eine bedeutsame Fehlerquelle ist. Daneben hat auch bei geringen Temperaturunterschieden die Existenz einer Verbindung zu einem Nachbargebäude/-raum einen relevanten Einfluss, da in der Regel der Leitwert gegenüber den Außenwänden deutlich erhöht ist. Aus dem Vergleich der beiden Messungen wird deutlich, dass leichte Gebäude deutlich geringere Anforderungen an die Messgenauigkeit stellen als schwere.

Begleitend zu den Messungen wurden dynamische Gebäudesimulationen der Temperaturverläufe auf Basis der gemessenen Randbedingungen durchgeführt. Diese erlaubten eine Überprüfung der Planungswerte aus dem PHPP und die Ermittlung eines zu erwartenden Wärmeverlustkoeffizienten. Als Standardmethode wären Vergleiche von Messungen mit dynamischen Simulationen allerdings deutlich zu aufwändig, da allein die Erstellung des Gebäudemodells einige Tage in Anspruch nehmen kann.

Zur Untersuchung der hygrischen Vorgänge sollte die Sprungantwort der Raumluftfeuchte auf das Einbringen einer Feuchtespitze durch Verdampfen von Wasser ermittelt und mit DYNBIL-Simulationen verglichen werden. Durch den Vergleich der Messwerte mit dynamischen Gebäudesimulationen konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Der wichtigste Punkt war die Anpassung der Diskretisierung der Wandaufbauten, die nun für Feuchte und Wärme unterschiedlich gewählt werden kann, um ausreichend feine Diskretisierungen der oberflächennahen Schichten bei akzeptablen Rechenzeiten zu ermöglichen. Eine weitere wichtige Erkenntnis lag in der Evaluierung der jeweils passenden Dampfdiffusionsübergangswiderstände zur Anpassung des Feuchteübergangs. Diese Erkenntnisse konnten nur durch einen detaillierten Mess-Sim-Vergleich erzielt werden und erlauben nun, mit dem validierten Modell, Vorhersagen des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports mit deutlich verbesserter Genauigkeit.

## 5 Literatur

- [AkkP-27] Wärmeverluste durch das Erdreich; Protokollband Nr. 27 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004.
- [Butler2013] Butler, D.; Dengel, A.: Review of co-heating test methodologies; NHBC Foundation, 2013.
- [DYNBIL] Feist, W.; Dynamische Wärmebilanzen mit dem Programm „DYNBIL“, Universität Tübingen, 1981.
- [Feist1994] Feist, W.; Thermische Gebäudesimulation: kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. 1. Aufl., Heidelberg, C. F. Müller 1994.
- [Feist1999] Feist, Wolfgang: Vergleich von Messung und Simulation, In: Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 5, Energiebilanz und Temperaturverhalten, Passivhaus Institut, Darmstadt, June 1999.
- [Feist2001] Feist, W.; Stellungnahme zur Vornorm DIN V 4108 Teil 6:2001 aus Sicht der Passivhausentwicklung, CEPHEUS Projektinformationen Nr. 39, Passivhaus Institut, 2001.
- [Feist2016] Feist; W. Ebel, S. Peper, W. Hasper: Langzeiterfahrungen und Messergebnisse aus dem ersten Passivhaus in Darmstadt-Kranichstein; Tagungsband der 20. Passivhaustagung, Darmstadt 2016
- [Gutschker2005] Gutschker, O., Forum der Forschung 18/2005: 63-68, BTU Cottbus, Eigenverlag, ISSN-Nr.: 0947 – 6989.
- [Gutschker2012] Gutschker, O.; Manual LORD 3.2, <http://dynastee.info/wp-content/uploads/2012/12/lordmanual.pdf>, 2012.
- [Johnston2012] Johnston, D.; Miles-Shenton, D.; Wingfield, J.; Farmer, D.; Bell, M.: Whole House Heat Loss Test Method (Coheating); Leeds Metropolitan University, Annex 58, Bilbao, 2012.
- [Kaufmann 2001] Kaufmann, Berthold und Feist, Wolfgang: Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 21, Hannover, Passivhaus Institut Darmstadt, Juni 2001.
- [Kramer2012] Kramer, R.; From castle to binary code; Master of Science Thesis; University of Technology Eindhoven; Eindhoven; 2012.
- [Künzel1994] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation am Lehrstuhl für Konstruktive Bauphysik der Universität Stuttgart, Stuttgart 1994.
- [Mangematin2012] Mangematin, E.; Pandraud, G.; Roux, D.: Quick measurements of energy efficiency of buildings, C. R. Physique 13, 383, 2012.



- [Mangematin2013] Mangematin, E.; Pandraud, G., Gilles, J.; Roux, D.: Method and device for determining the heat loss coefficient of a premises, United States Patent Application Publication, Pub. No. US 2013/0226503A1, 2013.
- [Pandraud2014] Pandraud, G.; Gossard, D., Alzetto, F.: Experimental optimization of the QUB method, IEA ECBCS Annex 58 Free paper, 2014.
- [Pandraud2015] Pandraud, G.; Fitton R.: QUB: Validation of a Rapid Energy Diagnosis Method for Buildings, 2015.
- [Peper2001] S. Peper, W. Feist, O. Kah: Meßtechnische Untersuchung und Auswertung Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 19, Endbericht Messzeitraum Oktober 1999 bis April 2001 Passivhaus Institut/Stadtwerke Hannover, Darmstadt / Hannover 2001.
- [PHPP2013] Feist, W.: Passivhaus Projektierungs-Paket PHPP, Version 8, Das Energiebilanzierungs- und Passivhaus-Planungstool für qualitätsgeprüfte Passivhäuser und EnerPHit-Modernisierungen, Passivhaus Institut, 2013.
- [Reichel2004] Reichel, A.; Hochberg, A.; Köpke, C.: Putze, Farben, Beschichtungen : Details, Produkte, Beispiele; München : Inst. für Internat. Architektur-Dokumentation, 2004.
- [Rojas-Kopeinig 2015] Rojas-Kopeinig, G.: Optimization potentials for mechanical ventilation of energy efficient housing Simulation and Evaluation Methods, Dissertation, Universität Innsbruck, 2015.
- [Rojas-Kopeinig2016] Rojas-Kopeinig, G., Pfluger, R., Metzger, S. Kastner, W: Zuverlässige Charakterisierung der Gebäudeenergieeffizienz mit Hilfe dynamischer Messungen in Echtgröße, FFG Projektbericht, Projektnummer 843156
- [Schnieders2003] Schnieders, Jürgen: Passive Strategien zur sommerlichen Kühlung im Passiv-Bürogebäude Cölbe: Praxiserfahrungen und Simulationsergebnisse. In: Proceedings of the 7th International Passive House Conference, Hamburg, 2003, Darmstadt, Passivhaus Institut, Feb 2003.
- [Schnieders2008] Schnieders, J.; Pfluger, R; Feist, W.: Energetische Bewertung von Wohnungslüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung, Endbericht, Passivhaus Institut Darmstadt 2008
- [Sonderegger1979a] Sonderegger, R. C. Condon, P. E. and Modera, M. P.: In-situ measurements of residential energy performance using electric co-heating. ASHRAE Transactions; Vol. 86(I); 1980.
- [Sonderegger1979b] Sonderegger, R.C.; Modera, M.P.: Electric Co-Heating A Method for evaluating seasonal heating and heat loss rates in dwellings; Lawrence Berkeley Laboratory; 1979.



