

# Endbericht

## FFG-Forschungsprojekt BIGCONAIR

Projektteil:

Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen

Bauphysik, Messung, Simulation

Dietmar Siegele, Norbert Hauer, Fabian Ochs, Wolfgang Streicher

April 2015



**FFG**

Österreichische  
Forschungsförderungsgesellschaft

<b>Projektlangtitel:</b>	Baubiologische Containerentwicklung	<b>Akronym:</b>	BIGCONAIR
<b>Projektlaufzeit:</b>	01.09.2012- 28.02.2015	<b>Projektnummer:</b>	FFG/836468
<b>Projektleitung:</b>	Univ.-Prof. DDI Michael Flach		



# INHALT

---

1	Zusammenfassung .....	5
2	AP 2 - Voruntersuchungen und bauliche Umsetzung .....	6
2.1	Bauphysikalische Beratung .....	6
2.2	Thermische und hygrothermische Bauteilsimulationen .....	6
2.2.1	Einleitung .....	6
2.2.2	Massivholzbauweise .....	6
2.2.3	Holz-Lehm-Rahmenbauweise .....	9
2.2.4	Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden .....	13
3	AP 3 - Messungen und Auswertung .....	15
3.1	Laborversuche - Bestimmung der Materialparameter .....	15
3.1.1	Feuchtespeicherfunktion des Lehms .....	15
3.1.2	Wasserdampfdiffusionswiderstand des Lehms .....	19
3.2	Messkonzept Container .....	22
3.2.1	Einleitung .....	22
3.2.2	Messgrößen .....	22
3.2.3	Datenaufzeichnung .....	26
3.2.4	Einmalige Messungen .....	27
3.2.5	Ergänzungen während der Projektlaufzeit .....	27
3.2.6	Verwendete Messgeräte .....	28
3.3	Messauswertung Container .....	29
3.3.1	Einleitung .....	29
3.3.2	Kalibriermessung Volumenstrom .....	30
3.3.3	Messungen Holz-Lehm-Rahmenbauweise .....	31
3.3.4	Messungen Massivholzbauweise .....	38
3.3.5	Messungen Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden .....	44
4	AP 4 - Simulationen und Optimierung .....	45
4.1	Simulationsprogramme .....	45



4.1.1	Matlab/Simulink mit der Toolbox CARNOT .....	45
4.1.2	Dynbil .....	46
4.1.3	TRNSYS .....	48
4.1.4	PHPP .....	48
4.1.5	Delphin .....	48
4.2	Simulationsobjekte.....	48
4.2.1	Container in Massivholzbauweise .....	48
4.2.2	Holz-Lehm-Rahmenbauweise .....	50
4.2.3	Referenzcontainer .....	51
4.2.4	Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden .....	52
4.3	Wetterdaten .....	52
4.4	Validierung des Simulationsmodells mit Messdaten.....	53
4.4.1	Validierung des hygrothermischen Modells .....	53
4.4.2	Validierung des Simulationsmodells der Container .....	58
4.5	Cross-Validierung des Simulationsmodells .....	67
4.5.1	Einleitung .....	67
4.5.2	Massivholzvariante .....	67
4.5.3	Holz-Rahmenbauweise .....	77
4.5.4	Feuchtigkeit .....	86
4.6	Untersuchung der Behaglichkeit .....	88
4.6.1	Einleitung .....	88
4.6.2	Beurteilung .....	88
4.6.3	Luftwechselrate für Sommerlüftung für die Behaglichkeitsuntersuchung.....	90
4.6.4	Variante Massivholz.....	91
4.6.5	Variante Holz-Rahmenbau.....	101
4.7	Vergleich mit Referenzcontainer .....	112
4.7.1	Einleitung .....	112
4.7.2	Behaglichkeit .....	113
4.7.3	Einfluss der Kapazität .....	117



4.8	Auswirkung der Lehmschicht auf die Feuchtepufferung .....	122
4.8.1	Vergleich unterschiedlicher Putze .....	122
4.8.2	Vergleich unterschiedlicher Lehmschichtdicken .....	123
5	Literaturverzeichnis .....	125
Anhang	.....	127



# 1 ZUSAMMENFASSUNG

---



## 2 AP 2 - VORUNTERSUCHUNGEN UND BAULICHE UMSETZUNG

---

### 2.1 BAUPHYSIKALISCHE BERATUNG

Die bauphysikalische Beratung der beteiligten Firmen wurde zusammen mit dem AB Holzbau durchgeführt. Die Materialmessungen aus AP 3 und die Simulationen aus AP 4 dienten unterstützend als Ausgangsmaterial hierfür. Die Ergebnisse sind den einzelnen Arbeitspaketen zu entnehmen. Zusätzlich wurden thermische und hygrothermische Bauteilsimulationen (vgl. Kapitel 2.2) durchgeführt.

### 2.2 THERMISCHE UND HYGROTHERMISCHE BAUTEILSIMULATIONEN

#### 2.2.1 Einleitung

Für die Beratung der Baufirmen über die Ausführung von Konstruktionsdetails wurden thermische und hygrothermische Bauteilsimulationen mit Delphin 5 durchgeführt. Diese Simulationsergebnisse wurden zudem weiterverwendet, um in den Simulationen die Wärmebrücken berücksichtigen zu können.

#### 2.2.2 Massivholzbauweise

Im Folgenden sind die Berechnungen und Ergebnisse für den Container in Massivholzbauweise dargestellt. Mit den vorgeschlagenen und ausgeführten Bauteilen sind keine bauphysikalischen Probleme zu erwarten.

#### Wandaufbau\*

Schicht	Teilfläche 1 90%		Teilfläche 2 10%		Dicke [mm]	
	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Material	$\lambda$ [W/(m K)]		
1	Massivholz	0,13			96	
2	Hanf	0,04	Fichte	0,13	120	
3	Hanf	0,04	Fichte	0,13	120	
4	Fichte	0,13			25	
					Rsi	0,13
					Rse	0,04

### Dachaufbau\*

	Teilfläche 1 90%		Teilfläche 2 10%		
Schicht	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Dicke [mm]
1	Massivholz	0,13			96
2	Hanf	0,04	Fichte	0,13	120
3	Hanf	0,04	Fichte	0,13	120
4	Fichte	0,13			25

Rsi	0,10
Rse	0,04

### Bodenaufbau\*

	Teilfläche 1 82%		Teilfläche 2 10%		Teilfläche 3 8%		
Schicht	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Material	$\lambda$ [W/(m K)]			Dicke [mm]
1	Fichte	0,13					25
2	DWS	0,046			Fichte	0,13	40
3	Massivholz z	0,13					96
4	Hanf	0,04	Fichte	0,13			100
5	Hanf	0,04	Fichte	0,13			100
6	Fichte	0,13					25

Rsi	0,17
Rse	0,04

\* Die Folien werden nicht berücksichtigt, weil ihre Einfluss auf die Berechnungsergebnisse vernachlässigbar ist

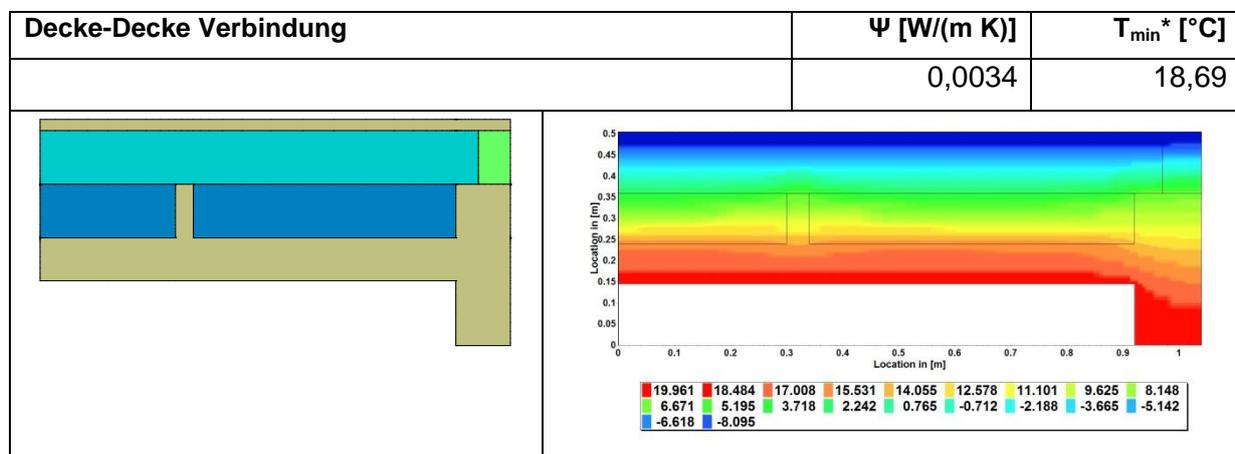


Abbildung 2.1 Schnitt Decke - Decke

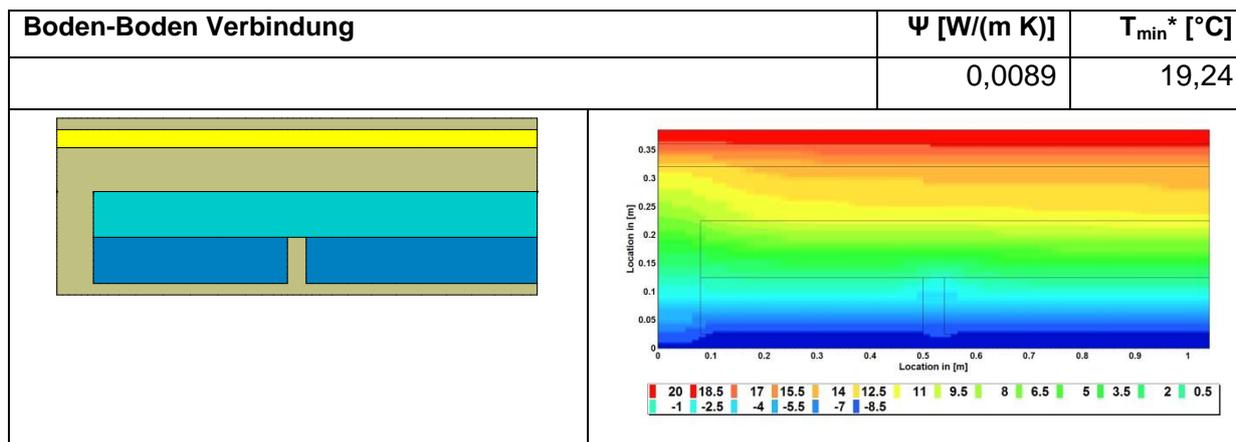


Abbildung 2.2 Schnitt Boden - Boden

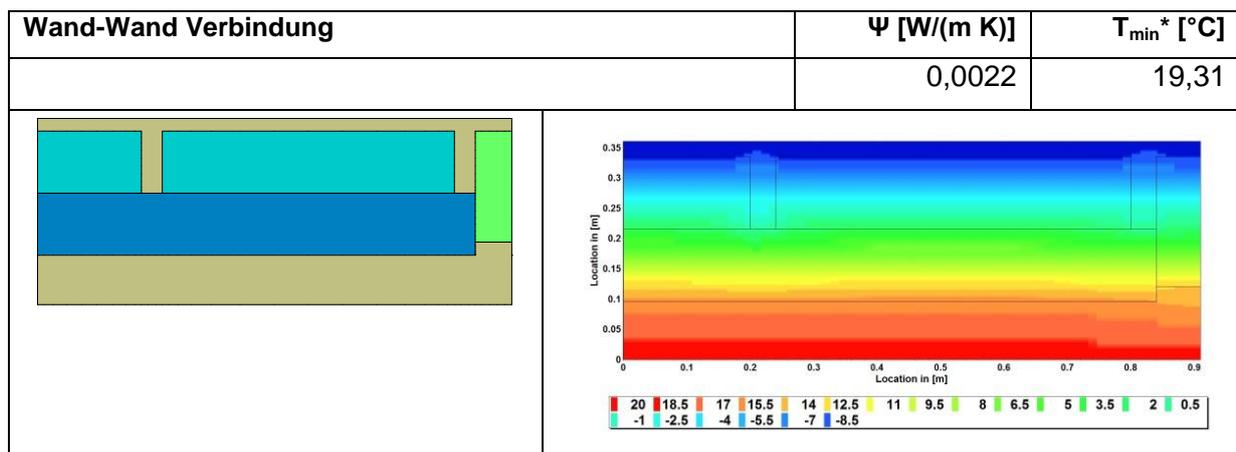


Abbildung 2.3 Schnitt Wand - Wand

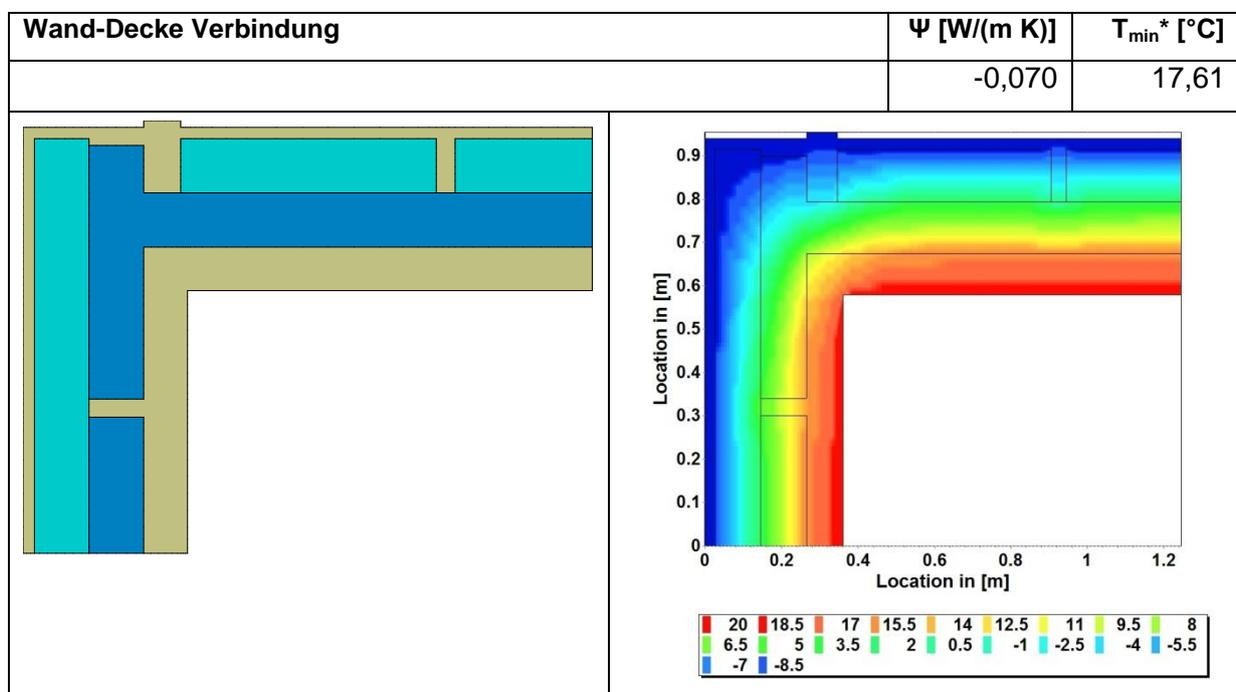


Abbildung 2.4 Schnitt Wand - Decke

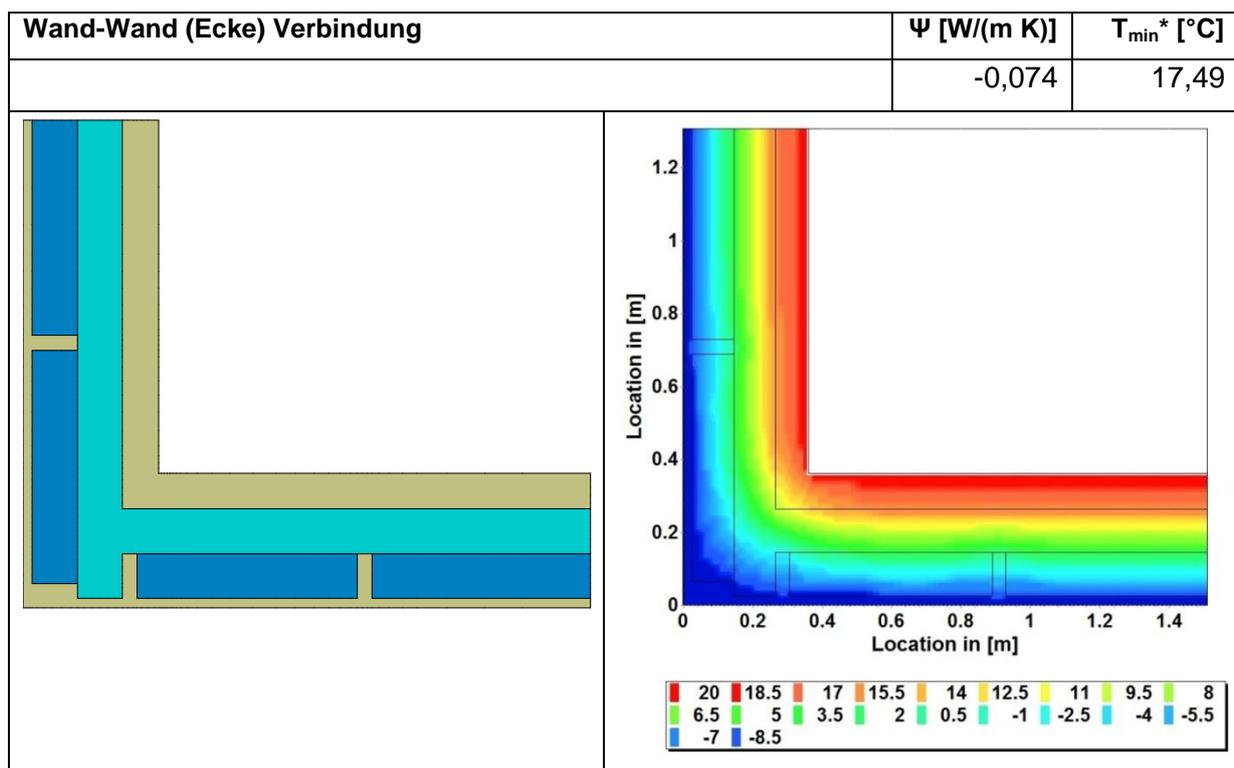


Abbildung 2.5 Schnitt Wand - Wand

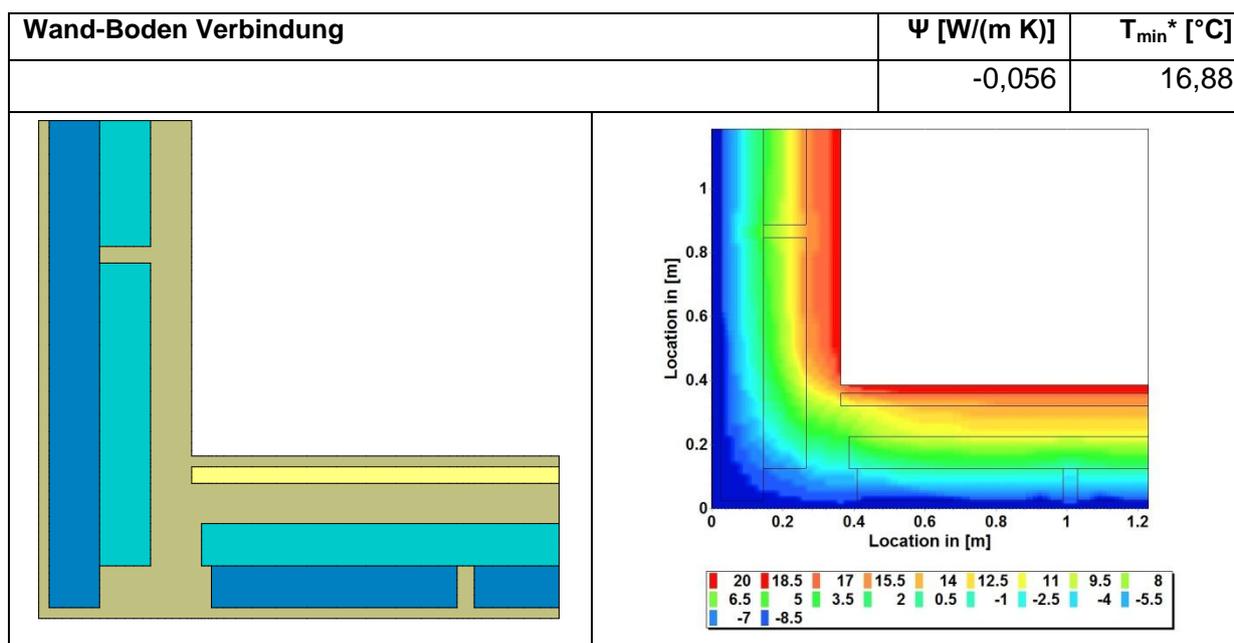


Abbildung 2.6 Schnitt Wand - Boden

\*Minimal Temperatur an der inneren Oberfläche

### 2.2.3 Holz-Lehm-Rahmenbauweise

Im Folgenden sind die Berechnungen und Ergebnisse für den Container in Holz-Lehm-Rahmenbauweise dargestellt. Mit den vorgeschlagenen und ausgeführten Bauteilen sind keine bauphysikalischen Probleme zu erwarten.



### Wandaufbau\*

	Teilfläche 1 90%		Teilfläche 2 10%			
Schicht	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Dicke [mm]	
1	Lehm	0,500			10	
2	Lehm	1,400	Holzfaser	0,05	8	
3	Lehm	0,035	Fichte	0,13	40	
4	Wolle	2,300	Fichte	0,13	60	
5	Holz	0,035			22	
6	Hanf		Fichte	0,13	100	
7	Hanf		Fichte	0,13	100	
					Rsi	0,13
					Rse	0,04

### Dachaufbau\*

	Teilfläche 1 90%		Teilfläche 2 10%			
Schicht	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Dicke [mm]	
1	Lehm	0,7			10	
2	Lehm	0,7	Holzfaser	0,05	8	
3	Lehm	0,7	Fichte	0,13	40	
4	Wolle	0,046	Fichte	0,13	60	
5	Fichte	0,13			24	
6	Hanf	0,04	Fichte	0,13	100	
7	Hanf	0,04	Fichte	0,13	100	
8	Fichte	0,13			25	
					Rsi	0,10
					Rse	0,04

### Bodenaufbau\*

	Teilfläche 1 82%		Teilfläche 2 10%		Teilfläche 3 8%			
Schicht	Material	$\lambda$ [W/(m K)]	Material	$\lambda$ [W/(m K)]			Dicke [mm]	
1	Fichte	0,13					25	
2	Mineralwolle	0,046			Fichte	0,13	40	
3	Hanf	0,04	Fichte	0,13			100	
4	Fichte	0,13					60	
5	Hanf	0,04	Fichte	0,13			100	
6	Fichte	0,13					25	
							Rsi	0,17
							Rse	0,04

\* Die Folien werden nicht berücksichtigt, weil ihre Einfluss auf die Berechnungsergebnisse vernachlässigbar ist

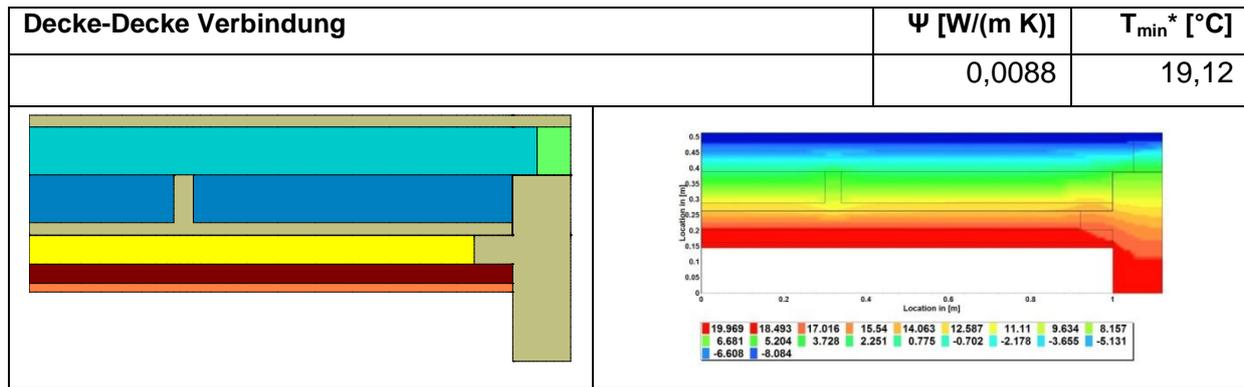


Abbildung 2.7 Schnitt Decke - Decke

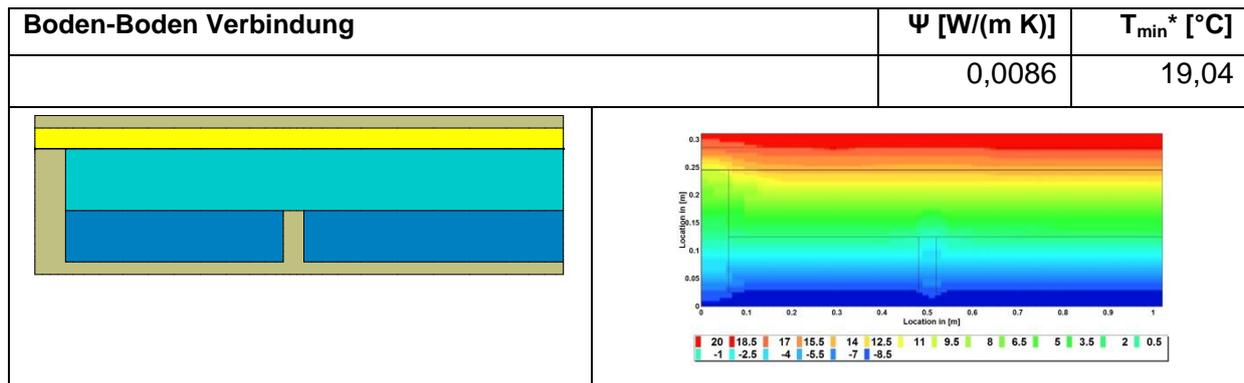


Abbildung 2.8 Schnitt Boden - Boden

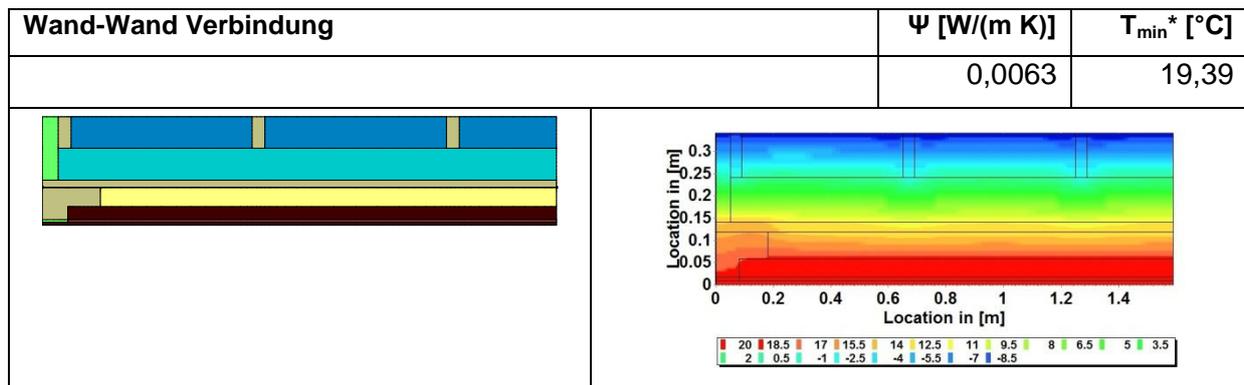


Abbildung 2.9 Schnitt Wand - Wand

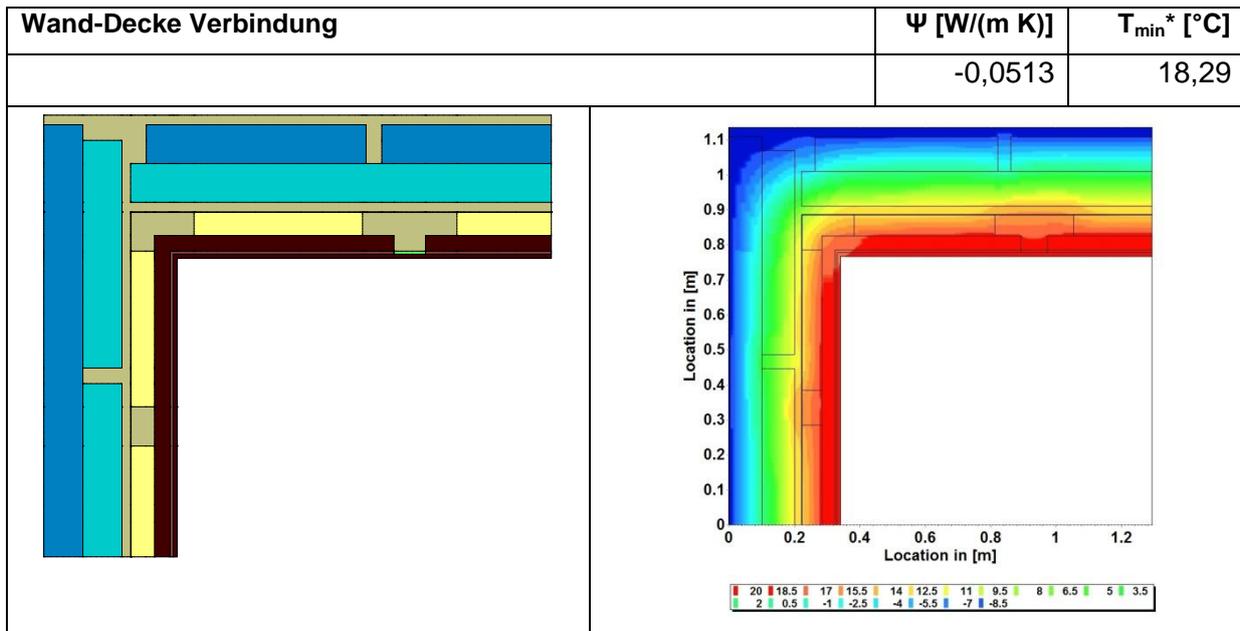


Abbildung 2.10 Schnitt Wand - Decke

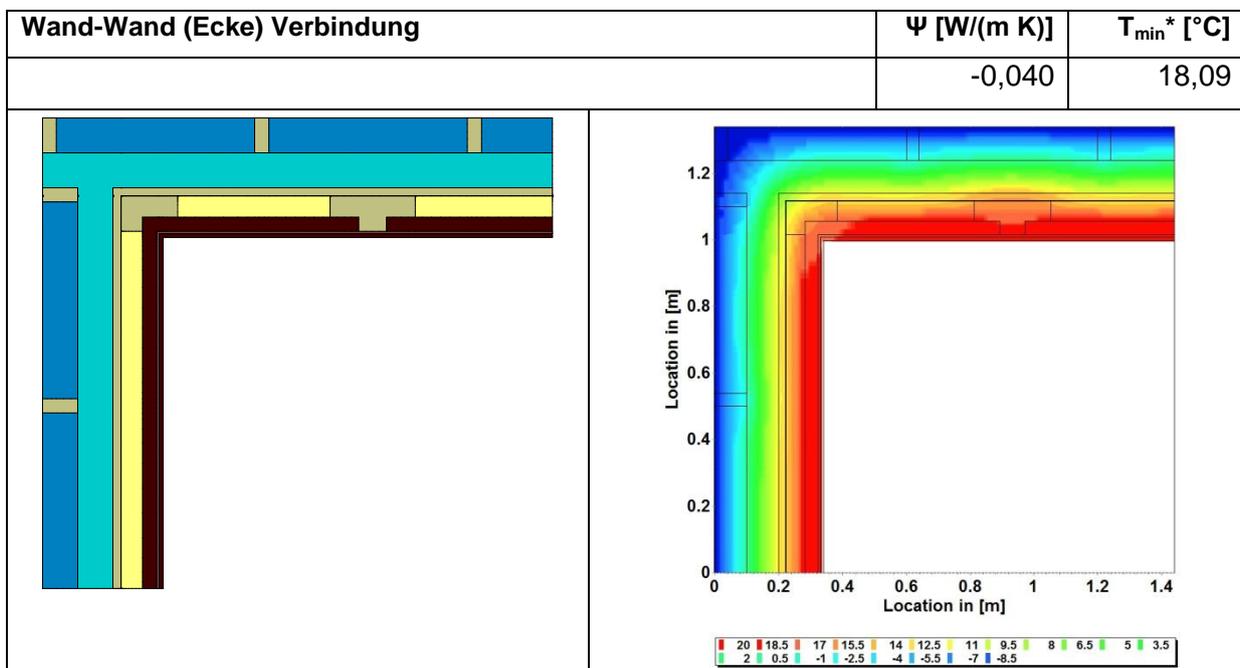


Abbildung 2.11 Schnitt Wand – Wand

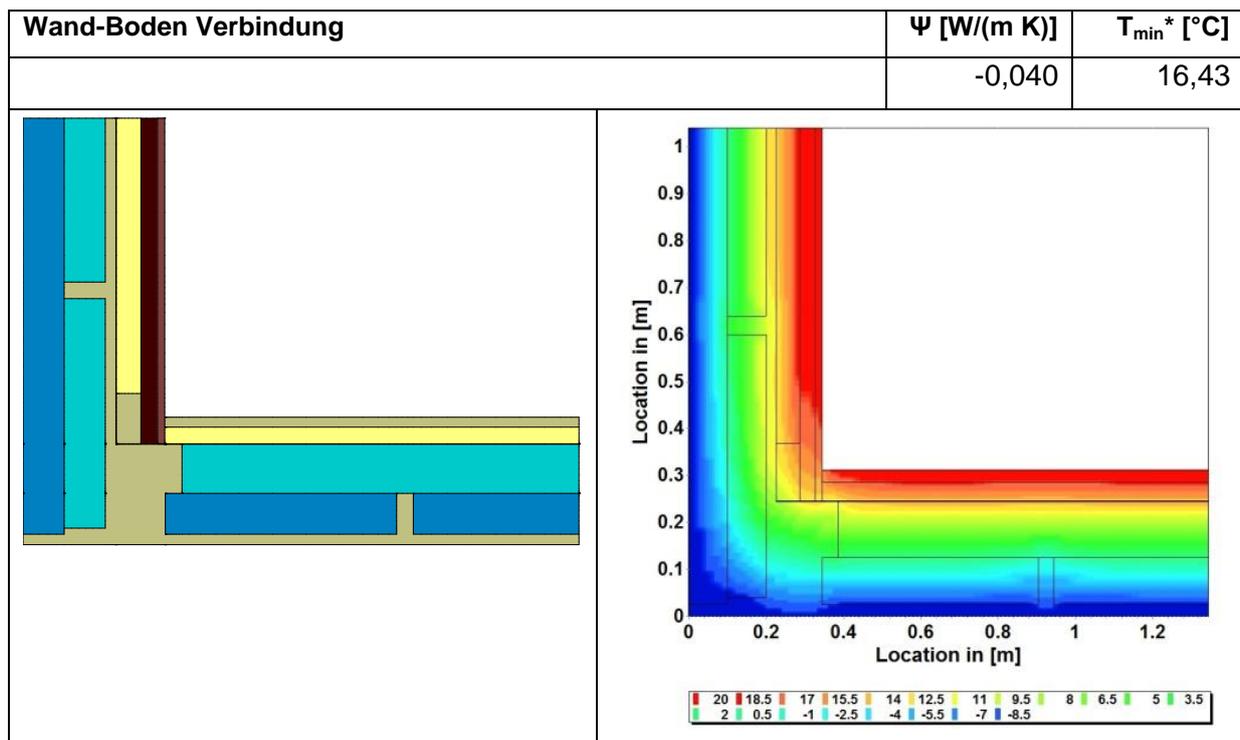


Abbildung 2.12 Schnitt Wand - Boden

\*Minimal Temperatur an der inneren Oberfläche

## 2.2.4 Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden

Für den Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden wurde eine hygrothermische Berechnung des Regelaufbaus durchgeführt, um die optimale, aber bauphysikalisch unbedenkliche, Dämmschichtdicke zu ermitteln.

### Varianten

Wandaufbau		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Schicht	Material	Dicke [mm]		Dicke [mm]	Dicke [mm]
1	Innen Lehmputz		10		10
2	Lehm		30		40
3	PU Dämmung Holzweichfaser		20 -		- 10
4	Beschichtete Spanplatte		10		10
5	Mineralwolle		100		100
6	Stahlblech		0.6		0.6

<b>Innere relative Feuchte</b>	50%	$\phi_{i,v2}(t)$	$\phi_{i,v3}(t)$	50%
--------------------------------	-----	------------------	------------------	-----

## Ergebnisse

Abbildung 2.13 zeigt den Verlauf der Feuchtigkeit zwischen PU Dämmung und Spanplatte (für Variante 1 bis 3, links) und zwischen den der Spanplatte und der Holzweichfaserplatte (für Variante 4, rechts). Die Ergebnisse sind für alle vier Aufbauvarianten dargestellt und alle vier Variante können als unbedenklich betrachtet werden.

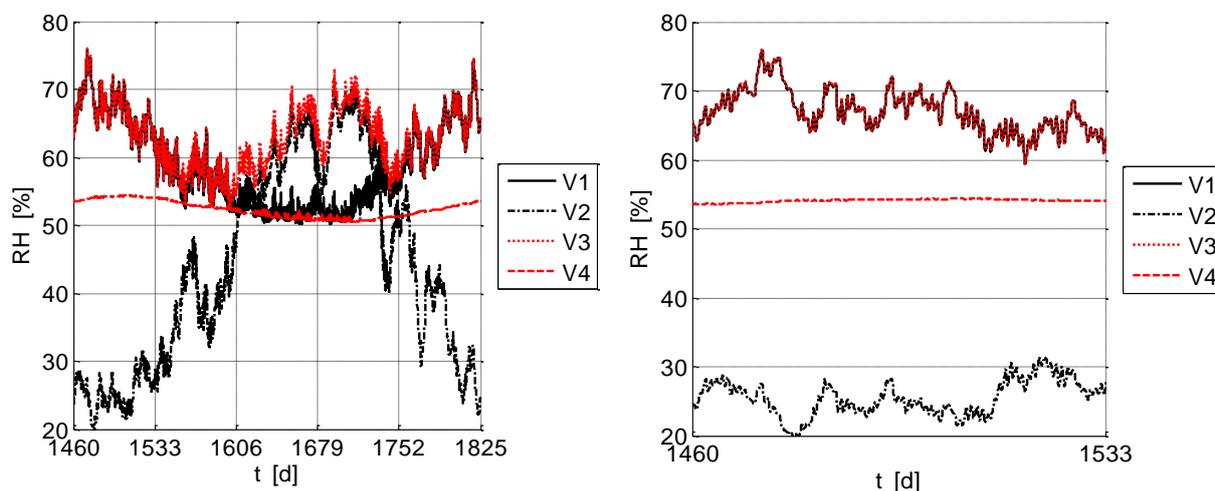


Abbildung 2.13 Verlauf der relativen Feuchte an der Schnittstelle PU Dämmung-Spanplatte (Varianten 1 bis 3) bzw. zwischen der Spanplatte und der Holzweichfaserplatte (Variante 4)

Abbildung 2.14 zeigt die Verteilung der relativen Feuchte im Bauteil am Ende der Simulation nach 1825 Tagen. Die Variante 4 zeigt hierbei die geringsten relativen Feuchten im kritischen Bereich der OSB-Platte. Die anderen Varianten 1 und 3 unterscheiden sich nur durch die Randbedingungen für die innere relative Feuchte und sind nahezu gleichwertig. Für die Variante 2 wurden unrealistische Randbedingungen für die innere relative Feuchte gewählt und diese wird daher ausgeschlossen.

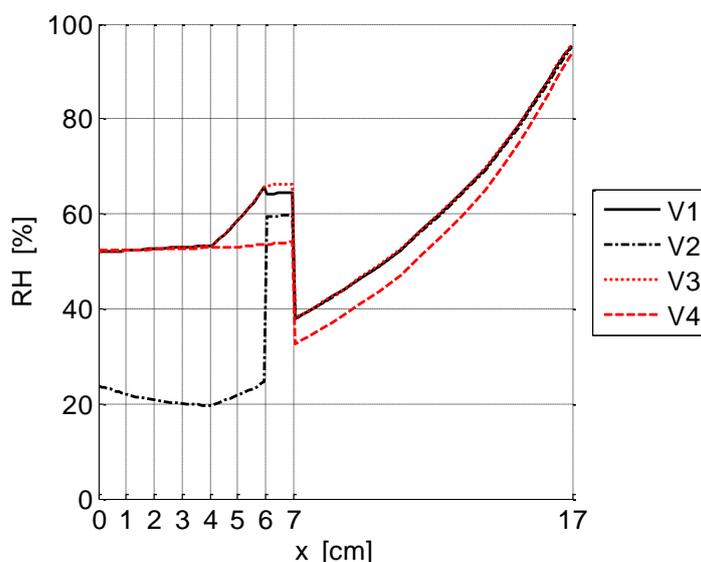


Abbildung 2.14 Verteilung der relativen Feuchte im Bauteil (Ende der Simulation, 1825 Tagen)

## 3 AP 3 - MESSUNGEN UND AUSWERTUNG

### 3.1 LABORVERSUCHE - BESTIMMUNG DER MATERIALPARAMETER

Im Rahmen des Projekts wurden Laborversuche zur Bestimmung der Materialparameter des verbauten Lehms durchgeführt (vgl. auch (Siegele, 2013)). Diese Laborversuche wurden aufbauend auf einem früheren FFG-Projekt Aktivhaussiedlung Kramsach (Ochs, et al., 2013) und (Ochs, et al., 2013) durchgeführt. Der folgende Abschnitt wurde (Siegele, 2013) entnommen.

#### 3.1.1 Feuchtespeicherfunktion des Lehms

Mit der sogenannten Sorptionsisotherme kann die Feuchtespeicherfähigkeit eines Materials teilweise beschrieben werden. Der erweiterte Ansatz der Feuchtespeicherfunktion berücksichtigt zusätzlich die Speicherung von ungebundenem Wasser.

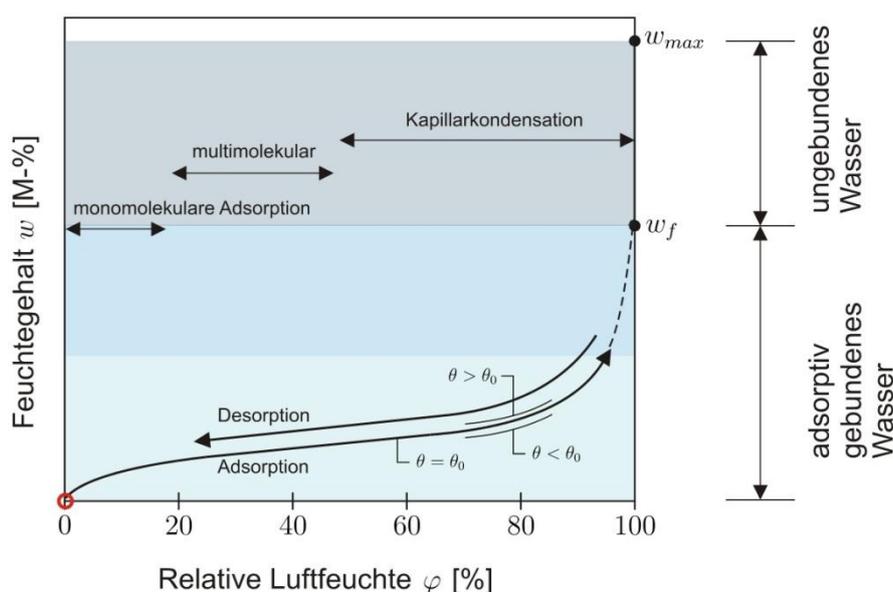


Abbildung 3.1 Feuchtespeicherfunktion (Quelle: M. Aschaber, Universität Innsbruck)

In Abbildung 3.1 ist eine schematische Feuchtespeicherfunktion dargestellt. Auf der Abszisse wird die relative Feuchte  $\varphi$  aufgetragen, auf der Ordinate der Wassergehalt  $u$  in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  oder wie hier der Feuchtegehalt  $w$  in  $[\text{M} \ %]$ . In der Feuchtespeicherfunktion wird zwischen adsorptiv gebundenem und ungebundenem Wasser unterschieden. Bis zu einer relativen Feuchte von  $\varphi < 50 \ %$  erfolgt die Feuchtespeicherung durch monomolekulare bzw. multimolekulare Adsorption. Bei höheren relativen Feuchten stellt sich eine Kapillarkondensation ein bis die Kapillaren vollgefüllt sind. Dieser Zustand wird als freie Sättigung  $u_f$  bzw.  $w_f$  bezeichnet. In Abhängigkeit vom Porenvolumen kann das Material

noch Feuchte bis zur maximalen Sättigung  $u_{max}$  bzw.  $w_{max}$  aufnehmen. In Simulationen ist dieser Bereich schwierig zu berechnen, da er zu numerische Instabilitäten führen kann.

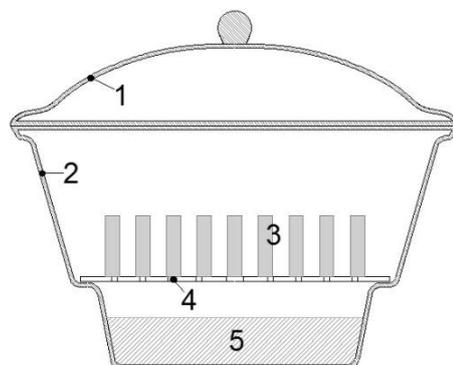
Nicht beschrieben werden kann mit dem Ansatz der Feuchtespeicherfunktion z.B. der Vorgang des Erhärtens eines Materials, dieser Vorgang würde zusätzlich chemische Prozesse implizieren. Solche Fragestellungen können nur mit komplexen Mehrphasenmodellen in anderen Maßstabsebenen betrachtet werden.

Die Messung der Sorptionsisotherme im Labor ist sehr aufwendig, da je nach Material entsprechend viele Versuche durchgeführt werden müssen. Nach ÖNORM EN ISO 12571 wird die Adsorptionsisotherme bestimmt.

In sogenannten Exsikkatoren (siehe Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3) kann mit Hilfe von Salzlösungen eine definierte relative Luftfeuchtigkeit eingestellt werden. Als Salze kommen u.a. Kaliumhydroxid, Magnesiumchlorid, Magnesiumnitrat, Natriumchlorid und Kaliumnitrat zum Einsatz. In Abhängigkeit von der geforderten Genauigkeit können mehr oder weniger Exsikkatoren zum Einsatz kommen.



Abbildung 3.2 Versuchsdurchführung Adsorptionsisotherme



- 1...Exsikkator - Deckel
- 2...Exsikkator - Unterteil
- 3...Probekörper
- 4...Lochplatte
- 5...gesättigte Lösung

Abbildung 3.3 Versuchsdurchführung Adsorptionsisotherme (Ochs, et al., 2013)



Die Proben werden auf Massenkonzanz getrocknet und anschließend in die vorbereiteten Exsikkatoren gegeben. In Abhängigkeit des Materials werden die Proben bis Massenkonzanz erreicht wird in den Exsikkatoren belassen. Hierbei sind laufend die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur in den Exsikkatoren zu prüfen.

Mit den erhaltenen Massen- und Volumendifferenzen (für diese muss die Rohdichte bekannt sein) kann auf Punkte der Adsorptionsisotherme geschlossen werden. Um aus diesen Daten eine geeignete Sorptionsisotherme für Simulationen zu erhalten, müssen die erhaltenen Punkte mit einer Funktion gefittet werden. Dies kann beispielsweise mit einer Polynomfunktion erfolgen, bei wenigen Messpunkten ist es jedoch sinnvoller das Verfahren nach Holm (Holm, et al., 2002) einzusetzen. Dieses erlaubt zusätzlich die analytische Auswertung der Ableitungen der Sorptionsisothermen.

Die Labormessungen der Sorptionsisothermen wurden für Grob- und Feinlehm durchgeführt. Es standen jeweils 25 Proben zur Verfügung welche auf 5 Exsikkatoren mit verschiedenen relativen Luftfeuchten (10 %, 33 %, 54 %, 75 %, 93 %) bei 20 °C Raumtemperatur verteilt wurden. Die Proben wurden getrocknet (48 Stunden bei 40 °C), für zwei Wochen in den Exsikkatoren mit höherer Feuchte wieder aufgefeuchtet und erneut getrocknet und anschließend abgebürstet. Erst dann wurden die Proben gleichmäßig auf die Exsikkatoren verteilt. Dadurch könnten ein abbröckeln von feinen Lehmstücken verhindert werden, welches in früheren Versuchsreihen sehr häufig auftrat.

Abbildung 3.4 zeigt die gemessenen Sorptionsisothermen mit ihrer Messunsicherheit.

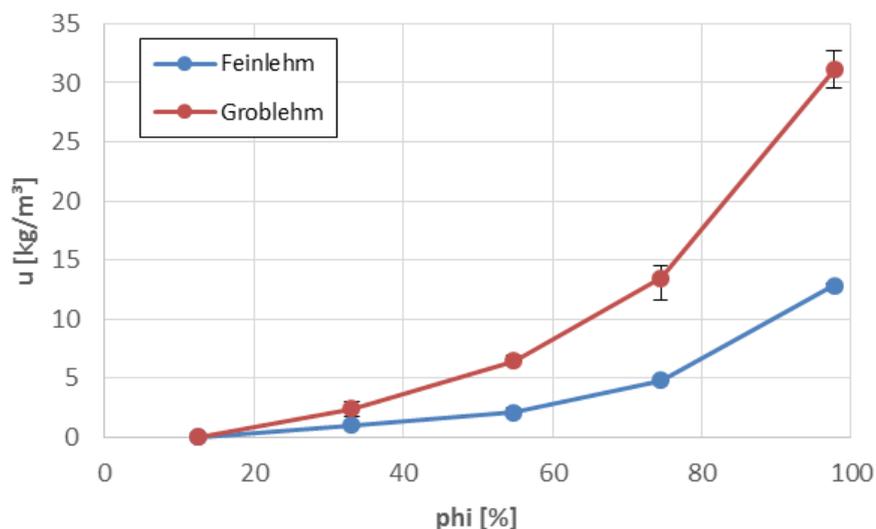


Abbildung 3.4 Ermittelte Sorptionsisothermen mit Messunsicherheit

Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6 zeigen den direkten Vergleich der gemessenen Proben (Typ C) mit früheren Messungen. Es zeigt sich, dass sowohl der Fein-, als auch der Groblehm im Bereich der Literaturwerte sind. Der Groblehm Typ A war ein qualitativ sehr



hochwertiger Lehm, welcher jedoch mengenmäßig nicht im ausreichenden Maße zur Verfügung steht um vermarktet werden zu können.

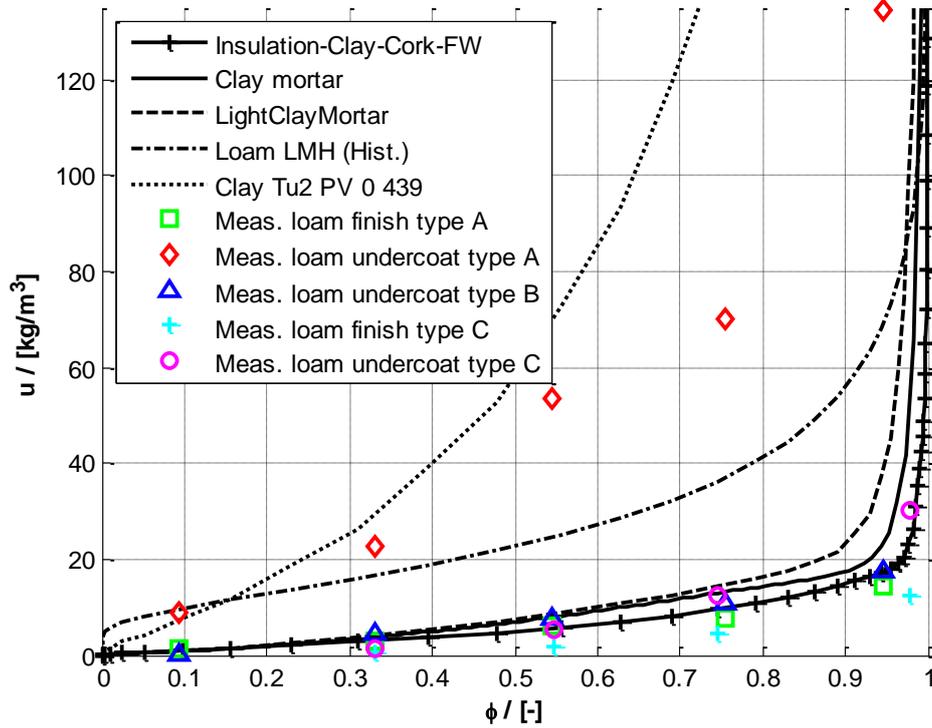


Abbildung 3.5 Vergleich der gemessenen Sorptionsisotherme mit Literaturwerten (Institut für Bauklimatik, TU Dresden) und alten Messergebnissen

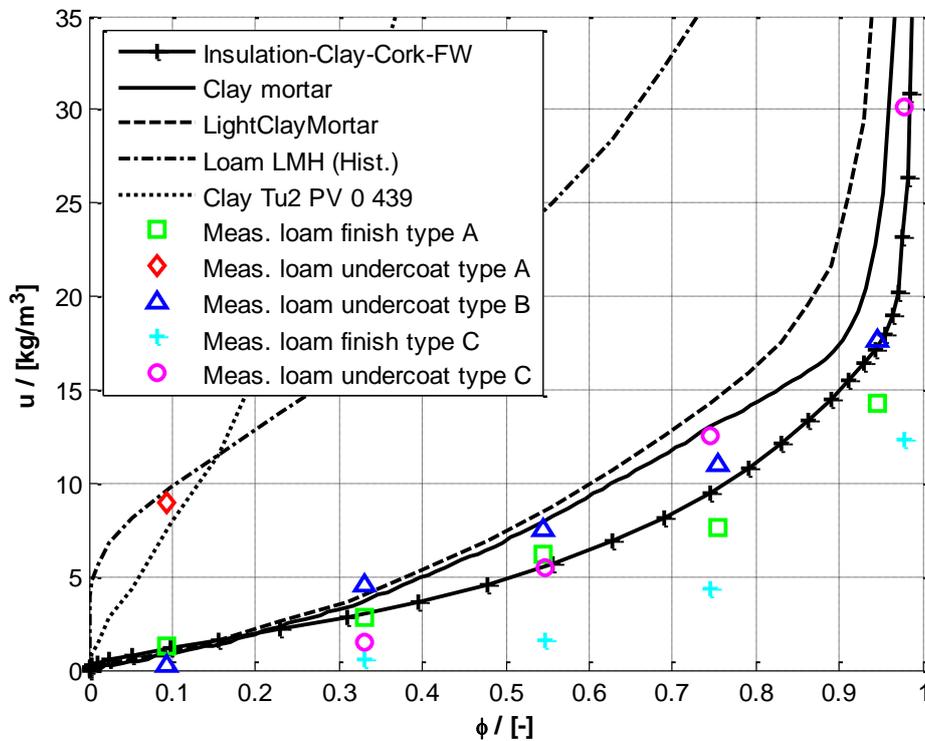


Abbildung 3.6 Vergleich der gemessenen Sorptionsisotherme mit Literaturwerten (Institut für Bauklimatik, TU Dresden) und alten Messergebnissen (Ausschnitt)



### 3.1.2 Wasserdampfdiffusionswiderstand des Lehms

Für die Beschreibung der Dampfdiffusion wird die dimensionslose Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  benötigt. Sie ist ein Faktor der angibt, um wie viel dichter ein Baustoff im Vergleich zu einer gleich dicken Luftschicht ist. Dieser Wert kann, wie der Name bereits sagt, als Widerstand interpretiert werden. In Kombination mit der Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit für Luft  $\delta_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m s Pa})$  kann  $\delta = \delta_0/\mu$  mathematisch als Leitfähigkeit interpretiert werden.

Die Messung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl kann nach der ÖNORM EN ISO 12572 erfolgen. Zuerst werden hierfür die verfügbaren Proben in einer Klimakammer (20 °C, 50 %rH) gelagert, bis Massenkonzanz erreicht ist. In weiterer Folge wird zwischen den Versuchsvarianten „wet cup“ und „dry cup“ unterschieden.

Im „dry cup“ wird trockenes Calciumchlorid eingebracht, damit stellt sich eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 0 % ein. Im „wet cup“ wird Kaliumnitrat als wässrige Lösung eingebracht, damit stellt sich eine relative Luftfeuchtigkeit von  $94,62 \pm 0,66$  ein.

Die zylindrischen Proben werden lt. Abbildung 3.8 eingebaut und seitlich mit Silikon abgedichtet. Die Versuchsaufbauten werden wieder in der Klimakammer gelagert und in regelmäßigen Abständen gewogen. Die Zeitabstände und die Versuchsdauer sind abhängig vom Material. Aus den ermittelten Massendifferenzen kann auf die diffundierte Wassermasse geschlossen werden.

Der Wasserdampfdiffusionsstrom  $G$  [kg/s] ergibt sich zu aus der Massendifferenz pro Zeiteinheit, die Wasserdampfdiffusionsstromdichte  $g$  [kg/(m<sup>2</sup> s)] ergibt sich durch die Division mit der Fläche.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ergibt sich dann zu

$$\mu = \frac{D_d}{R_d \cdot T \cdot g} \cdot \frac{\Delta p_v}{d} \quad (1)$$

Hierbei ist  $D_d = 0,000025 \text{ m}^2/\text{s}$  der Diffusionskoeffizient,  $\Delta p_v$  die Dampfdruckdifferenz über dem Probekörper, welche für den „dry cup“  $\Delta p_v = 1171,037 \text{ Pa}$  und für den „wet cup“  $\Delta p_v = 1045,034 \text{ Pa}$  beträgt. Zudem ist  $R_d = 462 \text{ J}/(\text{kg K})$  die Gaskonstante,  $T$  die absolute Temperatur der Probe,  $d$  die Dicke der Probe und  $g$  die Wasserdampfdiffusionsstromdichte.

Die erhaltenen Ergebnisse der beiden Versuchsarten weichen in der Regel deutlich voneinander ab. Dies ergibt sich aus dem Umstand, dass die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl vom Feuchtigkeitsgehalt des Werkstoffs abhängt. In der Regel sinkt der Wasserdampfdiffusionswiderstand mit Zunahme der Feuchte im Werkstoff (siehe auch (Künzel, 1995 S. 22ff)). Zudem kommt es zu einer Überlagerung mit

der Oberflächendiffusion, welche zu einer Reduktion des freien Querschnitts für die Dampfdiffusion führt. Zusätzlich existiert eine Abhängigkeit von der Temperatur, welche jedoch vernachlässigt werden kann.

Die Labormessungen für den Wasserdampfdiffusionswiderstand wurden über einen Zeitraum von einem Monat durchgeführt.



