



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

Master Thesis

# Untersuchung des Einflusses von Regelungsstrategien auf den Heizwärmebedarf und die operative Raumtemperatur bei unterschiedlichen Gebäudestandards

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar  
und  
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic  
E 206

Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

und unter Mitwirkung von

Ao. Univ. Prof. Dr. Wolfgang Kastner  
E 183-1  
Institut für Rechnergestützte Automation  
Arbeitsbereich Automatisierungssysteme

Eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Richard HOFER**  
Matr.Nr.: 0425494  
Kaiserstraße 123/13  
1070 Wien

## **Danksagung**

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mich während des ganzen Studiums unterstützt und mir weiter geholfen haben. Ohne sie wäre vieles nicht möglich gewesen.

Großer Dank gebührt auch Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Thomas Bednar, Leiter des Instituts für Hochbau und Technologie mit dem Fachgebiet für Bauphysik und Schallschutz, der meine Diplomarbeit in die richtigen Bahnen gelenkt und mir mit viel Geduld immer weiter geholfen hat. Auch die MitarbeiterInnen seines Instituts sollen nicht unerwähnt bleiben, besonders bedanken möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Markus Leeb und Dipl.-Ing. Christoph Harreither für ihre Unterstützung.

Meine Diplomarbeit entstand im Rahmen einer Anstellung am Institut für Rechnergestützte Automation. Ich möchte mich bei Ao. Univ. Prof. Dr. Wolfgang Kastner und dem gesamten „ThinkHome“-Team für die tolle und interessante Zeit bedanken: Dipl.-Ing. Mario Kofler, Dipl.-Ing. Mag. Christian Reinisch, Dipl.-Ing. Felix Iglesias Vazquez und Andreas Czink, BSc.

Ich möchte mich auch bei meiner Freundin Sabine bedanken, die mich immer wieder aufgerichtet und mir weiter geholfen hat. Meinen Freunden aus Kärnten und Wien möchte ich für die verbrachte Zeit während des Studiums danken und hoffe, dass sich das auch in Zukunft nicht ändern wird.

Diese Arbeit wurde im Rahmen der „Haus der Zukunft Plus“ Ausschreibung von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unter der Projektnummer 822170 gefördert.

## **Kurzfassung:**

Hofer Richard: Untersuchung des Einflusses von Regelungsstrategien auf den Heizwärmebedarf und die operative Raumtemperatur bei unterschiedlichen Gebäudestandards

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen des Projekts „ThinkHome“ am Institut „Rechnergestützte Automation“ der TU Wien. „ThinkHome“ ist eine weiterentwickelte Steuerung der Haustechnik (Heizung, Lüftung, usw.), welche es erlaubt, verschiedene von BenutzerInnen definierte Strategien auszuführen aber auch selbst vom Benutzerverhalten zu lernen. Die erarbeitete Simulation dient als Testumgebung für erste Versuche der intelligenten Steuerung.

Das Modell berechnet Wärmeströme für ein Gebäude mit zwei Zonen anhand der Klimaeinflüsse, Nutzung, Gebäudegeometrie und Materialparameter. Eine Berechnung von Heizwärmebedarf und Temperaturkurven ist somit möglich. Alle Module, welche nötig sind um diese Berechnungen auszuführen, werden genau beschrieben: Bauteile, Systeme und die Interaktion mit den NutzerInnen.

Es werden Vergleiche zwischen der eigenen Simulation und HAMBASE angestellt. Die Gegenüberstellung soll Unterschiede aufzeigen und das Verhalten der beiden Simulationen beschreiben.

Zum Schluss werden zwei Heizstrategien mit dem Modell getestet und die Ergebnisse mit einer statischen Berechnung verglichen. In den Varianten a kommt eine kontinuierliche Heizung zum Einsatz, welche sich nicht nach der Anwesenheit richtet. In den Varianten b wird ein typischer ON/OFF-Regler verwendet, welcher bei Abwesenheit der NutzerInnen keine Wärme zuführt und bei Anwesenheit versucht, die Komforttemperatur wieder zu erreichen.

## **Abstract**

Hofer Richard: Examination of the effect of the control strategy on the heating demand and the operative temperature with different building standards

The present master thesis was started within the project “ThinkHome” on the “Institute of Computer Aided Automation” which is part of the TU Vienna. “ThinkHome” is an advanced control of all building services (Heating, Ventilation, etc.) which makes it possible to execute user defined strategies but also learns from the users’ behavior. The compiled simulation serves as a testing environment for first experiments of the intelligent control system.

The model calculates heat flows for a building with two zones taking the influence of the climate, the user behavior, the geometry of the building and the material parameters into account. A calculation of the heating demand and temperature curves is therefore possible. All modules, which are needed to execute these calculations, are described in detail: structural elements, systems and the interaction with the user.

Comparisons are made between the own simulation and HAMBASE. These should point out differences and describe the behavior of both simulation environments.

In the end two heating strategies are tested with the model and the results are compared with a static calculation. Version “a” describes a continuous heating system, which does not take the user occupancy into account. In Version “b” a typical ON/OFF control strategy is used, which does not supply heat when the user is absent and which tries to reach the comfort temperature when the user is present.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1.	Überblick Zonenmodellierung .....	3
2.2.	Überblick Bauteilmodellierung.....	3
2.3.	Klimadaten .....	4
2.4.	Sonnenstandberechnung und Einfallswinkel.....	5
<b>3.</b>	<b>Modell</b> .....	<b>9</b>
3.1.	Konstruktionen .....	10
3.1.1.	Außenwand.....	10
3.1.2.	Fenster.....	22
3.1.3.	Bodenplatte.....	27
3.2.	Systeme.....	33
3.2.1.	Heizungsanlage .....	34
3.2.2.	Klimaanlage .....	35
3.2.3.	Lüftungsanlage und Fensterlüftung.....	36
3.2.4.	Verschattung.....	37
3.2.5.	Infiltration .....	38
3.3.	innere Lasten .....	42
3.4.	Zone.....	44
3.4.1.	Verbindung mit einer zweiten Zone.....	51
<b>4.</b>	<b>Plausibilitätskontrolle und Vergleich mit HAMBASE</b> .....	<b>52</b>
4.1.	Vergleich von zwei dynamischen Simulationen .....	52
4.1.1.	Allgemeines und Randbedingungen .....	52
4.1.2.	Vergleich 1: freischwingend mit Fenster .....	59
4.1.3.	Vergleich 2: freischwingend ohne Fenster .....	61
4.1.4.	Vergleich 3: beide Zonen beheizt.....	63
4.1.5.	Vergleich 4: Zone 1 unbeheizt, Zone 2 beheizt.....	65
4.1.6.	Schlussfolgerung .....	66
<b>5.</b>	<b>Variantenstudie</b> .....	<b>67</b>
5.1.	Allgemeines .....	67
5.2.	Eingangsdaten .....	68
5.2.1.	Eingangsdaten für das Simulink-Modell.....	68
5.2.1.	Eingangsdaten für die statische Bilanzierungsmethode.....	72
5.3.	Variante 1.....	75
5.3.1.	Variante 1a - beide Räume beheizt.....	76
5.3.2.	Variante 1b - beide Räume beheizt.....	77
5.3.3.	Variante 1a – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen .....	78
5.3.4.	Variante 1b – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen .....	79
5.3.5.	Variante 1a – Ein Raum beheizt – Tür offen .....	80

---

5.3.6.	Variante 1b – Ein Raum beheizt – Tür offen .....	81
5.4.	Variante 2.....	83
5.4.1.	Variante 2a – beide Räume beheizt .....	84
5.4.2.	Variante 2b – beide Räume beheizt .....	85
5.4.3.	Variante 2a – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen .....	86
5.4.4.	Variante 2b – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen .....	87
5.4.5.	Variante 2a – Ein Raum beheizt – Tür offen .....	88
5.4.6.	Variante 2b – Ein Raum beheizt – Tür offen .....	89
5.5.	Variante 3.....	91
5.5.1.	Variante 3a – beide Räume beheizt .....	92
5.5.2.	Variante 3b – beide Räume beheizt .....	93
5.5.3.	Variante 3a – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen .....	94
5.5.4.	Variante 3b – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen .....	95
5.5.5.	Variante 3a – Ein Raum beheizt – Tür offen .....	96
5.5.6.	Variante 3b – Ein Raum beheizt – Tür offen .....	97
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>98</b>
<b>7.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>101</b>
7.1.	Abbildungsverzeichnis .....	101
7.2.	Tabellenverzeichnis .....	102
<b>8.</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>103</b>

## 1. Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit ist eng mit dem Projekt „ThinkHome“ des Instituts für „Rechnergestützte Automation“ der TU Wien unter der Leitung von Prof. Kastner verknüpft. Die erstellte Simulationsumgebung, welche mit Hilfe von Simulink, einer Erweiterung für Matlab<sup>1</sup>, erstellt wurde, soll als Testumgebung für erste virtuelle Versuche dienen.

„ThinkHome“ ist eine weiterentwickelte Steuerung der Haustechnik (Heizung, Lüftung, Klimatisierung, usw.) welche es erlaubt, verschiedene von BenutzerInnen definierte Strategien auszuführen aber auch selbst vom BenutzerInnenverhalten zu lernen. Aktuelle Haustechniksteuerungssysteme verfolgen im besten Fall starre Strategien und nehmen keine Rücksicht auf die aktuelle Situation im Gebäude. Dies führt zu erhöhten Energiekosten und unzufriedenen NutzerInnen. „ThinkHome“ bestimmt aufgrund des herrschenden Klimas, der thermischen Qualität der Gebäudehülle und der NutzerInnen die optimale Strategie zur Steuerung aller Haustechnikkomponenten. Mit der Hilfe von Profilen lässt sich das Verhalten der NutzerInnen voraussehen. Ein Profil beinhaltet Informationen über das Nutzerverhalten und deren Gewohnheiten. Das System versucht wiederkehrende Muster im täglichen Leben der NutzerInnen zu erkennen und daraus Kontrollstrategien abzuleiten. [VAZ10]

Um ein Gebäude energieeffizient zu betreiben und gleichzeitig den NutzerInnen den größtmöglichen Komfort zu bieten, ist es wichtig die Regelungsstrategie für die Heizung zu optimieren. „ThinkHome“ kann aufgrund der Profile Anwesenheit voraussagen und so eine optimale Heizstrategie wählen.

„ThinkHome“ gliedert sich in zwei Teile: die Wissensdatenbank und ein Multi-Agent-System. Die Wissensdatenbank enthält alle wichtigen Daten, welche als Basis für die Kontrollstrategien und Profile dienen. Das Multi-Agent-System hat die Aufgabe die optimale Kontrollstrategie im Hinblick auf die Energieeffizienz und den Komfort auszuführen. Dies geschieht mit Hilfe von unabhängigen Programmen, sogenannten Agents, welche mit einer künstlichen

---

<sup>1</sup> MATLAB R2009a

Intelligenz ausgestattet sind und in Netzwerken zusammenarbeiten. Sie können unabhängig voneinander agieren, verfolgen jedoch gemeinsame Ziele. Dieses intelligente Netzwerk verbindet die automatisierte Haustechnik mit der Wissensdatenbank. [REI10]

Heutzutage wird im Neubau, aber auch bei der Sanierung bestehender Objekte, sehr viel Wert auf die Reduzierung der Heizkosten bei gleichzeitiger Erhöhung der Behaglichkeit gelegt. Deshalb muss es das Ziel sein, intelligente und auf die NutzerInnen und das Gebäude abgestimmte Steuerungssysteme weiter zu entwickeln und anzuwenden. Das Gebäude muss als Ganzes betrachtet werden, nur so können alle Einflüsse erfasst und weiter verarbeitet werden.

Das vorliegende Modell berechnet Wärmeströme für ein definiertes Gebäude anhand der Klimaeinflüsse, Nutzung, Gebäudegeometrie und Materialparameter. Daraus lassen sich unter anderem der Heizwärmebedarf oder Temperaturkurven bestimmen. Das Gebäude besteht aus zwei Zonen, welche mit einer Tür verbunden sind. Jede Zone besitzt ein Fenster, wobei eines nach Norden und eines nach Süden zeigt. Die Raumtemperatur wird mittels einer Heizungsanlage auf dem gewünschten Niveau gehalten. Die „virtuellen“ NutzerInnen können den Raum nach Belieben lüften und verschatten. Physikalische Effekte, wie die Luftinfiltration aufgrund von Wind und Temperaturunterschied, aber auch der Luftaustausch zwischen den Zonen werden in die Berechnung aufgenommen. Von Personen und Geräten erzeugte innere Lasten werden als innere Wärmequellen berücksichtigt und der Zone zugeführt. Das Endergebnis eines Berechnungsdurchgangs ist die Lufttemperatur und die operative Temperatur. Sie dienen als Startwert für den nächsten Zeitschritt.

Die angesprochenen Heizstrategien können so getestet und ausgewertet werden, denn das Modell ist in der Lage, die Unterschiede zwischen einzelnen Strategien darzustellen. Um dies zu zeigen, werden in Kapitel 5 die Ergebnisse einer kontinuierlichen Heizung ohne Temperaturabsenkung bei Abwesenheit und eines ON/OFF-Reglers gegenübergestellt.



## 2. Grundlagen

Das Simulink-Modell ermöglicht eine numerische Modellierung von Wärme- und Luftströmen in Gebäuden mit zwei Zonen. Diese sind miteinander verbunden und beeinflussen sich gegenseitig. Die Lufttemperatur wird aufgrund der Energiebilanzen für jede Zone berechnet.

### 2.1. Überblick Zonenmodellierung

Die Lufttemperatur wird aus folgender Gleichung gewonnen, welche alle Gewinne und Verluste bilanziert (Energieerhaltungssatz) und daraus für jeden Zeitschritt eine Lufttemperatur  $T_{\text{air}}$  berechnet [CLA01].

$$C \cdot \dot{T}_{\text{air}} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_V + \dot{Q}_{\text{sol,c}} + \dot{Q}_{Gc}$$

$C$  Speicherkapazität des Raumes [J/K]

$\dot{T}_{\text{air}}$  zeitliche Änderung der Lufttemperatur in der Zone [K/sec]

$\dot{Q}_C$  Wärmestrom aus Bauteilen [W]

$\dot{Q}_V$  Wärmestrom durch Luftaustausch [W]

$\dot{Q}_{\text{sol,c}}$  Wärmestrom durch solaren Energieeintrag, konvektiver Anteil [W]

$\dot{Q}_{Gc}$  Wärmestrom von Quellen, konvektiver Anteil [W]

Der Strahlungsanteil von Quellen und des Wärmeeintrags durch die Sonne wird in der Strahlungstemperatur berücksichtigt, siehe Kapitel 3.4.

### 2.2. Überblick Bauteilmodellierung

Jedes Bauteil wird in Schichten aufgeteilt und für jede einzelne Schicht werden die Wärmeströme bilanziert. Somit kann für jede Schicht des Bauteils eine Temperatur berechnet werden, daraus lässt sich eine Oberflächentemperatur ableiten. Diese Daten werden im Zonenmodell erfasst und führen zu einer Lufttemperatur.

$$C \cdot \dot{T} = q_{li} + q_{re}$$

C	Wärmekapazität der Schicht bezogen auf die Fläche [J/(m <sup>2</sup> K)]
$\dot{T}$	zeitliche Änderung der Temperatur in der Schicht [K/sec]
$q_{li}, q_{re}$	Wärmestromdichte von links, von rechts [W/m <sup>2</sup> ]

### 2.3. Klimadaten

Die Wetterdatenbank wurde vom Institut für Hochbau und Technologie - Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz der TU Wien zur Verfügung gestellt und bezieht sich auf den Standort Wien – innere Stadt<sup>2</sup>.

Folgende Datensätze wurden für die Simulation verwendet:

- Außenlufttemperatur
- gesamte solare Strahlung auf Nord-, Süd-, Ost- und Westwand
- gesamte solare Strahlung auf eine horizontale Fläche
- Windgeschwindigkeit

In der Datenbank befinden sich gemessene Werte für die solare Strahlung auf horizontale Flächen. Für vertikale Flächen wurde diese mit Hilfe der Formeln in [RIE94] auf alle Orientierungen abhängig von Tages- und Jahreszeit umgerechnet. Diese Daten finden direkt Eingang in die Simulation.

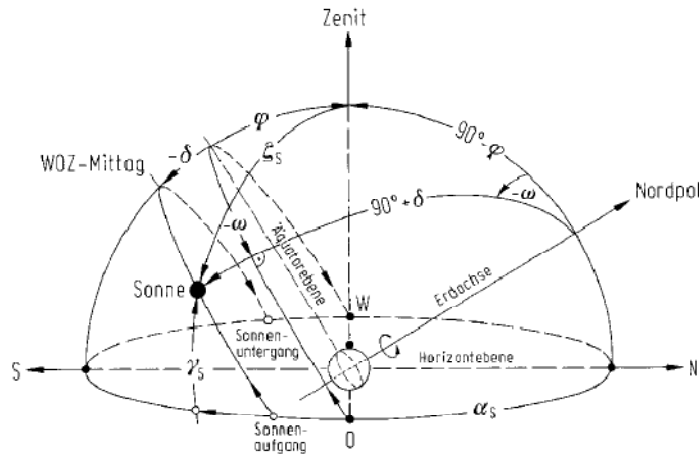
Diese Daten werden in den Workspace von Simulink geladen und stehen der Simulation zur Verfügung. Für jeden Zeitschritt wird der entsprechende Wert aus der Wetterdatenbank im Modell verarbeitet.

---

<sup>2</sup> g.L. 16°22'02", g.B. 48°11'58", Seehöhe 171 m, Auswahl aus der Periode 1991 – 2005, Testreferenzjahr J: 2003, F: 2000, M: 1992, A: 1994, M: 2005, J: 1996, J: 2004, A: 2004, S: 2000, O: 1996, N: 1992, D: 1994

## 2.4. Sonnenstandberechnung und Einfallswinkel

Für jeden 15. des Monats wurde eine detaillierte Sonnenstandberechnung durchgeführt. Diese Daten werden benötigt um für jedes Fenster den Einfallswinkel der Sonneneinstrahlung zu berechnen. Der Transmissionsgrad  $\tau$  und der Absorptionsgrad  $\alpha$  der Fensterscheiben sind vom Einfallswinkel abhängig.



**Bild B2-1.** Koordinaten zur Bestimmung des Sonnenstandes. Basis ist die Horizontebene eines Beobachters in der geographischen Breite  $\varphi$ . Dargestellt ist die Situation des Winterhalbjahres ( $\delta < 0$ ). Neben dem Weg der Sonne am Himmel zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang (SA und SU) ist auch derjenige zur Tag- und Nachtgleiche dargestellt. Aus dem astronomischen Dreieck ( $90 - \varphi$ ,  $\zeta_s$  und  $90 + \delta$ ) leiten sich die im Text angegebenen Formeln her

Abb. 1: Koordinaten zur Bestimmung des Sonnenstands aus [RIE94]

Die Berechnungen des Sonnenstands und die dazugehörigen Erläuterungen des Sonnenstands stammen aus [RIE94] und werden im Folgenden wiedergegeben. Mit den untenstehenden Formeln kann ausgehend vom Längen- und Breitengrad die Sonnenhöhe  $\gamma_s$  und der Sonnenazimut  $\alpha_s$  (positiv von Nord nach Süd) berechnet werden. Die Sonnenhöhe und der Sonnenazimut hängen von der Sonneneklination  $\delta$  und von der geographischen Breite  $\varphi$  ab. Die Sonnenhöhe hängt noch zusätzlich vom Stundenwinkel  $\omega$  ab, welcher von der Umdrehung der Erde beeinflusst wird.

$$\omega = 15 \cdot \text{WOZ} - 180$$

$$\omega \quad \text{Stundenwinkel [}^\circ\text{]}$$

$$\text{WOZ} \quad \text{Wahre Ortszeit [h]}$$

Durch die im Jahresverlauf ungleichmäßige, elliptische Erdlaufbahn um die Sonne ist der wahre Sonnentag ungleichmäßig lang. Die Mitteleuropäische Zeit

(MEZ) wird mit der Zeitgleichung und dem Einfluss des Längengrades  $\lambda$  auf die WOZ umgerechnet. Die WOZ entspricht der Sonnenzeit, welche auf einer Sonnenuhr abgelesen werden kann. Als Zeitgleichung wird die Differenz zwischen der WOZ und der Mittleren Sonnenzeit (Mittlere Ortszeit MOZ) eines Ortes bezeichnet.

$$\text{WOZ} = \text{MEZ} - 1 + \frac{\lambda}{15} + \text{ZGL}$$

MEZ                      Mitteleuropäische Zeit [h]

$\lambda$                         Längengrad des Ortes [°]

ZGL                      Zeitgleichung [h]

Die Zeitgleichung berechnet sich für jeden Tag im Jahr und wird in Minuten angegeben.

$$\text{ZGL} = -7,68 \sin(J' - 2,8) - 9,9 \sin(2J' + 19,7)$$

ZGL                      Zeitgleichung [min]

wobei

$$J' = \frac{360 J}{362,25}$$

J                          Tag, 1.Jänner J = 1

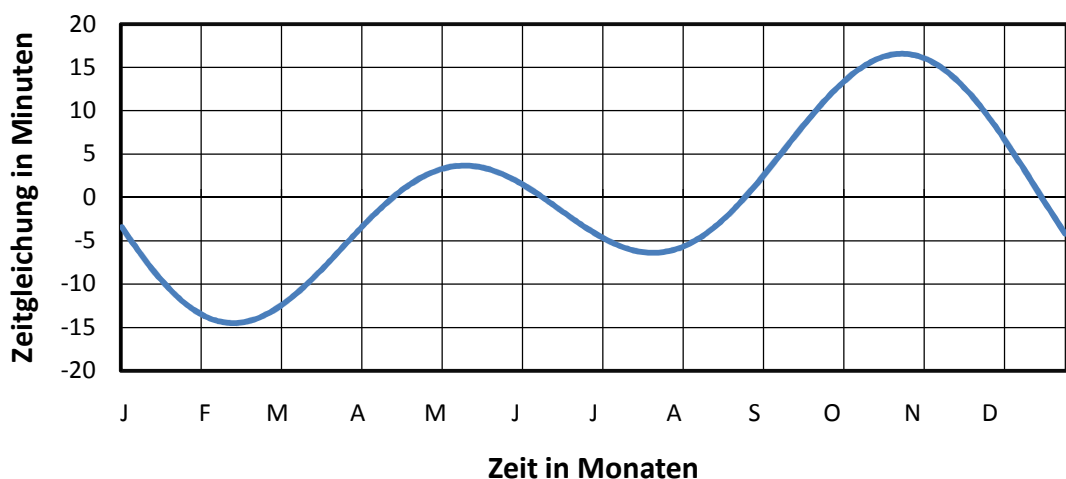


Abb. 2: Zeitgleichung für ein Jahr in Minuten

Für die weitere Berechnung wird die ZGL durch die Division durch 60 auf Stunden umgerechnet.

Um den Höhenwinkel berechnen zu können, wird die Deklination der Sonne  $\delta$  benötigt. Sie ändert sich beim Umlauf der Erde um die Sonne fortlaufend und dient zusammen mit dem Stundenwinkel zur Positionsangabe der Sonne.

$$\delta = \arcsin[0,3978 \sin(J' - 80,2 + 1,92 \sin(J' - 2,8))]$$

$\delta$  Deklination der Sonne für jeden Tag im Jahr [°]

Der Höhenwinkel  $\gamma_s$  kann nun für jeden Tag und für jede beliebige Stunde des Tages berechnet werden:

$$\gamma_s = \arcsin(\sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega))$$

$\varphi$  geografische Breite des Ortes [°]

$\delta$  Deklination der Sonne für jeden Tag im Jahr [°]

$\omega$  Stundenwinkel [°]

Der Sonnenazimut  $\alpha_s$  lautet:

$$\arccos \frac{\sin(\varphi) \sin(\gamma_s) - \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\gamma_s)}$$

$$= \alpha_s - 180^\circ \text{ für } \text{WOZ} > 12h$$

$$= 180^\circ - \alpha_s \text{ für } \text{WOZ} \leq 12h$$

$\varphi$  geografische Breite des Ortes [°]

$\delta$  Deklination der Sonne [°]

$\gamma_s$  Höhenwinkel der Sonne [°]

An jedem Tag im Jahr geht die Sonne zu unterschiedlichen Zeiten auf und unter. Auf der Homepage der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik [ZAM11] können für jeden Tag die Zeitpunkte von Sonnenauf- und Sonnenuntergang eingesehen werden. Für das Modell wurde der 15. des Monats berechnet und diese Werte von Azimut und Höhenwinkel für den ganzen Monat verwendet.

Um den Einfallswinkel für jedes Fenster für jeden 15. des Monats angeben zu können, muss der zur Sonne gerichtete Einheitsvektor der Empfangsfläche

für jede volle Stunde berechnet werden. Die folgenden Formeln stammen aus [ONO97]:

$$e_x = -\cos(\alpha_s) \cos(\gamma_s)$$

$$e_y = \sin(\alpha_s) \cos(\gamma_s)$$

$$e_z = \sin(\gamma_s)$$

$e_x, e_y, e_z$  Einheitsvektor der Empfangsfläche [-]

$\gamma_s$  Höhenwinkel der Sonne [°]

$\alpha_s$  Azimut der Sonne [°]

Die Orientierung des Fensters ist durch den Azimut  $\alpha_F$  und der Neigung  $\nu$  der nach außen orientierten Flächennormalen gegeben:

$$n_x = -\cos(\alpha_F) \cos(\nu)$$

$$n_y = \sin(\alpha_F) \cos(\nu)$$

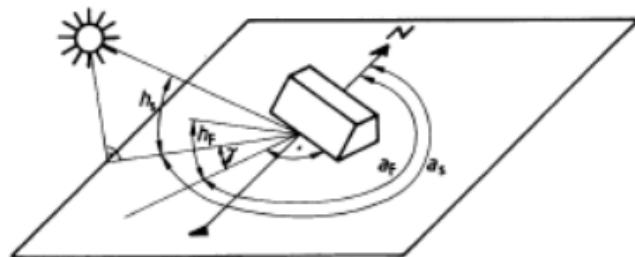
$$n_z = \sin(\nu)$$

$n_x, n_y, n_z$  nach außen orientierte Flächennormale [-]

$\alpha_F$  Azimut des Fensters [°]

$\nu$  Neigung des Fensters [°]

NORD (N) = 0°  
OST (E) = 90°  
SÜD (S) = 180°  
WEST (W) = 270°



$\alpha_s$  = Azimut der Sonne

$\alpha_F$  = Azimut der Wand (Winkel zwischen Nordrichtung und Projektion der Flächennormalen auf die Horizontalebene)

$h_s$  = Sonnenhöhe

$h_F$  = Höhenwinkel der Flächennormalen

$\gamma = \alpha_s - \alpha_F$  (positiv verwenden)

Abb. 3: Definition Azimut und Neigung eines Fensters aus [ONO97]

Der Einfallswinkel kann wie folgt für jede volle Stunde berechnet werden:

$$\beta(h) = \arccos (e_x(h) \cdot n_x + e_y(h) \cdot n_y + e_z(h) \cdot n_z)$$

$\beta(h)$  Einfallswinkel der Sonne auf das Fenster für jede Stunde  $h$  [°]

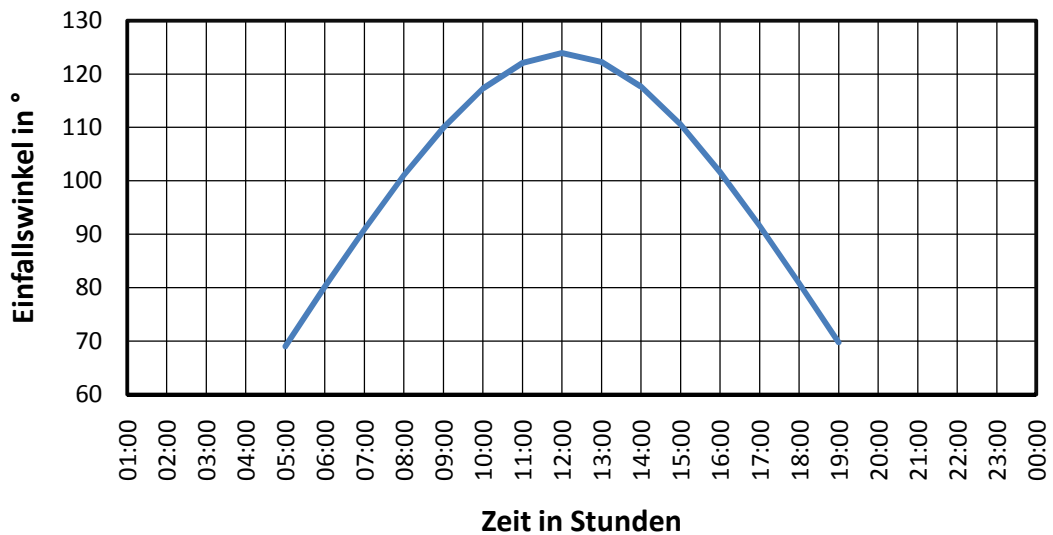


Abb. 4: Verlauf des Einfallswinkels für den 15. August auf ein Nordfenster

Abb. 4 zeigt den Verlauf des Einfallswinkels für einen Tag. Nur im Bereich von 0° bis 90° fällt direkt Sonne auf das Fenster, außerhalb dieses Bereichs ist das Fenster im Eigenschatten. Der Einfallswinkel wird in Kapitel Fenster 3.1.2 zur Bestimmung des winkelabhängigen Transmissions- und Absorptionsgrades verwendet.

### 3. Modell

Als Grundlage für die erstellte Simulationsumgebung in Simulink dienten vom Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz zur Verfügung gestellten Module „Zone“ und „Wand“. Diese wurden auf Grundlage von [CLA01] erstellt. Diese Grundmodule wurden konsequent erweitert um damit auch Böden, Decken, Türen und Fenster berechnen zu können. Neben den Konstruktionsmodulen und dem Zonenmodul wurden Systemmodule erstellt, welche Heizung, Lüftung, innere Lasten, Infiltration und die Verschattung beinhalten.

Für das Modell werden folgende Annahmen getroffen:

- die Lufttemperatur im Raum ist überall gleich

- die thermischen Eigenschaften der Materialien sind zeitunabhängig
- Wärmeleitung durch Bauteile wird eindimensional berechnet
- Wärmebrücken werden nicht berücksichtigt
- jeglicher Wärmeeintrag durch Strahlung wird gleichmäßig auf alle Flächen verteilt
- Wärmeübergangskoeffizienten sind konstant
- 50 % der Wärmeenergie von den inneren Lasten und der Heizungsanlage erwärmen sofort die Luft, die restlichen 50 % gehen in die Strahlungstemperatur der Oberflächen
- 10 % der Wärmeenergie durch solare Strahlung erwärmen sofort die Luft, die restlichen 90 % gehen in die Strahlungstemperatur der Oberflächen
- alle Abmessungen der Bauteile sind Innenabmessungen

Grundsätzlich werden Lüftungsverluste (Infiltration, Luftaustausch, zwischen Zonen, Lüftungsanlage) mit der Lufttemperatur  $T_{\text{air}}$  berechnet. Transmissionsverluste durch Bauteile werden mit einer operativen Temperatur  $T_o$  berechnet, die Steuerung der Heizung erfolgt ebenfalls über die operative Temperatur. In der operativen Temperatur wird die Lufttemperatur und die Strahlungstemperatur der Oberflächen zusammengefasst (Kapitel 3.4). Alle innenliegenden Bauteiloberflächen „sehen“ somit dieselbe Temperatur  $T_o$ .

[DIN06] definiert die operative Temperatur in folgender Weise: „Gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht gleichmäßigen Umgebung.“

### 3.1. Konstruktionen

#### 3.1.1. Außenwand

Das Modul „Außenwand“ grenzt das Raumklima in der Zone vom Außenklima ab und berechnet den daraus resultierenden Wärmestrom. Für



jede Orientierung (Süd, Nord, Ost, West) wurde ein eigenes Außenwandmodul erstellt.

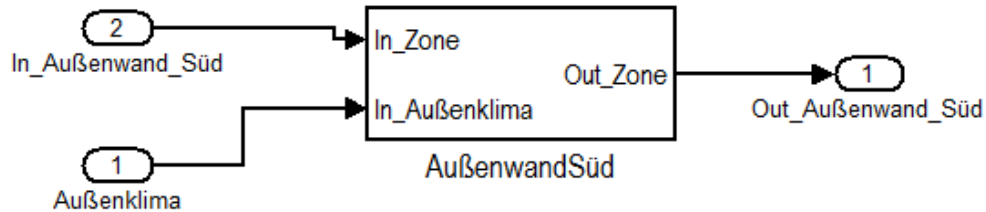


Abb. 5: Außenwandmodul in Simulink

Folgende Daten werden vom Außenklima an das Konstruktionsmodul übergeben (In\_Außenklima):

- Außenlufttemperatur  $T_{\text{ext}}$
- konvektiver Übergangskoeffizient  $h_c$
- diffuse und direkte solare Strahlung  $I_{\text{diff}}, I_{\text{dir}}$

Folgende Daten erhält das Modul aus der Zone (In\_Zone):

- operative Temperatur in der Zone  $T_o$
- effektiver Übergangskoeffizient  $h_{\text{eff}}$
- Fläche des Bauteils  $A$

Folgende Daten gibt das Modul an die Zone weiter (Out\_Zone):

- Oberflächentemperatur des Bauteils  $T_s$
- Wärmedurchlasskoeffizient der äußeren Schicht  $K$
- Fläche des Bauteils  $A$

Das numerische Modell zur Berechnung eines eindimensionalen Wärmestroms durch die Außenwand kann in drei Bereiche eingeteilt werden:

- Oberflächenknoten - Außenklima
- Oberflächenknoten – Zone
- Knoten im Inneren der Wand

Für die Berechnung sind beide Oberflächenknoten notwendig, zur Erhöhung der Rechengenauigkeit kann das Wandmodell um Knoten im Inneren erweitert werden. Für jeden einzelnen Knoten wird eine Bilanzierung der von links und rechts kommenden Wärmeströme aufgestellt.