- [Subbaro1988] Subbarao, K; Burch, J.D.; Hancock, C.E.; Lekov; A.; Balcomb, J.D.; Short-Term Energy Monitoring (STEM): Application of the PSTAR Method to a Residence in Fredericksburg, Virginia; 1988.
- [Wingfield2013] Wingfield, J; Johnston, D.; Miles-Shenton, D.; Farmer, D.; Whole House Heat Loss Test Method (Coheating); Leeds Metropolitan University; 2013.

## 6 Anhang

### 6.1 Bilder Passivhausscheibe



© Passivhaus Institut

**Abbildung 79: Wetterstation auf dem Dach des Messobjekts. Das Foto liefert auch einen Eindruck der Wetterbedingungen während eine Großteils des Messzeitraums.**



© Passivhaus Institut

**Abbildung 80: Zustand des Objekts während der Messung: Alle Rollläden sind geschlossen.**





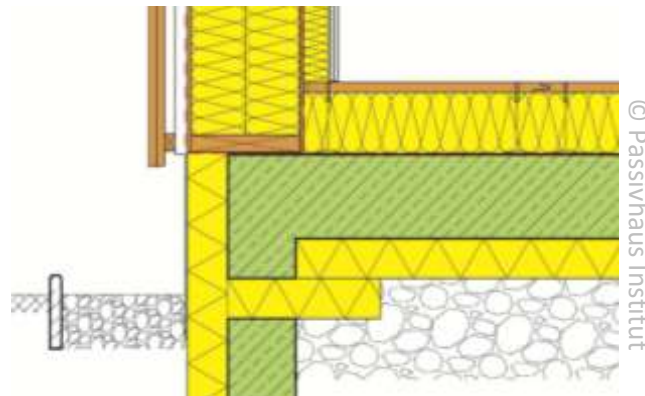
**Abbildung 81: Foto von der Eingangstür zum Gebäude: Das Netzkabel zur Kontrolle der Messung ist unter der Türdichtung durchgeführt. Die kleine Seitenscheibe neben der Tür ist mit einer Folie verdunkelt.**

## 6.2 Passivhausscheibe: Wärmebrückenberechnungen zum Erdreichtemperatur

Wie in Abschnitt 2.1.2 festgestellt wurde, hat das Erdreich im stationären Zustand einen bedeutenden Einfluss auf den gesamten Wärmestrom, der das Gebäude verlässt. Gleichzeitig kann man die wirksame Temperatur unter der Bodenplatte nicht unmittelbar messen, erstens, weil dieser Bereich nicht gut zugänglich ist, zweitens, weil dreidimensionale Effekte und der Einfluss von Wärmebrücken dafür sorgen, dass die Temperatur unter der Bodenplatte sich räumlich (und in geringem Maße auch zeitlich) ändert.

Im Folgenden wird untersucht, ob Temperaturmessungen im Randbereich der Bodenplatte Rückschlüsse auf die Temperaturwerte der Bodenplatte zulassen und an welcher Stelle die Messung ggf. am sinnvollsten stattfindet.

Das Gebäude wurde, ohne Anspruch auf maximale Genauigkeit, zweidimensional im Wärmestromprogramm HEAT2 modelliert. Dabei wurde im Referenzfall angesetzt, dass die Raumtemperatur konstant 18 °C beträgt. Betrachtet wurde das Temperaturprofil am 1. Februar im eingeschwungenen Zustand.



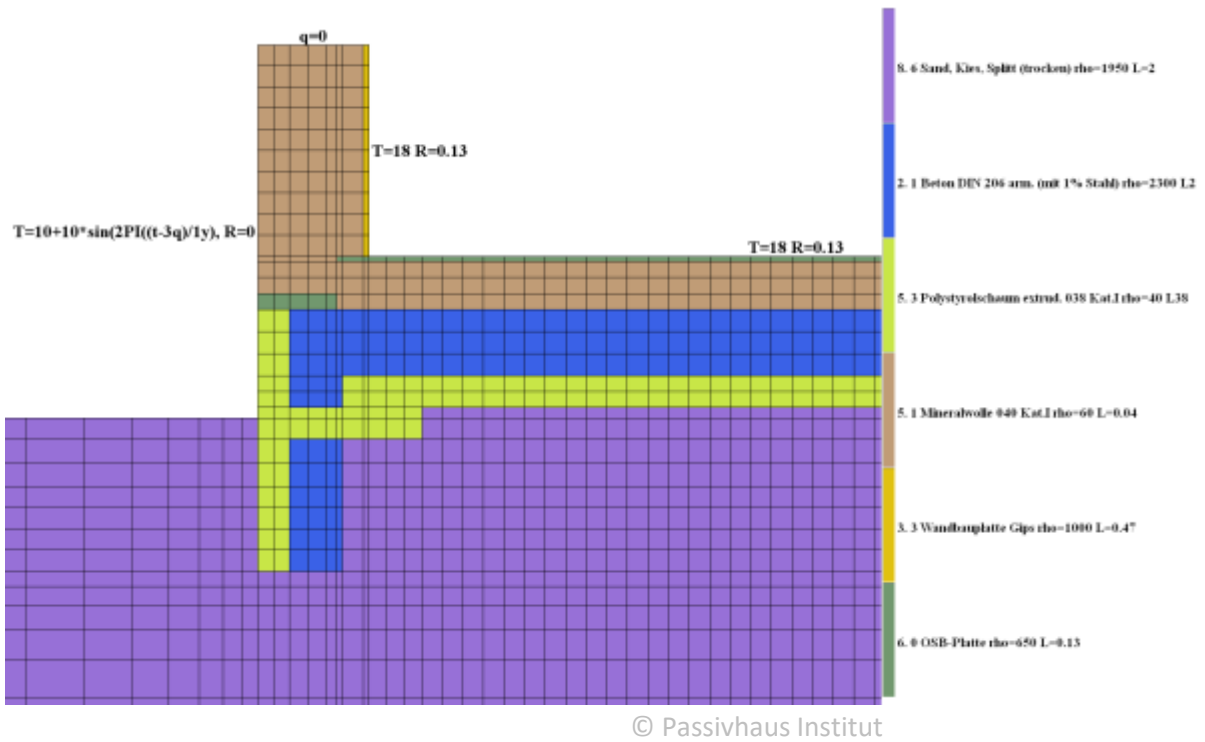


Abbildung 82: Randdetail der Bodenplatte in der Passivhausscheibe und Ausschnitt aus dem Simulationsmodell