Abbildung 3.7 Versuchsbehälter Wasserdampfdiffusionswiderstand

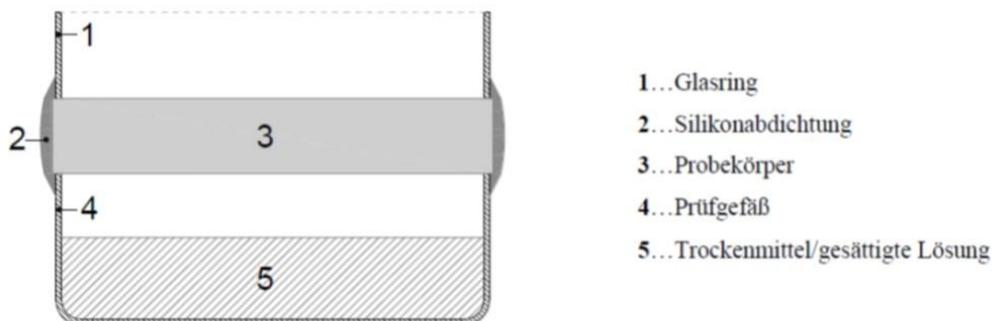


Abbildung 3.8 Versuchsaufbau Wasserdampfdiffusionswiderstand (Ochs, et al., 2013)

Für den Groblehm standen 5 Proben zur Verfügung und es wurde eine Messung nach dem „dry cup“ Verfahren durchgeführt. Abbildung 3.9 zeigt die Messergebnisse als Masse der Probe (inkl. Probenbehälter) aufgetragen über der Versuchsdauer und Abbildung 3.10 die Massenänderung der Proben aufgetragen über der Versuchsdauer. Drei Proben (G2, G3 G5) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, eine Probe weicht geringfügig ab (G4) und eine Probe sehr stark (G1). Bei einer genaueren Betrachtung stelle sich heraus, dass bei der Probe G1 zu wenig Salz verwendet wurde und sich somit nicht die korrekte Luftfeuchtigkeit einstellte. Beim Probenbehälter G3 wurde festgestellt, dass die seitliche Silikonabdichtung

nicht ganz dicht war. Diese beiden Proben wurden bei der Versuchsauswertung nicht berücksichtigt.

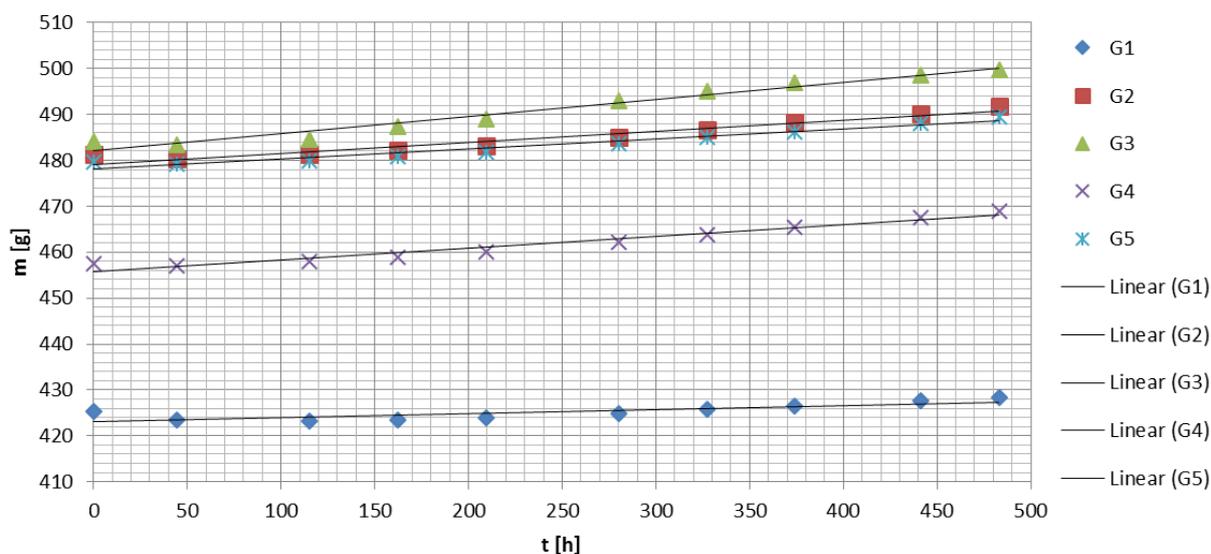


Abbildung 3.9 Masse der Proben aufgetragen über der Zeit

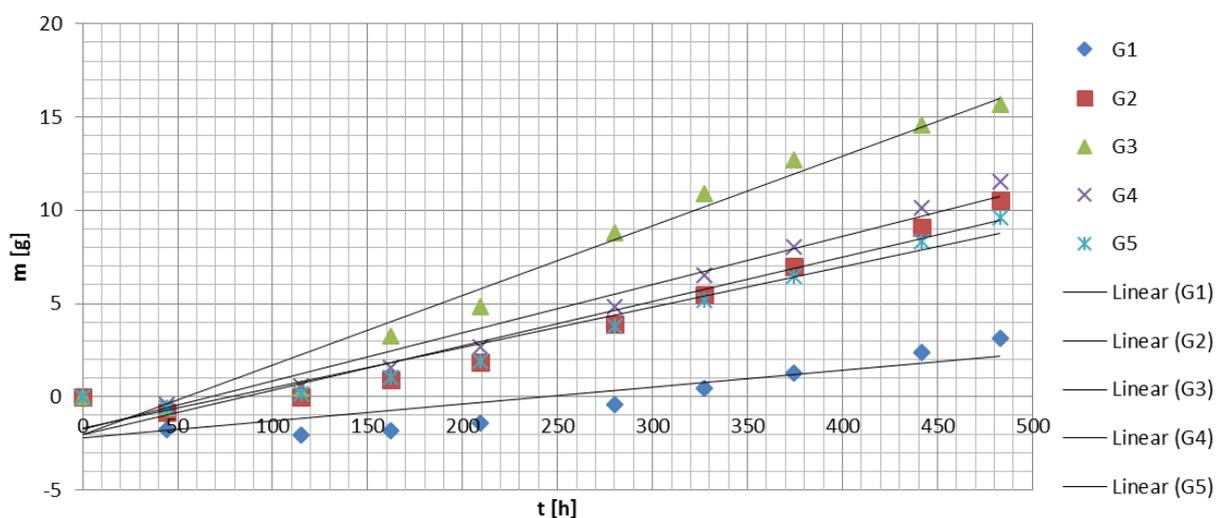


Abbildung 3.10 Massenänderung der Proben aufgetragen über der Zeit

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand für den Groblehm ergibt sich aus den erläuterten Messungen zu

$$\mu = 14,8 [-] \pm 1,1 \quad (2)$$

Die Proben des Feinlehms waren zu dünn und zerbrachen während der Vorbereitungen für die Messungen. Hier kann jedoch auf Erfahrungswerte aus der Vergangenheit zurückgegriffen werden und daher wird für den Wasserdampfdiffusionswiderstand des Feinlehms derselbe wie für den Groblehm angesetzt.



Die einzelnen Sensoren wurden in der Fläche in einem Raster von 150 mm versetzt installiert, um sicherzugehen, dass die Messstellen im ungestörten Bauteil liegen.

In der Massivholzplatte wurden die Sensoren mithilfe von Kunststoffhülsen von der Außenseite her in Bohrungen in einem Winkel von 45° zur Oberfläche montiert (Abbildung 3.12). Die Kunststoffhülsen schließen die Messstellen nach außen (zur Dämmebene hin) luftdicht ab.

Die genauen Sensorpositionen sind in Tabelle 3.1 angegeben.

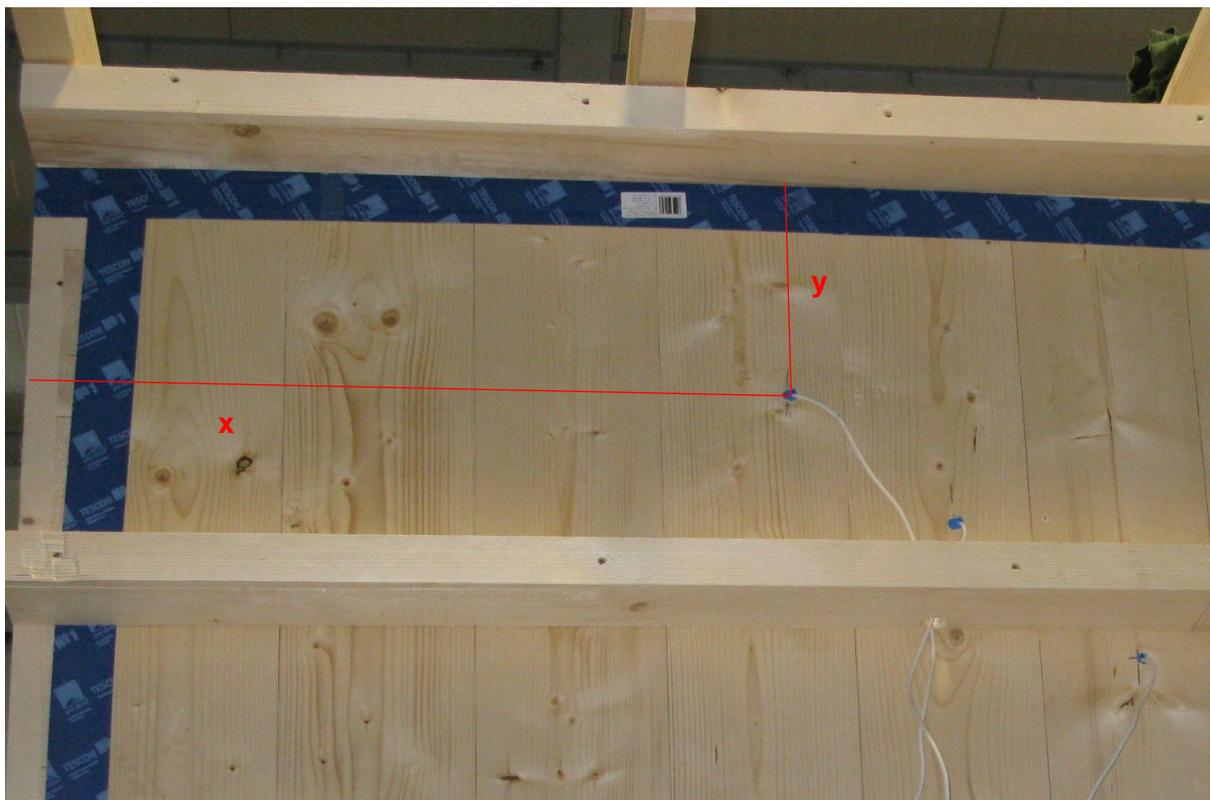


Abbildung 3.12: Lage und Bezug der Messstellen im Holzcontainer

Die Koordinaten x und y beziehen sich auf die Oberkante bzw. die jeweils von außen gesehen links gelegene Kante der Massivholzplatte. Die Tiefe z ist von der Innenwand aus gemessen.

Tabelle 3.1: Sensorpositionen der Temperatur- und Feuchtfühler im Holzcontainer

Variante Holz	Sensorposition [mm]		
Messstelle	x	y	z
9854654_Holz_Nord_1	765	300	18
9854651_Holz_Nord_2	915	450	42





Entsprechend der Lage der Lehmplatten im fertiggestellten Container ergeben sich die in Tabelle 3.2 dargestellten Fühlerpositionen. Die Koordinaten x und y beziehen sich hier auf die Oberkante bzw. linke Kante der Innenwand. Die Fühlerpositionen in der Decke wurden von der Fensterwand (x) bzw. vom Unterzug aus (y) gemessen.

*Tabelle 3.2: Sensorpositionen der Temperatur- und Feuchtefühler im Lehmcontainer*

Variante Lehm	Sensorposition [mm]		
Messstelle	x	y	z
9854654_Lehm_Nord_1	805	200	10
9854651_Lehm_Nord_2	955	350	25
9923298_Lehm_Nord_3	1105	500	40
9854657_Lehm_Sued_1	805	200	10
9854653_Lehm_Sued_2	955	350	25
9854655_Lehm_Sued_3	1105	500	40
9854652_Lehm_Decke_1	1460	200	10
9854656_Lehm_Decke_2	1610	350	25
9854662_Lehm_Decke_3	1760	500	40

In den im Bestandscontainer nachgerüsteten Lehmwänden wurden ebenfalls Temperatur- und Feuchtesensoren installiert. Aufgrund der geringeren Dicke der Lehmschicht wurde die Zahl der Sensoren jedoch auf zwei je Wand reduziert. Die Montage der Fühler erfolgte beim Aufbringen des Lehmputzes unbeaufsichtigt, deshalb sind die genauen Fühlerpositionen nicht dokumentiert worden.

Drei der vier Fühler wurden durch den nassen Verputz beschädigt, was zu untypisch hohen Stromverbräuchen (Batterielebensdauer kürzer als ein Auslesezyklus anstatt mehrere Jahre) und in der Folge teilweise unbrauchbaren, weil nicht mehr lesbaren Messdaten führte.

### **3.2.2.2 Betriebszustände der Lüftungsgeräte**

Dank einer von der Fa. Drexel&Weiss zur Verfügung gestellten Schnittstelle und der Möglichkeit, die beiden Geräte mit einer Datenleitung zu verbinden, konnte online auf den Betriebszustand der Lüftungssteuerungen zugegriffen werden.

Folgende Größen wurden aufgezeichnet:

- Raumtemperatur (Messwert des Fühlers im Raumbediengerät)
- Frischlufttemperatur (Fühler im Ansaugrohr)
- Drehzahlen der Zu- und Abluftventilatoren

- CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft (Fühler im Abluftrohr, Eingangsgröße für den automatischen Lüfterbetrieb).

### 3.2.2.3 Eingebrachte Energie durch elektrische Verbraucher

Jeder Containerprototyp wurde mit einem für die vorhandene Elektroinstallation geeigneten Drehstrom- bzw. Wechselstromzähler ausgerüstet. Drei Zähler verfügen über einen S0-Pulsausgang für die Datenaufzeichnung.

Eine Energiezählung in den Bestandscontainern war ursprünglich geplant, konnte jedoch aufgrund der vorhandenen Elektroinstallation nicht umgesetzt werden. Diese wurde im Lauf der Zeit mehrmals ergänzt und umgebaut, sodass eine getrennte Erfassung der beiden Referenzcontainer nur mit einer großen Anzahl an Zählern und nach umfangreichen Änderungen am Bestand möglich gewesen wäre.

### 3.2.2.4 Öffnungszustand von Türen und Fenstern

In den beiden Prototypen wurde der Zustand von Türen und Fenstern mithilfe von Magnetkontakten erfasst (Status offen/geschlossen/gekippt).

### 3.2.2.5 Personenbelegung

Für Rückschlüsse auf innere Wärme- und Feuchtequellen wurden im Türbereich Schalter für die Personenzählung installiert. Mit Tastern "Kommen" und "Gehen" (Abbildung 3.14) wurde ein Zähler für die aktuelle Personenzahl im Raum erhöht bzw. vermindert.

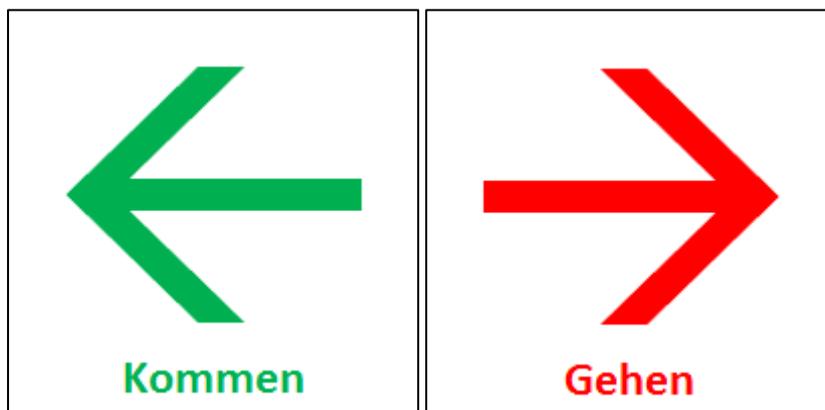


Abbildung 3.14: Taster für die Personenzählung

### 3.2.3 Datenaufzeichnung

Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgte im Falle der Temperatur- und Feuchtefühler mithilfe der integrierten Loggerfunktion. Als Aufzeichnungsintervall wurden 5 Minuten gewählt. Dieses ermöglicht mit dem verfügbaren Messwertspeicher eine Laufzeit von ca. 75 Tagen bis zum nächsten Auslesen.



Beim Neustart nach dem Auslesen wird automatisch auch die Uhr des Loggers justiert. Damit ergibt sich mit dem vom Hersteller angegebenen Drift eine Abweichung von maximal 2,5 Minuten in den aufgezeichneten Zeitstempeln.

Alle anderen Daten wurden mit einem embedded Controller NI Compact RIO 9074 von National Instruments aufgezeichnet, auf dem das Echtzeitbetriebssystem LABView RT läuft.

Das Gerät verfügt über eine serielle Schnittstelle, an die die Lüftungsgeräte angebunden waren.

Für die Erfassung der Fenster, Türen und der Personenzählung kam ein Messmodul NI 9425 mit 32 digitalen Eingängen zum Einsatz. Die Tasterpulse der Personenzähler wurden sofort in entsprechende Zählerstände umgerechnet,

Die Energiezähler wurden mit einem auch für höherfrequente Digitalsignale und Frequenzmessung geeigneten Modul NI 9423 mit 8 Eingängen erfasst. Das Modul wurde auf Pulszählung konfiguriert, die Zählerstände wurden auf kWh skaliert aufgezeichnet.

Das Aufzeichnungsintervall der kontinuierlichen Daten (Lüftungsgerät, Außentempersensoren) betrug 30 Sekunden.

Die Personenzähler, Stromzähler, Türen und Fenster wurden ereignisgesteuert erfasst, wobei jeweils der Zeitstempel, der Messkanal sowie der vorherige und der aktuelle Messwert aufgezeichnet wurden.

### **3.2.4 Einmalige Messungen**

Mittels des sogenannten „Flowfinder“ wurden für die beiden Lüftungsgeräte die Luftvolumenströme zu den einzelnen Lüfterstufen erfasst, um die mitgeschriebenen Lüfterdrehzahlen auf den Luftvolumenstrom skalieren zu können.

Der „Flowfinder“ des Herstellers Acin (<http://www.acin.nl/product/FlowFinder>) misst Luftströme mithilfe des Staudruckkompensationsverfahrens.

### **3.2.5 Ergänzungen während der Projektlaufzeit**

Im Jänner 2015 wurde die Energiezählung im östlichen Prototyp erweitert, um die Verbräuche des Lüftungsgeräts und der Frostschutzheizung bei negativen Außentemperaturen separat erfassen zu können. Dazu wurden zwei weitere Stromzähler (WSZ12D-32A) in der Anschlussleitung des Geräts und im Gerät im aufgetrennten Stromkreis der Heizung installiert.



## 3.2.6 Verwendete Messgeräte

### 3.2.6.1 Temperatur und Feuchtlogger Hobo Pro v2

Dieser Logger kam in zwei Varianten zum Einsatz, U23-001 mit integriertem Sensorelement und U23-002 mit abgesetztem Sensorelement und Kabel.

Technische Daten:

Temperaturmessung

Messbereich		-40 – 70 °C
Messgenauigkeit		+/- 0,21 °C im Bereich von 0 bis 50 °C
Auflösung		0,02 °C bei 25 °C
Ansprechzeit t90 (Luft 1 m/s)	U23-001	40 min.
	U23-002	5 min.
Drift		< 0,1 %/Jahr

Feuchtemessung

Messbereich		0 – 100 %rH
Messgenauigkeit		+/- 2,5 % im Bereich von 10 bis 90 %rH
Auflösung		0,03 %rH
Ansprechzeit t90 (Luft 1 m/s)	U23-001	40 min.
	U23-002	5 min.
Drift		< 1 %/Jahr

Abweichung der Echtzeituhr +/- 1 Minute/Monat

Speicher 64 kB, 21 000 Datenpunkte (T und rH)

### 3.2.6.2 Wirkarbeitszähler

Drehstromzähler Eltako DSZ12D-3x65A, MID geeicht

bzw. Wechselstromzähler Eltako WSZ12D-32A, MID geeicht

Technische Daten	DSZ12D-3x65A	WSZ12D-32A
I <sub>ref</sub> (I <sub>max</sub> )	3 x 10 (65) A	5 (32) A
Eigenverbrauch	0,4 W je Pfad	0,7 W
Genauigkeitsklasse +/- 1%	B	B
Anlaufstrom	20 mA	40 mA
Impulsausgang S0	2000 Pulse/kWh	1000 Pulse/kWh



### 3.2.6.3 Flowfinder

Der Flowfinder des Herstellers Acin misst Luftströme mithilfe des Staudruckkompensationsverfahrens.

Technische Daten:

Messbereich	0 – 225 m <sup>3</sup> /h
Lufttemperatur	-20 – 80 °C
Messgenauigkeit	3 – 5 % vom Ablesewert, min. 2 m <sup>3</sup> /h
Auflösung der Druckdifferenzanzeige	< 1 Pa
Wiederholgenauigkeit	< 1 % bzw. max. 0,3 m <sup>3</sup> /h

## 3.3 MESSAUSWERTUNG CONTAINER

### 3.3.1 Einleitung

Die Tabelle 3.3 zeigt die Ereignisse, welche während der Messdatenerfassung in den beiden neu errichteten Containern aufgetreten sind. Hier ist insbesondere hervorzuheben, dass die Personenzählung (zur Ermittlung der inneren Wärmen und der inneren Feuchtproduktion) aufgrund mangelnder Bereitschaft der Probanden nicht funktioniert hat.

*Tabelle 3.3 Ereignisse in der Messdatenerfassung*

von	bis	Kommentar
02.02.13 00:00		Messbeginn erster HOBO
02.02.13 00:00		Beginn Messdaten
07.11.13 10:23		Messbeginn cRIO
07.11.13 10:23	23.10.14 06:33	bis auf östlichen Türkontakt keine Eventdaten über gesamte Periode
17.01.14 09:52	21.01.14 09:09	Ausfall cRIO
25.03.14 16:10	25.03.14 16:40	Messungen mit Flowfinder
02.04.14 01:48	02.04.14 14:23	Ausfall cRIO
15.04.14 15:26	15.04.14 17:20	Lüftungsgerät Ost: ungewöhnlich hoher CO <sub>2</sub> -Wert
20.04.14 07:57	22.04.14 06:19	Ausfall cRIO
06.05.14 22:10	22.08.14 13:00	Ausfall alle HOBOs (Fehler beim manuellen Auslesen)
07.05.14 05:45	05.11.14 22:30	Ausfall Datenerfassung Lüftungsgerät West
05.06.14 13:47	05.06.14 13:55	Ausfall cRIO
18.06.14 07:52	20.06.14 05:44	Ausfall cRIO
20.06.14 05:44	25.06.14 04:11	Ausfall cRIO
21.08.14 10:52	22.08.14 11:53	Ausfall cRIO
23.10.14 06:33		Beginn Messdaten cRIO mit Eventdaten
05.11.14 22:30		Ende Messdaten HOBO für regulären Messbetrieb
05.11.14 22:30		Ende Messdaten cRIO für regulären Messbetrieb

Der Großteil der Messdaten ist über den Zeitraum vom 08.11.2013 0:00 und 05.11.2014 22:30 verfügbar, dieser Zeitraum von einem Jahr wird als der reguläre Messbetrieb angenommen. Im Folgenden werden die vorhandenen Messdaten über eben jenen Zeitraum ausgewertet und interpretiert.

### 3.3.2 Kalibriermessung Volumenstrom

Der Volumenstrom der Zu- und Abluft des Lüftungsgeräts wird nicht direkt gemessen, sondern indirekt über die Drehzahl der Ventilatoren. Um von der Drehzahl auf den Volumenstrom umrechnen zu können, wurde eine Kalibriermessung durchgeführt. Es wurden drei verschiedene Ventilatorstufen angefahren, die Drehzahl der Ventilatoren aufgezeichnet und der Volumenstrom mittels Flow Finder (retrotec, 2015) für Außen- und Fortluft gemessen. Es ergibt sich hier ein geringfügiger Fehler (kleiner 5 %) durch die Vernachlässigung der Temperatur und des Drucks, da die Beziehung zwischen Drehzahl Ventilator und Volumenstrom nicht linear ist. Dieser Messfehler tritt jedoch auch bei anderen Messverfahren (wie Messblenden) auf, wenn die entsprechenden Randbedingungen nicht erfasst und kompensiert werden. Abbildung 3.15 zeigt die Kalibrierkurven für die beiden Holzcontainer. Die dargestellten Volumenströme in den folgenden Abschnitten wurden mit diesen Kurven umgerechnet.

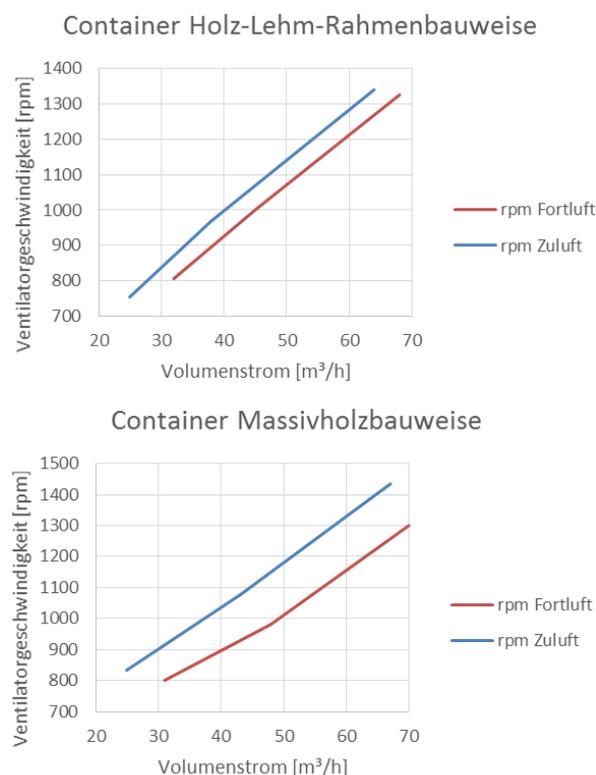


Abbildung 3.15 Kalibriermessung für Volumenstrom, Drehzahl = rpm (rounds per minute)

### 3.3.3 Messungen Holz-Lehm-Rahmenbauweise

Die Abbildung 3.16 zeigt den Verlauf der Raumtemperatur über den gesamten Betrachtungszeitraum von einem Jahr für den Container in Holz-Lehm-Rahmenbauweise. In der Periode zwischen dem 06.05.2014 und dem 22.08.2014 sind für diese Sensoren keine Messwerte verfügbar. Dies gilt auch für alle nachfolgenden Temperatur- und Feuchtemesswerte. Im Dezember 2013 bzw. Jänner 2014 zeigt sich ein eigenartiges Benutzerverhalten. So wurde der Container über die Weihnachtstage auf über 35 °C aufgeheizt (vermutlich Fehlbedienung oder Fehlfunktion der Heizung). Generell ist den Messdaten eine hohe Variabilität der Temperaturen im Winter zu entnehmen, welches aus dem Benutzerverhalten resultiert. An den Wochenenden (und teilweise auch in den Nächten) wurde die Heizung jeweils auf einer kleineren Stufe betrieben. Während der Bürozeiten liegt die durchschnittliche Raumtemperatur im Bereich von 22 °C. Für den Sommerbetrieb kann nahezu keine Aussage getroffen werden (insbesondere aufgrund der fehlenden Messwerte), es ist lediglich eine kurze Periode in der Übergangszeit im April 2014 auffällig, welche jedoch im direkten Vergleich mit dem zweiten Container wieder auf einen Bedienungsfehler der Heizung zurück zu führen ist.

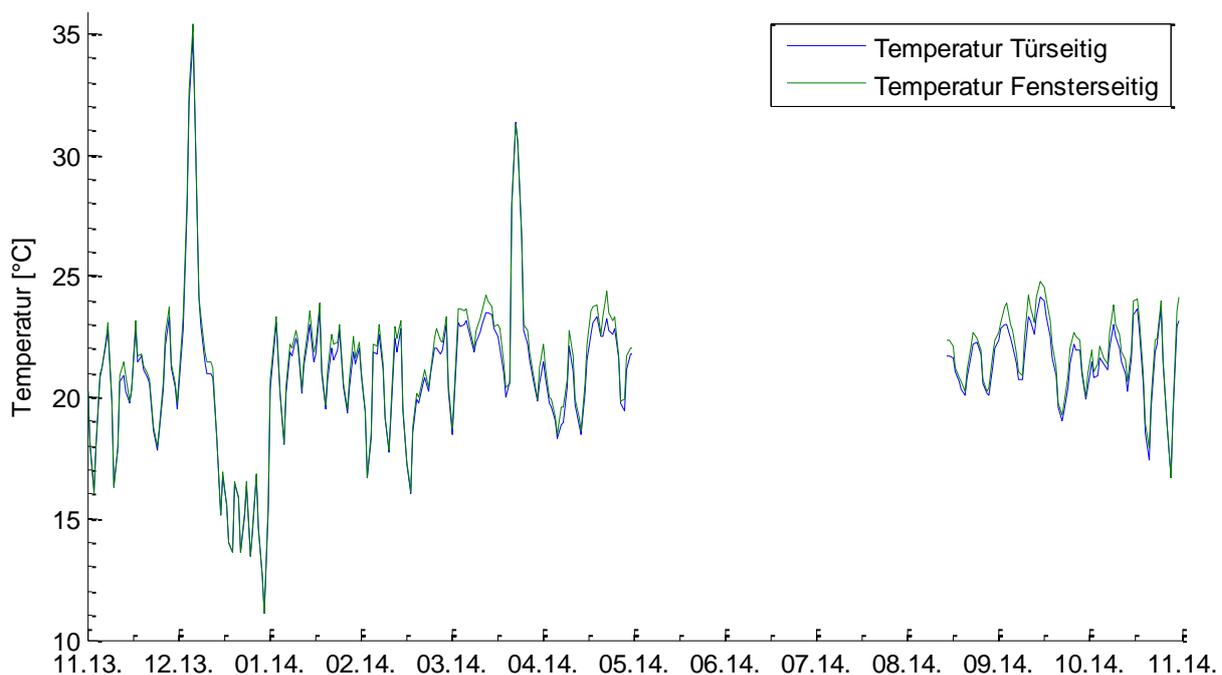


Abbildung 3.16 Raumtemperatur (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

Die Abbildung 3.17 zeigt den Verlauf der relativen Feuchte im Raum über den gesamten Betrachtungszeitraum von einem Jahr. Im Winter fällt die relative Feuchte nur an sehr wenigen Tagen unter 30 %, was akzeptabel ist und auch keine Akzeptanzprobleme bei den Benutzern zur Folge hat. Diese relativ hohen Werte sind jedoch nur durch die nach der CO<sub>2</sub>-

Konzentration geregelte Lüftung zu erreichen, was auch die Simulationen im Weiteren zeigen werden.

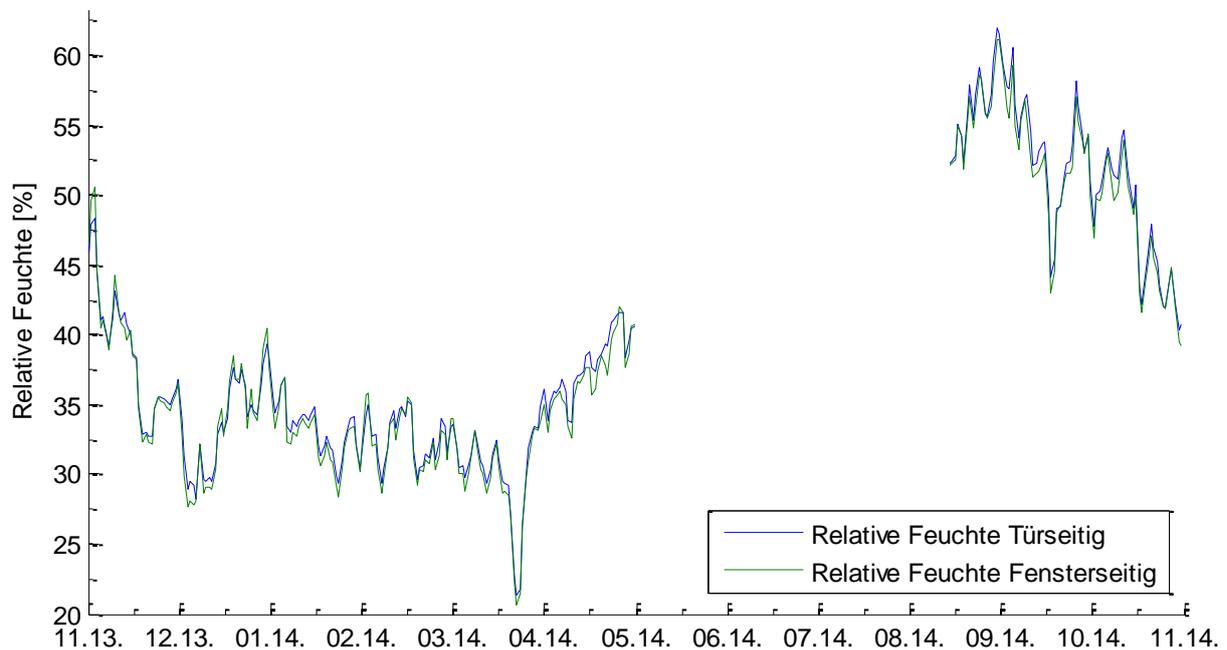


Abbildung 3.17 Relative Feuchte Raum (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

Die Abbildung 3.18, Abbildung 3.20 und Abbildung 3.22 zeigen den Temperaturverlauf bzw. die Abbildung 3.19, Abbildung 3.21 und Abbildung 3.23 den Verlauf der relativen Feuchte im Lehmputz (für die Position der Messfühler vgl. Abschnitt 3.2). Die Varianz der drei Messwerte ist für alle Bauteile sehr gering. Beim Temperaturverlauf ist dies durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Lehms bedingt. Der Verlauf der relativen Feuchte zeigt einen nur sehr geringen Dämpfungseffekt über die Lehmschicht. Abbildung 3.24 zeigt einen Detailausschnitt für den Verlauf der relativen Feuchte der Nordwand. Dieser Verlauf zeigt noch einmal deutlich den geringen Effekt der Feuchtepufferung.

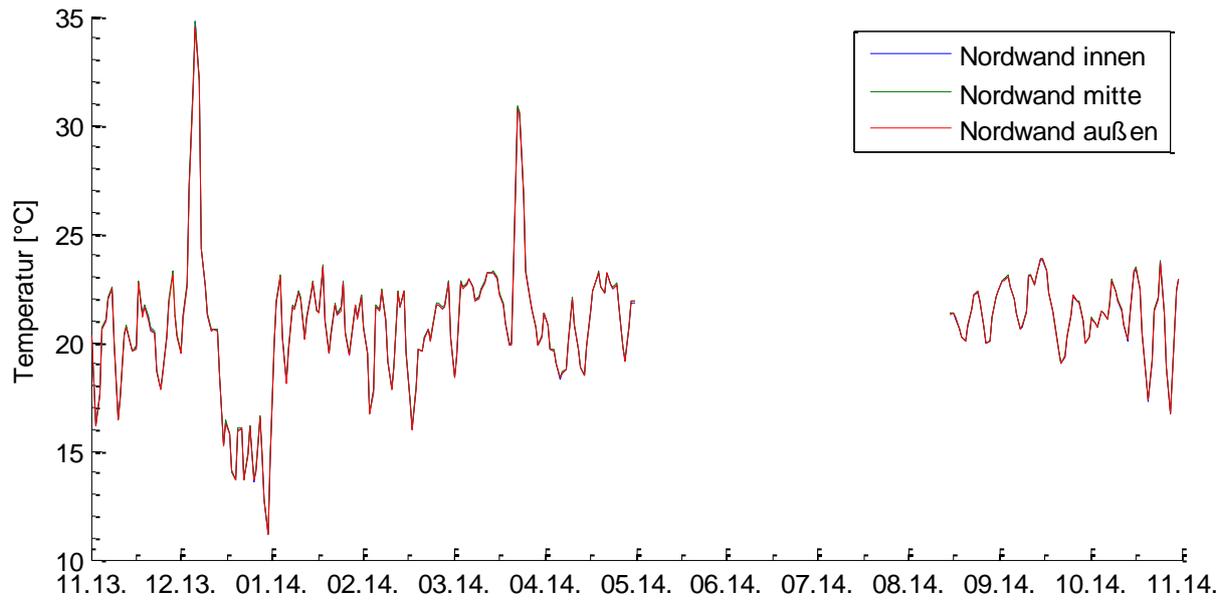


Abbildung 3.18 Temperaturverlauf Nordwand (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

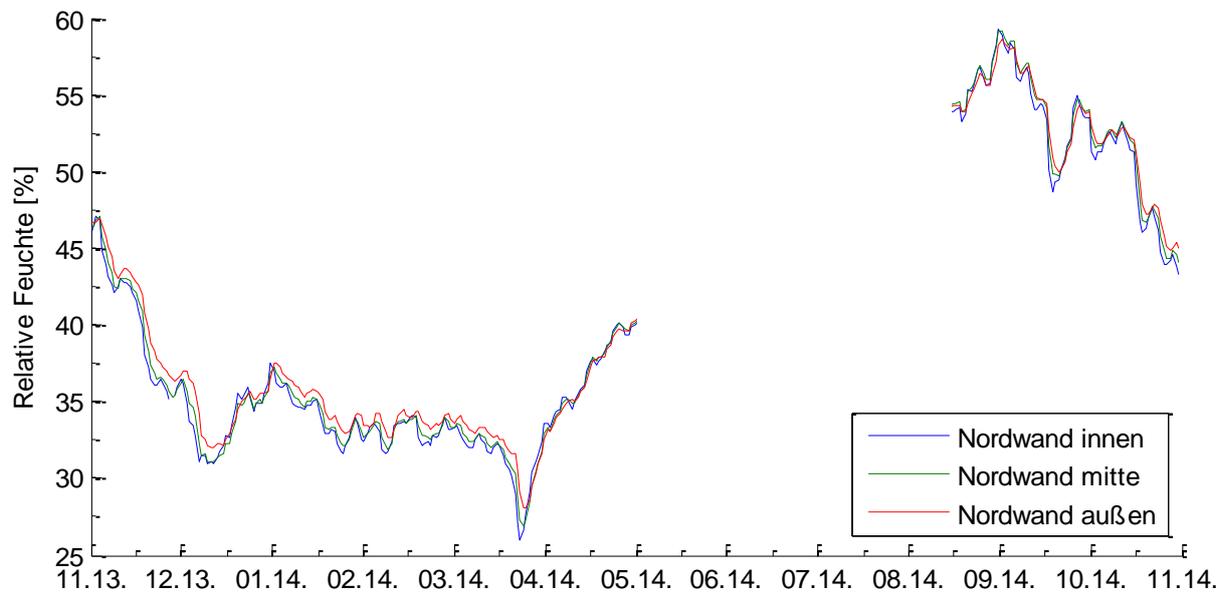


Abbildung 3.19 Verlauf relative Feuchte Nordwand (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

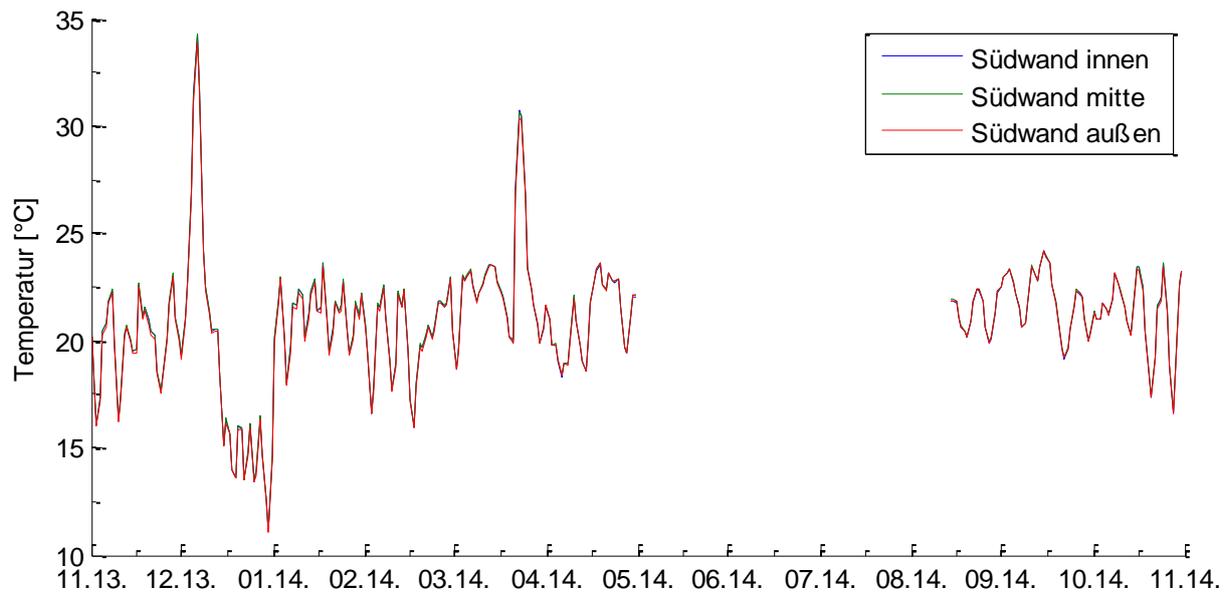


Abbildung 3.20 Temperaturverlauf Südwand (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

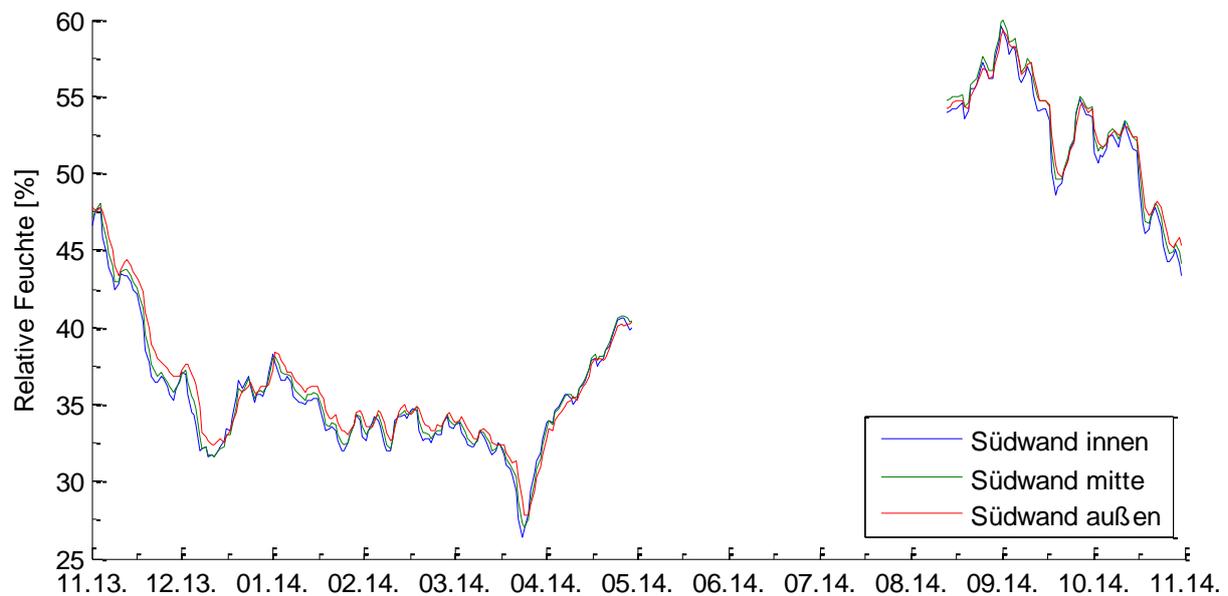


Abbildung 3.21 Verlauf relative Feuchte Südwand (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

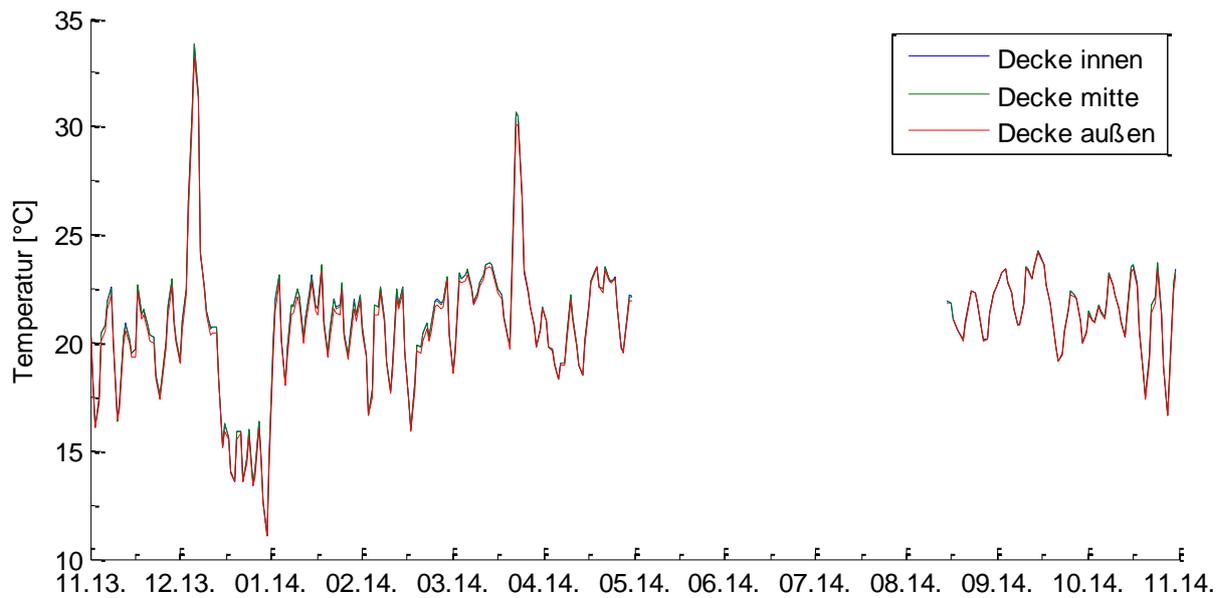


Abbildung 3.22 Temperaturverlauf Decke (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

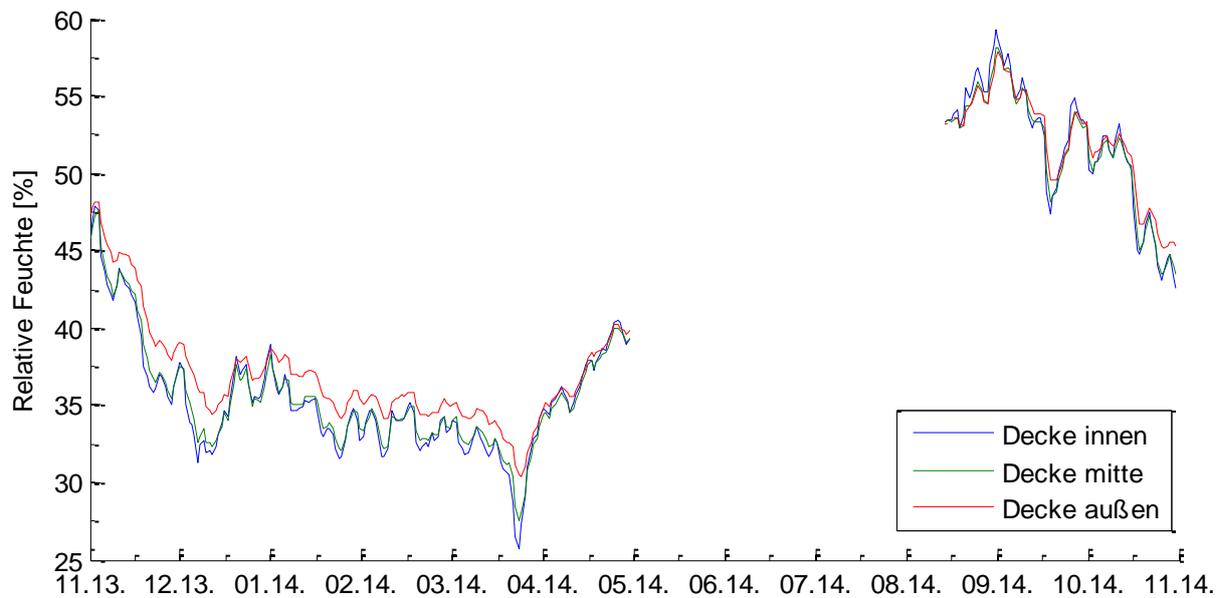


Abbildung 3.23 Verlauf relative Feuchte Decke (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

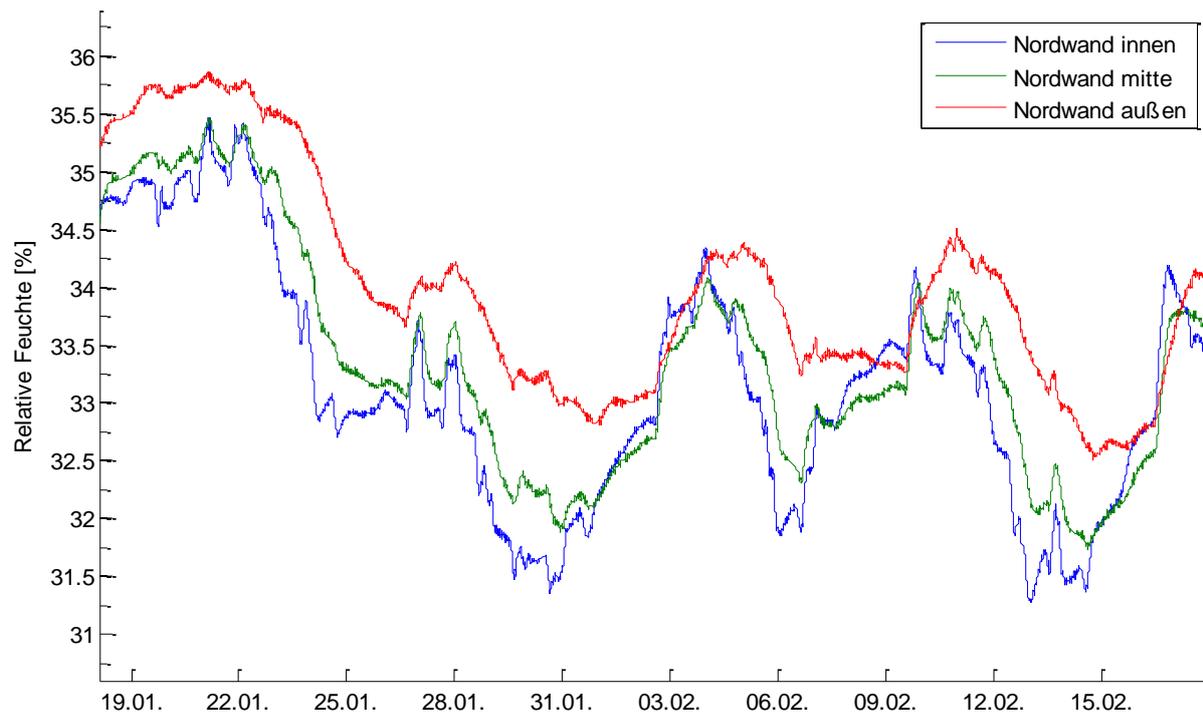


Abbildung 3.24 Verlauf relative Feuchte Nordwand (Tagesmittel) Holz-Lehm-Rahmenbauweise

Abbildung 3.25 zeigt den Volumenstrom der Zuluft des Lüftungsgerätes über den Messzeitraum. Die Funktionsweise der geregelten Lüftung ist hier eindeutig festzustellen. Im Sommer wurde die Lüftung aufgrund der hohen Temperaturen und der fehlenden Sommer-Bypass-Funktion zeitweise außer Betrieb genommen. Abbildung 3.26 zeigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration über den gesamten Messzeitraum. In Zeiten, in denen das Lüftungsgerät ausgeschaltet wurde, sind höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu beobachten. In den restlichen Zeiten ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration immer unter 1000 ppm und dies zumeist deutlich, trotz der sehr geringen Spitzenvolumenströme von unter 60 m<sup>3</sup>/h. Im Tagesschnitt liegen die Volumenströme bei ca. 10 m<sup>3</sup>/h (vgl. Abbildung 3.27).

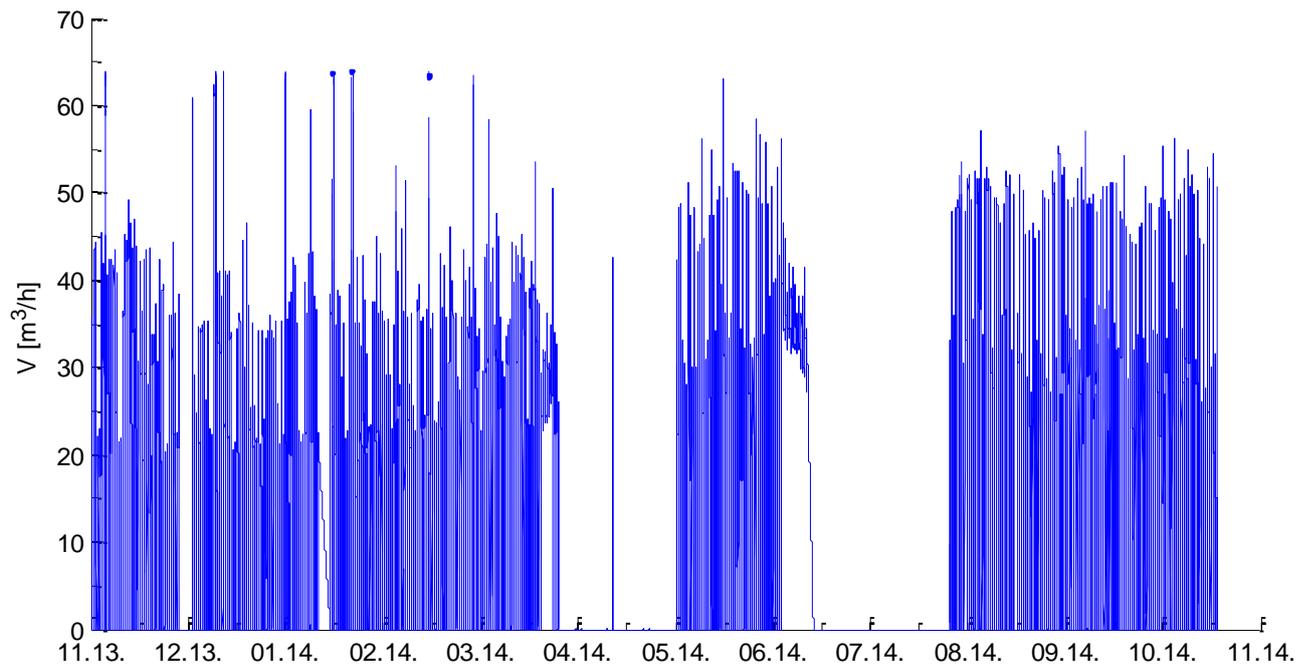


Abbildung 3.25 Volumenstrom Zuluft über den Messzeitraum (Holz-Lehm-Rahmenbauweise)

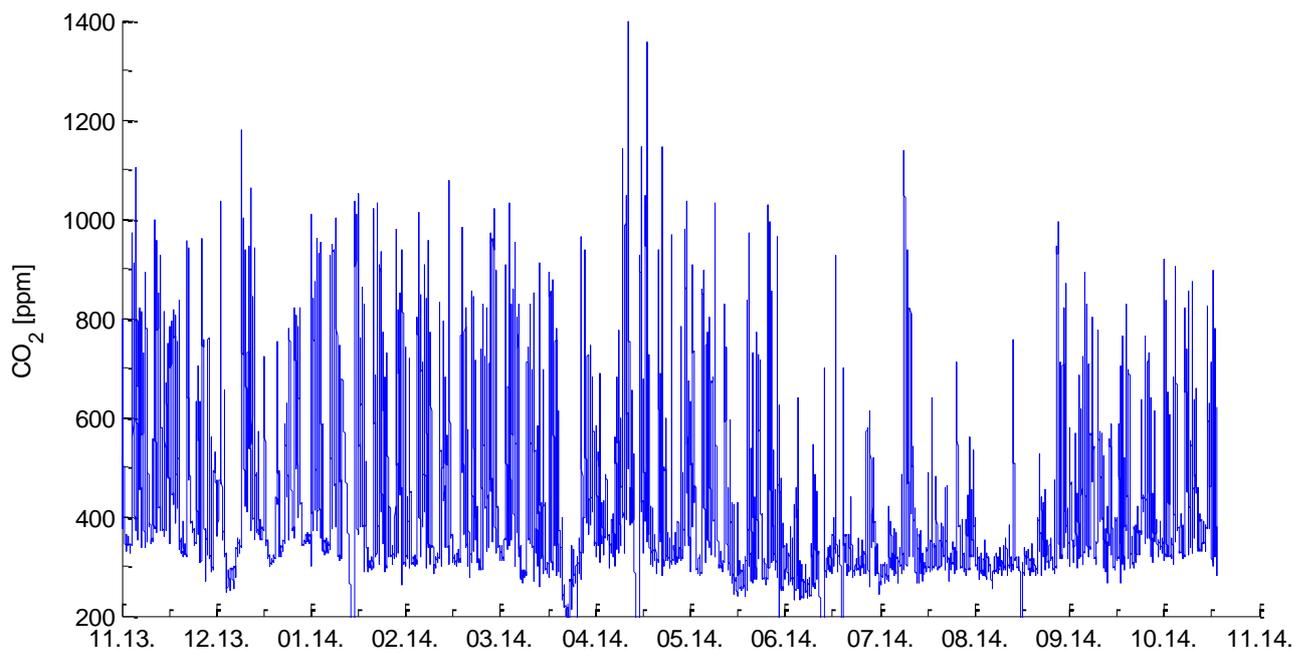


Abbildung 3.26 CO<sub>2</sub>-Konzentration über den Messzeitraum (Holz-Lehm-Rahmenbauweise)

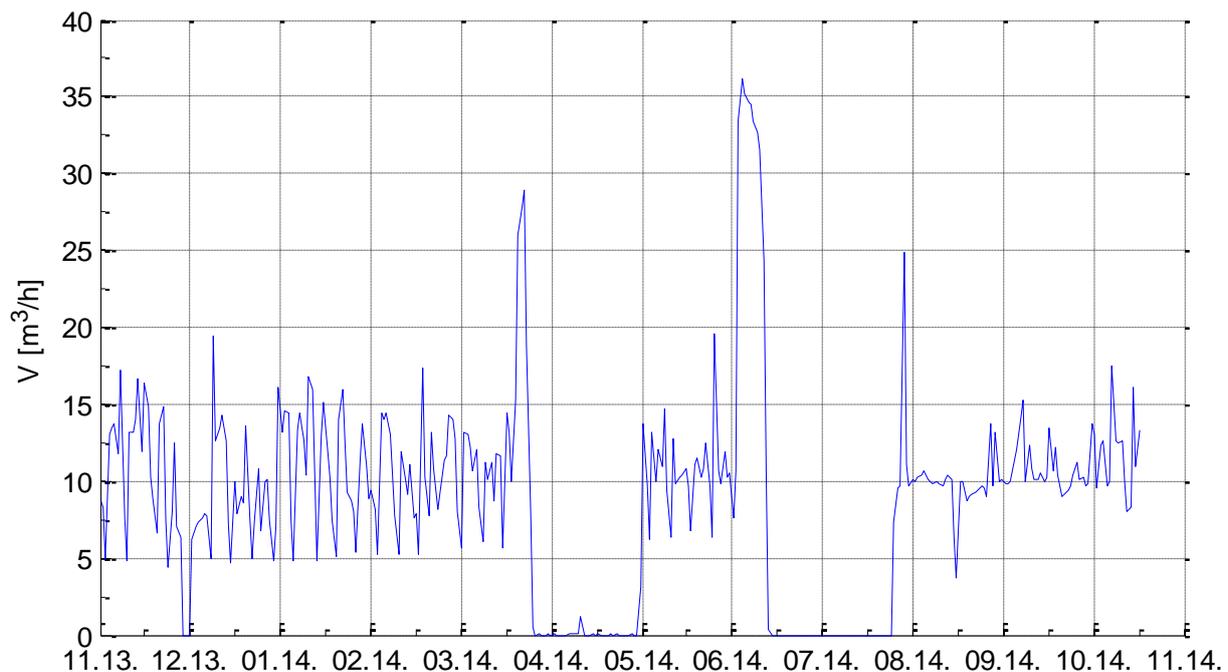


Abbildung 3.27 Volumenstrom Zuluft (Tagesmittel) über den Messzeitraum (Holz-Lehm-Rahmenbauweise)

### 3.3.4 Messungen Massivholzbauweise

Die Abbildung 3.28 zeigt den Verlauf der Raumtemperatur über den gesamten Betrachtungszeitraum von einem Jahr für den Container in Massivholzbauweise. In der Periode zwischen dem 06.05.2014 und dem 22.08.2014 sind für diese Sensoren keine Messwerte verfügbar. Dies gilt auch für alle nachfolgenden Temperatur- und Feuchtemesswerte. Im Dezember 2013 bzw. Jänner 2014 zeigt sich ein eigenartiges Benutzerverhalten. So wurde der Container über den Jahreswechsel auf fast 30 °C aufgeheizt (vermutlich Fehlbedienung oder Fehlfunktion der Heizung). Generell ist den Messdaten eine hohe Variabilität der Temperaturen im Winter zu entnehmen, welches aus dem Benutzerverhalten resultiert. An den Wochenenden (und teilweise auch in den Nächten) wurde die Heizung jeweils auf einer kleineren Stufe betreiben. Während der Bürozeiten liegt die durchschnittliche Raumtemperatur im Bereich von 22 °C. Für den Sommerbetrieb kann nahezu keine Aussage getroffen werden (insbesondere aufgrund der fehlenden Messwerte).