Für jede Schicht werden Materialparameter festgelegt, diese werden mit Hilfe von Variablen in einer Textdatei abgelegt und können dort geändert werden.

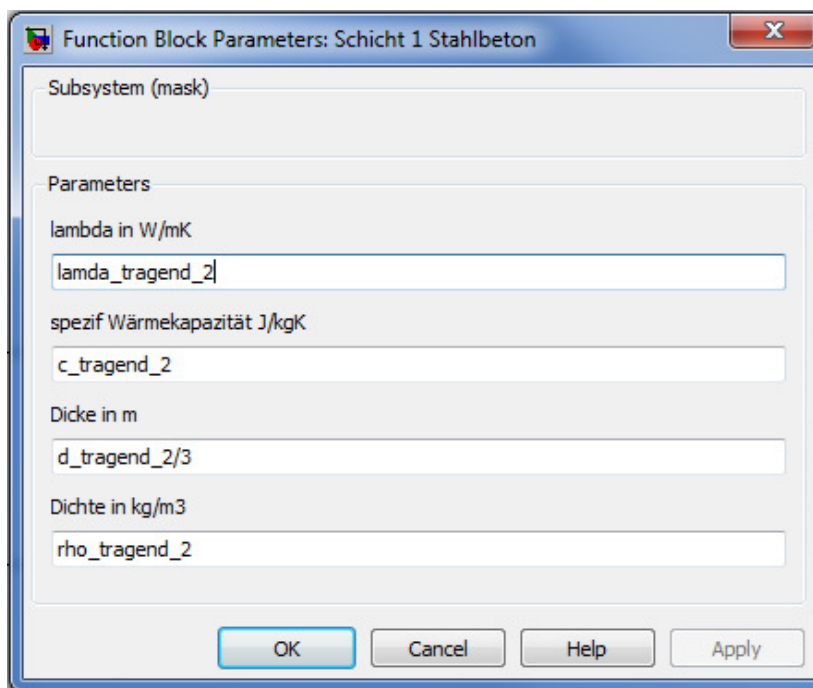


Abb. 6: Variablen zur Festlegung der Materialkennwerte und Abmessungen

```
%2 Außenwand, Zwischenwand
lamda_tragend_2=2.5;
c_tragend_2=1080;
d_tragend_2=0.3;
rho_tragend_2=2400;
```

Abb. 7: Definition der Variablen in einer Textdatei

Sobald die Variablen in den Speicher (Workspace) von Simulink geladen sind, stehen sie dem Berechnungsmodell zur Verfügung.

### Knoten im Wandinneren

Im Folgenden wird die Berechnungsmethode an einer durch Schichten diskretisierten Wand gezeigt.

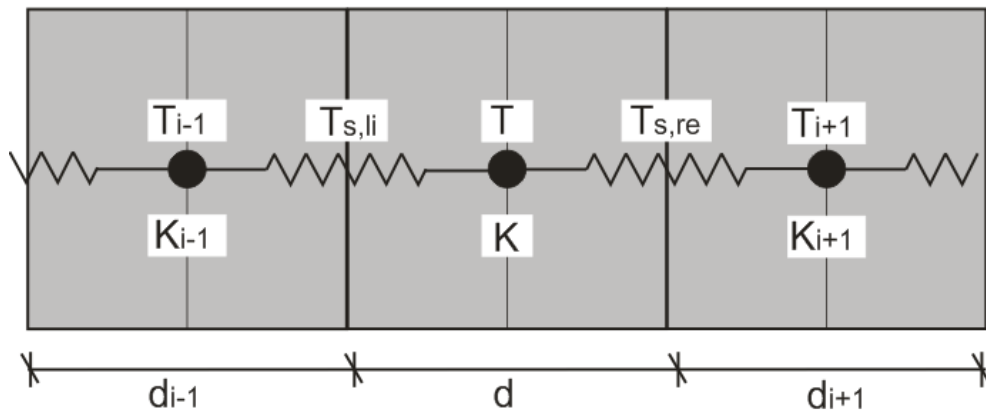


Abb. 8: Diskretisiertes Wandmodell für die Berechnung eines inneren Knotens

Die Wand wird, wie bereits erwähnt, in Schichten eingeteilt. Jeder dieser Schichten wird ein Knoten zugewiesen für welchen die Temperatur berechnet wird. Die Knoten sind über materialabhängige Widerstände miteinander verbunden. In jedem Knoten ist die Wärmekapazität der Schicht konzentriert. Jede einzelne Schicht kann als Kontrollvolumen angesehen werden für welches der Energieerhaltungssatz für Wärmeenergie angewendet wird [CLA01]. Um die Realität so gut wie möglich abzubilden, müsste das Bauteil in unendlich viele Knoten eingeteilt werden. Da dies aber nicht möglich ist, müssen Diskretisierungsfehler in Kauf genommen werden. Die Änderung der Temperatur in einem Knoten ist gleich der Wärmestromdichte von links und von rechts:

$$C \cdot \dot{T} = q_{li} + q_{re}$$

$C$  Wärmekapazität der Schicht bezogen auf die Fläche [J/(m<sup>2</sup>K)]

$\dot{T}$  zeitliche Änderung der Temperatur [K/sec]

$q_{li}, q_{re}$  Wärmestromdichte von links, von rechts [W/m<sup>2</sup>]

Die Wärmekapazität der Schicht ist abhängig vom Material und wird wie folgt berechnet:

$$C = cpd_i$$

$c$  spezifische Wärmekapazität des trockenen Materials [J/(kgK)]

$\rho$  Trockendichte [kg/m<sup>3</sup>]

$d_i$  Dicke der Schicht mit Index  $i$  [m]

Die Wärmestromdichte setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen [CLA01]:

$$q = q_{\text{kond}} + q_{\text{konv}}$$

$q_{\text{kond}}$  Wärmestromdichte bei Wärmeleitung [W/m<sup>2</sup>]

$q_{\text{konv}}$  Wärmestromdichte bei Konvektion [W/m<sup>2</sup>]

Basierend auf dem Fourierschen Gesetz kann wie folgt angeschrieben werden [HTO02]:

$$q_{\text{li,kond}} = K \cdot (T_{\text{s,li}} - T)$$

$$q_{\text{re,kond}} = K \cdot (T_{\text{s,re}} - T)$$

$T_{\text{s,li}}, T_{\text{s,re}}$  Temperatur an der linken bzw. rechten Schichtgrenze [°C]

$T$  Temperatur im inneren der Schicht [°C]

$K = \frac{2\lambda}{d_i}$  Wärmedurchlasskoeffizient der halben inneren Schichten [W/m<sup>2</sup>K]

Ausgehend von der Annahme, dass lokale stationäre Verhältnisse zwischen den Schichtgrenzen und dem Nachbarknoten herrschen, können die Temperaturen zwischen den Schichten ausgedrückt werden als [HTO02]:

$$T_{\text{s,li}} = \frac{K \cdot T + K_{i-1} \cdot T_{i-1}}{K + K_{i-1}}$$

$$T_{\text{s,re}} = \frac{K \cdot T + K_{i+1} \cdot T_{i+1}}{K + K_{i+1}}$$

Werden diese Terme in die Gleichung für die von links und rechts kommenden Wärmestromdichten eingesetzt, ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der zeitlichen Änderung der Temperatur für einen Knoten im Inneren der Wand:

$$C \cdot \dot{T} = \frac{K_{i-1} \cdot K}{K_{i-1} + K} (T_{i-1} - T) - \frac{K \cdot K_{i+1}}{K + K_{i+1}} \cdot (T - T_{i+1})$$

C	Wärmekapazität der Schicht bezogen auf die Fläche [J/(m <sup>2</sup> K)]
T <sub>i</sub>	Temperatur des Schichtknotens mit Index i [°C]
$\dot{T}$	zeitliche Änderung der Temperatur für einen Knoten im Wandinneren [K/sec]
K <sub>i</sub>	Wärmedurchlasskoeffizient der halben inneren Schicht mit Index i [W/m <sup>2</sup> K]

In dieser Art und Weise können mehrere Schichten hintereinander angeordnet werden. An den Schnittpunkten werden jeweils die Temperatur und der Wärmedurchlasskoeffizient der Schicht übergeben. Die Wärmeströme durch Konvektion innerhalb des Bauteils werden nicht berücksichtigt, es wird angenommen, dass sie einen vernachlässigbaren Anteil beitragen.

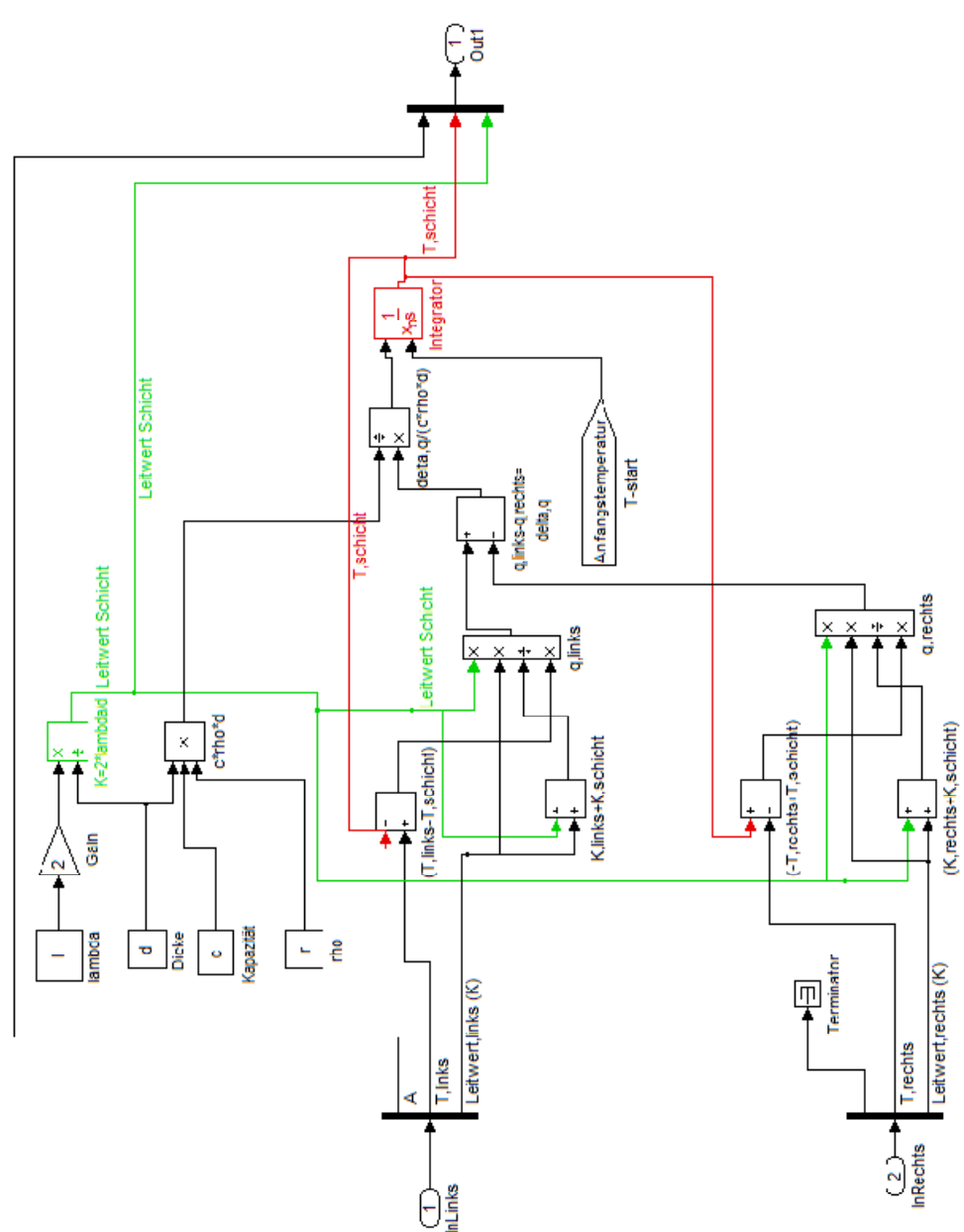


Abb. 9: Berechnung eines Knotens im Wandinneren mit Simulink

### Oberflächenknoten zur Zone

Die Berechnung der Oberflächentemperatur eines Knotens zur Zone erfolgt nach demselben Prinzip wie bei Knoten im Inneren des Bauteils. Da der Knoten am Rand des Kontrollvolumens liegt, muss für den Wärmedurchlasskoeffizient  $K$  die gesamte Schichtdicke verwendet werden. Die operative Temperatur ist mit der Oberflächentemperatur über einen effektiven Übergangskoeffizienten verknüpft, daraus lässt sich die Wärmestromdichte für die Bilanzierungsgleichung berechnen. Wie die operative Temperatur berechnet wird, ist in Kapitel 3.4 erläutert.

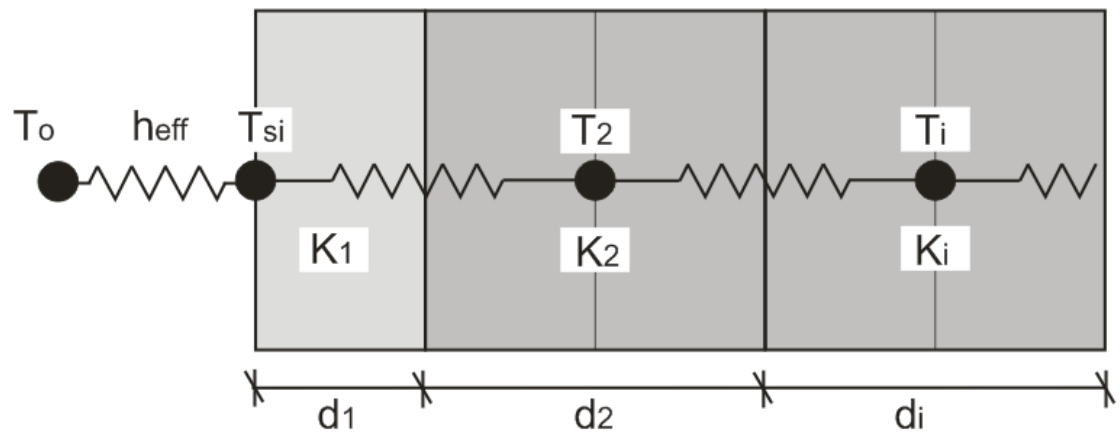


Abb. 10: Diskretisiertes Wandmodell für die Berechnung eines Knotens zur Zone

$$C \cdot \dot{T}_{si} = (T_o - T_{si}) \cdot h_{eff} - \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2} \cdot (T_{si} - T_2)$$

$C = \rho d_1$	Wärmekapazität der Schicht bezogen auf die Fläche [J/(m <sup>2</sup> K)]
$c$	spezifische Wärmekapazität des trockenen Materials [J/(kgK)]
$\rho$	Trockendichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$d_i$	Dicke der Schicht mit Index i [m]
$T_{si}$	Oberflächentemperatur der Schicht zur Zone [°C]
$\dot{T}_{si}$	zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur [K/sec]
$T_o$	operative Temperatur in der Zone [°C]
$T_2$	Temperatur des Schichtknotens 2 [°C]
$h_{eff}$	effektiver Übergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]
$K_1 = \frac{\lambda}{d_1}$	Wärmedurchlasskoeffizient der äußeren Schicht 1 [W/m <sup>2</sup> K]
$K_2 = \frac{2\lambda}{d_2}$	Wärmedurchlasskoeffizient der halben Schicht 2 [W/m <sup>2</sup> K]

Für die Berechnung des Wärmeübergangs an der Oberfläche können die Übergangskoeffizienten für Konvektion und Strahlung zu einem effektiven Übergangskoeffizienten zusammen gefasst werden. Der gesamte Wärmeübergangskoeffizient für beide Arten beträgt laut [FIS08] ca. 7,5 W/m<sup>2</sup>K und für Strahlung 5 W/m<sup>2</sup>K. Somit ergibt sich für den konvektiven Übergangskoeffizienten 2,5 W/m<sup>2</sup>K. Diese Werte gelten vereinfacht für die gesamte Zone.

$$h_{\text{eff}} = h_c + h_r$$

$h_{\text{eff}}$	effektiver Übergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]
$h_c$	konvektiver Übergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]
$h_r$	Strahlungskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]



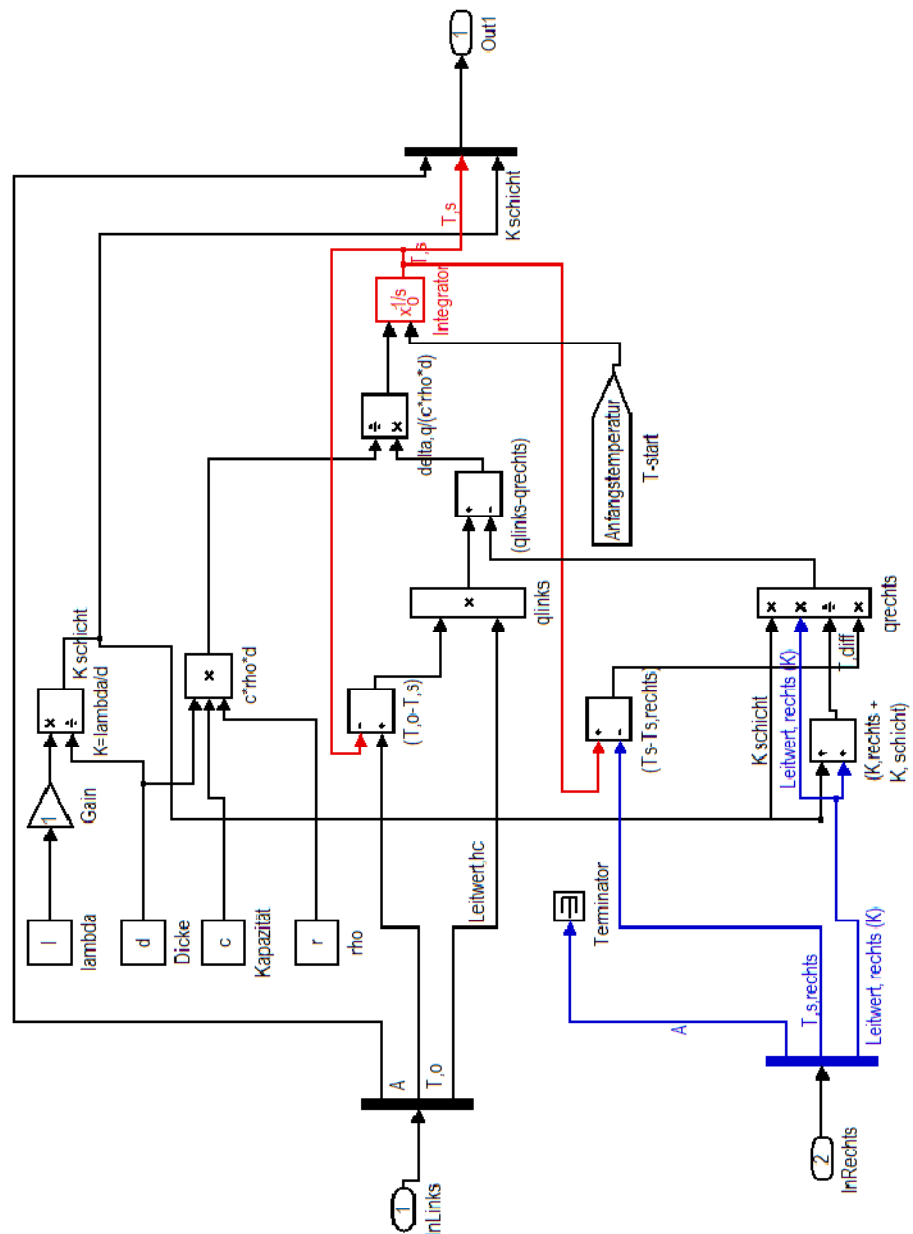


Abb. 11: Berechnung eines Oberflächenknotens zur Zone in Simulink

### Oberflächenknoten zur Außenluft

Die Berechnung dieses Knotens erfolgt wieder mittels der Bilanzierungsmethode wobei sich die Wärmestromdichten aus dem Außenklima und dem Wandinneren ergeben. Der Wärmedurchlasskoeffizient wird mit der gesamten Schichtstärke berechnet. Der konvektive und durch Wärmestrahlung hervorgerufene Wärmeübergang an der Oberfläche wird durch eine effektive Außentemperatur abgebildet. Diese ist über einen effektiven Übergangskoeffizienten mit der Oberflächentemperatur der Außenschicht verbunden.

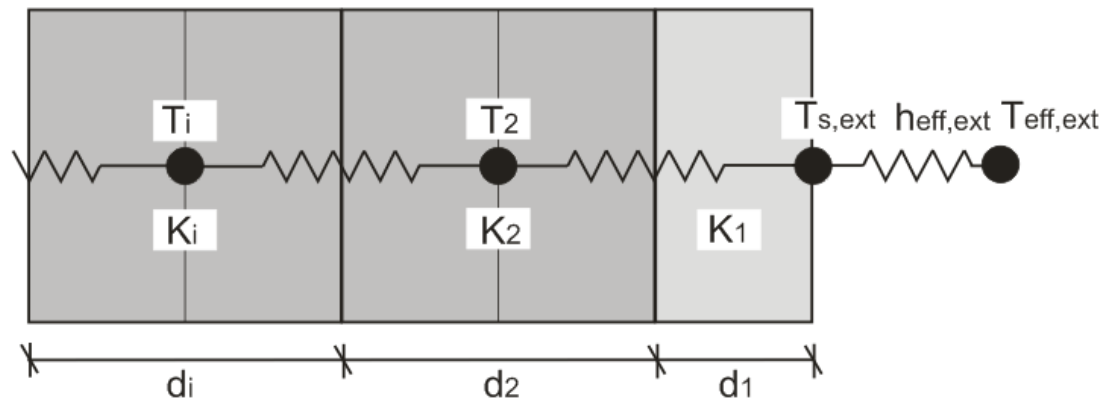


Abb. 12: Diskretisiertes Wandmodell für die Berechnung eines Knotens zur Außenluft

$$C \cdot \dot{T}_{s,ext} = (T_2 - T_{s,ext}) \cdot \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + K_2} - (T_{s,ext} - T_{eff,ext}) \cdot h_{eff,ext}$$

$C = \rho d_1$	Wärmekapazität der Schicht bezogen auf die Fläche [J/(m <sup>2</sup> K)]
$c$	spezifische Wärmekapazität des trockenen Materials [J/(kgK)]
$\rho$	Trockendichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$d_i$	Dicke der Schicht mit Index $i$ [m]
$T_{s,ext}$	Oberflächentemperatur des Bauteils zur Außenluft [°C]
$\dot{T}_{s,ext}$	zeitliche Änderung Oberflächentemperatur [K/sec]
$T_{eff,ext}$	effektive Außentemperatur [°C]
$T_2$	Temperatur des Schichtknotens 2 [°C]
$h_{eff,ext}$	effektiver Übergangskoeffizient außen [W/m <sup>2</sup> K]
$K_1 = \frac{\lambda}{d_1}$	Wärmedurchlasskoeffizient der äußeren Schicht 1 [W/m <sup>2</sup> K]
$K_2 = \frac{2\lambda}{d_2}$	Wärmedurchlasskoeffizient der halben Schicht 2 [W/m <sup>2</sup> K]

In der effektiven Außentemperatur wird die Sonneneinstrahlung und der Strahlungsaustausch mit dem Himmel berücksichtigt, die Berechnung gestaltet

sich dadurch übersichtlicher. In [HTO02] wird die Wärmebilanz an der Oberfläche getrennt für den Strahlungsanteil und für den konvektiven Anteil durchgeführt. Dies lässt sich zu einer effektiven Außentemperatur zusammenfassen:

$$T_{\text{eff,ext}} = T_{\text{ext}} + \frac{1}{h_{\text{eff,ext}}} \cdot (a_e \cdot (I_{\text{dir}} + I_{\text{diff}}) + (T_{\text{R,sky}} - T_{\text{ext}}) \cdot h_{\text{r,ext}} \cdot F)$$

$T_{\text{eff,ext}}$  effektive Außentemperatur [°C]

$T_{\text{R,sky}}$  Strahlungstemperatur Himmel ( $T_{\text{ext}} - 10$ ) [°C]

$$h_{\text{eff,ext}} = h_{\text{c,ext}} + h_{\text{r,ext}}$$

$h_{\text{eff,ext}}$  effektiver Übergangskoeffizient außen [W/m<sup>2</sup>K]

$h_{\text{c,ext}}$  konvektiver Übergangskoeffizient außen [W/m<sup>2</sup>K]

$$h_{\text{r,ext}} = \varepsilon_{\text{se}} \cdot 5$$

$h_{\text{r,ext}}$  Strahlungskoeffizient außen [W/m<sup>2</sup>K]

$\varepsilon_{\text{se}}$  Emissionsgrad der äußeren Oberfläche [-]

$F$  Sichtfaktor [-]

$I_{\text{dir}}$  direkte Strahlung auf das Fenster [W/m<sup>2</sup>]

$I_{\text{diff}}$  diffuse Strahlung auf das Fenster [W/m<sup>2</sup>]

$a_e$  Absorptionsgrad für Bauteil außen [-]

Die Strahlungstemperatur des Himmels  $T_{\text{R,sky}}$  kann um 10 K kälter angenommen werden als die Außenlufttemperatur  $T_{\text{ext}}$  [DIN08]. Die Näherung für den Strahlungskoeffizienten  $h_{\text{r,ext}}$  ist für übliche Verhältnisse durchaus ausreichend und ergibt sich zu 4,5 W/m<sup>2</sup>K, für unterschiedliche Randbedingungen sind Strahlungskoeffizienten in [FIS08] angegeben. Der Sichtfaktor  $F$  beschreibt wie viel die jeweilige Fläche vom Himmel „sieht“. Für horizontale Flächen ist dieser Wert 1, für vertikale Flächen 0,5. Für den Strahlungsaustausch mit der Umgebung wird angenommen, dass diese dieselbe Temperatur wie die Luft hat. Für den konvektiven Übergangskoeffizienten  $h_{\text{c,ext}}$  werden 20 W/m<sup>2</sup>K angesetzt.

Die Berechnung in Simulink sieht folgendermaßen aus:

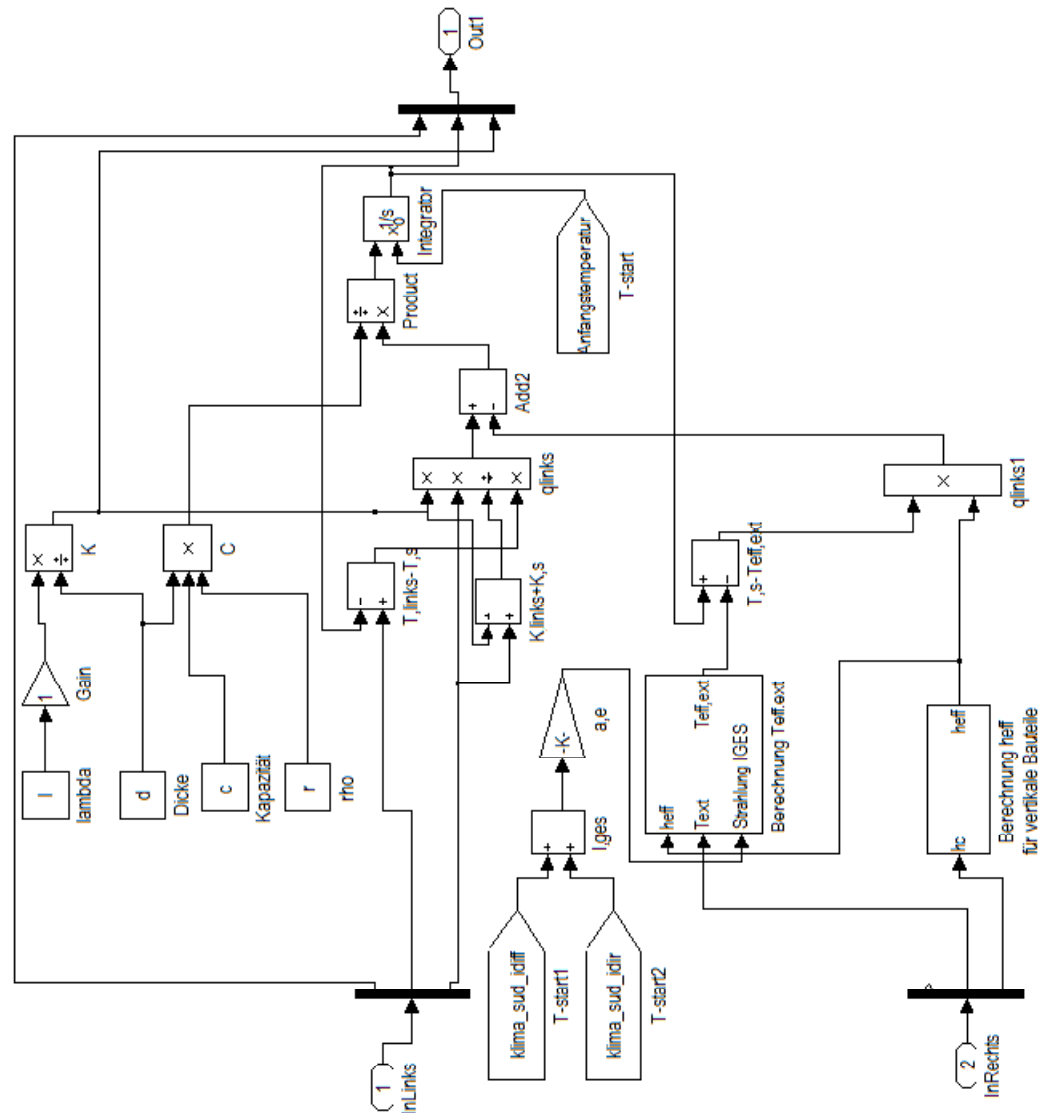


Abb. 13: Berechnung eines Temperaturknotens zum Außenklima in Simulink

### 3.1.2. Fenster

Das Modell zur Berechnung des Wärmedurchgangs durch ein Fenster setzt sich aus zwei Oberflächenknoten und einem Widerstandsknoten zusammen. Die Berechnung des Widerstandsknotens stammt aus der International Building Physics Toolbox (IBPT) welche unter [IBP11] kostenlos bezogen werden kann. Die IBPT ist eine Sammlung von vorgefertigten Simulink Subsystemen aus denen Gebäudemodelle für dynamische Simulationen zusammen gesetzt werden können. Der Widerstandsknoten repräsentiert die Luft zwischen den Scheiben und besitzt keine Wärmekapazität sehr wohl aber einen Wärmedurchlasswiderstand [HTO02]. Dieser wird mit  $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$  auf Basis von [FIS08] angesetzt.