## Ergebnisse der Wärmestromberechnungen für verschiedene Fälle:

Fall	Wärmestrom $Q_{BP}$ [W/m]		Temperatur-Profil 1.2., 0:00 Uhr	Temperatur-Profil 15.2., 0:00 Uhr
	1.2.	15.2.		
Referenz (Fall 0)	3.9348	4.0031		
15 °C bis 1.2. (Fall T15)	2.8432	4.4334		
21 °C bis 1.2. (Fall 21)	5.0264	3.5727		
$\lambda_{Erd.} = 1$ Fall L1)	3.4348	3.4700		
$C_{Erd.} = 1$ (Fall C1)	4.2979	4.3843		



Aus den Simulationsergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Die Temperaturen neben dem Gebäude ändern sich innerhalb von 2 Wochen, vor allem oberflächennah, um ca. 1 K. Sie werden also stark vom Wetter der letzten Tage und Wochen beeinflusst.

Ein Temperatursprung in der Innentemperatur um 3 K verändert nach 2 Wochen den Wärmestrom durch die Bodenplatte noch immer um ca. 10%. Dies könnte darauf hindeuten, dass es möglicherweise besser ist, die Innentemperatur bei der Messung nicht anzuheben. Damit würde zwar der zu erwartenden Messfehler auf Grund geringerer Temperaturdifferenzen steigen, Fehler bei der Bewertung der Bodenplatten bzw. Erdreicheinflüsse dagegen aber reduziert.

Die Erdreicheigenschaften (Kapazität und Wärmeleitfähigkeit) beeinflussen das Temperaturprofil im Erdreich erheblich, insbesondere im Randbereich. Gleichzeitig sind diese Größen nur mit geringer Genauigkeit bekannt. Eine Labormessung einer Bodenprobe würde keinen großen Erkenntnisgewinn bringen, denn die Feuchteverhältnisse neben und unter der Bodenplatte können sich unterscheiden, die Erdfeuchte hat aber großen Einfluss auf die Erdreicheigenschaften.

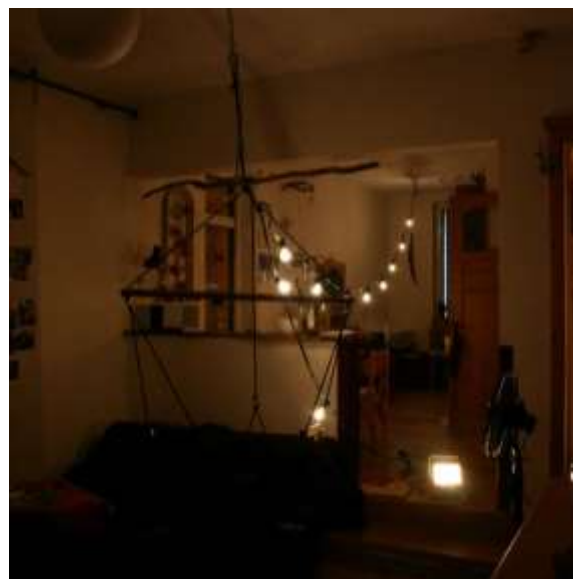
Der Wärmestrom durch die Bodenplatte wird primär durch die Dämmung der Bodenplatte bestimmt, weniger durch die Erdreicheigenschaften.

Das Temperaturprofil an der Gebäudekante hängt primär von den Erdreicheigenschaften ab. Ergo wird man über den Wärmestrom (und auch über die Mitteltemperatur unter der Bodenplatte) anhand einer Messung der Temperatur im zugänglichen Bereich kaum brauchbare Aussagen gewinnen können.

### 6.3 Bilder Reihendhaus



**Abbildung 83: Blick vom Wohnzimmer nach draußen: Auch bei geschlossener Jalousie dringt noch etwas Tageslicht ein.**



**Abbildung 84: Wohnzimmer bei eingeschalteter „Heizung“. Während des Co-Heatings war ein zusätzlicher 400 W Baustrahler in Betrieb.**





**Abbildung 85: Außen- und Innenansicht des WC-Fensters, welches von außen mit einer XPS-Platte, die mit einer Rettungsdecke bedeckt wird, lichtdicht verschlossen wurde.**



**Abbildung 86: Blick durch das Treppenhaus während der Messung bei eingeschalteter Lichterkette.**



© Passivhaus Institut

**Abbildung 87: Hochgenauer Stromzähler zur zeitaufgelösten Messung des Gesamtstromverbrauchs am Zählerkasten.**



© Passivhaus Institut

**Abbildung 88: Durchführung der Kabel der Wetterstation durch das Dachflächenfenster.**

## 6.4 Free Paper at Annex 58 Meeting, Prague, April 2015

### Determination of the heat loss coefficient (HLC) of a Passive House

Oliver Ottinger, Jürgen Schnieders, Wolfgang Hasper, Wolfgang Feist\*

Passive House Institute, Rheinstr. 44/46, 64283 Darmstadt, Germany

\* Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften der Universität Innsbruck

#### Abstract

The reduction of heat losses is a big issue in the context of reducing the energy demand in the building sector. The determination of the heat loss coefficient (HLC) by a measurement could be one way for quality assurance of the thermal envelope. In this paper the measurement sequence is described which was applied for a passive house. From the measured data the HLC of the passive house was determined using two different methods: the classical co-heating test (constant indoor temperature) and the QUB-method (Quick U-value for buildings developed by Isover). A comparison of the measured temperatures with results from dynamic simulations with DYNBIL showed a good agreement confirming that the planning data used in PHPP (Passive House Planning Package) is plausible. The comparison of the theoretical HLC from PHPP under the conditions of the measurement with the QUB test showed some deviations in the order of 20 % of the extracted value from PHPP. Whereas the HLC deduced from the co-heating test showed a nearly perfect agreement. It could be shown that both methods co-heating and QUB are applicable also for passive houses at least for thermally light ones.