Die Abbildung 3.29 zeigt den Verlauf der relativen Feuchte im Raum über den gesamten Betrachtungszeitraum von einem Jahr. Im Winter liegt die relative Feuchte im Schnitt nur knapp über 25 % und fällt einige Tage darunter. Dieser Wert ist bereits sehr niedrig und liegt unter den empfohlenen Werten und kann im schlimmsten Fall gesundheitliche Probleme zur Folge haben. Die im Vergleich zur Holz-Lehm-Rahmenbauweise geringere Feuchte lässt sich einerseits durch eine geringere Personenbelegung erklären und andererseits durch

mehrere Pflanzen im Lehmcontainer. Er ist jedoch nicht auf einen Speichereffekt durch Bauteile zurückzuführen.

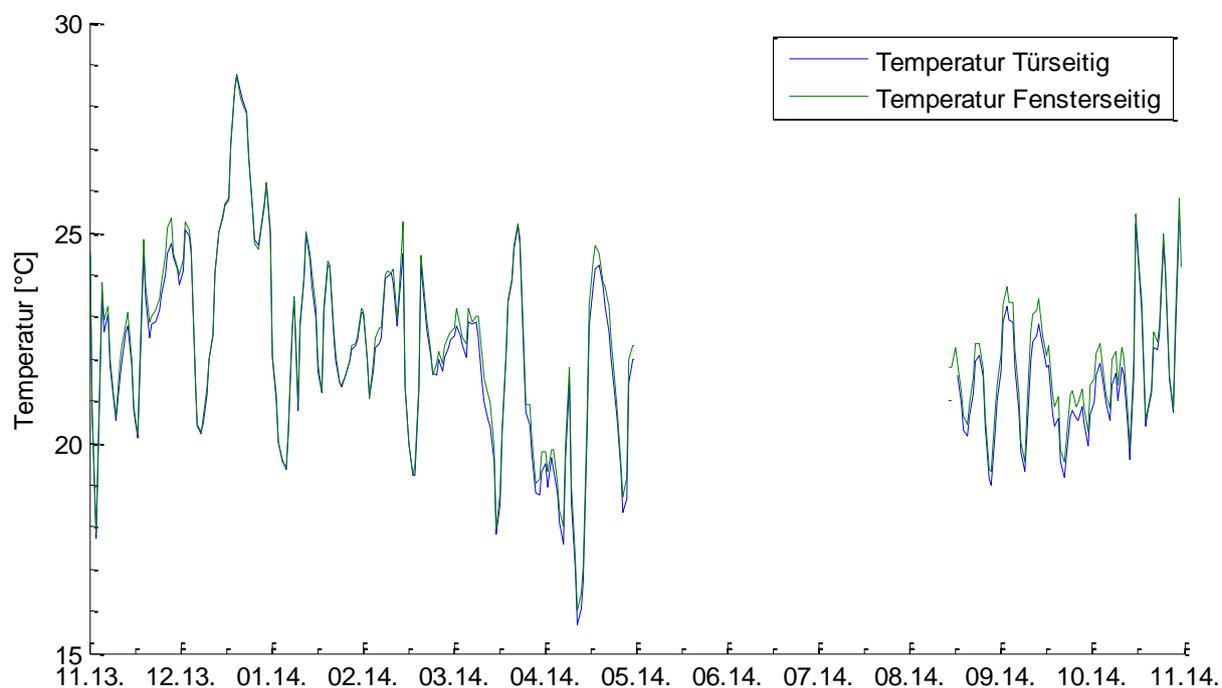


Abbildung 3.28 Raumtemperatur (Tagesmittel) Massivholzbauweise

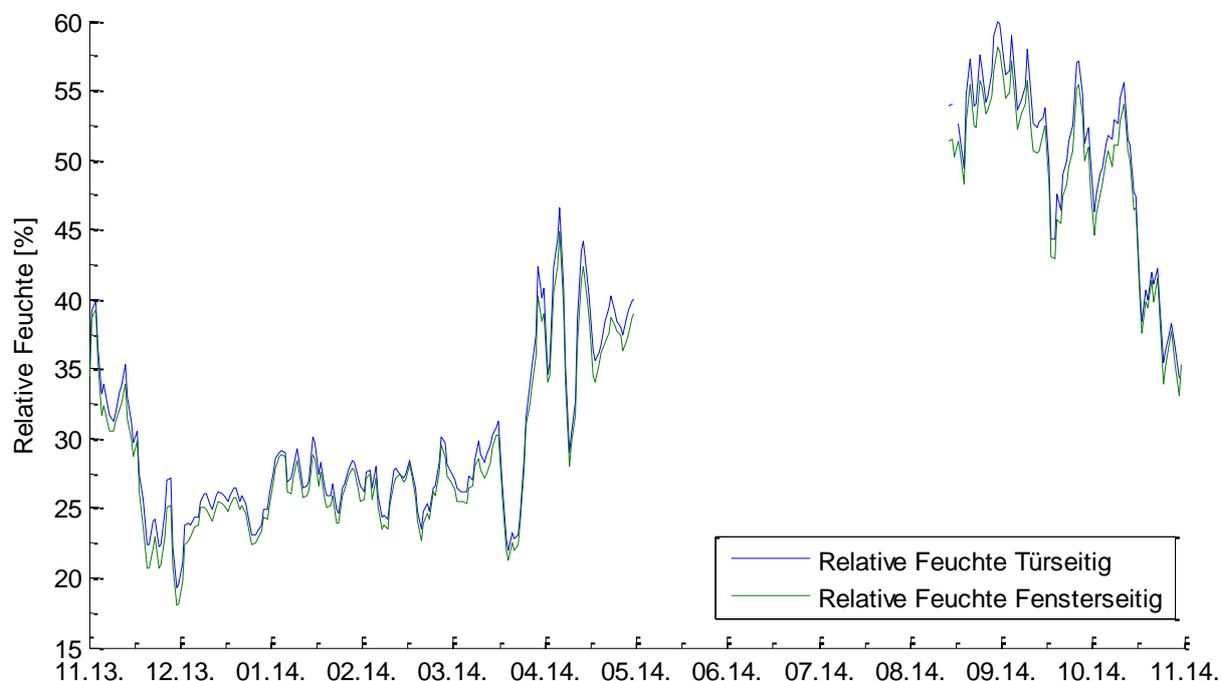


Abbildung 3.29 Relative Feuchte Raum (Tagesmittel) Massivholzbauweise

Die Abbildung 3.30, Abbildung 3.32 und Abbildung 3.34 zeigen den Temperaturverlauf bzw. die Abbildung 3.31, Abbildung 3.33 und Abbildung 3.35 den Verlauf der relativen Feuchte im



Massivholz (für die Position der Messfühler vgl. Abschnitt 3.2). Die Varianz der drei Messwerte ist für alle Bauteile etwas größer als bei der Holz-Lehm-Rahmenbauweise. Beim Temperaturverlauf ist dies durch die niedrigere Wärmeleitfähigkeit des Holzes zu erklären. Der Verlauf der relativen Feuchte besitzt nur aufgrund der höheren Varianz der Temperaturen einen ausgeprägten Verlauf, eine Feuchtespeicherung ist jedoch nicht zu erkennen. In den Temperaturverläufen kann nur eine sehr geringe Dämpfung beobachtet werden.

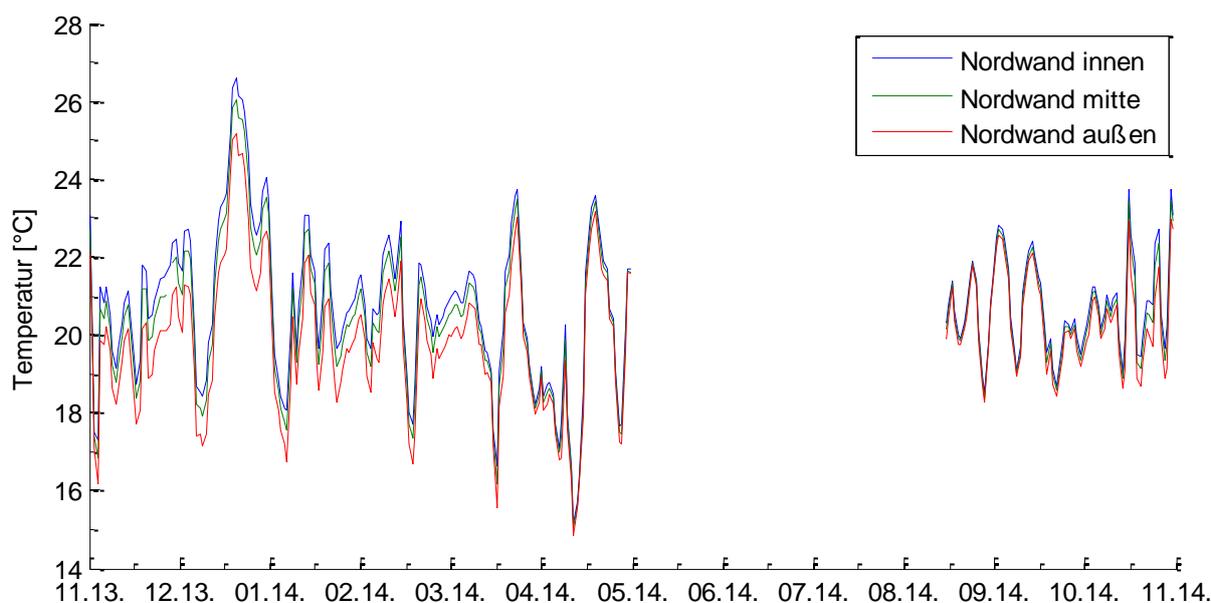


Abbildung 3.30 Temperaturverlauf Nordwand (Tagesmittel) Massivholzbauweise

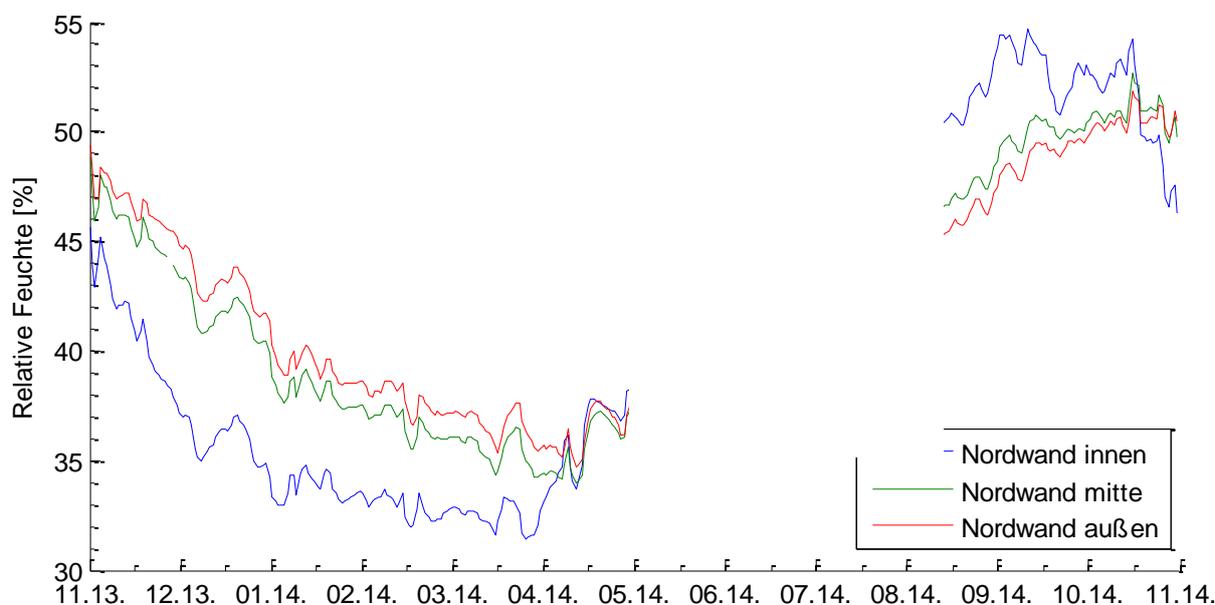


Abbildung 3.31 Verlauf relative Feuchte Nordwand (Tagesmittel) Massivholzbauweise

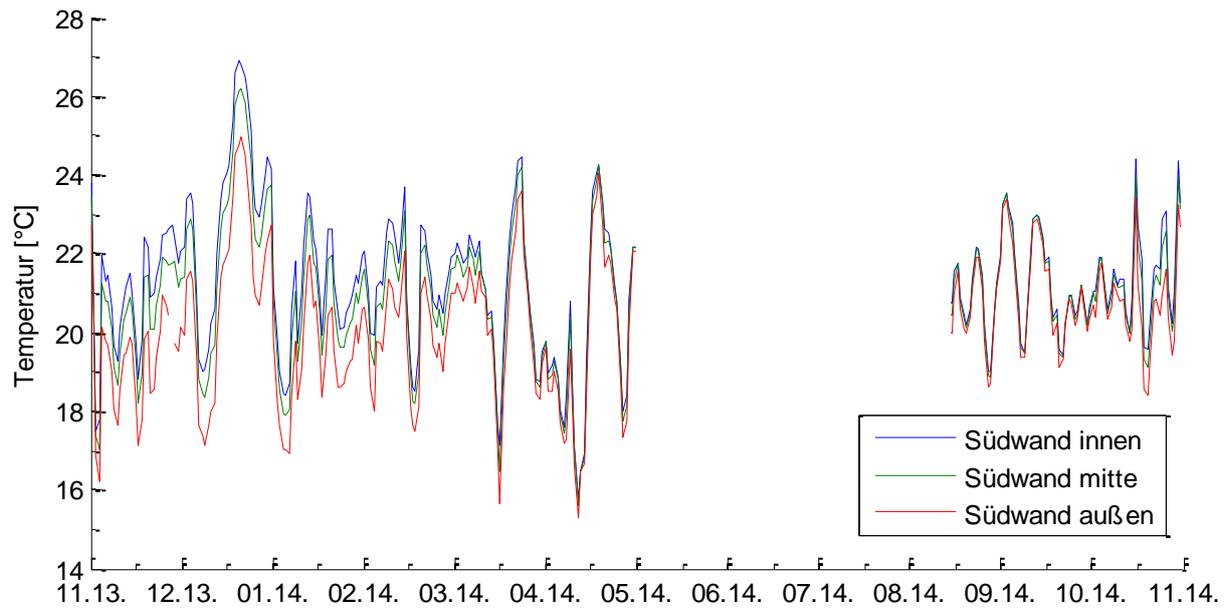


Abbildung 3.32 Temperaturverlauf Südwand (Tagesmittel) Massivholzbauweise

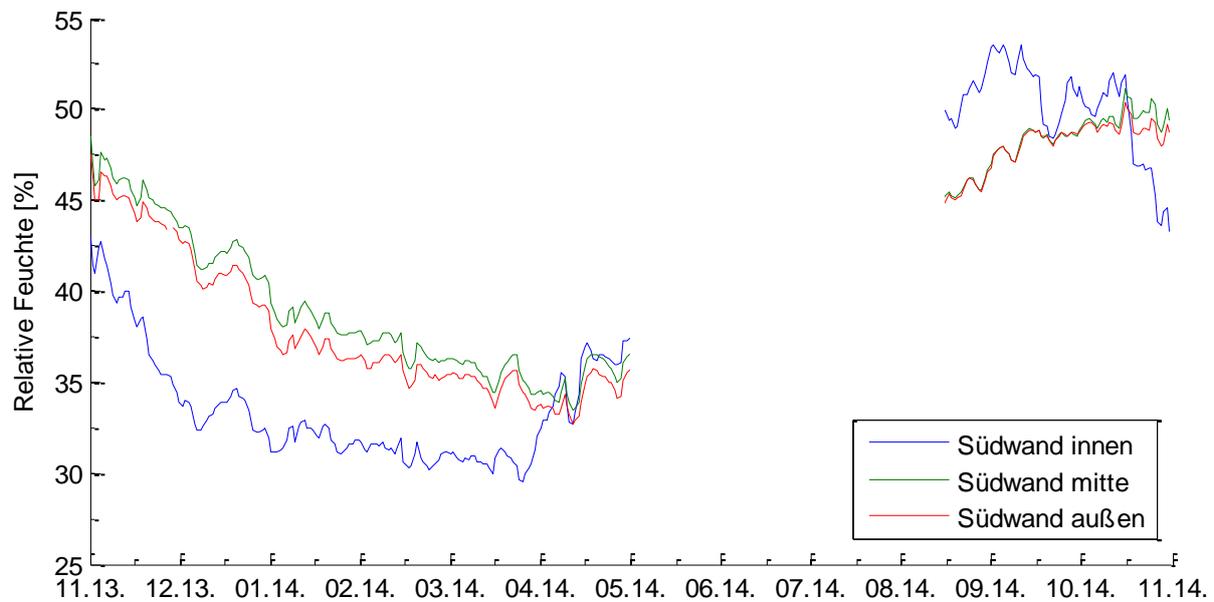


Abbildung 3.33 Verlauf relative Feuchte Südwand (Tagesmittel) Massivholzbauweise

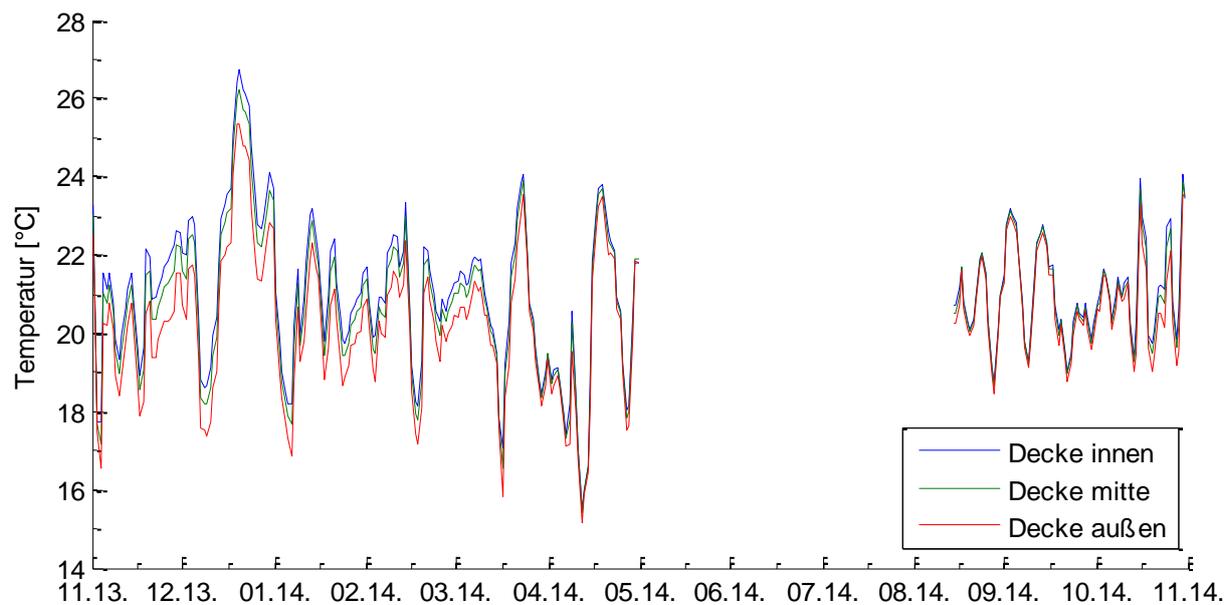


Abbildung 3.34 Temperaturverlauf Decke (Tagesmittel) Massivholzbauweise

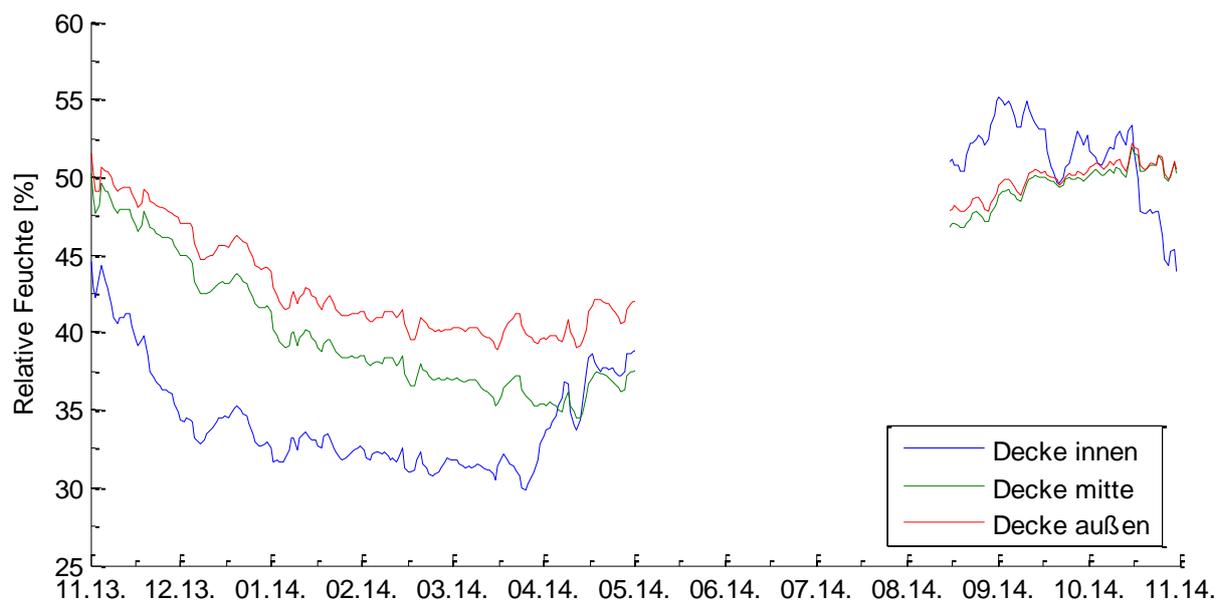


Abbildung 3.35 Verlauf relative Feuchte Decke (Tagesmittel) Massivholzbauweise

Abbildung 3.36 zeigt den Volumenstrom der Zuluft des Lüftungsgeräts über den Messzeitraum. Die Funktionsweise der geregelten Lüftung ist hier sehr schön im Tag-Nacht Rhythmus festzustellen. Abbildung 3.37 zeigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration über den gesamten Messzeitraum. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration ist teilweise knapp über 1000 ppm aber zumeist deutlich darunter, trotz der sehr geringen Spitzenvolumenströme von unter 60 m<sup>3</sup>/h. Bei diesem Lüftungsgerät sind häufiger Ausfälle in der Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu beobachten. Zu erkennen ist dies an den CO<sub>2</sub>-Konzentration von fast 2000 ppm, welche fehlerhafte Messwerte darstellen. Im Tagesschnitt liegen die Volumenströme bei ca. 10 m<sup>3</sup>/h (vgl. Abbildung 3.38). In den folgenden Abbildungen ist der Ausfall der Messdatenerfassung

des Lüftungsgeräts zu erkennen. Die Mesdatenerfassung konnte aufgrund der Komplexität des Problems nicht mehr innerhalb der Projektlaufzeit und des Projektbudgets gelöst werden.

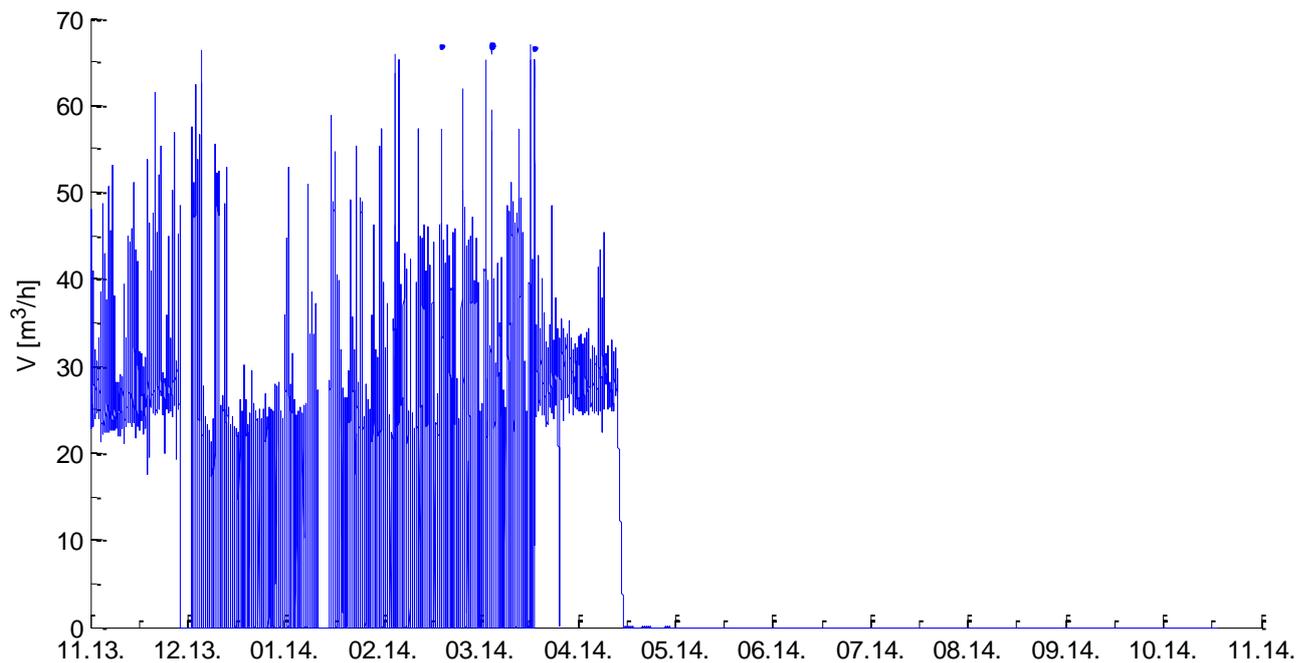


Abbildung 3.36 Volumenstrom Zuluft über den Messzeitraum (Massivholzbauweise)

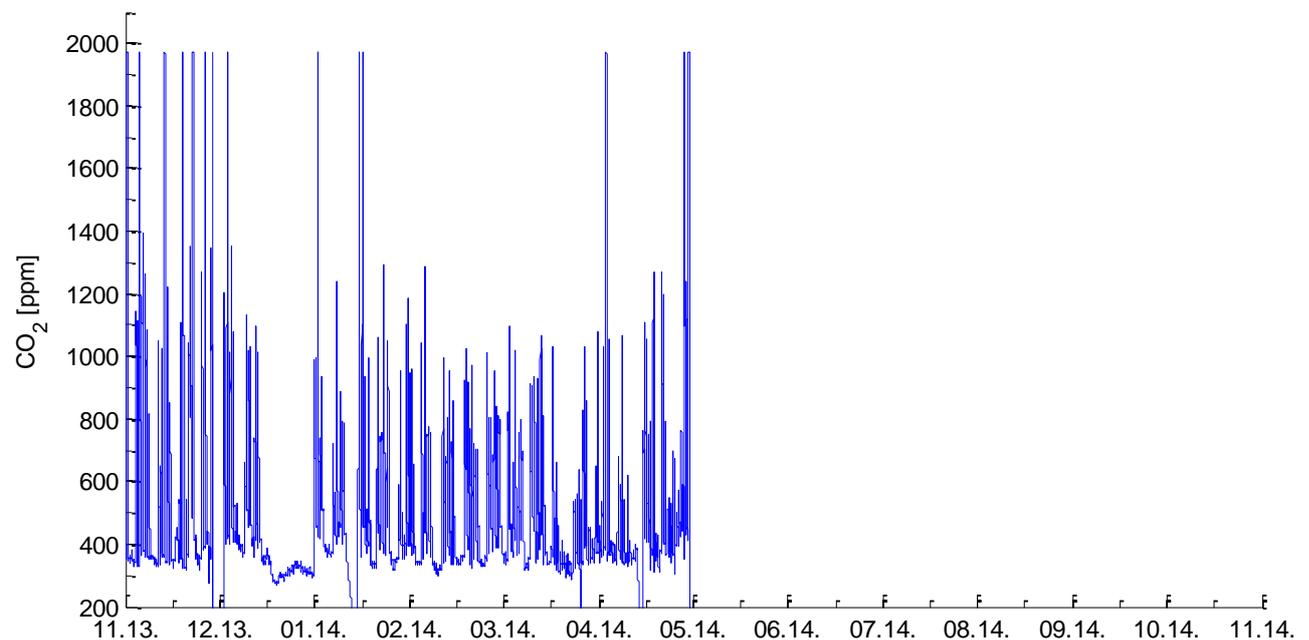


Abbildung 3.37 CO<sub>2</sub>-Konzentration über den Messzeitraum (Massivholzbauweise)

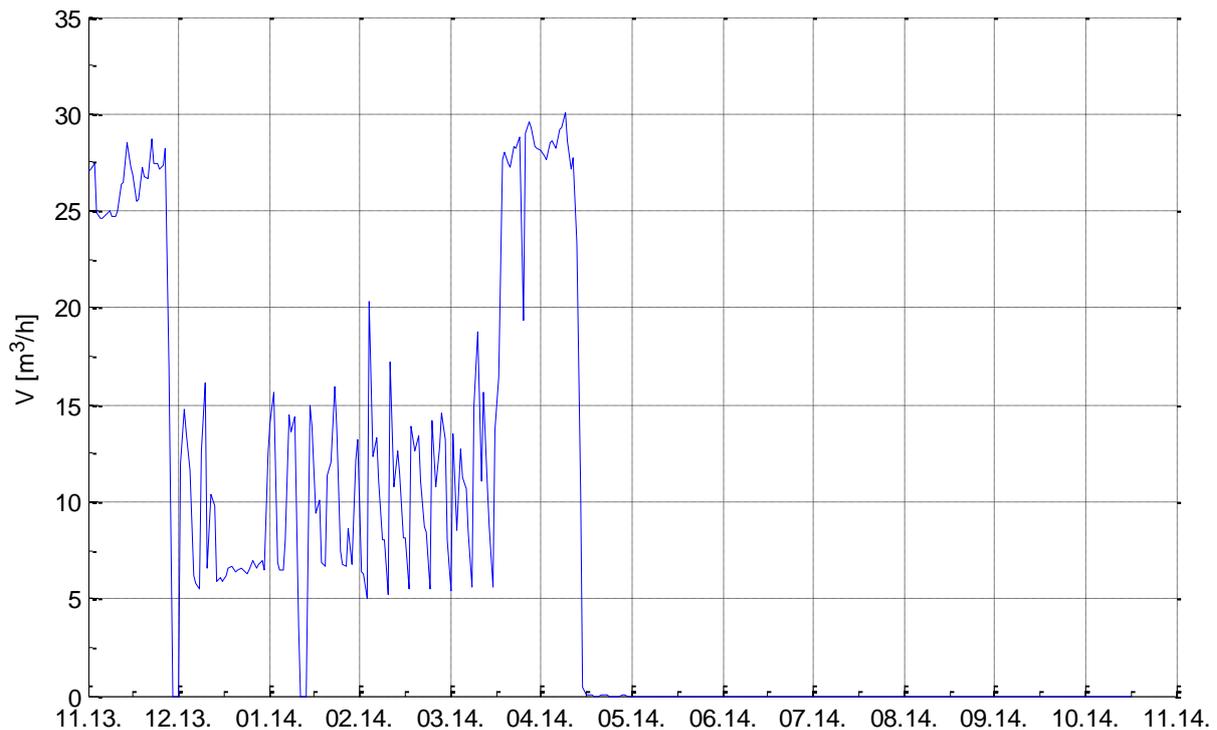


Abbildung 3.38 Volumenstrom Zuluft (Tagesmittel) über den Messzeitraum (Massivholzbauweise)

### 3.3.5 Messungen Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden

Die Auswertung der Messdaten im Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden liefert kein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Gründe hierfür sind vielseitig, aber insbesondere eine Vielzahl von defekten Sensoren erlaubt keine detaillierte Messdatenauswertung über den Betrachtungszeitraum. Die Defekte an den Sensoren dürften Großteils beim Einbauen der Lehmwände aufgetreten sein.

Ein kleiner Ausschnitt der Messdaten (Austrocknungsphase Lehm) wurde die für Validierung des hygrothermischen Bauteilmodells verwendet (vgl. Kapitel 4.4.1). Die dort verwendeten Messdaten sind eben dort zu finden. Es standen bereits zu diesem Zeitpunkt nicht alle Messwerte zur Verfügung und die Anzahl der Defekte nahm nach der Austrocknungsphase weiter zu.

Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen Modell und Realität (vgl. Kapitel 4.4.2) kann jedoch mit den Simulationen (vgl. Kapitel 4.7) ausreichend gute Aussagen auch ohne die Verifizierung mit Messdaten getroffen werden.



## 4 AP 4 - SIMULATIONEN UND OPTIMIERUNG

---

### 4.1 SIMULATIONSPROGRAMME

#### 4.1.1 Matlab/Simulink mit der Toolbox CARNOT

Matlab ist ein Softwareprogramm für numerische Mathematik. Die Toolbox Simulink bietet eine graphische Oberfläche zur Modellierung von Simulationen an und ermöglicht somit eine sehr intuitive Arbeitsweise. Das CARNOT Blockset (Conventional And Renewable Energy Systems Optimization Blockset) stellt eine Erweiterung für Matlab/Simulink dar und wurde vom Solarinstitut Jülich entwickelt. Mithilfe dieses Blocksets können Gebäudesimulationen durchgeführt werden.

In der CARNOT- Toolbox wird eine Wand mit dem sogenannten Beuken-Modell berechnet. Es beschreibt die Wärmeleitfähigkeiten zwischen verschiedenen Materialschichten des Wandaufbaus als R-C-(Widerstands-Kapazitäten-) Netzwerk. Die Widerstände in den Wänden werden mit den jeweiligen Wärmedurchlasswiderständen  $R_i$  je Schicht berechnet. Die Kapazitäten werden aufgeteilt, wobei immer die Hälfte der angrenzenden Kapazitäten aufaddiert wird. An den beiden Oberflächen sind zwei Widerstände (Wärmeübergangswiderstände) parallel angeordnet, die den letzten Wandtemperaturknoten mit dem Luft- und Strahlungstemperaturknoten verbinden.

Die Temperatur des Luftknotens an der Außenseite entspricht der Umgebungstemperatur und wird abhängig von der Windgeschwindigkeit berechnet. Der Strahlungsknoten berücksichtigt den Strahlungsaustausch mit der Umgebung. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass 50 % der Strahlung mit dem Himmel und 50 % mit dem Boden ausgetauscht werden. Im Innenraum wird ein 2-Stern-Modell verwendet, d.h. es sind ebenfalls zwei Temperaturknoten vorhanden. Der konvektive Knoten beschreibt die Lufttemperatur die sich aus der Bilanz des Luftwechsels, dem Wärmeaustausch mit den Wänden und internen Quellen ergibt. Für den Strahlungsknoten wird ein Ersatzsystem verwendet. In der Realität ist zwischen allen Wänden ein gegenseitiger Strahlungsaustausch vorhanden. Diese Strahlungsmengen hängen von der Raumgeometrie ab und werden bei der Berechnung von größeren Modellen sehr aufwendig. Es wird vereinfachend ein fiktiver Raumknoten eingeführt. Der Strahlungsaustausch einer Wand und internen Quellen erfolgt nur mit diesem Raumknoten. So entsteht eine fiktive Strahlungstemperatur.

Da es sich nicht um ein geometrisch korrektes mehrdimensionales Modell handelt, können Wärmebrücken nur teilweise durch die Verwendung fiktiver Wände berücksichtigt werden.

Im Zuge von (Siegele, 2013) wurde das CARNOT Blockset um ein hygrothermisches Bauteilmodell ergänzt, um den Transport von Wasserdampf durch das Bauteil berücksichtigen zu können. Der Transport erfolgt durch Diffusion und Feuchtetransport. Die Feuchtespeicherung kann über eine Sorptionsisotherme abgebildet werden (Ochs, et al., 2013 S. 112-114).

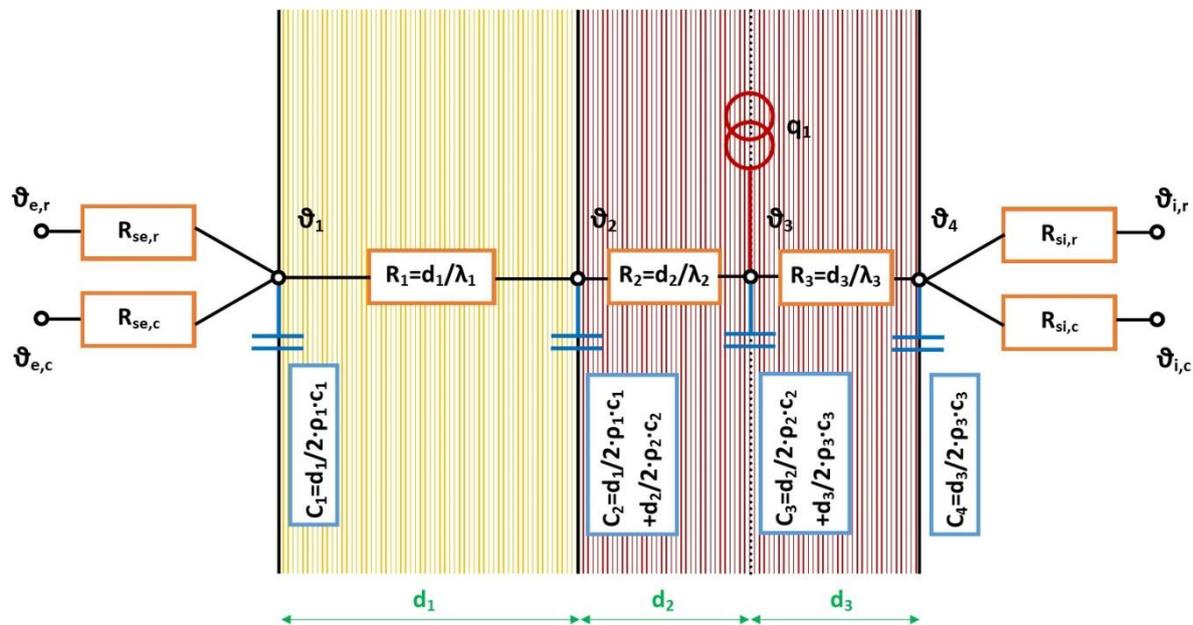


Abbildung 4.1 R-C-Modell (Beuken) mit Quelle (Siegele, 2013 S. 20)

## 4.1.2 Dynbil

Dynbil ist instationäres Simulationsprogramm. Einzelne Zonen sind mit einem instationär arbeitenden Strömungsmodell miteinander verknüpft. Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  sind im Modell temperaturabhängig. Wärmebrücken werden explizit über eindimensionale Ersatzdarstellungen berücksichtigt. Dynbil war zunächst nur für Wärmetransportmodelle ausgelegt und wurde später für Feuchtetransportprobleme erweitert (Ochs, et al., 2013 S. 116).

Folgende Aspekte werden in Dynbil berücksichtigt:

- Instationäre Wärmeströme (Mehrkapazitäten-Netzwerkmodell) inkl. eindimensionaler Ersatzdarstellungen für Wärmebrücken; explizites Lösungsverfahren der Fouriergleichung.
- Temperaturabhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangs an Oberflächen im Raum; Temperaturabhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangs im ebenen Spalt (z.B. in Scheibenzwischenräumen).





### 4.1.3 TRNSYS

Bei der Simulationssoftware TRNSYS in der Version 16 handelt es sich um eine kommerziell verfügbare Software für thermische Gebäudesimulationen. Für die grundlegende Funktions- und Arbeitsweise von TRNSYS sei auf die Dokumentation des Herstellers verwiesen (TRANSSOLAR Software).

### 4.1.4 PHPP

Das PHPP (Passivhaus Projektierungspaket) wurde vom Passivhausinstitut Darmstadt (Passivhaus Institut) entwickelt und ermöglicht die monatsweise Berechnung des Heizwärmebedarfs und einer charakteristischen Heizlast. In dieser Arbeit wurde PHPP 8 verwendet. Für die Dokumentation sei auf das dazugehörige Handbuch verwiesen.

### 4.1.5 Delphin

Die thermischen und hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels FDM wurden mit dem Programm Delphin 5 (Institut für Bauklimatik, TU Dresden) durchgeführt. Für die Dokumentation sei auf den Hersteller verwiesen.

## 4.2 SIMULATIONSOBJEKTE

### 4.2.1 Container in Massivholzbauweise

#### 4.2.1.1 Geometrie

Der Doppelcontainer hat eine Grundfläche von 27,51 m<sup>2</sup> und ein Raumvolumen von 71,38 m<sup>3</sup> bezogen auf die Innenmaße. Es befinden sich zwei Flügelfenster (Dreh-Kipp) und zwei Fenster mit Fixverglasung in der Westwand und eine Tür in der Ostwand. Der Container steht auf sechs Stützen und hat keinen direkten Kontakt mit dem Untergrund. Der Deckenaufbau ist Teil der thermischen Hülle und wird durch einen Dachaufbau vor Witterungseinflüssen wie Schnee und Regen geschützt. Der Zwischenraum wird jedoch zu einem gewissen Grad durchlüftet und es herrschen dort näherungsweise Außentemperaturen (siehe Anhang).

*Tabelle 4.1 Abmessungen Raum*

Länge	5,865 [m]	Volumen	71,38 [m <sup>3</sup> ]
Breite	4,69 [m]	Grundfläche	27,51 [m <sup>2</sup> ]
Höhe	2,595 [m]		



Tabelle 4.2 Geometriedaten Wände, Fenster und Tür

	Azimuth	Höhe	Länge	Anzahl	A <sub>Ges</sub>	A <sub>Red</sub>
	[°]	[m]	[m]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
Wand Nord	180	2,55	5,819	1	14,84	-
Wand West	90	2,55	4,644	1	11,84	9,31
Wand Süd	0	2,55	5,819	1	14,84	-
Wand ost	-90	2,55	4,644	1	11,84	7,40
Tür	90	2,20	1,15	1	2,53	-
Fenster	-90	1,20	1,85	2	4,44	-

#### 4.2.1.2 Wand -,Boden- und Deckenaufbau

Tabelle 4.3 Aufbauten Massivholzcontainer

<b>Bodenaufbau</b> U=0,157 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Lärchenboden	25,00	0,130	236
Schafwolle	40,00	0,054	2
Brettsperrholzplatte	96,00	0,130	236
Thermo-Hanf *	200,00	0,049	2
Schalung	25,00	0,130	236
Diffusionsfolie / offen	0,95	0,150	22
<b>Dachaufbau</b> U=0,164 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Brettsperrholzplatte	96,00	0,13	236
Thermo-Hanf*	240,00	0,049	2
Proklima DA	0,90	0,150	22
Schalung	25,00	0,130	236
<b>Wandaufbau</b> U=0,172 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Brettsperrholzplatte	96,00	0,130	236
Thermo-Hanf*	240,00	0,049	2
Pro Klima Windpapier	0,45	0,150	22
Rhombusschalung**	25,00	0,130	40

\* Die Dämmschicht beinhaltet 10% Holzlattungen, die die mittlere Wärmeleitfähigkeit erhöhen.

\*\* Die Rhombusschalung ist keine durchgehende Schicht und wird daher bei der Berechnung des U-Werts sowie dem Diffusionswiderstandes nicht berücksichtigt.

#### 4.2.1.3 Fenster

In der Westwand gibt es zwei Fenster mit jeweils zwei Flügeln (jeweils einer davon fix). Es sind die U-Werte für die Verglasung sowie den Rahmen bekannt und zusätzlich die linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten  $\psi$  für den Einbau und die Glas-Rahmenverbindung. Daraus lässt sich ein mittlerer U-Wert für ein Fenster, wie in Tabelle 4.4 Kennwerte für ein Doppelflügel Fenster Abbildung 4.3 dargestellt, bestimmen. In Dynbil können die Wärmebrücken und die U-Werte für Rahmen und Verglasung direkt berücksichtigt werden.

$U_{\text{Verglasung}}$	0,700	[W/m <sup>2</sup> K]
$U_{\text{Rahmen (mittel)}}$	0,730	[W/m <sup>2</sup> K]
$\psi_{\text{Glasrand (mittel)}}$	0,038	[W/mK]
$\psi_{\text{Einbau (mittel)}}$	0,010	[W/mK]
$A_{\text{Fenster}}$	2,22	[m <sup>2</sup> ]
$A_{\text{Glas}}$	1,58	[m <sup>2</sup> ]
Umfang Einbau	6,10	[m]
Umfang Glas	6,58	[m]
$U_{\text{mittel}}$	0,849	[W/m <sup>2</sup> K]
g-Wert	0,50	[-]

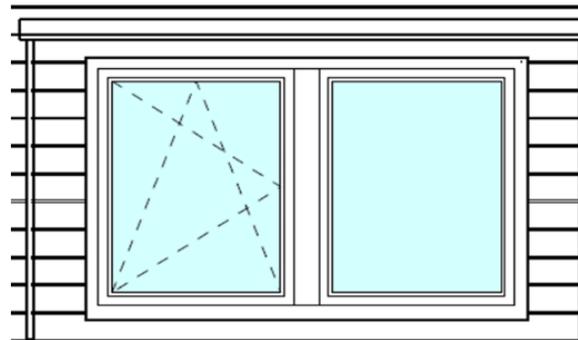


Tabelle 4.4 Kennwerte für ein Doppelflügel Fenster

Abbildung 4.3 Doppelflügel Fenster

## 4.2.2 Holz-Lehm-Rahmenbauweise

Der Holz-Lehm-Rahmenbau-Container ist genauso ausgerüstet wie der Massivholz-Container. Die Unterschiede sind die Aufbauten und die Orientierung (vgl. Anhang). Das Fenster ist nach Osten ausgerichtet und die Türe nach Westen. Die Flächen bezogen auf die Innenmaße weichen aufgrund der unterschiedlichen Wandstärken leicht von denen der Massivholzvariante ab.

### 4.2.2.1 Geometrie

Tabelle 4.5 Abmessungen Raum

Länge	5,819 [m]	Volumen	68,91 [m <sup>3</sup> ]
Breite	4,644 [m]	Grundfläche	27,02 [m <sup>2</sup> ]
Höhe	2,55 [m]		

Tabelle 4.6 Geometriedaten Wände, Fenster und Tür

	Azimuth	Höhe	Länge	Anzahl	$A_{\text{Ges}}$	$A_{\text{Red}}$
	[°]	[m]	[m]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
Wand Nord	180	2,55	5,819	1	14,84	-
Wand West	90	2,55	4,644	1	11,84	9,31
Wand Süd	0	2,55	5,819	1	14,84	-
Wand ost	-90	2,55	4,644	1	11,84	7,40
Tür	90	2,20	1,15	1	2,53	-
Fenster	-90	1,20	1,85	2	4,44	-



## 4.2.2.2 Wand-, Boden- und Deckenaufbau

Table 4.7 Aufbauten Rahmenbauweise

<b>Wandaufbau</b> U=0,173 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Lehm	10,00	0,700	11
Lehm-Holz**	8,00	0,635	11
Lehm-Holz*	40,00	0,643	11
Schafwolle-Holz	60,00	0,054	2
pro clima intello	0,20	0,200	18750
Diagonalschalung	25,00	0,130	236
Hanf-Holz*	200,00	0,049	2
pro clima Solitex WA	0,4500	0,150	22
<b>Deckenaufbau</b> U=0,168 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Lehm	10,00	0,700	11
Lehm-Holz**	8,00	0,635	11
Lehm-Holz*	40,00	0,643	11
Schafwolle	60,00	0,054	2
pro clima intello	0,20	0,200	18750
Diagonalschalung	25,00	0,130	236
Hanf-Holz*	200,00	0,049	2
Schalung	25,00	0,130	236
pro clima Solitex WA	0,900	0,150	22
<b>Bodenaufbau</b> U=0,170 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Lärchenboden	25,00	0,130	236
Schafwolle	40,00	0,054	2
pro clima intello	0,20	0,200	18750
Diagonalschalung	25,00	0,130	236
Hanf-Holz ***	120,00	0,052	2
Hanf-Holz*	100,00	0,049	2
Schalung	25,00	0,130	236
diffu Light Folie	0,95	0,150	22

- \* Die Schicht beinhaltet 10 % Holzlattungen mit einem U-Wert von 0,13 [W/m<sup>2</sup>K], die die mittlere Wärmeleitfähigkeit erhöhen.
- \*\* Schicht beinhaltet 10 % Holzphase mit einem U-Wert von 0,050 [W/m<sup>2</sup>K], die die mittlere Wärmeleitfähigkeit verändern.
- \*\*\* Schicht beinhaltet 13 % Holzlattungen mit einem U-Wert von 0,13 [W/m<sup>2</sup>K], die die mittlere Wärmeleitfähigkeit verändern.

## 4.2.3 Referenzcontainer

Um die Unterschiede der Holzbaucontainer zu einem herkömmlichen Bürocontainer zu ermitteln wird ein Referenzcontainer definiert. Für die Abmessungen wird dieselbe Geometrie verwendet wie für den Holz-Lehm-Rahmenbau bezogen auf die Innenmaße. Der



Wandaufbau des Referenzcontainers ist in Tabelle 4.8 angegeben. Weiter wird die Annahme getroffen, dass der Container eine 2-Scheiben-Verglasung, keine mechanische Lüftung und somit keine Wärmerückgewinnung besitzt. Der Luftwechsel erfolgt durch Stoßlüften. Die Ausrichtung der Fensterfläche erfolgt in Abhängigkeit des zu untersuchenden Vergleichs.

Tabelle 4.8 Wandaufbau des Referenzcontainers

<b>Wandaufbau</b> U=0,35 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Sperrholzplatte	10,0	0,13	1200
Mineralwolle	100,0	0,038	1
Stahl profiliert	0,006	50	10000

#### 4.2.4 Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden

In einem weiteren Schritt wird untersucht, welchen Einfluss eine Lehmschicht auf einen herkömmlichen Bürocontainer besitzt. Dazu werden die Nord- und die Südwand, also jene Wände welche keine Fenster oder Türen beinhalten, mit einer Lehmschicht nachgerüstet. Der modifizierte Wandaufbau ist in Tabelle 4.9 angeführt.

Tabelle 4.9 Aufbau des Referenzcontainers mit nachgerüsteten Lehmwänden

<b>Wandaufbau</b> U=0,29 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Feinlehm	6,00	0,700	12
Groblehm	14,0	0,635	10
Alukaschierung	0,001	263	1000
PU-Dämmung	20,0	0,03	60
Alukaschierung	0,001	263	1000
Sperrholzplatte	10,0	0,13	1200
Mineralwolle	100,0	0,038	1
Stahl profiliert	0,006	50	10000

### 4.3 WETTERDATEN

Jedes der verwendeten Simulationsprogramme verlangt sein eigenes Dateiformat. Alle Eingabedatensätze wurden mit der Software Meteororm 6 (Meteotest) erstellt. Es ist trotzdem notwendig zu überprüfen, ob die Wetterdatensätze zusammenpassen. Hier werden vereinfacht die Mittel- bzw. Summenwerte über ein Jahr betrachtet (Tabelle 4.10).

Obwohl die berechneten Werte ident sind, können gerade bei der Solarstrahlung dennoch Unterschiede entstehen. Bei der Simulation mit Dynbil muss bereits bei der Wahl der Klimadatei entschieden werden, welches Berechnungsmodell zur Ermittlung der Solarstrahlung verwendet wird. Bei der Strahlungsberechnung nach Perez, benötigt Dynbil



drei weitere Spalten in der Klimadatei. Je nach Berechnungsmodell entstehen Unterschiede in den solaren Gewinnen von bis zu 10 %.

*Tabelle 4.10 Kennwerte des Klimadatensatzes*

	<b>Einheit</b>	<b>Dynbil</b>	<b>CARNOT</b>	<b>PHPP</b>	<b>TRNSYS</b>
$\vartheta_{e,mean}$	[°C]	9,04	9,04	9,0	9,04
$\vartheta_{sky,mean}$	[°C]	-2,45	-2.45	n/a	-2.45
$\varphi_{e,mean}$	[%]	76,00	76,29	n/a	76,29
$x_{e,mean}$	[g/kg]	5,81	5,82	n/a	5,82
$I_{diff,sum}$	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]	582,02	582,04	n/a	582,04
$I_{g,sum}$	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]	1102,68	1110,09	1110	1110,09

## 4.4 VALIDIERUNG DES SIMULATIONSMODELLS MIT MESSDATEN

### 4.4.1 Validierung des hygrothermischen Modells

Für die weitere Bewertung welche im Rahmen dieses Projekts durch die Simulationen getroffen werden wird das Simulationsprogramm CARNOT verwendet. Im Rahmen von (Siegele, 2013) wurde das hygrothermische Wandmodell ausführlich validiert. Für die Validierung wurden Messdaten des nachgerüsteten Stahlcontainers verwendet. Der folgende Abschnitt stammt daraus.

Für die Validierung wird auf die Messwerte des Stahlcontainers mit zwei Lehmwänden zurückgegriffen. Die Messdaten umfassen einen Zeitraum von 10 Tagen und zeigen das Austrocknungsverhalten des Lehms. Ab Beginn des verwendeten Zeitraums ist der Lehm bereits chemisch nahezu vollständig abgebunden, es ist jedoch noch überschüssiges Wasser vorhanden.

In Abbildung 4.4 sind das Gebäudemodell des Containers und die ungefähre Lage der Sensoren abgebildet.

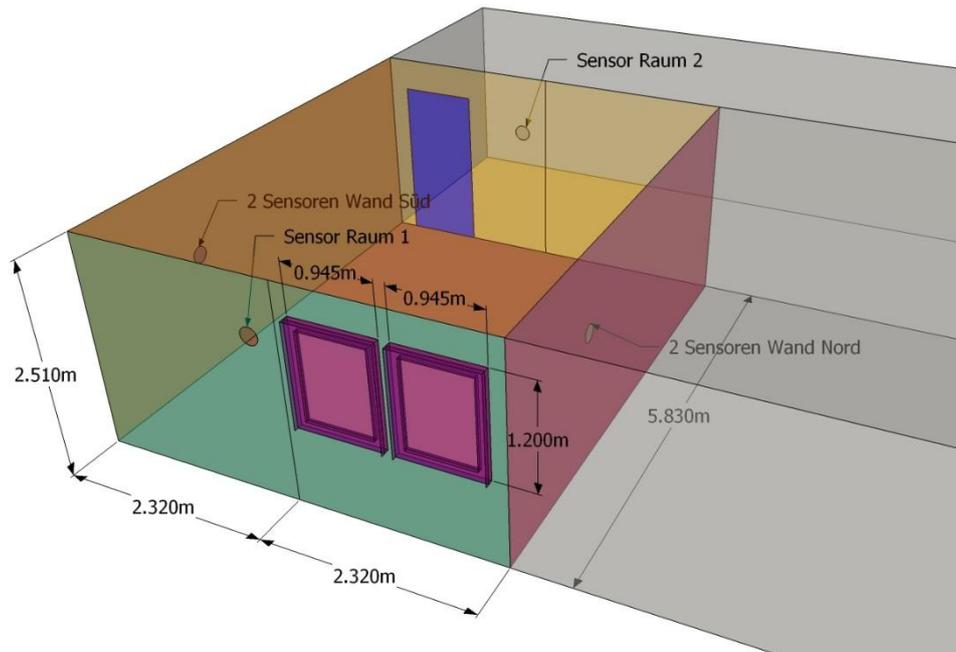


Abbildung 4.4 Nachgerüsteter Stahlcontainer

In Tabelle 4.11 ist der Wandaufbau für die südliche Außenwand dargestellt. Die genaue Lage der Sensoren nicht bekannt. Es wird jedoch aufgrund der Planung und der Messung Simulationsergebnisse davon ausgegangen, dass der erste Sensor im hinteren Bereich des Groblehms und der zweite Sensor an der Grenzschicht zwischen Grob- und Feinlehm liegt.

Tabelle 4.11 Aufbau der südlichen Außenwand

S	Material	Dicke [mm]	$\mu$ [-]	$u_{fs}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Materialtyp Delphin
1	Feinlehm	6.0	12	237.0	Insulation-Clay-Cork-FW
2	Groblehm	14.0	10	572.5	Insulation-Clay-Cork-FW
3	Alukaschierung	0.001	1000	0.1	PE-Foil
4	PU-Dämmung	20.0	60	949.0	PU-Foam
5	Alukaschierung	0.001	1000	0.1	PE-Foil
6	Sperrholzplatte	10.0	1200	350.0	OSB Board
7	Mineralwolle	100.0	1	900.0	Mineral Wool
8	Stahl profiliert	0.006	10000	0.0	PE-Foil

Die verwendeten Materialwerte entsprechen jenen aus Kapitel 3.1. In Abbildung 4.5 ist die Sorptionsisotherme des Lehms dargestellt, welche für die Validierung verwendet wurde.