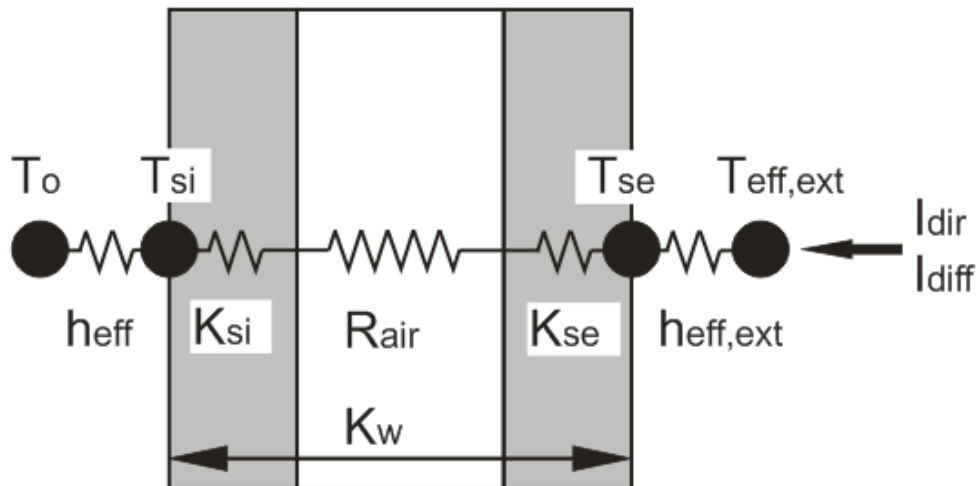


Abb. 14: Diskretisiertes Modell des Fensters

Für den Knoten zur Zone wird wie bei den Wandbauteilen eine Wärmebilanzgleichung aufgestellt, zusätzlich wird noch die Sonneneinstrahlung mit dem vom Einfallswinkel abhängigen Absorptionsgrad berücksichtigt. Bei dem Wärmedurchlasskoeffizienten  $K_w$  ist der Widerstand der Luftschicht mit eingerechnet [DTU02].

$$C \cdot \dot{T}_{si} = h_{eff} \cdot (T_o - T_{si}) - K_w \cdot (T_{si} - T_{se}) + (I_{dir} + I_{diff}) \cdot a_i(\beta)$$

$C$	Wärmekapazität der Schicht bezogen auf die Fläche [J/(m <sup>2</sup> K)]
$h_{eff}$	effektiver Übergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]
$T_o$	operative Lufttemperatur in der Zone [°C]
$T_{si}$	innere Oberflächentemperatur [°C]
$\dot{T}_{si}$	zeitliche Änderung der inneren Oberflächentemperatur [K/sec]
$K_w$	Wärmedurchlasskoeffizient von der äußeren zur inneren Schicht [W/m <sup>2</sup> K]
$T_{se}$	äußere Oberflächentemperatur [°C]
$I_{dir}$	direkte Strahlung auf das Fenster [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{diff}$	diffuse Strahlung auf das Fenster [W/m <sup>2</sup> ]
$a_i(\beta)$	Absorptionsgrad abhängig vom Einfallswinkel [-]

Die Berechnung des Knotens zum Außenklima läuft analog, nur dass hier die Sonneneinstrahlung, der Strahlungsaustausch mit dem Himmel und der vom Einfallswinkel abhängige Absorptionsgrad in der effektiven Außentemperatur berücksichtigt sind:

$$C \cdot \dot{T}_{se} = h_{\text{eff,ext}} \cdot (T_{\text{eff,ext}} - T_{se}) - K_w \cdot (T_{se} - T_{si})$$

$$h_{\text{eff,ext}} = h_{c,\text{ext}} + h_{r,\text{ext}}$$

$h_{\text{eff,ext}}$  effektiver Übergangskoeffizient außen [W/m<sup>2</sup>K]

$h_{c,\text{ext}}$  konvektiver Übergangskoeffizient außen [W/m<sup>2</sup>K]

$$h_{r,\text{ext}} = \varepsilon_{se} \cdot 5$$

$h_{r,\text{ext}}$  Strahlungskoeffizient außen [W/m<sup>2</sup>K]

$\varepsilon_{se}$  Emissionsgrad der äußeren Oberfläche [-]

$\dot{T}_{se}$  zeitliche Änderung der äußeren Oberflächentemperatur [K/sec]

$T_{\text{eff,ext}}$  effektive Außentemperatur [°C]

$K_w$  Wärmedurchlasskoeffizient von der äußeren zur inneren Schicht [W/m<sup>2</sup>K]

Die effektiven Außentemperatur für das Fenster ergibt sich zu:

$$T_{\text{eff,ext}} = T_{\text{ext}} + \frac{1}{h_{\text{eff,ext}}} \cdot (a_e(\beta) \cdot (I_{\text{dir}} + I_{\text{diff}}) + (T_R - T_{\text{ext}}) \cdot h_{r,\text{ext}} \cdot F)$$

$T_{R,\text{sky}}$  Strahlungstemperatur Himmel ( $T_{\text{ext}} - 10$ ) [°C]

$a_e(\beta)$  Absorptionsgrad abhängig vom Einfallswinkel [-]

Im mittleren Widerstandsknoten werden lediglich Wärmedurchlasskoeffizienten und Temperaturen an die benachbarte Schicht übergeben. Zuerst wird der Leitwert der äußeren Materialschicht mit dem Widerstand der Luft zusammen gefasst ( $K_{se+air}$ ) und an die innere Schicht weiter gegeben. Somit kann der Leitwert  $K_w$  gebildet werden. Die Berechnung von innen nach außen erfolgt analog [HTO02].

$$K_{se+air} = \frac{1}{\frac{1}{K_{se}} + R_{air}}$$

$$K_w = \frac{K_{se+air} \cdot K_{si}}{K_{se+air} + K_{si}}$$

$$K_{si+air} = \frac{1}{\frac{1}{K_{si}} + R_{air}}$$

$$K_w = \frac{K_{si+air} \cdot K_{se}}{K_{si+air} + K_{se}}$$

$K_w$	Wärmedurchlasskoeffizient zwischen dem äußeren und dem inneren Oberflächenknoten [W/m <sup>2</sup> K]
$K_{se}$	Wärmedurchlasskoeffizient der äußeren Schicht [W/m <sup>2</sup> K]
$K_{si}$	Wärmedurchlasskoeffizient der inneren Schicht [W/m <sup>2</sup> K]
$R_{air}$	Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht zwischen den Scheiben [m <sup>2</sup> K/W]
$K_{se+air}$	Wärmedurchlasskoeffizient der äußeren Scheibe zusammengefasst mit dem Durchlasswiderstand der Luft zwischen den Scheiben [W/m <sup>2</sup> K]
$K_{si+air}$	Wärmedurchlasskoeffizient der inneren Scheibe zusammengefasst mit dem Durchlasswiderstand der Luft zwischen den Scheiben [W/m <sup>2</sup> K]

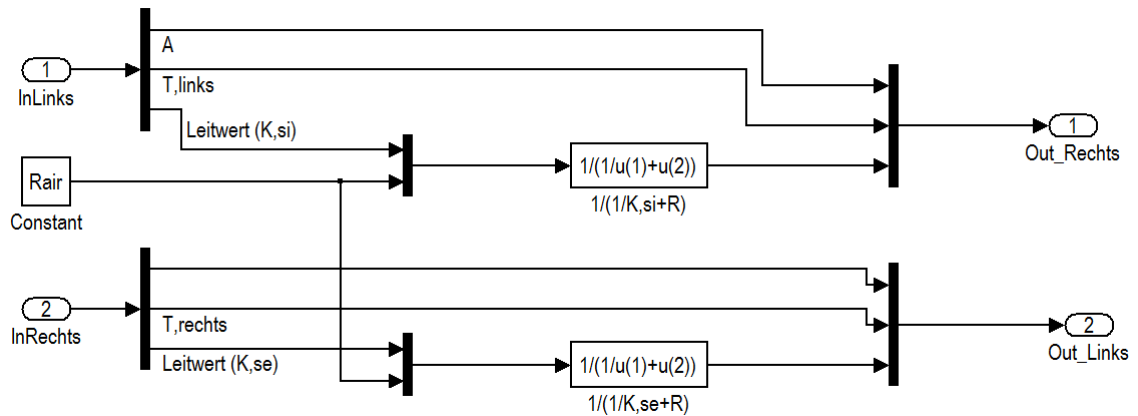


Abb. 15: Widerstandsknoten in Simulink

Strahlungstransmissions- und Absorptionsgrade werden normalerweise nur für senkrechten Strahlungseinfall angegeben. Bei schrägem Strahlungseinfall wird der Transmissionsgrad kleiner, der Absorptionsgrad größer [DUF91]. In [ONO97] wird beschrieben wie der Strahlungsdurchgang auf Grund des Einfallswinkels abgemindert werden kann. In [DUF91] befinden sich detaillierte Berechnungsverfahren zur Bestimmung der winkelabhängigen Werte von Glas. Für die vorliegende Arbeit wurden die winkelabhängigen Transmissions- und Absorptionsgrade aus der TRNSSYS Datenbank entnommen. Diese Datenbank wurde mit Hilfe des Programms WINDOWS 4.1 erstellt [WIN11]. Die Werte entsprechen dem Verhalten, wie sie in [DUF91] gerechnet werden.

Das verwendete Fenster besitzt eine Zweischeibenverglasung mit Glasstärken von 4 mm und einem Luftzwischenraum von 15 mm. Das Fenster wird in der TRNSSYS Datenbank wie folgt spezifiziert:

Name:	TRNSSYS15 WINDOW LIB
Desc.:	Saint Gobain CLIMAPLUS FUTUR AR 1.4 4/15/4
Rahmen:	11 TRNSSYS WIN – 1



Tab. 1: Winkelabhängige Transmissions- und Absorptionsgrade für das verwendete Fenster

Winkelabhängige Transmissions- und Absorptionsgrade für das verwendete Fenster			
Einfallswinkel der direkten solaren Strahlung $\beta$	Transmissionsgrad $\tau(\beta)$	Absorptionsgrad Scheibe außen $a_e(\beta)$	Absorptionsgrad Scheibe innen $a_i(\beta)$
[°]	[-]	[-]	[-]
0	0,521	0,102	0,022
10	0,524	0,104	0,022
20	0,517	0,112	0,023
30	0,508	0,117	0,023
40	0,495	0,119	0,025
50	0,472	0,123	0,026
60	0,418	0,135	0,027
70	0,312	0,142	0,029
80	0,153	0,105	0,031
90	0,000	0,000	0,000
Werte für den diffusen Strahlungsanteil	0,439	0,121	0,025

### 3.1.3. Bodenplatte

Bei erdberührten Bauteilen gestaltet sich die Berechnung der Wärmeverluste aufgrund der thermischen Eigenschaften des Bodens etwas aufwendiger als bei Bauteilen die an die Außenluft grenzen. Wie der Boden in dynamischen Simulationen berücksichtigt werden kann, wird in [ONO08] beschrieben. Ziel der dort beschriebenen Methode ist es auf Grund der

thermischen Eigenschaften des Bodens, der Bodenplatte und des Außenklimas eine virtuelle Temperatur zu berechnen. Diese wird als Randbedingung einer virtuellen Schicht angesetzt, welche den Aufbau der Bodenplatte und 0,5 m Erdreich repräsentiert. Die folgenden Berechnungsschritte und Formeln sind direkt aus [ONO08] übernommen und wurden komplett in die Simulation integriert.

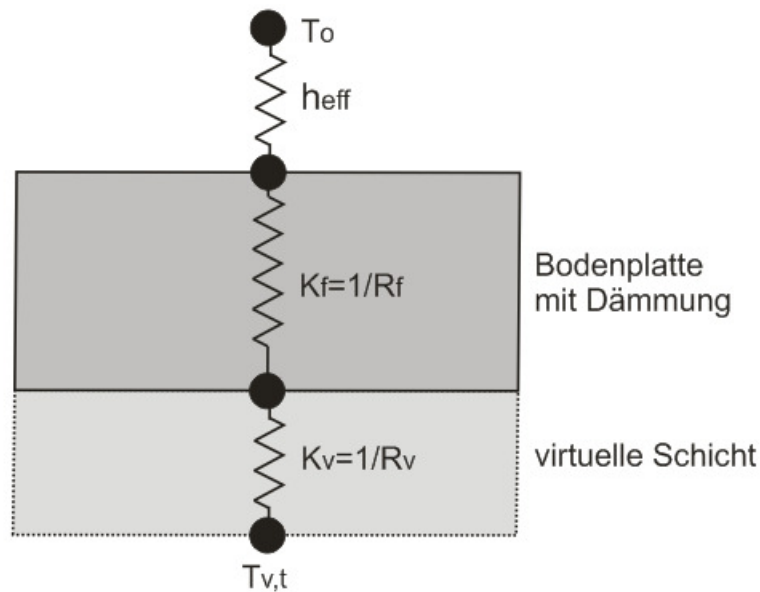


Abb. 16: Modell für die Bodenplatte

Zwei wichtige Parameter für die Berechnung des Wärmestroms müssen noch vorher erwähnt werden. Das charakteristische Bodenplattenmaß  $B'$  berücksichtigt das räumliche Verhalten des Wärmestroms im Erdreich.

$$B' = \frac{A_b}{0,5 \cdot P}$$

$B'$  Charakteristisches Bodenplattenmaß [m]

$A_b$  Fläche der Bodenplatte [m<sup>2</sup>]

$P$  Umfang der Bodenplatte [m]

Die wirksame Dicke  $d_t$  fasst die wärmetechnischen Eigenschaften von Erdreich und Bodenplatte zusammen und erleichtert so die Berechnung.

$$d_t = w + \lambda_{erde} \cdot (R_{si} + R_f + R_{se})$$

$d_t$  wirksame Dicke [m]

$w$	Dicke der Außenwände [m]
$\lambda_{\text{erde}}$	Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreichs [W/mK]
$R_{\text{si}}$	innerer Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
$R_{\text{se}}$	äußerer Wärmeübergangswiderstand [m <sup>2</sup> K/W]
$R_f$	Wärmedurchlasswiderstand der Bodenplattenkonstruktion [m <sup>2</sup> K/W]

Der Wärmestrom durch die Bodenplatte setzt sich aus einem stationären und einem instationären Anteil zusammen. Für den stationären U-Wert gibt es zwei mögliche Werte, je nachdem wie gut die Bodenplatte gedämmt ist. Bei ungedämmten oder leicht gedämmten Bodenplatten und wenn  $d_t < B'$  gilt, ist folgende Formeln anzuwenden:

$$U_{\text{stationär}} = \frac{2 \lambda_{\text{erde}}}{\pi B' + d_t} \cdot \ln \left( \frac{\pi B'}{d_t} + 1 \right)$$

Bei gut gedämmten Bodenplatten und wenn  $d_t \geq B'$  gilt, ist folgende Formel anzuwenden:

$$U_{\text{stationär}} = \frac{\lambda_{\text{erde}}}{0,457 \cdot B' + d_t}$$

Der Leitwert für den stationären Teil des Wärmestroms durch die Bodenplatte lässt sich wie folgt angeben:

$$H_g = U_{\text{stationär}} \cdot A_b$$

$H_g$  stationärer Leitwert [W/K]

Der instationäre Leitwert berücksichtigt die Trägheit des Bodens und die Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreichs.

$$H_{\text{pe}} = 0,37 \cdot \lambda_{\text{erde}} \cdot P \cdot \ln \left( \frac{\delta}{d_t} + 1 \right)$$

$H_{\text{pe}}$  instationärer Leitwert für Jahresschwingung außen [W/K]

$\delta$  periodische Eindringtiefe [m]

Die periodische Eindringtiefe der Temperaturschwankungen in den Boden lautet:

$$\delta = \sqrt{\frac{t \cdot \lambda_{\text{erde}}}{\pi \cdot \rho_{\text{erde}} \cdot c_{\text{erde}}}}$$

$\lambda_{\text{erde}}$  Wärmeleitfähigkeit des ungefrorenen Erdreichs [W/mK]

$t$  Zeitraum [s]

$\rho_{\text{erde}}$  Trockendichte des Erdreichs [kg/m<sup>3</sup>]

$c_{\text{erde}}$  spezifische Wärmekapazität des Erdreichs [J/kgK]

Der Wärmestrom durch die Bodenplatte kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\Phi_m = H_g \cdot (\bar{\vartheta}_i - \bar{\vartheta}_e) + H_{pe} \cdot \hat{\vartheta}_e \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{m - \tau - \beta}{12}\right)$$

$\Phi_m$  Wärmestrom durch die Bodenplatte im Monat  $m$  [W]

$H_g$  Leitwert für den stationären Anteil [W/K]

$\bar{\vartheta}_i$  Jahresmittelwert Innentemperatur [°C]

$\bar{\vartheta}_e$  Jahresmittelwert Außentemperatur [°C]

$H_{pe}$  instationärer Leitwert für die Jahresschwingung außen [W/K]

$\hat{\vartheta}_e$  Amplitude der Jahresschwingung außen [°C]

$m$  Nummer des Monats (1=Jänner) [-]

$\tau$  Monat mit minimaler Außentemperatur [-]

$\beta$  Phasenverschiebung [-]

Die Phasenverschiebung  $\beta$  zwischen der Außenlufttemperatur und dem Wärmestrom lautet:

$$\beta = 1,5 - 0,43 \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_t + 1}\right)$$

Für das Modell wird das Erdreich durch einen virtuellen Wärmeübergangswiderstand ersetzt.

$$R_v = \frac{1}{U_{\text{stationär}}} - R_{si} - R_f - R_g$$

$R_v$	virtueller Wärmedurchlasswiderstand [ $m^2K/W$ ]
$R_{si}$	innerer Wärmedurchlasswiderstand [ $m^2K/W$ ]
$R_g$	Wärmedurchlasswiderstand von 0,5 m des Grundes [ $m^2K/W$ ]
$R_f$	Wärmedurchlasswiderstand der Bodenplattenkonstruktion [ $m^2K/W$ ]
$U_{stationär}$	der stationäre Wärmedurchgangskoeffizient der Bodenplatte einschließlich der Auswirkung des Grundes [ $W/m^2K$ ]

Die virtuelle Temperatur unterhalb der virtuellen Schicht kann wie folgt berechnet werden:

$$T_{v,t} = T_{i,t} - \frac{\Phi_m}{A_b \cdot U_{stationär}}$$

$\Phi_m$	Wärmestrom über die Bodenplatte [W]
$T_{i,t}$	Innenraumtemperatur [ $^{\circ}C$ ]
$T_{v,t}$	Temperatur unterhalb der virtuellen Schicht [ $^{\circ}C$ ]
$A_b$	Fläche der Bodenplatte [ $m^2$ ]
$U_{stationär}$	der stationäre Wärmedurchgangskoeffizient der Bodenplatte einschließlich der Auswirkung des Grundes [ $W/m^2K$ ]

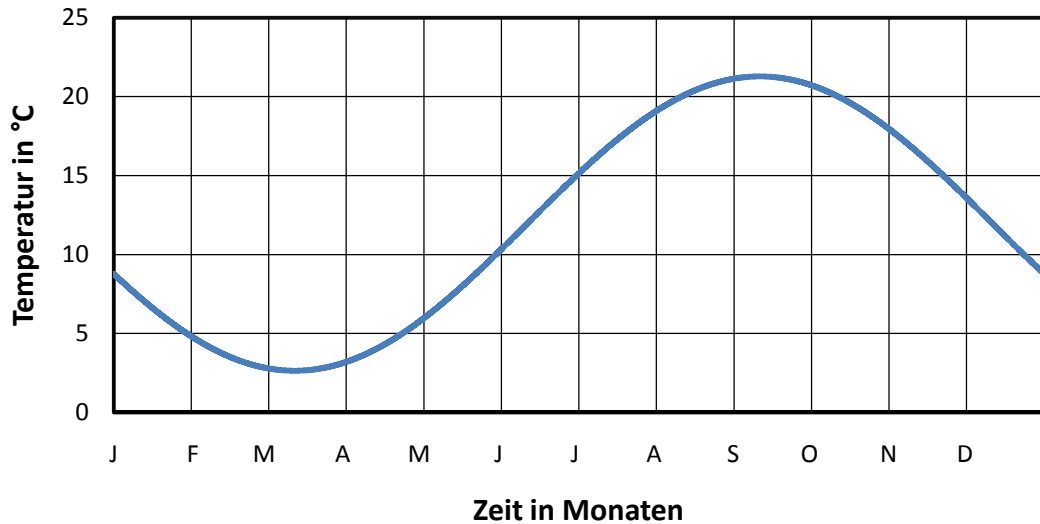


Abb. 17: Temperatur unter der Bodenplatte

Die Innenraumtemperatur ergibt sich entweder aus der Simulation oder kann wie folgt berechnet werden. Diese Formel stellt eine gute Näherung dar.

$$T_{i,t} = \bar{T}_i - \hat{T}_i \cdot \cos\left(2\pi \frac{m - \tau}{12}\right)$$

$\bar{T}_i$  Jahresmittelwert der Innenraumtemperatur [°C]

$\hat{T}_i$  Amplitude der Innenraumtemperatur [°C]

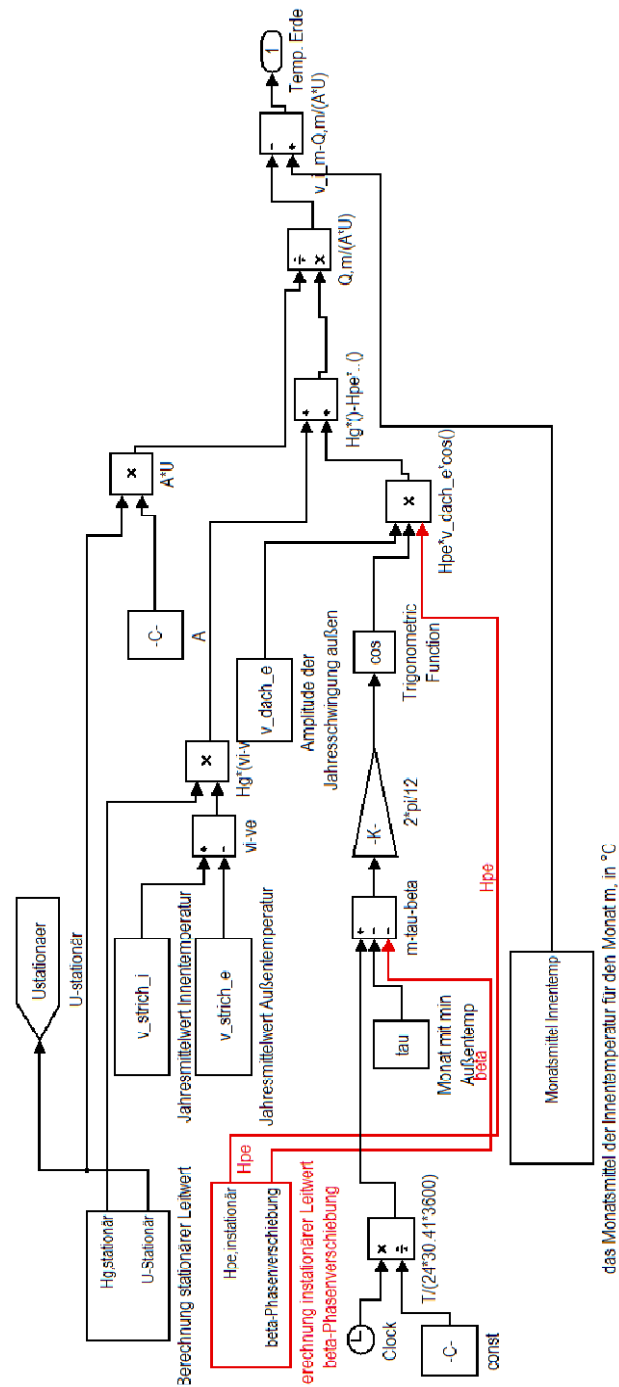


Abb. 18: Berechnung der virtuellen Temperatur in Simulink

### 3.2. Systeme

Damit sich ein Mensch behaglich in seinem Wohnraum fühlt, sind unter anderem folgende Faktoren ausschlaggebend [DIN06]:







### 3.2.3. Lüftungsanlage und Fensterlüftung

Ein wichtiges Kriterium für die Behaglichkeit in Wohnräumen ist die Luftqualität, je nach Personenanzahl und Benutzung des Raums muss die Luft ausgetauscht werden. In dem Modell kann dies auf zwei Arten geschehen: über eine Lüftungsanlage und über die herkömmliche Fensterlüftung. Bei Anwesenheit werden 30 m<sup>3</sup>/h.Person durch die Anlage ausgetauscht [DIN07b], bei Abwesenheit wird die Menge reduziert. Zusätzlich kann zu verschiedenen Zeitpunkten über das Fenster stoßgelüftet werden. Um das Risiko für sommerliche Überwärmung zu reduzieren, kann in den Sommermonaten das Fenster über Nacht offen gelassen werden. Die Berechnung des Luftvolumenstroms für vollkommen geöffnete Fenster erfolgt auf Basis von [ISO04]. Der Wert 0,7 ist ein Sicherheitsfaktor, welcher den Volumenstrom um 30 % abmindert.

$$\dot{V}_{Fe} = 0,7 \cdot C_{ref} \cdot A \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\Delta T_{ext,intern}}$$

$\dot{V}_{Fe}$	Luftvolumenstrom über die das geöffnet Fenster [m <sup>3</sup> /h]
$C_{ref}$	Austauschkoeffizient; $C_{ref} = 100$ [m <sup>0,5</sup> /h K <sup>0,5</sup> ]
A	Fläche der Lüftungsöffnung [m <sup>2</sup> ]
H	Höhe der Lüftungsöffnung [m]
$\Delta T_{ext,intern}$	Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenlufttemperatur [K]

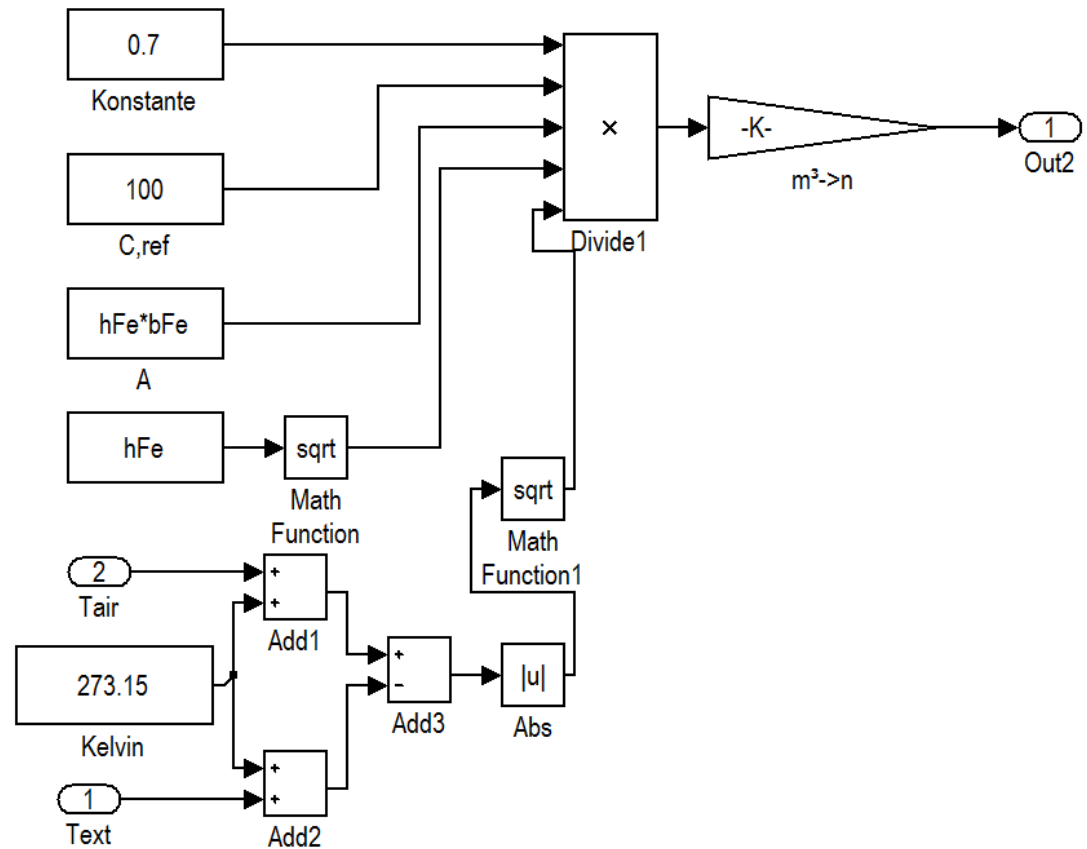


Abb. 20: Berechnung des Luftvolumenstroms bei geöffnetem Fenster in Simulink

### 3.2.4. Verschattung

Die Verschattung der Fenster dient im Sommer zur Reduzierung des Risikos der sommerlichen Überwärmung. Die Reduktion der solaren Gewinne hängt von den Absorptions- und Reflexionseigenschaften der Sonnenschutzeinrichtung ab. In der Simulation wird über einen „Switch“<sup>3</sup> überprüft, ob die Summe von diffuser und direkter Sonneneinstrahlung einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Trifft dies zu wird der Abminderungsfaktor  $z$  auf einen Wert kleiner 1 gesetzt, je nach Sonnenschutzvorrichtung. Dieser Entscheidungsprozess findet nur einmal in der Stunde statt. Die folgende Formel wird in der Zonenbilanz berücksichtigt und enthält den Abminderungsfaktor  $z$ .

<sup>3</sup> Ein „Switch“ überprüft in Simulink mittels eines Grenzwerts den Input 2 ob Input 1 oder Input 3 weiter gegeben werden soll.

$$\dot{Q}_R = \sum_{i=1}^n (I_{\text{dir}} + I_{\text{diff}}) \cdot A_i \cdot \tau(\beta) \cdot z$$

$\dot{Q}_R$	Wärmestrom durch solaren Energieeintrag [W]
$I_{\text{dir}}$	direkte Strahlung auf das Fenster [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{\text{diff}}$	diffuse Strahlung auf das Fenster [W/m <sup>2</sup> ]
$A_i$	Fläche des Fensters mit Index i [m <sup>2</sup> ]
$\tau(\beta)$	Transmissionsgrad abhängig vom Einfallswinkel [-]
$z$	Abminderungsfaktor je nach Sonnenschutzvorrichtung [-]

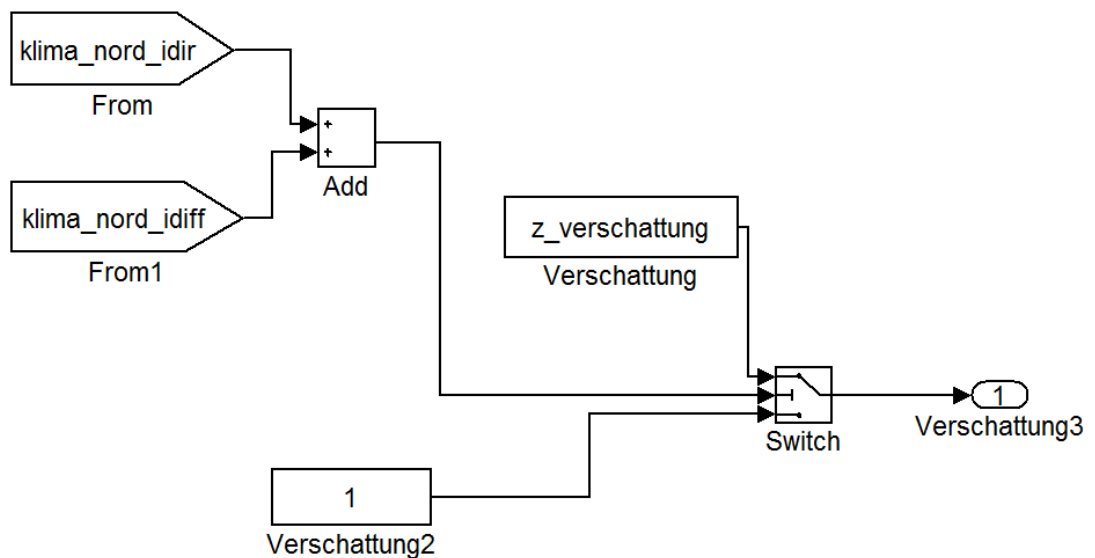


Abb. 21: Aktivierung des Sonnenschutzes in Simulink

### 3.2.5. Infiltration

Der Vorgang der Infiltration beschreibt in der Bauphysik das Eindringen von Luft in den Wohnraum durch undichte Stellen aufgrund von Wind und thermischen Auftrieb [DIN07a]. Es entsteht ein Druckunterschied zwischen innen und außen. Die Infiltration kann durch den Massenerhaltungssatz beschrieben werden, welcher besagt, dass die eindringende Luftmasse gleich der austretenden Luftmasse sein muss [CLA01]. Für weitere Berechnungen ist es praktischer den Massenstrom in einen Volumenstrom umzurechnen. Ziel der nachstehenden Formeln ist es den Innendruck  $p_i$  direkt bestimmen zu können.

Aufgrund einiger Annahmen und Vereinfachungen ist dies ohne aufwändigen Iterationsprozess möglich.