#### Introduction

The thermal performance of a building determines the energy consumption of the building as well as the comfort for the residents. In the planning phase energy demand calculations are carried out in order to predict the consumption during the usage. The real energy consumption during lifetime is strongly influenced by the residents (actual indoor temperature, opening of windows, etc.). So the results of the realisation of the planning process is not directly accessible by consumption measurements. Nevertheless it can be of great interest to determine the heat loss coefficient (HLC), the measure for the quality of the thermal envelope. There are different static and dynamic methods available for HLC determination. If the method should be applied for quality assurance it has to be simple, precise and the required time has to be short.

The HLC measurement of a passive house has some peculiarities because of the drastically reduced heating demand going in parallel with an increased time constant of the building. A passive house has a maximal heating demand of 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) or respectively a maximal heating load of < 10 W/m<sup>2</sup>. The extremely high insulation level goes in line with a very low heat loss coefficient [W/K] of the building. Thus the question arises in how far measuring procedures like the static co-heating test and the dynamic QUB-method (Quick U-value of Buildings, developed by Isover [Pandraud2012]) are applicable. This was investigated by a measurement in a built Passive House and comparison of the results with the theoretically expected HLC and simulations of the temperature and humidity evaluation during the measurement using the dynamic building simulation software DYNBIL [Dynbil].



**Figure 1:** View from the back side of the building. It is a one story passive house with a floor area of 142 m<sup>2</sup> being located in Austria in the region “Salzkammergut”.

## Experimental

### Description of the test object

For the experiment a freestanding one story building with a floor area of 142 m<sup>2</sup> was chosen. Because of its round form the house, built in 2000, is also called Passive House Disc (s. Figure 1). The detailed floor plan is depicted in Figure 4. The certified passive house with a heating demand of 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) is situated in the region “Salzkammergut” in Austria. It is a wooden construction with a highly insulated envelope (38 cm walls, 30 cm floor slab, 48 cm roof insulation with a thermal conductivity of 0,04 W/mK). The building is heated with a heat pump compact unit, working with heat recovery. The air tightness with a value of  $n_{50} = 0,4 \text{ h}^{-1}$  is very good, so infiltration heat losses are expected to be small. For planning and energy demand calculations the Passive House Planning Package (PHPP) [PHPP2013] was used.

## Expected HLC from planning with PHPP (Passive House Planning Package)

The heat loss coefficient is defined as the heat loss in [W] per temperature difference between inside and outside temperature. So it is well defined as long as there is no other temperature level like a basement, a neighbor or the soil which is the case here. The standardized definition of the HLC in EN 12831 refers to standardized indoor and outdoor temperatures and also provides definitions for other temperature zones. Those temperature levels may be good assumptions for annual mean temperatures but in most cases the temperature levels during the measurement will be different. Because the definition of the HLC is relative to the temperature difference this is no problem as long as there are only two temperature levels (inside and outside). If there is a third one different from the others, there is a deviation between the standardized HLC and that expected from measurement. So in the following with HLC the Heat loss referred to the actual temperatures during measurement is meant. Only with a recalculation to the standardized temperatures a comparison with the standardized HLC is possible.

To calculate the expected theoretical HLC the UA values of areas adjoining to other temperature levels have to be corrected. For the considered building this is only the case for the floor slab and the corresponding soil temperature. The correction factor includes the actual indoor temperature  $T_i$ , the outdoor temperature  $T_e$  and the temperature in the adjacent zone  $T_x$ . The correction factor  $f$  is then given by

$$f = \frac{T_i - T_x}{T_i - T_e}$$

This has some consequences: first the HLC defined like this is not a constant but depends on the different temperatures which can be different for different measurements. The other consequence is that since at least the outdoor temperature is varying with time the HLC is time depending. Only for short measurement periods the temperatures can be assumed to be constant and mean temperatures can be used for HLC evaluation.

During the measurement the outdoor conditions were very good, since the outdoor temperature was quite constant around 3 °C. With the correction factor  $f$  the heat flow to the ground was recalculated with a soil temperature of 12.3 °C. The latter is the result of a PHPP calculation for an indoor temperature of 18.5 °C (indoor temperature at the beginning of the measurement). The result is an effective heat loss coefficient for the floor slab and the thermal bridge of the perimeter of 10.1 W/K. Together with the sum of all other UA-values and considering the closed roller blinds during the measurement period the transmission heat loss coefficient turns out to be 55.4 W/K. Besides the transmission heat losses there are also losses by ventilation. During the experi-

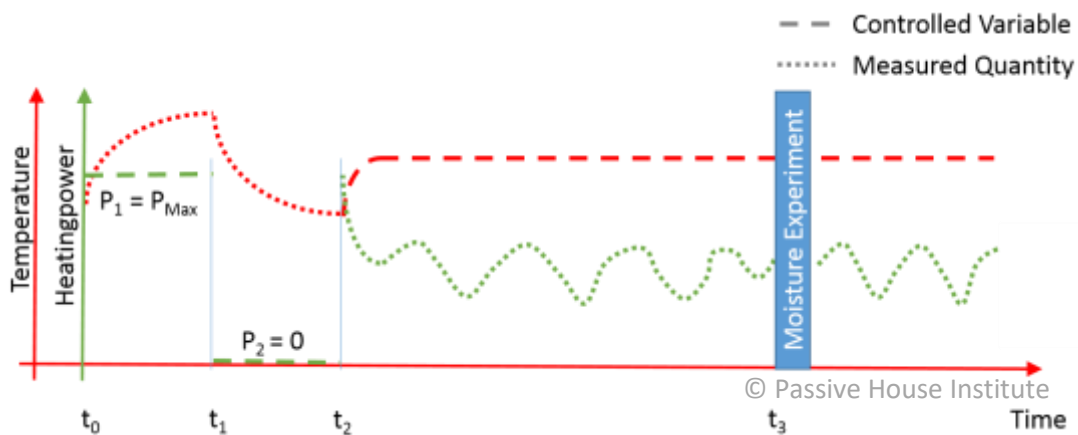


ment the fresh air and exhaust air ducts were sealed so only infiltration has to be considered. As estimation the infiltration volume flow was taken from the PHPP ventilation sheet. This results in a ventilation heat loss coefficient of 4.6 W/K.

The total theoretical HLC of the building consisting of transmission and ventilation fractions is 60.0 W/K. The error for this value was estimated to be approximately 2 W/K assuming that the planning details are correctly implemented into the PHPP [Feist2001].

## Experimental setup

The experiment comprised three phases: It started with the operation of the QUB-test (QUB = Quick U-value of Buildings, developed by Pandraud et al. [Pandraud2012]) meaning a phase of constant heating power for 24 hours ( $t_0$  to  $t_1$ ) and afterwards for the same time a cooling period ( $t_1$  to  $t_2$ ). Secondly the classical method for determination of heat losses, the co-heating test, was applied with a constant temperature from  $t_2$  on. At the end a moisture experiment under co-heating conditions was conducted in order to learn more about the moisture dynamics. Therefore at  $t = t_3$  water was evaporated for several hours and the evolution of indoor humidity was monitored whereat after one day the ventilation was switched on.