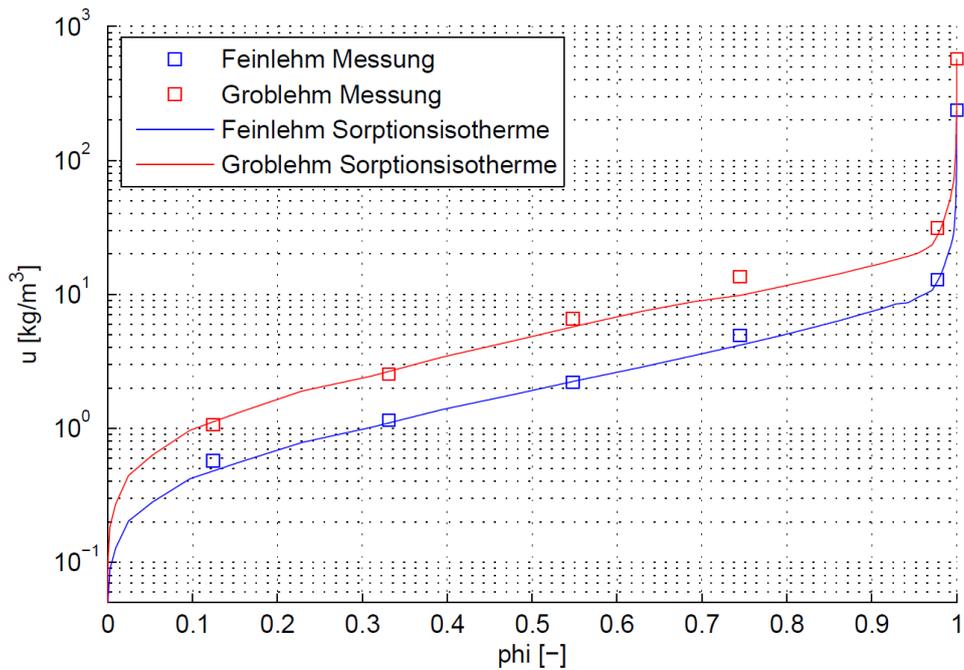


Abbildung 4.5 Sorptionsisotherme für die Validierung

Zusätzlich zu den in Abbildung 4.4 eingezeichneten Sensoren (Temperatur und Feuchte) sind Messdaten der Umgebung verfügbar. Diese stammen von den PASSYS-Zellen der Universität Innsbruck. Die Messdaten der Umgebung umfassen Temperatur und Feuchte am Standort der PASSYS-Zellen und Globalstrahlung auf die südorientierte vertikale Fläche. Die Globalstrahlung auf die horizontale Fläche wird näherungsweise durch einen Tageslichtsensor und die gemessene Globalstrahlung der Südfäche bestimmt. Der Einfluss von Wind wird vernachlässigt, da dieser einerseits sehr vom Standort abhängt und andererseits der Einfluss auf den Feuchtetransport aufgrund der profilierten Stahlfassade gering ist. Die Messdaten finden sich in den Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7.

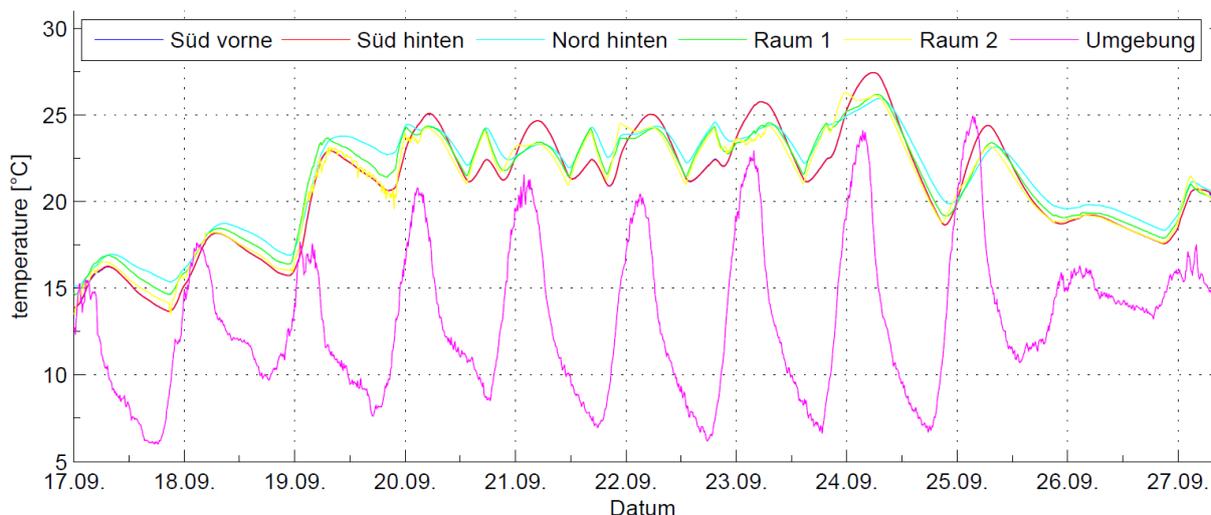


Abbildung 4.6 Messwerte für Temperatur

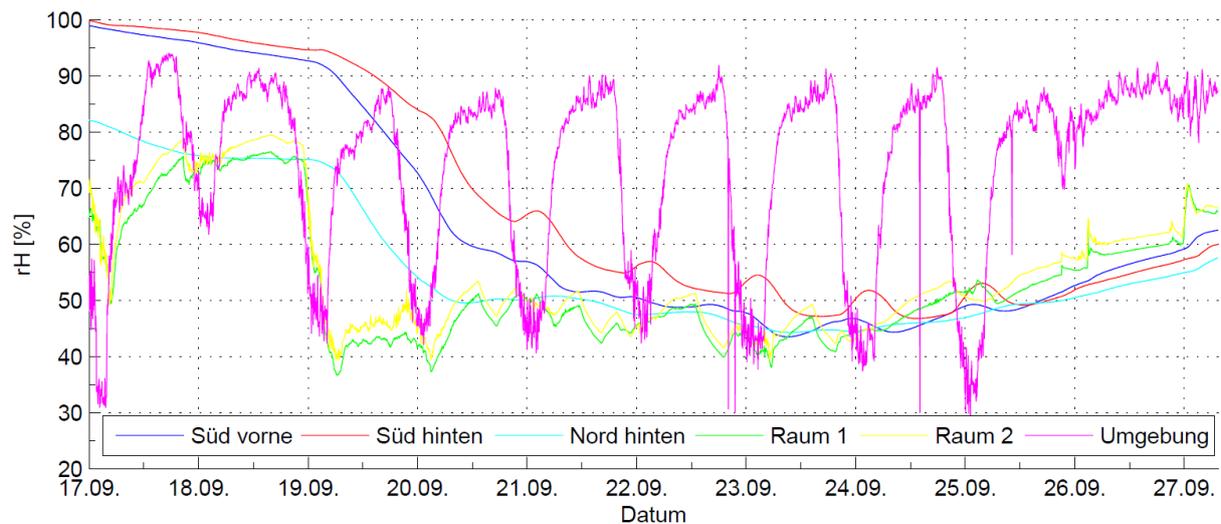


Abbildung 4.7 Messwerte für relative Feuchte

Zudem ist bekannt, dass sich im Zeitraum der Messung keine Personen dauerhaft im Container aufgehalten haben. Die Fenster waren im Zeitraum der Messung durchgängig gekippt. Es ist zudem bekannt, dass der Raum erst ab Stunde 6274 mit einer Soll-Temperatur von 22,0 °C beheizt wird. Ab Stunde 6440 wird die Soll-Temperatur auf 18,0 °C geändert.

Für die Validierung des hygrothermischen Wandmodells wird zuerst nur die südliche Außenwand modelliert, welche die Messdaten als Randbedingungen erhält. Die Simulationsergebnisse für die Temperaturen und relativen Feuchten in der Wand werden anschließend mit den Messdaten von den verbauten Sensoren verglichen.

Die Anfangsfeuchte im Lehm ist aus den Messungen bekannt. Für die Feuchte in der PU-Dämmung und in der Sperrholzplatte ist dies nicht der Fall. Der Einfluss der Anfangsbedingungen auf die Simulationsergebnisse ist signifikant. Insbesondere aufgrund der auffallenden Charakteristik der Messergebnisse zu den Stunden 6327, 6351, 6375, 6399 und 6324 - also aufgrund einer sich täglich wiederholenden Anfeuchtung des Groblehms - kann auf eine hohe Anfangsfeuchte in der Sperrholzplatte und der Mineralwolle geschlossen werden. Die tägliche Anfeuchtung des Lehms kann in der Simulation für den Fall einer hohen Anfangsfeuchte (89 % in der Sperrholzplatte) nachvollzogen werden. In Abbildung 4.8 ist der gewählte Verlauf für die Initialisierungsbedingung der relativen Feuchte dargestellt. Für die Temperatur wurden im Grob- und Feinlehm die gemessenen Werte verwendet, für die restlichen Schichten wurde eine lineare Interpolation des Messwerts im Groblehm und der Außentemperatur verwendet.

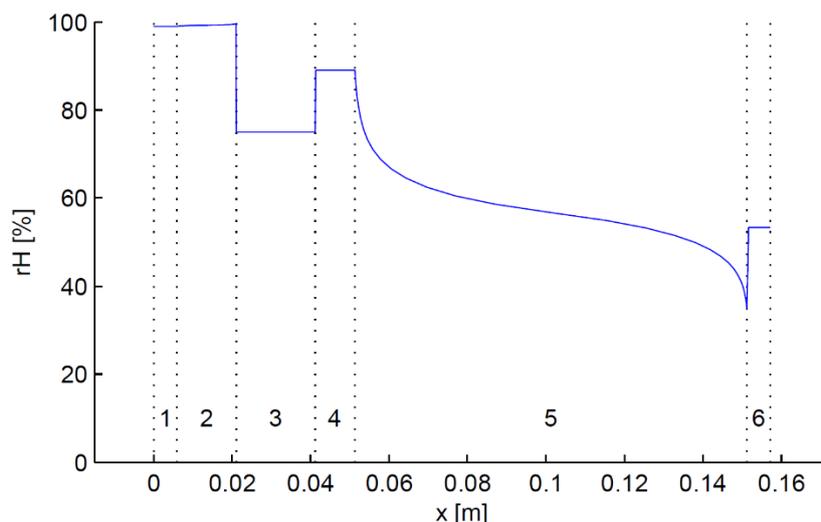


Abbildung 4.8 Initialisierungsbedingung für die relative Feuchte (1: Feinlehm, 2: Groblehm, 3: PU-Dämmung mit Alukaschierung, 4: Sperrholzplatte, 5: Mineralwolle, 6: Stahl)

Der aus der ersten Simulation erhaltene zeitliche Verlauf der relativen Feuchte ist in Abbildung 4.9 und für die Temperaturen in Abbildung 4.10 dargestellt. Es wird jeweils das Simulationsergebnis und das Messergebnis mit der Messungengenauigkeit der Sensoren abgebildet.

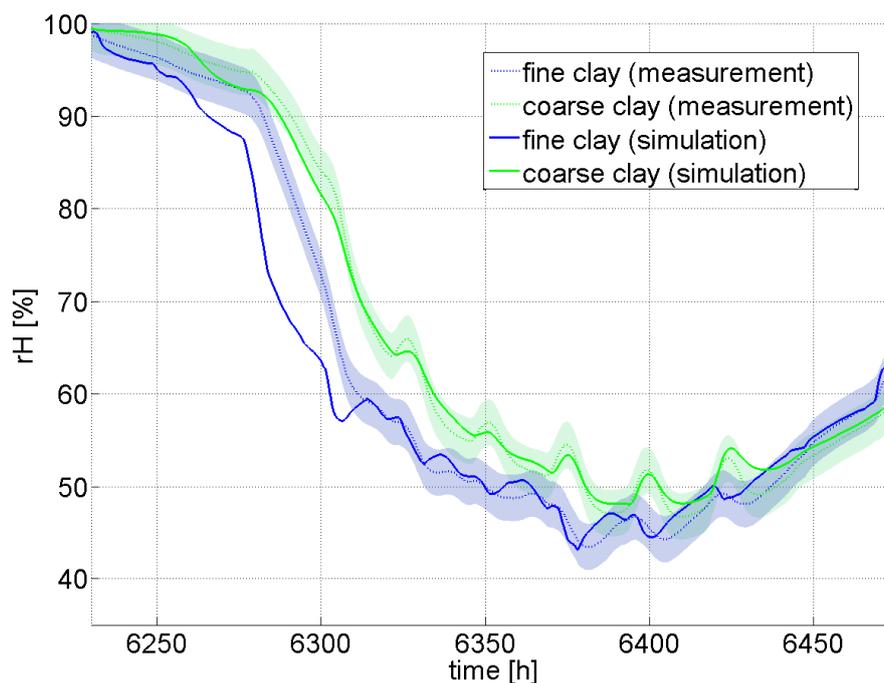


Abbildung 4.9 Zeitlicher Verlauf der relativen Feuchten im Lehm für gemessene Sorptionsisotherme - Simulation und Messergebnisse mit Messungengenauigkeit der Sensoren

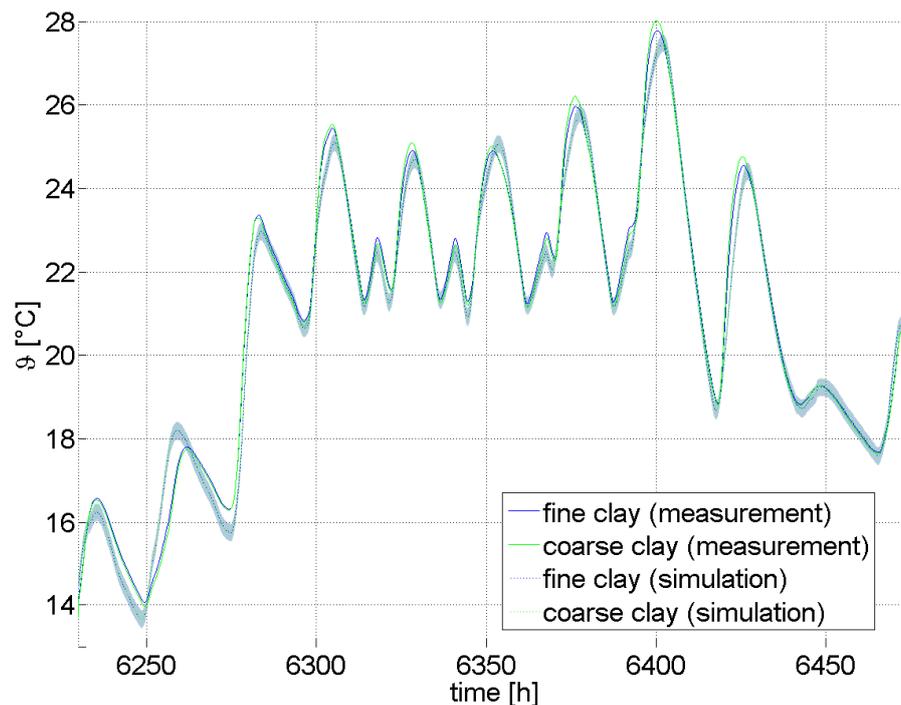


Abbildung 4.10: Zeitlicher Verlauf Temperaturen im Lehm für gemessene Sorptionsisotherme - Simulation und Messergebnisse mit Messungenauigkeit der Sensoren

Insbesondere für den Groblehm kann der Verlauf sehr gut abgebildet werden. Für den Feinlehm bestehen weiterhin die Abweichungen bei der Austrocknung. Der Verlauf lässt sich jedoch mit dem gewählten Modellansatz nicht weiter verbessern. Der Temperaturverlauf lässt sich ebenfalls gut nachvollziehen. Für die Phase der Austrocknung sind Abweichungen in der thermischen Trägheit des Lehms festzustellen. Wodurch diese entstehen kann nicht erklärt werden.

#### 4.4.2 Validierung des Simulationsmodells der Container

Für eine Validierung des gesamten Gebäudemodells unter Berücksichtigung des Benutzerverhaltens während des Betriebs wurde der Messzeitraum zwischen dem 14. Dezember 2014 und dem 11. Jänner 2015 für den Container in Holz-Rahmen-Bauweise mit Lehmputz detailliert ausgewertet und für die Simulation aufbereitet. Neben den eigentlichen Messdaten des Containers standen Wetterdaten der ZAMG für den Standort Innsbruck Flughafen zur Verfügung.

Als Randbedingungen fließen in die Simulation die Außenlufttemperatur (Abbildung 4.11), die relative Feuchte der Außenluft (Abbildung 4.12) und die Globalstrahlung (Abbildung 4.13) ein.

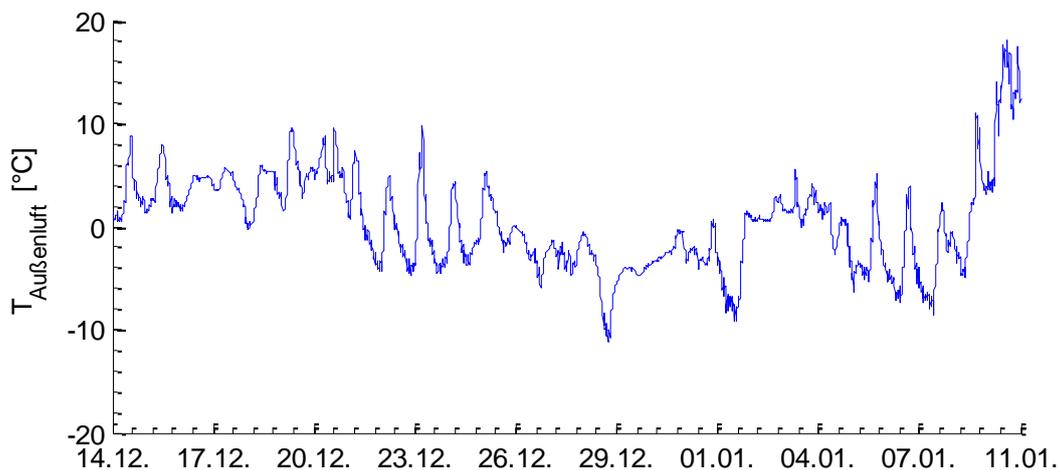


Abbildung 4.11 Außenlufttemperatur Flughafen Innsbruck (ZAMG) (Zeitstempel: Mitternacht)

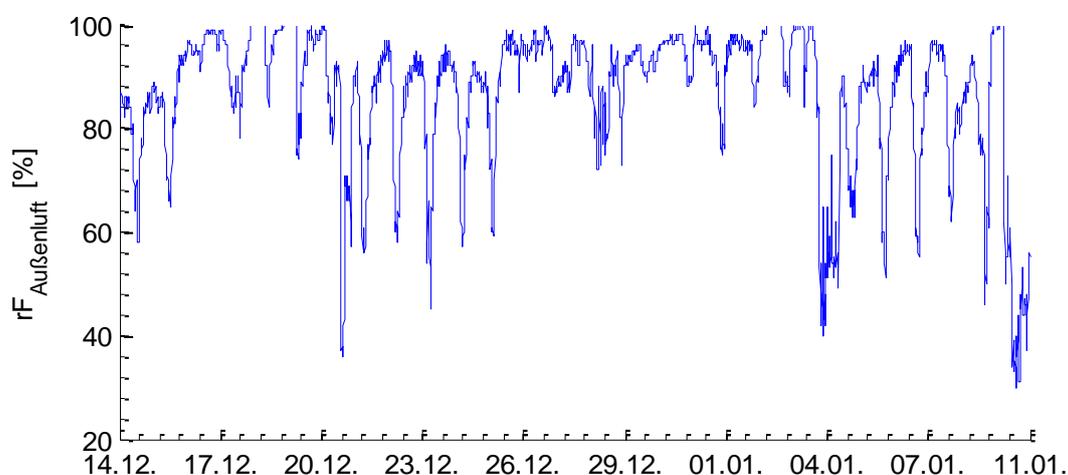


Abbildung 4.12 Relative Feuchte Außenluft Flughafen Innsbruck (ZAMG) (Zeitstempel: Mitternacht)

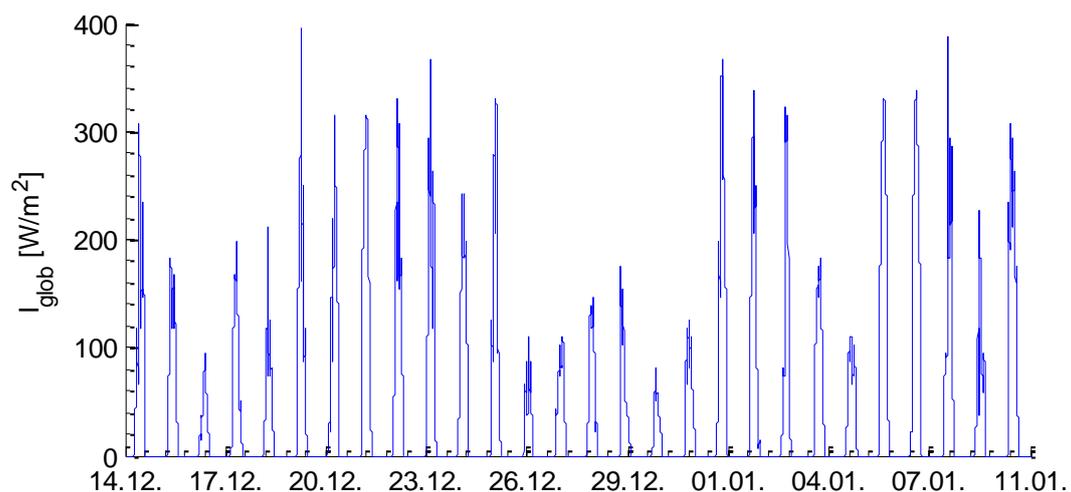


Abbildung 4.13 Horizontale Globalstrahlung Flughafen Innsbruck (ZAMG) (Zeitstempel: Mitternacht)

Als zusätzliche Messwerte der ZAMG werden der Bewölkungsgrad (Abbildung 4.14), die Windgeschwindigkeit (Abbildung 4.15) und die Windrichtung (Abbildung 4.16) herangezogen.

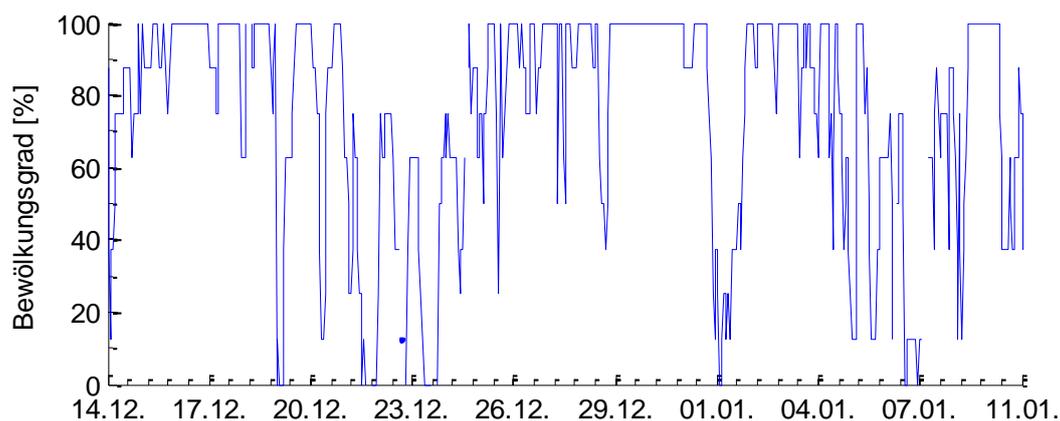


Abbildung 4.14 Bewölkungsgrad Flughafen Innsbruck (ZAMG) (Zeitstempel: Mitternacht)

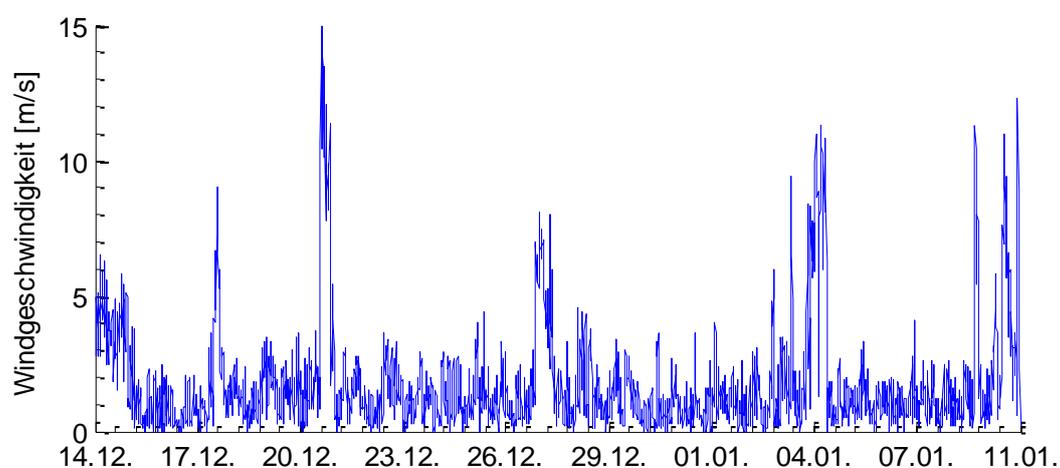


Abbildung 4.15: Windgeschwindigkeit Flughafen Innsbruck (ZAMG) (Zeitstempel: Mitternacht)

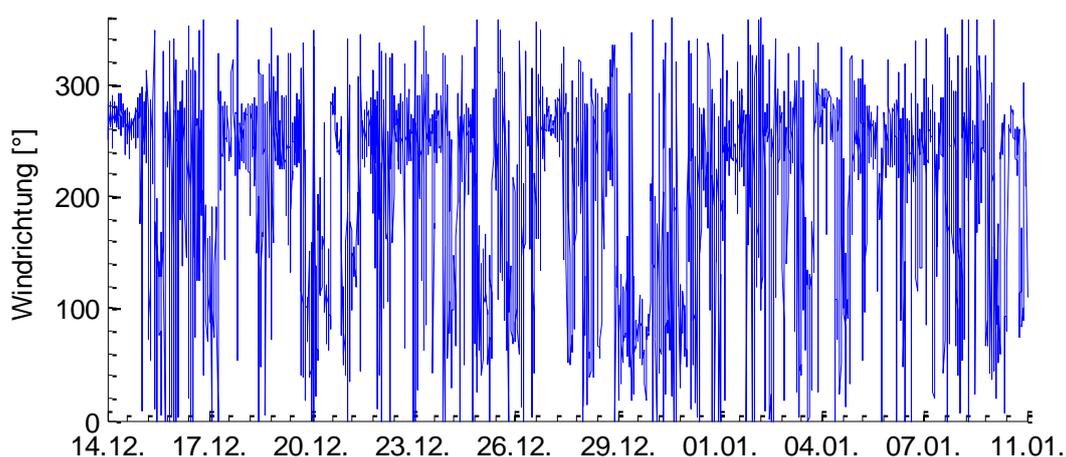


Abbildung 4.16 Windrichtung Flughafen Innsbruck (ZAMG) (Zeitstempel: Mitternacht)

Aus den Messdaten der Container können weitere Randbedingungen generiert werden. Der Öffnungszustand der Tür (Abbildung 4.17) und der Fenster (Abbildung 4.18) ist bekannt. Bei den Fenstern wird zwischen den Zuständen „gekippt“ und „geöffnet“ unterschieden. Ist das Fenster geöffnet, hat es auch gleichzeitig den Zustand „gekippt“.

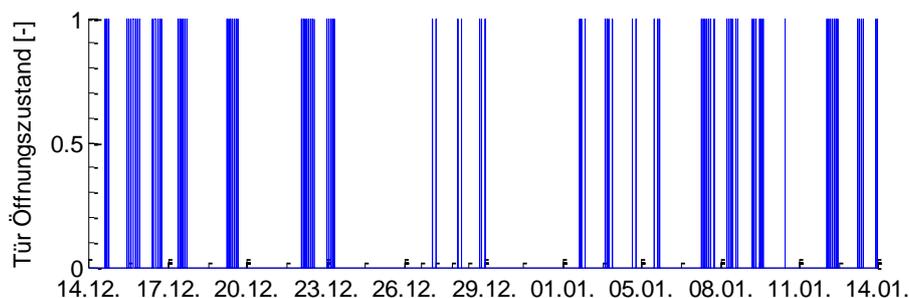


Abbildung 4.17 Öffnungszustand Tür (Zeitstempel: Mitternacht)

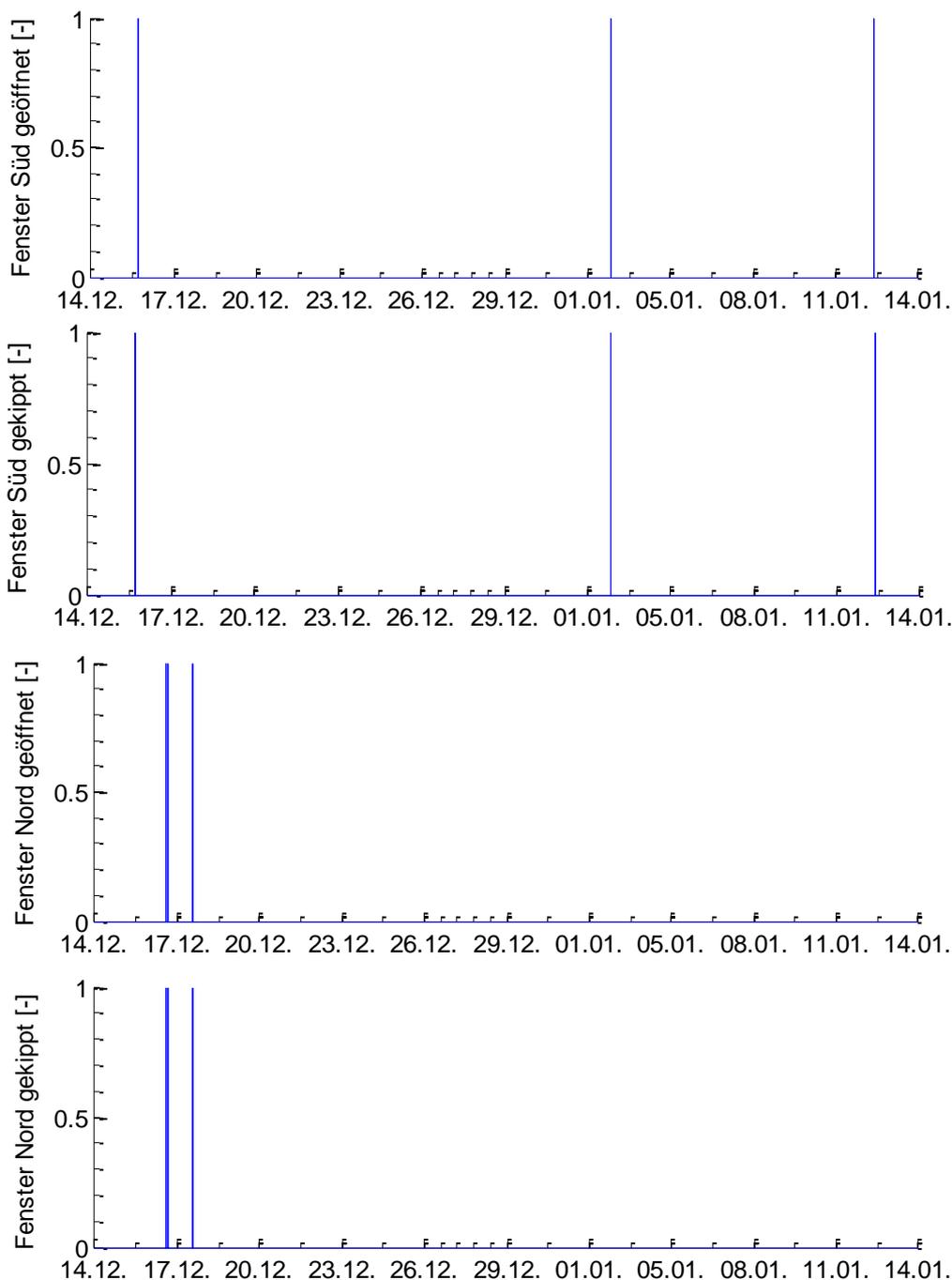


Abbildung 4.18 Öffnungszustand (1) Fenster Süd geöffnet, (2) Fenster Süd gekippt, (3) Fenster Nord geöffnet, (4) Fenster Nord gekippt; (Zeitstempel: Mitternacht)

Die Personenzählung ist zwar messtechnisch vorgesehen, allerdings wurde sie von den Probanden nicht akzeptiert. Dementsprechend sind keine verwertbaren Messdaten verfügbar. Es sind jedoch die Türöffnungszustände und die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Container bekannt. Aus diesen Messdaten kann relativ genau auf die Personenbelegung (Abbildung 4.19) geschlossen werden.

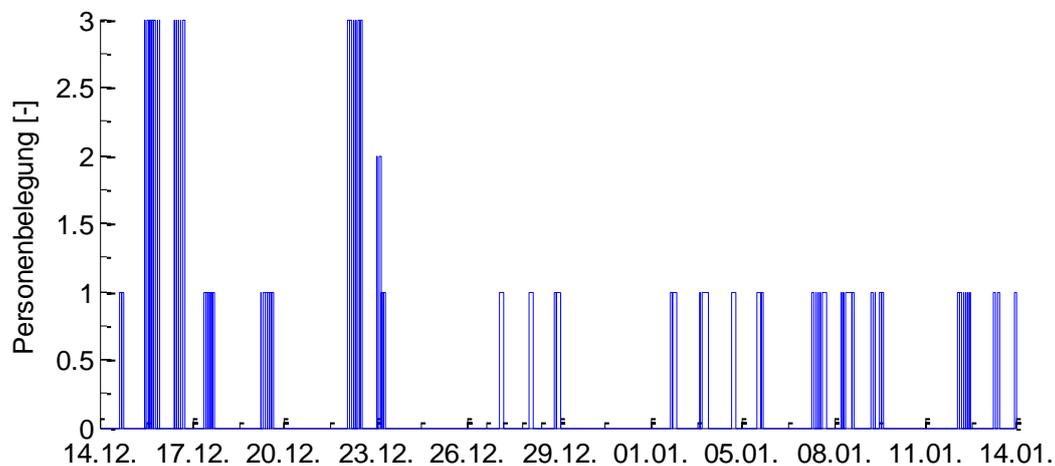


Abbildung 4.19 Personenbelegung im Container

Der Volumenstrom der Lüftung (Abbildung 4.20) wurde messtechnisch über die Drehzahl der Ventilatoren erfasst. Um den Volumenstrom zu erhalten, wurde für drei Lüfterstufen eine Kalibrierung durchgeführt, indem der Volumenstrom mit einem Volumenstrommesser (Flow Finder) gemessen und im gleichen Zeitraum die Drehzahl mit aufgezeichnet wurde (vgl. Abbildung 3.15 in Kapitel 3.3.2).

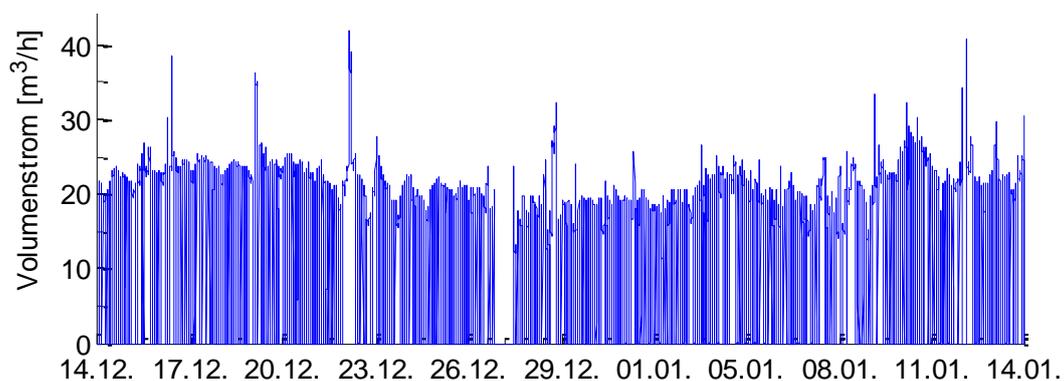


Abbildung 4.20 Volumenstrom Container

Für die Validierung wurden zudem noch die beiden Raumsensoren für Temperatur (Abbildung 4.21), relative Feuchte (Abbildung 4.22) und die CO<sub>2</sub>-Messung (Abbildung 4.23) herangezogen.

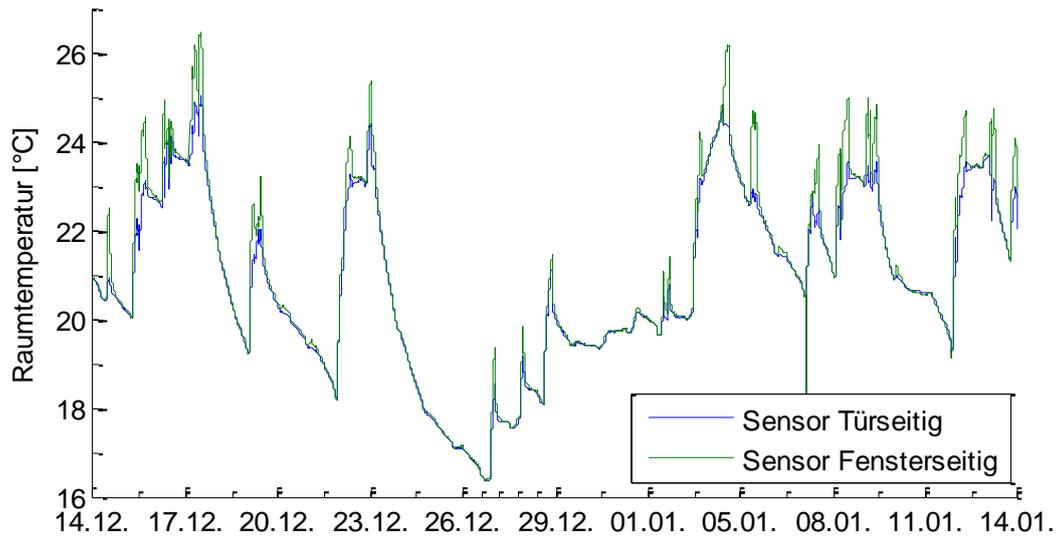


Abbildung 4.21 Temperatur im Raum (Zeitstempel: Mitternacht)

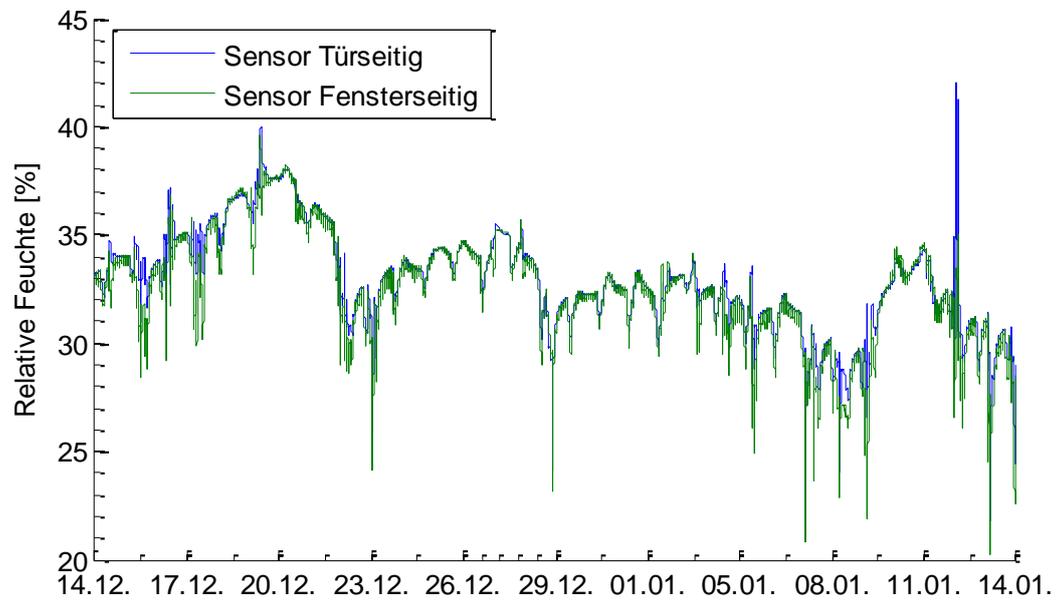


Abbildung 4.22: Relative Feuchte im Raum (Zeitstempel: Mitternacht)

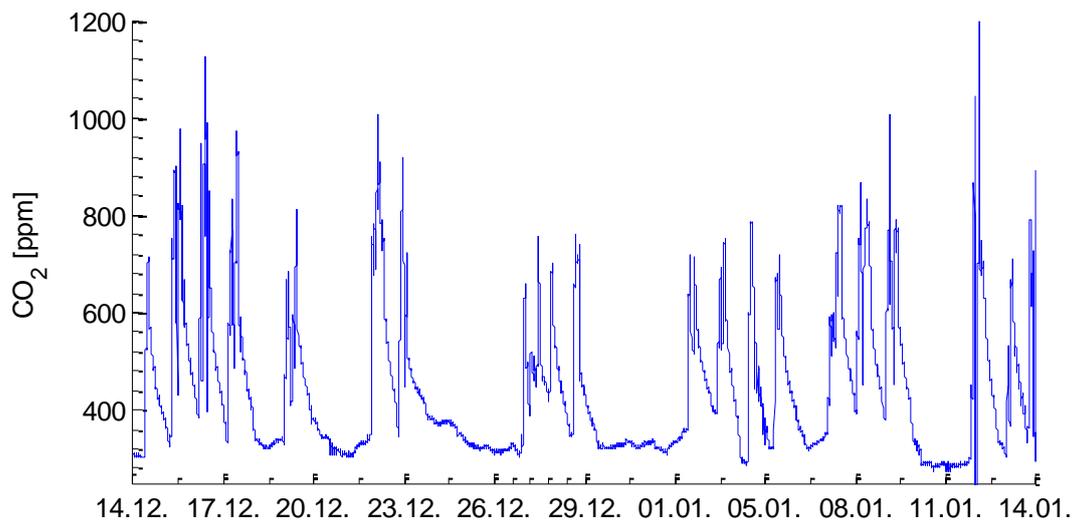


Abbildung 4.23 CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum (Zeitstempel: Mitternacht)

Die restlichen Messdaten von Temperatur und relativer Feuchte (hier nicht abgebildet) in den Bauteilen wurden nur stichprobenartig für Vergleiche und für die Initialisierungsbedingungen verwendet.

Zwischen dem 26. Dezember 2014 und dem 31. Dezember 2014 lag auf dem Universitätsgelände Schnee. Der sonst für den übrigen Zeitraum angesetzt Albedo von 0,20 wurde in diesem Zeitraum auf 0,90 erhöht.

Für die Validierung wurde das Modell in CARNOT aus Kapitel 4.4 verwendet. Als Eingangsdaten wurden die bereits erläuterten Messdaten verwendet. Das Modell wurde in einem Punkt angepasst: Die Wärmebrücken wurden im Vergleich zu den berechneten Werten (vgl. Kapitel 2.2) um 45 % erhöht (dies entspricht einem zusätzlichen Leitwerk von 0,704 W/K), dadurch kann der Temperaturverlauf deutlich besser abgebildet werden. Die Abweichungen lassen sich durch höhere Wärmeleitfähigkeiten als angenommen erklären und durch Vereinfachungen in den Wärmebrückenberechnungen, so wurden z.B. die Ecken der Container vernachlässigt (punktförmige Wärmebrücken).

Abbildung 4.24 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Raumtemperaturen. Lediglich über die Weihnachtsfeiertage sind größere Abweichungen von bis zu 0,5 °C zu beobachten (welche damit jedoch immer noch innerhalb der Messunsicherheit der Sensoren liegen). Der restliche Verlauf zeigt sehr gute Übereinstimmungen (vgl. Abbildung 4.27).

Abbildung 4.25 zeigt Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Werten für die relative Feuchte. Hier kann eine ähnlich gute Übereinstimmung wie bei der Raumtemperatur erkannt werden. Es können maximale Abweichungen von 3 % relativer Feuchte festgestellt werden. Dies liegt im Bereich der Messunsicherheit der verwendeten Sensoren. Die größten

Abweichungen treten immer im Bereich der Aufheiz- bzw. Auskühlphasen bzw. direkt nach einem Zeitraum mit länger geöffneter Tür auf. Hier kann unter Umständen das verwendete Simulationsmodell den kurzzeitigen Speichereffekt von Oberfläche und Einrichtung nicht widerspiegeln.

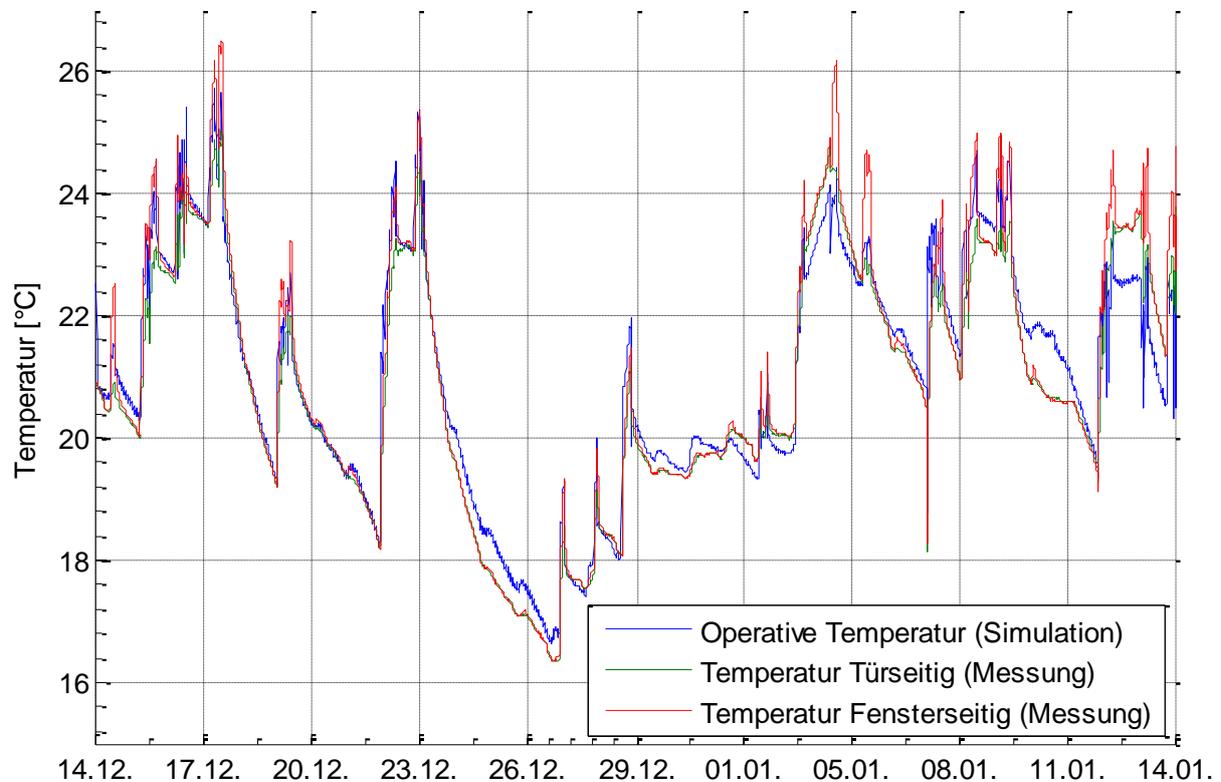


Abbildung 4.24 Validierung Temperatur Raumluft (Zeitstempel: Mitternacht)

Abbildung 4.26 zeigt den Vergleich der gemessenen und simulierten Werte für die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft. Diese Werte wurden auch bereits zur Anpassung bzw. Ermittlung der Belegungszahlen verwendet und können daher nur begrenzt zur Beurteilung für die Validierung herangezogen werden. Zudem wurde die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft konstant auf 380 ppm festgesetzt, da hier keine Messdaten zur Verfügung stehen. Jedoch zeigt insbesondere das Abklingverhalten eine sehr gute Übereinstimmung, was zeigt, dass die Volumenströme (sowohl über die Lüftung, als auch die Infiltration) im Modell gut mit der Realität übereinstimmen.

Im Großen und Ganzen kann eine sehr gute Übereinstimmung des Simulationsmodells mit den Messergebnissen festgestellt werden.

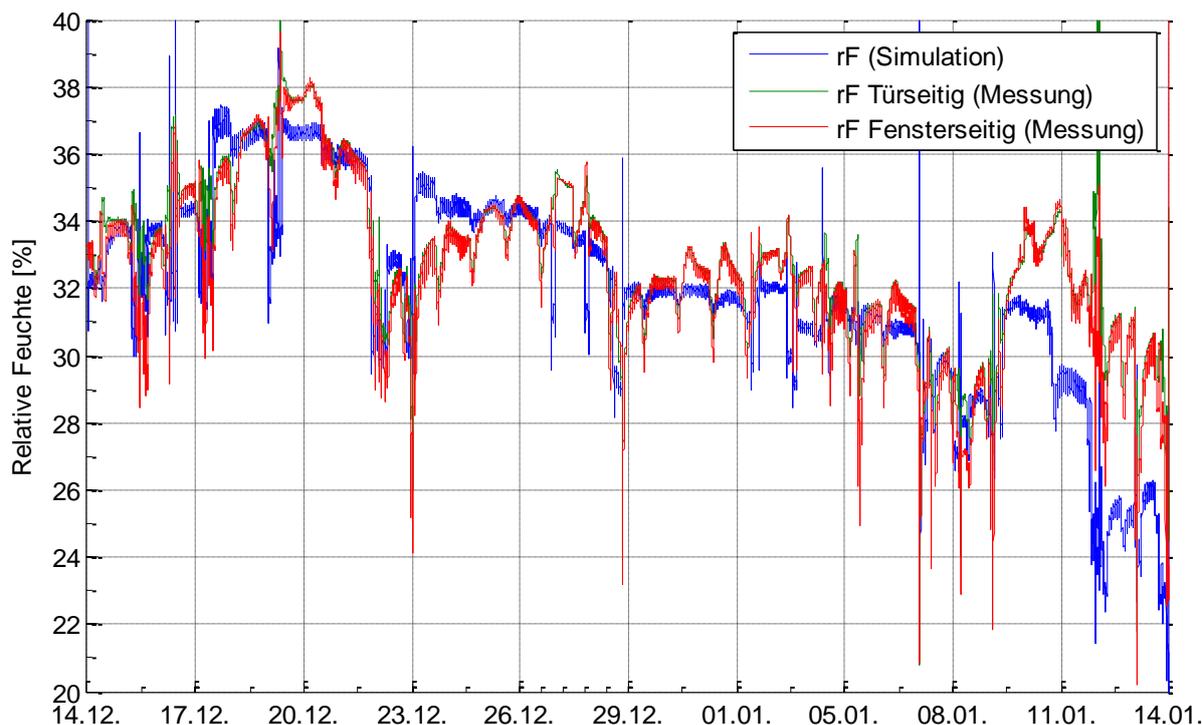


Abbildung 4.25 Validierung relative Feuchte Raumluf (Zeitstempel: Mitternacht)

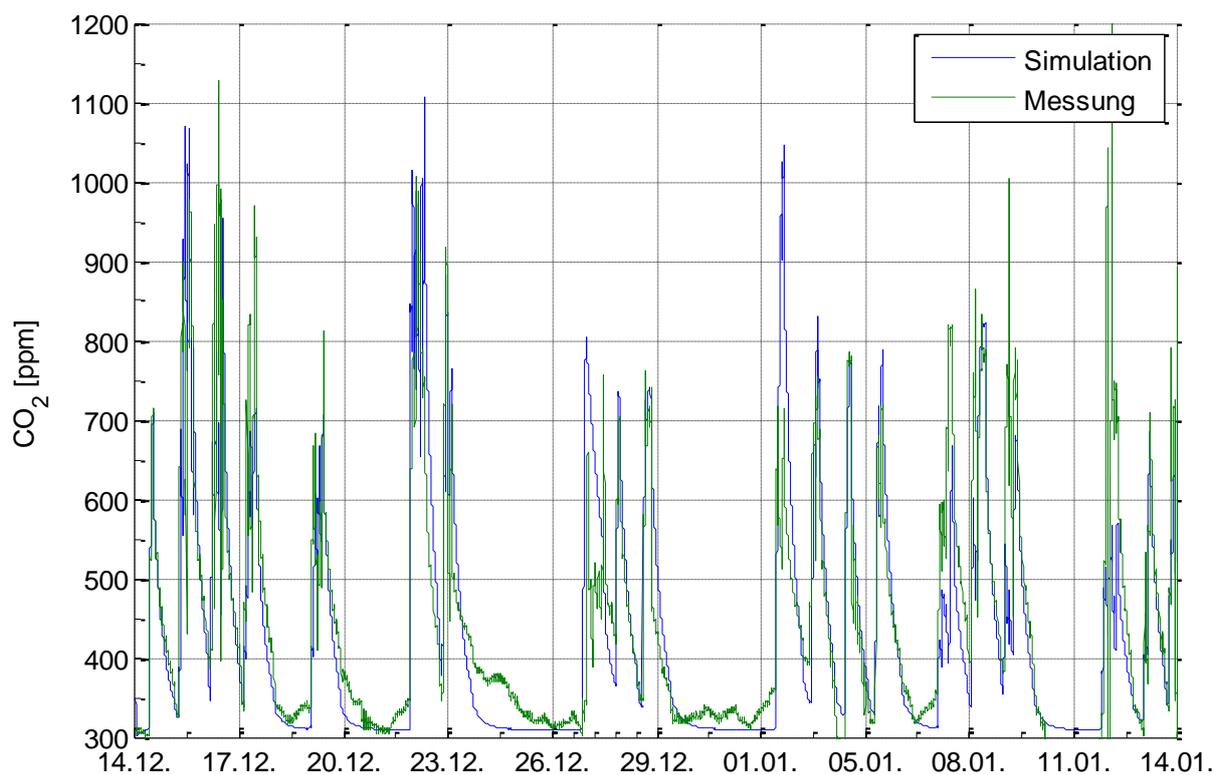


Abbildung 4.26 Validierung CO<sub>2</sub>-Konzentration (Zeitstempel: Mitternacht)

Abbildung 4.27 zeigt zwei Detailausschnitte des Temperaturverlaufs der Validierung. Links ist der Bereich nach einer längeren Auskühlphase dargestellt. Die Abweichungen zwischen Messung und Simulation betragen hier maximal 0,6 °C. Rechts ist der Bereich einer

Überhitzung des Containers durch innere Lasten und Solarstrahlung dargestellt. Auch hier sind die Abweichungen zwischen Messung und Simulation nur sehr gering, auffällig sind hier insbesondere die Unterschiede zwischen den beiden Messfühlern. Die Messwerte beim fensterseitigen Fühler werden insbesondere durch die Solarstrahlung beeinflusst. Die Simulation bildet hier immer eine Mischtemperatur der thermischen Zone ab und der Einfluss der Solarstrahlung in Fensternähe lässt sich durch das vorhandene Modell nicht abbilden.

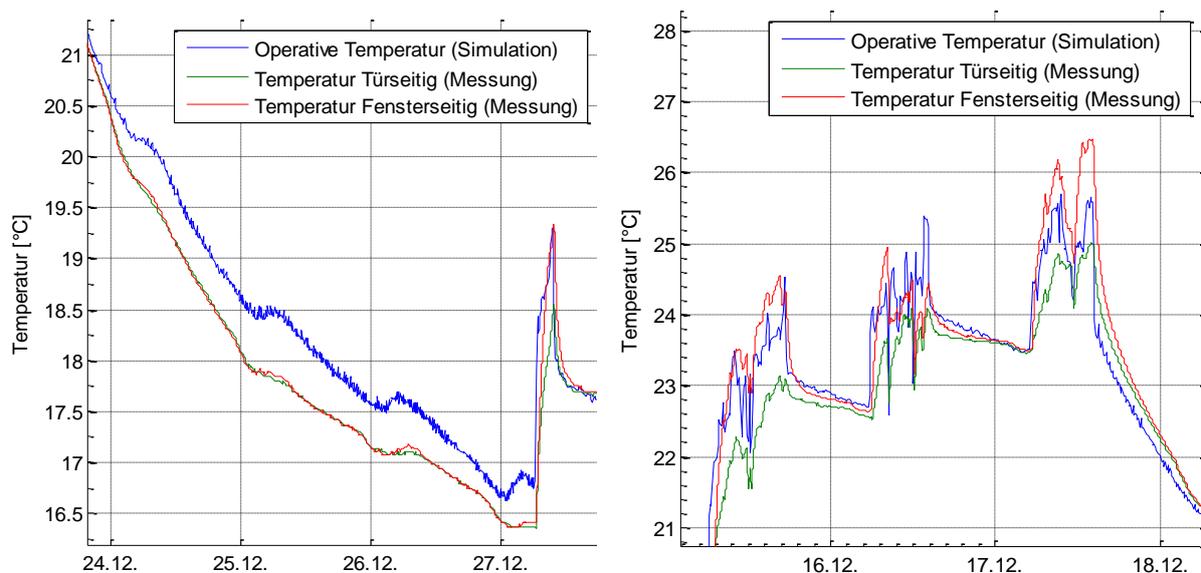


Abbildung 4.27 Detailausschnitt Validierung Temperatur Raumluft (Zeitstempel: Mitternacht)

## 4.5 CROSS-VALIDIERUNG DES SIMULATIONSMODELLS

### 4.5.1 Einleitung

Im folgenden Abschnitt wird eine Cross-Validierung des Simulationsmodells in CARNOT mit den beiden Simulationsprogrammen Dynbil (Feist, 1994) und TRNSYS 16 (TRANSSOLAR Software) durchgeführt. Dies wurde durchgeführt, da die Messdaten für eine direkte Validierung erst mit Projektende zur Verfügung standen. Für die Validierung des Simulationsmodells mit Messdaten sei auf das Kapitel 4.4 verwiesen.

### 4.5.2 Massivholzvariante

Bei einer ersten Untersuchung der Simulationsprogramme wurde auf eine Sommerlüftung verzichtet. Die Ergebnisse von CARNOT und Dynbil wurden jeweils mit Berechnungen aus TRNSYS sowie CARNOT mit einem alternativen Fenstermodell untersucht. Bei der Auswertung der Simulation von CARNOT können mehrere Einflüsse dargestellt und verglichen werden. Bei Dynbil hingegen ist ein Vergleich von Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten aufgrund der vorgegebenen Ausgabeformate schwierig.

### 4.5.2.1 Ohne Sommerlüftung

Die Regelung der Heizung erfolgt auf die konvektive Temperatur. In CARNOT wird ein PI-Regler zur Steuerung der Heizung, in TRNSYS sowie Dynbil werden Idealheizungen verwendet. Der Temperaturverlauf ist in allen drei Berechnungen vergleichbar (siehe Abbildung 4.28 und Abbildung 4.29).