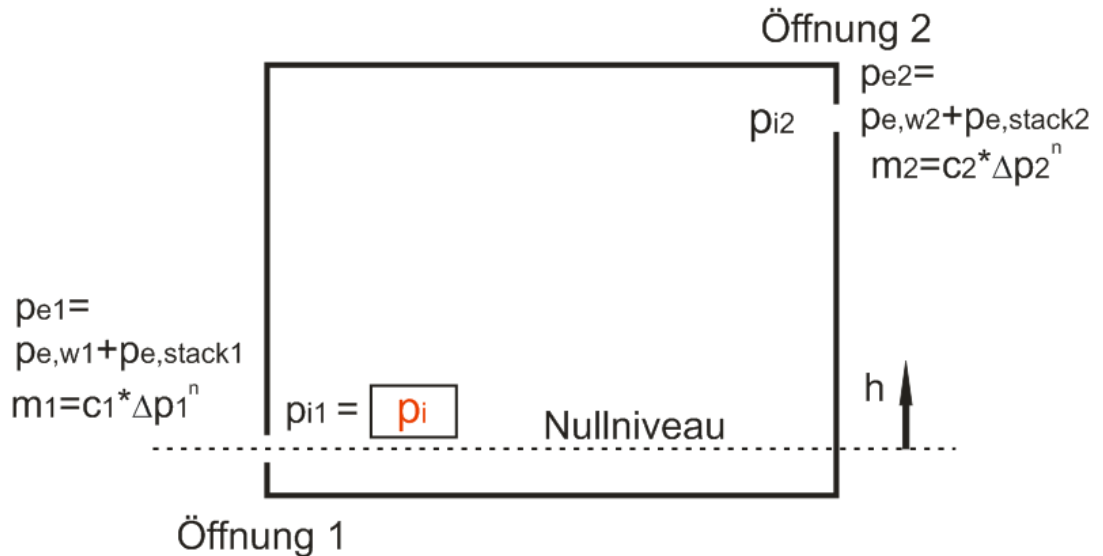


Abb. 22: Infiltrationsmodell

Der Volumenstrom durch Infiltration lässt sich mit folgender Formel angeben wobei der Strömungsbeiwert  $c_i$  die Größe und Form der Öffnung und der Strömungsexponent  $n$  die Strömungsart (laminar oder turbulent) berücksichtigt [WIT09], [CLA01].

$$\dot{m} = \sum_{i=1}^k c_i \cdot \Delta p^n$$

$\dot{m}$	Volumenstrom durch Infiltration [m <sup>3</sup> /h]
$c_i$	Strömungsbeiwert bei 1 Pa für Öffnung mit Index $i$ [m <sup>3</sup> /(hPa <sup><math>n</math></sup> )]
$n$	Strömungsexponent [-]
$\Delta p$	Druckdifferenz [Pa]

Für zwei Öffnungen in einer Zone ergibt sich:

$$\dot{m} = c_1 \cdot \Delta p_1^n - c_2 \cdot \Delta p_2^n = c_1 \cdot (p_{e1} - p_{i1})^n - c_2 \cdot (p_{i2} - p_{e2})^n$$

$p_{ij}$  Druck an der Innenseite mit Index  $j$  [Pa]

$p_{ej}$  Druck an der Außenseite mit Index  $j$  [Pa]

Umformen ergibt:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{(p_{i2} - p_{e2})^n}{(p_{e1} - p_{i1})^n}$$

Der Druck an der Außenseite in der Höhe  $h$  über Nullniveau setzt sich aus dem Winddruck  $p_{e,w}$  und dem Druck  $p_{e,stack}$  aus dem thermischen Auftrieb zusammen [DIN07a]. Der Einfluss der Windrichtung wird nicht berücksichtigt, es wird vereinfacht angenommen, dass der Wind aus jeder Richtung den gleichen Druck erzeugt.

$$p_{e,w} = \frac{C_p v_{site}^2 \rho_a}{2}$$

$$p_{e,stack} = \rho_a g h$$

$\rho_a$  Dichte der Luft in Abhängigkeit der Lufttemperatur [kg/m<sup>3</sup>]

$C_p$  Winddruckbeiwert [-]

$v_{site}$  Windgeschwindigkeit am Gebäude [m/s]

$h$  Höhe über Nullniveau [m]

$g$  Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

$$p_e = \rho_a g h + \frac{C_p v_{site}^2 \rho_a}{2}$$

Die Dichte der Luft kann in Abhängigkeit der Lufttemperatur berechnet werden, wenn sie als ideales Gas betrachtet wird [RIE94]:

$$\rho_a = \frac{p_0}{R \cdot T}$$

$R$  spezifische Gaskonstante [J/kgK]

$T$  Lufttemperatur [K]

$p_0$  atmosphärischer Luftdruck [Pa]

Der Luftdruck an der zweiten Öffnung kann ausgedrückt werden als

$$p_{e2} = p_{e1} - \rho_a g h = p_{e1} - \frac{p_0 g h}{R \cdot T_{ext}}$$

$T_{\text{ext}}$  Außenlufttemperatur [K]

Wird für  $p_{i1}$  der gesuchte Druck  $p_i$  angesetzt so führt dies auf:

$$p_{i1} = p_i$$

$$p_{i2} = p_i - \rho_a g h = p_i - \frac{p_0 g h}{R \cdot T_{\text{air}}}$$

$T_{\text{air}}$  Innenlufttemperatur [K]

Werden all diese Beziehungen in den Volumenstrom für zwei Öffnungen eingesetzt, ergibt sich eine Formel aus der der Innendruck  $p_i$  direkt berechnet kann:

$$\frac{c_1}{c_2} = \left[ \frac{\left( p_i - \frac{p_0 g h}{R \cdot T_{\text{air}}} \right) - \left( p_{e1} - \frac{p_0 g h}{R \cdot T_{\text{ext}}} \right)}{p_{e1} - p_i} \right]^n$$

Umformen ergibt:

$$\left( \frac{c_1}{c_2} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{\frac{p_0 g h}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{ext}}} - \frac{1}{T_{\text{air}}} \right)}{p_{e1} - p_i} - 1$$

Um die Berechnung noch zu vereinfachen wird für beide Öffnungen derselben Strömungsbeiwert angesetzt:

$$c_1 = c_2$$

Damit ergibt sich:

$$p_{e1} - p_i = \frac{\frac{p_0 g h}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{ext}}} - \frac{1}{T_{\text{air}}} \right)}{2}$$

Die erste Öffnung wird auf Höhe des Nullniveaus gelegt. Wird  $p_{e1}$  gleich Null gesetzt lautet die Gleichung für den Innendruck wie folgt:

$$p_i = - \frac{\frac{p_0 g h}{R} \left( \frac{1}{T_{\text{ext}}} - \frac{1}{T_{\text{air}}} \right)}{2}$$

Der Strömungsbeiwert  $c$  wird für den Anfang so gewählt, dass sich bei einem Temperaturunterschied von 20 K und einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s eine Infiltrationsluftwechselzahl von 0,1 1/h einstellt. Diese Randbedingungen ergeben in etwa einen Druckunterschied von 20 Pa.

Normalerweise ergibt sich der Strömungsbeiwert aus der Art und Form der Öffnung, z.B. Länge der Fuge. Die Luftwechselzahl aus Infiltration wird als Wärmeverlust durch Luftaustausch in der Zonenbilanz berücksichtigt. (Kapitel 3.4).

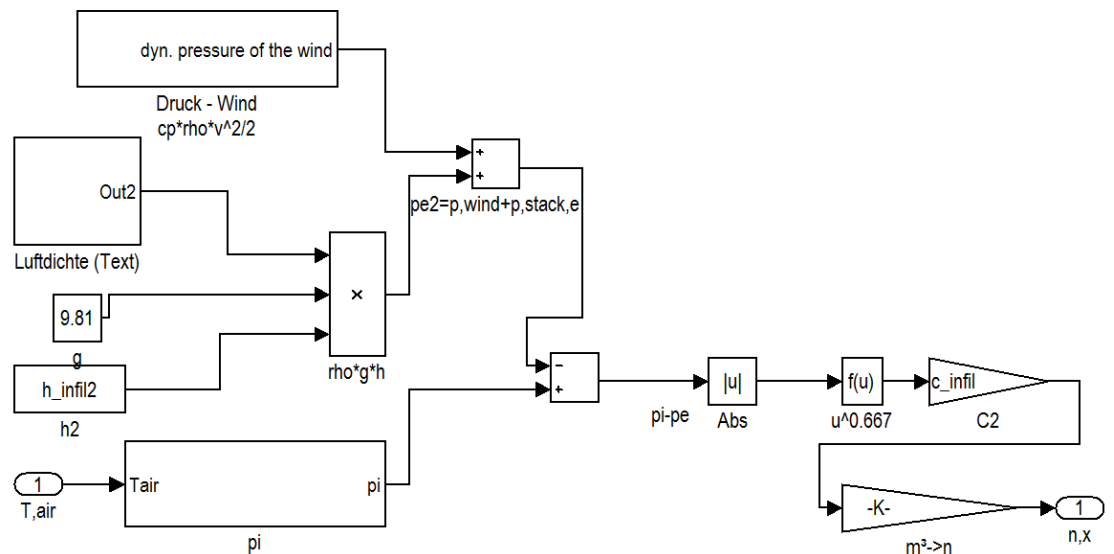


Abb. 23: Berechnung der Infiltration in Simulink

### 3.3. innere Lasten

Personen und Geräte haben einen großen Einfluss auf das Innenraumklima, Personen geben aufgrund ihrer Aktivität Wärme ab, Geräte und Beleuchtung wandeln einen Großteil der ihnen zugeführten elektrischen Energie in Wärme um. Dieser zusätzliche Wärmeeintrag muss in der Berechnung unbedingt berücksichtigt werden. Für Personen werden bei Anwesenheit 80 Watt Wärmeabgabe angesetzt, für Geräte gilt Tab. 2. 50 % der inneren Lasten erwärmen direkt die Luft, die restlichen 50 % werden als Wärmestrahlung berücksichtigt. Die Berechnungen in diesem Abschnitt wurden aus [PHP07] entnommen. Laut [PHP07] ist der Normverbrauch ein vom Hersteller des Geräts angegebener Wert. Die Werte für „interne Wärmequelle“ in Tab. 2 berechnen sich wie folgt:



$$Q_{\text{Gerät,Tätigkeit}} = P_{\text{Norm}} \cdot \eta$$

$Q_{\text{Gerät,Tätigkeit}}$  interne Wärmequelle aus Geräten und Tätigkeiten  
[kWh/Anwendung]

$P_{\text{Norm}}$  Normverbrauch [kWh/Anwendung]

$\eta$  Anteil an Wärme [-]

Tab. 2: innere Lasten aufgrund von Geräten und Tätigkeiten

innere Lasten aufgrund von Geräten			
Gerät/Tätigkeit	Normverbrauch	Anteil an Wärme	interne Wärmequelle
	[kWh/Anwendung]	-	[kWh/Anwendung]
Geschirrspüler	1,1	0,3	0,33
Waschmaschine	1,0	0,3	0,3
Kochen	0,3	0,5	0,15
Computer	0,2	1,0	0,2
Laptop	0,1	1,0	0,1

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass nicht immer 100 % der zugeführten elektrischen Energie auch als Wärmequelle berücksichtigt werden darf. Der Geschirrspüler verliert 70 % der Wärme durch das Abwasser. Für jede Anwendung eines Geräts werden die obengenannten Werte in der Simulation berücksichtigt. Kleingeräte und Beleuchtung finden als Durchschnittswert ihren Weg in die Berechnung. Die Formel für die Berechnung der Kleingeräte und Beleuchtung lauten wie folgt:

$$Q_{\text{Bel.u.Elekt.}} = (P_{\text{Norm}} \cdot n_{\text{Personen}} \cdot t \cdot \eta) / 8,76$$

$Q_{\text{Bel.u.Elekt.}}$  innere Last aus Beleuchtung und Elektronik [W]

$P_{\text{Norm}}$  Normverbrauch [W]

$n_{\text{Personen}}$  Anzahl der Personen im Haushalt [W]

$t$  Häufigkeit [kh/P.a]

$\eta$  Anteil an Wärme [-]

Damit können folgende Werte für die inneren Lasten aus Beleuchtung, Kleingeräten und Elektronik angesetzt werden:

Tab. 3: innere Lasten aufgrund von Beleuchtung, Kleingeräten und Elektronik

innere Lasten aufgrund von Beleuchtung, Kleingeräten und Elektronik bei 2 Personen im Haushalt				
Gerät	Normverbrauch	Häufigkeit	Anteil an Wärme	interne Wärmequelle
	[W]	[kh/P.a]	[-]	[W]
Beleuchtung	20,8	2,9	1	13,8
Elektronik	80	0,55	1	10,0
Kleingeräte	50	1	1	11,4

### 3.4. Zone

Das Zonenmodul repräsentiert einen Luftknoten für welchen die Lufttemperatur  $T_{air}$  aufgrund aller Inputs aus den Systemen (mit Steuerung durch die BewohnerInnen), den Klimadaten, den Konstruktionen, den inneren Lasten und der zweiten Zone berechnet wird. Bei einem Ein-Knoten-Modell wird angenommen, dass die Lufttemperatur im Raum überall gleich, also optimal durchmischt ist.

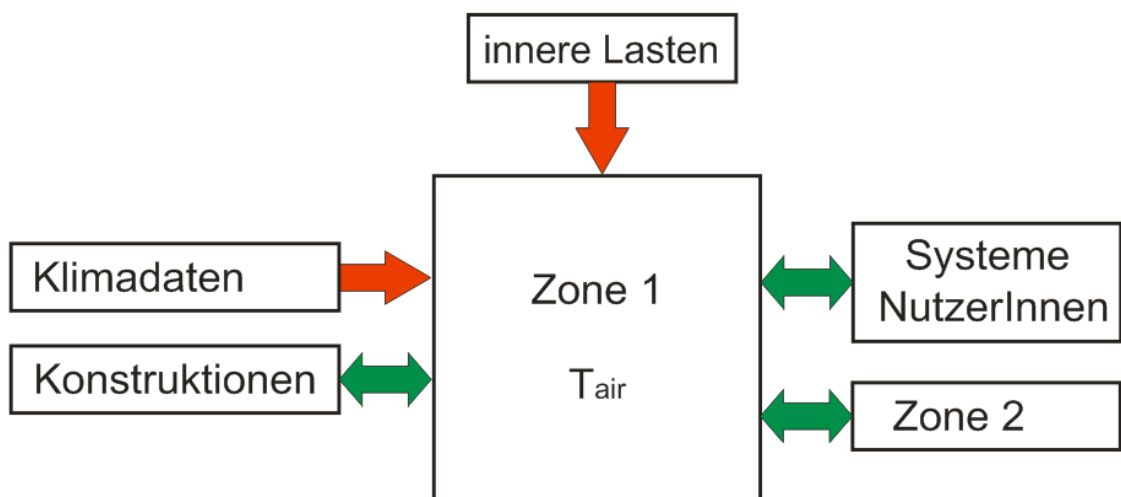


Abb. 24: Überblick Zonenmodul

Zunächst wird aus den konvektiven Anteilen der Wärmeströme die Lufttemperatur  $T_{\text{air}}$  berechnet, dabei wird folgende Energiebilanzgleichung angewendet [CLA01]:

$$C \cdot \dot{T}_{\text{air}} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_V + \dot{Q}_{\text{sol},c} + \dot{Q}_{Gc}$$

$$C = c_{p,a} \cdot \rho_a \cdot V + C_m$$

$C$	Speicherkapazität des Raumes [J/K]
$c_{p,a}$	spezifische Wärmekapazität der Luft [J/(kgK)]
$\rho_a$	Dichte der Luft [kg/m <sup>3</sup> ]
$V$	Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]
$C_m$	zusätzliche speicherwirksame Masse (Möbel, usw.) [J/K]
$\dot{T}_{\text{air}}$	zeitliche Änderung der Lufttemperatur in der Zone [K/sec]

Der rechte Teil der Formel, also alle Wärmeströme, setzt sich aus folgenden Gleichungen zusammen [CLA01]. Der Wärmestrom aus einer Konstruktion  $\dot{Q}_C$  errechnet sich aus dem Wärmeübergang von der Bauteiloberfläche zur Raumluft mit dem Übergangskoeffizienten  $h_c$ :

$$\dot{Q}_C = \sum_{i=1}^n (T_{s,i} - T_{\text{air}}) \cdot A_i \cdot h_c$$

$\dot{Q}_C$	Wärmestrom aus einer Konstruktion [W]
$T_{s,i}$	Oberflächentemperatur des Bauteils mit Index $i$ [°C]
$T_{\text{air}}$	Lufttemperatur in der Zone [°C]
$A_i$	Fläche des Bauteils mit Index $i$ [m <sup>2</sup> ]
$h_c$	konvektiver Übergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]

Der Wärmeverlust aus Konvektion  $\dot{Q}_V$  wird durch folgende Vorgänge ausgelöst:

- Luft welche von außen in die Zone durch Infiltration und Lüften eindringt

- Luft welchen zwischen den Zonen aufgrund von Temperaturunterschieden ausgetauscht wird

Für den ersten Teil ergibt sich folgende Gleichung [HAM03]:

$$\dot{Q}_V = \sum_{i=1}^n \dot{V}_i \cdot C_{\text{air}} \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{air}}) \cdot \frac{1}{3600}$$

$$C_{\text{air}} = c_{p,a} \cdot \rho_a$$

$C_{\text{air}}$  Speicherkapazität des Raumes bezogen auf das Raumvolumen [J/m<sup>3</sup>K]

$c_{p,a}$  spezifische Wärmekapazität der Luft [J/(kgK)]

$\rho_a$  Dichte der Luft [kg/m<sup>3</sup>]

$\dot{V}_i$  Luftvolumenstrom aus Quelle mit Index  $i$  (Lüftungsanlage, Infiltration, Fensterlüftung) [m<sup>3</sup>/h]

$T_{\text{ext}}$  Außenlufttemperatur [°C]

$T_{\text{air}}$  Lufttemperatur in der Zone [°C]

Wird zusätzlich noch der Luftaustausch zwischen zwei Zonen berücksichtigt, kann die vorherige Formel folgendermaßen erweitert werden. Zone  $j$  ist die aktuelle Zone, Zone  $k$  die Nachbarzone.

$$\dot{Q}_V = \left[ \sum_{i=1}^n \dot{V}_i \cdot C_{\text{air}} \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{air}}) + \dot{V}_{j \rightarrow k} \cdot C_{\text{air}} \cdot (T_{\text{air},k} - T_{\text{air},j}) \right] \cdot \frac{1}{3600}$$

$\dot{V}_{j \rightarrow k}$  Luftvolumenstrom von der Zone  $j$  zur Zone  $k$  [m<sup>3</sup>/h]

$T_{\text{air},k,j}$  Lufttemperatur der Zone  $k$  bzw.  $j$  [°C]

Der sich einstellende Luftvolumenstrom  $\dot{V}_{j \rightarrow k}$  durch eine Öffnung bei unterschiedlichen Lufttemperaturen wird auf Basis von [ISO04] berechnet. Der Wert 0,7 ist ein Sicherheitsfaktor, welcher den Volumenstrom um 30 % abmindert.

$$\dot{V}_{j \rightarrow k} = 0,7 \cdot C_{\text{ref}} \cdot A \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\Delta T_{j,k}}$$

$\dot{V}_{j \rightarrow k}$  Luftvolumenstrom von der Zone  $j$  zur Zone  $k$  [m<sup>3</sup>/h]

$C_{\text{ref}}$  Austauschkoefizient;  $C_{\text{ref}} = 100$  [m<sup>0.5</sup>/h K<sup>0.5</sup>]

A	Fläche der Lüftungsöffnung [m <sup>2</sup> ]
H	Höhe der Lüftungsöffnung [m]
$\Delta T_{j,k}$	Lufttemperaturdifferenz zwischen Zone j und k [K]

Der konvektive Anteil des solaren Energieeintrags durch transparente Bauteile ergibt sich zu [DTU02]:

$$\dot{Q}_{\text{sol,c}} = \sum_{i=1}^n (I_{\text{dir}} + I_{\text{diff}}) \cdot A_i \cdot \tau(\beta) \cdot f_{\text{sa}}$$

$\dot{Q}_{\text{sol,c}}$	Wärmestrom durch solaren Energieeintrag, konvektiver Anteil [W]
$I_{\text{dir}}$	direkte Strahlung auf das Fenster [W/m <sup>2</sup> ]
$I_{\text{diff}}$	diffuse Strahlung auf das Fenster [W/m <sup>2</sup> ]
$A_i$	Fläche des Fensters mit Index i [m <sup>2</sup> ]
$\tau(\beta)$	Transmissionsgrad abhängig vom Einfallswinkel [-]
$f_{\text{sa}}$	„solar to air“ Faktor [-]

Der „solar to air“ Faktor  $f_{\text{sa}}$  ergibt sich laut [ISO04] für geringe Möblierung zu 0,1. Die restlichen 90 % des solaren Wärmeeintrags  $\dot{Q}_{\text{sol,r}}$  fließen in die operative Temperatur ein (siehe weitere Ausführungen in diesem Kapitel). Der Transmissionsgrad ist abhängig vom Einfallswinkel (Kapitel 3.1.2).

Der Wärmeeintrag von inneren Lasten und der Heizung ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_{\text{Gc}} = f_{\text{Lc}} \cdot \dot{Q}_{\text{Lasten}} + f_{\text{Hc}} \cdot \dot{Q}_{\text{Heizung}} + \dot{Q}_{\text{Klimaanlage}}$$

$\dot{Q}_{\text{Gc}}$	Wärmestrom von Quellen, konvektiver Anteil [W]
$\dot{Q}_{\text{Lasten}}$	Wärmestrom von inneren Lasten (Personen, Geräte, etc.) [W]
$\dot{Q}_{\text{Heizung}}$	Wärmestrom von der Heizung [W]
$\dot{Q}_{\text{Klimaanlage}}$	Wärmeentzug durch die Klimaanlage [W]
$f_{\text{Lc}}$	Konvektionsfaktor = 0,5 [-]
$f_{\text{Hc}}$	Konvektionsfaktor = 0,5 [-]

Der Faktor  $f_{LC}$  bzw.  $f_{HC}$  wird als Konvektionsfaktor bezeichnet und beträgt normalerweise 0,5 [WIT09]. Er beschreibt den Beitrag der inneren Lasten und der Heizung, welcher sofort die Lufttemperatur  $T_{air}$  erwärmt. Die restlichen 50 % werden beim Strahlungsknoten berücksichtigt.

Da alle Wärmeströme bilanziert werden können, wird im nächsten Schritt die Strahlungstemperatur  $T_R$  berechnet. Sie entsteht dadurch, dass ein Körper Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung abgibt. Grundlage dafür ist das Stefan Boltzmann Gesetz. Bauteile, die sich „sehen“, tauschen Wärme in Form von Strahlung aus. Diese Ströme können aufaddiert werden, da für die Berechnung die Annahme getroffen wird, dass die gesamte Strahlungswärme in solcher Weise verteilt wird, dass alle Flächen, außer den Fenstern, dieselbe Menge an Energie pro Flächeneinheit absorbieren und emittieren.

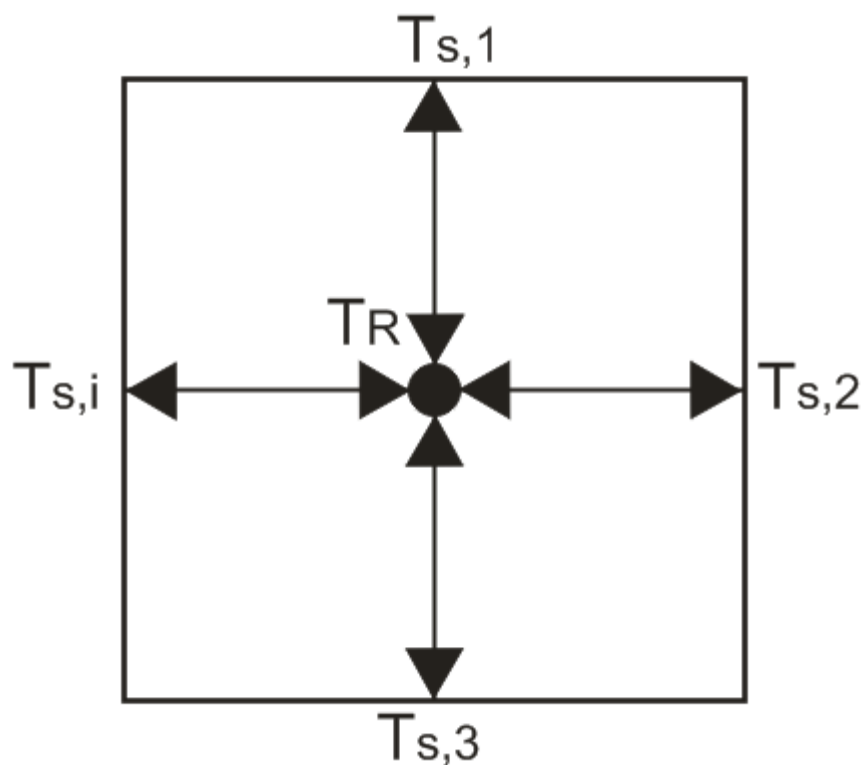


Abb. 25: Strahlungsknoten im Wärmeaustausch mit Oberflächen

In linearisierter Form kann der Strahlungsaustausch für eine Oberfläche mit Index  $i$  mit den anderen Flächen im Raum wie folgt angegeben werden [HTO02], es wird der Strahlungskoeffizient  $h_r$  eingeführt:

$$\left( \frac{\sum_{j=1}^n A_j \cdot T_{s,j}}{\sum_{j=1}^n A_j} - T_{s,i} \right) \cdot h_r$$

$h_r$	Strahlungskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]
$A_j$	Fläche des Körpers mit Index j [m <sup>2</sup> ]
$T_{s,j}, T_{s,i}$	Oberflächentemperatur der Fläche mit Index j bzw. Index i [°C]

Der erste Term in der Klammer kann als Temperatur des Strahlungsknotens in der Zone interpretiert werden, welcher Wärme mit einer Oberfläche i austauscht. Die Strahlungstemperatur ist also gleich [ISO04]

$$T_R = \frac{\sum_{j=1}^n A_j \cdot T_{s,j}}{\sum_{j=1}^n A_j}$$

Der Wärmeaustausch auf Grund von Strahlung kann laut [WIT09] folgendermaßen angeschrieben werden:

$$\dot{Q}_{\text{str}} = A_j h_r \left( \frac{\sum_{j=1}^n A_j \cdot T_{s,j}}{\sum_{j=1}^n A_j} - T_{s,i} \right) + \frac{A_j (f_{Lr} \cdot \dot{Q}_{\text{Lasten}} + f_{Hr} \cdot \dot{Q}_{\text{Heizung}})}{\sum_{j=1}^n A_j}$$

$\dot{Q}_{\text{Lasten}}$	Wärmestrom von inneren Lasten (Personen, Geräte, etc.) [W]
$f_{Lr}$	Faktor für Strahlung, innere Lasten = 0,5 [-]
$\dot{Q}_{\text{Heizung}}$	Wärmestrom von der Heizung [W]
$f_{Hr}$	Faktor für Strahlung der Heizung = 0,5 [-]
$A_j$	Fläche mit Index j [m <sup>2</sup> ]

Wird der Anteil der inneren Lasten und der Heizung als Teil der Strahlungstemperatur berücksichtigt so ergibt sich:

$$T_R = \frac{\sum_{j=1}^n A_j \cdot T_{s,j}}{\sum_{j=1}^n A_j} + \frac{f_{Lr} \cdot \dot{Q}_{\text{Lasten}} + f_{Hr} \cdot \dot{Q}_{\text{Heizung}}}{h_r \cdot \sum_{j=1}^n A_j}$$

Für die Simulation werden die Strahlungstemperatur und die Lufttemperatur in eine operative Temperatur umgerechnet. Sie findet Anwendung bei den Transmissionsverlusten aus Bauteilen und bei der Regelung der Heizung. Sie ist wichtig für die Bewertung der Behaglichkeit. Aus der Wärmestromdichte für

die Zone, welche sich aus dem Wärmeübergang zwischen Bauteiloberflächen und dem Luftknoten bzw. dem Strahlungsknoten zusammensetzt, kann diese operative Temperatur berechnet werden. Zusätzlich wird die durch die Oberflächen im Inneren der Zone absorbierte solare Strahlung addiert. Der Absorptionskoeffizient für die inneren Oberflächen der Bauteile ist gleich 1. Die Wärmestromdichte für die Zone lautet:

$$q_{\text{conv+rad}} = (T_R - T_{s,i}) \cdot h_r + (T_{\text{air}} - T_{s,i}) \cdot h_c + \frac{\dot{Q}_{\text{sol.r}}}{\sum_{j=1}^n A_j}$$

$\dot{Q}_{\text{sol.r}}$  Wärmestrom aus solarer Strahlung [W]

Der Fehler, der durch die Vernachlässigung der Reflektion- und Transmissioneigenschaften gemacht wird, ist klein. Die Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung und Konvektion werden konstant angenommen und können durch addieren zu einem effektiven Übergangskoeffizienten zusammengefasst werden. (siehe auch Kapitel 3.1.1)

$$h_{\text{eff}} = h_c + h_r$$

$h_c$  konvektiver Übergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]

$h_r$  Strahlungskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]

Nach einigem Umformen der Gleichung für die Wärmestromdichte ergibt sich für die operative Lufttemperatur folgende Formel:

$$T_o = (T_R - T_{\text{air}}) \cdot \frac{h_r}{h_{\text{eff}}} + T_{\text{air}} + \frac{1}{h_{\text{eff}}} \cdot \frac{\dot{Q}_{\text{sol.r}}}{\sum_{j=1}^n A_j}$$

[WIT09] gibt diese in etwas umgeformter Weise an. In Simulink stellt sich das Zonenmodell folgendermaßen dar:



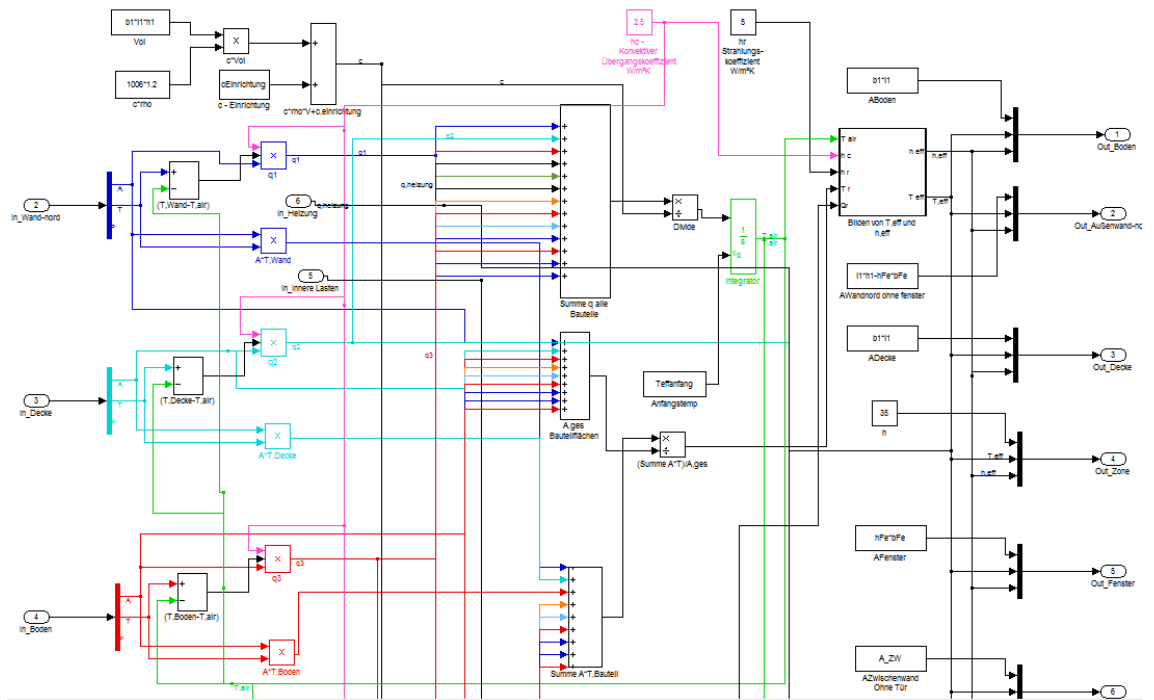


Abb. 26: Modellierung des Zonenmoduls in Simulink

### 3.4.1. Verbindung mit einer zweiten Zone

Die in der Simulation vorhandenen Zonen 1 und 2 werden über eine Zwischenwand mit Verbindungstür getrennt. Sowohl die Wand auch als auch die Tür müssen vollständig modelliert werden. Zum einen wird sich durch die Wand ein Wärmestrom einstellen, da die Zonen unterschiedlich genutzt werden und auch Fenster in unterschiedliche Richtungen haben. Zum anderen wird sich ein Luftvolumenstrom und somit ein Wärmestrom durch die geöffnete Tür aufgrund des Temperaturunterschieds einstellen. Die mathematische Formulierung des Wärmestroms durch die Wand und durch die Tür stützt sich auf die Theorie in Kapitel 3.1.1 und wird hier nur kurz behandelt.

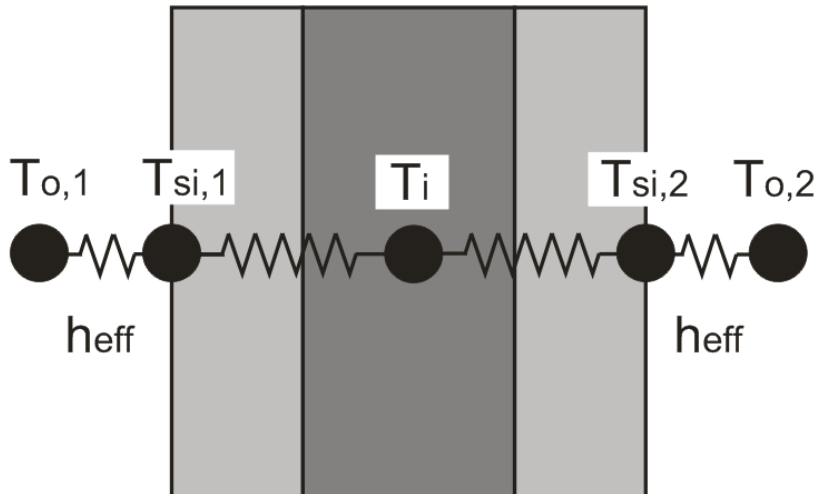


Abb. 27: Diskretisierung der Zwischenwand

Als Randbedingung für die Zwischenwand wird, im Gegensatz zur Außenwand, auf beiden Seiten die operative Temperatur der Zone angesetzt. Der sich einstellende Luftvolumenstrom und die dazugehörige Formel werden in Kapitel 3.4 behandelt.

#### **4. Plausibilitätskontrolle und Vergleich mit HAMBASE**

Ein Vergleich zwischen zwei dynamischen Simulationen dient zur Überprüfung des Modells auf Fehler und zur Untersuchung von Unterschieden. Im Folgenden werden die Ergebnisse zweier verschiedener, dynamischer Simulationen unter denselben Randbedingungen gegenüber gestellt.

##### **4.1. Vergleich von zwei dynamischen Simulationen**

###### **4.1.1. Allgemeines und Randbedingungen**

Der Vergleich findet zwischen der in MATLAB und Simulink erstellten dynamischen Simulation HAMBASE und der in dieser Arbeit vorgestellten Simulation statt. HAMBASE kann von [HAM11] kostenlos bezogen werden. Dieses Programm ist in der Lage Wärme- und Feuchtigkeitsströme zu berechnen und daraus auf die Raumtemperatur, die relative Luftfeuchte und den Energiebedarf für Heizung und Kühlung für multizonale Gebäude zu schließen [WIT09]. HAMBASE wurde 2001 erfolgreich im ASHRAE-Bestest validiert und fand bei vielen Projekten Verwendung. Der ASHRAE-Bestest dient zur Evaluierung von Simulationsprogrammen und beschreibt ein Testgebäude

für welches Ergebnisse in einer gewissen Bandbreite erreicht werden müssen. HAMBASE wurde für den Vergleich gewählt, da dieses Programm im Rahmen vom Projekt „ThinkHome“ ebenfalls zur Anwendung kommt.