**Figure 2: Monitoring program: QUB test with heating and cooling phase ( $t_0 - t_1 - t_2$ ) where the heating power was set as constant in each phase. At  $t_2$  a co-heating phase started (constant temperature) interrupted by a moisture experiment.**

The experiment took place from 1.12.2014 until 15.12.2014 at the passive house disc in Austria. Before this period the building was not in use for more than one week. During this time the ventilation unit and heating were running. In each zone there was a decentralized Arduino based control unit (s. Figure 3 left). Each unit read out a surface and an air temperature sensor and the relative humidity with an interval of 10 s. The surface temperature was used as control measure during the co-heating experiment. This has the advantage that there is a more direct coupling between the control size



and the mean building temperature then if the air temperature is used. The sensors were calibrated in a water bath with a highly accurate sensor. From the corrected data 10 minute mean values were calculated for further processing.

As heating system chains of light bulbs were used, having the advantage to bring in heat well distributed over the room and that the heating power can be easily adopted. The total installed power was 3400 W. For a more constant temperature between the zones fans were installed to ensure high air exchange rates between the rooms. Positions of fans and sensors are marked in Figure 4. In order to minimize solar gains all roller blinds were closed during the whole measurement period.

At the roof of the building a temporary weather station (s. Figure 3 right) was installed measuring mainly temperature and relative humidity but also, as additional information, the global radiation as well as the long wave radiation balance with an interval of 10 minutes. The mean outdoor temperature during the measurement was 2.9 °C and had minimal and maximal values of -1.7 °C and 12.1 °C respectively. During the first half of the measurement most times it was quite cloudy, partly with drizzle. Only in the second half of the experiment from the 10<sup>th</sup> on there was direct solar radiation. This is the reason for the higher daily temperature amplitude during that time.



**Figure 3** Decentralized control unit with sensors and switch for heater (left). Weather station on the roof of the building, with view on the surroundings.

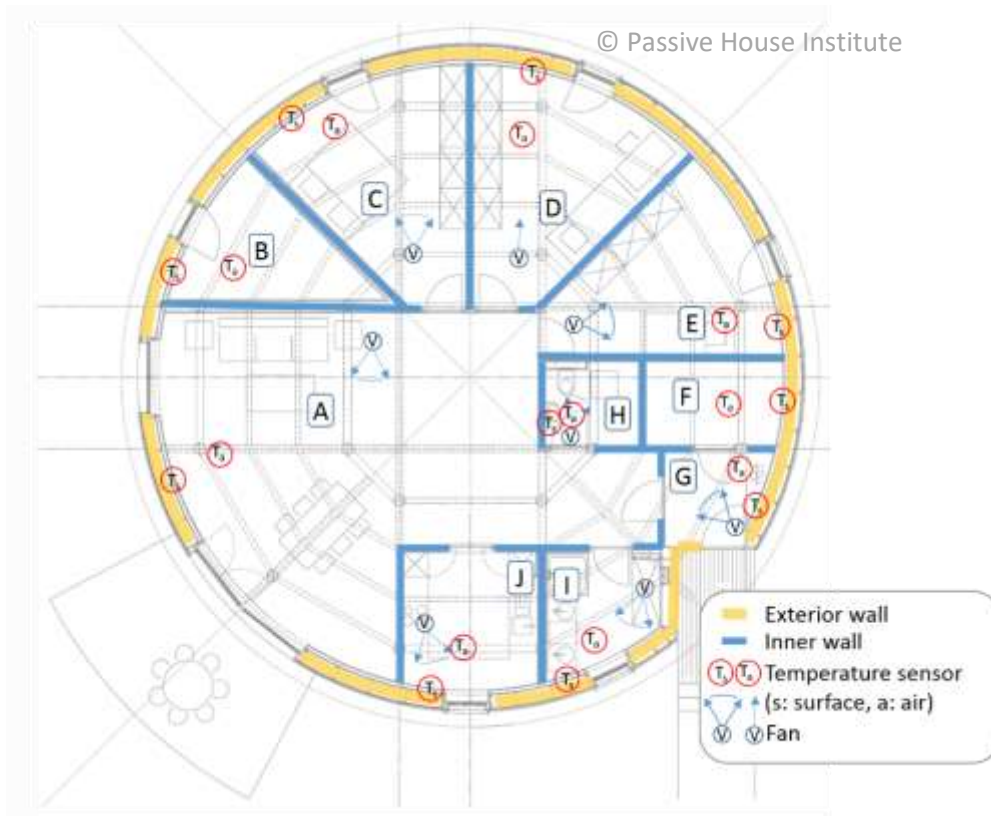
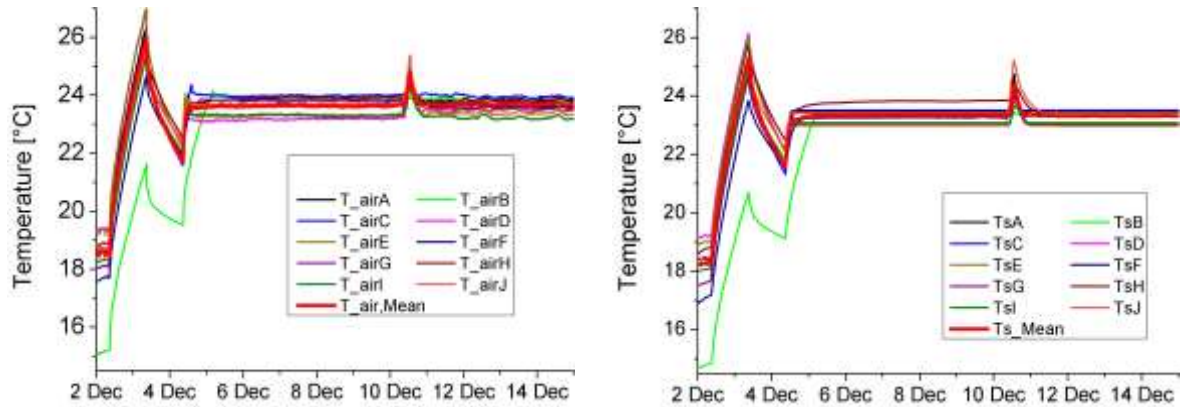


Figure 4: Floor plan with marked positions of temperature sensors (index s: surface temperature index a: air temperature) and fans and their current direction (if existing their range of rotation).



Figure 5: Measured outdoor temperature during measurement period.