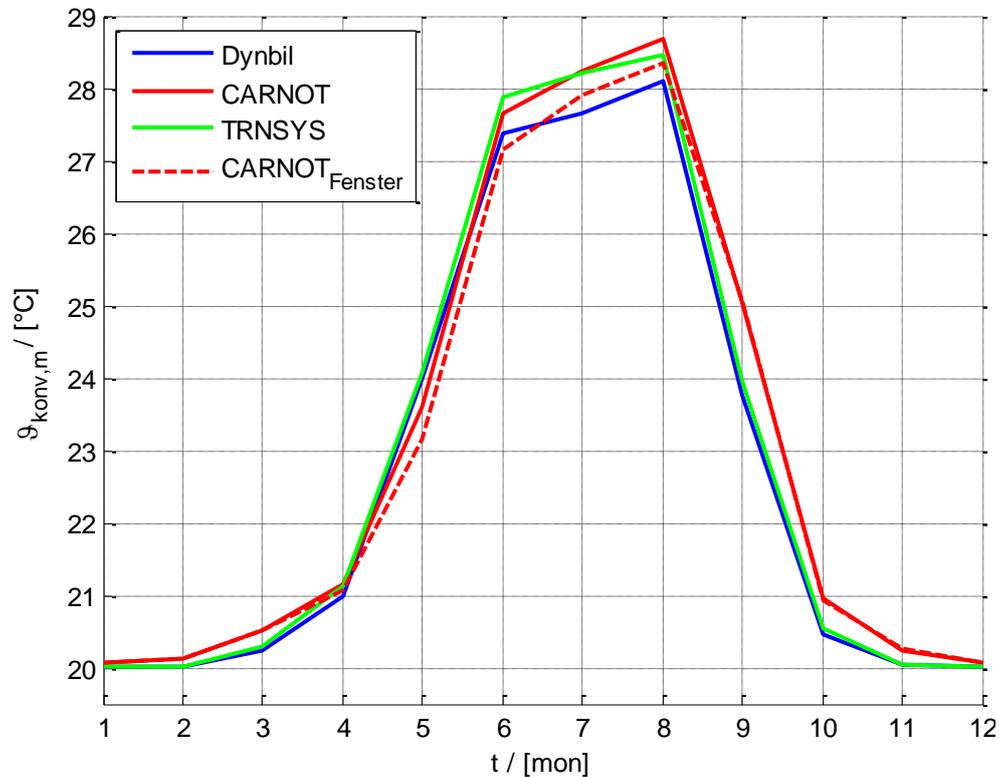


Abbildung 4.28 Monatsmittelwerte konvektive Temperatur; massiv ohne Sommerlüftung

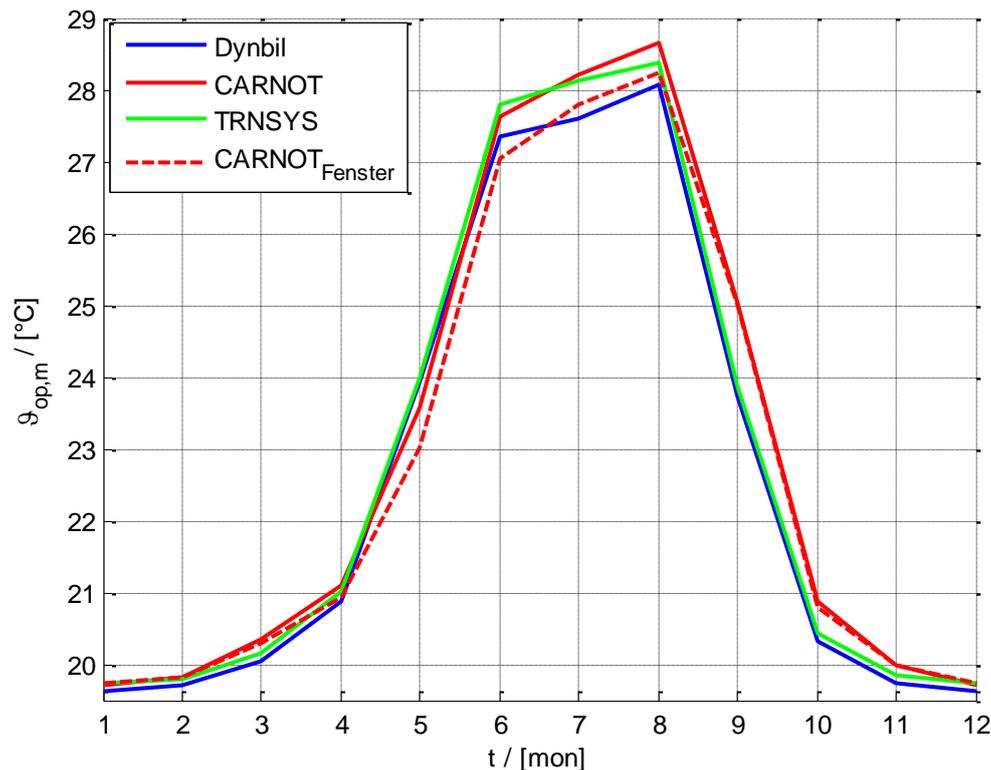


Abbildung 4.29 Monatsmittelwerte operative Temperatur; massiv ohne Sommerlüftung

Der Heizwärmebedarf (vgl. Tabelle 4.12 und Abbildung 4.30) sollte bei CARNOT etwas höher sein als bei den anderen Simulationen, da auch die mittlere Temperatur in der Heizperiode höher liegt. Dies ist jedoch nicht der Fall. Ein Unterschied liegt bei den solaren Gewinnen, diese sind bei CARNOT etwas größer. Um mögliche Fehler aus dem CARNOT-Fenstermodell zu kontrollieren wurde dieselbe Simulation mit dem alternativen Fenstermodell CARNOT<sub>Fenster</sub> berechnet. Mit dem neuen Fenstermodell können in etwa dieselben Ergebnisse erzielt werden. Die solaren Gewinne haben somit immer noch einen maßgebenden Einfluss.

Tabelle 4.12 Heizwärmebedarf [kWh/(m<sup>2</sup> a)], massiv, ohne Sommerlüftung

Dynbil	CARNOT	TRNSYS	CARNOT <sub>Fenster</sub>	PHPP
48,78	41,88	46,50	43,46	42,95

Die schwarze Kurve stellt die Berechnung mit PHPP dar. Die verwendeten Klimadaten wurden für das PHPP-Format angepasst. PHPP ist keine dynamische Simulation sondern rechnet mit monatsgemittelten Werten. Dennoch kann hier eine gute Übereinstimmung mit den deutlich aufwendigeren Simulationen erzielt werden. Lediglich in der Übergangszeit im Frühling entstehen kleine Abweichungen zwischen den Simulationsmodellen. Diese Unterschiede können durch die unterschiedliche Berücksichtigung der Sonneneinstrahlung erklärt werden. Die „vereinfachte“ Berechnung nach PHPP liefert gute Ergebnisse.

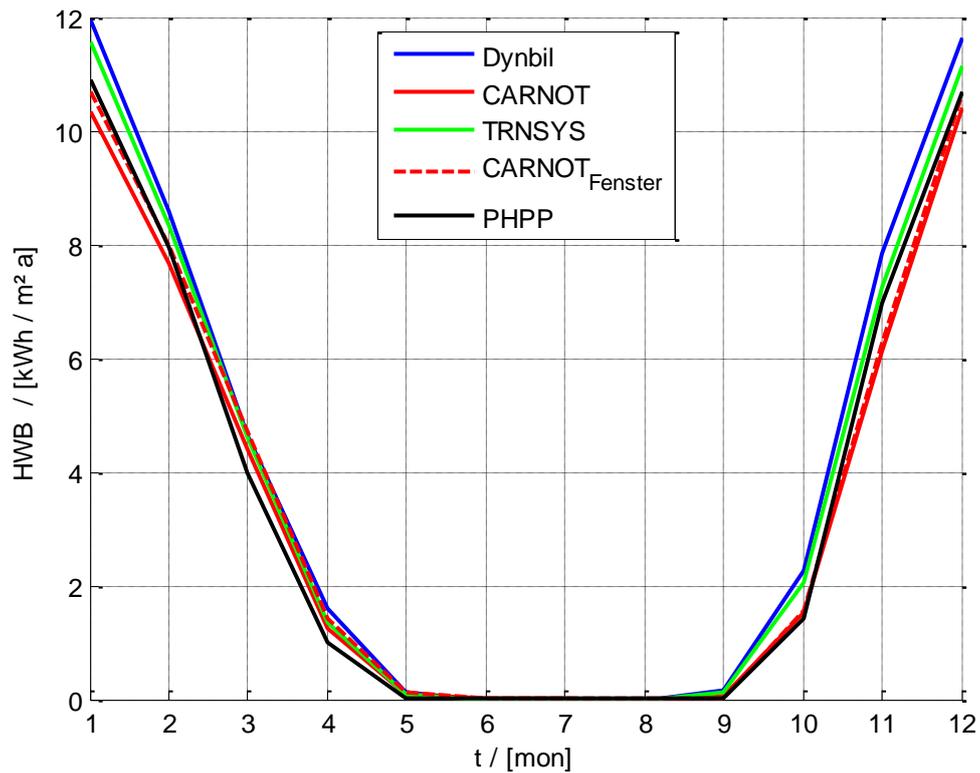


Abbildung 4.30 Monatsmittelwerte Heizwärmebedarf; massiv ohne Sommerlüftung

Die vier Simulationsmodelle liefern für die Heizlast ähnliche Ergebnisse, wie in Abbildung 4.31 unten gut zu sehen ist. Hier werden die Ausgleichsgeraden für die einzelnen Berechnungen in einem Diagramm verglichen. Die Berechnungen mit CARNOT liegen etwa in der Mitte zwischen Dynbil (höher) und TRNSYS (tiefer). Die Bandbreite liegt bei  $\pm 7\%$ .

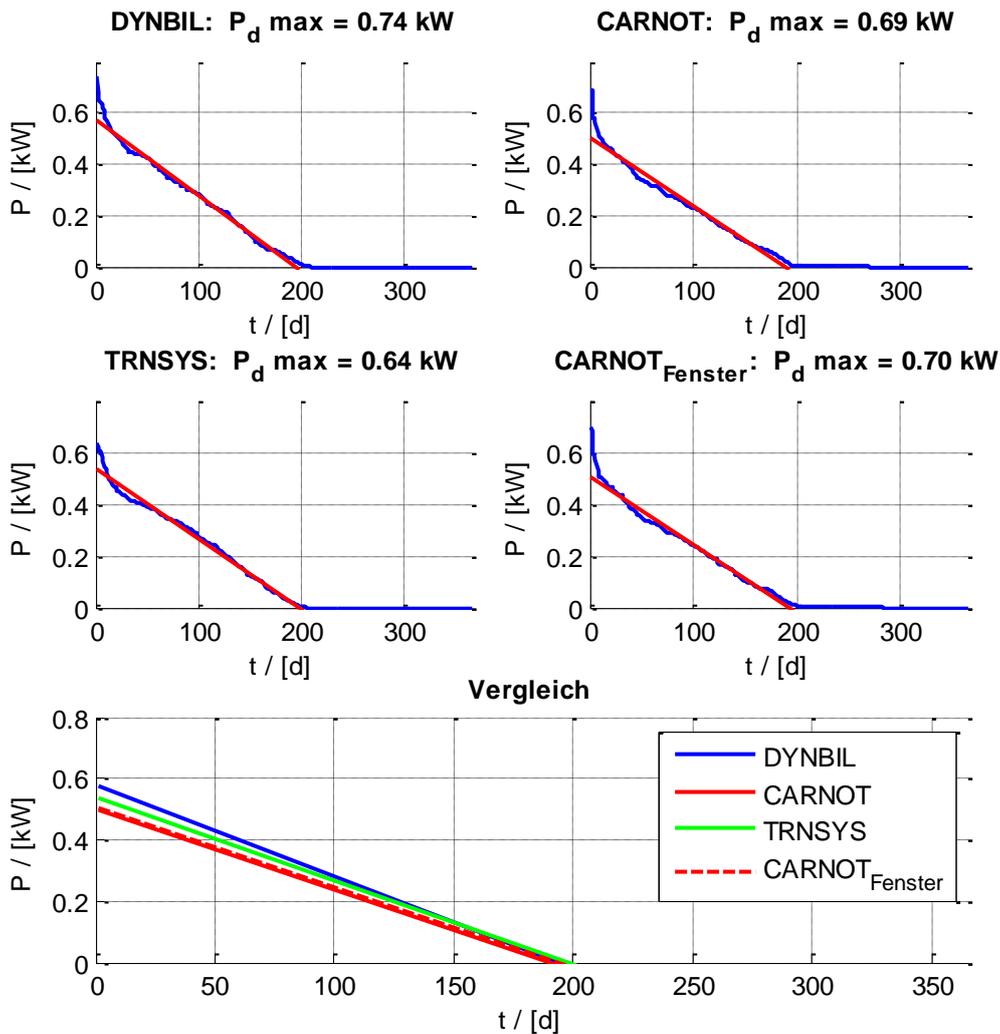


Abbildung 4.31 Heizlast für alle drei Varianten und Vergleich der Ausgleichsgeraden miteinander; massiv ohne Sommerlüftung

#### 4.5.2.2 Mit Sommerlüftung

Für die Sommerlüftung wurde für den Vergleich eine einfache Variante gewählt. Die mechanische Lüftung läuft konstant über das ganze Jahr mit einer Luftwechselrate von  $0,65 \text{ h}^{-1}$  durch. Die Sommerlüftung in Form einer Fensterlüftung wird mit einem konstanten Wert von  $2,0 \text{ h}^{-1}$  angenommen, was von der Realität deutlich abweichen kann. Die Luftwechselrate einer Fensterlüftung hängt vom Öffnungswinkel, Windgeschwindigkeit und Temperaturunterschied ab. Für einen einfacheren Vergleich der Simulationsprogramme wird dennoch dieser konstante Wert angenommen. Die Bedingung für die Sommerlüftung ist wie folgt definiert: Ist die Innentemperatur größer als die Außentemperatur und größer  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , so wird mittels Fenster gelüftet. Mit dieser Art der Regelung nimmt der Heizwärmebedarf durch den Einsatz der Sommerlüftung nicht wesentlich zu aber die Sommertemperaturen im Container zeigen eine Verringerung um  $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$  gegenüber der Variante ohne Sommerlüftung. Dies zeigt die hohe Wirksamkeit einer Sommerlüftung.

Die Temperaturverläufe (Abbildung 4.32 und Abbildung 4.33) verhalten sich wiederum gleich wie bei der Variante ohne Sommerlüftung. Die Temperaturen sind vergleichbar, jedoch kommt es in einzelnen Monaten zu Abweichungen von bis zu 0,5 °C. Der Grund ist hier in den unterschiedlichen solaren Gewinnen zu suchen. Der einzige große Unterschied liegt wiederum im Winter in der Heizperiode und ist in der fehlenden Idealheizung bei den Simulationen mit CARNOT begründet.

Die konvektive Temperatur ist für die CARNOT-Simulationen für das neue Fenstermodell höher als für das herkömmliche. Bei der operativen Temperatur hingegen ist es umgekehrt. Somit beeinflussen die beiden Fenster die konvektive und radiative Temperatur unterschiedlich, sprich das neue Fenstermodell beeinflusst die konvektive Temperatur stärker als das herkömmliche Fenstermodell.

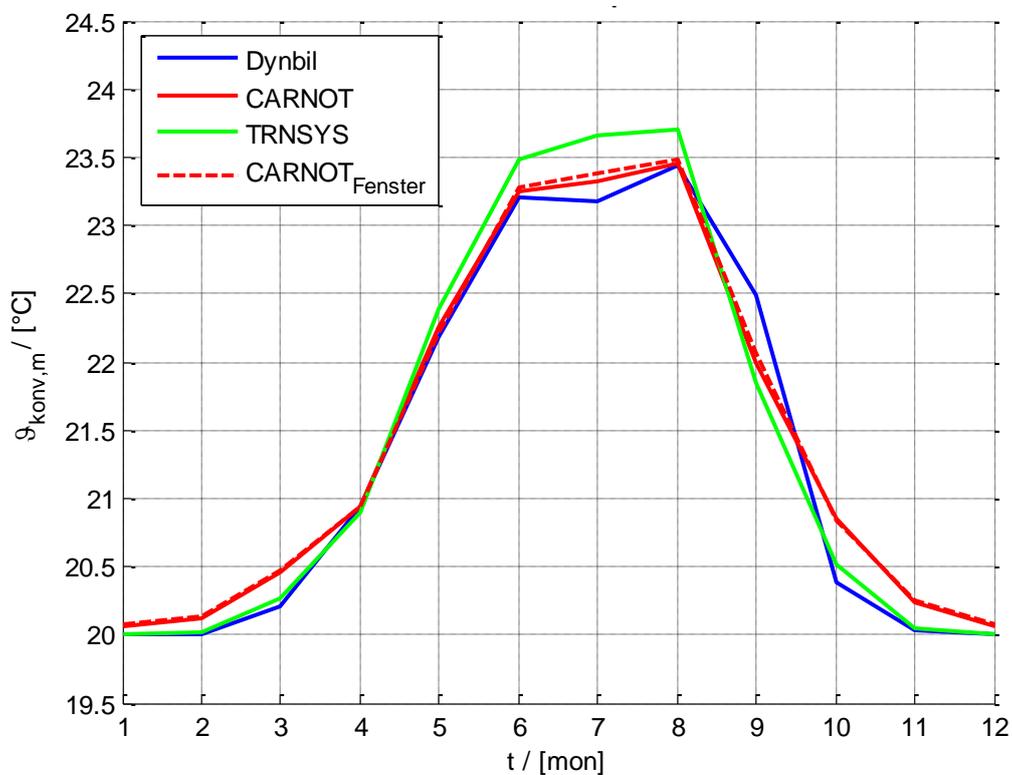


Abbildung 4.32 Monatsmittelwerte konvektive Temperatur; massiv mit Sommerlüftung

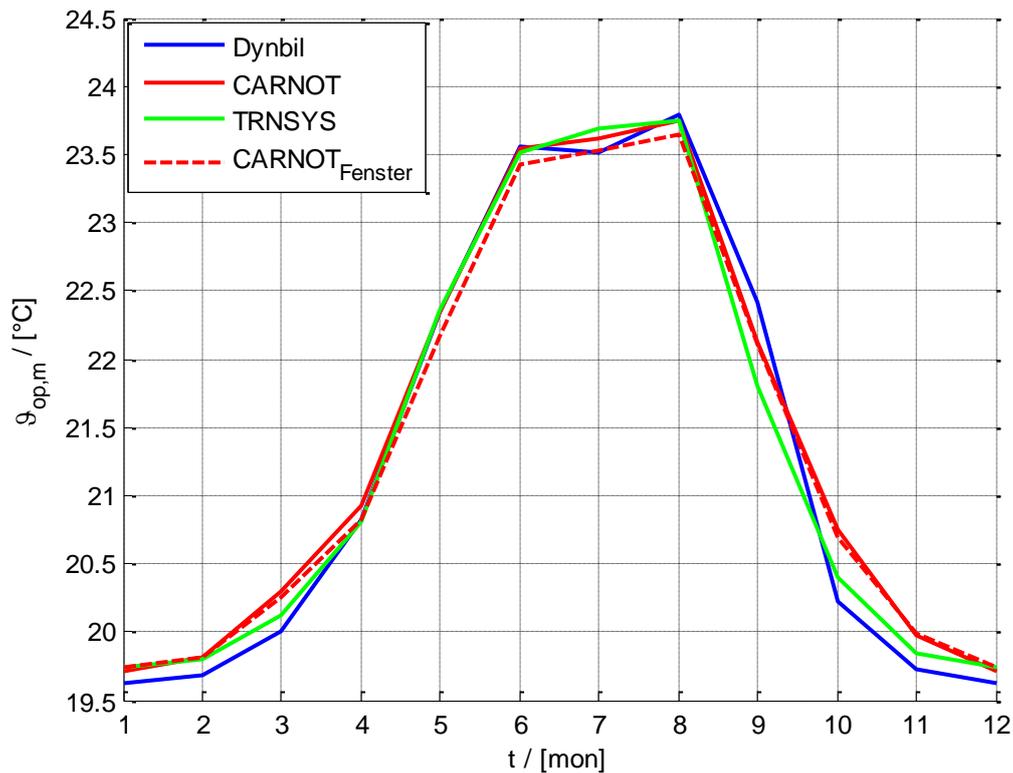


Abbildung 4.33 Monatswerte operative Temperatur; massiv mit Sommerlüftung

Der Heizwärmebedarf (Tabelle 4.13 und Abbildung 4.34) ist vergleichbar mit dem der Variante ohne Sommerlüftung. Durch eine Sommerlüftung sollte der Heizwärmebedarf nicht merklich gesteigert werden. Ein geringer Anstieg ist in den Übergangszeiten zu erwarten, da mit der Kühlung mögliche Wärme für eine kurz darauffolgende kühlere Phase abgelüftet wird und die Heizung somit kurzzeitig eingeschaltet wird.

Tabelle 4.13 Heizwärmebedarf [kWh/m<sup>2</sup>a], massiv, mit Sommerlüftung

Dynbil	CARNOT	TRNSYS	CARNOT_Fenster	PHPP
49,93	42,55	46,85	44,18	42,95

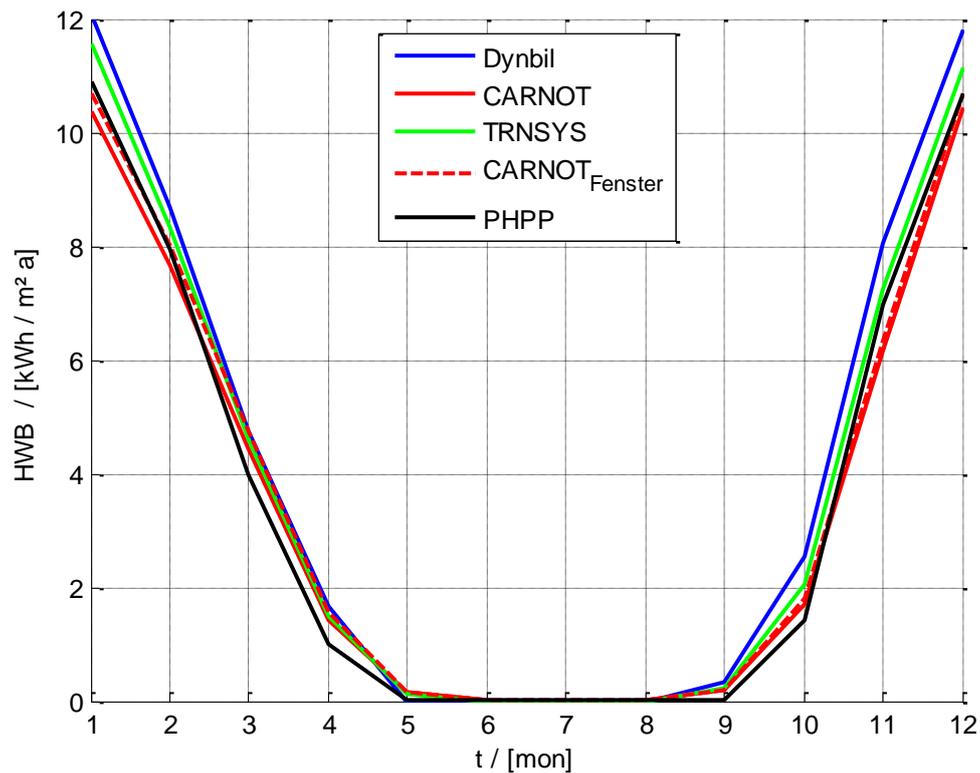


Abbildung 4.34 Monatswerte für Heizwärmebedarf; massiv mit Sommerlüftung

Da die Unterschiede im Heizwärmebedarf nur sehr gering sind, ist auch bei der Heizleistung über der Außentemperatur (Abbildung 4.35) kein großer Unterschied zu erwarten. Die größte Heizleistung tritt im Winter auf. Dort hat die Fensterlüftung keinen Einfluss und somit eine noch geringe Auswirkung auf die Heizleistung als beim Heizwärmebedarf.

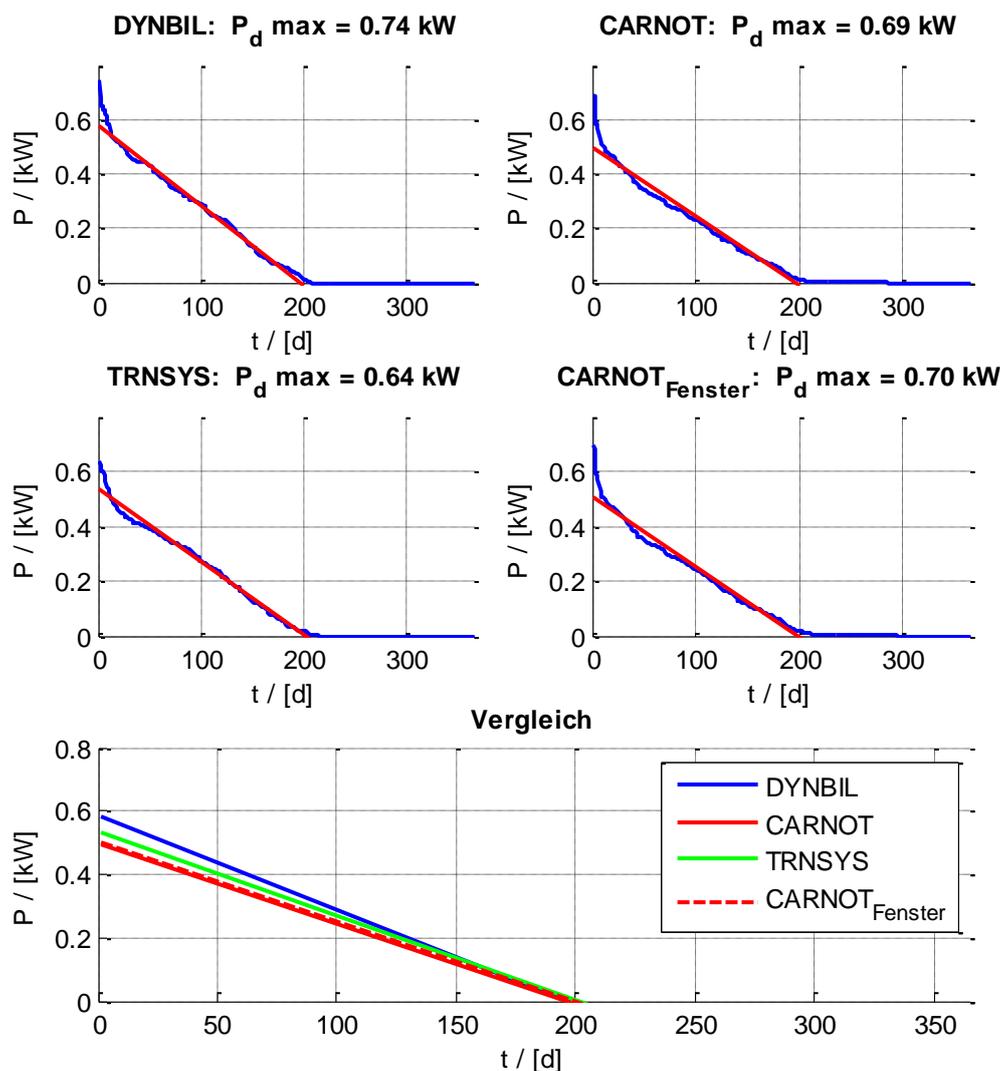


Abbildung 4.35 Heizlast für alle drei Varianten und Vergleich der Ausgleichsgeraden miteinander; massiv mit Sommerlüftung

#### 4.5.2.3 Detaillierter Vergleich des dynamischen Verhaltens

Für eine genauere Betrachtung des dynamischen Verhaltens werden Ausschnitte wie z.B. einer Woche genauer betrachtet. In Abbildung 4.36 ist für eine kalte Woche der Verlauf der operativen Temperaturen angegeben. Hier ist sehr gut zu erkennen, dass die Temperaturen im Mittel vergleichbar sind. Die internen Gewinne werden in CARNOT mit einem detaillierten Belegungsprofil ermittelt. Das bedeutet, dass das Licht abhängig von der eintreffenden Strahlung, sollte es im Raum zu dunkel sein, eingeschaltet wird. Die Wärmeabgaben der Personen werden ebenfalls von den Umgebungsbedingungen bestimmt. Da dies in den restlichen Programmen nur schwer berücksichtigt werden kann, wurde die Summe der internen Gewinne übers Jahr als Mittelwert in Dynbil und TRNSYS übernommen. Dadurch treten die Temperaturspitzen nicht bei allen Modellen gleich auf, sondern werden bei Dynbil teilweise und bei TRNSYS komplett verschmiert. Die Temperaturspitzen bei Dynbil und TRNSYS resultieren somit aus der Solarstrahlung. TRNSYS reagiert stärker auf solare

Einstrahlungen. Dies kann damit zusammenhängen, dass in TRNSYS kein hygrothermisches Wandmodell hinterlegt ist. Die Spitzen bei CARNOT entstehen einerseits aus der Solarstrahlung und andererseits aus den internen Gewinnen. Dies erklärt die etwas größeren mittleren Temperaturen bei CARNOT. Abgesehen davon, sind die Temperaturen aller Simulationen vergleichbar.

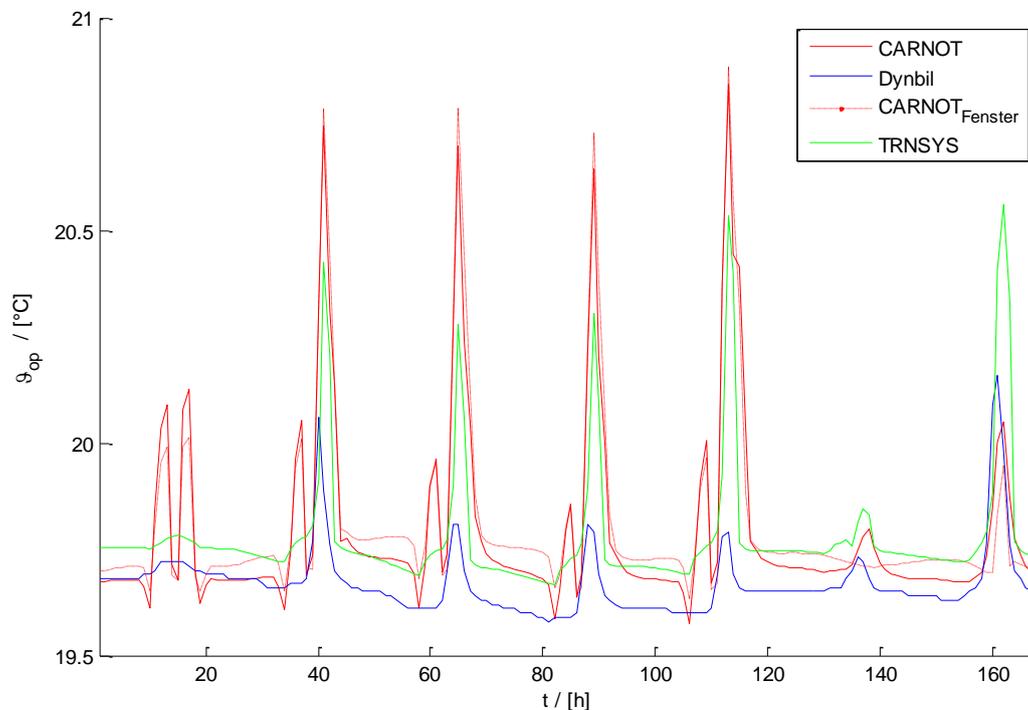


Abbildung 4.36 Verlauf der operativen Temperaturen einer kalten Woche, Massivholzvariante

In Abbildung 4.37 und Abbildung 4.38 ist wieder der Einfluss des Fenstermodells beider CARNOT-Simulationen zu erkennen. Bei Sonneneinstrahlung wird bei dem neuen Fenstermodell mehr Energie an den konvektiven Temperaturknoten im Raum abgegeben. Dies zeigt sich durch die wesentlich höheren Temperaturspitzen bei dieser Variante. Dies bedeutet gleichzeitig, dass in der Heizperiode, weniger Verluste durch das Fenster durch Wärmestrahlung erfolgen. Somit ist die radiative Temperatur bei diesem Modell geringfügig höher und erklärt somit auch den etwas höheren Heizwärmebedarf.

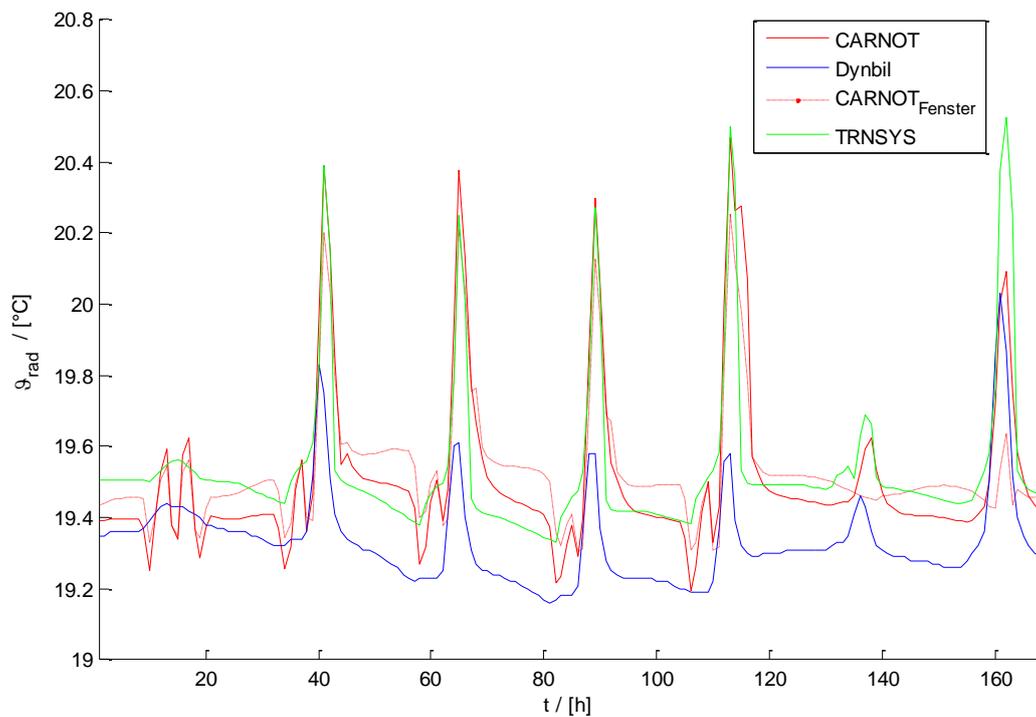


Abbildung 4.37 Verlauf der radiativen Temperaturen einer kalten Woche, Massivholzvariante

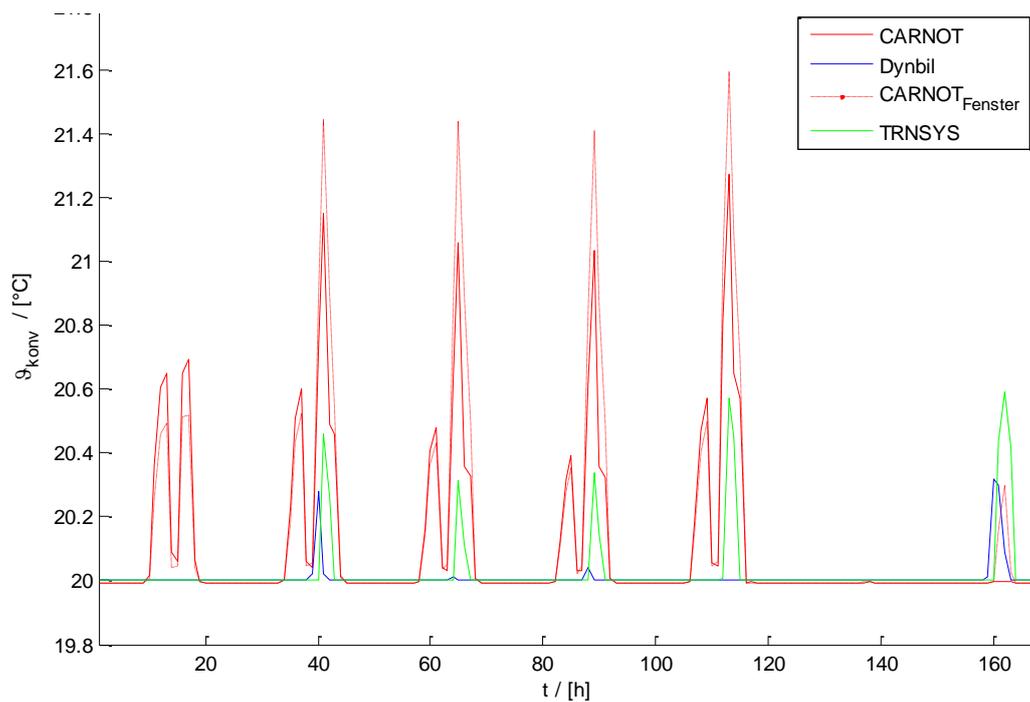


Abbildung 4.38 Verlauf der konvektiven Temperaturen einer kalten Woche, Massivholzvariante

### 4.5.3 Holz-Rahmenbauweise

Der Holz-Lehm-Container ist ähnlich aufgebaut wie der Massivholzcontainer. Es gibt geringe Unterschiede in den Geometrien, die Aufbauten sind andere und die Orientierung der Fenster wurde in Richtung Osten abgeändert. Die internen Gewinne wurden wiederum mit CARNOT berechnet und für die beiden anderen Simulationen wiederverwendet. Die

Randbedingungen für die Lüftung wurden beibehalten. Im Vergleich zu einer Ausrichtung nach Westen ergeben sich dieses Mal für CARNOT die geringeren solaren Gewinne im Vergleich mit den anderen Simulationen (Tabelle 4.14).

Tabelle 4.14 Solare und interne Gewinne

		Dynbil	CARNOT	TRNSYS
$q_{sol}$	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]	36,88	33,63	37,60
$q_{int}$	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]	3,85	3,85	3,85

#### 4.5.3.1 Ohne Sommerlüftung

Auch bei der Holzrahmen-Variante liefern die verschiedenen Programme vergleichbare Ergebnisse (vgl. Abbildung 4.39 und Abbildung 4.40). Hier funktioniert der PI-Regler im CARNOT-Modell als Ersatz für die Idealheizung besser als bei der Massivholzvariante. Dies liegt daran, dass bei einer Ausrichtung nach Osten die Temperaturspitzen im Winter durch die solare Einstrahlung geringer sind und besser ausgeglichen werden können und an einer nicht optimalen Reglerparametrierung. Im Sommer werden wiederum annähernd dieselben Ergebnisse erzielt. TRNSYS erreicht höhere mittlere Temperaturen im Sommer, da das Modell stärker auf die solare Einstrahlung reagiert wie in Abbildung 4.37 gut zu erkennen ist.

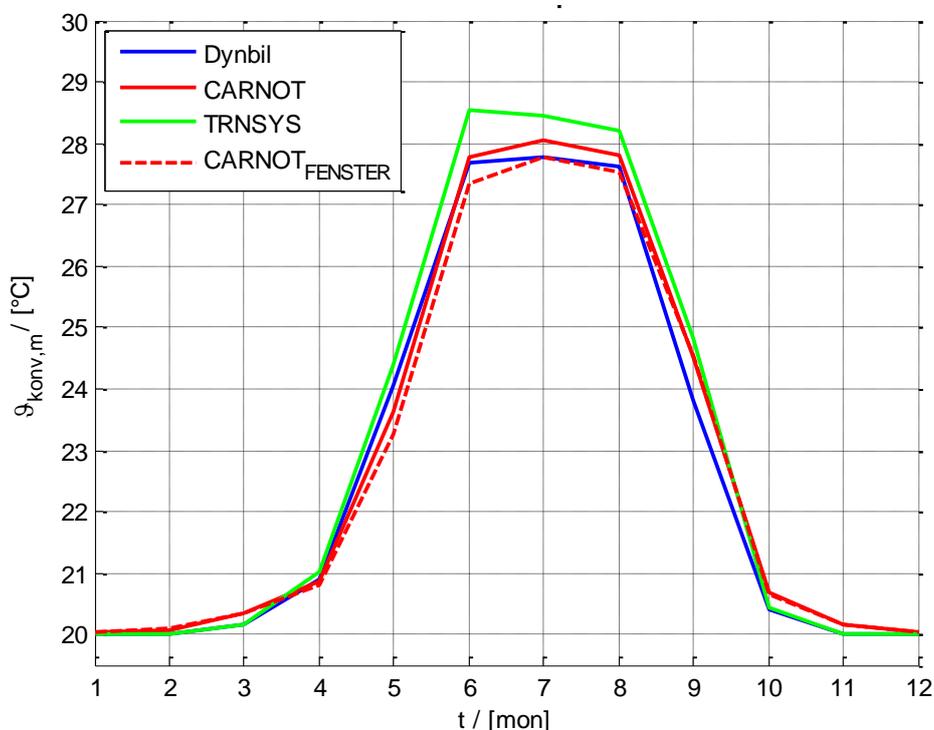


Abbildung 4.39 Monatswerte für die konvektive Temperatur; Holz-Rahmen ohne Sommerlüftung

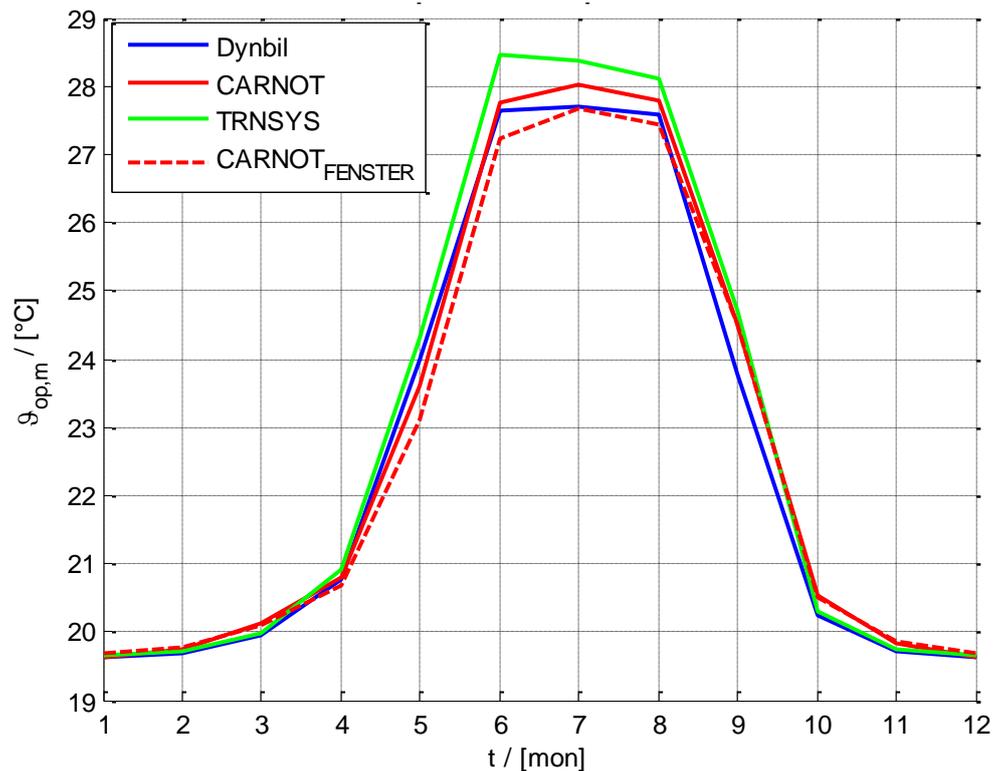


Abbildung 4.40 Monatswerte für die operative Temperatur; Holz-Rahmen ohne Sommerlüftung

Der Heizwärmebedarf (Tabelle 4.15 und Abbildung 4.41) bei Dynbil ist wiederum größer als bei den restlichen Simulationen, mit Ausnahme der Berechnung mit PHPP. Hier werden beinahe dieselben Ergebnisse erzielt. Da die solaren Gewinne im Schnitt geringer sind steigt der Heizwärmebedarf bei allen Simulationen an. Die größten Unterschiede im Heizwärmebedarf abhängig von der Ausrichtung werden bei PHPP erreicht gefolgt von den Simulationen mit CARNOT. Der Heizwärmebedarf von Dynbil und TRNSYS nimmt nur gering zu. Dabei ist zu beachten, dass der Rahmenbau einen thermisch gesehen geringfügig schlechteren Aufbau besitzt als der Container in Massivholzbauweise.

Tabelle 4.15 Heizwärmebedarf [kWh/(m<sup>2</sup> a)], Holz-Rahmen, ohne Sommerlüftung

Dynbil	CARNOT	TRNSYS	CARNOT <sub>Fenster</sub>	PHPP
51,59	47,59	48,24	49,18	51,70

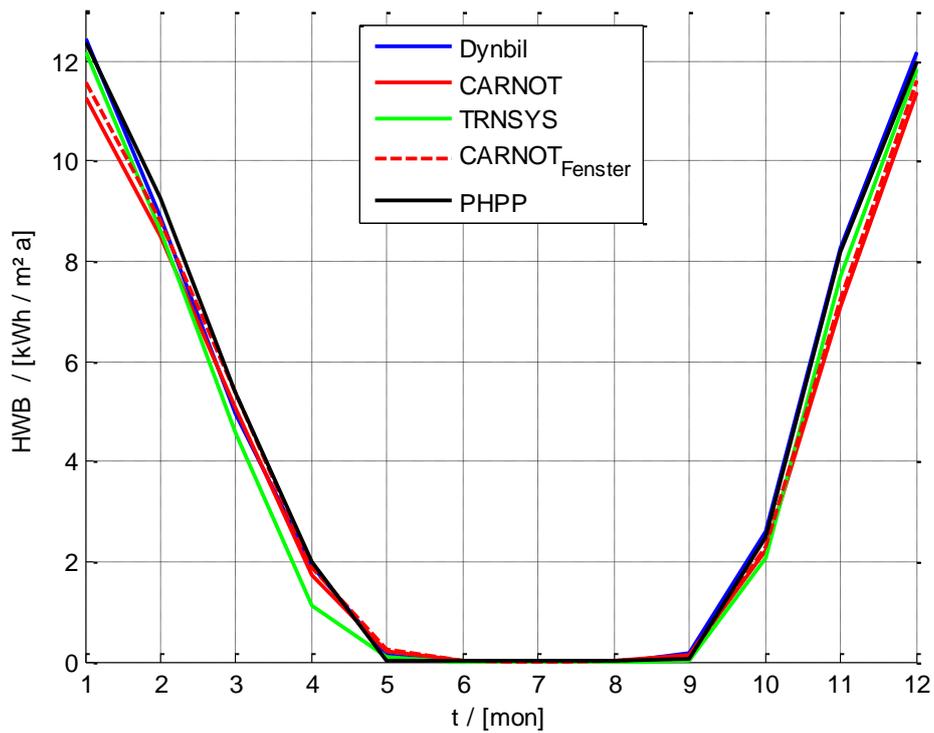


Abbildung 4.41 Monatswerte für den Heizwärmebedarf; Holz-Rahmen ohne Sommerlüftung

Die Heizlast (Abbildung 4.42) ist vergleichbar mit der der Massivholzvariante, liegt jedoch etwas höher, da die Aufbauten etwas „schlechter“ sind. Somit wird im Winter am kältesten Tag etwas mehr Leistung benötigt. Dynbil liegt wiederum entsprechend dem Heizwärmebedarf etwas höher, der Unterschied ist jedoch gering.

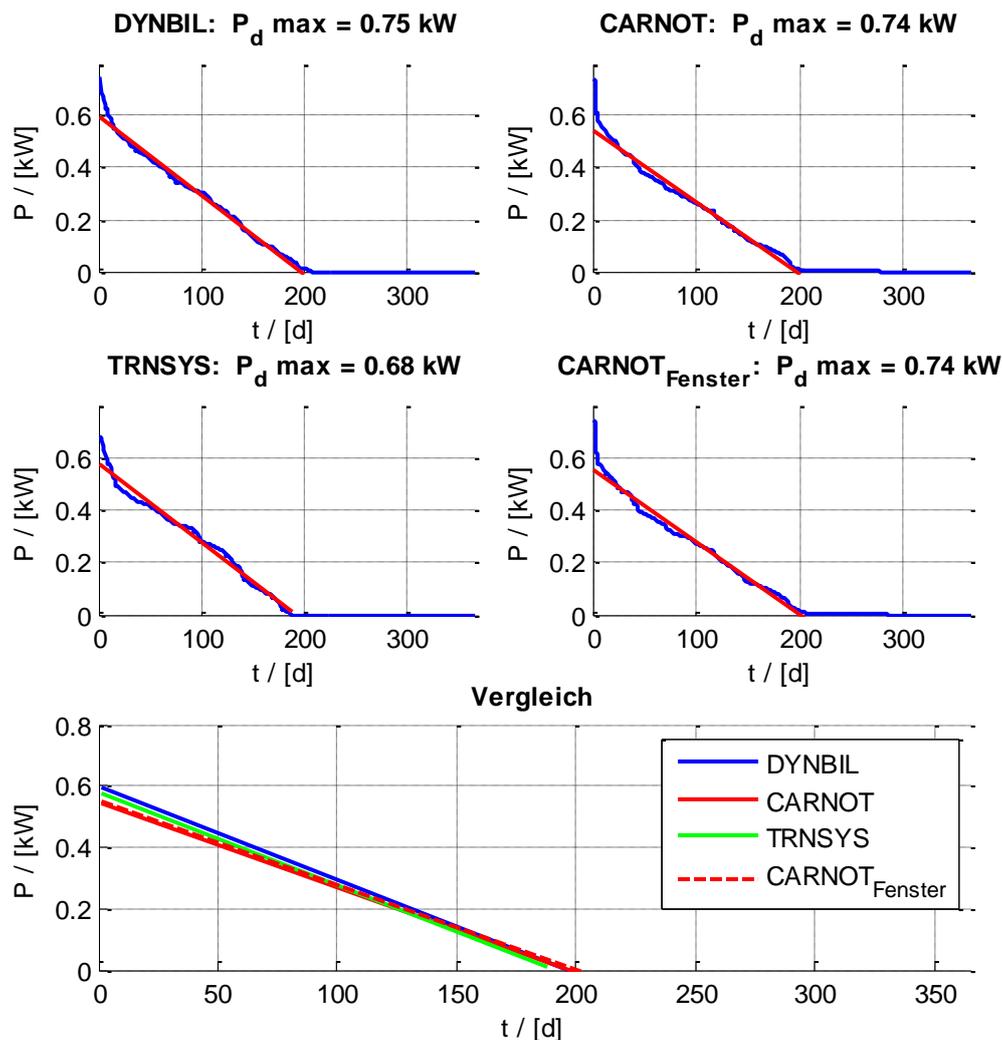


Abbildung 4.42 Heizlast für alle drei Varianten und Vergleich der Ausgleichsgeraden miteinander; Holz-Rahmen ohne SL

#### 4.5.3.2 Mit Sommerlüftung

Für die Regelung der Lüftung wurden die gleichen Annahmen wie bei der Massivholzvariante gewählt. Die mechanische Lüftung läuft zusammen mit der Wärmerückgewinnung das ganze Jahr durch. Im Sommer wird zusätzlich mit einer idealisierten konstanten Luftwechselrate von  $2,0 \text{ h}^{-1}$  gelüftet wenn die Innentemperatur über  $23 \text{ °C}$  liegt und wärmer ist als die Außenluft.

Die Temperaturen der verschiedenen Simulationsprogramme (Abbildung 4.43 und Abbildung 4.44) stimmen wiederum sehr gut überein und zeigen wiederum eine Verringerung der Temperaturen um  $4,5 \text{ °C}$  gegenüber der Variante ohne Sommerlüftung. Die Temperaturoaufteilung bei TRNSYS scheint eine andere zu sein als bei den restlichen Simulationen. Die konvektive Temperatur weicht hier stärker ab als die operative Temperatur. Betrachtet man die operative alleine, kann jedoch gesagt werden, dass die Simulationen dieselben Ergebnisse liefern.

Der größere Unterschied der operativen Temperatur im September erklärt sich durch den unterschiedlichen Einfluss der Solarstrahlung der einzelnen Modelle. Im folgenden Monat sind die Temperaturen wiederum annähernd gleich.

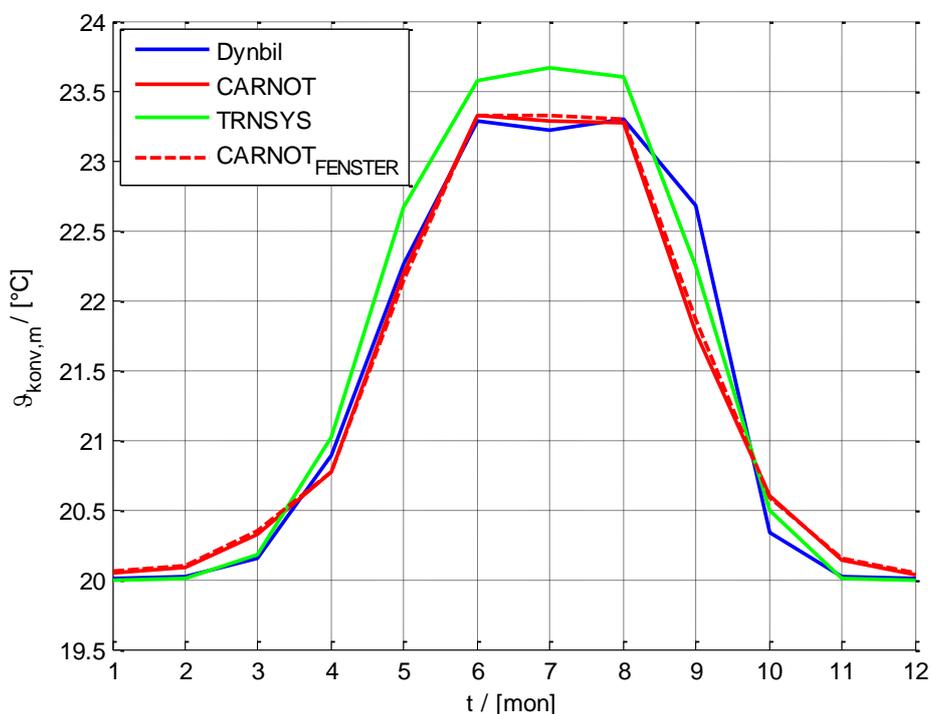


Abbildung 4.43 Monatswerte für die konvektive Temperatur; Holz-Rahmen mit Sommerlüftung

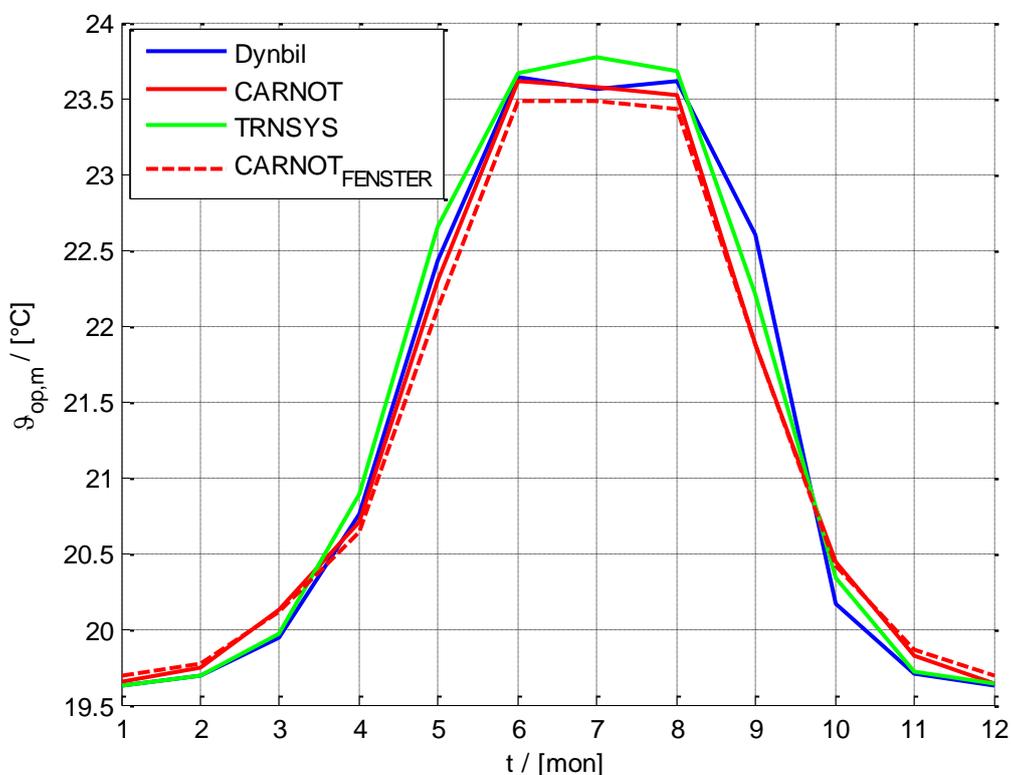


Abbildung 4.44 Monatswerte für die operative Temperatur; Holz-Rahmen mit Sommerlüftung



Auf den Heizwärmebedarf (Tabelle 4.16 und Abbildung 4.45) hat die Sommerlüftung nur einen geringen Einfluss. Daher ergeben sich annähernd dieselben Werte wie bei der Variante ohne Sommerlüftung. Die etwas höheren Werte treten vorwiegend in den Übergangszeiten auf, da hier Kühl und Heizphasen kurz aufeinander folgen können und durch die Kühlung die für das Heizen nutzbaren Temperaturen abgelüftet werden. Durch eine saubere Regelung könnte dies komplett vermieden werden, jedoch wurde für den Vergleich der Programme auf weitere Bedingungen verzichtet.

Tabelle 4.16 Heizwärmebedarf [kWh/(m<sup>2</sup> a)], Holz-Rahmen, mit Sommerlüftung

Dynbil	CARNOT	TRNSYS	CARNOT <sub>Fenster</sub>	PHPP
52,41	49,02	48,29	50,45	51,70

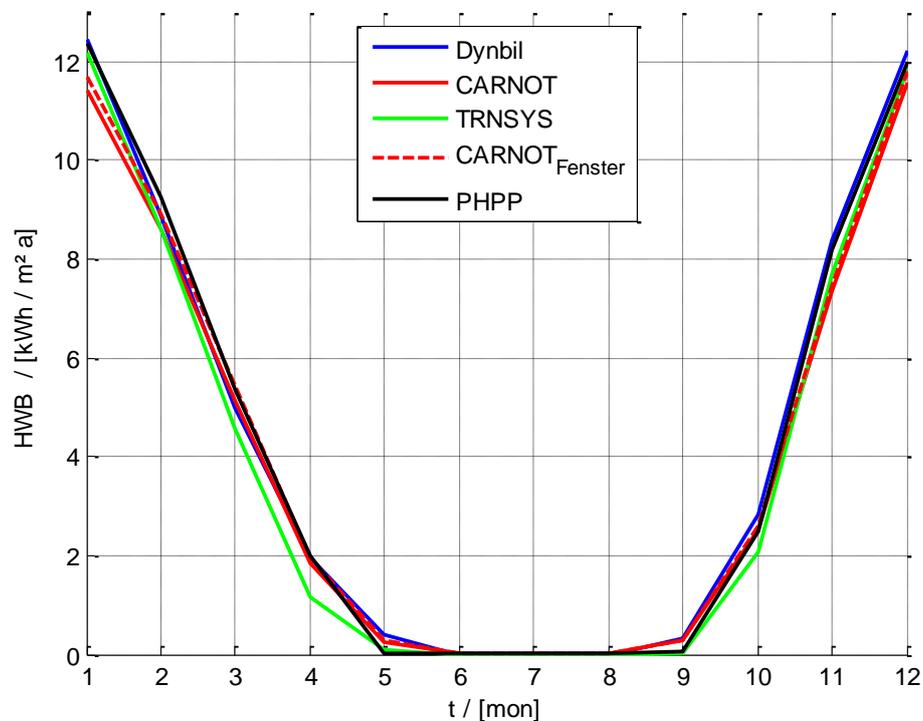


Abbildung 4.45 Monatswerte für den Heizwärmebedarf; Holz-Rahmen mit Sommerlüftung

Auf die Heizlast (Abbildung 4.46) hat die Sommerlüftung wie auch schon beim Massivholzcontainer keinen erkennbaren Einfluss. Ein erkennbarer Einfluss auf die Heizlast würde auf eine schlecht gewählte Regelung der Lüftung schließen lassen.