Für die Gegenüberstellung ist es wichtig ein Programm zu finden, das ähnlich arbeitet und ähnliche Annahmen trifft. HAMBASE deckt sich zwar weitgehend, aber nicht überall, mit den Annahmen und Berechnungsmethoden, welche in den Kapiteln 2 und 3 beschrieben werden. Aus diesem Grund sind Abweichungen zwischen den berechneten Temperaturverläufen zu erwarten.

Das Gebäude besteht aus zwei Zonen mit jeweils einem Fenster und einer Verbindungstür zwischen den Zonen. Die Raumhöhe beträgt jeweils 3 m. Die Außenwände, das Dach und die Bodenplatte bestehen aus 30 cm Stahlbeton und 20 cm Wärmedämmung.

In der folgenden Abbildung ist der Grundriss dargestellt, das Fenster in Zone 1 zeigt nach Norden, das Fenster in Zone 2 nach Süden. Zone 1 hat ein Volumen von  $108 \text{ m}^3$ , Zone 2 von  $72 \text{ m}^3$ .

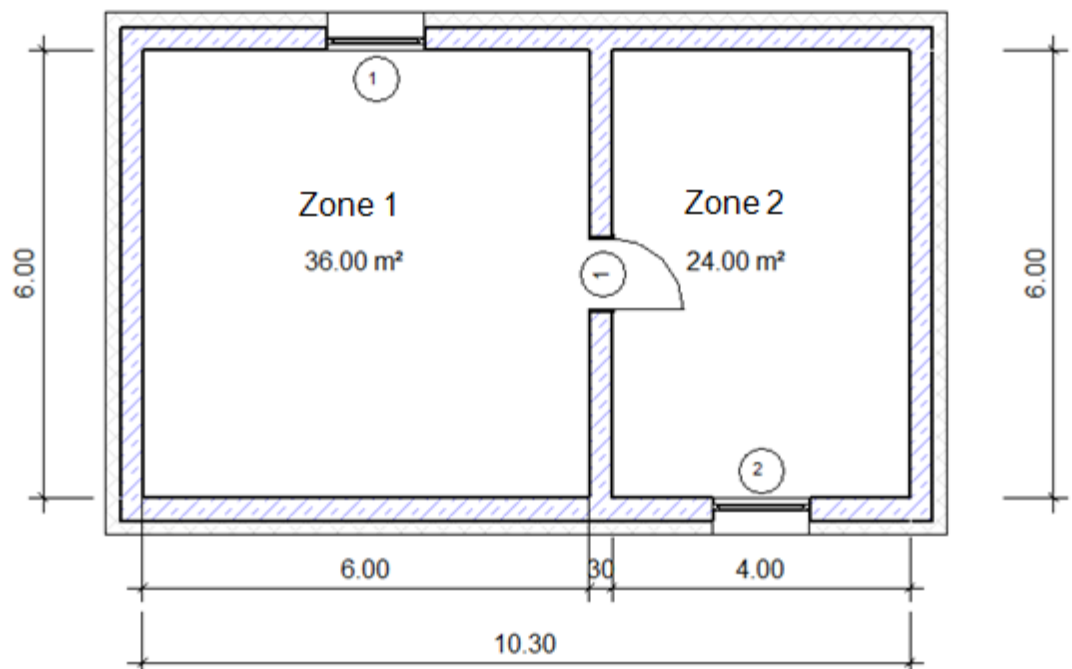


Abb. 28: Grundriss für Vergleich

Die Klimadaten für beide Simulationen stammen aus einer Klimadatenbank vom Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz. Verwendet werden Außentemperatur und solare Einstrahlung

für den Standort Wien – innere Stadt. HAMBASE benötigt als Input nur die Strahlung auf eine horizontale Fläche und berechnet dann für jede Orientierung und Neigung der eingegebenen Flächen Strahlungswerte. In HAMBASE kann die Temperatur unter der Bodenplatte nur als fixer Wert eingegeben werden. Aus diesem Grund ist in beiden Simulationen die Temperatur des Bodens mit 12 °C konstant.

Mit HAMBASE können Zonen, Bauteile und jegliche Geometrie über ein Inputfile definiert werden. Es werden dieselben Materialkennwerte in beiden Modellen verwendet. Alle Bauteile und deren Aufbau, Flächen und Ausrichtung befinden sich in den nächsten zwei Tabellen. Die Haustüre wurde in beiden Programmen vorerst weggelassen, für den Vergleich macht dies keinen Unterschied.

Tab. 4: Bauteile mit Fläche und Orientierung

Bauteile mit Zonenzuteilung, Fläche und Orientierung		
Bauteil	Fläche	Orientierung
	[m <sup>2</sup> ]	-
<b>Zone 1</b>		
Wand 1	14	Norden
Wand 2	18	Süden
Wand 3	18	Westen
Dach	36	-
Boden	36	-
Fenster	4	Norden
<b>Zone 2</b>		
Wand 1	12	Norden
Wand 2	8	Süden
Wand 3	18	Osten
Dach	24	-
Boden	24	-
Fenster	4	Süden
<b>Zonenteilung</b>		
Zwischentür	2	-
Zwischenwand	16	-

Für die folgende Tabelle werden diese Abkürzungen verwendet:

- Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda$
- spez. Wärmekapazität:  $c$
- Rohdichte:  $\rho$
- Dicke:  $d$
- solarer Absorptionsgrad außen:  $\alpha_e$
- solarer Absorptionsgrad innen:  $\alpha_i$

Tab. 5: Aufbauten und Materialkennwerte

Materialkennwerte und Bauteilaufbauten						
Material	d	$\lambda$	c	$\rho$	$\alpha_i$	$\alpha_e$
	[m]	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[-]
<b>Außenwand, Bodenplatte, Dach</b> (von innen nach außen)						
<b>U-Wert = 0,19 W/m<sup>2</sup>K</b>						
Stahlbeton	0,3	2,5	1080	2400	0,855	0,5
Dämmmaterial	0,2	0,04	1450	17	0,855	0,5
<b>Zwischenwand</b>						
<b>U-Wert = 2,63 W/m<sup>2</sup>K</b>						
Stahlbeton	0,3	2,5	1080	2400	0,855	-
<b>Tür innen</b>						
<b>U-Wert = 1,90 W/m<sup>2</sup>K</b>						
Holz	0,04	0,15	1600	600	0,855	-
<b>Fenster (Zweischeibenverglasung)</b>						
<b>U-Wert = 2,46 W/m<sup>2</sup>K</b>						
Glas pro Scheibe	0,004	0,81	800	2500	0,06	0,06

In HAMBASE werden keine Absorptionsgrade für die inneren Flächen direkt definiert, jene Sonneneinstrahlung die innen absorbiert wird, ergibt sich aus den in HAMBASE angesetzten „convection factors“ [WIT09]. Sie wurden auf den vorgegebenen Standardwerten belassen.

Die Fenster haben einen U-Wert von 2,46 W/m<sup>2</sup>K, einen Gesamtenergiedurchlassgrad g von 0,605 und einen Transmissionsgrad von 0,521.

HAMBASE arbeitet nicht mit winkelabhängigen Werten für die Transmissions- und Absorptionsgrade, es wird nicht in der Dokumentation [WIT09] erwähnt. Aus diesem Grund wird für den Vergleich in der eigenen Simulation ebenfalls auf die Verwendung der winkelabhängigen Werte verzichtet.

Die internen Lasten sind tagsüber zwischen 8 und 18 Uhr aktiv, es werden folgende Werte für die gesamte Zone angesetzt:

- Zone 1 188 W
- Zone 2 167 W

Diese Werte ergeben sich aus folgender Formel:

$$\dot{Q}_{\text{innere Last}} = (P_{\text{Person}} + Q_{\text{I,Geräte}} \cdot A_{\text{brutto}} \cdot 0,8)$$

$P_{\text{Person}}$  innere Gewinne aus Personen = 80 [W]

$Q_{\text{I,Geräte}}$  Wärmeabgabe für Geräte / Beleuchtung = 3,75 [W/m<sup>2</sup>]

$A_{\text{brutto}}$  Bruttogeschossfläche [m<sup>2</sup>]

Der Wert  $Q_{\text{I,Geräte}}$  ergibt sich aus folgender Formel, dabei wird angenommen, dass 90 % der inneren Gewinne auch genutzt werden können. [HWB10]:

$$Q_{\text{I,Geräte}} = \frac{P_{\text{Geräte}} \cdot 0,9 \cdot 1000}{8760 \cdot A_{\text{brutto}} \cdot 0,8}$$

$Q_{\text{I,Geräte}}$  innere Gewinne aus Geräten und Beleuchtung [W/m<sup>2</sup>]

$P_{\text{Geräte}}$  innere Gewinne aus Geräten = 1750 [kWh]

$A_{\text{brutto}}$  Bruttogeschossfläche [m<sup>2</sup>]

Die Lüftungsanlage wird nach Anwesenheit geregelt: von 8 bis 18 Uhr beträgt der Luftwechsel 0,33 1/h, in der übrigen Zeit, wenn sich niemand in den Räumlichkeiten befindet, wird der Luftwechsel um 50 % auf 0,167 1/h reduziert. Der Luftwechsel von 0,33 1/h ergibt sich aus einem Luftvolumenstrom von

60 m<sup>3</sup>/h bei zwei anwesenden Personen (30 m<sup>3</sup>/h pro Person). Die Luft gelangt jeweils mit Außenlufttemperatur in die Räume. Ein Luftaustausch zwischen den Zonen wurde nicht angesetzt.

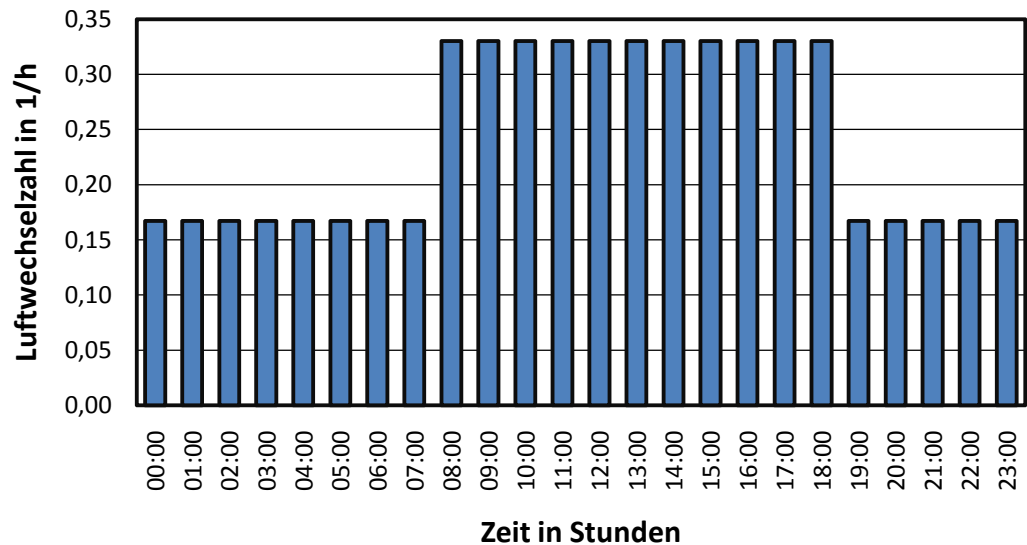


Abb. 29: Angesetzter Luftwechsel für beide Simulationsumgebungen

Beide Simulationen werden mit und ohne Heizung mit einander verglichen. Dies hat den Vorteil, dass auch in kalten Monaten die Temperaturen besser gegenüber gestellt können. Zusätzlich wird bei einem Vergleich nur eine Zone beheizt und dann die Temperaturen in beiden Zonen gegenüber gestellt. Um den großen Einfluss des Südfensters zu demonstrieren werden die Ergebnisse mit und ohne Fenster verglichen. Bei allen Vergleichen wird die Differenz der Temperaturverläufe dargestellt. Diese ergeben sich aus den Temperaturen aus HAMBASE abzüglich der Temperaturen aus der eigenen Arbeit.

Die Heizungsanlage hat eine Leistung von 7000 Watt und ist auf einen Setpoint von 21 °C über das ganze Jahr eingestellt, sie wird mit Hilfe eines P-Controllers geregelt (Kapitel 3.2.1) Eine Kühlung ist nicht vorhanden. Eine Verschattung wird nicht berücksichtigt.

Für beide Modelle wird derselbe Anfangswert der Lufttemperatur von 10,8 °C gewählt, dies ergab sich aus HAMBASE und wurde auch für die eigene Arbeit angesetzt.

Die Gegenüberstellung der Simulationen erfolgt aufgrund der in der Zone herrschenden Lufttemperaturen  $T_{\text{air}}$ , da ein aussagekräftiger Vergleich mit Hilfe der operativen Temperatur in HAMBASE nicht möglich war.

Vergleich 1 wird freischwingend, das heißt ohne Einfluss einer Heizungsanlage, und mit je einem Fenster pro Zone durchgeführt.

Vergleich 2 wird freischwingend, das heißt ohne Einfluss einer Heizungsanlage, und ohne Fenster durchgeführt.

Vergleich 3 wird mit Heizung für beide Zonen und mit je einem Fenster pro Zone durchgeführt.

Vergleich 4 wird mit Heizung für Zone 2, einer unbeheizten Zone 1 und mit je einem Fenster pro Zone durchgeführt.



#### 4.1.2. Vergleich 1: freischwingend mit Fenster

In den zwei folgenden Abbildungen ist der Temperaturverlauf in der Zone 1 und 2, mit den jeweiligen Programmen berechnet, dargestellt.

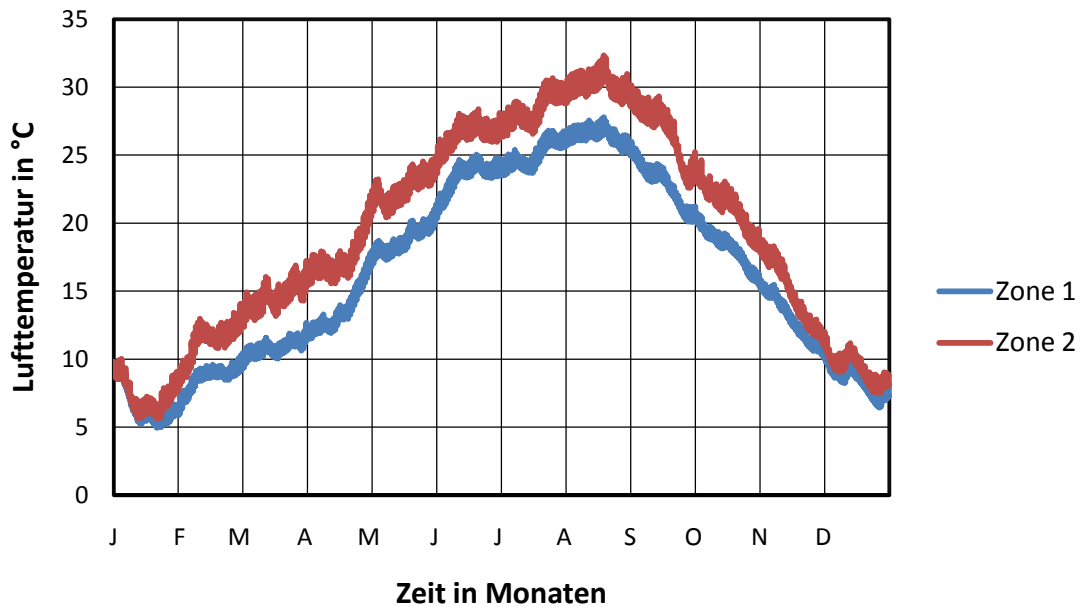


Abb. 30: Vergleich 1 Temperaturverlauf HAMBASE

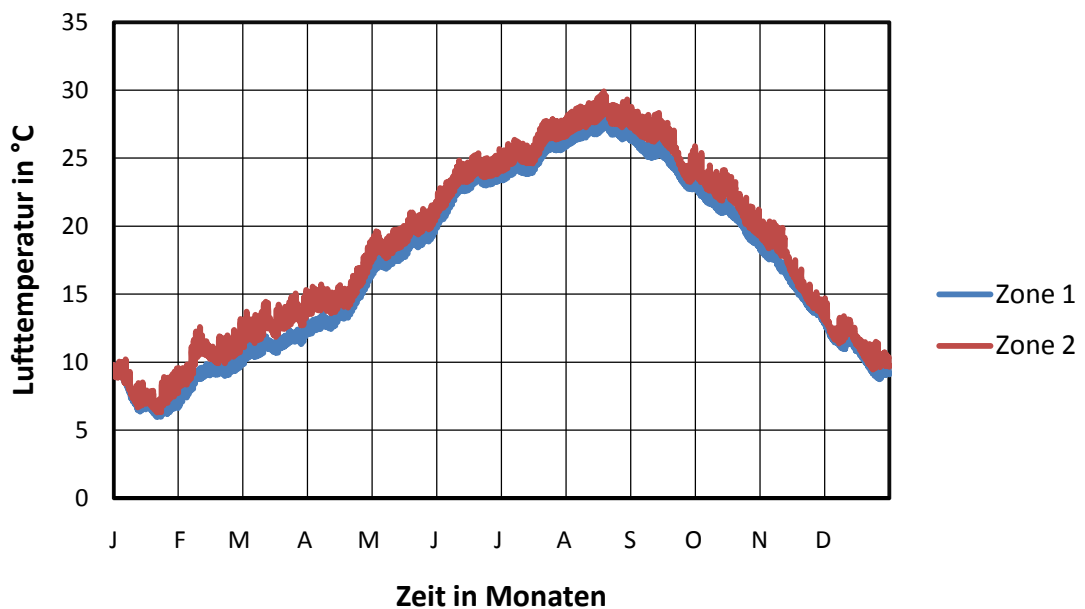


Abb. 31: Vergleich 1 Temperaturverlauf eigene Arbeit

Den Unterschied zwischen den Temperaturverläufen zeigt das folgende Diagramm:

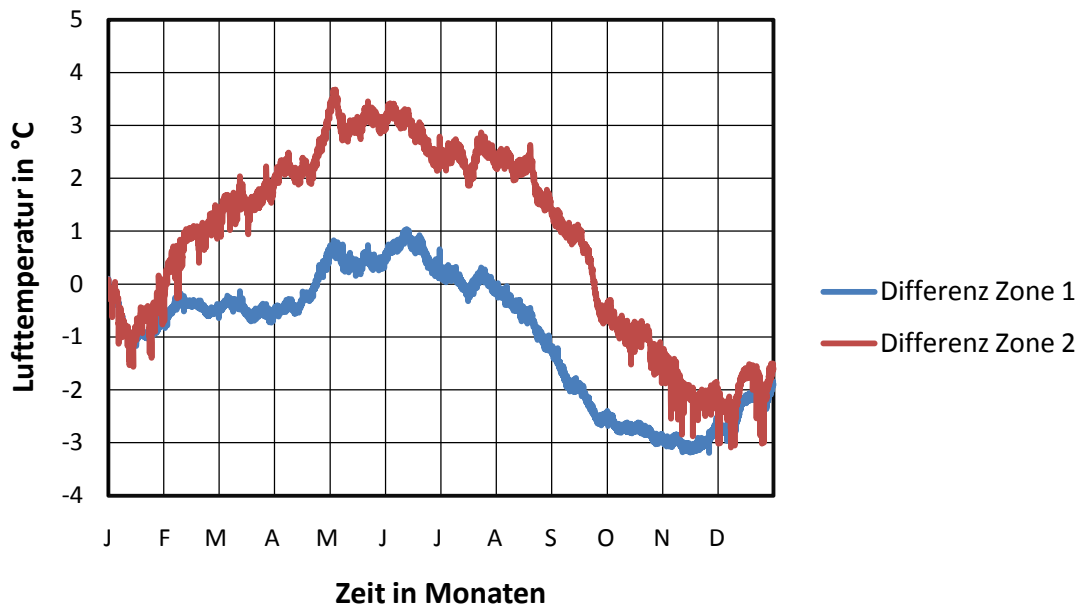


Abb. 32: Vergleich 1 Differenz zwischen den Temperaturverläufen

Bei Zone 1 ist ein größer werdender Unterschied zwischen den Temperaturverläufen im Herbst und Winter zu erkennen. Bei Zone 2 sind diese Unterschiede in den Sommermonaten am größten. Da die Berechnung der solaren Strahlung in HAMBASE nicht einsehbar ist, wird angenommen, dass dort die größten Differenzen zwischen den Modellen zu finden sind. Für die eigene Arbeit wurden die berechneten Werte für jede Orientierung aus der Klimadatenbank übernommen. Die solare Strahlung hat Auswirkung auf den Eintrag durch das Fenster aber auch auf die effektive Außentemperatur. Konkrete Werten konnten in HAMBASE nicht eingesehen werden.

Die Berechnung des Wärmestroms durch das Fenster ist ebenfalls unterschiedlich. In der eigenen Arbeit wird dieser mit Hilfe des in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Modells berechnet. HAMBASE berechnet den Wärmestrom aufgrund des U-Werts und der Differenz der operativen Innen- und effektiven Außentemperatur. Absorption in den Scheiben wird dort nicht berücksichtigt bzw. ist nicht aus der Dokumentation ersichtlich [WIT09].

#### 4.1.3. Vergleich 2: freischwingend ohne Fenster

In den zwei folgenden Abbildungen ist der Temperaturverlauf in der Zone 1 und 2, mit den jeweiligen Programmen berechnet, dargestellt. Die Räume besitzen bei dieser Variante keine Fenster.

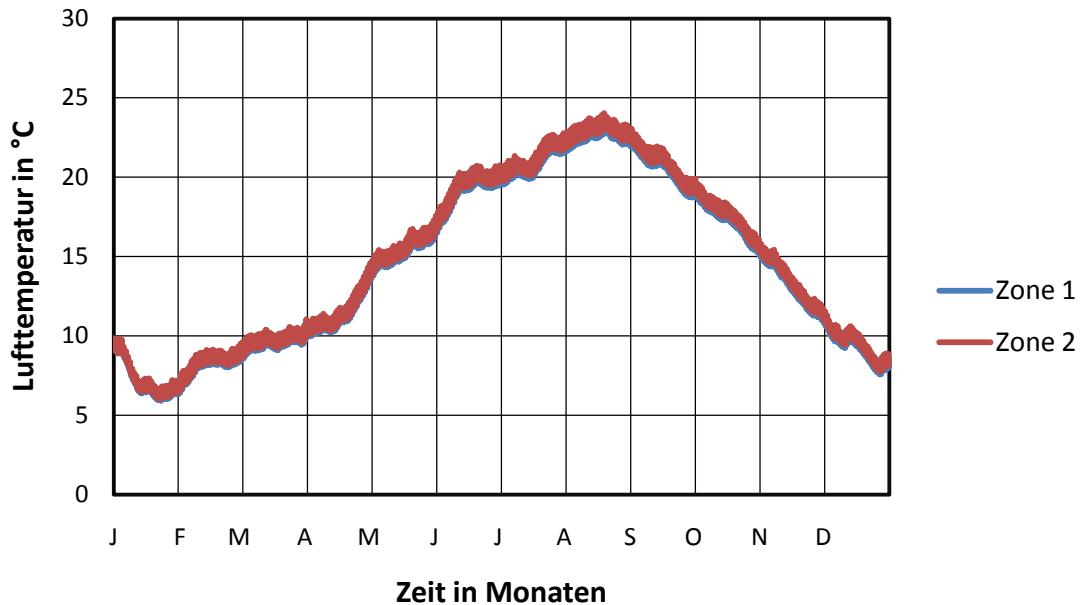


Abb. 33: Vergleich 2 Temperaturverlauf HAMBASE

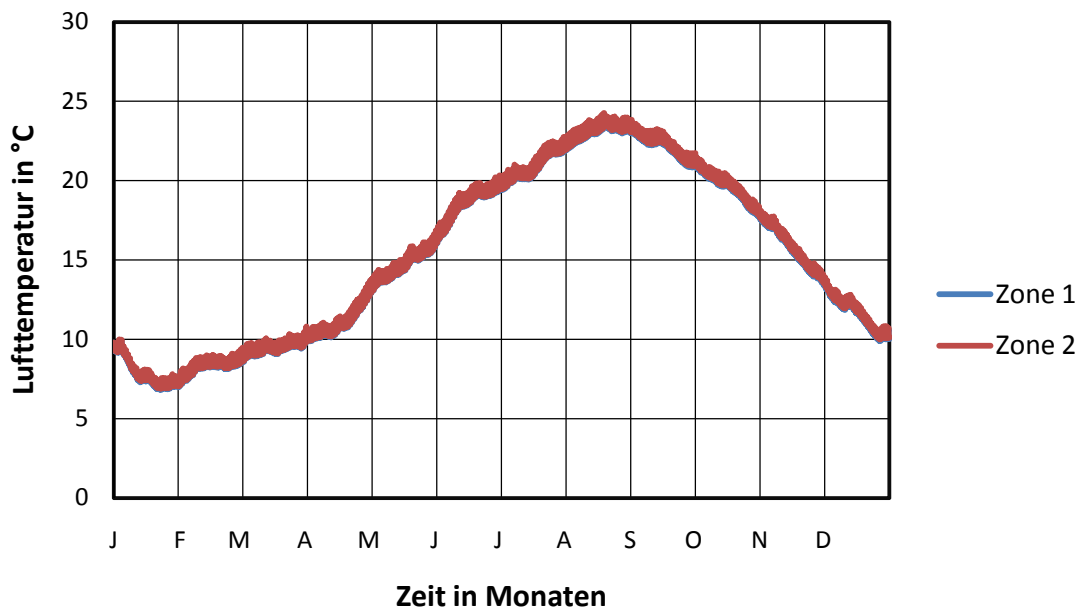


Abb. 34: Vergleich 2 Temperaturverlauf eigene Arbeit

Den Unterschied zwischen den Temperaturverläufen zeigt das folgende Diagramm:

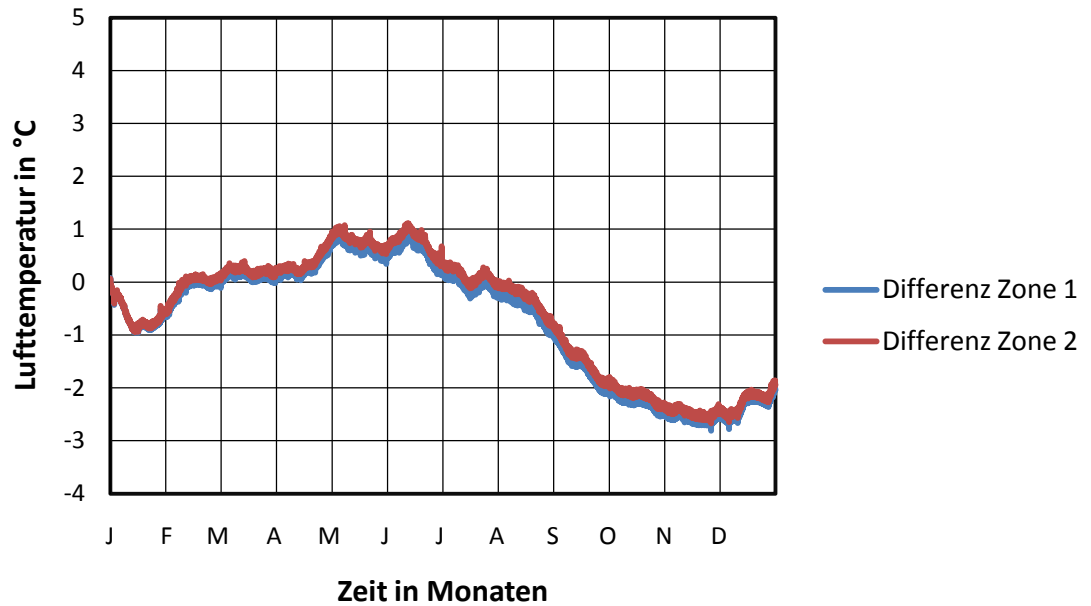


Abb. 35: Vergleich 2 Differenz zwischen den Temperaturverläufen

Im Unterschied zu Vergleich 1 sind die großen Abweichungen im Sommer zurückgegangen, was die Annahme des Unterschieds zwischen den Strahlungsberechnungen untermauert.

#### 4.1.4. Vergleich 3: beide Zonen beheizt

In den zwei folgenden Abbildungen ist der Temperaturverlauf in der Zone 1 und 2, mit den jeweiligen Programmen berechnet, dargestellt. Für diesen Vergleich wurden beide Zonen beheizt, beide Zonen besitzen ein Fenster.

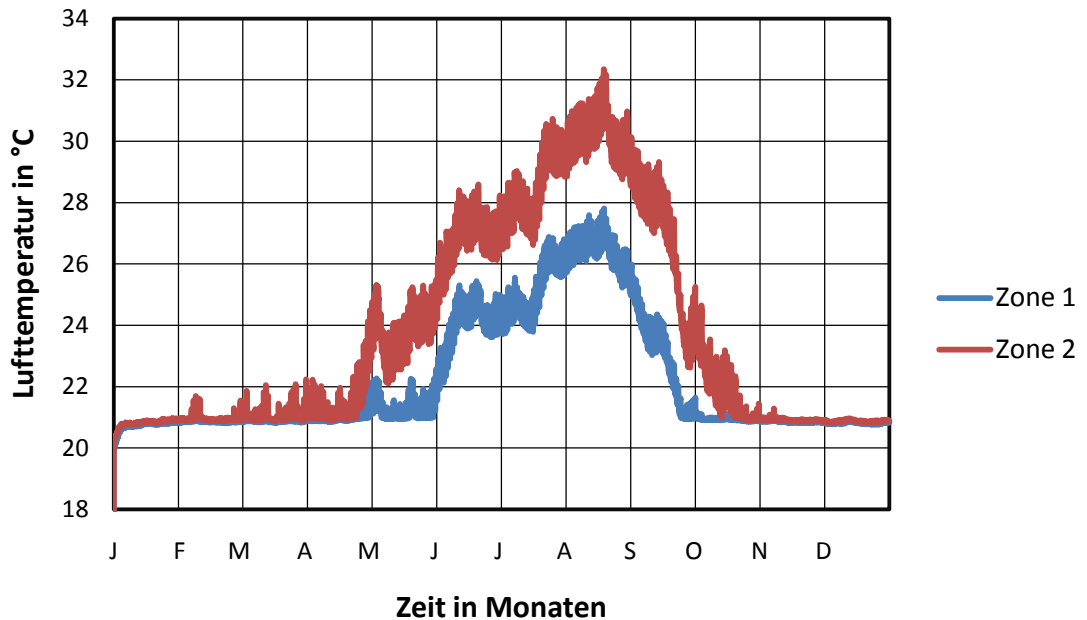


Abb. 36: Vergleich 3 Temperaturverlauf HAMBASE

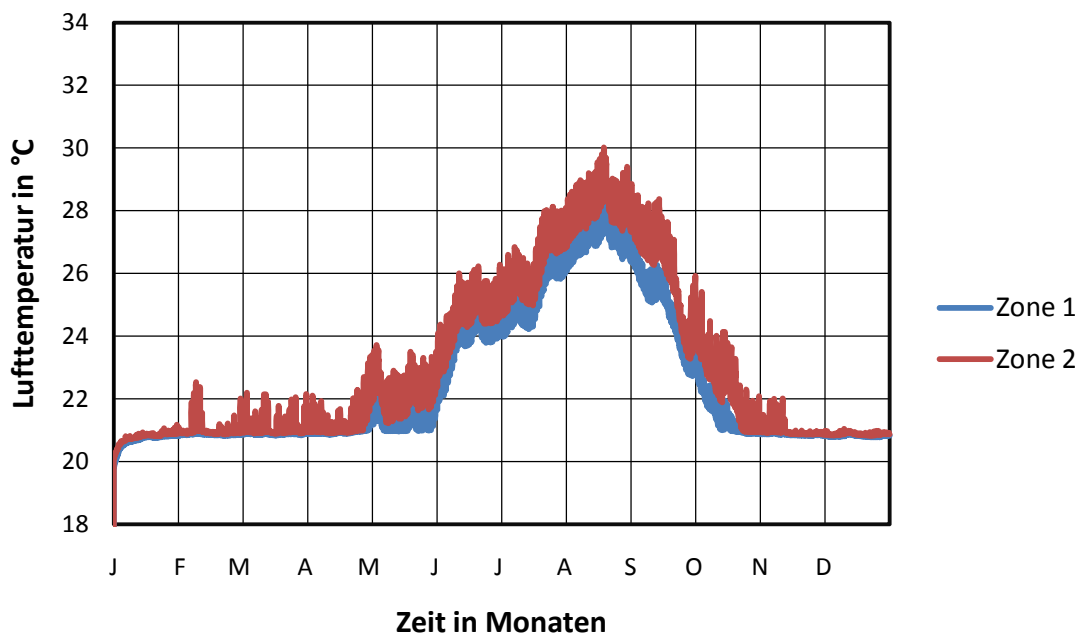


Abb. 37: Vergleich 3 Temperaturverlauf eigene Arbeit

Den Unterschied zwischen den Temperaturverläufen zeigt das folgende Diagramm:

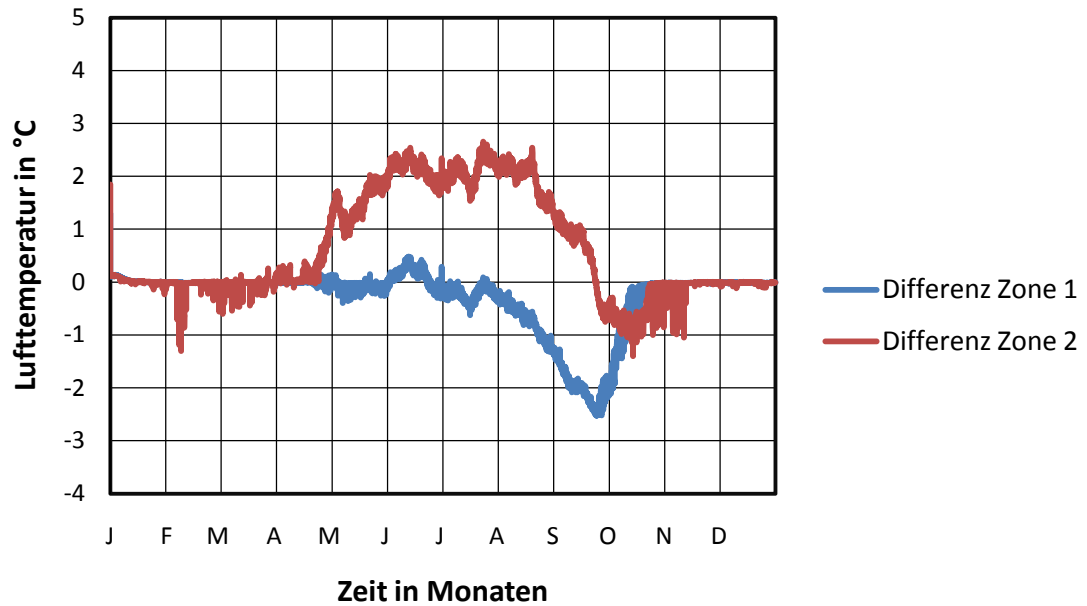


Abb. 38: Vergleich 3 Differenz der Temperaturverläufe

Für beide Simulationen wurde der Heizwärmebedarf berechnet, für HAMBASE lauten die Ergebnisse:

- Zone 1: 63,06 kWh/m<sup>2</sup>
- Zone 2: 51,59 kWh/m<sup>2</sup>

Für die eigene Arbeit lauten die Ergebnisse:

- Zone 1: 58,61 kWh/m<sup>2</sup>
- Zone 2: 50,63 kWh/m<sup>2</sup>

Bei den Temperaturverläufen und beim Heizwärmebedarf ergeben sich bei diesem Vergleich kleinere Unterschiede. Die Abweichungen bei den Temperaturen betragen maximal 2,65 °C.