**Figure 6:** Evolution of the air temperature in the different zones (A-J) at the left and that of the surface temperatures (right). The area weighted mean temperatures are plotted in red for both temperatures as well. The room B (green) is a separated storage room that was unheated before the measurement started.

## Results

The measured 10 minute mean temperature values are plotted in Figure 6 together with the area weighted mean temperature. In general the calculation of the mean building temperature should be weighted with the heat losses. But since this is the quantity that should be determined by the measurement this seems not recommendable. In this special case of a one story building the difference of weighting with the room area and with the heat loss per room is very small. The temperature profiles go in line with each other as expected from experimental design. The deviations between the different rooms are less than 1 K. Only the storage room B that was not heated before the measurement started is about 3 K colder than the others. It reached the temperature of the other rooms approximately at the third day of the measurement. So mainly the QUB phase is influenced by this fact. But since for the evaluation of the QUB test mainly the temperature gradient is taken into account the usage of the mean temperature of the evaluation seems reasonable.

The temperature rise during the heating phase of the QUB-test is about 7 K. The subsequent decrease when the heating is switched off is about 4.3 K respectively 4 K for the air and the surface temperatures only. The constant set temperature for the co-heating phase is reached very quickly within less than one day with the exception of room B (storage room). On December 10th a second temperature peak is visible since for the evaporation of water additional heat was released.

The electrical power consumption within the building was measured with a highly accurate power meter. In Figure 7 the measured electrical power consumed within the building is shown. The heating phase started on December 2nd at 9 a.m. and ended on December 3<sup>rd</sup>. At the same time. It is obvious that there is a deviation of nearly 400 W between the intended heating power indicated by the red line and the measured

value. The difference is the background consumption of fans, measurement equipment and fridge, for example. Since no persons were inside the building and the regular heating was switched off no other internal heat gains prevailed during the measurement. Since the measured temperatures showed very little daily variations it seems reasonable to neglect the influence of solar gains.

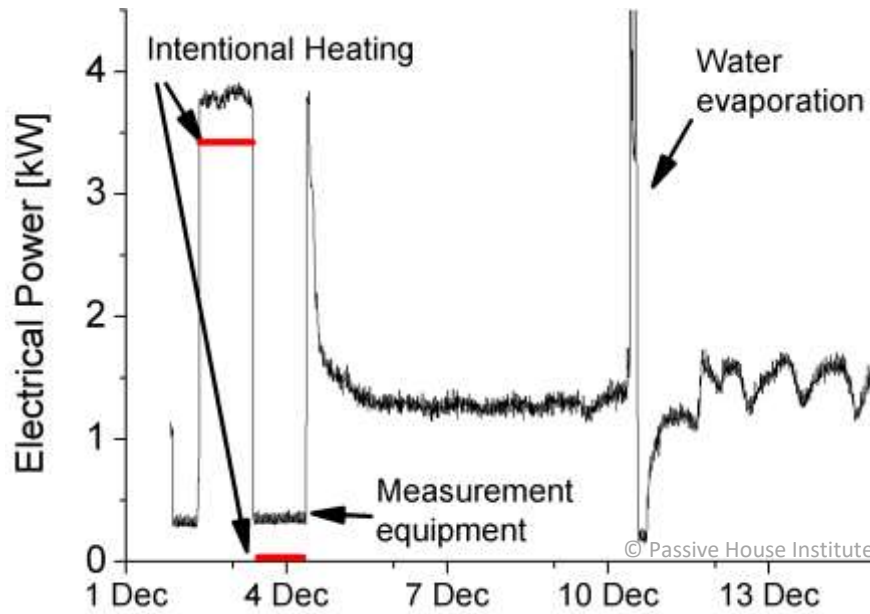
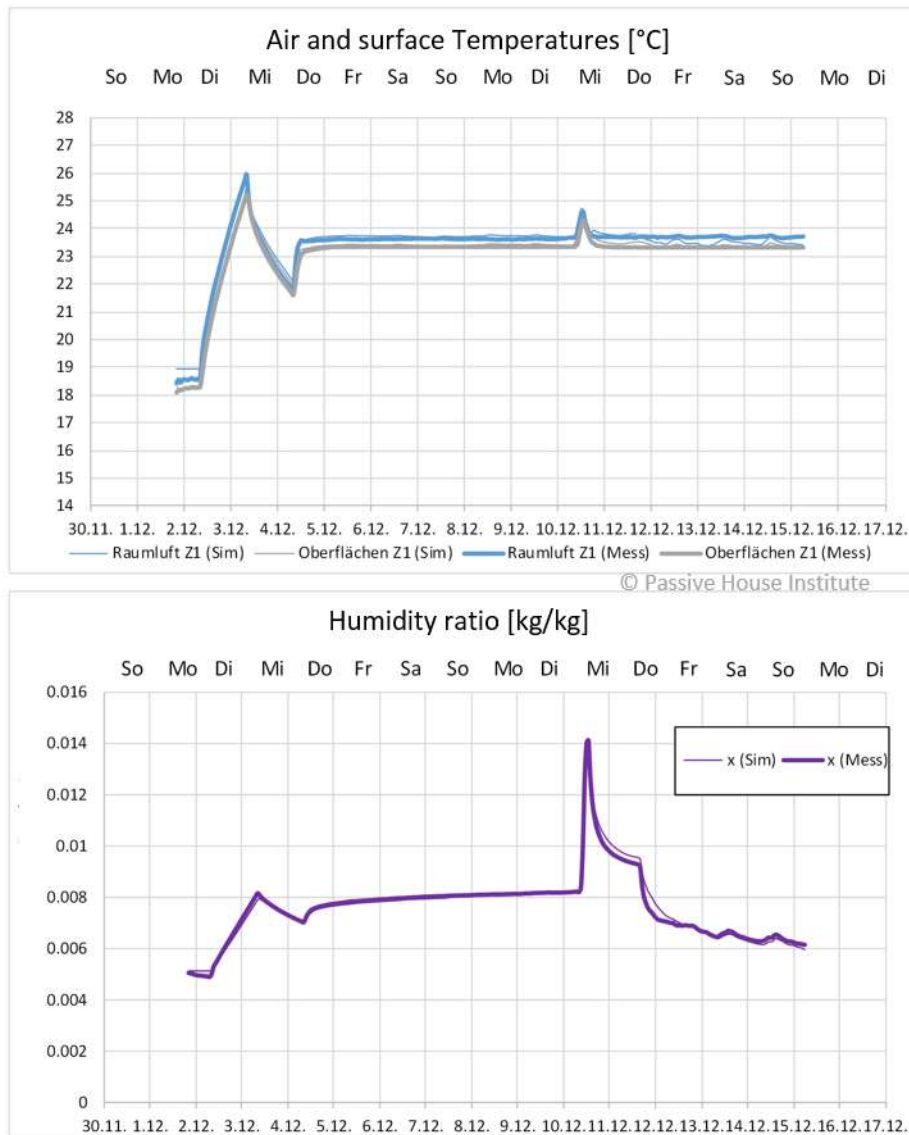


Figure 7: Total electrical power consumption during the measurement.