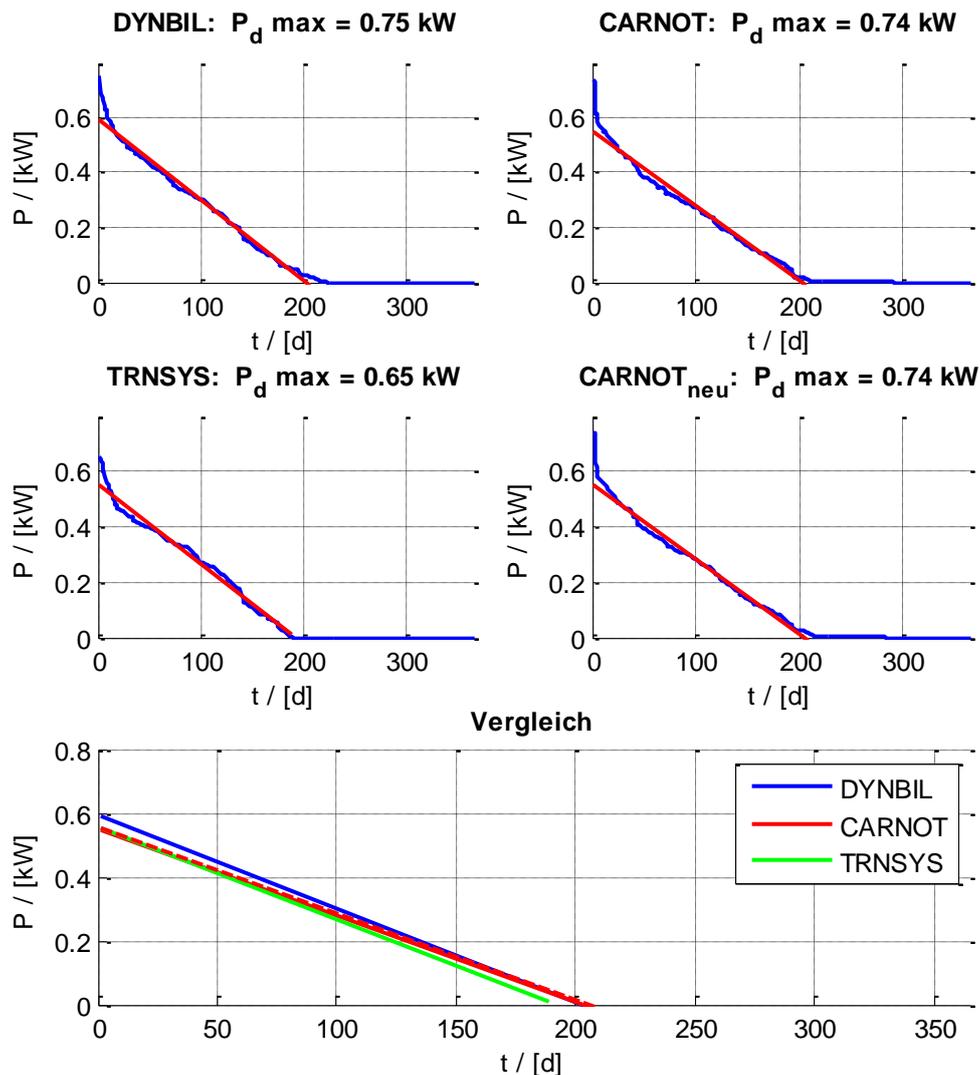


Abbildung 4.46 Heizlast für alle drei Varianten und Vergleich der Ausgleichsgeraden miteinander; Holz-Rahmen mit Sommerlüftung

#### 4.5.3.3 Detaillierter Vergleich des dynamischen Verhaltens

Auch bei der Holzrahmenbauvariante treten die Spitzen durch die solaren Gewinne gekoppelt mit den internen Gewinnen bei CARNOT auf. Dynbil liegt hier im Mittel noch etwas näher bei den Ergebnissen von CARNOT, was in Abbildung 4.47 und Abbildung 4.48 gut zu erkennen ist.

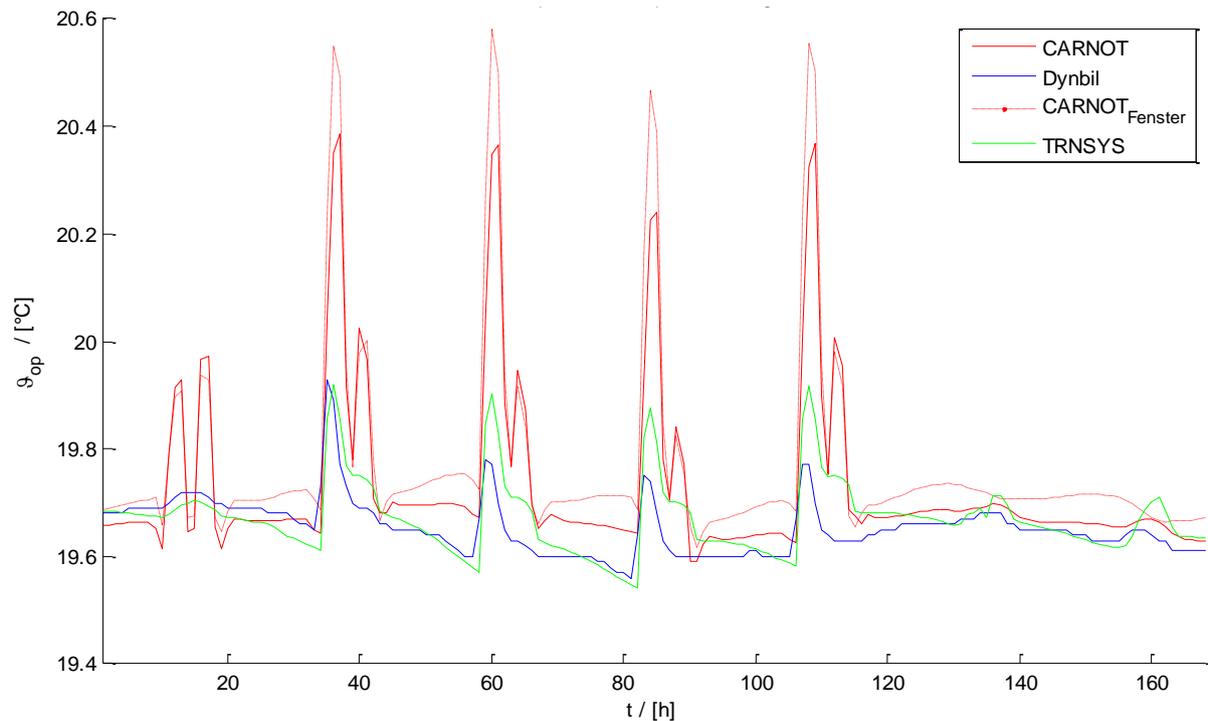


Abbildung 4.47 Verlauf der operativen Temperaturen einer kalten Woche, Holz-Rahmenbau

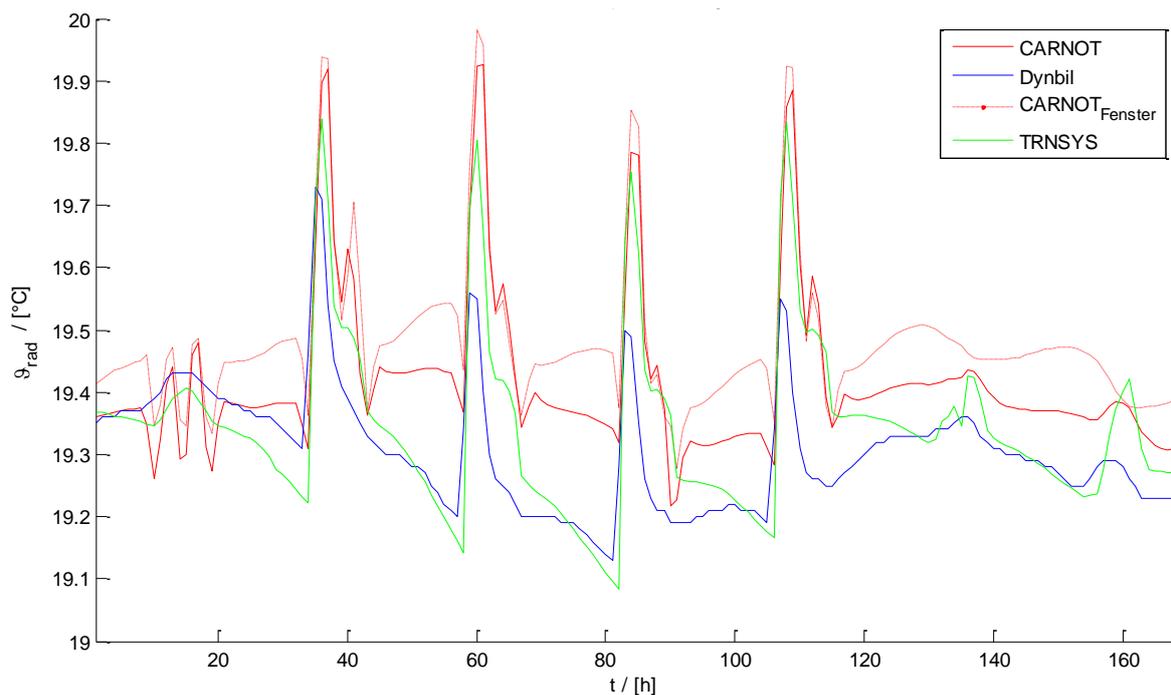


Abbildung 4.48 Verlauf der radiativen Temperaturen einer kalten Woche, Holz-Rahmenbau

In Abbildung 4.49 ist wieder der Einfluss des Fenstermodells beider CARNOT-Simulationen zu erkennen. Die Fenster sind nach Osten ausgerichtet und erhalten somit vormittags solare Einstrahlungen. Das neue Fenstermodell gibt wiederum einen wesentlich höheren Anteil der eintreffenden Strahlung an den konvektiven Temperaturknoten ab. So entsteht bei dieser Variante vormittags eine Spitze. Am Nachmittag sind beide CARNOT Simulationen

annähernd gleich. Abgesehen von den unterschiedlich großen Schwankungen werden annähernd dieselben Temperaturverläufe erreicht. Die Modelle erzielen vergleichbare Ergebnisse.

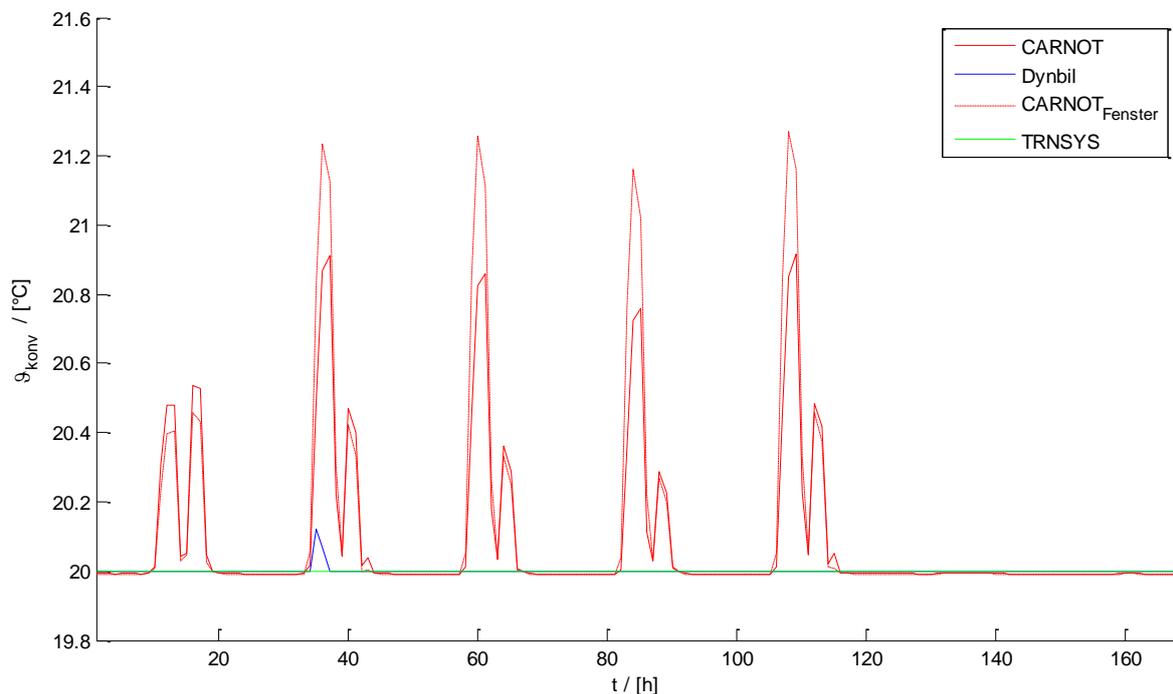


Abbildung 4.49 Verlauf der konvektiven Temperaturen einer kalten Woche, Holz-Rahmenbau

## 4.5.4 Feuchtigkeit

### 4.5.4.1 Massivholzvariante mit Sommerlüftung

Die relative Raumlufffeuchte hängt von der Temperatur ab und ist für einen Vergleich nur bedingt zu gebrauchen. Die absolute Feuchte ist temperaturunabhängig und somit besser geeignet für einen direkten Vergleich. Abbildung 4.50 zeigt die absolute Raumlufffeuchte als Tagesmittelwerte für die Simulationen mit Dynbil und CARNOT mit dem herkömmlichen Fenstermodell. Beide Modelle berücksichtigen den Transport von Wasser in den Aufbauten. TRNSYS kann dies nicht und ein Vergleich ist deshalb nicht sinnvoll. Im Winter reagiert die Feuchtepufferung von CARNOT beim Massivholzcontainer träger als bei Dynbil. Im Sommer wird diese Trägheit durch die Sommerlüftung etwas abgeschwächt, da hier die Raumlufffeuchte maßgebend durch den Luftwechsel bestimmt wird. Jedoch ist auch dort ein etwas trägeres Verhalten von CARNOT zu erkennen.

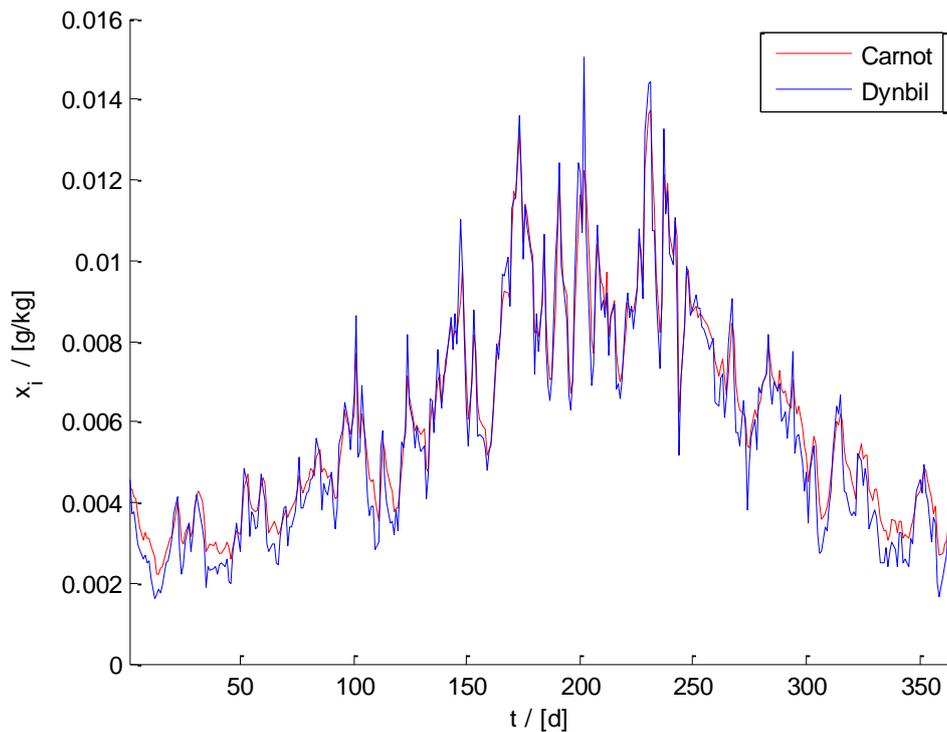


Abbildung 4.50 absolute Raumlufffeuchte mit Sommerlüftung für Massivholz-Bauweise

#### 4.5.4.2 Holz-Lehm-Rahmenbauweise mit Sommerlüftung

Abbildung 4.51 zeigt die absolute Raumlufffeuchte als Tagesmittelwerte für die Simulationen mit Dynbil und CARNOT für die Holz-Lehm-Rahmenbauweise. Die Feuchtepufferung von CARNOT ist deutlich ausgeprägter als jene von Dynbil. Dies lässt sich durch die vereinfachte Modellbildung und nur begrenzte Diskretisierung der Bauteile in Dynbil erklären. Der Effekt ist bei der Holz-Lehm-Rahmenbauweise noch ausgeprägter als bei der Massivholz-Bauweise, da der Lehm eine deutlich ausgeprägtere Sorptionsisotherme bei niedrigen relativen Feuchten (wie sie im Winter herrschen) besitzt. Detaillierter wurde dieses Verhalten bereits in (Ochs, et al., 2013) untersucht.

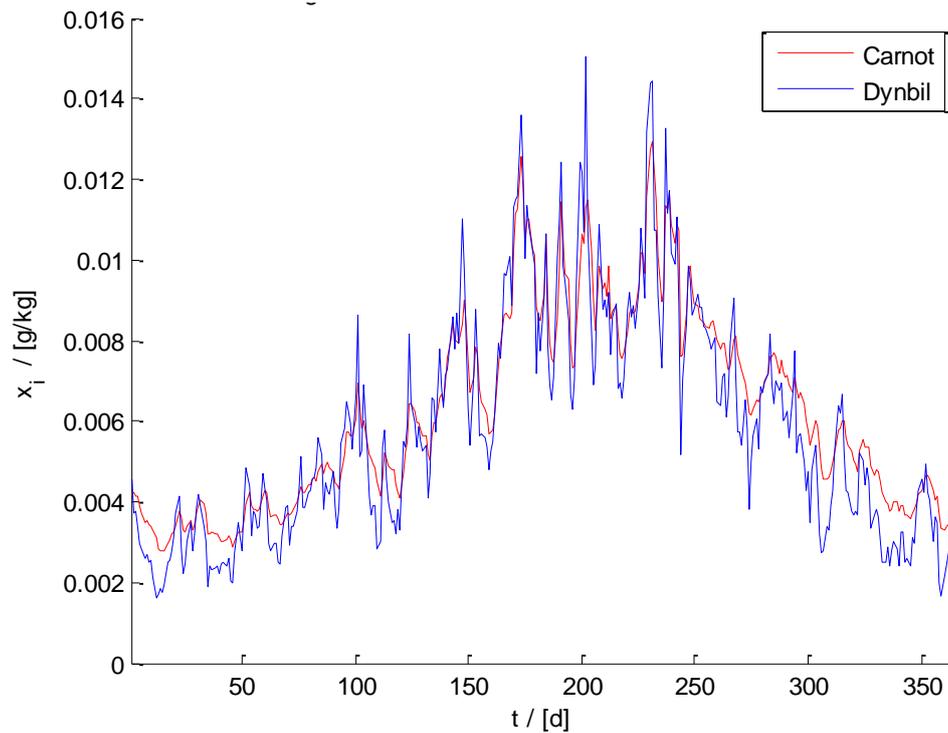


Abbildung 4.51 absolute Raumlufffeuchte mit Sommerlüftung für Holz-Lehm-Rahmenbauweise

## 4.6 UNTERSUCHUNG DER BEHAGLICHKEIT

### 4.6.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden nun für die energieeffizienten Container die vergleichsweise sehr guten Bauteile und Einrichtungen (teilweise sogar Passivhausstandard), durch reguläre, „schlechtere“ Bauteile ersetzt. Dazu zählen die mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung, die Fenster und die Wärmedämmung der Aufbauten. Für den Holz-Lehm-Rahmencontainer wird zusätzlich noch untersucht, welchen Einfluss die Lehmschicht bezüglich Feuchte- und Wärmespeicherung auf die Behaglichkeit ausübt.

Um die Behaglichkeit qualitativ abzubilden gibt es verschiedene Ansätze. Grundsätzlich haben die vorherrschenden Temperaturen, die Kleidung und Aktivität der Personen sowie die jeweilige persönliche Empfindung Einfluss auf die Behaglichkeit in Bezug auf die Temperatur. Dieser Zusammenhang kann mit Hilfe der Formel nach *Fanger* (ISO 7730) dargestellt werden. Die Luftqualität kann mit Hilfe des Indikatorgases  $\text{CO}_2$  bestimmt werden. Der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Behaglichkeit ist eher gering (Richter, 2007 S. 14-20).

### 4.6.2 Beurteilung

Die Einflüsse auf die energiebezogenen Kenngrößen sind in diesem Kapitel nicht relevant. Die Luftqualität wird nur mit Hilfe der Häufigkeit auftretender  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen



verglichen. Die thermische Behaglichkeit wird zufolge der Formel nach *Fanger* bestimmt. *Fanger* schließt auf die Behaglichkeit, indem er die Differenz zwischen realer aktivitätsbedingter Wärmeabgabe und der bei den vorliegenden raumklimatischen und bekleidungsphysiologischen Verhältnissen bestimmbaren behaglichen Wärmeabgabe bildet. Mit dieser Differenz berechnet er die mittlere Subjektive Klimabewertung der Raumnutzer (**Predicted Mean Vote**), der sogenannte PMV-Wert (Richter, 2007 S. 17).

Der PMV-Wert ist eine dimensionslose Größe beispielsweise wie in Tabelle 4.17 interpretiert werden kann.

*Tabelle 4.17 Zuordnung der thermischen Empfindung zum PMV-Wert (Richter, 2007 S. 18)*

PMV	Empfindung
- 3	kalt
- 2	kühl
- 1	erträglich (leicht) kühl
0	neutral (thermisch behaglich)
1	erträglich (leicht) warm
2	warm
3	heiß

Abhängig vom PMV (vgl. Abbildung 4.52) kann der PPD-Wert (**Predicted Percentage of Dissatisfaction**) bestimmt werden. Dieser gibt, wie der Name schon sagt, an wieviel Prozent mit den vorherrschenden Bedingungen unzufrieden sind. Der Zusammenhang kann in einem Diagramm dargestellt werden. Dabei wird eine Zufriedenheitsrate von 100 % aufgrund verschiedener „Vorlieben“ aller Personen nie erreicht.

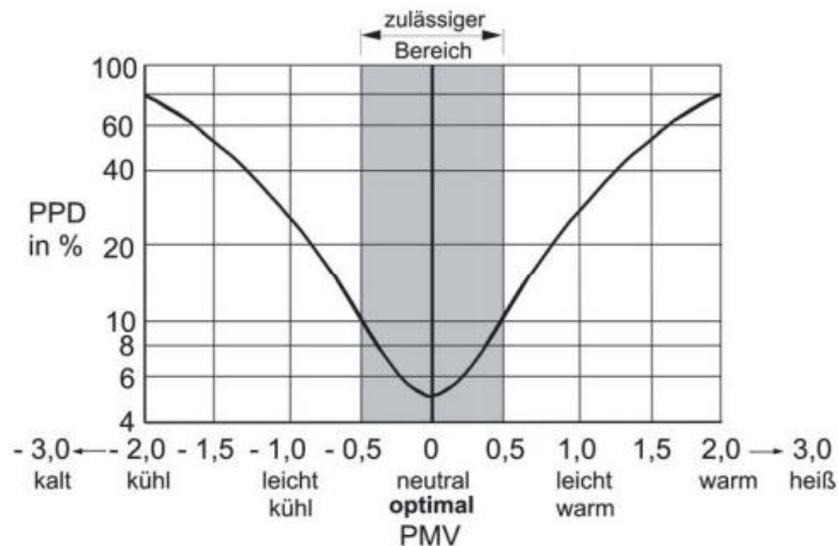


Abbildung 4.52 Vorausgesagter Prozentsatz der mit dem Raumklima unzufriedenen Raumnutzer (PPD) in Abhängigkeit von der vorhergesagten mittleren Klimabeurteilung (PMV) durch alle Raumnutzer (Richter, 2007 S. 18)

Obwohl die Luftfeuchtigkeit der Literatur zufolge keinen allzu großen Einfluss hat, wird dennoch häufig die relative Feuchte in Abhängigkeit der operativen Temperatur als Punktwolken für eine Bewertung herangezogen. Eine sinnvolle Beurteilung wäre auch Betrachtung der Temperaturverteilung über die Raumhöhe. Dies ist jedoch aufgrund der Modellbildung nicht möglich und in gut gedämmten Gebäuden wenig relevant. In CARNOT, TRNSYS und Dynbil besitzt der Innenraum lediglich einen konvektiven und radiativen Temperaturknoten und die Raumtemperatur ist somit über die Höhe konstant.

### 4.6.3 Luftwechselrate für Sommerlüftung für die Behaglichkeitsuntersuchung

Die Sommerlüftung wurde bislang mit einem konstanten relativ hohen Wert angenommen. Dies entspricht nicht der Realität. Um das Verhalten der Kühlwirkung durch die Sommerlüftung in Form eines gekippten Fensters auf die verschiedenen Varianten für Windstille besser darstellen zu können wird eine temperaturabhängige Regelung für die Sommerlüftung definiert (vgl. (Dott, et al., 2013)).

$$V \alpha = C_d C_k \alpha \frac{W}{3} \frac{\Delta T}{T} g H^3 \frac{m^3}{s} \quad (3)$$

$$C_d = 0.0174\alpha - 0.0928 \frac{H}{W} + 0.4116 [-] \quad (4)$$

$$C_k = 2.6 \cdot 10^{-7} \alpha^3 - 1.19 \cdot 10^{-4} \alpha^2 + 1.86 \cdot 10^{-2} \alpha [-] \quad (5)$$

$H$  steht für die lichte Höhe des Fensters und  $W$  für die lichte Breite des Fensters.  $T$  ist der Mittelwert der Umgebungs- und der operativen Temperatur in Kelvin und  $\Delta T$  ist die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft. Die Variable  $\alpha$  gibt den Öffnungswinkel des gekippten Fensters in Grad an.

Bei der Annahme einer Öffnung am oberen Ende von 10 cm, ergibt sich ein Winkel von etwa  $5^\circ$ . Die Fensterfläche besteht aus zwei identischen Fenstern bei denen jeweils eine Hälfte gekippt wird. Deshalb wurde die Breite mit 1,85 m angenommen.

Der Einfluss der Luftwechselrate auf die Kühlung im Sommer ist in Abbildung 4.53 dargestellt. Mit zunehmender Luftwechselrate kann der nächtliche Kühleffekt um bis zu  $4^\circ\text{C}$  gesteigert werden. Die temperaturabhängige Regelung ermöglicht eine Abschätzung der tatsächlich eintretenden Luftwechselrate. Diese liegt zwischen der Variante mit  $1,0$  und  $2,0\text{ h}^{-1}$ .

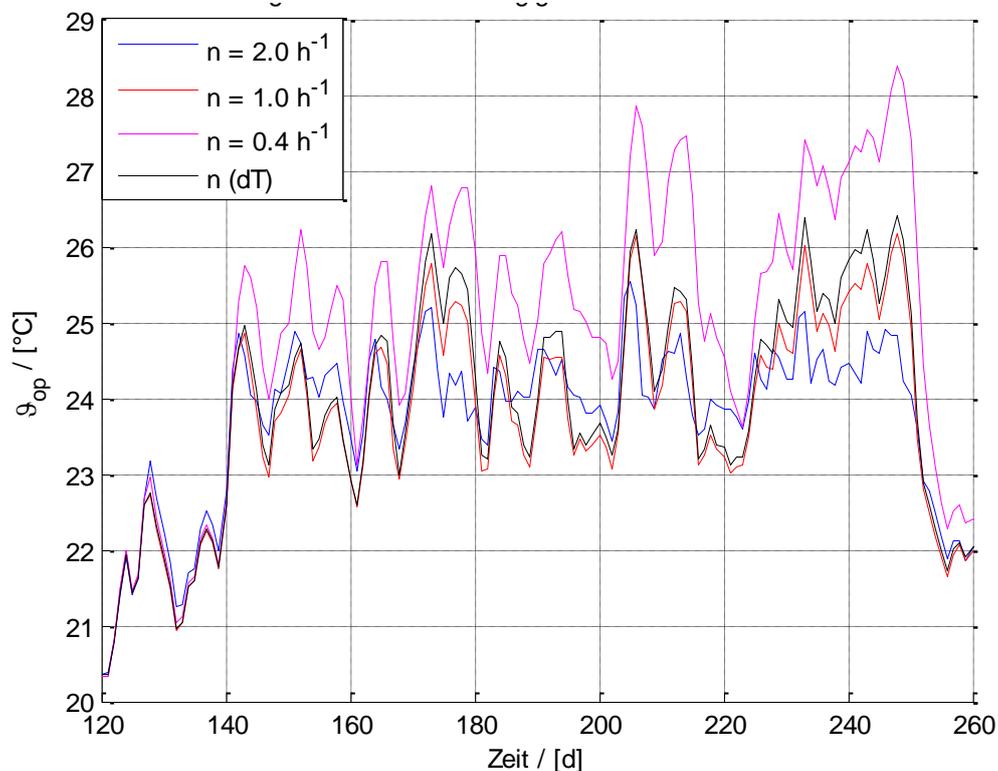


Abbildung 4.53 Auswirkungen der Luftwechselrate auf die Kühlung im Sommer

## 4.6.4 Variante Massivholz

### 4.6.4.1 Massivholz ohne Wärmerückgewinnung

In einem ersten Schritt der stückweisen theoretischen Verschlechterung des Containers, wird die Wärmerückgewinnung nicht mehr berücksichtigt. Dabei werden zwei Varianten unterschieden. Einmal kann weiter mit der mechanischen Lüftung über das Jahr mit einem konstanten Luftwechsel gelüftet werden und einmal rein mit Fensterlüftung. Die

Fensterlüftung wurde so gewählt, dass zwischen 8:00 und 18:00 Uhr sechs Mal mit einer Luftwechselrate von  $8 \text{ h}^{-1}$  für eine Viertelstunde gelüftet wird.

#### 4.6.4.1.1 Mechanische Lüftung

In Abbildung 4.54 wird die relative Luftfeuchtigkeit zusammen mit der operativen Innenraumtemperatur als Stundenmittelwerte für die Aufenthaltszeit von 8:00 bis 18:00 Uhr aufgetragen. Als zusätzliche Information ist für beide Varianten der Heizwärmebedarf angeführt. Die Bereiche im linken Diagramm sollen Grenzen für die Behaglichkeit darstellen (Häupl, et al., 2008 S. 370f). Dabei ist der innere Bereich der wirklich behagliche, und der äußere soll die Grenze für die Behaglichkeit bzw. für den noch erträglichen Bereich darstellen.

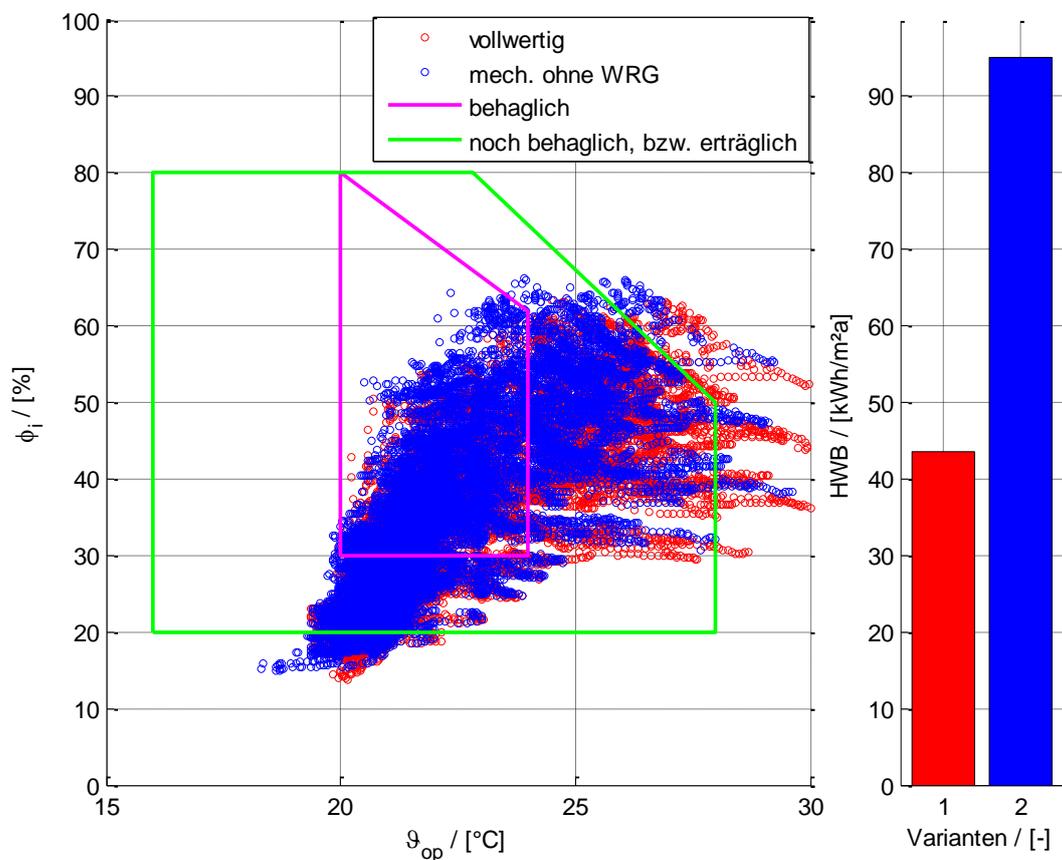


Abbildung 4.54 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur mit und ohne WRG bei Anwesenheit von Personen

Beide Varianten verlassen den behaglichen Bereich im Winter aufgrund der geringen Raumlufffeuchte. Da die mechanische Lüftung zwar eine Wärmerückgewinnung, jedoch keine Feuchterückgewinnung besitzt, trocknet die Raumluff stark aus, da die kalte Außenluft nur geringe Wasserdampfmengen aufnehmen kann. Die Raumlufffeuchte könnte ggf. durch z.B. Pflanzen aufgrund der eingebrachten Feuchte durch Gießen etwas erhöht werden. Im Sommer werden die Grenzen für die Behaglichkeit mit Wärmerückgewinnung häufiger überschritten. Ohne Wärmerückgewinnung (bzw. Sommer-Bypass) kann im Sommer die

ganze Nacht über gelüftet und somit gekühlt werden. Dadurch werden nur vereinzelt wirklich warme Temperaturen erreicht. Mit Wärmerückgewinnung muss die Kühlung über die gekippten Fenster alleine erfolgen. Somit ist der vollwertige Container im Sommer wesentlich wärmer. Eine bessere Nutzung einer mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung kann mit einem Bypass (Lüften ohne WRG) oder Ausschalten der mechanischen Lüftung und reiner Fensterlüftung für den Sommer erzielt werden.

Abbildung 4.55 zeigt einen besseren Vergleich der Verteilung der Temperaturen und der absoluten Raumlufffeuchte. Im Winter sind fast keine Unterschiede erkennbar, da hier entsprechender der zusätzlichen Verluste der Lüftung mehr geheizt wird. Das Ausmaß auf den Heizwärmebedarf ist in Abbildung 4.54 rechts dargestellt. Im Sommer ist dann der kühlende Effekt der mechanischen Lüftung ohne Wärmerückgewinnung gut zu erkennen. Auf die absolute Luftfeuchtigkeit hat diese Maßnahme so gut wie keinen Einfluss.

Alles in Allem sind keine allzu großen Unterschiede zu erkennen. Bemerkenswert jedoch ist der Unterschied im Heizwärmebedarf. Um die Behaglichkeit zu steigern, könnten Maßnahmen zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit im Winter getroffen werden.

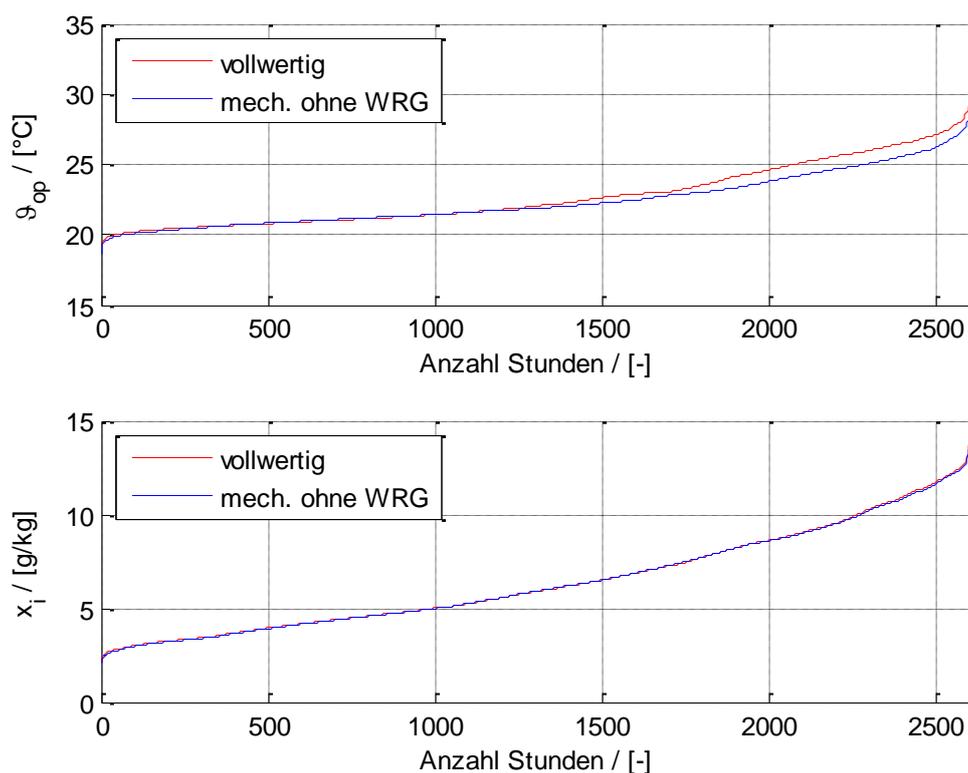


Abbildung 4.55 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit bei Anwesenheit

#### 4.6.4.1.2 Reine Fensterlüftung

In Abbildung 4.56 werden auf dieselbe Art die Varianten ohne Wärmerückgewinnung mit verschiedenen Lüftungsvarianten miteinander verglichen. Abbildung 4.57 zeigt mit der

Summenlinie einen besseren Vergleich. Durch die Lüftung in Intervallen kann sich im Raum im Winter eine höhere Luftfeuchtigkeit einstellen, da zwischen den Lüftungen die Luftfeuchtigkeit nicht an die Umwelt abgegeben wird. Im Gegenzug erreicht man während des Lüftungsvorganges wesentlich geringere Temperaturen. Im Sommer herrschen bei der Fensterlüftung im Schnitt kühlere Temperaturen, jedoch werden hier auch größere kurzfristige Temperaturspitzen erreicht.

Mit der Fensterlüftung wird im Winter zwar eine angenehmere Luftfeuchtigkeit erreicht, jedoch kühlt der Raum während des Lüftungsvorganges stark ab (vgl. Abbildung 4.57).

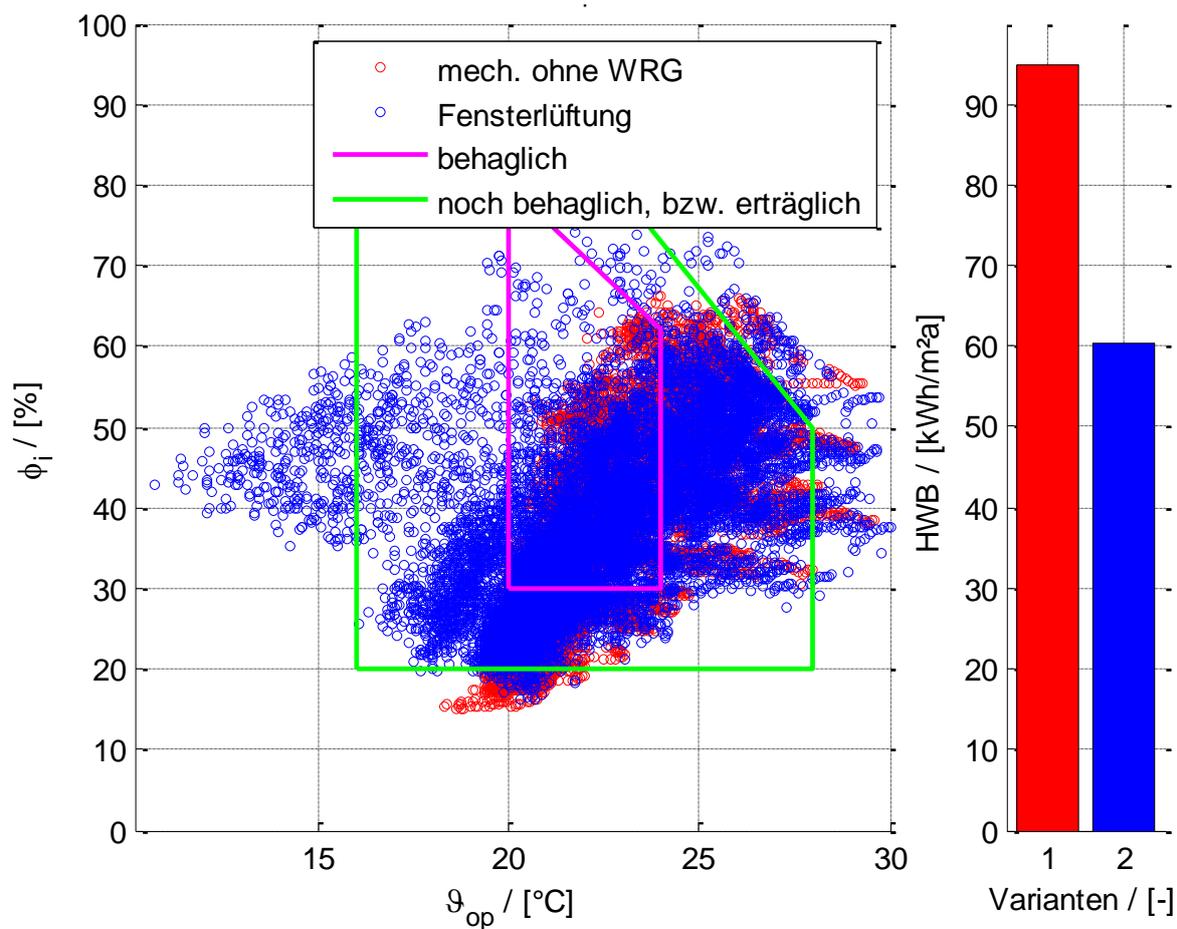


Abbildung 4.56 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur ohne WRG mechanisch und mit Fensterlüftung

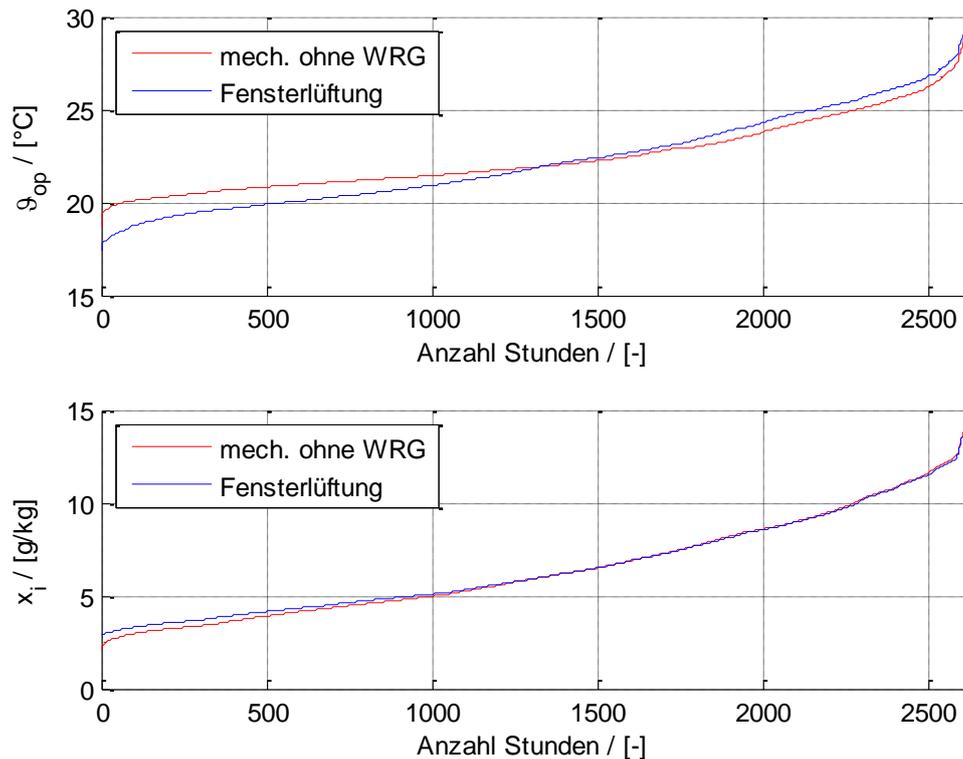


Abbildung 4.57 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit

#### 4.6.4.2 Massivholz mit einer 2-Scheiben Verglasung

Ein nächster Schritt für die Reduzierung der Bauteilqualität ist der Einbau eines schlechteren Fensters. Die vorhandene 3-Scheibenverglasung wurde durch eine einfachere 2-Scheibenverglasung ersetzt. Dazu wurde ein vordefinierter Fensteraufbau aus dem Programm Window 6 entnommen und in die Simulation eingearbeitet. Die Wärmebrücken für den Einbau und die Kanten zwischen Glas und Rahmen wurden mit höheren linearen Verlustkoeffizienten versehen. Die Eckdaten des verwendeten Fensters sind im Anhang enthalten.

Im Sommer werden durch die schlechtere Verglasung höhere solare Gewinne erzielt. Dadurch steigt die Temperatur ohne eine Verschattung rascher an und es werden Temperaturen von über 30 °C erreicht. Im Winter kann anhand Abbildung 4.58 keine Aussage über die Auswirkungen getroffen werden. Die Summenlinien in Abbildung 4.59 bieten eine bessere Anschaulichkeit, wobei auch hier bei den kalten Temperaturen keine großen Unterschiede erkennbar sind.

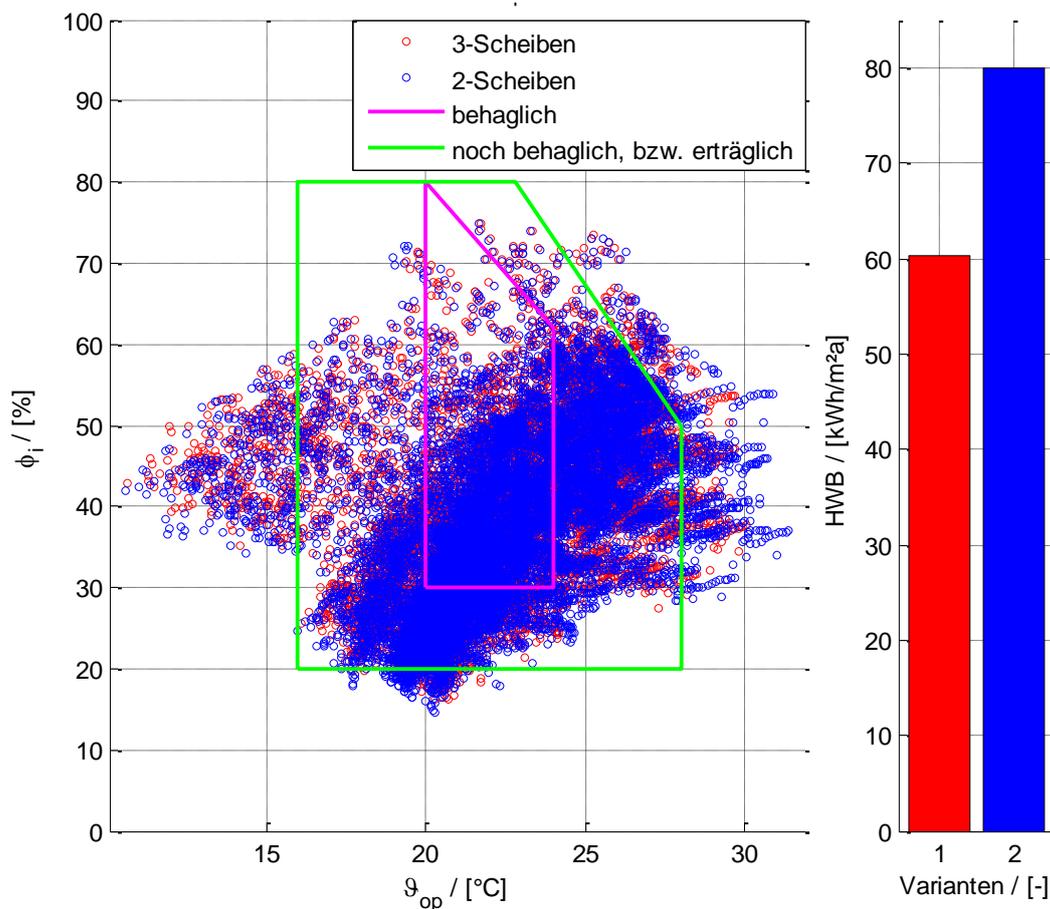


Abbildung 4.58 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur mit Fensterlüftung mit 2- und 3- Scheibenverglasung

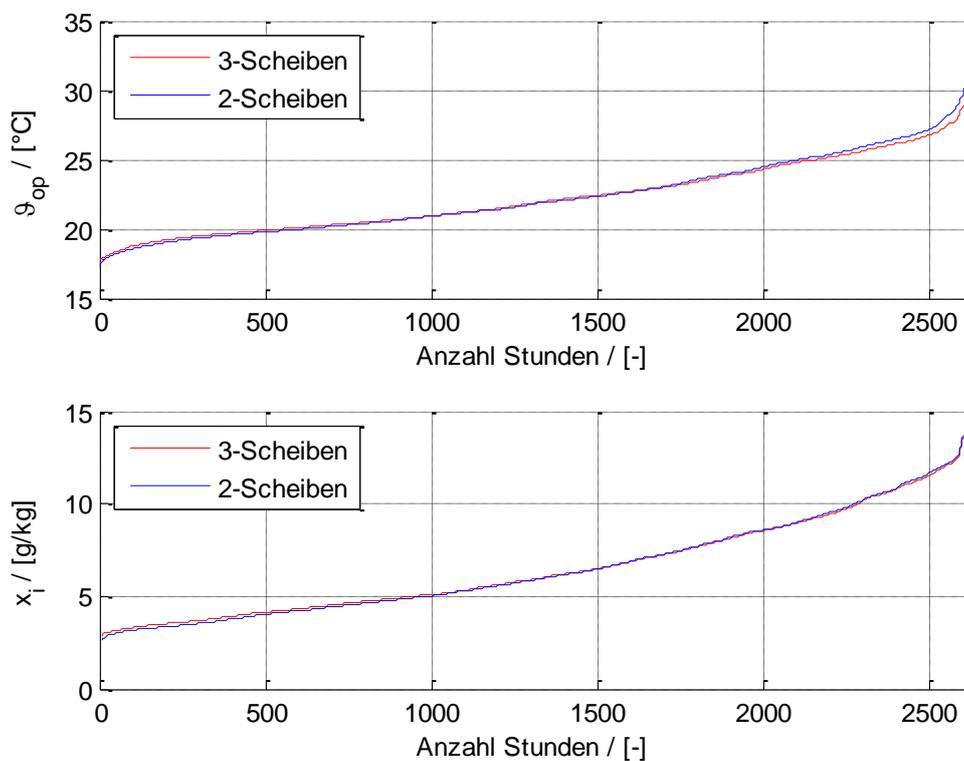


Abbildung 4.59 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit

Daher ist in Abbildung 4.60 der Bereich um die Raumtemperatur von 20 °C genauer dargestellt. Die sehr kalten Temperaturen werden während des Lüftungsvorganges erreicht und hängen von der Luftwechselzahl ab. Hier ergeben sich erwartungsgemäß keine Unterschiede zufolge der Fensterwahl. Im Bereich um die gewünschte Raumtemperatur hingegen ist die Variante mit der 3-Scheiben-Verglasung wärmer. Um eine Größenordnung der Auswirkung nennen zu können, kann die Differenz der Anzahl der Temperaturen unter 20 °C beider Varianten angegeben werden. Die Anzahl beträgt bei der 3-Scheiben-Verglasung 558 h und mit der 2-Scheiben-Verglasung 619 h. Dadurch, dass keine mechanische Lüftung mehr vorhanden ist, ist die Produktion der Feuchtigkeit maßgebend für die Verhältnisse im Raum. Je wärmer es ist, desto mehr Wasserdampf wird von den Personen im Raum produziert. Die Korrelation von abgegebener Feuchte von Personen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und Aktivität sind in CARNOT hinterlegt. Dies erklärt die geringfügig größere absolute Luftfeuchtigkeit, bei der Variante mit der 3-Scheiben-Verglasung.

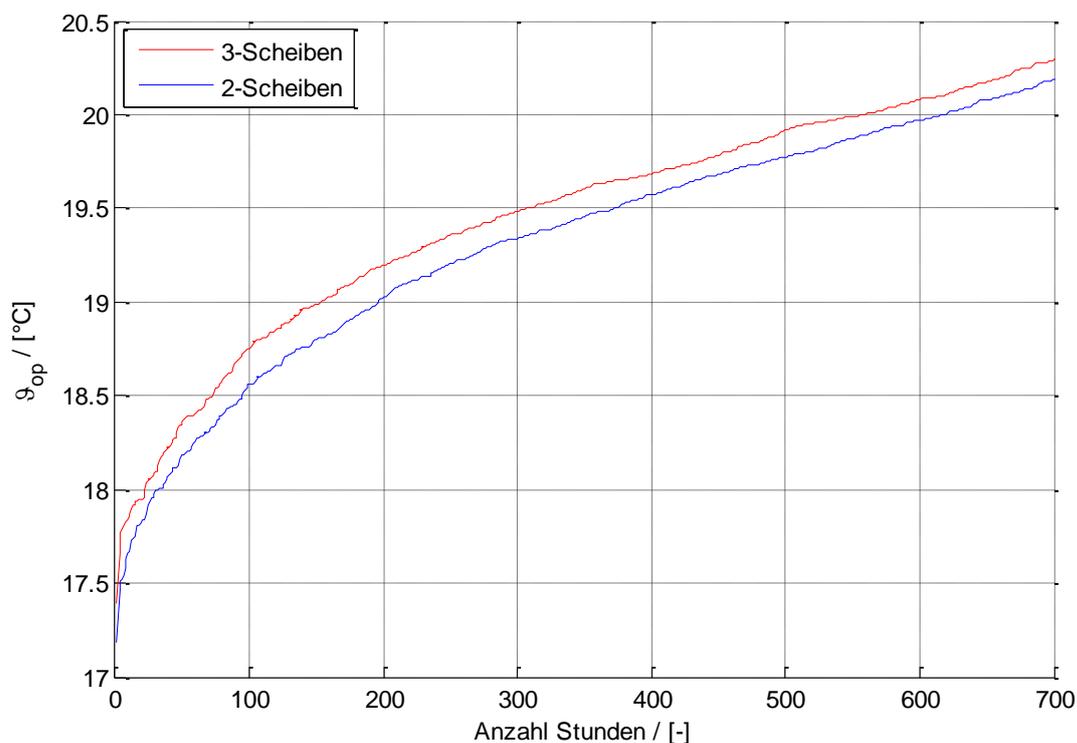


Abbildung 4.60 Genauere Darstellung der Summenlinie im Bereich um die gewünschte Raumtemperatur

#### 4.6.4.3 Massivholz ohne Wärmedämmung

In einem letzten Schritt kann nun eine Berechnung ohne Wärmedämmung durchgeführt werden. Der Container besitzt nun eine herkömmliche 2-Scheiben-Verglasung, wird in Intervallen über das Fenster belüftet. Der Wandaufbau wurde auf das tragende System



reduziert. Der so erhaltene Container kann näherungsweise mit einem herkömmlichen Bürocontainer verglichen werden.

Ohne Dämmung steigen die Wärmeverluste derart an, dass das bisher verwendete Heizsystem gar nicht mehr in der Lage ist die Temperaturen im Winter zu halten. Die Oberflächentemperaturen weichen also von der Lufttemperatur und der Temperatur des Heizelementes ab und es entstehen Temperaturgradienten im Raum. Im Sommer heizt sich der relativ kleine Raum schnell auf und es werden sogar Temperaturen von bis zu 32 °C erreicht. Die abgespeckte Version benötigt also eine Heizung mit einer größeren Leistung um zumindest im Winter temperaturmäßig behagliche Bedingungen zu erhalten. Dadurch steigt der Heizwärmebedarf noch mehr an.