#### 4.1.5. Vergleich 4: Zone 1 unbeheizt, Zone 2 beheizt

In den zwei folgenden Abbildungen ist der Temperaturverlauf in der Zone 1 und 2, mit den jeweiligen Programmen berechnet, dargestellt. Die Heizung wird nur in Zone 2 betrieben. Fenster sind in beiden Räumen vorhanden.

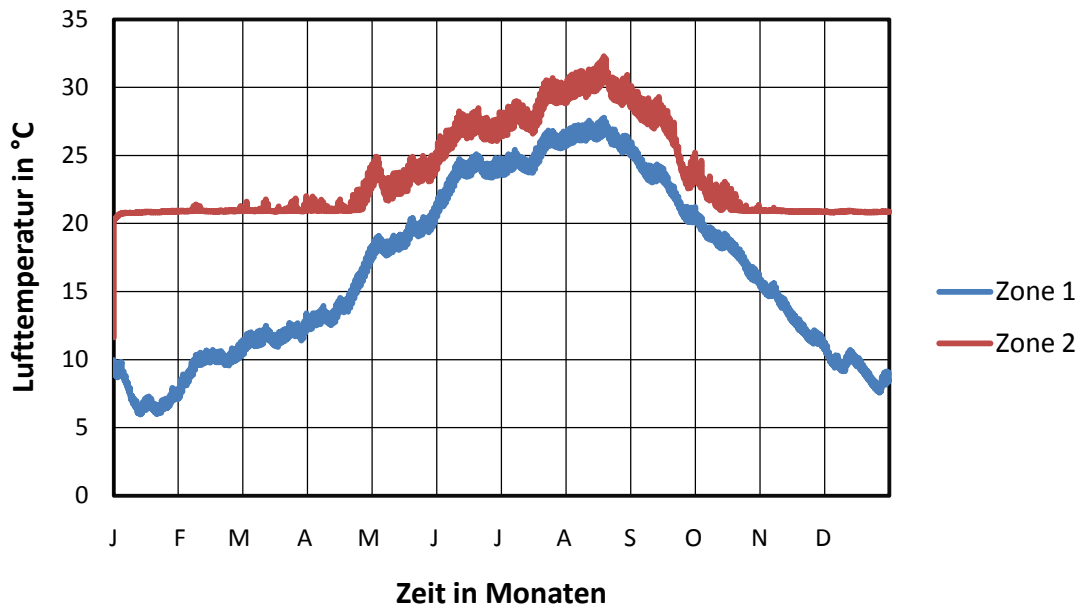


Abb. 39: Vergleich 4 Temperaturverlauf HAMBASE

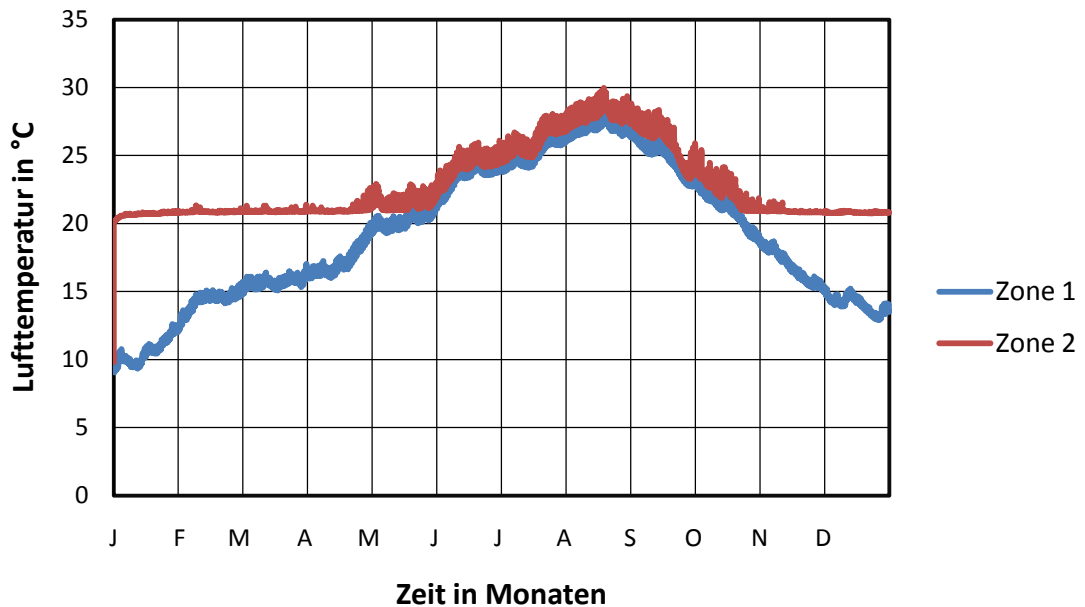


Abb. 40: Vergleich 4 Temperaturverlauf eigene Arbeit

Den Unterschied zwischen den Temperaturverläufen zeigt das folgende Diagramm:

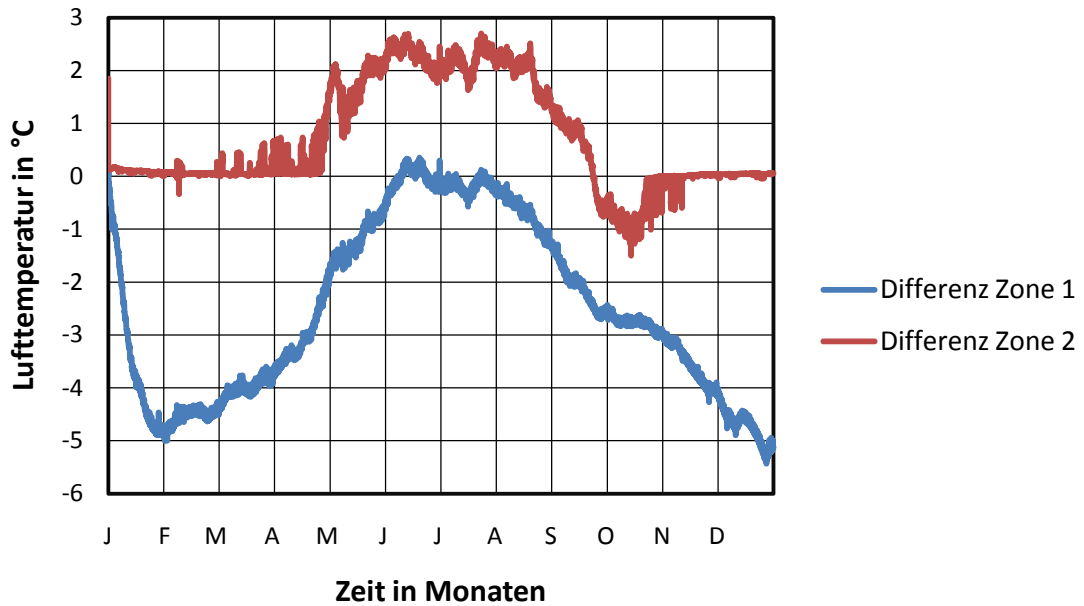


Abb. 41: Vergleich 4 Differenz zwischen Temperaturverläufen

HAMBASE hat einen Heizwärmebedarf für die Zone 2 von 59,73 kWh/m<sup>2</sup> berechnet. Wie auf den Diagrammen zu erkennen ist, hat die warme Zone 2 auf die kalte Zone 1 nur sehr wenig Einfluss. Zone 1 wird im Schnitt nur ein knappes Grad wärmer als in Vergleich 1 wo beide Zonen unbeheizt sind. In der eigenen Arbeit wird für Zone 2 ein Heizwärmebedarf von 86 kWh/m<sup>2</sup> ermittelt. Daran ist ersichtlich, dass Zone 2 die Zone 1 über den Wärmeverlust der Trennwand „mit heizt“. Die Temperaturen der Zone 2 sind bei der eigenen Arbeit im Gegensatz zu Vergleich 1 um 4 bis 5,5 °C höher. Die beiden Zonen beeinflussen sich gegenseitig also stärker als dies bei HAMBASE der Fall ist. Dieser Effekt ist auch beim Unterschied der Temperaturverläufe für Zone 1 zu sehen. Es wird keine Luft zwischen den Zonen ausgetauscht.

#### 4.1.6. Schlussfolgerung

Der Vergleich soll vor allem die Unterschiede zwischen den Programmen zeigen, aber auch demonstrieren, dass das Verhalten vergleichbar ist. Gerade für kurze Simulationszeiten (1 Tag bis 1 Woche), wie sie beim „ThinkHome“ Projekt vorkommen werden, ist es wichtig, dass das Verhalten einem anderen Simulationsprogramm gleicht. Unterschiede wirken sich in kurzen Simulationszeiten weniger aus.



Aus Vergleich 3 (beide Zonen beheizt) ist ersichtlich, dass sich die Verhaltensweise der Modelle sehr ähnelt. Große Unterschiede sind Zone 2 feststellbar, dort zeigt das Fenster nach Süden. Aus Vergleich 4 ist ersichtlich, dass die beiden Zonen in der eigenen Arbeit stärker voneinander abhängen als in HAMBASE. Dieses Verhalten ist für die Bewertung von Regelungsstrategien wichtig.

Unterschiede zwischen den Simulationen treten auf. Jedoch konnten einzelne Berechnungsroutinen in HAMBASE nicht eingesehen werden weshalb sich Ursachen für die Abweichungen schwer fest stellen lassen.

Im Rahmen des „ThinkHome“ Projekts, für welches diese Simulationsumgebung unter anderem erarbeitet wurde, bietet die eigene Simulation einen entscheidenden Vorteil gegenüber HAMBASE. Das Modell ist je nach Wünschen leichter anpassbar und es wird ermöglicht, zusätzliche Berechnungsroutinen einzubauen.

## **5. Variantenstudie**

### **5.1. Allgemeines**

Die Variantenstudie beinhaltet drei verschiedene Konstruktionsarten: einen alten Stahlbetonbau, ein Gebäude nach aktueller OIB Richtlinie 6 und ein Gebäude mit einer thermischen Hülle nach Passivhausstandard. Es werden vor allem der Einfluss der Nutzung und die Auswirkung unterschiedlicher Heizverhalten und Regelungsstrategien auf den Heizwärmebedarf und die operativen Raumtemperaturen untersucht. Die Varianten a werden mit kontinuierlicher Heizung betrieben, die Varianten b mit einem ON/OFF-Controller. Bei Variante b wird also nur bei Anwesenheit geheizt. Für alle Varianten werden im freien Feld stehende Häuser mit zwei Zimmern betrachtet. Zuerst werden beide Räume geheizt, im weiteren Verlauf nur mehr einer. Auch der Luftaustausch zwischen den Zonen wird eine Rolle spielen. Dies wird durch eine geöffnete Tür zwischen den Räumen ermöglicht. Die Simulationsdauer erstreckt sich über eine gewählte Heizperiode vom 1. Oktober bis 31. März. Im Zuge des Vergleichs wird von Variante zu Variante die thermische Hülle verbessert und deren Auswirkungen aufgezeigt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass bei Steigerung der Qualität der thermischen Hülle die operative Temperatur des beheizten und unbeheizten Raums sich immer mehr einander nähern. Es soll gezeigt werden, dass der Unterschied zwischen kontinuierlicher Heizung und ON/OFF-Controller klein ist und bei besser werdenden thermischen Eigenschaften des Gebäudes noch kleiner wird.

Die Klimadaten für beide Simulationen stammen aus der Klimadatenbank vom Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz für den Standort Wien – innere Stadt. Die Außentemperatur nimmt für die gewählte Simulationsdauer folgende Werte an:

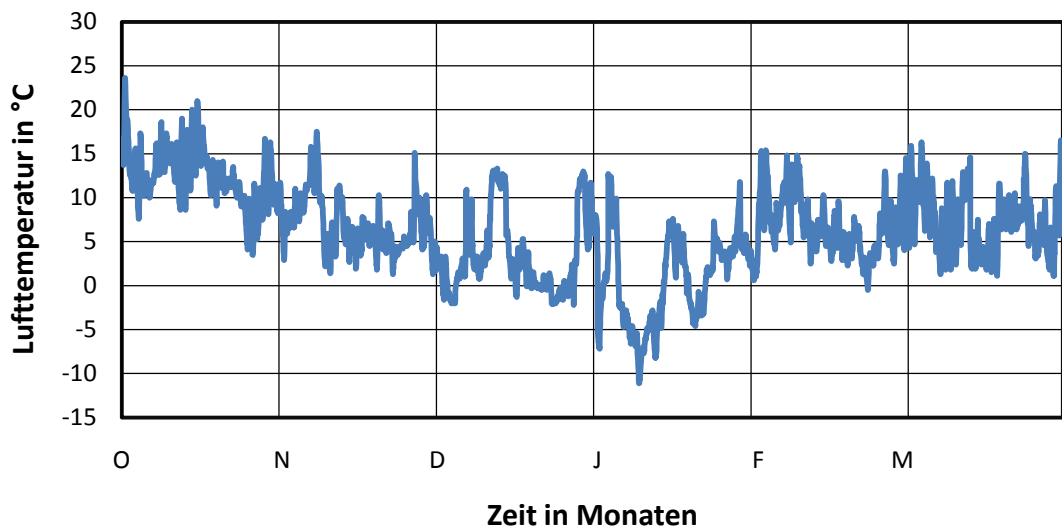


Abb. 42: Außentemperatur in der Heizperiode

## 5.2. Eingangsdaten

### 5.2.1. Eingangsdaten für das Simulink-Modell

Für alle drei Varianten werden derselbe Grundriss und dieselben Bauteilflächen verwendet.

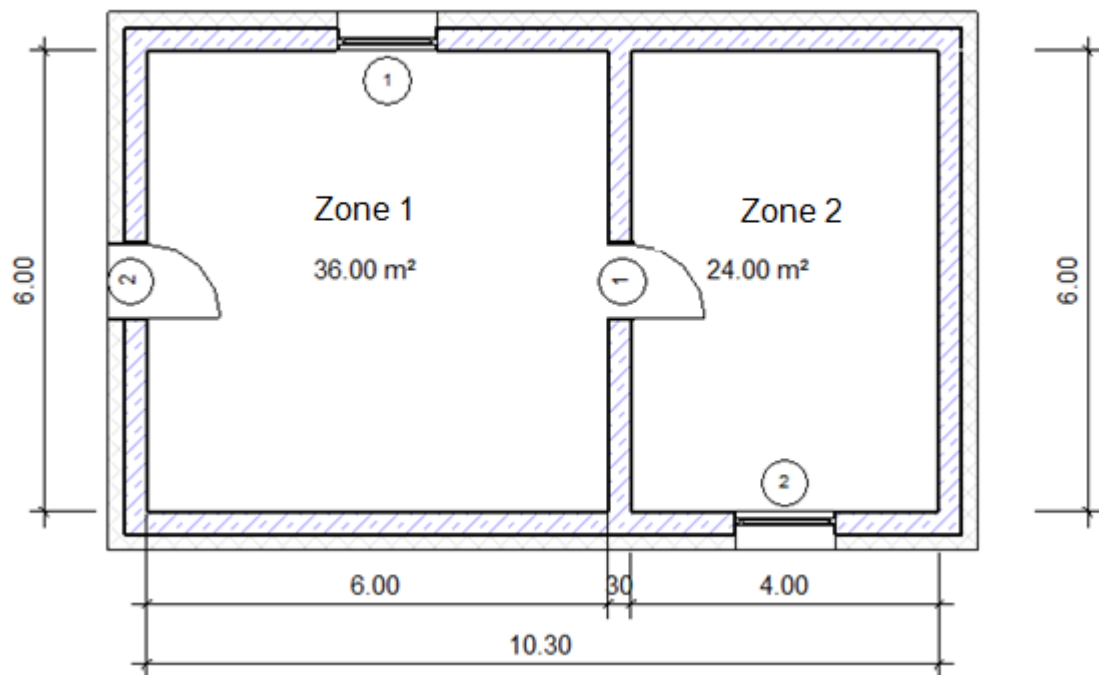


Abb. 43: Grundriss für die Variantenstudie

Das Gebäude besteht aus zwei Räumen mit jeweils einem Fenster und einer Verbindungstür zwischen den Zonen. Die Raumhöhe beträgt 3 m. Das Fenster in Zone 1 zeigt nach Norden, das Fenster in Zone 2 nach Süden. Zone 1 hat ein Volumen von 108 m<sup>3</sup>, Zone 2 von 72 m<sup>3</sup>.

In der Variantenstudie ändern sich die Qualität der thermischen Hülle und die Luftdichtheit. Folgende Ausgangskonfiguration kommt bei der Variantenstudie zur Anwendung:

Tab. 6: Bauteilflächen und Orientierung für die Variantenstudie

Bauteile mit Zonenzuteilung, Fläche und Orientierung		
Bauteil	Fläche	Orientierung
	[m <sup>2</sup> ]	-
<b>Zone 1 - Küche</b>		
Wand 1	14	Norden
Wand 2	18	Süden
Wand 3	16	Westen
Dach	36	-
Boden	36	-
Fenster	4	Norden
Haustür	2	Westen
<b>Zone 2 - Schlafzimmer</b>		
Wand 1	12	Norden
Wand 2	8	Süden
Wand 3	18	Osten
Dach	24	-
Boden	24	-
Fenster	4	Süden
<b>Zonenteilung</b>		
Zwischentür	2	Osten/Weste
Zwischenwand	16	Osten/Westen

Für die Fenster werden die vom Einfallswinkel der Sonne abhängigen Werte berücksichtigt, eine genauere Beschreibung des Fensters befindet sich in dem Kapitel für die jeweilige Variante. Das Fenster wird ab einer solaren Strahlung von 200 W/m<sup>2</sup> auf die Fensterfläche verschattet. Die genauere Funktion wird in Kapitel 3.2.4 beschrieben. Das dynamische Erdmodell wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, findet hier, im Gegensatz zu Kapitel 4.1, Anwendung. Alle Wände haben einen inneren solaren Absorptionskoeffizienten von 1,0 und einen äußeren von 0,4. Für die inneren Lasten werden Daten aus einem Selbsttest mit einbezogen. Über eine Woche wurden, am Beispiel der eigenen Wohnung, Anwesenheitszeiten notiert und Protokoll über die Benutzung von Geräten

geführt. Für jeden Wochentag ergibt sich somit ein anderes Anwesenheitsprofil. Ein typischer Montag wird in der folgenden Tabelle aufgezeigt:

Tab. 7: innere Lasten für einen typischen Wochentag

innere Lasten für einen typischen Wochentag (Montag)				
Uhrzeit	Anzahl der anwesenden Personen		aktives Gerät, Tätigkeit	
	Zone 1	Zone 2	Zone 1	Zone 2
00:00 – 01:00	2	0		
01:00 – 02:00	2	0		
02:00 – 03:00	2	0		
03:00 – 04:00	2	0		
04:00 – 05:00	2	0		
05:00 – 06:00	2	0		
06:00 – 07:00	2	0		
07:00 – 08:00	2	0		
08:00 – 09:00	1	1		
09:00 – 10:00	0	1		
10:00 – 11:00	0	0		
11:00 – 12:00	0	0		
12:00 – 13:00	0	0		
13:00 – 14:00	0	0		
14:00 – 15:00	0	0		
15:00 – 16:00	1	1		Computer
16:00 – 17:00	1	1		Computer
17:00 – 18:00	0	2	Waschmaschine	Computer
18:00 – 19:00	1	1	Waschmaschine	Computer
19:00 – 20:00	2	0	Waschmaschine	Computer
20:00 – 21:00	0	2	Kochen	Computer
21:00 – 22:00	2	0		Computer
22:00 – 23:00	2	0		Computer
23:00 – 00:00	2	0		

Der Austausch von Luft erfolgt über eine Lüftungsanlage, sie wird nach Anwesenheit geregelt. Bei Anwesenheit wird ein Luftvolumenstrom von  $30 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{Person}$  angesetzt, in der übrigen Zeit, wenn sich niemand in den Räumlichkeiten befindet,  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die Luft gelangt mit Außenlufttemperatur in die Räume.

Die Heizungsanlage ist auf einen Setpoint von  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  über das ganze Jahr eingestellt, sie wird mit Hilfe eines P-Controllers geregelt. Eine Kühlung ist nicht vorhanden da nur die Wintermonate betrachtet werden. Für alle Varianten beträgt die Anfangstemperatur der Luft in beiden Zonen  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Varianten a werden mit kontinuierlicher Heizung betrieben, bei den Varianten b wird ein ON/OFF-Regler verwendet. Bei Anwesenheit wird die Heizung wie bei den Varianten a geregelt, bei Abwesenheit wird keine Wärme zugeführt. Der Heizwärmebedarf wird getrennt für Zone 1 und 2 berechnet und dann über die Grundfläche der Zonen gemittelt:

$$Q_{h,d} = \frac{Q_{h,d,1} \cdot A_1 + Q_{h,d,2} \cdot A_2}{A_1 + A_2}$$

$Q_{h,d}$  über die Grundfläche gemittelter dynamisch berechneter Heizwärmebedarf [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ]

$Q_{h,d,1}, Q_{h,d,2}$  dynamisch berechneter Heizwärmebedarf für die Zone 1 bzw. 2 [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ]

$A_1, A_2$  Grundfläche der Zone 1 bzw. 2 [ $\text{m}^2$ ]

Der so gemittelte Heizwärmebedarf kann mit dem aus dem statischen Bilanzierungsverfahren verglichen werden.

In den Varianten wird ein Wärmeverlust bzw. -gewinn für die Zonen angegeben wenn diese unterschiedlich geheizt werden. Dieser Verlust bzw. Gewinn kommt nur durch Transmission über das Trennbauteil zwischen den Zonen zustande.

### 5.2.1. Eingangsdaten für die statische Bilanzierungsmethode

Im Lauf der Variantenstudie wird der simulierte Heizwärmebedarf mit einem statisch berechneten verglichen. Für diese statische Berechnung wird eine

Heizwärmebedarfsberechnung verwendet, welche vom Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, zur Verfügung gestellt wurde. Die Klimadaten für die dynamische und die statische Methode stammen aus derselben Datenbank.

Die statische Berechnung des Heizwärmebedarfs (Bilanzierungsverfahren) basiert auf [ONO10] und [ONO11] und lautet wie folgt:

$$Q_h = (Q_T + Q_V) - \eta \cdot (Q_S + Q_I)$$

$Q_h$  Heizwärmebedarf [kWh]

$Q_T$  Transmissionsverluste [kWh]

$Q_V$  Lüftungsverluste [kWh]

$\eta$  Ausnutzungsgrad [-]

$Q_S$  solare Gewinne [kWh]

$Q_I$  innere Gewinne [kWh]

Alle thermischen Randbedingungen für die Berechnung werden aus den jeweiligen Varianten übernommen. Die Luftwechselrate und die operative Raumtemperatur werden zuerst dynamisch für jede Variante simuliert und dann über die Grundfläche der Zonen gemittelt. Sie können so in dem Bilanzierungsverfahren eingesetzt werden.

Monatliche Mittelung der operativen Raumtemperatur über die Grundfläche:

$$T_{o,k,ges} = \frac{T_{o,k,1} \cdot A_1 + T_{o,k,2} \cdot A_2}{A_1 + A_2}$$

$T_{o,k,ges}$  über die Grundfläche gemittelte operative Raumtemperatur für das Monat k [°C]

$T_{o,k,1}, T_{o,k,2}$  arithmetisches Mittel der operativen Raumtemperatur für das Monat k in der Zone 1 bzw. 2 [°C]

$A_1, A_2$  Grundfläche der Zone 1 bzw. 2 [m<sup>2</sup>]

Mittelung der Luftwechselrate über die Grundfläche für die gesamte Heizperiode:

$$n_{\text{ges}} = \frac{n_1 \cdot A_1 + n_2 \cdot A_2}{A_1 + A_2}$$

$n_{\text{ges}}$  über die Grundfläche gemittelte Luftwechselrate [1/h]

$n_1, n_2$  arithmetisches Mittel der Luftwechselrate in der Zone 1 bzw. 2 [1/h]

$A_1, A_2$  Grundfläche der Zone 1 bzw. 2 [m<sup>2</sup>]

Es ergeben sich folgende Werte für die Luftwechselraten  $n_{\text{ges}}$ :

Variante 1: 0,71 1/h

Variante 2: 0,48 1/h

Variante 3: 0,42 1/h

Die Berechnung des Lüftungsleitwerts wurde leicht abgeändert, statt dem Nettovolumen wird das Bruttovolumen der beiden Zonen angesetzt um den Vergleich zu erleichtern.

$$L_v = 0,34 \cdot n_{\text{ges}} \cdot V_{\text{brutto}}$$

$L_v$  Lüftungsleitwert [W/K]

$V_{\text{brutto}}$  Bruttovolumen [m<sup>3</sup>]

Der Wert 0,34 Wh/m<sup>3</sup>K ergibt sich aus folgender Gleichung [ONO10]:

$$0,34 = \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} \cdot \frac{1}{3600}$$

$\rho_{\text{air}}$  Dichte von Luft = 1,23 [kg/m<sup>3</sup>]

$c_{\text{air}}$  spezifische Wärmekapazität von Luft = 1006 [J/kgK]

Für die statische Bilanzierungsmethode werden 5 W/m<sup>2</sup> als innere Lasten angesetzt, somit entspricht die Summe der Lasten über die Heizperiode jener in der dynamischen Simulation.

Sowohl in der Simulation als auch in der Bilanzierung wird eine Verschattung mit einem z-Wert von 0,5 berücksichtigt.

Um das Erdreich mit der Bilanzierungsmethode besser abbilden zu können, wurde monatsweise bei den Transmissionsverlusten über die Bodenplatte statt der Außenlufttemperatur die tatsächliche Temperatur unter der Bodenplatte



eingesetzt. Diese Werte stammen aus der Simulation und wurden mit den Methoden aus Kapitel 3.1.3 berechnet.

### 5.3. Variante 1

Diese Variante beschreibt einen alten Stahlbetonbau mit U-Werten für außenluftberührende Bauteile um  $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die Infiltrationsrate ist mit einem durchschnittlichen Luftwechsel von  $0,3 \text{ 1/h}$  recht hoch angesetzt. Die niedrige Luftdichtheit und die schlechte Wärmedämmung werden es unmöglich machen, ein angenehmes Raumklima im unbeheizten Raum zu schaffen.

Die verwendeten Bauteilaufbauten befinden sich in der folgenden Tabelle, alle Materialkennwerte sind der Tab. 5 in Kapitel 4.1.1 zu entnehmen. Die Fenster besitzen einen U-Wert von  $2,73 \text{ W/m}^2\text{K}$  und einen g-Wert von  $0,605$ .

Tab. 8: Variante 1 – Bauteilaufbauten

außenluftberührende Bauteilaufbauten Variante 1 (von innen nach außen)		
Bauteile	d	U-Wert
	[m]	[W/m <sup>2</sup> K]
<b>Außenwand, Bodenplatte, Dach</b>		
Stahlbeton	0,3	0,96
Wärmedämmung	0,03	
<b>Haustür</b>		
Holz	0,01	1,92
Dämmung	0,01	
Holz	0,01	

Im Folgenden befinden sich die Ergebnisse der Variante 1. Die Varianten a werden mit kontinuierlicher Heizung betrieben unabhängig von der Anwesenheit, die Varianten b werden mit ON/OFF-Controller geheizt bei dem nur Wärme zugeführt wird wenn sich jemand in der Wohnung befindet.

### 5.3.1. Variante 1a - beide Räume beheizt

In dieser Variante werden beide Zonen kontinuierlich geheizt, diese Ergebnisse dienen als Ausgangspunkt für die weiteren Untersuchungen innerhalb dieser Variante. Wärmeaustausch zwischen den Zonen findet bei geschlossener Tür nur durch Transmission über die trennenden Bauteile statt.

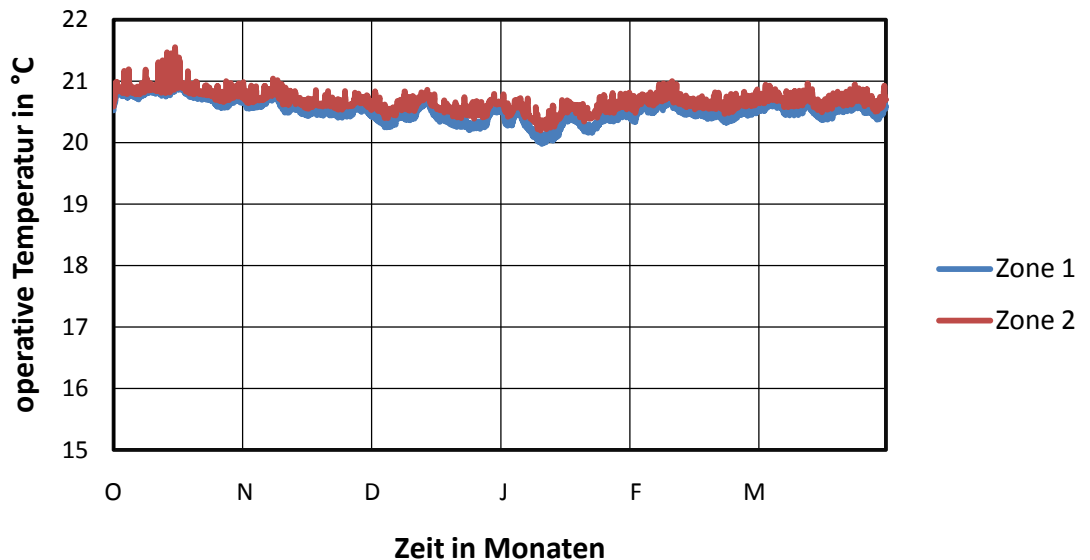


Abb. 44: Variante 1a - Verlauf der operativen Temperatur - beide Räume beheizt

Es ist ersichtlich, dass die Temperatur in Zone 2 wegen der Fensterausrichtung nach Süden etwas höher wird als in Zone 1. Trotz der hohen Leistung der Heizung folgt die operative Temperatur dem Außenklima was auf die schlechte thermische Hülle und die schlechte Luftdichtheit zurück zu führen ist. Der resultierende Wärmestrom zwischen den Zonen über die trennenden Bauteile ist nahezu Null.

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 208,90 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 221,30 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 213,90 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 226 kWh/m<sup>2</sup>.

### 5.3.2. Variante 1b - beide Räume beheizt

In dieser Variante werden beide Zonen mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.3.1.