## Discussion

### Comparison with simulations

A comparison of the measured temperature data with a simulation using the dynamic simulation program DYNBIL, developed by Feist et al. [Feist1994] is shown in Figure 8. The model was built based on the information of the PHPP from this building. The measured total heating power was supplied to the model. The resulting temperatures show very good agreement during the QUB phase and only a small long-term drift. The drift may result from differences in ground temperature and from infiltration being lower than calculated. Nevertheless the maximal deviation is below 0.5 K after more than 10 days. The temperature decay in the simulation, with the same heating power as in the measurement, indicates a slightly lower HLC in reality compared to the planning.

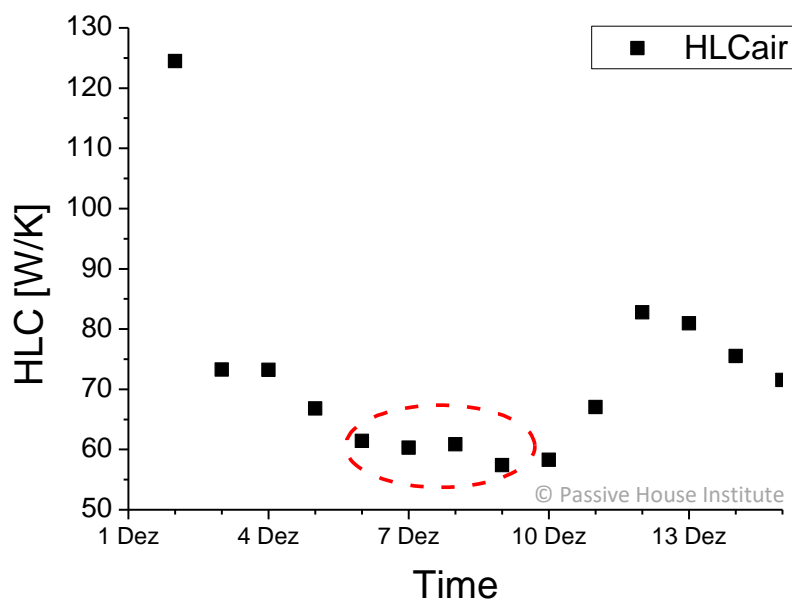


**Figure 8:** Measured mean surface temperature and calculated surface temperature in comparison with simulated ones (top). For simulations the measured heating power was used. Measured and calculated humidity ratio in comparison. In the simulation the measured amount of evaporated water was used.

Also the calculated humidity is in acceptable agreement with the measured data (s. Figure 6). Again, there is a general drift, possibly due to lower infiltration than expected. The decay directly after the humidification peak on the second Wednesday of the measurement period shows differences in the shape of the humidity decline. Reasons for this are differences between the actual and assumed moisture transport and storage properties of the inner surfaces. Here the large amount of wooden parts plays a big role because the detailed properties are not well known. Since the influence of moisture dynamics on the heat loss coefficients is quite small it will not be further discussed here.

## Evaluation of co-Heating test

During the co-heating test the building was held at a constant temperature. This has the advantage that, if the variation of the outdoor temperature is comparatively small to the temperature difference between inside and outside, the building is in a (quasi) static state. So capacitive effects causing heat fluxes by charging or discharging the capacities are negligible. With the closed roller blinds the solar gains are negligible, so the HLC results directly from the average heating power divided by the average temperature difference. The daily averages of temperature differences between inside and outside  $\Delta T$  and daily mean Power  $Q$  [W] were determined from measured data. Out of this daily values for the heat loss coefficient HLC [W/K] were calculated as depicted in Figure 9.



**Figure 9** Mean heat loss per day from measured temperature differences between inside and outside and the mean power over a day. The marked points are those used for the co-heating test evaluation in Figure 10.

At the 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> of December the QUB-test was performed meaning that those days should not be evaluated in terms of co-heating test. Afterwards the building was heated up to a constant temperature of 24 °C. As expected during this heating phase an increased HLC is measured because of capacitive effects (Figure 9). When the constant temperature is reached the expected co-heating conditions are present – so this data is very suitable for evaluation. On December 10<sup>th</sup> the moisture experiment started so the following days are influenced by sorption and desorption processes and from December 12<sup>th</sup> on also by the running ventilation system. As consequence only the values



from very well suitable days were evaluated as marked in Figure 9. They seem to have a more or less static value, also with respect to the outdoor temperature development. Since during this time the roller blinds were closed and additionally the sky was very cloudy no solar gains were taken into account. The resulting HLC is 59.9 W/K, being very close to the theoretical value determined from PHPP.

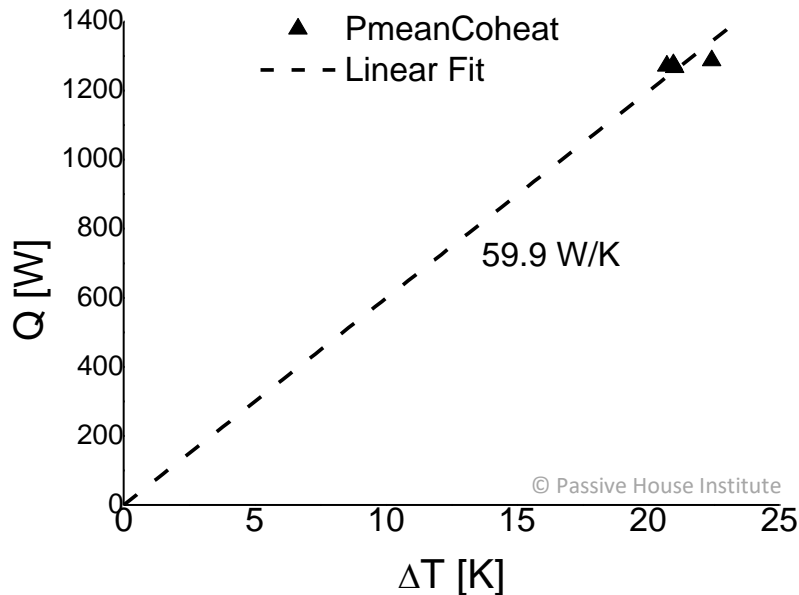


Figure 10: Mean heating power over a day is plotted against the temperature difference between inside and outside  $\Delta T$ . The linear fit through the origin shows a gradient of 59.9 W/K.