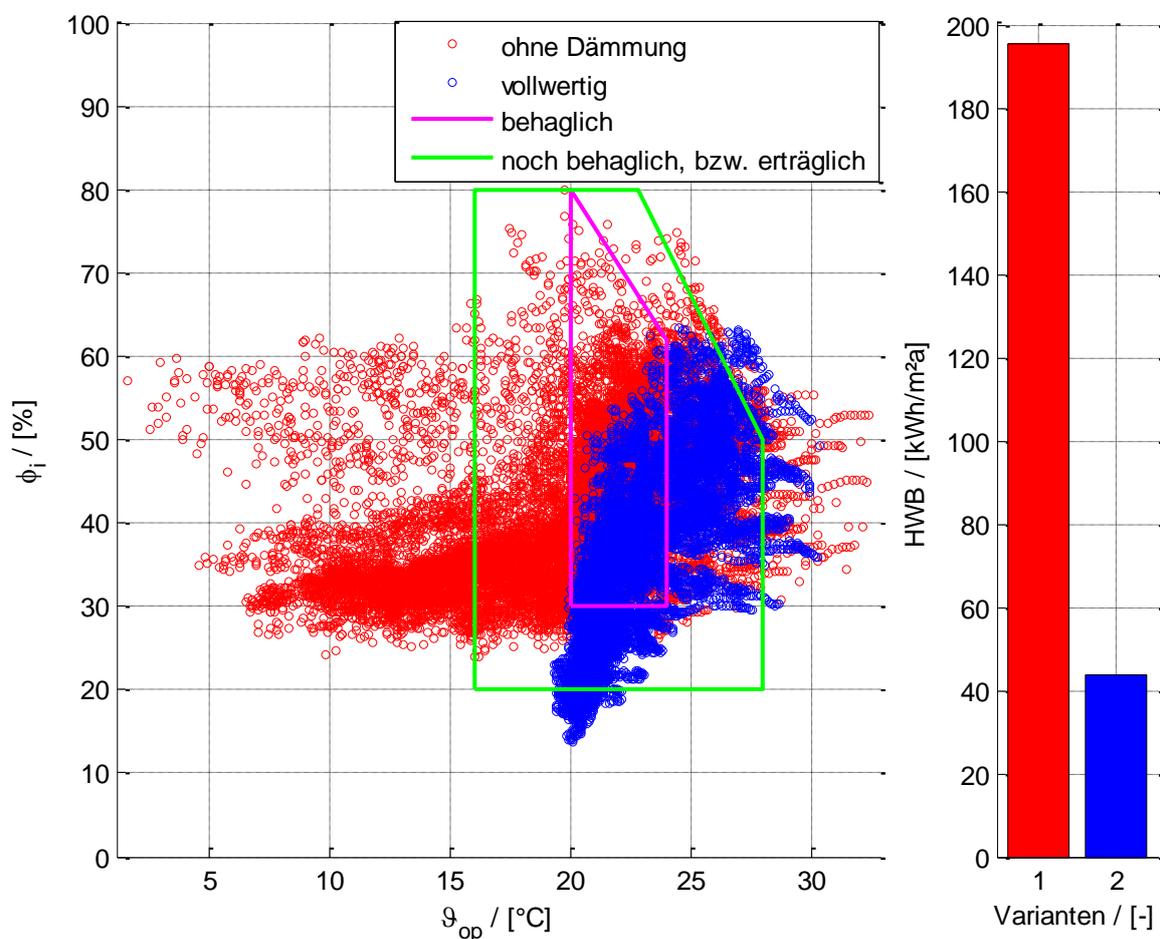


Abbildung 4.61 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur des vollwertigen Aufbau im Vergleich mit dem vollständig rückgebauten Container

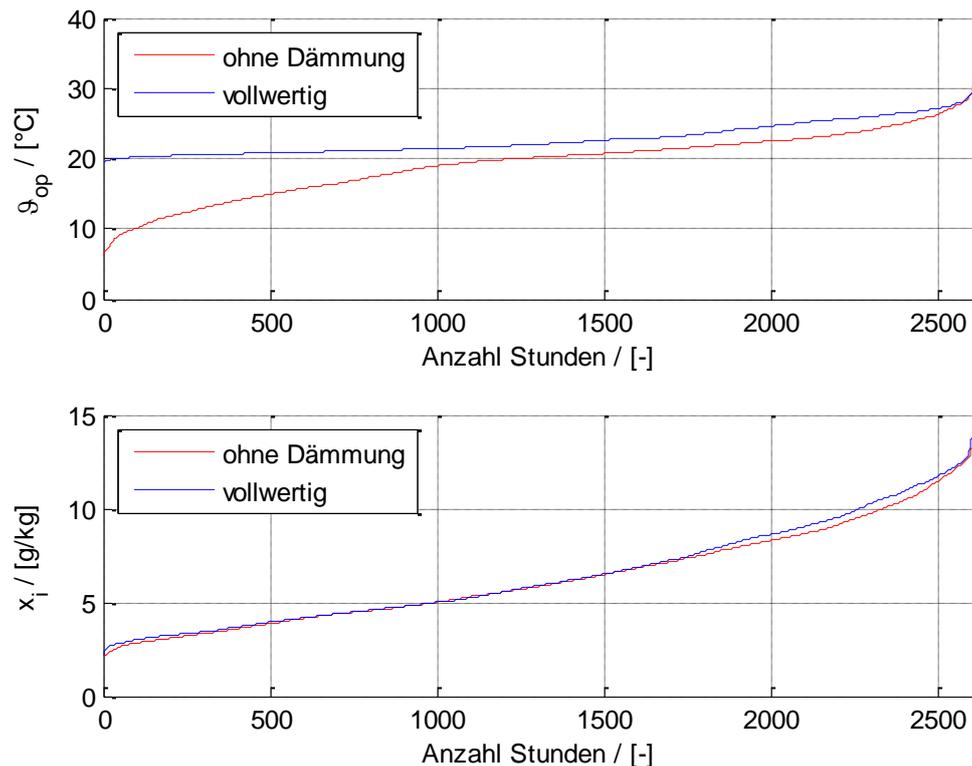


Abbildung 4.62 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit

#### 4.6.4.4 Vergleich der Varianten mit dem Verfahren nach Fanger

Gemäß Tabelle 4.17 werden Werte für -1 bis 1 als behaglich bzw. gut erträglich erachtet. Abbildung 4.63 zeigt, dass der Container tendenziell zu warm als zu kalt wird. Bei den Varianten 3-Scheiben- und 2-Scheiben-Verglasung erfolgt der Luftwechsel im Winter durch Stoßlüften. Während des Lüftens kann die Heizung die Temperatur nicht halten, es wird folglich zu kalt. Die Anzahl der zu kühlen Zeitpunkte ist im Vergleich jedoch sehr gering. Im Sommer hingegen kann nur durch einen erhöhten Luftwechsel die Temperatur wieder gesenkt werden, z.B. durch Nachtlüftung. Jedoch wird es bei keiner Variante anhaltend zu warm im Raum, sondern nur kurzfristig bei großen solaren Einstrahlungen. Die Variante ohne Dämmung ist thermisch bereits so schlecht, dass die vorgesehene Heizung im Winter gar nicht die benötigte Leistung erbringen kann. Daher ist es bei dieser Variante bereits tendenziell kälter.

Bei einer reinen Betrachtung der Behaglichkeit empfiehlt sich eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung die für den Sommer einen Bypass besitzt oder im Sommer das Lüftungsgerät auszuschalten und über das Fenster zu lüften. Um die Luftfeuchtigkeit im Winter zu erhöhen gibt es Geräte, die zusätzliche eine Feuchterückgewinnung besitzen. Einfacher wäre es noch die Feuchtigkeit über Pflanzen zu erhöhen. Ist keine Wärmerückgewinnung vorhanden, empfiehlt sich eine Fensterlüftung. Eine auf Dauer

reduzierte relative Luftfeuchtigkeit ist gesundheitsschädlich und deshalb einer zeitweisen kühleren Raumtemperatur nicht vorzuziehen.

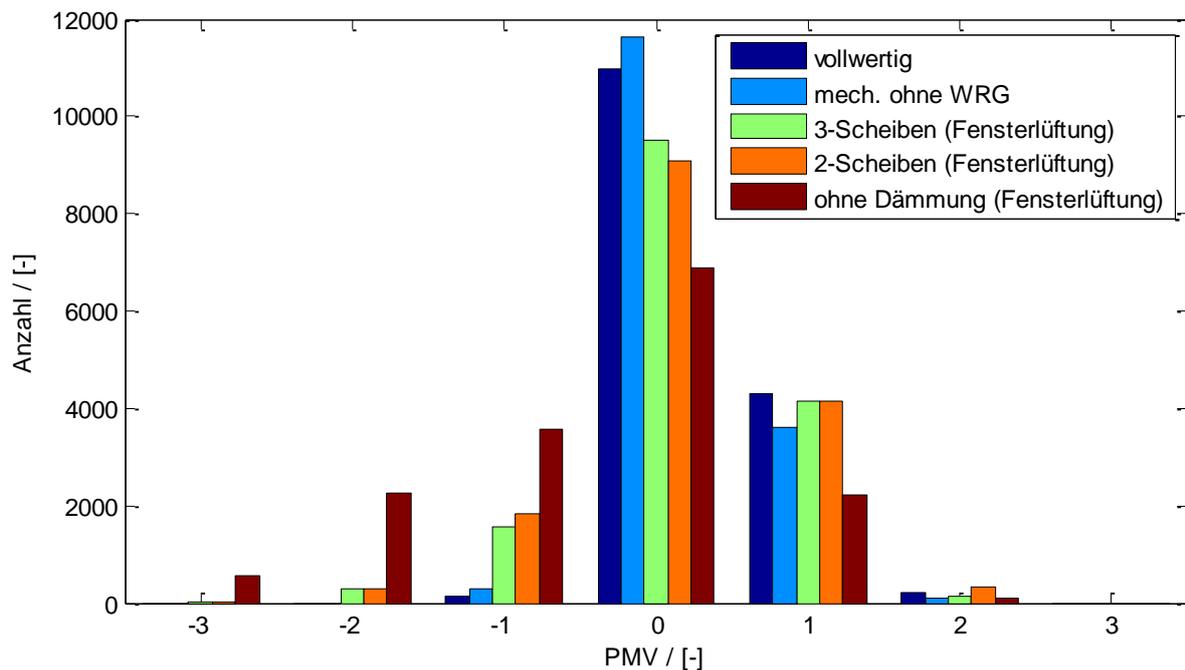


Abbildung 4.63 Vergleich der Ergebnisse für die Berechnung der Behaglichkeit nach Fanger bei Anwesenheit von Personen, Massivholz

#### 4.6.4.5 Vergleich der Verluste und Gewinne aller Varianten

Um ein Verständnis für die Auswirkungen der Maßnahmen auf die Energieströme zu erhalten sind in Abbildung 4.64 die Größe der Gewinne bzw. der Verluste der untersuchten Varianten verglichen. Verständlicherweise ergeben sich größere Transmissionswärmeverluste, je, thermisch gesehen, schlechter die einzelnen Bauteile werden. Die solaren Gewinne beinhalten bereits die Gewinne durch Transmission, sowie die Gewinne durch die sekundäre Wärmeabgabe.

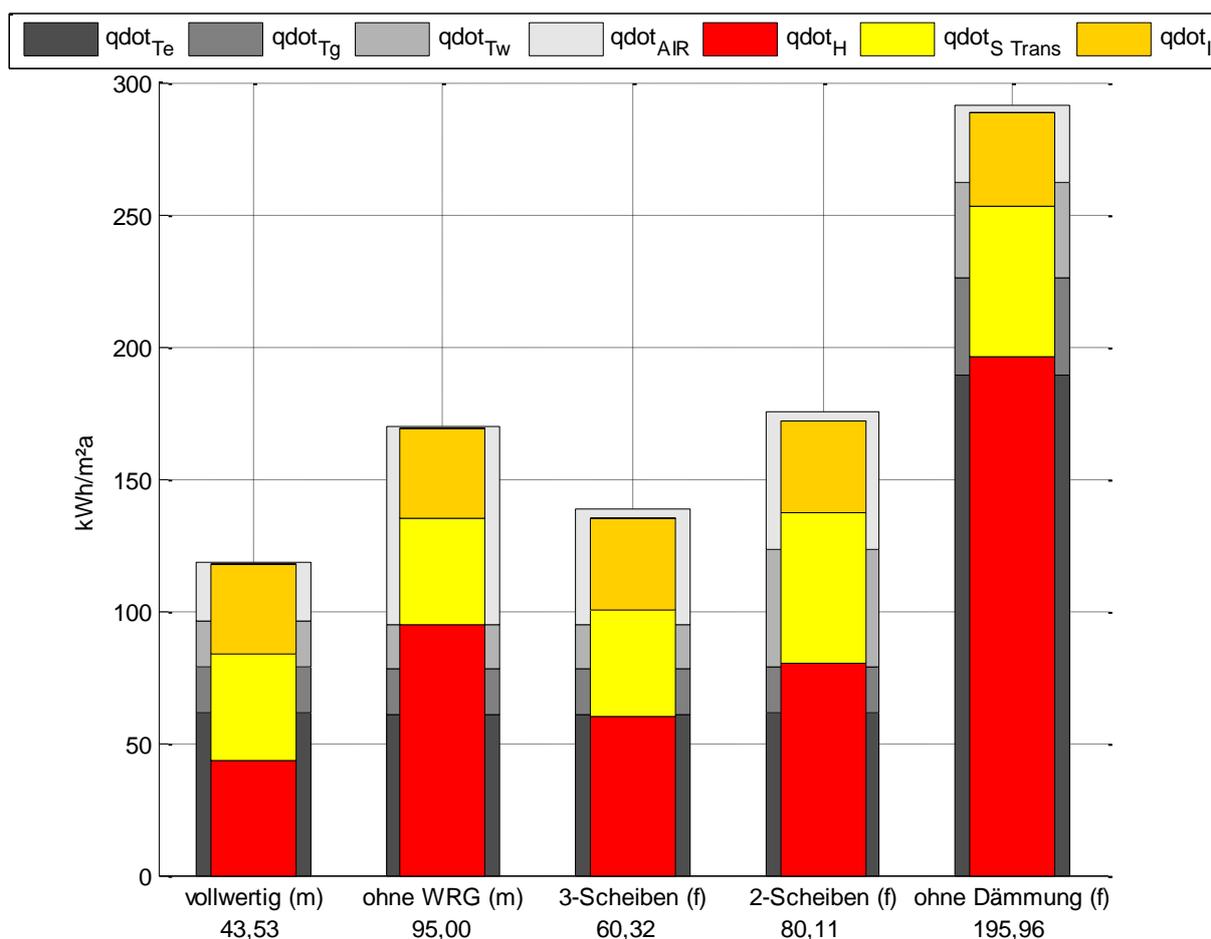


Abbildung 4.64 Vergleich der Gewinne und Verluste der einzelnen Varianten, (f) = Fensterlüftung, (m) = mechanische Lüftung, Werte entsprechen dem Heizwärmebedarf in kWh/m²a

## 4.6.5 Variante Holz-Rahmenbau

Damit die Container untereinander vergleichbar sind wird auch für den Rahmenbau die Orientierung der Fenster nach Westen festgelegt. Der Holz-Rahmencontainer hat im Gegensatz zur massiven Variante einen Lehmputz auf der Innenseite der Wände. Der Lehm soll als Feuchte- und Wärmepufferung dienen und so die Raumqualität verbessern.

### 4.6.5.1 Holz-Rahmenbau mit herkömmlichem Kalkputz

Abbildung 4.65 zeigt einen Vergleich mit dem geplanten Lehm-Putz und einem herkömmlichen Putz. In dieser Darstellung ist keine signifikante Steigerung der Behaglichkeit zu erkennen. Genauer gesagt verhalten sich die beiden Varianten beinahe ident. Die Summenlinien in Abbildung 4.66 zeigen dass die Temperaturen sogar exakt dieselben sind. Eine Auswirkung des Lehmputzes auf die Feuchtigkeit ist fast nicht festzustellen. Eine genauere Untersuchung der Auswirkung des Putzes erfolgt in Kapitel 4.7. Für den Heizwärmebedarf ergeben sich keine Unterschiede, da der Putz so gewählt wurde, dass die Wärmeleitfähigkeit der des Lehms entspricht.

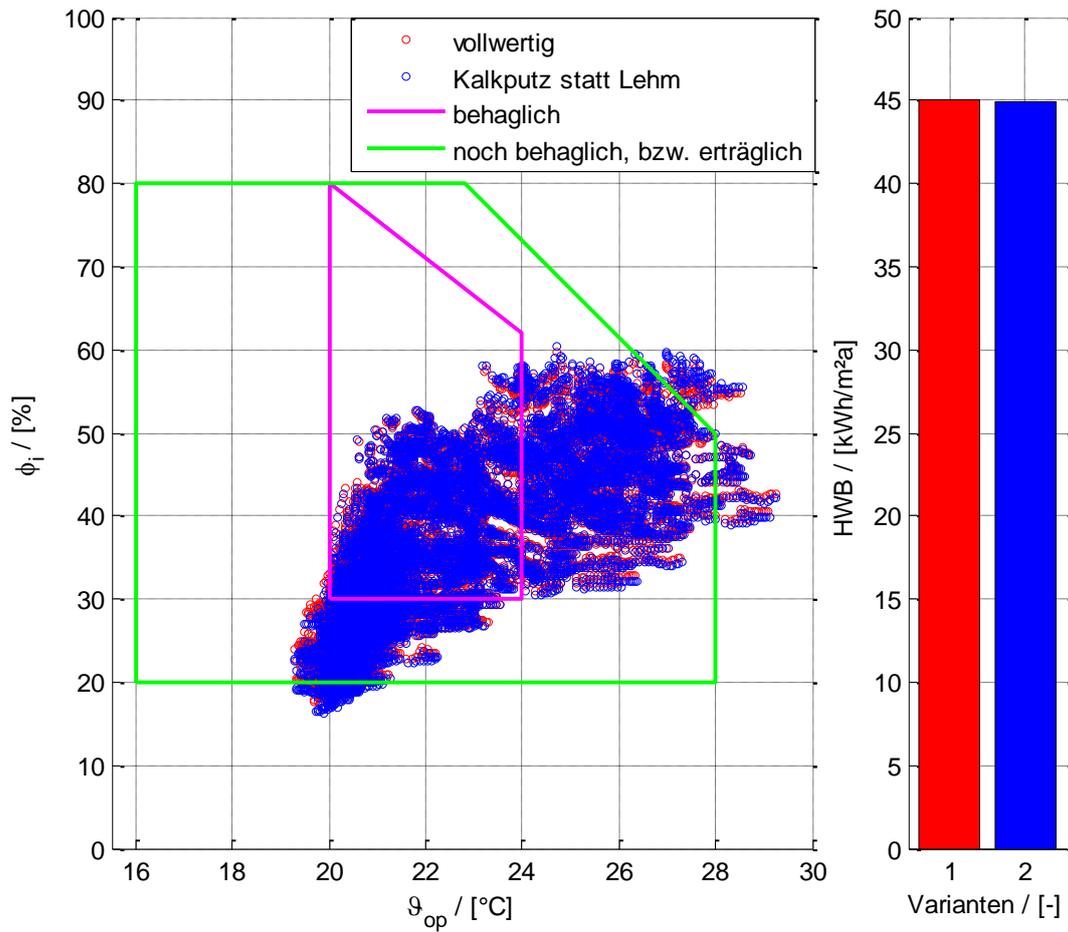


Abbildung 4.65 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur des vollwertigen Aufbau im Vergleich mit einem Aufbau ohne Lehmschichten

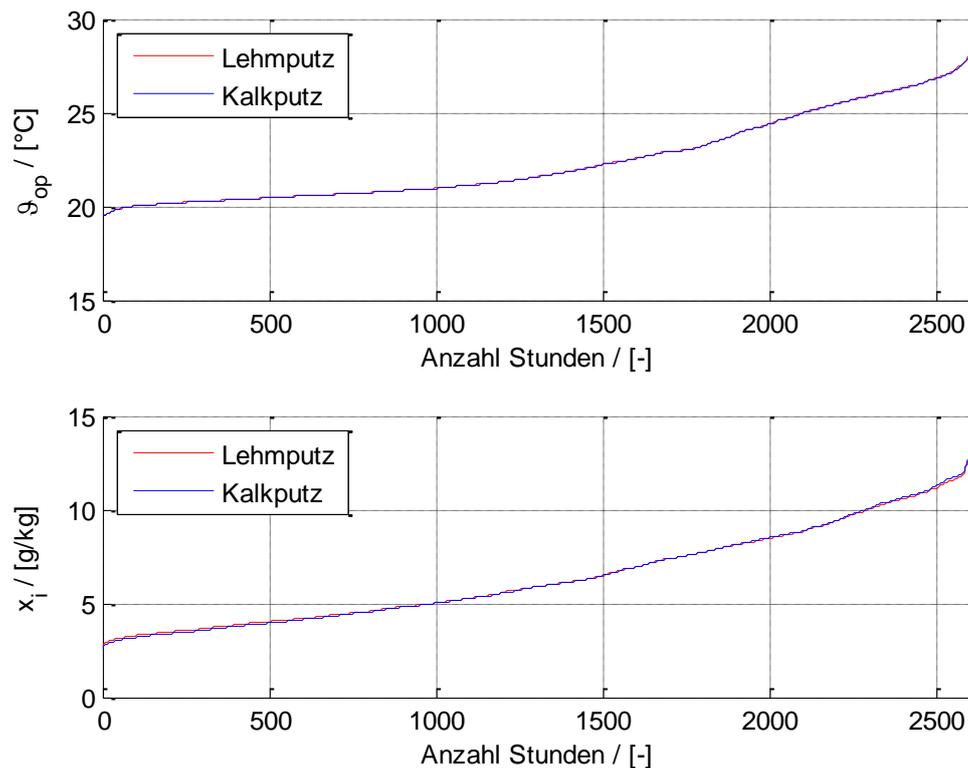


Abbildung 4.66 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit

## 4.6.5.2 Holz-Rahmenbau ohne Wärmerückgewinnung

### 4.6.5.2.1 Mechanische Lüftung

Wie auch bei der Massivholzvariante hat das Weglassen der Wärmerückgewinnung im Winter einen sehr geringen Einfluss auf die Behaglichkeit bei der Betrachtung von Abbildung 4.67 bzw. Abbildung 4.68. Im Sommer hingegen bringt die kontinuierliche Lüftung einiges für die Auskühlung des Raumes. Im Winter kann aufgrund der andauernden Lüftung das Heizsystem nicht immer die gewünschte Temperatur halten, daher entstehen im Winter teilweise Temperaturen unter 19 °C. Die absolute Luftfeuchtigkeit hängt vom Luftwechsel ab. Die Unterschiede der absoluten Feuchtigkeit hängen mit der Häufigkeit des Luftwechsels mit der Sommerlüftung zusammen.

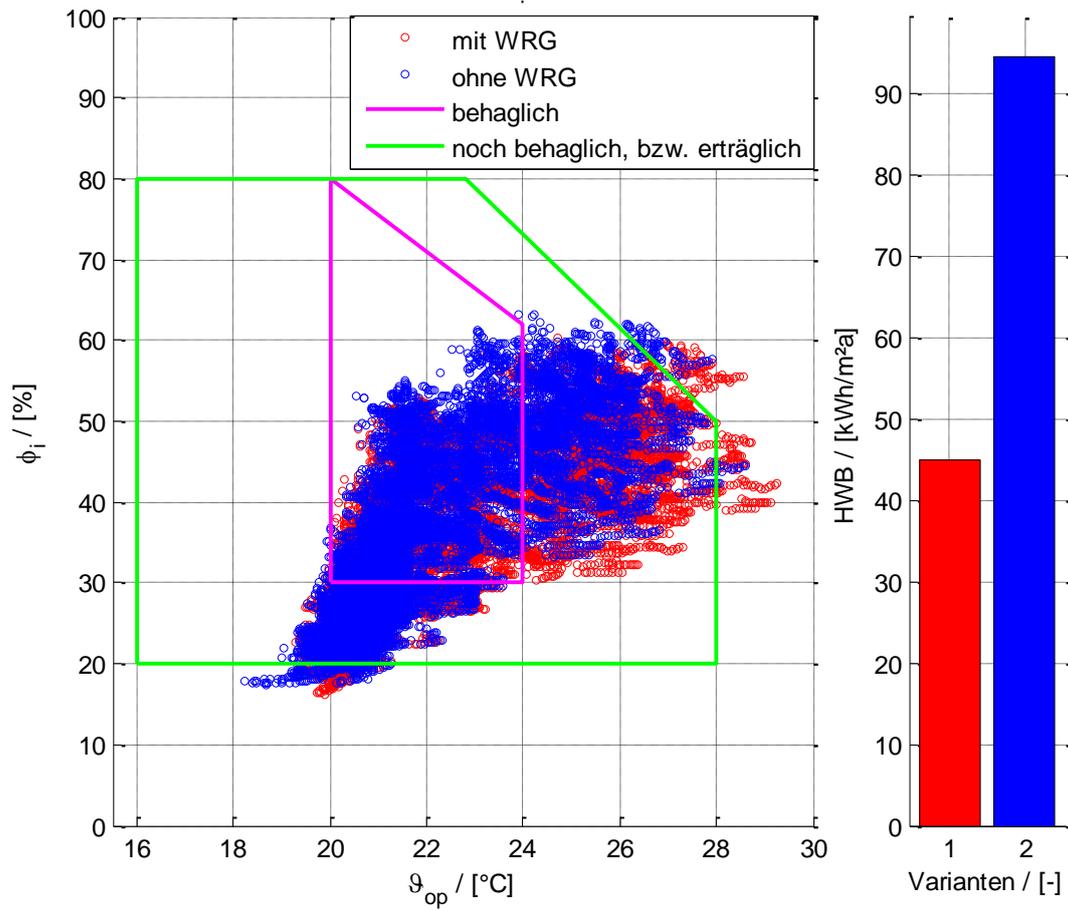


Abbildung 4.67 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur des Aufbaus mit normalem Putz mit und ohne Wärmerückgewinnung

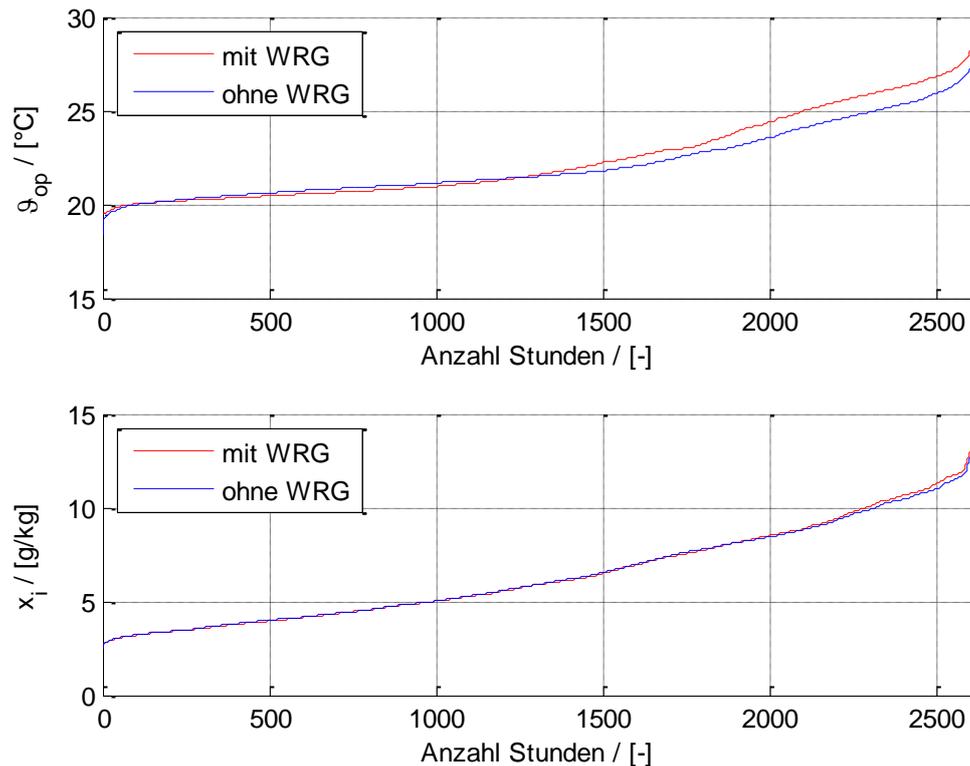


Abbildung 4.68 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit

#### 4.6.5.2.2 Reine Fensterlüftung

Vergleicht man wiederum die mechanische Lüftung mit einer geplanten Fensterlüftungsstrategie, so ergeben sich in etwa dieselben Ergebnisse wie bei der Massivholzvariante (vgl. Abbildung 4.69 und Abbildung 4.70). Aufgrund der hohen Luftwechselrate bei der Fensterlüftung sinken die Temperaturen im Winter kurzfristig schneller ab, jedoch kann sich auch eine höhere absolute Luftfeuchtigkeit einstellen, da diese nicht sofort abgelüftet wird. Im Sommer heizt sich der Raum wieder sehr schnell auf und kann durch die kurzen Stoßlüftungen untertags nicht so gut ausgekühlt werden, wie mit einer kontinuierlichen Lüftung. Energietechnisch gesehen ist das Lüften mit einem Lüftungsplan wesentlich effizienter als die mechanische Lüftung.

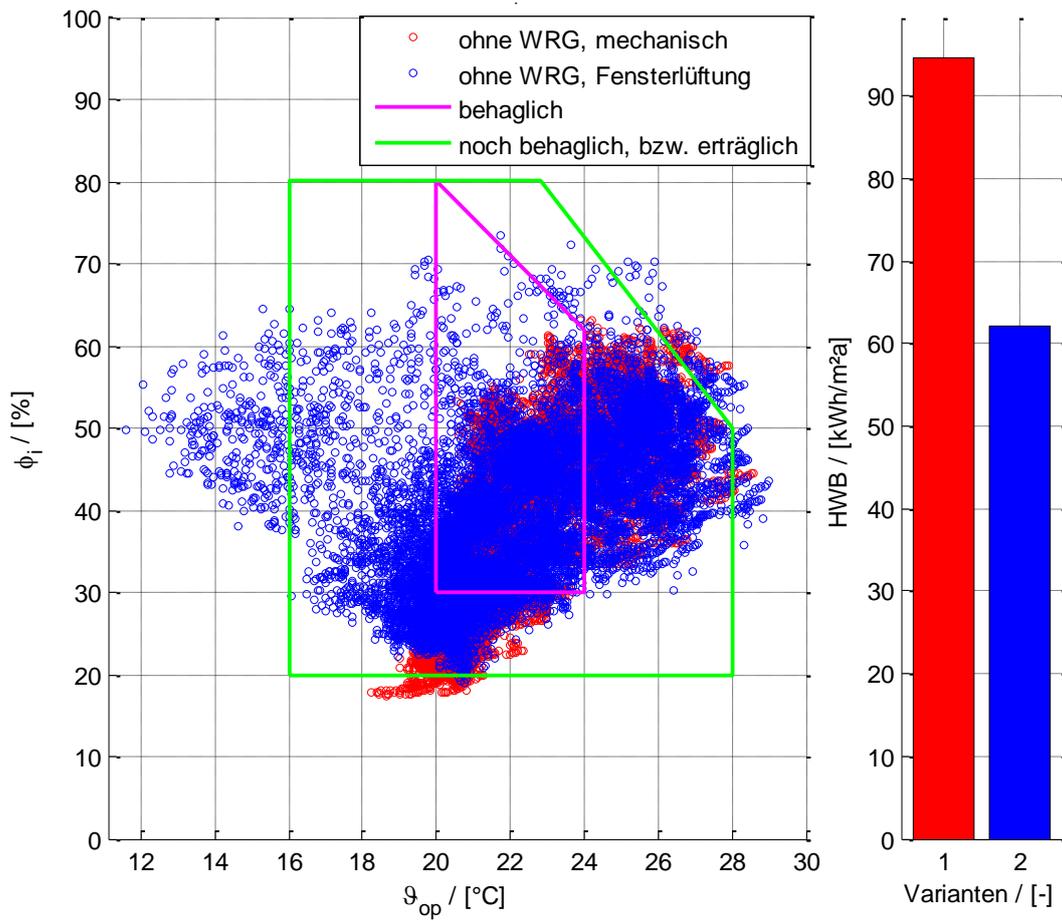


Abbildung 4.69 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur mit normalem Putz ohne Wärmerückgewinnung mit mechanischer Lüftung und Fensterlüftung

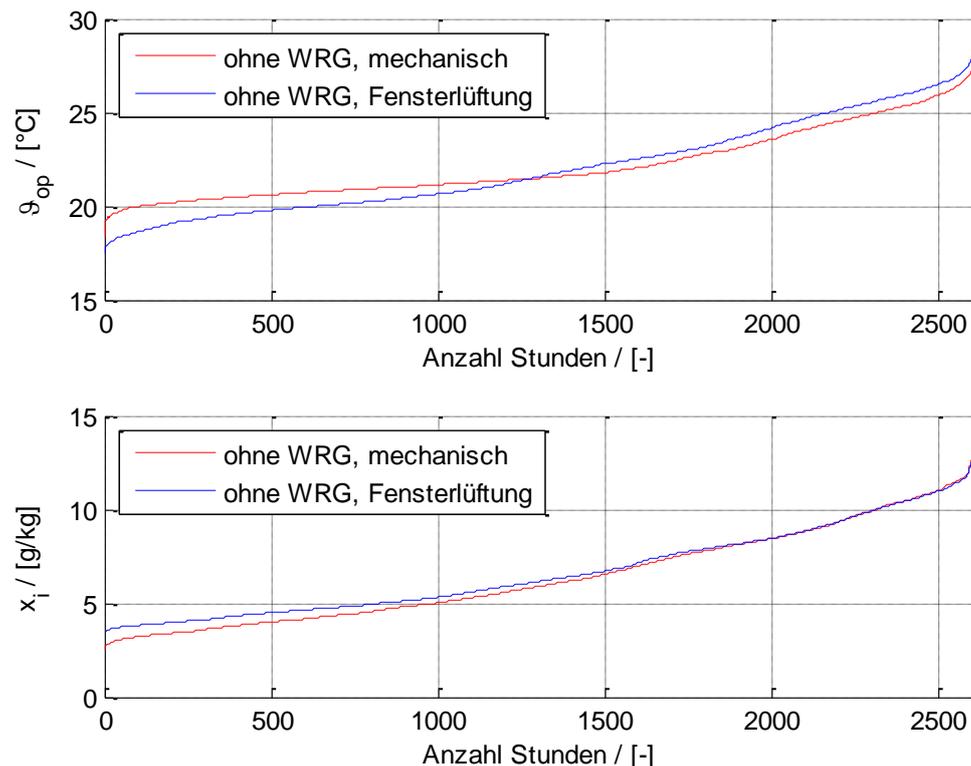


Abbildung 4.70 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit

#### 4.6.5.3 Holz-Rahmenbau mit einer 2-Scheibenverglasung

Die schlechte 2-Scheiben-Verglasung hat einen größeren g-Wert und folglich größere solare Gewinne (vgl. Abbildung 4.71). Dadurch steigen die Temperaturen im Sommer bei starker Einstrahlung noch schneller an als bei den bisherigen Varianten, solange nicht verschattet wird. Ansonsten verhalten sich die beiden Varianten sehr ähnlich zueinander und zu der massiven Variante. Abbildung 4.72 zeigt wiederum die Summenlinien, welche in dieser Größe keine wirklich bessere Darstellung der Unterschiede zeigt. Die Temperaturen scheinen bis auf den Sommer dieselben zu sein und die Luftfeuchtigkeit stimmt beim Rahmenbau noch besser überein als bei der Massivholzvariante. Diese bessere Übereinstimmung hängt mit der diffusionsaktiveren Oberfläche des Holz-Rahmen-Containers ab. Der Kalkputz kann schneller auf die Raumlufffeuchte reagieren als die Massivholzplatte des massiven Containers. Daher wird hier die produzierte Wasserdampfmenge im Raum von den Wänden aufgenommen und es entstehen geringere Unterschiede. Um den Einfluss auf die Temperatur besser darzustellen wird wiederum eine Vergrößerung des Bereiches um die 20 °C in Abbildung 4.73 angegeben. Hier ist gut zu erkennen, dass die schlechtere Verglasung durchaus einen Einfluss auf die Temperaturen im Winter hat. Berechnet man wiederum den Unterschied der Häufigkeiten niedriger Temperaturen als 20 °C so ergibt sich ein Unterschied von 76 Stunden. Es werden also mit der 2-Scheiben-Verglasung öfter geringere Temperaturen erreicht als mit der 3-Scheiben-Verglasung.

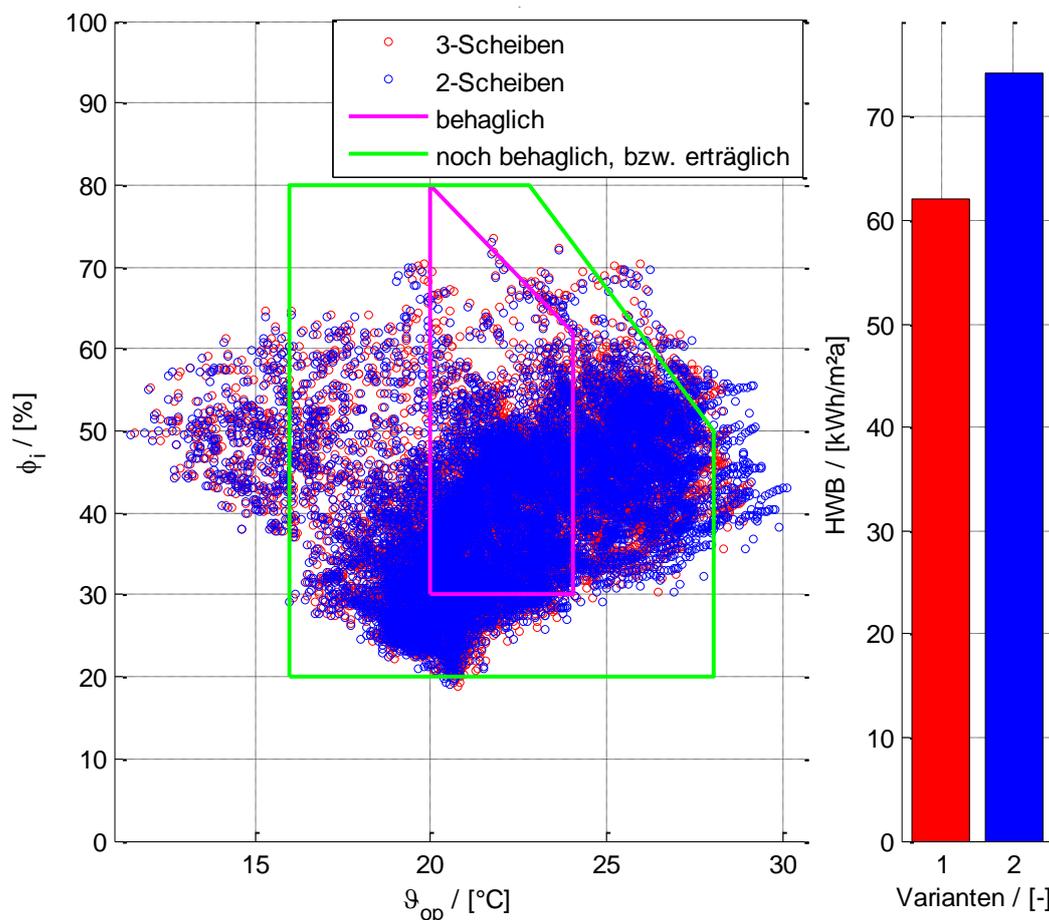


Abbildung 4.71 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur mit normalem Putz ohne WRG mit Fensterlüftung mit einer 3-Scheiben-Verglasung und einer schlechten 2-Scheiben-Verglasung

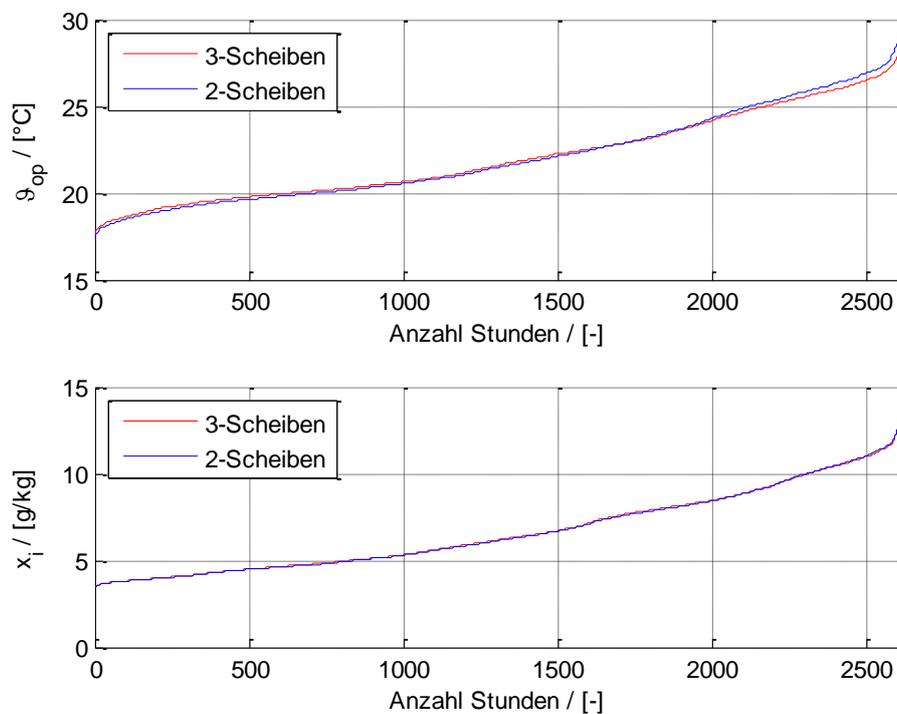


Abbildung 4.72 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit

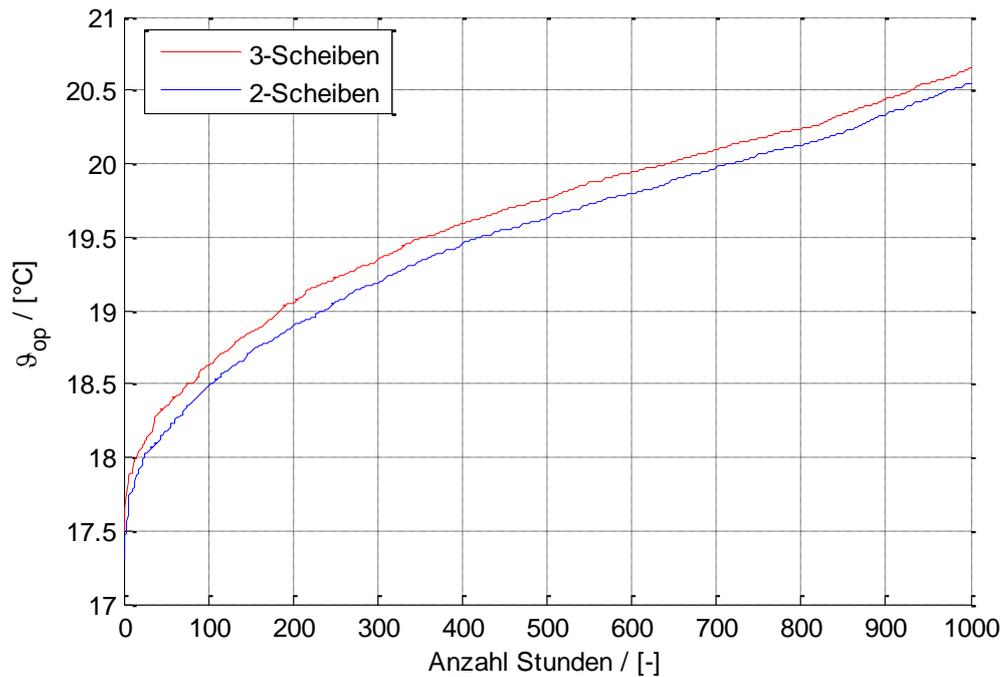


Abbildung 4.73 genauere Darstellung der Summerlinie um den Bereich von 20 °C

#### 4.6.5.4 Holz-Rahmenbau ohne Wärmedämmung

Bei einem kompletten Rückbau des Containers reicht die Leistung der verwendeten Heizung nicht aus um im Winter behagliche Temperaturen zu erreichen (vgl. Abbildung 4.74 und Abbildung 4.75). Aufgrund der niederen Temperaturen wird auch eine wesentlich größere relative Luftfeuchtigkeit erreicht. Diese kann jedoch nicht als Vergleich bzw. zur Beurteilung herangezogen werden. Die Kapazität der Aufbauten ist durch den Putz immer noch gegeben und ermöglicht geringere Temperaturen im Sommer, da durch die schlechte Wärmedämmung die Kapazitäten in der Nacht gut auskühlen und den Temperaturspitzen unter Tags entgegen wirken können.

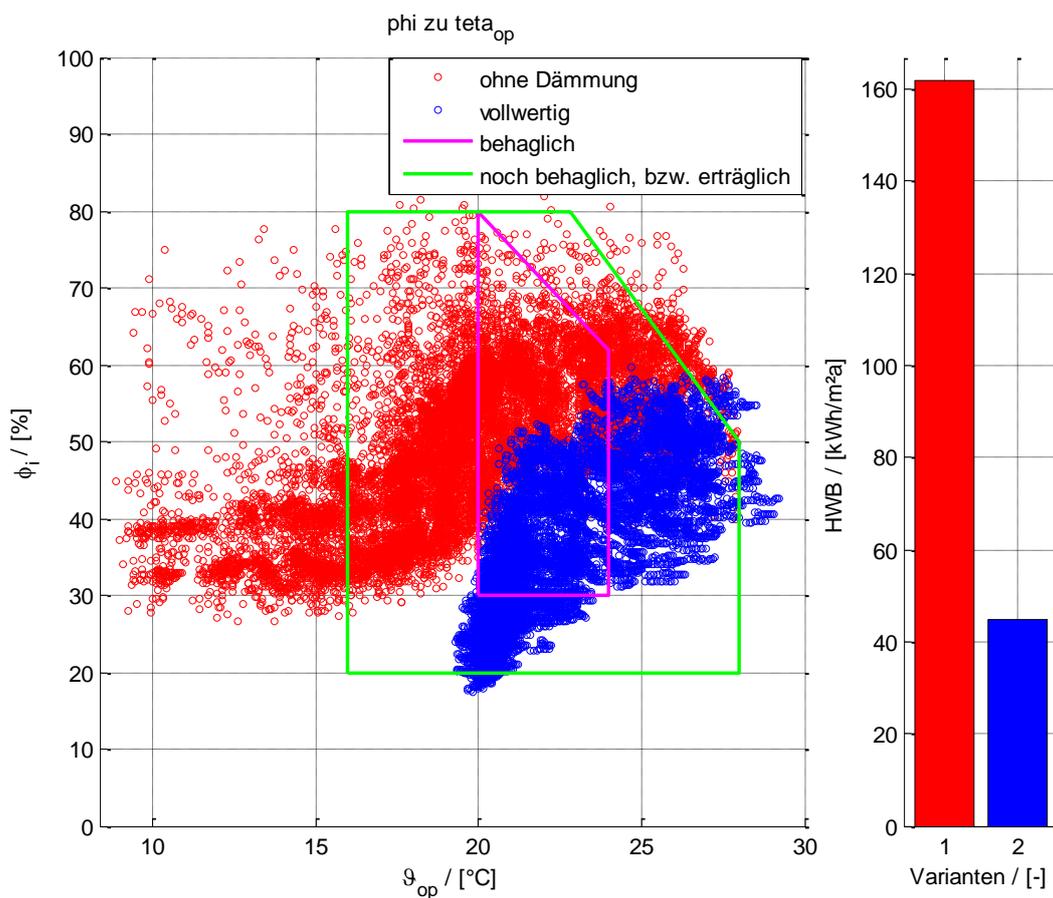


Abbildung 4.74 Relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der operativen Temperatur des vollwertigen Aufbaus im Vergleich mit dem vollständig rückgebauten Container

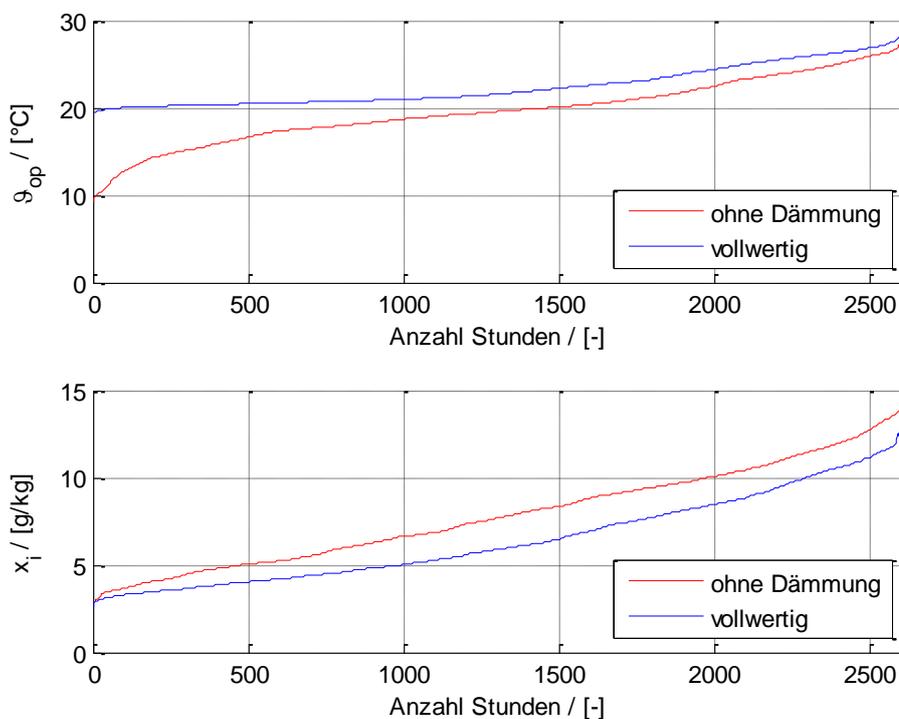


Abbildung 4.75 Summenlinie der operativen Temperatur und der absoluten Luftfeuchtigkeit

#### 4.6.5.5 Vergleich der Varianten mit dem Verfahren nach Fanger

Abbildung 4.76 zeigt, dass der Rahmencontainer tendenziell zu warm als zu kalt ist. Da nur über Fensterlüftung gekühlt wird, erfolgt die Kühlung über den Tag versetzt. Somit können sich etwas wärmere Temperaturen einstellen. Der Einfluss der Lehmschicht auf die Behaglichkeit ist sehr gering und kann mithilfe dieser Darstellungen kaum bis gar nicht dargestellt werden. Ansonsten verhält sich die Holz-Rahmenvariante entsprechend der Massivholzvariante. Im Sommer ist generell warm. Die Fensterlüftung kann nur in der Nacht effektiv kühlen. Daher ist der Kühlvorgang zeitlich versetzt und es ist untertags etwas wärmer. Wirklich zu warm wird es so gut wie nie. Die Kapazitäten der Aufbauten wirken hier noch etwas besser als bei der Massivholzvariante.

Im Winter werden hauptsächlich bei der Fensterlüftung zu kalte Temperaturen erreicht. Diese sind jedoch zeitlich auf den Lüftungsvorgang beschränkt und können durch die Heizung schnell wieder angepasst werden. Bei der Variante ohne Dämmung reicht die Heizleistung nicht mehr aus und die gewünschte Raumtemperatur kann nicht mehr erreicht werden.

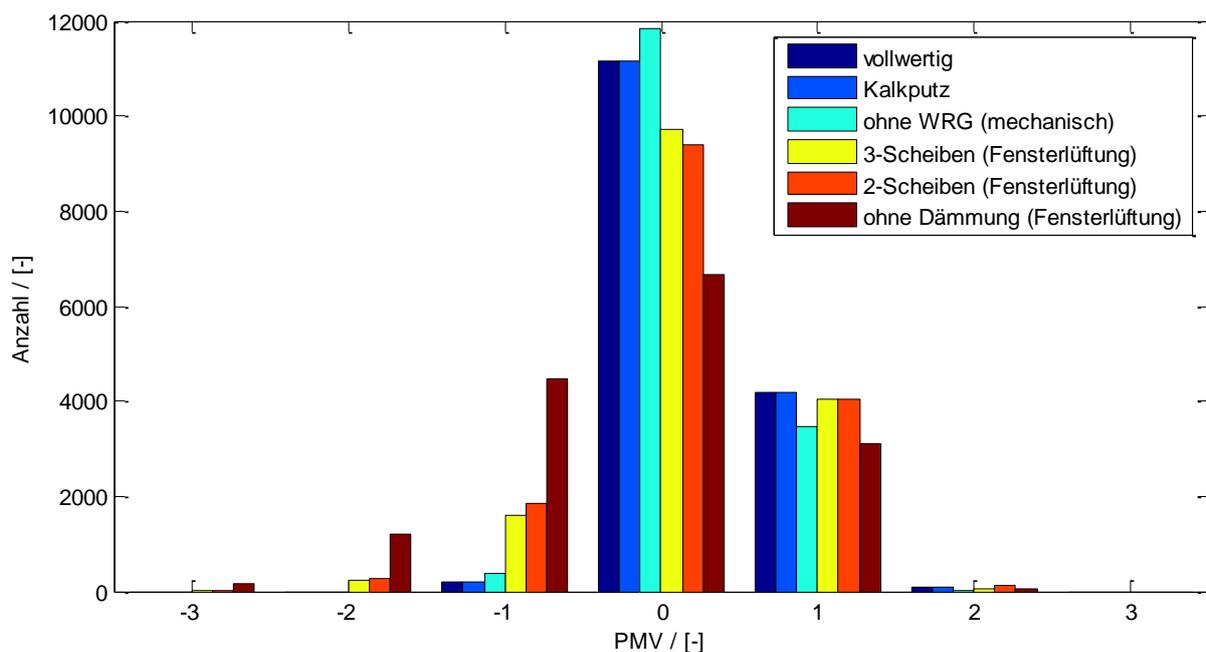


Abbildung 4.76 PMV für alle untersuchten Varianten im Vergleich, bei der Anwesenheit von Personen, Rahmenbau

#### 4.6.5.6 Vergleich der Verluste und Gewinne aller Varianten

In Abbildung 4.77 werden die Gewinne und Verluste der einzelnen Varianten für den Rahmenbau miteinander verglichen. Die Variante ohne Wärmedämmung hat hier bereits einen wesentlich größeren Heizwärmebedarf. Die Anpassung der Heizleistung an die Anforderungen würde den Heizwärmebedarf nochmals wesentlich erhöhen.

Von Seite der Energiebilanz gesehen verhalten sich die Varianten des Holz-Rahmen-Containers ähnlich den Varianten des Massivholz-Containers. Berücksichtigt man nur die Behaglichkeitskriterien nach *Fanger*, so sind die Varianten mit zunehmender Reduktion der Qualität auch zunehmend unbehaglich. Nicht zu empfehlen ist die letzte Variante ohne Wärmedämmschicht.

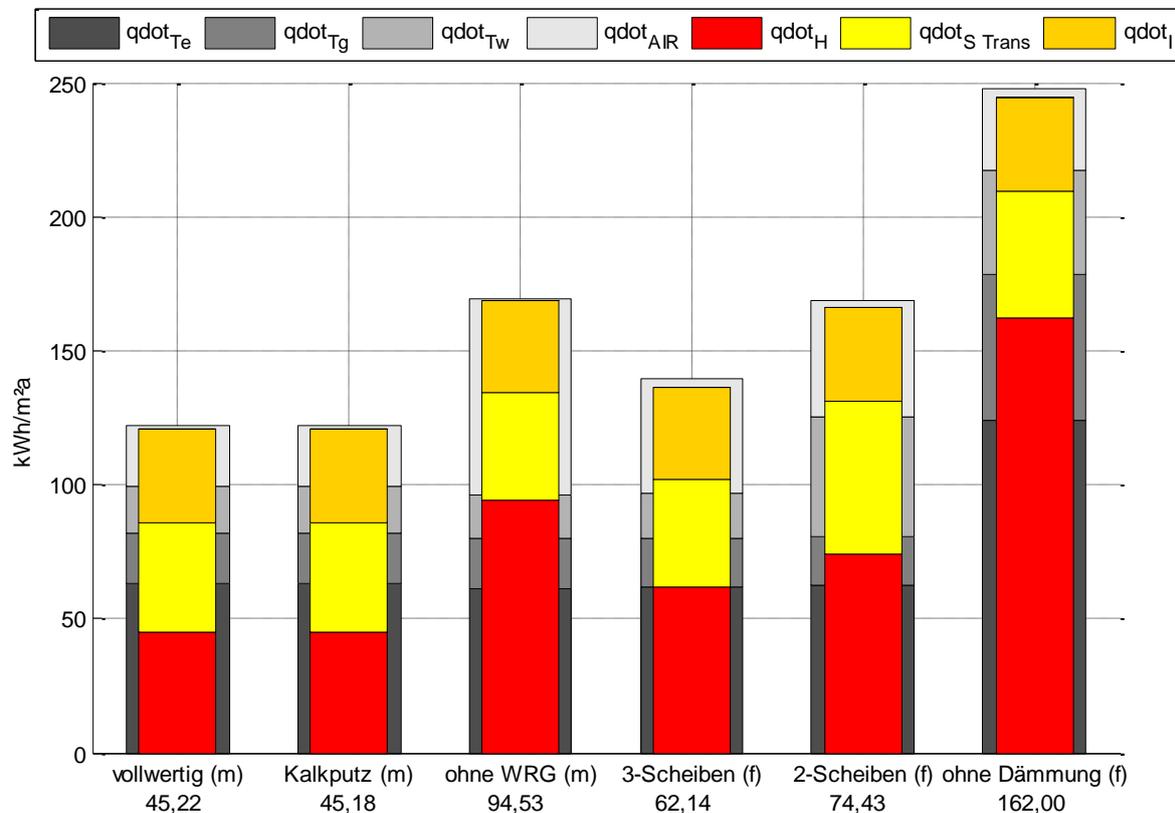


Abbildung 4.77 Vergleich der Gewinne und der Verluste der Varianten für den Holz-Rahmenbau, (f) = Fensterlüftung, (m) = mechanische Lüftung, Werte entsprechen dem Heizwärmebedarf in kWh/m²a

$q_{dot}$ : Te: Transmissionsverluste Außenwände und Decken, Tg: Transmissionsverluste Boden, Tw: Transmissionsverluste Fenster, AIR: Lüftungsverluste, H, Heizwärme, S: Solare Gewinne, I: Interne Gewinne

## 4.7 VERGLEICH MIT REFERENZCONTAINER

### 4.7.1 Einleitung

Es werden die beiden Container, so wie sie auf dem Gelände des Universität Innsbruck stehen, mit einem Referenzcontainer (Standardbürocontainer aus Stahl) und einem Referenzcontainer mit nachgerüsteten Lehmwänden verglichen. Alle Varianten werden nach Westen ausgerichtet um Unterschiede aus der solaren Einstrahlung zu eliminieren. Der Referenzcontainer besitzt keine mechanische Lüftung. Deshalb erfolgt der Luftwechsel im Winter über die Fensterlüftung. Dazu wird vier Mal täglich zwischen 8:00 und 18:00 Uhr für zehn Minuten gelüftet. Dazu wurde vereinfachend ein konstanter Luftwechsel von  $8 \text{ h}^{-1}$  über



diesen Zeitraum angenommen (Stoßlüftung mit geöffneten Fenstern und Türen). In herkömmlichen Bürocontainer sind einfache Verglasungen eingebaut. Deshalb wird die in Kapitel 4.6.4.2 definierte 2-Scheiben-Verglasung für den Container angesetzt. Der Wandaufbau ist in Tabelle 4.18 gegeben. Das Dach wird mit demselben Aufbau berücksichtigt, jedoch ist zusätzlich ein hinterlüftetes Dach vorhanden, welches in den Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt wird.

Tabelle 4.18 Wandaufbau des Referenzcontainers

<b>Wandaufbau</b> U=0,35 [W/m <sup>2</sup> K]	Schichtdicke innen nach außen [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Wasserdampfdiffusions- widerstand [-]
Sperrholzplatte	10.0	0.13	1200
Mineralwolle	100.0	0.038	1
Stahl profiliert	0.006	50	10000

## 4.7.2 Behaglichkeit

Für die Beurteilung der Behaglichkeit werden die Summenlinien für die Temperatur, Feuchtigkeit und den CO<sub>2</sub>-Gehalt der drei Varianten miteinander verglichen. Dabei werden nur jene Zeiten berücksichtigt, bei denen jemand im Container anwesend ist. Dies beschränkt sich auf Wochentage von 8:00 - 18:00 Uhr. Für den normalen Referenzcontainer wird vereinfachend vier Mal täglich 10 Minuten mit einem konstanten Luftwechsel gelüftet. Für den modifizierten Referenzcontainer wird angenommen, dass eine mechanische Lüftung, jedoch ohne Wärmerückgewinnung vorhanden ist.

Wie zu erwarten ist, verhalten sich beide Holzcontainervarianten sehr ähnlich. Der Massivbaucontainer hat etwas, thermisch betrachtet, bessere Wandaufbauten. Die Transmissionswärmeverluste im Sommer sind daher geringer und die Temperaturen dementsprechend höher. Abgesehen davon kann gesagt werden, dass sich beide Holzcontainer, bezogen auf die Temperatur, gleich verhalten. Der Referenzcontainer besitzt einen wesentlich schlechteren Wandaufbau und erreicht somit im Winter größere Transmissionswärmeverluste. Für einen Vergleich wird die Idealheizung über einen PI-Regler gesteuert (womit der Idealheizung eine gewisse Trägheit und eine maximale Heizlast aufgeprägt werden kann), welcher die benötigte Heizleistung entsprechend anpasst. Während des Stoßlüftens wird die aufgewendete Energie direkt abgelüftet und die Temperatur kann nicht gehalten werden. Der verbesserte Referenzcontainer mit der mechanischen Lüftung hat eine längere Heizperiode, da wesentlich größere Lüftungswärmeverluste entstehen. Die größten Unterschiede zwischen der Luft- und der Strahlungstemperatur treten beim herkömmlichen Referenzcontainer auf. Durch die Fensterlüftung wird die Lufttemperatur sehr schnell abgekühlt. Die Wände reagieren träger und die Strahlungstemperatur sinkt wesentlich langsamer.



Im Sommer erreichen die beiden Referenzcontainer sehr hohe Temperaturen. Es wurde bei keiner Simulation eine Verschattung berücksichtigt um die solaren Gewinne zu reduzieren. Dies ist für die Holzcontainer kein Problem, jedoch für die Referenzcontainer absolut notwendig. Durch die 2-Scheiben-Verglasung werden wesentlich mehr solare Gewinne erzielt. Zudem besitzt der Referenzcontainer keinerlei thermische Masse. Der modifizierte Referenzcontainer verzögert die Erhitzung etwas. Die maximalen Temperaturen sind dennoch etwa dieselben.