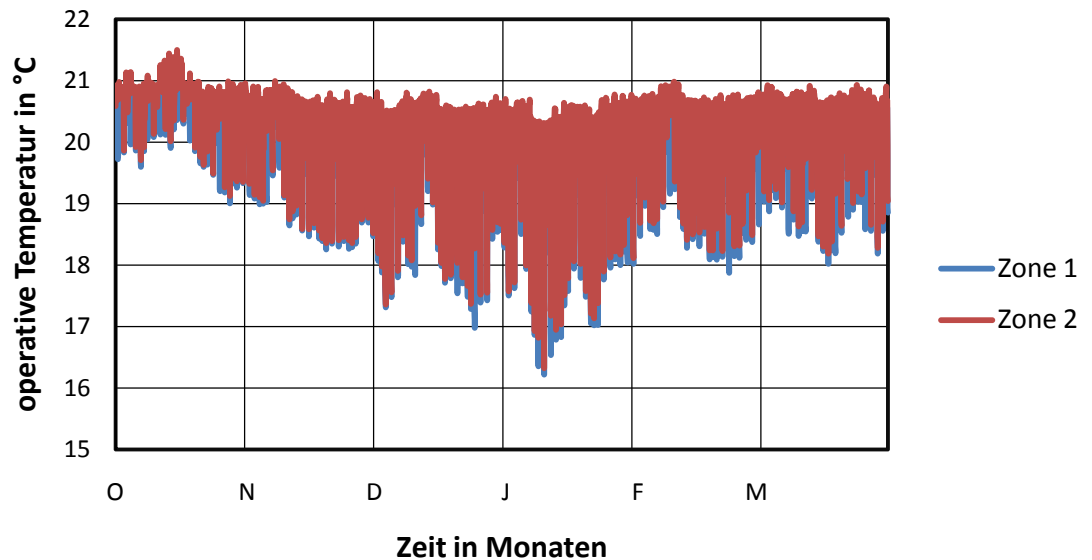


Abb. 45: Variante 1b - Verlauf der operativen Temperatur - beide Räume beheizt

Aus der Abbildung ist deutlich die Charakteristik eines ON/OFF-Reglers erkennbar, die operativen Raumtemperaturen schwanken beträchtlich, der Komfort für die NutzerInnen sinkt im Gegensatz zur kontinuierlichen Heizung. Die starken Schwankungen sind auf die schlechte thermische Hülle und die geringe Luftdichtheit zurückzuführen, das Gebäude kühlt sehr schnell aus und muss wieder auf 21 °C aufgeheizt werden. Die Auswirkung der geänderten Regelungsstrategie auf den Heizwärmebedarf ist gering. Der resultierende Wärmestrom zwischen den Zonen über die trennenden Bauteile ist nahezu Null.

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 204,00 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 216,60 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 209,00 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 221 kWh/m<sup>2</sup>.

### 5.3.3. Variante 1a – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen

In dieser Variante wird nur die Zone 1 kontinuierlich geheizt, Zone 2 mit dem Fenster nach Süden erhält Wärme durch solare Strahlung, durch die inneren Lasten und durch den Wärmegewinn über Transmission durch die trennenden Bauteile zwischen den Zonen. Die Tür ist geschlossen, es wird angenommen, dass diese dicht ist und kein Luftwechsel zwischen den Zonen stattfindet.

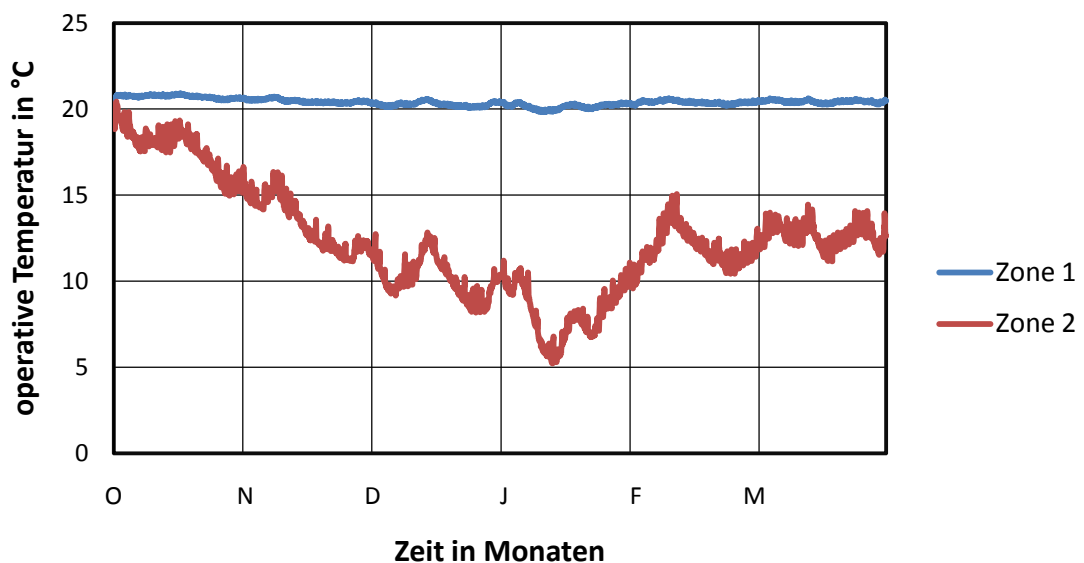


Abb. 46: Variante 1a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen

Aus dem Diagramm ist erkennbar, dass die warme Zone 1 kaum in der Lage ist nur durch Transmission über die Zwischenwand die Zone 2 „mit zu heizen“. Der Heizwärmebedarf steigt jedoch an, da sich zusätzliche Wärmeverluste über die Zwischenwand in Zone 2 einstellen. Diese Wärmeverluste, oder für den Fall der Zone 2 Wärmegewinne, werden aus dem Unterschied von Lufttemperatur zur Oberflächentemperatur berechnet (siehe Kapitel 3.4).

Zone 1 Wärmeverlust: 581,70 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 596,10 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 253,10 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 151,86 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 164 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.3.4. Variante 1b – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen

In dieser Variante wird die Zone 1 mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.3.3.

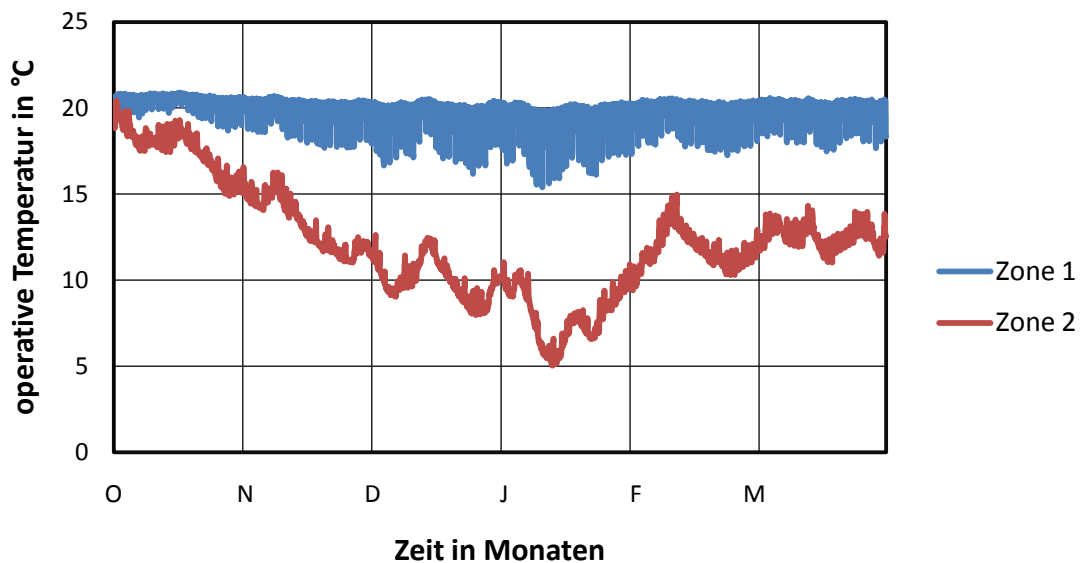


Abb. 47: Variante 1b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen

Es stellt sich derselbe Effekt wie bei Punkt 5.3.3 ein, die warme Zone 1 ist kaum in der Lage nur durch Transmission über die Zwischenwand die Zone 2 „mit zu heizen“. Zusätzlich schwankt die Temperatur in Zone 1 stark durch den ON/OFF-Regler. Die Auswirkung der geänderten Regelungsstrategie auf den Heizwärmebedarf ist gering. Es stellen sich folgende Wärmeverluste bzw. –gewinne ein:

Zone 1 Wärmeverlust: 561,40 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 578,10 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 245,90 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 147,54 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 148 kWh/m<sup>2</sup>.

### 5.3.5. Variante 1a – Ein Raum beheizt – Tür offen

In dieser Variante wird wieder nur die Zone 1 kontinuierlich geheizt, Zone 2 mit dem Fenster nach Süden erhält Wärme durch solare Strahlung, durch die inneren Lasten, durch den Wärmegewinn über die Zwischenwand und durch die warme Luft, welche über die offene Tür von Zone 1 nach Zone 2 strömt. Für Zone 1 bedeutet dies einen Wärmeverlust, dies wird sich in durch einem höheren Heizwärmebedarf widerspiegeln. Für Zone 2 ist dies jedoch ein Gewinn, dies wird sich durch die höheren Temperaturen in der Zone zeigen.

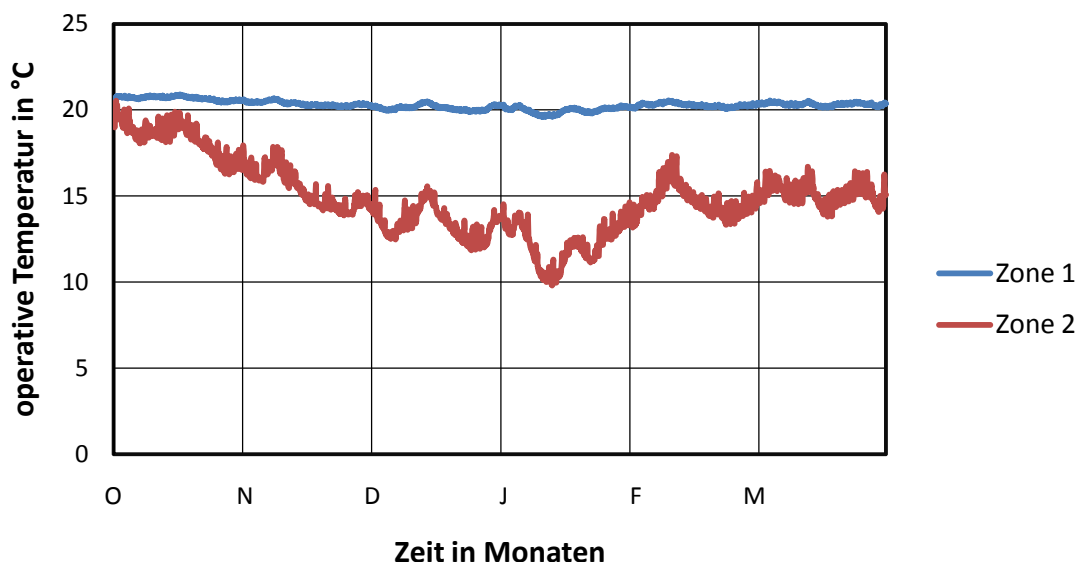


Abb. 48: Variante 1a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen

Aus dem Diagramm ist erkennbar, dass die warme Zone 1 jetzt über die offene Tür in der Lage ist die Zone 2 stärker zu erwärmen. Die Wärmeverluste für Zone 1 werden noch größer, was eine Steigerung des Heizwärmebedarfs mit sich bringt. Der Zone 1 wird durch den Luftwechsel über die Tür 2448 kWh Wärme entzogen. Folgende Wärmeverluste und –gewinne stellen sich rein durch Transmission über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmeverlust:	233,00 kWh
Zone 2 Wärmegewinn:	245,20 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 301,00 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 180,60 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 182 kWh/m<sup>2</sup>.

### 5.3.6. Variante 1b – Ein Raum beheizt – Tür offen

In dieser Variante wird die Zone 1 mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.3.5.

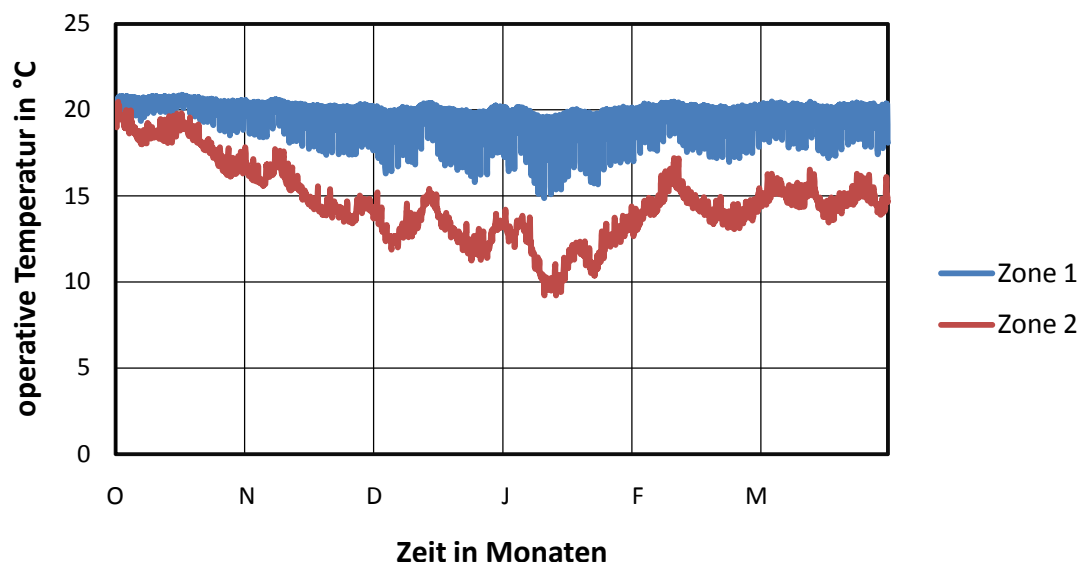


Abb. 49: Variante 1b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen

Es stellt sich derselbe Effekt wie bei Punkt 5.3.5 ein, die warme Zone 1 ist nun stärker in der Lage Zone 2 durch die offene Tür „mit zu heizen“. Aufgrund der Regelung schwankt die Temperatur in Zone 1 stark. Der Zone 1 wird durch den Luftwechsel über die Tür 2355 kWh Wärme entzogen. Folgende Wärmeverluste und –gewinne stellen sich rein durch Transmission über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmeverlust: 224,50 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 238,80 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 291,70 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 175,00 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 176 kWh/m<sup>2</sup>.



#### 5.4. Variante 2

In dieser Variante wird ein Gebäude betrachtet, welches, die Anforderungen an die thermische Hülle betreffend, den OIB Richtlinien [OIB07] genügt. Die Luftdichtheit wurde im Gegensatz zur vorherigen Variante verbessert, es stellt sich ein durchschnittlicher Luftwechsel von 0,1 1/h ein. Die verbesserte Luftdichtheit und die stärkere Wärmedämmung werden es möglich machen, den unbeheizten Raum stärker zu erwärmen.

Die verwendeten Bauteilaufbauten befinden sich in der folgenden Tabelle, alle Materialkennwerte sind der Tab. 5 in Kapitel 4.1.1 zu entnehmen. Die Fenster besitzen einen U-Wert von 1,39 W/m<sup>2</sup>K und einen g-Wert von 0,605.

Tab. 9: Variante 2 – Bauteilaufbauten

außenluftberührende Bauteilaufbauten Variante 2		
(von innen nach außen)		
Bauteile	d	U-Wert
	[m]	[W/m <sup>2</sup> K]
<b>Außenwand, Bodenplatte</b>		
Stahlbeton	0,3	0,33
Wärmedämmung	0,11	
<b>Dach</b>		
Stahlbeton	0,3	0,2
Wärmedämmung	0,19	
<b>Haustür</b>		
Holz	0,02	0,53
Dämmung	0,06	
Holz	0,02	

Im Folgenden befinden sich die Ergebnisse der Variante 2. Die Varianten a werden mit kontinuierlicher Heizung betrieben unabhängig von der

Anwesenheit, die Varianten b werden mit ON/OFF-Controller geheizt bei dem nur Wärme zugeführt wird wenn sich jemand in der Wohnung befindet.

#### 5.4.1. Variante 2a – beide Räume beheizt

In dieser Variante werden beide Zonen kontinuierlich geheizt, diese Ergebnisse dienen als Ausgangspunkt für die weiteren Untersuchungen innerhalb dieser Variante. Wärmeaustausch zwischen den Zonen findet bei geschlossener Tür nur durch Transmission über die trennenden Bauteile statt.

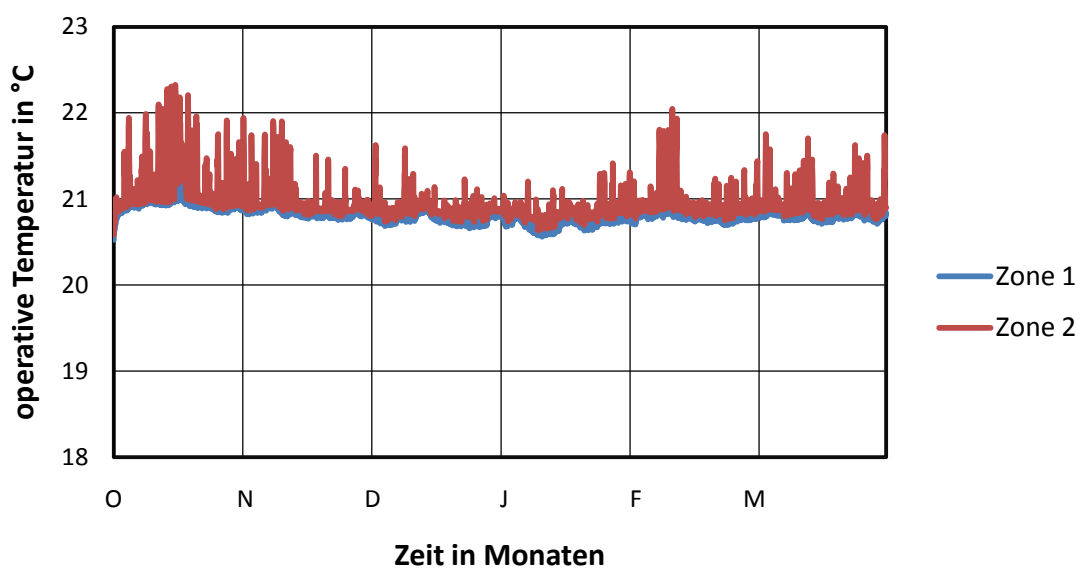


Abb. 50: Variante 2a - Verlauf der operativen Temperatur - beide Räume beheizt

Es ist ersichtlich, dass die Temperatur in Zone 2 wegen der Fensterausrichtung nach Süden einige Temperaturspitzen aufweist. Der solare Eintrag über das Fenster hat wegen der verbesserten Hülle eine größere Auswirkung. In Summe stellen sich für beide Zonen Gewinne über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmegewinn: 49,90 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 29,80 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 78,12 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 69,70 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 74,80 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 73 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.4.2. Variante 2b – beide Räume beheizt

In dieser Variante werden beide Zonen mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.4.1.

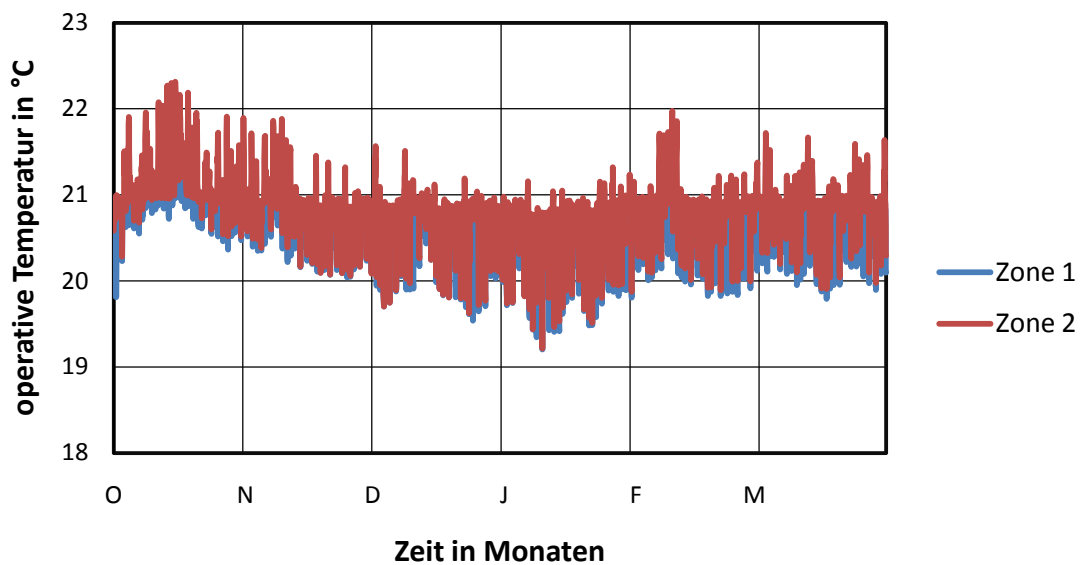


Abb. 51: Variante 2b - Verlauf der operativen Temperatur - beide Räume beheizt

Aus der Abbildung ist deutlich die Charakteristik eines ON/OFF-Reglers erkennbar, die operativen Raumtemperaturen schwanken aber aufgrund der verbesserten thermischen Hülle nur in einer Bandbreite von ca. 3 °C. Die Auswirkung der geänderten Regelungsstrategie auf den Heizwärmebedarf ist gering. In Summe stellen sich für beide Zonen Gewinne über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmegewinn: 51,89 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 28,72 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 77,28 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 69,23 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 74,10 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 71 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.4.3. Variante 2a – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen

In dieser Variante wird nur die Zone 1 kontinuierlich geheizt, Zone 2 mit dem Fenster nach Süden erhält Wärme durch solare Strahlung, durch die inneren Lasten und durch den Wärmegewinn über die trennenden Bauteile zwischen den Zonen. Die Tür ist geschlossen, es wird angenommen, dass diese dicht ist und kein Luftwechsel zwischen den Zonen stattfindet.

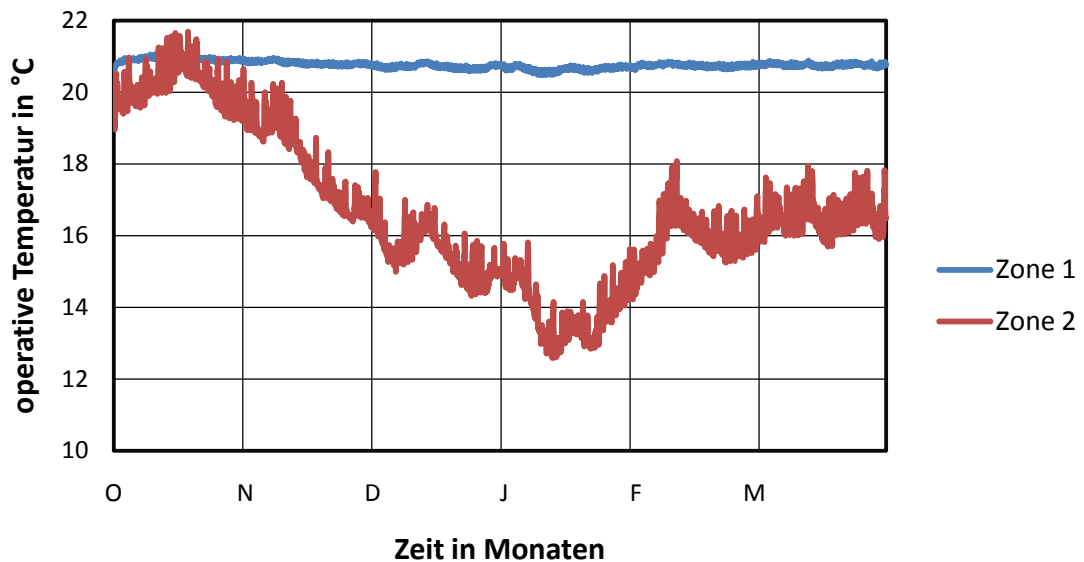


Abb. 52: Variante 2a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen

Durch die verbesserte thermische Hülle kann die Zone 1 die Zone 2 schon merklich besser „mit heizen“. Der Heizwärmebedarf steigt wiederum an, da sich zusätzliche Wärmeverluste über die Zwischenwand in Zone 2 einstellen. Diese Wärmeverluste, oder für den Fall der Zone 2 Wärmegewinne, werden aus dem Unterschied Lufttemperatur zur Oberflächentemperatur berechnet (siehe Kapitel 3.4).

Zone 1 Wärmeverlust: 246,30 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 333,30 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 101,20 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 60,72 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 60 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.4.4. Variante 2b – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen

In dieser Variante wird die Zone 1 mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.4.3.

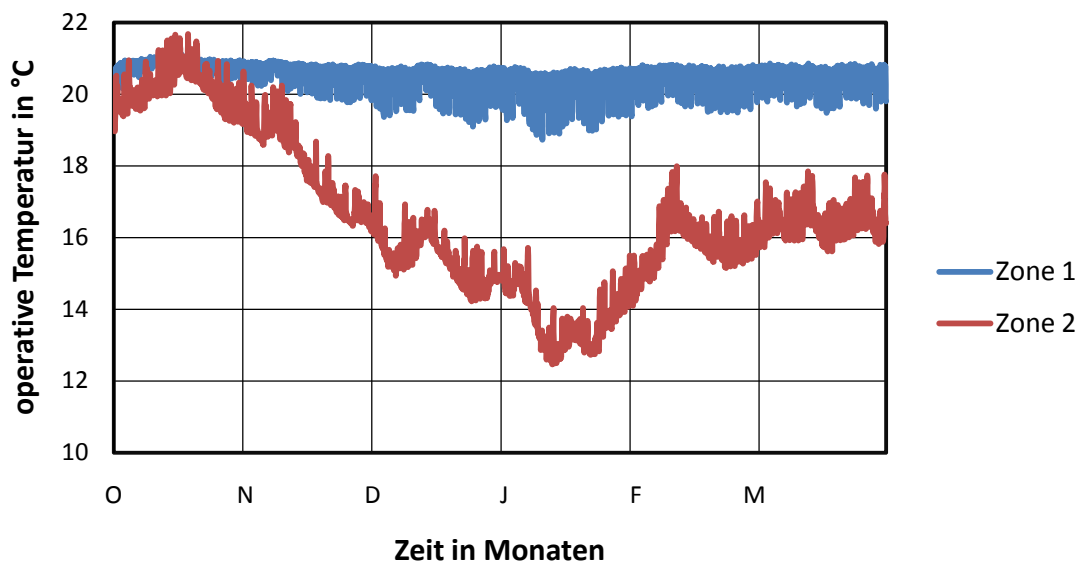


Abb. 53: Variante 2b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen

Es stellt sich derselbe Effekt wie bei Punkt 5.4.3 ein, die warme Zone 1 ist nun, aufgrund der verbesserten thermischen Hülle, besser in der Lage nur durch Transmission über die Zwischenwand die Zone 2 „mit zu heizen“. Zusätzlich schwankt die Temperatur in Zone 1 stark durch den ON/OFF-Regler. Die Auswirkung der geänderten Regelungsstrategie auf den Heizwärmebedarf ist gering. Es stellen sich folgende Wärmeverluste bzw. –gewinne ein:

Zone 1 Wärmeverlust: 240,70 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 327,90 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 99,80 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 59,82 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 59 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.4.5. Variante 2a – Ein Raum beheizt – Tür offen

In dieser Variante wird wieder nur die Zone 1 kontinuierlich geheizt, Zone 2 mit dem Fenster nach Süden erhält Wärme durch solare Strahlung, durch die inneren Lasten, durch den Wärmegewinn über die Zwischenwand und durch die warme Luft, welche über die offene Tür von Zone 1 nach Zone 2 strömt. Für Zone 1 bedeutet dies einen Wärmeverlust, dies wird sich auch durch einen höheren Heizwärmebedarf widerspiegeln. Für Zone 2 ist dies jedoch ein Gewinn, dies wird sich durch die höheren Temperaturen in der Zone zeigen.

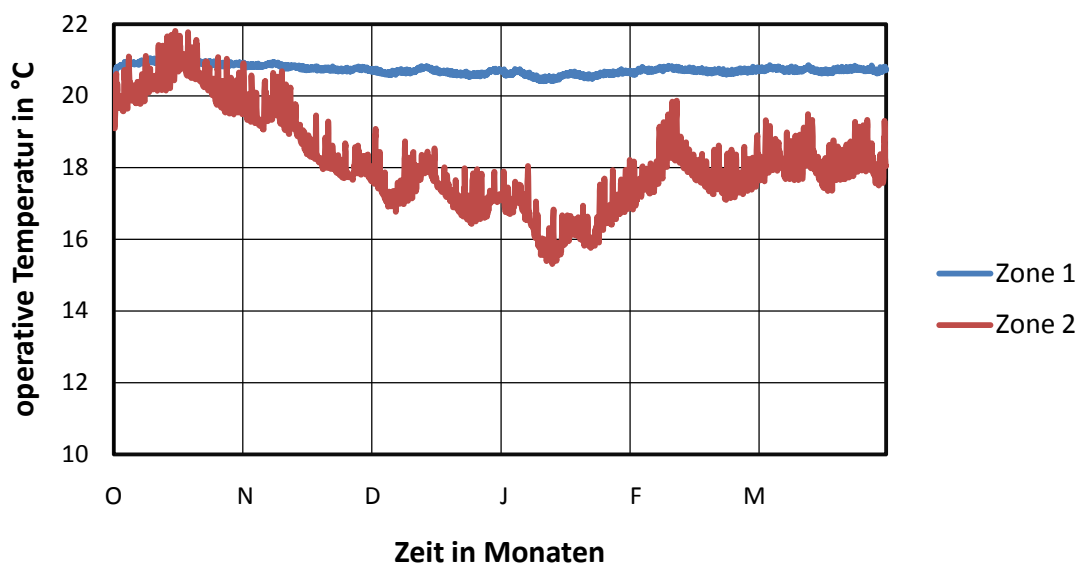


Abb. 54: Variante 2a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen

Aus dem Diagramm ist erkennbar, dass die warme Zone 1 jetzt über die offene Tür in der Lage ist die Zone 2 stärker zu erwärmen. Die Wärmeverluste für Zone 1 werden noch größer, was eine weitere Steigerung des Heizwärmebedarfs mit sich bringt. Der Zone 1 wird durch den Luftwechsel über die Tür 883,6 kWh Wärme entzogen. Folgende Wärmeverluste und –gewinne stellen sich rein durch Transmission über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmeverlust: 81,60 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 160,20 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 116,20 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 69,72 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 64 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.4.6. Variante 2b – Ein Raum beheizt – Tür offen

In dieser Variante wird die Zone 1 mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.4.5.

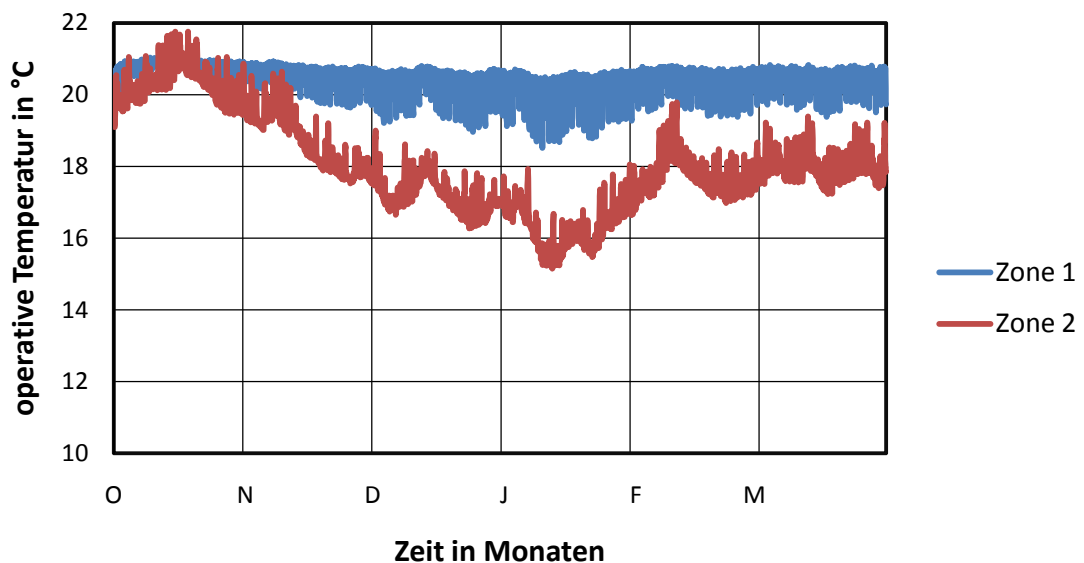


Abb. 55: Variante 2b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen

Es stellt sich derselbe Effekt wie bei Punkt 5.4.5 ein, die warme Zone 1 ist nun stärker in der Lage Zone 2 durch die offene Tür „mit zu heizen“. Aufgrund der Regelung schwankt die Temperatur in Zone 1. Der Zone 1 wird durch den Luftwechsel über die Tür 865,6 kWh Wärme entzogen. Folgende Wärmeverluste und –gewinne stellen sich rein durch Transmission über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmeverlust: 79,24 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 158,00 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 114,40 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 68,64 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 63 kWh/m<sup>2</sup>.



### 5.5. Variante 3

Variante 3 besitzt eine thermische Hülle in Passivhausqualität. Bauteile, die an die Außenluft grenzen, müssen einen U-Wert kleiner als  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  aufweisen. Die Infiltrationsrate ist mit einem durchschnittlichen Luftwechsel von  $0,05 \text{ 1/h}$  angesetzt. Die hohe Luftdichtheit und die gute Wärmedämmung werden es nun ermöglichen, ein angenehmes Raumklima im unbeheizten Raum zu schaffen.

Die verwendeten Bauteilaufbauten befinden sich in der folgenden Tabelle, alle Materialkennwerte sind der Tab. 5 in Kapitel 4.1.1 zu entnehmen. Die Fenster besitzen einen U-Wert von  $0,78 \text{ W/m}^2\text{K}$  und einen g-Wert von  $0,605$ .