## Evaluation of QUB method

The QUB method developed and tested by Isover was applied in the first phase of the measurement. For the HLC determination it is assumed that the thermal behaviour of the building can be described by a RC-circuit. During a heating and a cooling phase the indoor temperature rises/drops exponentially. The outdoor temperature is assumed to be constant. Linearizing the function of the indoor temperature it is possible to determine the resistance  $R = 1/\text{HLC}$  only from the gradients of the indoor temperatures during heating and cooling phase  $\alpha_h$  and  $\alpha_c$ , the heating power  $P$  and the initial temperature differences between inside and outside  $\Delta T_h$  and  $\Delta T_c$ . A constant power of  $P \sim 3800$  W was applied between 9.00 am of the second day and 9.00 am of the third day followed by 24 hours of no intentional heating (heat input only by measurement equipment).

Having a closer look on the heating power (s. Figure 7) during the QUB procedure it becomes obvious that the actual total electrical consumption was larger than the intentional heating power. This may be caused by appliances that could not be switched off (fridge etc.) but also the measurement equipment (fans, switch etc.) has a contribution. There was a constant heating power of around 350 W. During the heating phase the intentional heating as well as the constant offset heating power have to be taken into account. In the cooling phase now the heating power is not zero anymore and according to [Pandraud2014] the HLC is determined as

$$HLC = \frac{P_c \alpha_h - P_h \alpha_c}{\Delta T_0^c \alpha_h - \Delta T_0^h \alpha_c}.$$

The indices  $h$  and  $c$  stand for heating and cooling phase. With this formula a HLC of 73.0 W/K results from the slopes indicated in Figure 11. [Pandraud2012] says that a too large heating power causing an asymmetric temperature increase and decrease, causes an overestimation of the HLC. Still the deviation of about 20 % really seems to be a lot here. Another reason for an overestimated HLC could be the room B having a lower temperature at the beginning of the experiment which results in a steeper gradient during heating phase and a lower one during cooling phase.

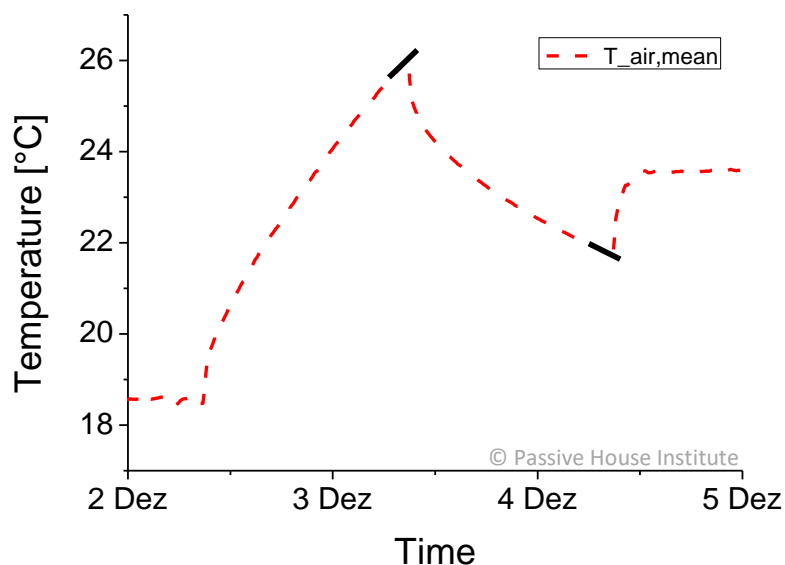


Figure 11: Indoor air temperature during the QUB-test and the used derivatives for determination of the HLC.

## Summary

A measurement in a passive house was performed consisting out of 2 day for QUB test followed by 5 days of co-heating to an increase temperature of 24 °C and afterwards a 1 week moisture experiment. The results from the moisture experiment will be discussed elsewhere. The theoretical HLC of the building under measurement conditions deduced from the PHPP data was 60.0 W/K. Evaluating the suitable data from the co-heating period a HLC of 59,9 W/K resulted. From the QUB method a value of 73 W/K was deduced. Differences can partly be explained by the influence of a separated room with a start temperature about 2 K below the other rooms. Also the asymmetric indoor temperatures during heating and cooling are a reason for an overestimation of the HLC [Pandraud2014]. Never the less it was possible to determine the HLC with the QUB method within 48 hours whereas the co heating test took nearly 150 hours.

Methode	HLC [W/K]
Theoretically (PHPP)	60.0
Co-Heating	59.9
QUB ( $P_2=350$ W)	73.0

**Table 1: Comparison of theoretical and measured heat loss coefficients (HLC).**

For this thermally very light building good concordance between co-heating & theory (PHPP data) as well as simulations could be achieved. Closing the roller blinds seemed to be very helpful for this case since solar gains strongly contribute to heat loads in passive houses. An improvement of the QUB test could be achieved by pre heating of all rooms to an equilibrated start temperature [Passiv2016]. In total it could be shown that the HLC of passive houses can be measured within some days with both methods within some days. Nevertheless it should be noted that the considered building was very light and outdoor conditions were very good, providing low and constant temperatures and only little solar radiation.

## Acknowledgements

We thank Günter Lang for having the opportunity to measure in his house and Guillaume Pandraud for helpful discussions. Thanks to the German Federal Ministry of Economics and Technology represented by the PTJ for financial support within the framework of the IEA EBC Annex 58 (Förderkennzeichen 03ET1144C).

## Literature

- [DYNBIL] Feist, W.; Dynamische Wärmebilanzen mit dem Programm „DYNBIL“, Universität Tübingen, 1981.
- [Feist1993] Feist, W.; Thermische Gebäudesimulation: kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. 1. Aufl., Heidelberg, C. F. Müller 1994.
- [Feist2001] Feist, W.; Stellungnahme zur Vornorm DIN V 4108 Teil 6:2001 aus Sicht der Passivhausentwicklung, CEPHEUS Projektinformationen Nr. 39, Passivhaus Institut, 2001.
- [Passiv2016] A detailed report evaluating results for a second measurement at a massive building will be available at [www.passive.de](http://www.passive.de) in May 2016.
- [Pandraud2012] Pandraud, G. et al.; Quick measurements of energy efficiency of buildings, C. R. Physique 13, 383, 2012.
- [Pandraud2014] Pandraud, G. et al.; Experimental optimization of the QUB method, IEA ECBCS Annex 58 Free paper, 2014.
- [PHPP2013] Feist, W.; Passivhaus Projektierungs-Paket PHPP, Version 8, Das Energiebilanzierungs- und Passivhaus-Planungstool für qualitätsgeprüfte Passivhäuser und EnerPHit-Modernisierungen, Passivhaus Institut, 2013.