Die nächtliche Sommerlüftung wurde für gekippte Fenster ausgelegt. Der Luftwechsel reicht nicht aus um die noch schnellere Erwärmung auszugleichen. Wird verschattet, zum Beispiel über einen Rollladen, so werden zwar die solaren Gewinne reduziert, aber gleichzeitig wird auch der mögliche Luftwechsel stark eingeschränkt. Ein ständiger Wechsel zwischen Verschatten und Stoßlüften ist die Folge, welche aufgrund des Aufwandes nicht als behaglich eingestuft werden kann. Die Variante des herkömmlichen Referenzcontainers mit mechanischer Lüftung dient zur besseren Vergleichbarkeit der Einflüsse von Lüftung und modifiziertem Wandaufbau.

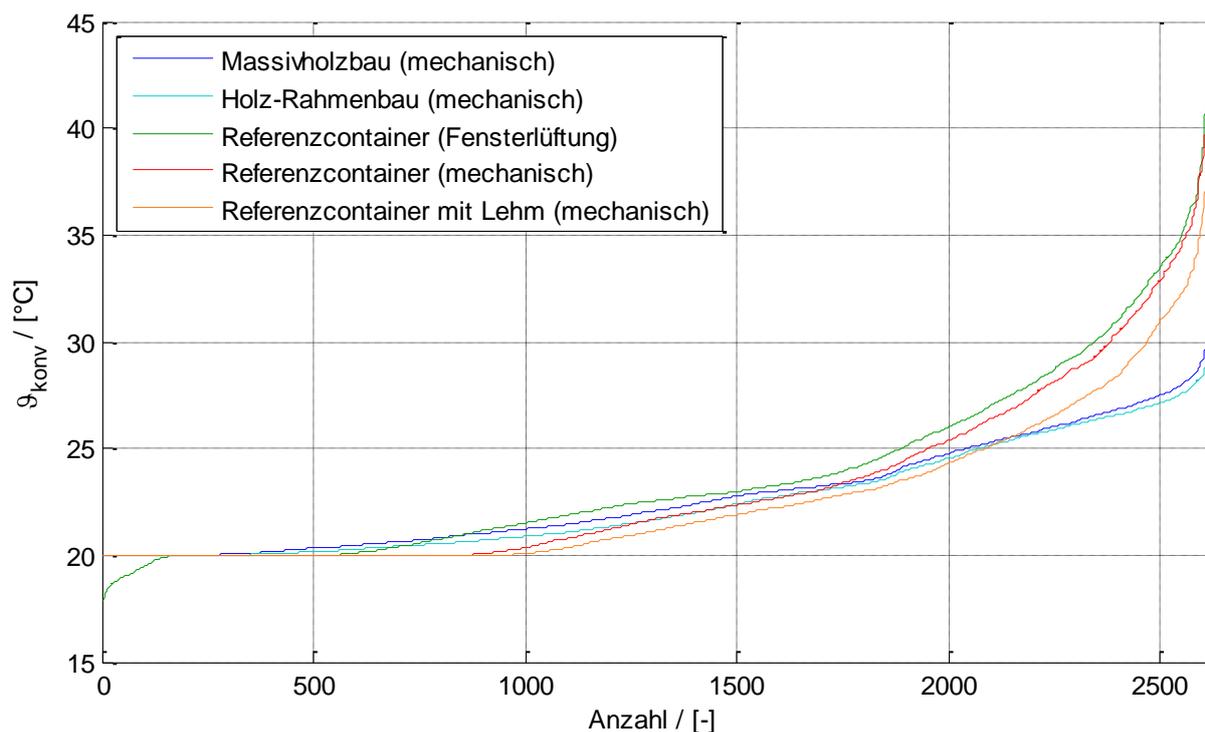


Abbildung 4.78 Summenlinie der konvektiven Temperatur für Anwesenheit

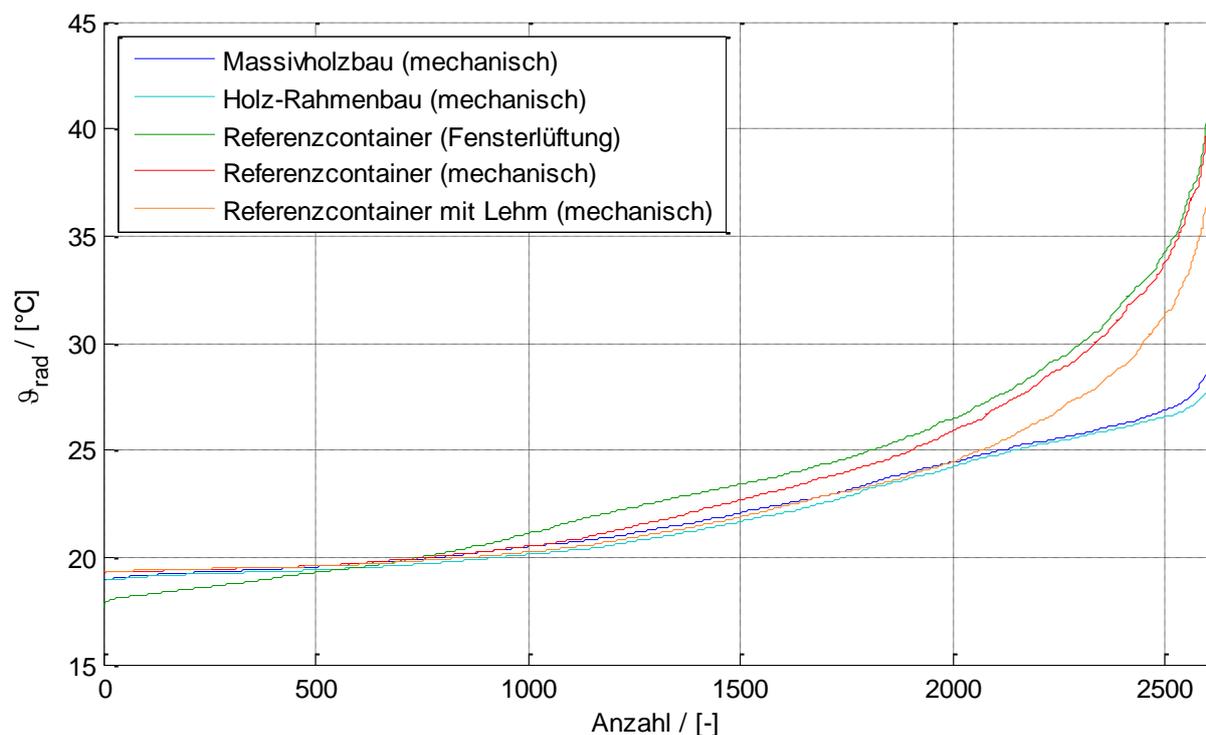


Abbildung 4.79 Summenlinie der radiativen Temperatur für Anwesenheit

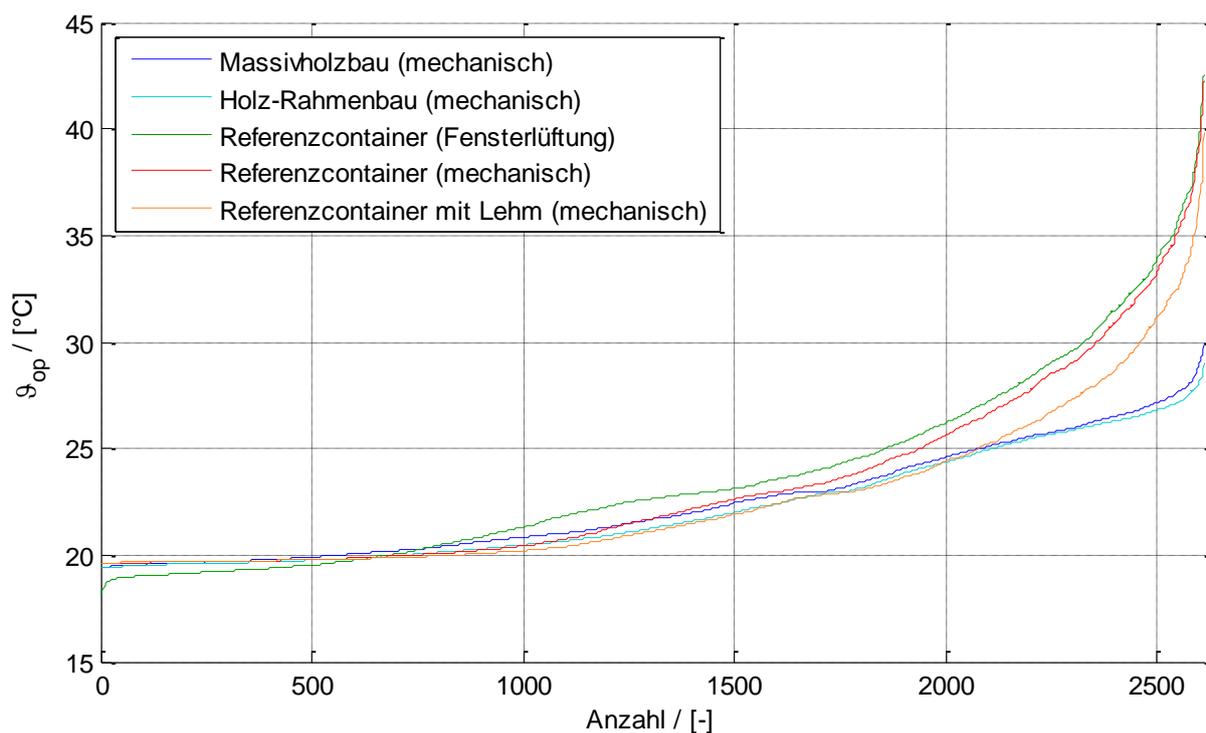


Abbildung 4.80 Summenlinie der operativen Temperatur für Anwesenheit

Abgesehen von der Temperatur ist die Qualität der Luft ein Kriterium für die Behaglichkeit. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt dient als Indikator für die Luftqualität. Außenluft besitzt eine Konzentration von ca. 400 ppm. Dieser Wert wird in Abbildung 4.81 nicht ganz erreicht, da der erste berücksichtigte Wert bereits durch den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der anwesenden Person beeinflusst



wird. Die  $\text{CO}_2$ -Konzentration hängt maßgeblich von der Luftwechselrate ab. Die Unterschiede zwischen den beiden Holzcontainern liegen somit bei der Sommerlüftung. Der Rahmenbau kühlt über Nacht etwas besser aus. Zudem besitzt er eine höhere thermische Masse (vgl. Kapitel 4.7.3). Somit springt die Sommerlüftung seltener an und damit verbunden stellt sich ein etwas höherer  $\text{CO}_2$ -Gehalt ein. Der Referenzcontainer wird durch die Fensterlüftung nur in Intervallen gelüftet. Somit steigt der  $\text{CO}_2$ -Gehalt zwischen zweier Lüftungsvorgänge fast ungehindert an. Daher entstehen hier höhere  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen. Da der Referenzcontainer wesentlich wärmer ist, springt hier auch untertags die Sommerlüftung an und der Luftwechsel ist wesentlich größer als bei den beiden Holzcontainern. Die hohen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen werden somit eher im Winter erreicht. Der modifizierte Referenzcontainer besitzt dieselbe Grundluftwechselrate wie die beiden Holzcontainer, jedoch sind die Temperaturen wesentlich höher. Somit springt die Sommerlüftung noch etwas öfter an als bei den beiden Holzcontainern.

Wird regelmäßig gelüftet, so wird der Grenzwert von 1500 ppm (Boos, et al. S. 6) nicht überschritten. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine regelmäßige Fensterlüftung in diesem Ausmaß in der Realität nicht stattfinden wird, also tendenziell weniger gelüftet wird.

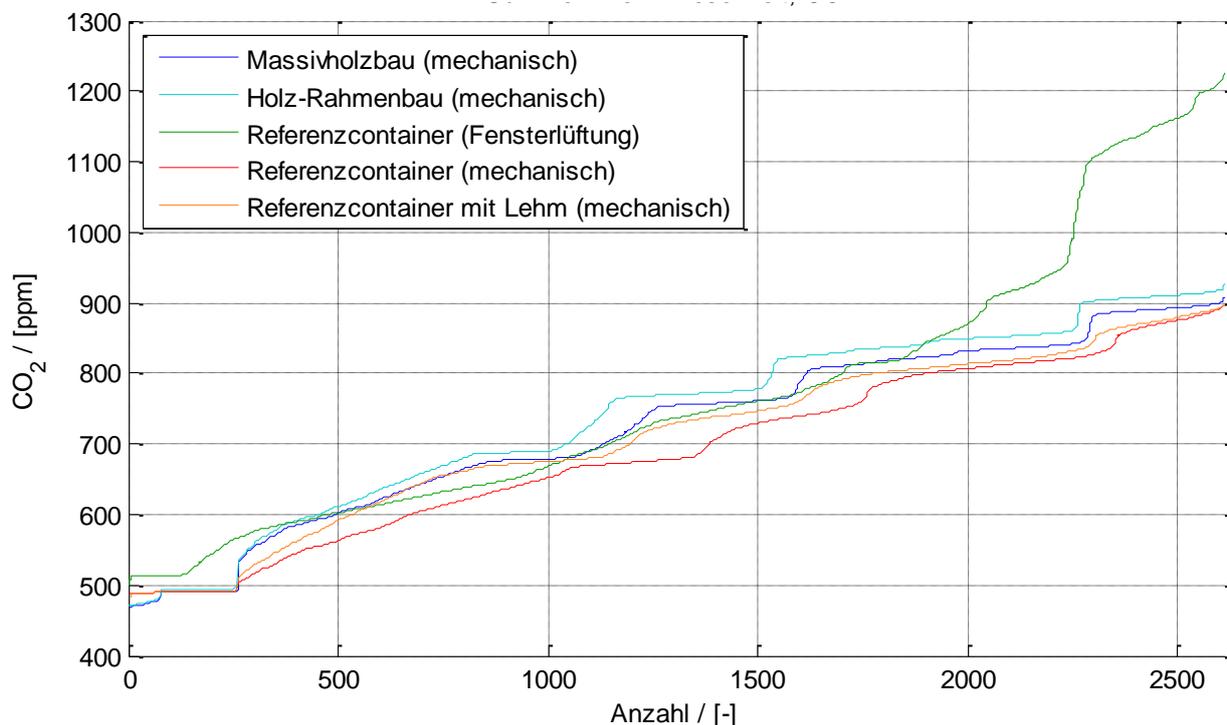


Abbildung 4.81 Summenlinie des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes für Anwesenheit

Ein weiterer Faktor für die Behaglichkeit ist die Menge der Feuchtigkeit im Raum. Der Holz-Rahmencontainer besitzt eine 18 mm Dicke Lehmschicht auf der Innenseite der Wände und der Decke. Im Winter ist die Luft in den Räumen tendenziell trocken. Im Sommer hingegen

ist mehr Feuchtigkeit in der Luft. Die Lehmschicht soll die Feuchtigkeit über das Jahr ausgleichen. Dieses Verhalten ist im Vergleich zum Massivholzbau erst bei näherer Betrachtung zu erkennen. Die Feuchtigkeit im Winter ist höher und im Sommer geringer. Der Referenzcontainer besitzt so gut wie keine Feuchtepufferung. Die höhere absolute Feuchtigkeit hängt mit der Lüftung in Intervallen zusammen. Dadurch kann sich, wie beim CO<sub>2</sub>-Gehalt, etwas mehr Feuchtigkeit ansammeln. Je wärmer es ist, desto mehr Wasserdampf wird durch Personen erzeugt. Dadurch wird hier im Sommer eine wesentlich höhere Feuchtigkeit bei beiden Referenzcontainer erreicht. Die Auswirkung auf die Feuchtepufferung durch den zusätzlich aufgetragenen Lehm im Referenzcontainer ist sehr gering.

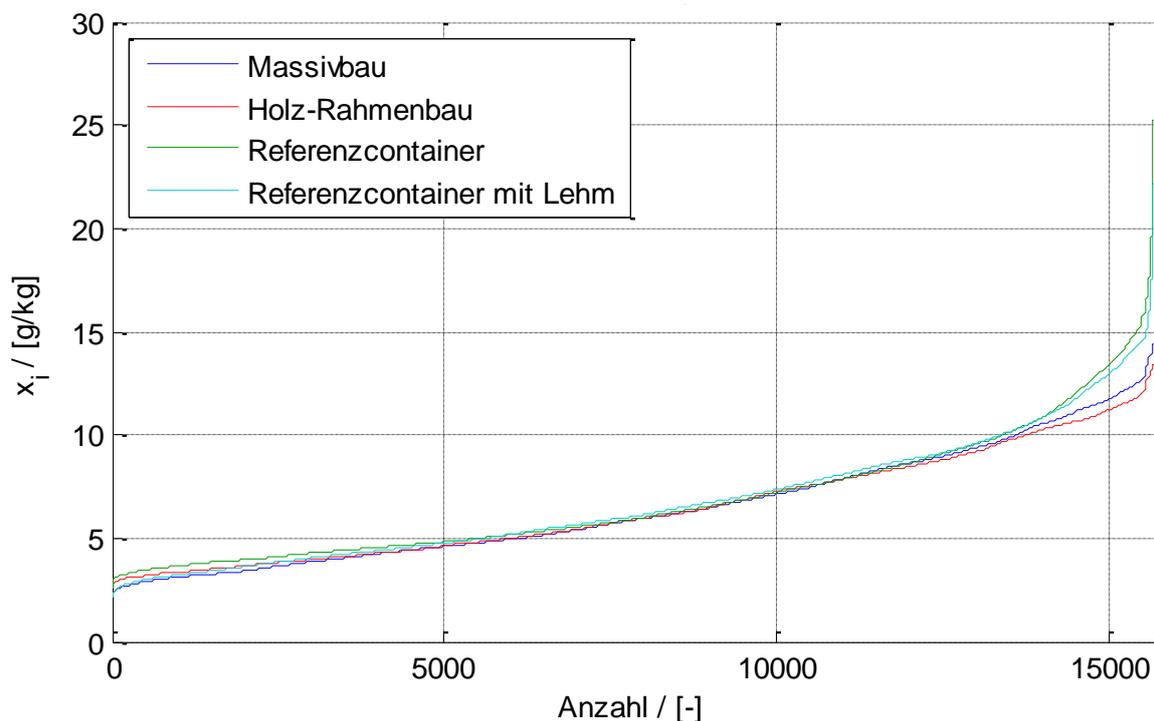


Abbildung 4.82 Summenlinie der absoluten Feuchtigkeit für Anwesenheit

### 4.7.3 Einfluss der Kapazität

Der Holz-Rahmen-Container reagiert träger als die Massivholzvariante. Dies ist sehr gut in Abbildung 4.83 zu erkennen. Die Holz-Rahmen-Variante hat durch die Lehmschicht eine nicht zu vernachlässigende Wärmekapazität. Je größer die thermische Masse, desto geringer sind die Temperaturschwankungen über den Tag. Im Vergleich dazu ist der Referenzcontainer, welcher so gut wie keine thermische Masse besitzt, sehr großen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Die zusätzliche Lehmschicht auf zwei Wänden bewirkt eine geringere Temperaturschwankung, reicht jedoch nicht aus um die Temperaturspitzen auf ein behagliches Maß zu reduzieren. Untertags erhitzen sich beide

Referenzcontainer sehr schnell durch die solaren Einstrahlungen. In der Nacht kühlt er wiederum schneller aus.

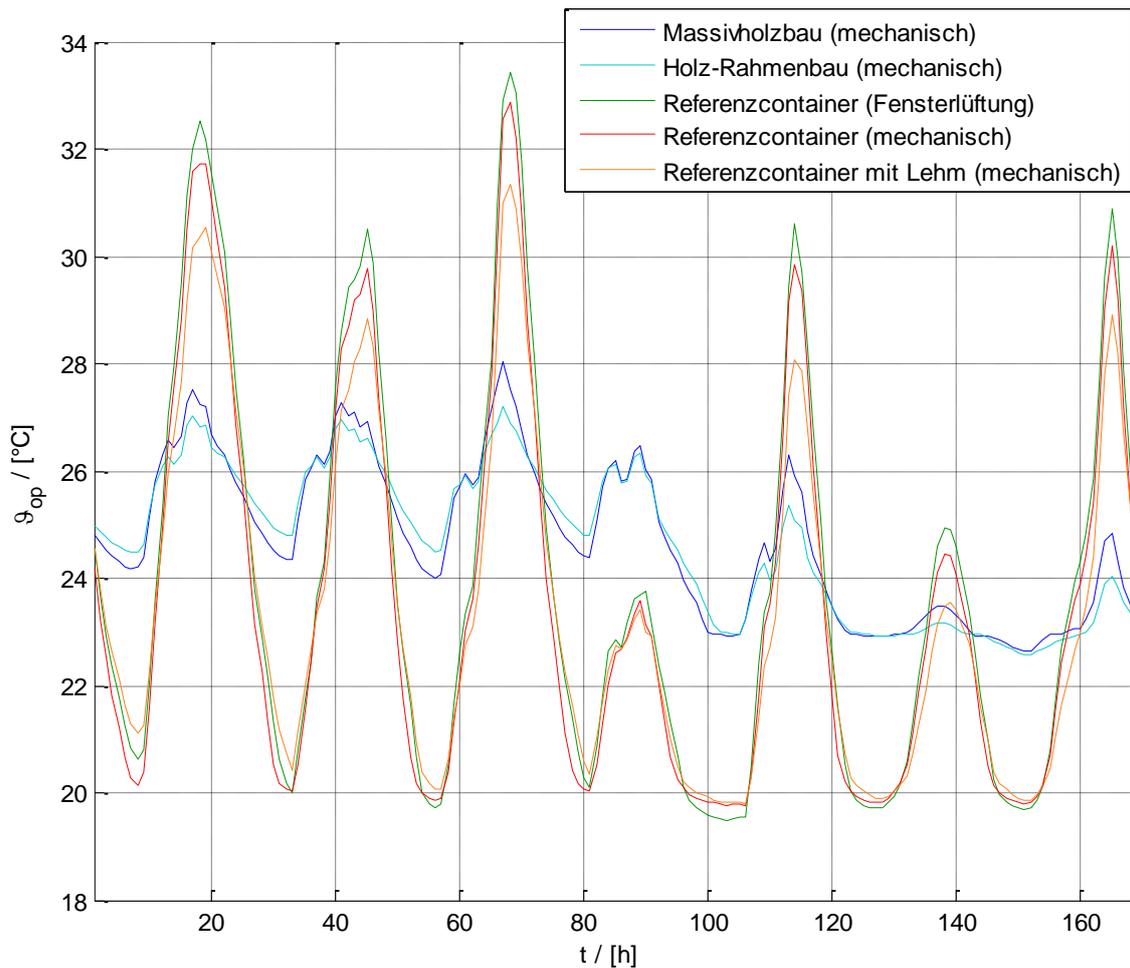


Abbildung 4.83 Stundenmittelwerte der operativen Temperatur einer heißen Woche im Sommer, mit Sommerlüftung

In Abbildung 4.84 ist der Einfluss der Solarstrahlung auf die Erwärmung des Referenzcontainers zu erkennen. Die zusätzliche Lehmschicht reicht von der thermischen Masse her nur für die Kühlung für den Vormittag. Am Nachmittag steigen die Temperaturen aufgrund der solaren Einstrahlung bereits wieder stark an. Die Strahlungstemperatur des herkömmlichen Referenzcontainers ist wesentlich geringer als bei den restlichen Temperaturen. Das bedeutet, dass die Oberflächen der Wände kühl sind. Die Lehmschicht gleicht dies aus und liefert einen wesentlichen Vorteil im Blick auf die Behaglichkeit. Abbildung 4.85 zeigt, dass die konvektive Temperatur auf 20 °C gehalten wird und die Heizleistung mit Ausnahme der Stoßlüftungszeiten ausreichend groß ist.

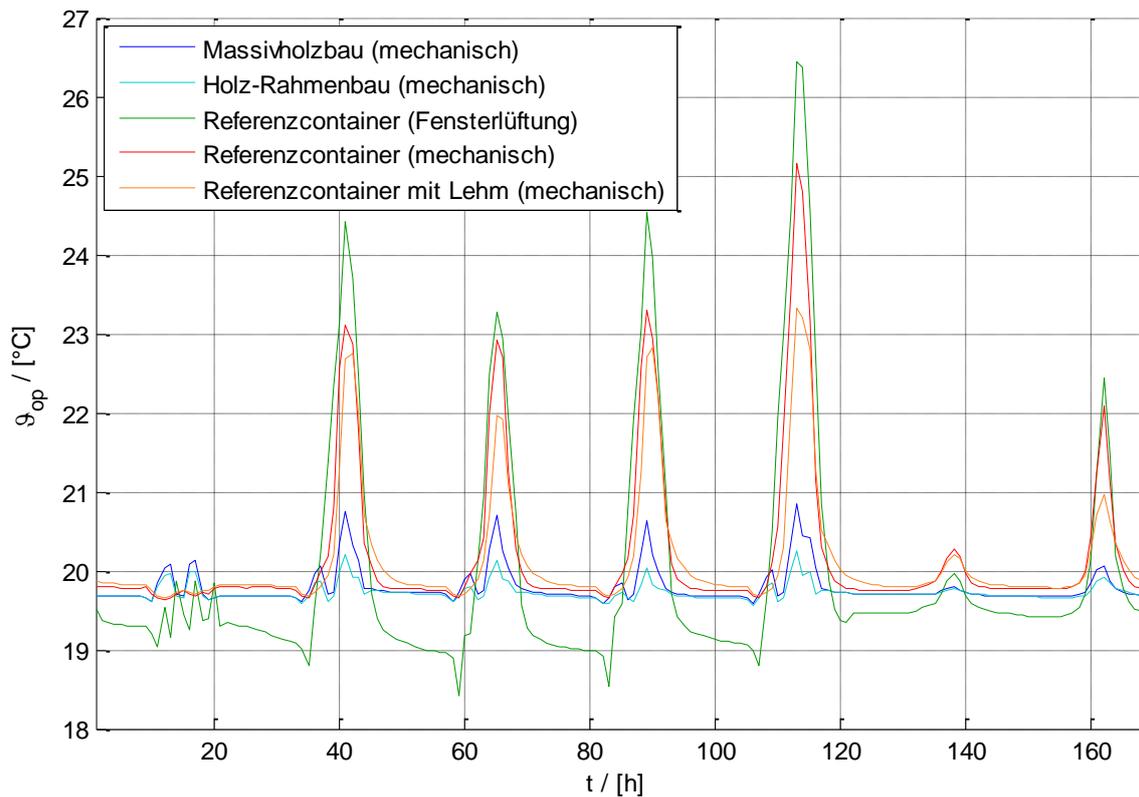


Abbildung 4.84 Stundenmittelwerte der operativen Temperatur einer kalten Woche im Winter

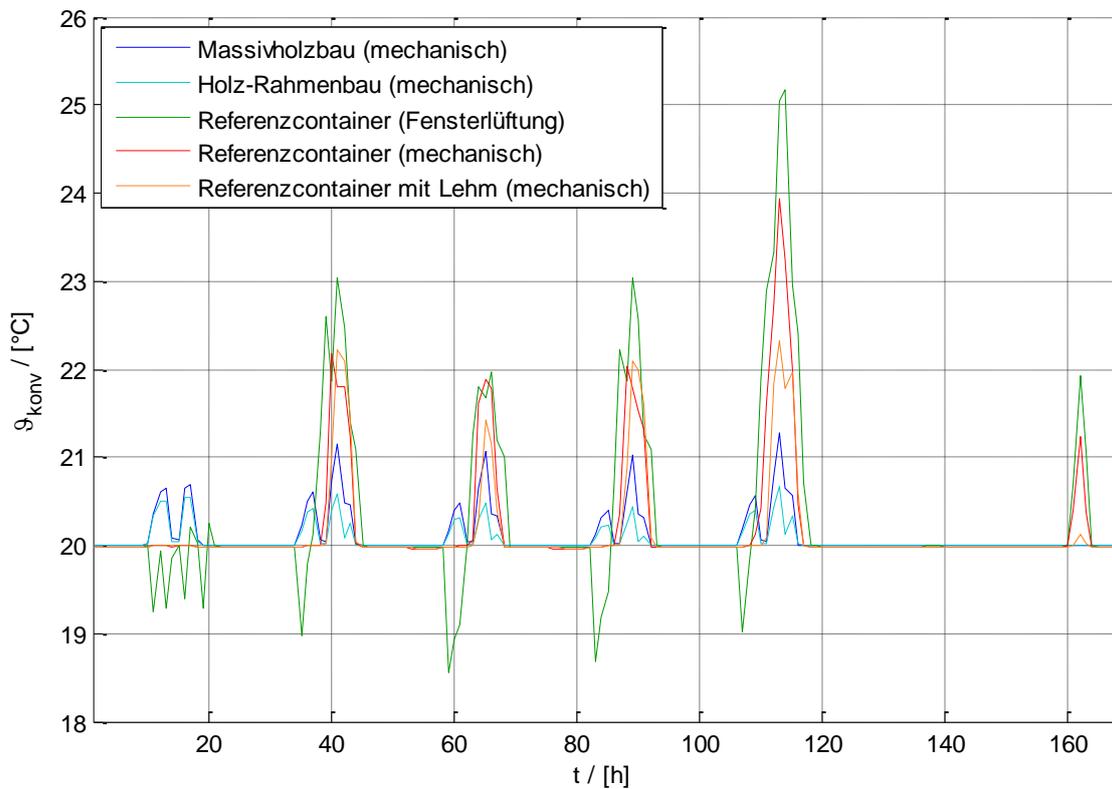


Abbildung 4.85 Stundenmittelwerte der konvektiven Temperatur einer kalten Woche im Winter



Abschließen werden die Varianten noch durch die Beurteilung nach *Fanger* miteinander verglichen. Die Werte für das PMV zwischen -0,5 und 0,5 gelten laut *Fanger* als behaglich. Aufgrund der Regelung der Heizung auf 20 °C konvektive Temperatur, sinkt die operative Temperatur aufgrund der geringeren Strahlungstemperatur etwas ab. Daher sind die meisten Werte bei -0,5, sprich leicht kühler, aber immer noch im behaglichen Bereich. In allen Container ist es tendenziell zu warm. Der Referenzcontainer erreicht aufgrund der hohen Temperaturen im Sommer, sowie durch die Fensterlüftung im Winter am seltensten behagliche Bedingungen. Bei den beiden Holzcontainern ist zufolge *Fanger* der Holz-Rahmenbau der behaglichere. Die zusätzliche Lehmschicht reicht nicht aus um die Temperaturen im Sommer ganz auszugleichen, jedoch um im Winter die Oberflächentemperatur nicht zu sehr absinken zu lassen. Die Behaglichkeit wird durch den zusätzlich eingebauten Lehm gesteigert.

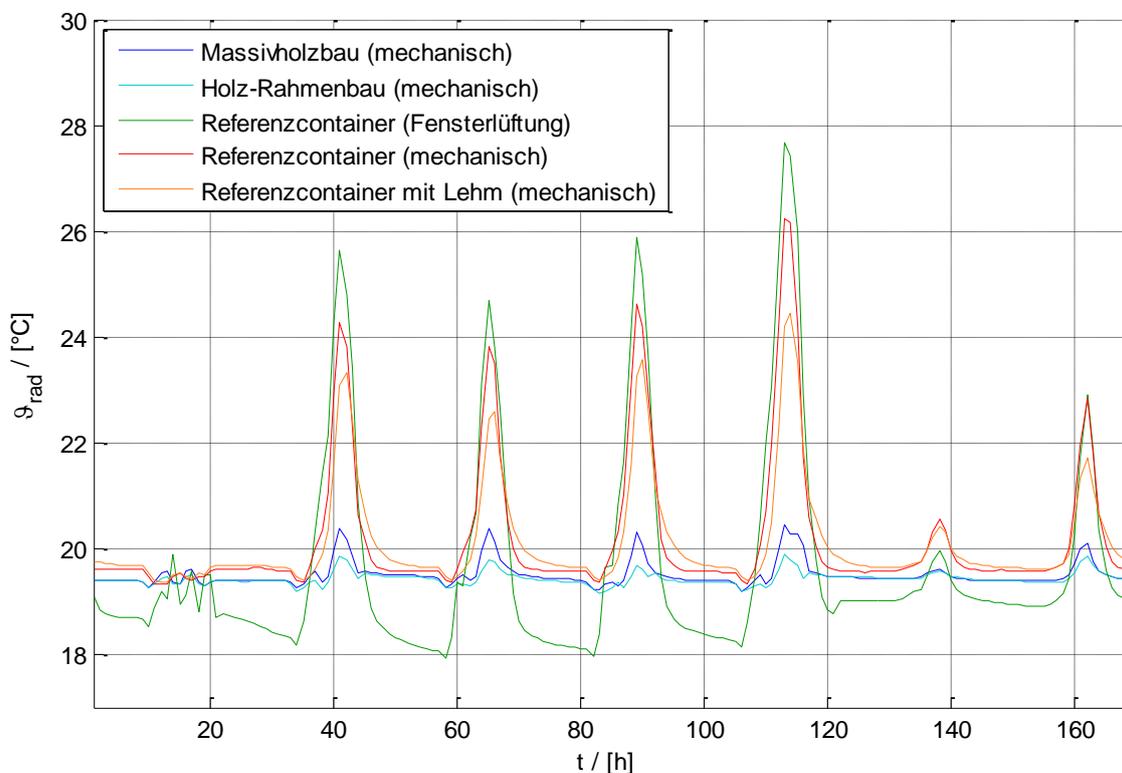


Abbildung 4.86 Stundenmittelwerte der radiativen Temperatur einer kalten Woche im Winter

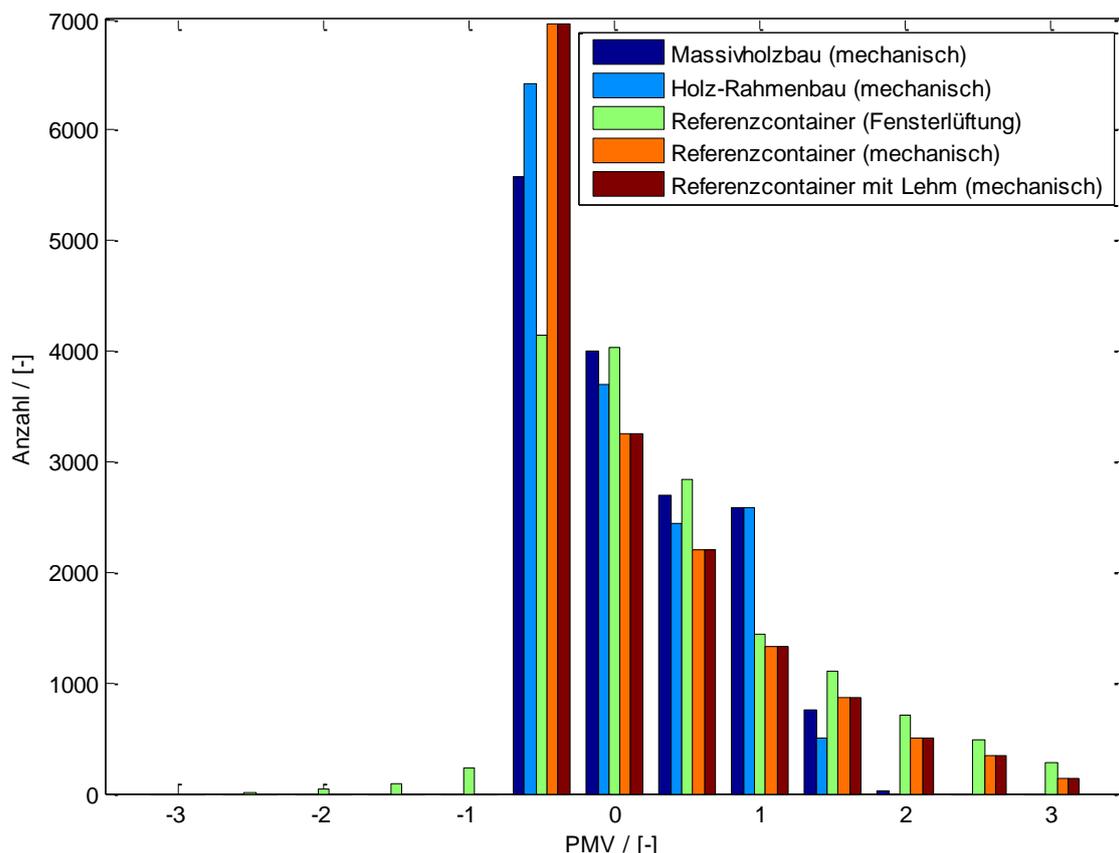


Abbildung 4.87 PMV für Anwesenheit

Der Vollständigkeit halber ist in Tabelle 4.19 der Heizwärmebedarf über das Jahr für alle Varianten angegeben. Der Holzrahmenbau hat mehr Transmissionswärmeverluste durch die minimal schlechteren Aufbauten. Ansonsten sind beide in etwa gleich gut. Der Referenzcontainer hat nur eine halb so dicke Wärmedämmschicht, keine Wärmerückgewinnung für den Luftwechsel und eine schlechtere Verglasung. Dementsprechend ist der Heizwärmebedarf erwartungsgemäß größer. Der nachgerüstete Referenzcontainer besitzt einen höheren HWB, da hier eine mechanische Lüftung ohne Wärmerückgewinnung eingesetzt wird. Mit der manuellen Fensterlüftung beim Referenzcontainer werden kleinere Luftwechselzahlen erreicht.

Tabelle 4.19 Heizwärmebedarf übers Jahr im Vergleich, mit Sommerlüftung

	Massivholzbau mechanische Lüftung mit WRG	Holz-Rahmenbau mechanische Lüftung mit WRG	Referenzcont. Fensterlüftung	Referenzcont. mechanische Lüftung	Referenzcont. mit Lehm mechanische Lüftung
HWB [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	42,40	44,21	149,56	187,65	164,94

## 4.8 AUSWIRKUNG DER LEHMSCHICHT AUF DIE FEUCHTEPUFFERUNG

### 4.8.1 Vergleich unterschiedlicher Putze

Der Holz-Rahmenbau besitzt eine Lehmschicht auf der Innenseite der Wände und der Decke. In diesem Kapitel wird untersucht, welchen Einfluss diese Lehmschicht auf die Feuchtepufferung hat. Dazu werden drei Varianten mit drei verschiedenen Putzen untersucht. Aus der Materialdatenbank von Delphin (Institut für Bauklimatik, TU Dresden) werden ein Lehm und ein herkömmlicher Kalkputz herangezogen. Für die dritte Variante wurde der im Holz-Rahmenbau tatsächlich eingebaute Lehm gemessen (vgl. Kapitel 3.1). Maßgebend für die Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit ist die Sorptionsisotherme. Diese ist für alle drei Materialien Abbildung 4.88 angegeben. Der Lehm aus der Datenbank ist wesentlich aktiver als der Kalkputz. Der gemessene Lehm entspricht in seinem Verhalten in etwa dem Kalkputz aus der Datenbank.

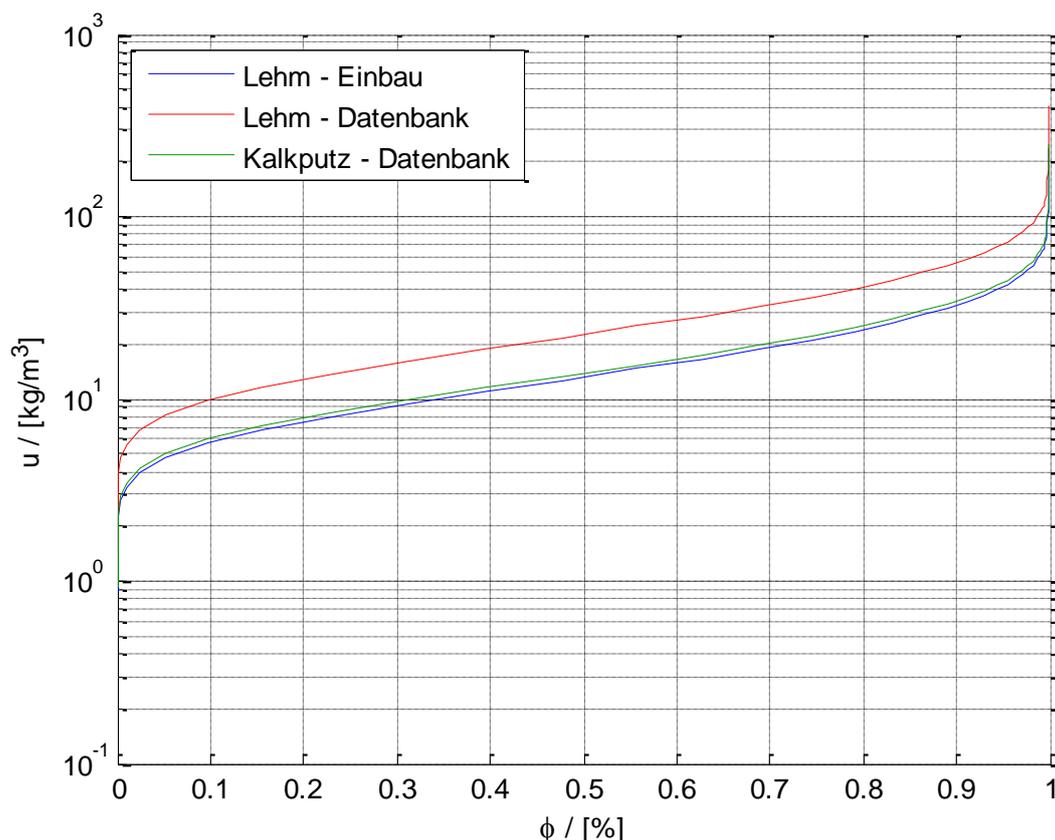


Abbildung 4.88 Sorptionsisotherme aller drei Materialien

Die Auswirkungen der verwendeten Materialien kann wiederum mit Hilfe der Summenlinien dargestellt werden. In Abbildung 4.89 ist kaum ein Unterschied zwischen den einzelnen Materialien zu erkennen. Der gute Lehm aus der Datenbank puffert etwas mehr als der

Kalkputz und der eingebaute Lehm. Die Unterschiede sind jedoch sehr gering. Dies hängt sicherlich mit der in Summe geringen Wasserdampfproduktion ab, welche in einer Büroumgebung herrschen. Wären die Feuchtequellen höher, so wäre auch mit einem größeren Unterschied zu rechnen. Jedoch ist dies nur für den guten Lehm aus der Datenbank zu erwarten. Der gemessene Lehm verhält sich immer noch ähnlich wie der herkömmliche Kalkputz. Deshalb ist auch bei höhere Wasserdampfproduktion mit einem vergleichbaren Ergebnis zu rechnen.

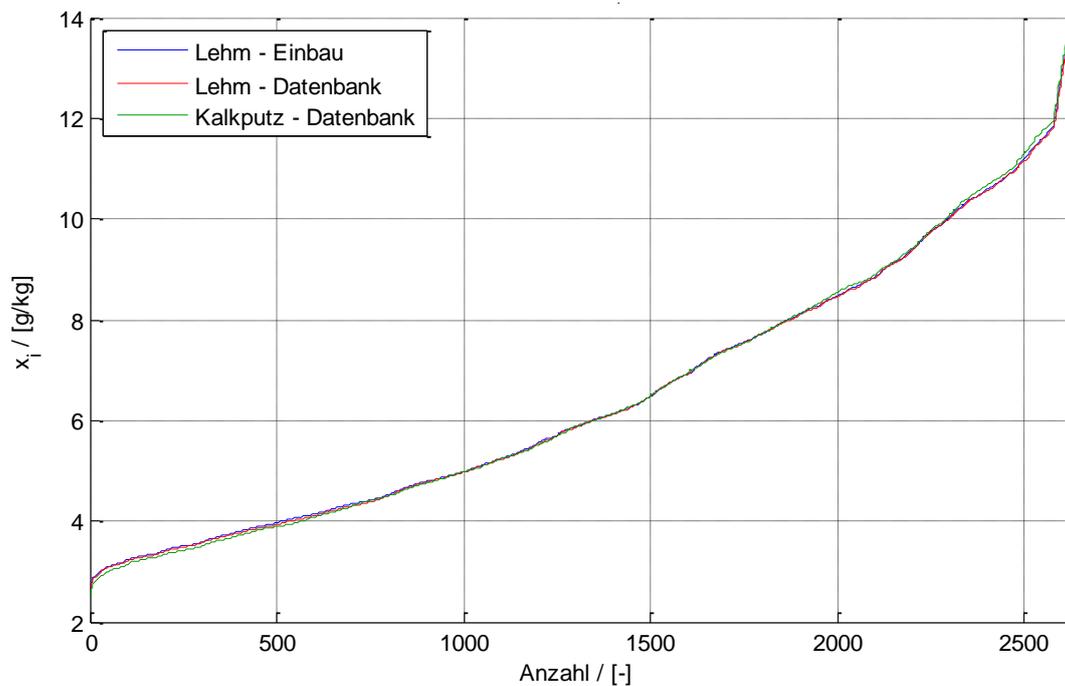


Abbildung 4.89 Summenlinie der absoluten Feuchtigkeit für Anwesenheit

## 4.8.2 Vergleich unterschiedlicher Lehmschichtdicken

Da die Unterschiede ohnehin nicht sehr groß sind, wurden nur zwei Varianten miteinander verglichen. Dabei wurden die herkömmlichen 18 mm Lehmschichtdicke auf 90 mm erhöht. Wie Abbildung 4.90 zeigt, funktioniert die Feuchtepufferung mit der dickeren Lehmschicht etwas besser. Die Unterschiede sind jedoch wiederum nur sehr gering.

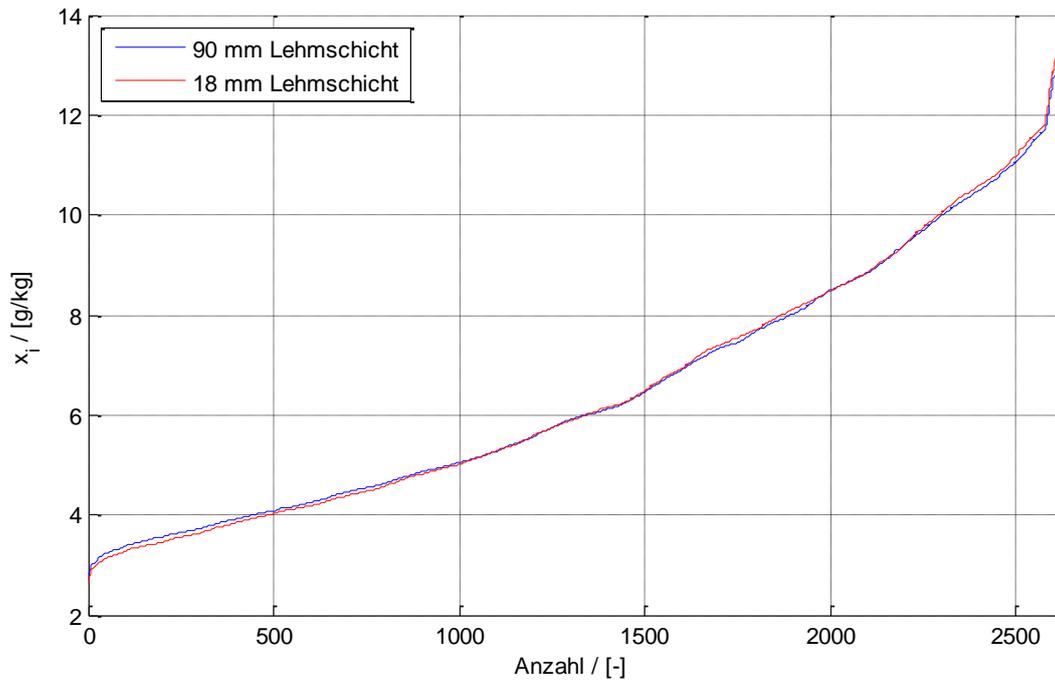


Abbildung 4.90 Summenlinie der absoluten Feuchte für 90 mm und 18 mm Lehmsschichtdicke



## 5 LITERATURVERZEICHNIS

---

**Boos, R., et al.** Bewertung der Innenraumluft. Physikalische Faktoren, Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter. [Online] [Zitat vom: 06. 03 2015.]  
<http://www.innenraumanalytik.at/Newsletter/co2.pdf>.

**Dott, R., et al. 2013.** *The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38 - Part B: Buildings and Space Heat Load.* 2013.

**Feist, W. 1994.** Dynbil. [Online] 1994. [Zitat vom: 06. 03 2015.]  
[http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus\\_D/DYNBIL.htm](http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/DYNBIL.htm).

**Häupl, P., et al. 2008.** *Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima.* s.l. : Springer Vieweg, 2008.

**Holm, A., Krus, M. und Künzel, H. M. 2002.** *Approximation der Feuchtespeicherfunktion.* s.l. : Fraunhofer Institute of Building, 2002.

**Institut für Bauklimatik, TU Dresden.** Delphin 5. *Software.*

**Künzel, H. M. 1995.** *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components.* s.l. : Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.

**Meteotest.** Meteonorm. *Software.*

**Ochs, F., Längle, K. und Feist, W. 2013.** *FFG Forschungsprojekts Aktivhaussiedlung Kramsach.* s.l. : Universität Innsbruck AB Energieeffizientes Bauen, 2013.

—. **2013.** *Net-zero Energy Passive House and Timber Loam Construction for healthy Indoor Climate: Pilot Project "Aktivhaus"-Residential Estate in Kramsach, Austria.* Chambéry, France : Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2013.

**Passivhaus Institut.** PHPP 8. *Software.*

**retrotec. 2015.** Flow Finder. [Online] 2015. [Zitat vom: 12. 03 2015.]  
<http://retrotec.com/products/flow-finder-mk-2>.

**Richter, W. 2007.** Handbuch der thermischen Behaglichkeit. Sommerlicher Kühlbetrieb. [Online] 2007. [Zitat vom: 06. 03 2015.]  
[http://www.bubw.de/PDF\\_Dateien/News/2007/09\\_September/F2071,xv=vt%5B1%5D.pdf](http://www.bubw.de/PDF_Dateien/News/2007/09_September/F2071,xv=vt%5B1%5D.pdf).

**Siegele, D. 2013.** Modellierung und Simulation von fassadenintegrierten aktiven Komponenten. *Masterarbeit.* 2013.



**TRANSSOLAR Software. TRNSYS 16. Software.**



## ANHANG

### RANDBEDINGUNGEN

#### *Lüftung*

Die beiden Holzcontainer besitzen eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung mit einer Rückwärmezahl von  $\eta = 0,9$ . Die mechanische Lüftung wird das ganze Jahr, Tag und Nacht verwendet. Die Infiltration berechnet sich aus dem  $n_{50}$ -Wert aus einem Drucktest bei einer Druckdifferenz von 50 Pa. Dieser ergibt sich für diese Variante zu  $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ . Die Infiltrationsluftwechselrate bei normalem Druck wird mit 7 % des  $n_{50}$ -Wertes angenommen. Wird eine Sommerlüftung berücksichtigt, so wird unter folgenden Bedingungen ein konstanter Volumenstrom angesetzt. Ist die Innentemperatur (operative Temperatur) größer als die Außentemperatur plus  $0,5 \text{ °C}$  und größer als  $23 \text{ °C}$ , so wird das Fenster geöffnet. Da ein konstanter Volumenstrom nur mit einer mechanischen Lüftung erreicht werden kann, werden  $0,5 \text{ °C}$  für die Ventilatorleistung berücksichtigt. Dieser Vorgang ist auf Mai bis August beschränkt. Zwischen Wochentag und Wochenende wird nicht unterschieden.

Tabelle 0.1 Luftwechselraten

mechanische Lüftung	$n = 0,65 \text{ h}^{-1}$
Infiltration	$n = 0,042 \text{ h}^{-1}$
Sommerlüftung: geöffnet	Fenster $n = 2,0 \text{ h}^{-1}$

#### *Verschattung*

Vorerst werden keine Verschattungsprogramme verwendet.

#### *Wärmebrücken*

Die vorhandenen Wärmebrücken werden durch eine zusätzliche fiktive Wand mit der Fläche von  $10,796 \text{ m}^2$  und einem U-Wert von  $0,145 \text{ W/m}^2\text{K}$  berücksichtigt.

#### *Absorption- und Emissionskoeffizienten*

Damit durch die fiktive Wand keine zu großen zusätzlichen Wärmegewinne durch Solarstrahlung entstehen, wird der Absorptionskoeffizient auf null gesetzt. Das Gleiche gilt für die Decke, da diese durch den Dachaufbau keine direkte Solarstrahlung erhält. Für die Decke und den Boden wurde die Annahme getroffen, dass der Strahlungsaustausch an der



Außenseite näherungsweise mit der Umgebungsluft stadtfindet, also kein Strahlungsaustausch mit der Himmelstemperatur besteht.

Tabelle 0.2 Absorptions- und Emissionskoeffizienten

Emissionskoeffizient innen	0,90	[-]
Emissionskoeffizient außen	0,90	[-]
Absorptionskoeffizient	0,60	[-]
Absorptionskoeffizient für WB, Decke, Boden	0,00	[-]

### **Heizung**

Geheizt wird auf 20 °C konvektive Raumtemperatur.

### **ALTERNATIVES FENSTERMODELL**

Am Arbeitsbereich für energieeffizientes Bauen wurde für CARNOT ein alternatives Fenstermodell erstellt. Dieses arbeitet mit den tatsächlichen Wärmetransporten zwischen der Umgebung und den Scheiben bzw. zwischen zwei Scheiben selbst. Zudem werden die nutzbaren solaren Gewinne winkelabhängig berechnet. Dazu werden die Werte für Transmission, Absorption sowie Reflektion aller Scheiben und Oberflächen benötigt. Diese können mit Hilfe des Programmes Window 6 berechnet und in das Programm importiert werden.

Da bei den Modelldaten Fenster mit bestimmten U- bzw. g-Werten gegeben sind muss in Window 6 eine Kombination von Scheiben- und Zwischenraumeigenschaften so getroffen werden, dass die daraus errechneten U-bzw. g-Werte mit den Vorgaben übereinstimmen. Dabei ist es notwendig Eigenschaften selbst zu definieren. Dabei kann es passieren, dass die angegebenen überschlagsmäßig errechneten Werte, nicht exakt stimmen. Daher empfiehlt es sich das Fenster vor der Berechnung des Gebäudemodelles separat zu kontrollieren.

Für eine Kontrolle werden thermische Randbedingungen für das Modell gesetzt. Das bedeutet konstante Temperaturen Innen sowie Außen. Dadurch stellt sich ein Wärmetransport ein, der nach einer kurzen Zeit konvergierten sollte. Die Anteile aus Transmission, konvektiver und radiativer Wärmeabgabe können ausgegeben und so den gesamten Wärmedurchfluss der Scheibe ermittelt werden. Mit der Kenntnis des Temperaturgradienten wird der U-Wert bestimmt. Um auf das richtige Ergebnis zu gelangen empfiehlt es sich die Scheibenzwischenräume solange anzupassen (Berücksichtigung der



Mindestdicken) bis der gewünschte U-Wert erreicht wurde. Als Beispiel wurde der Scheibenzwischenraum von 8 mm (Angabe Window 6) auf 7,3 mm reduziert. Somit wurde

$$U = 0,7022 \frac{W}{m^2K}$$

erreicht.

Einen ähnlichen Versuchsaufbau kann für den g-Wert durchgeführt. Eine Korrektur von Hand ist hier jedoch nur schwer möglich.

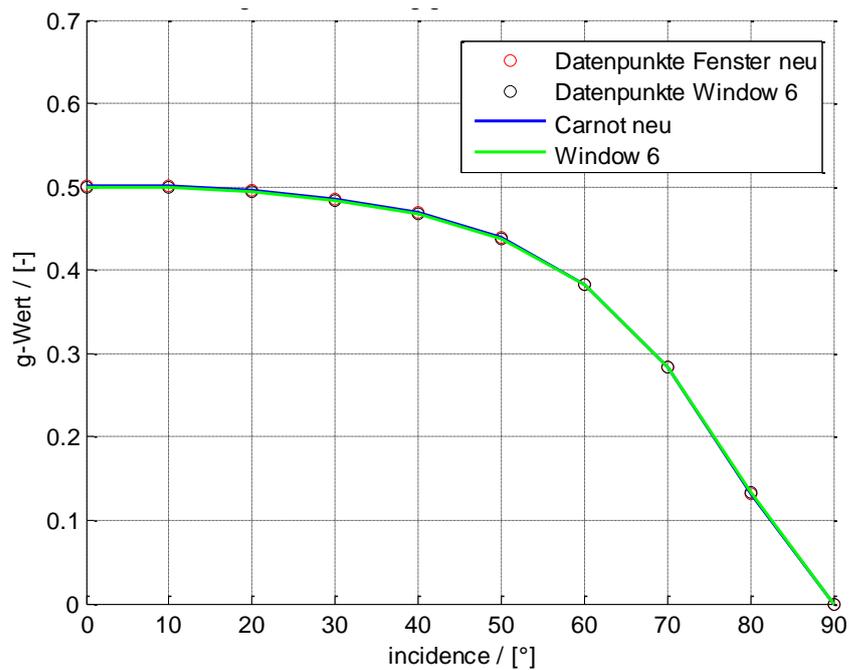


Abbildung 0.1 g-Wert in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel



Layer Data for Glazing System '1 3S2Ag2Kr '

ID	Name	D(mm)	Tsol 1	Rsol 2	Tvis 1	Rvis 2	Tir 1	Emis 2	Keff			
-----												
-----												
Outside												
30005	FPLT T-SAPPHIRE	4.0	.715	.050	.050	.700	.052	.025	.000	.837	.103	1.00
	3 Krypton	8.0										.013
30006	EmeraldGreen4mm	4.0	.500	.051	.051	.621	.062	.062	.000	.840	.840	1.00
	3 Krypton	8.0										.013
30005	PLT T-SAPPHIRE	4.0	.715					.050				.050
			.700	.025	.052	.000	.103	.837	1.00			
Inside												

**Werte aus Window 6**

Abbildung 0.2 Kennwerte aus Window 6



## KENNWERTE FÜR 2-SCHEIBENVERGLASUNG

```

ID      : 2
Name    : Double Clear Air
Tilt    : 90.0
Glazings: 2
KEFF    : 0.0638
Width   : 23.430
Uvalue  : 3.23
SHGCc   : 0.70
SCc     : 0.81
Vtc     : 0.79
RHG     : 532.63

Layer Data for Glazing System '2 Double Clear Air'

ID      Name                D(mm) Tsol  1 Rsol 2 Tvis  1 Rvis 2 Tir  1 Emis 2 Keff
-----
Outside
  103 CLEAR_6.DAT      #  5.7 .771 .070 .070 .884 .080 .080 .000 .840 .840 1.00
    1 Air                12.0
  103 CLEAR_6.DAT      #  5.7 .771 .070 .070 .884 .080 .080 .000 .840 .840 1.00
Inside
    
```

Abbildung 0.3 Kennwerte aus Window 6

Die Werte aus Window 6 wurden mit Hilfe von Matlab kontrolliert. Die Werte konnten auch hier bestätigt werden.

Die Verluste durch Rahmen und Wärmebrücken die durch den Einbau und den Übergang zwischen Glas und Rahmen entstehen müssen separat berücksichtigt werden. Die zusätzlichen Wärmeverluste wurden wiederum der der fiktiven Wärmebrückenwand hinzugerechnet. Für die 2-Scheibenverglasung wurden dreimal so schlechte lineare Wärmeübergangskoeffizienten angenommen. Die Leitfähigkeit des Rahmens wurde nicht verändert.