Tab. 10: Variante 3 – Bauteilaufbauten

außenluftberührende Bauteilaufbauten Variante 3 (von innen nach außen)		
Bauteile	d	U-Wert
	[m]	[W/m <sup>2</sup> K]
<b>Außenwand, Bodenplatte, Dach</b>		
Stahlbeton	0,3	0,1
Wärmedämmung	0,37	
<b>Haustür</b>		
Holz	0,02	0,35
Dämmung	0,1	
Holz	0,02	

Im Folgenden befinden sich die Ergebnisse der Variante 3. Die Varianten a werden mit kontinuierlicher Heizung betrieben unabhängig von der Anwesenheit, die Varianten b werden mit ON/OFF-Controller geheizt bei dem nur Wärme zugeführt wird wenn sich jemand in der Wohnung befindet.

### 5.5.1. Variante 3a – beide Räume beheizt

In dieser Variante werden beide Zonen kontinuierlich geheizt, diese Ergebnisse dienen als Ausgangspunkt für die weiteren Untersuchungen innerhalb dieser Variante. Wärmeaustausch zwischen den Zonen findet bei geschlossener Tür nur durch Transmission über die trennenden Bauteile statt.

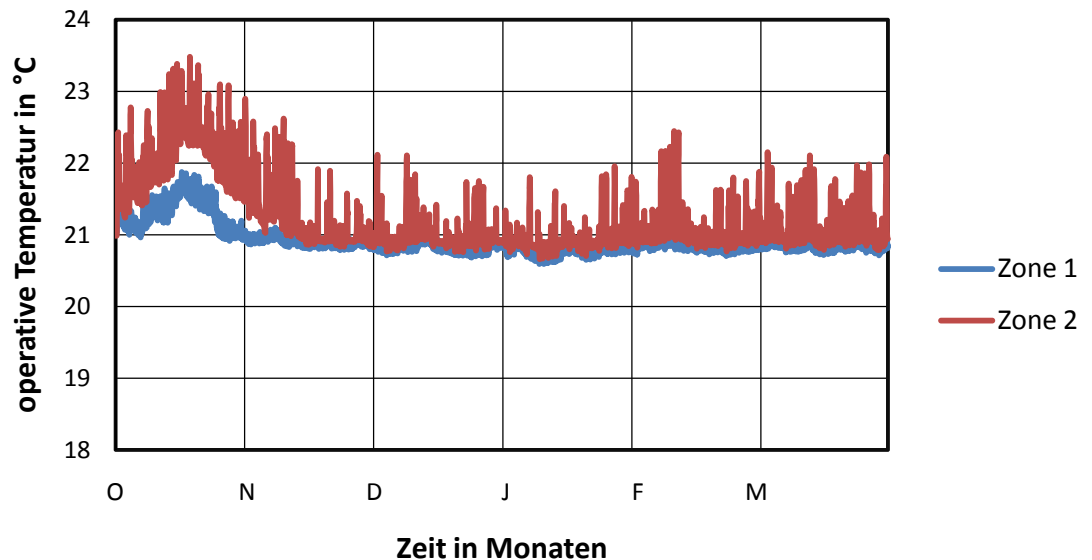


Abb. 56: Variante 3a - Verlauf der operativen Temperatur - beide Zonen beheizt

Aus dem Diagramm ist erkennbar, dass die Temperatur in Zone 2 wegen der Fensterausrichtung nach Süden mehrere Temperaturspitzen aufweist. Der solare Eintrag über das Fenster hat wegen der thermischen Hülle in Passivhausqualität eine größere Auswirkung. In Summe stellen sich für beide Zonen Gewinne über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmegewinn: 81,05 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 35,67 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 39,72 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 26,50 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 34,45 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 29 kWh/m<sup>2</sup>.

### 5.5.2. Variante 3b – beide Räume beheizt

In dieser Variante werden beide Zonen mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.5.1.

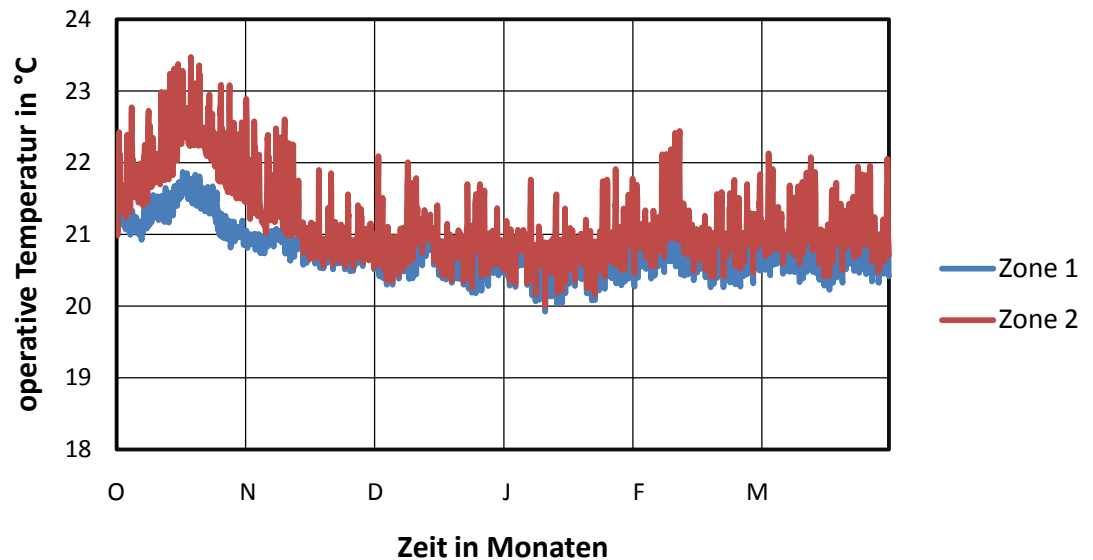


Abb. 57: Variante 3b - Verlauf der operativen Temperatur - beide Zonen beheizt

Aus der Abbildung ist deutlich die Charakteristik eines ON/OFF-Reglers erkennbar, die operativen Raumtemperaturen schwanken aber aufgrund der verbesserten thermischen Hülle nur gering, das Gebäude kühlt langsamer aus. Nur einmal wird die Temperatur von 20 °C unterschritten. Die Auswirkung der geänderten Regelungsstrategie auf den Heizwärmebedarf ist sehr klein. In Summe stellen sich für beide Zonen Gewinne über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmegewinn: 82,50 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 34,20 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 39,35 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 26,50 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 34,22 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 28 kWh/m<sup>2</sup>.

### 5.5.3. Variante 3a – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen

In dieser Variante wird nur die Zone 1 kontinuierlich geheizt, Zone 2 mit dem Fenster nach Süden erhält Wärme durch solare Strahlung, durch die inneren Lasten und durch den Wärmegewinn über die trennenden Bauteile zwischen den Zonen. Die Tür ist geschlossen, es wird angenommen, dass diese dicht ist und kein Luftwechsel zwischen den Zonen stattfindet.

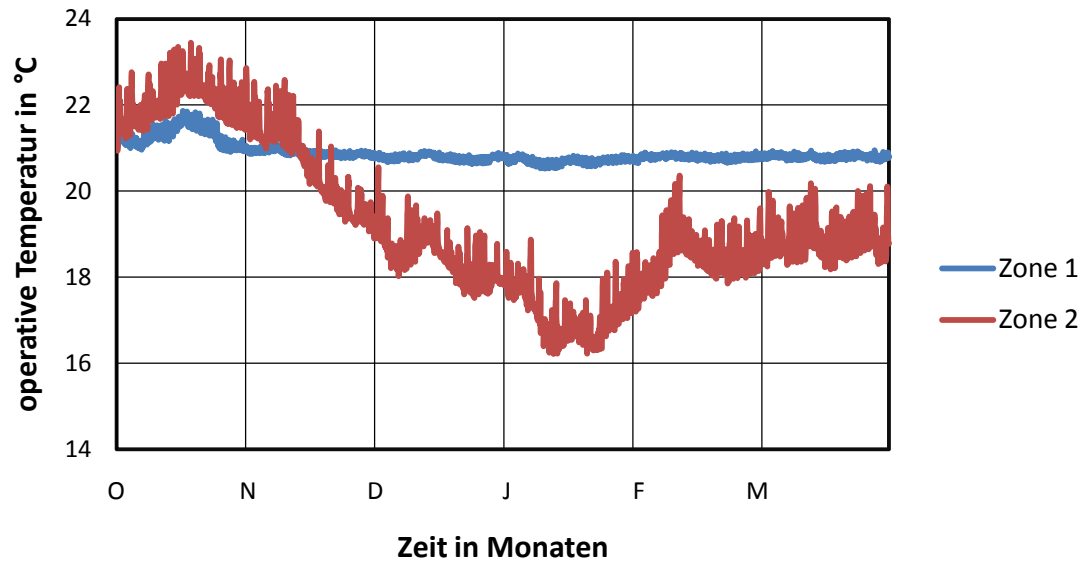


Abb. 58: Variante 3a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen

Durch die gute thermische Hülle kann die Zone 1 die Zone 2 besser „mit heizen“, auch bei geschlossener Tür. Der Heizwärmebedarf in Zone 1 steigt ein wenig an, da sich zusätzliche Wärmeverluste über die Zwischenwand in Zone 2 einstellen. Diese Wärmeverluste, oder für den Fall der Zone 2 Wärmegewinne, werden aus dem Unterschied Lufttemperatur zur Oberflächentemperatur berechnet (siehe Kapitel 3.4).

Zone 1 Wärmeverlust: 54,10 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 173,00 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 50,26 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 30,20 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 25 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.5.4. Variante 3b – Ein Raum beheizt – Tür geschlossen

In dieser Variante wird die Zone 1 mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.5.3.

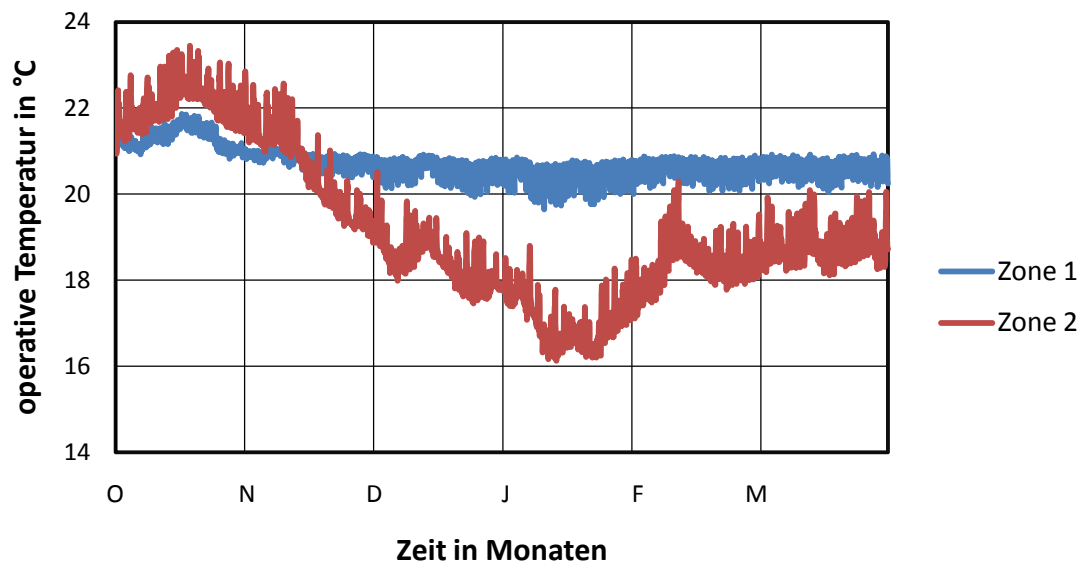


Abb. 59: Variante 3b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen

Es stellt sich derselbe Effekt wie bei Punkt 5.5.3 ein, die warme Zone 1 ist, auch bei geschlossener Tür, in der Lage Zone 2 besser „mit zu heizen“. Die Temperatur in Zone 1 schwankt etwas durch den ON/OFF-Regler. Die Auswirkung der geänderten Regelungsstrategie auf den Heizwärmebedarf ist gering. Es stellen sich folgende Wärmeverluste bzw. –gewinne ein:

Zone 1 Wärmeverlust: 52,44 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 170,80 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 49,75 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 29,85 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 25 kWh/m<sup>2</sup>.

### 5.5.5. Variante 3a – Ein Raum beheizt – Tür offen

In dieser Variante wird wieder nur die Zone 1 kontinuierlich geheizt, Zone 2 mit dem Fenster nach Süden erhält Wärme durch solare Strahlung, durch die inneren Lasten, durch den Wärmegewinn über die Zwischenwand und durch die warme Luft, welche über die offene Tür von Zone 1 nach Zone 2 strömt. Für Zone 1 bedeutet dies einen Wärmeverlust, dies wird sich auch durch einen höheren Heizwärmebedarf widerspiegeln. Für Zone 2 ist dies jedoch ein Gewinn, dies wird sich durch die höheren Temperaturen in der Zone zeigen.

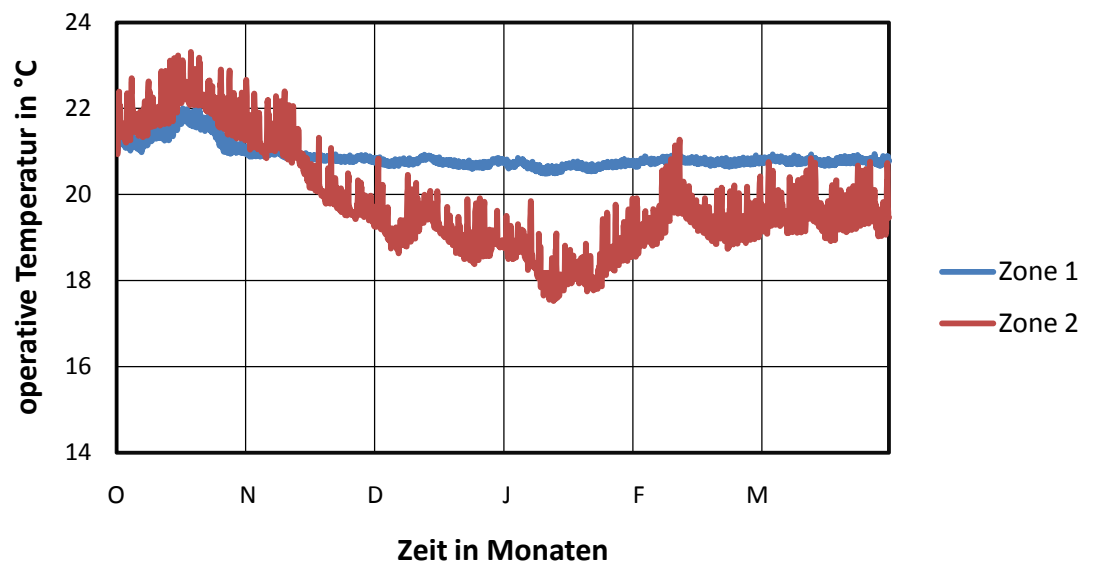


Abb. 60: Variante 3a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen

Durch die geöffnete Tür ist es nun möglich fast im gesamten betrachteten Zeitraum ein angenehmes Klima in Zone 2 herzustellen. Der Temperatureinbruch in der Zone 2 kommt aus einer Kälteperiode, die Außentemperaturen liegen über einen größeren Zeitraum zwischen -5 °C und -10 °C. Trotzdem bleiben die Temperaturen in Zone 2 meist zwischen 18 und 20 °C. Der Zone 1 wird durch den Luftwechsel über die Tür 294,4 kWh Wärme entzogen. Folgende Wärmegewinne stellen sich rein durch Transmission über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmegewinn: 2,30 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 104,40 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 55,02 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 33,01 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 26 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 5.5.6. Variante 3b – Ein Raum beheizt – Tür offen

In dieser Variante wird die Zone 1 mittels ON/OFF-Controller geheizt, alle anderen Randbedingungen decken sich mit jenen aus Punkt 5.5.5.

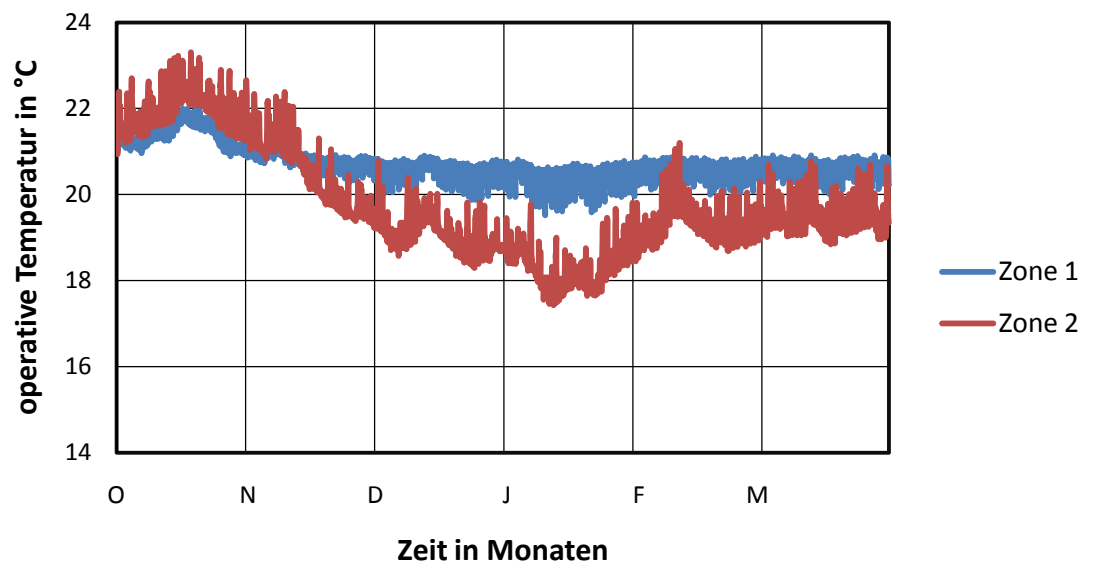


Abb. 61: Variante 3b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen

Wie in Punkt 5.5.5 ist es durch die geöffnete Tür möglich fast im gesamten betrachteten Zeitraum ein angenehmes Klima in Zone 2 herzustellen. Aufgrund der Regelung schwankt die Temperatur in Zone 1. Der Zone 1 wird durch den Luftwechsel über die Tür 288,0 kWh Wärme entzogen. Folgende Wärmegewinne stellen sich rein durch Transmission über die Zwischenwand ein:

Zone 1 Wärmegewinn: 3,70 kWh

Zone 2 Wärmegewinn: 103,40 kWh

Der Heizwärmebedarf beträgt:

Zone 1: 54,37 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 2: 0 kWh/m<sup>2</sup>

Zone 1 und 2 zusammengefasst: 32,62 kWh/m<sup>2</sup>

Der Heizwärmebedarf berechnet mit der statischen Bilanzierungsmethode beträgt 26 kWh/m<sup>2</sup>.

## **6. Zusammenfassung**

Die in Kapitel 5.1 erwähnte erwartete Tendenz ist durch die Varianten deutlich zu erkennen. Umso besser die thermische Hülle und die Luftdichtheit werden, desto eher ist ein beheizter Raum in der Lage einen benachbarten unbeheizten mit zu erwärmen. Es konnte gezeigt werden, dass eine ON/OFF-Regelung keine merklichen Einsparungen bringt, der Unterschied wird nahezu Null wenn die thermische Qualität der Außenhülle hoch ist. Bei schlecht gedämmten Gebäuden ergeben aus dem ON/OFF-Regler große Schwankungen der operativen Temperatur was sich negativ auf den Komfort auswirkt.

Werden beide Räume geheizt, ist der Temperaturverlauf in beide Zonen recht ähnlich, bei steigender thermischer Qualität der Außenbauteile werden die Auswirkungen des Fensters in Richtung Süden stärker bemerkbar.

Wird nun die Heizung in Zone 2 nicht benutzt, so fallen die Temperaturen bei schlechter Dämmung recht schnell ab, da der Wärmeeintrag über die Zwischenwand und die geringen inneren Lasten in Zone 2 zu wenig sind um die operative Temperatur angenehm zu halten.

Wenn die Tür zwischen den Zonen offen ist, kann mehr Wärme durch den Luftstrom transportiert werden. Dieser Wärmetransport wird rein durch den Temperaturunterschied zwischen den Zonen angetrieben. Wie aus den Variantenstudien ersichtlich ist, steigen mit besser werdender thermischer Hülle auch die durchschnittlichen Temperaturen in der Zone 2.

Im Folgenden befindet sich die Zusammenfassung der Varianten a und b, HWB<sub>1</sub> bzw. HWB<sub>2</sub> beschreibt den dynamisch simulierten Heizwärmebedarf in der jeweiligen Zone, HWB<sub>Ges.</sub> beschreibt den dynamisch errechneten Heizwärmebedarf gemittelt über die Grundfläche, HWB<sub>Bilanz</sub> ist der mit dem statischen Bilanzierungsverfahren berechneten Heizwärmebedarf, T<sub>2,0</sub> ist das



arithmetische Mittel der Temperaturen in Zone 2 und  $T_{2,\min}$  ist die kleinste auftretende Temperatur in Zone 2.

Tab. 11: Zusammenfassung der Variantenstudie a, kontinuierliche Heizung

Zusammenfassung der Variantenstudie a						
Variante	HWB1	HWB2	HWBGes.	HWBBilanz	$T_{2,\emptyset}$	$T_{2,\min}$
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	°C	°C
<b>Variante 1a</b>						
beide Räume beheizt	208,9	221,3	213,9	226	20,7	20,2
Zone 1 beheizt Tür geschlossen	253,1	0	151,9	164	12,3	5,2
Zone 1 beheizt Tür offen	301	0	180,6	182	14,8	9,8
<b>Variante 2a</b>						
beide Räume beheizt	78,1	69,7	74,8	73	20,9	20,6
Zone 1 beheizt Tür geschlossen	101,2	0	60,7	60	16,6	12,6
Zone 1 beheizt Tür offen	116,2	0	69,7	64	18,1	15,3
<b>Variante 3a</b>						
beide Räume beheizt	39,7	26,5	34,5	29	21,2	20,6
Zone 1 beheizt Tür geschlossen	50,3	0	30,2	25	19,2	16,2
Zone 1 beheizt Tür offen	55,0	0	33,0	26	19,8	17,5

Tab. 12: Zusammenfassung der Variantenstudie b, Heizung mit ON/OFF-Regler

Zusammenfassung der Variantenstudie b						
Variante	HWB <sub>1</sub>	HWB <sub>2</sub>	HWB <sub>Ges.</sub>	HWB <sub>Bilanz</sub>	T <sub>2,Ø</sub>	T <sub>2,min</sub>
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup> ]	°C	°C
<b>Variante 1b</b>						
beide Räume beheizt	204,0	216,6	209,0	221	20,4	16,3
Zone 1 beheizt Tür geschlossen	245,9	0	147,5	148	12,3	5,0
Zone 1 beheizt Tür offen	291,7	0	175,0	176	14,6	9,2
<b>Variante 2b</b>						
beide Räume beheizt	77,3	69,2	74,1	71	20,9	19,2
Zone 1 beheizt Tür geschlossen	99,8	0	59,9	59	16,5	12,5
Zone 1 beheizt Tür offen	114,4	0	68,6	63	18,0	15,2
<b>Variante 3b</b>						
beide Räume beheizt	39,4	26,5	34,2	28	21,4	20,0
Zone 1 beheizt Tür geschlossen	49,8	0	29,9	25	19,2	16,1
Zone 1 beheizt Tür offen	54,4	0	32,6	26	19,7	17,4

## 7. Anhang

### 7.1. **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Koordinaten zur Bestimmung des Sonnenstands aus [RIE94] .....	5
Abb. 2: Zeitgleichung für ein Jahr in Minuten.....	6
Abb. 3: Definition Azimut und Neigung eines Fensters aus [ONO97] .....	8
Abb. 4: Verlauf des Einfallswinkels für den 15. August auf ein Nordfenster.....	9
Abb. 5: Außenwandmodul in Simulink .....	11
Abb. 6: Variablen zur Festlegung der Materialkennwerte und Abmessungen.....	12
Abb. 7: Definition der Variablen in einer Textdatei .....	12
Abb. 8: Diskretisiertes Wandmodell für die Berechnung eines inneren Knotens .....	13
Abb. 9: Berechnung eines Knotens im Wandinneren mit Simulink.....	16
Abb. 10: Diskretisiertes Wandmodell für die Berechnung eines Knotens zur Zone .....	17
Abb. 11: Berechnung eines Oberflächenknotens zur Zone in Simulink .....	19
Abb. 12: Diskretisiertes Wandmodell für die Berechnung eines Knotens zur Außenluft.....	20
Abb. 13: Berechnung eines Temperaturknotens zum Außenklima in Simulink.....	22
Abb. 14: Diskretisiertes Modell des Fensters.....	23
Abb. 15: Widerstandsknoten in Simulink .....	26
Abb. 16: Modell für die Bodenplatte .....	28
Abb. 17: Temperatur unter der Bodenplatte .....	32
Abb. 18: Berechnung der virtuellen Temperatur in Simulink .....	33
Abb. 19: P-Controller in Simulink .....	35
Abb. 20: Berechnung des Luftvolumenstroms bei geöffnetem Fenster in Simulink .....	37
Abb. 21: Aktivierung des Sonnenschutzes in Simulink.....	38
Abb. 22: Infiltrationsmodell.....	39
Abb. 23: Berechnung der Infiltration in Simulink .....	42
Abb. 24: Überblick Zonenmodul.....	44
Abb. 25: Strahlungsknoten im Wärmeaustausch mit Oberflächen .....	48
Abb. 26: Modellierung des Zonenmoduls in Simulink.....	51
Abb. 27: Diskretisierung der Zwischenwand.....	52
Abb. 28: Grundriss für Vergleich.....	53
Abb. 29: Angesetzter Luftwechsel für beide Simulationsumgebungen .....	57
Abb. 30: Vergleich 1 Temperaturverlauf HAMBASE .....	59
Abb. 31: Vergleich 1 Temperaturverlauf eigene Arbeit.....	59
Abb. 32: Vergleich 1 Differenz zwischen den Temperaturverläufen.....	60
Abb. 33: Vergleich 2 Temperaturverlauf HAMBASE .....	61
Abb. 34: Vergleich 2 Temperaturverlauf eigene Arbeit.....	61
Abb. 35: Vergleich 2 Differenz zwischen den Temperaturverläufen.....	62
Abb. 36: Vergleich 3 Temperaturverlauf HAMBASE .....	63
Abb. 37: Vergleich 3 Temperaturverlauf eigene Arbeit.....	63

Abb. 38: Vergleich 3 Differenz der Temperaturverläufe .....	64
Abb. 39: Vergleich 4 Temperaturverlauf HAMBASE .....	65
Abb. 40: Vergleich 4 Temperaturverlauf eigene Arbeit .....	65
Abb. 41: Vergleich 4 Differenz zwischen Temperaturverläufen .....	66
Abb. 42: Außentemperatur in der Heizperiode .....	68
Abb. 43: Grundriss für die Variantenstudie .....	69
Abb. 44: Variante 1a - Verlauf der operativen Temperatur - beide Räume beheizt .....	76
Abb. 45: Variante 1b - Verlauf der operativen Temperatur - beide Räume beheizt .....	77
Abb. 46: Variante 1a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen	78
Abb. 47: Variante 1b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen	79
Abb. 48: Variante 1a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen .....	80
Abb. 49: Variante 1b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen .....	81
Abb. 50: Variante 2a - Verlauf der operativen Temperatur - beide Räume beheizt .....	84
Abb. 51: Variante 2b - Verlauf der operativen Temperatur - beide Räume beheizt .....	85
Abb. 52: Variante 2a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen	86
Abb. 53: Variante 2b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen	87
Abb. 54: Variante 2a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen .....	88
Abb. 55: Variante 2b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen .....	89
Abb. 56: Variante 3a - Verlauf der operativen Temperatur - beide Zonen beheizt .....	92
Abb. 57: Variante 3b - Verlauf der operativen Temperatur - beide Zonen beheizt .....	93
Abb. 58: Variante 3a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen	94
Abb. 59: Variante 3b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür geschlossen	95
Abb. 60: Variante 3a - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen .....	96
Abb. 61: Variante 3b - Verlauf der operativen Temperatur - Zone 1 beheizt - Tür offen .....	97

## 7.2. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Winkelabhängige Transmissions- und Absorptionsgrade für das verwendete Fenster	27
Tab. 2: innere Lasten aufgrund von Geräten und Tätigkeiten .....	43
Tab. 3: innere Lasten aufgrund von Beleuchtung, Kleingeräten und Elektronik .....	44
Tab. 4: Bauteile mit Fläche und Orientierung .....	54
Tab. 5: Aufbauten und Materialkennwerte .....	55
Tab. 6: Bauteilflächen und Orientierung für die Variantenstudie .....	70
Tab. 7: innere Lasten für einen typischen Wochentag .....	71
Tab. 8: Variante 1 – Bauteilaufbauten .....	75
Tab. 9: Variante 2 – Bauteilaufbauten .....	83
Tab. 10: Variante 3 – Bauteilaufbauten .....	91
Tab. 11: Zusammenfassung der Variantenstudie a, kontinuierliche Heizung .....	99
Tab. 12: Zusammenfassung der Variantenstudie b, Heizung mit ON/OFF-Regler .....	100

## 8. Literatur

[CLA01] Clarke, J.A.: Energy Simulation in Building Design. Second Edition. Oxford: Butterworth Heinemann: 2001

[DIN06] DIN EN ISO 7730. Deutsche Norm. Ergonomie der thermischen Umgebung. Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2006

[DIN07a] DIN EN 15242. Deutsche Norm. Lüftung von Gebäuden – Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2007

[DIN07b] DIN EN 13779. Deutsche Norm. Lüftung von Nichtwohngebäuden. Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2007

[DIN08] DIN EN 13790. Deutsche Norm. Energieeffizienz von Gebäuden. Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2008

[DTU02] Rammer Nielsen, Toke u.a.; Modeling Building Physics in Simulink (2002). <http://www.ibpt.org/>. Aktualisierungsdatum: 01.09.2010

[DUF91] Duffie, John A.; Beckman, William A.: Solar Engineering of Thermal Processes. Second Edition. New York: Wiley Interscience, 1991.

[FIS08] Fischer, Heinz-Martin; Freymuth, Hanns et al.: Lehrbuch der Bauphysik. Schall. Wärme. Feuchte. Licht. Brand. Klima. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2008.

[HAM03] Sasic Kalagasidis, Angela; HAM-Tools. International Building Physics Toolbox. Block documentation (2003). <http://www.ibpt.org/>. Aktualisierungsdatum: 01.09.2010

[HAM11] HAMBASE. Heat Air and Moisture model for Building And Systems Evaluation. <http://archbps1.campus.tue.nl/bpswiki/index.php/Hamlab/>. Aktualisierungsdatum: 20.02.2011

[HTO02] Sasic Kalagasidis, Angela; H-Tools. International Building Physics Toolbox. Block documentation (2002). <http://www.ibpt.org/>. Aktualisierungsdatum: 01.09.2010

[HWB10] Heizwärmebedarfsberechnung. Version 2010; Institut für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, TU Wien, 2010

[IBP11] International Building Physics Toolbox. <http://www.ibpt.org/>. Aktualisierungsdatum: 22.02.2011

[ISO04] International Standard ISO 13791. Thermal performance of buildings — Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling — General criteria and validation procedures. Genf: European Committee for Standardization (CEN), Technical Committee ISO/TC 163, 2004

[OIB07] OIB – Richtlinie 6. Energieeinsparung und Wärmeschutz. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2007

[ONO97] ÖNORM H 6040. Lüftungstechnische Anlagen. Kühllastberechnung. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 1997

[ONO08] ÖNORM EN 13370. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Wärmeübertragung über das Erdreich. Berechnungsverfahren. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2008.

[ONO10] ÖNORM B 8110-6. Wärmeschutz im Hochbau. Grundlagen und Nachweisverfahren. Heizwärmebedarf und Kühlbedarf. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2010.

[ONO11] ÖNORM H 5056. Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Heiotechnik-Energiebedarf. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2011.

[PHP07] Feist, Wolfgang: Passivhaus Projektierungspaket 2007. PHPP 2007. Darmstadt: Passivhausinstitut 2007

[REI10] Reinisch, Christian; Kastner, Wolfgang; Kofler, Mario J.; ThinkHome: A Smart Home as Digital Ecosystem, In: *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST 2010)*, April 2010, S. 256-261

[RIE94] Rietschel; Raumklimatechnik. Hrsg. von Horst Esdorn. 16. Auflage. Berlin [u.a.]: Springer, 1994

[VAZ10] Vázquez, Félix Iglesias; Kastner, Wolfgang; Usage Profiles for Sustainable Buildings, In: *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 IEEE Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST 2010)*, September 2010, S. 1-8

[WIN11] WINDOWS 4.1. <http://windows.lbl.gov/software/window/window.html/>. Aktualisierungsdatum: 01.09.2010

[WIT09] de Wit, Martin; HAMBASE. Part I Theory. Heat Air and Moisture model for Building And Systems Evaluation (2009). [http://archbps1.campus.tue.nl/bpswiki/images/3/3a/Hambasetheorydec\\_2009.pdf/](http://archbps1.campus.tue.nl/bpswiki/images/3/3a/Hambasetheorydec_2009.pdf/). Aktualisierungsdatum: 07.11.2010

[ZAM11] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. [http://www.zamg.ac.at/klima/sonne\\_mond/?ts=1288626421/](http://www.zamg.ac.at/klima/sonne_mond/?ts=1288626421/). Aktualisierungsdatum: 21.02.2011