



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**
**VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY**

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

UNTERSUCHUNGEN DES EINFLUSSES DER FEUCHTEPUFFERUNG UND DES LÜFTUNGSVERHALTENS AUF DAS RAUMKLIMA IN WOHNUNGEN DURCH NUMERISCHE SIMULATION

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

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas BEDNAR

Institut für Hochbau und Technologie
Zentrum für Bauphysik und Bauakustik
E 206

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Michael JUNG

Mat. Nr. 9625639

2803 Schwarzenbach, Hocheckgraben 96

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Michael Jung', is written over the printed name and matriculation number.

Wien, im Februar 2007

„Es ist nicht genug zu wissen, man muss auch anwenden;
es ist nicht genug zu wollen, man muss auch tun.“

Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832)

Meiner Frau Cornelia, meinen Töchtern Lisa und Lena sowie meinen Eltern Gertraude
und Wilhelm gewidmet.

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gebührt meiner Frau Cornelia, sowie meinen Töchtern Lisa und Lena. Sie waren und sind für mich die beste Unterstützung, die ich mir wünschen kann. Ohne sie wäre ein erfolgreicher Studienabschluss kaum möglich gewesen.

Außerordentlicher Dank gebührt außerdem O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. DDr. Jürgen Dreyer und meinem Mentor Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar für das Organisieren und Leiten der Projekte, an denen ich während meiner Tätigkeit als Projektassistent am Institut für Hochbau und Technologie im Zentrum für Bauphysik und Akustik mitwirken durfte. Diese Drittmittelprojekte bildeten das thematische und auch das finanzielle Fundament und haben erst das Erarbeiten der vorliegenden Arbeit ermöglicht.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar einerseits für das gelungene Koordinieren der Projekte und andererseits für die hervorragende Betreuung bei der Ausarbeitung der Diplomarbeit.

Auch ohne meine Eltern wäre ein erfolgreicher Abschluss meines langen Ausbildungsweges kaum möglich gewesen.

Für endlose Geduld und Unterstützung danke ich meiner Frau Cornelia.

Für viele schöne Stunden, insbesondere während meiner Ausbildung und meiner Beschäftigung am Institut, möchte ich mich bei meinen Kollegen und bei meinen Freunden sehr herzlich bedanken.

KURZFASSUNG

Die vorliegende Diplomarbeit beinhaltet Untersuchungen zum Einfluss der Feuchtepufferung und des Lüftungsverhaltens auf das Raumklima in Wohnungen. Dazu wurde ein Simulationsmodell für „Matlab“ mit dem Aufsatz „Simulink“ entwickelt, wobei als Grundlage das Modell von Angela Sasics Kalagasidis, PhD.,(HT002) um das Feuchtemodell erweitert und wie in Kapitel 3 und 4 erläutert validiert wurde, um eine simulationsgestützte Berechnung einer Wohnung mit unterschiedlichen Nutzungs-, Lüftungs- und Feuchtepufferungsszenarien durchzuführen.

Die Erläuterung der Grundlagen für das vorliegende Berechnungsmodell sind im Kapitel 1 dargestellt.

Das Kapitel 2 befaßt sich mit der Beschreibung des entwickelten Mehrzonenmodells und seinen Komponenten. Es enthält des Weiteren die genaue Beschreibung der verwendeten Berechnungsalgorithmen sowie eine Beschreibung der Zusammenhänge die zur Durchführung einer solchen Modellbildung mit dem vorliegenden Simulationsmodell erforderlich sind.

Die Kapitel 3 und 4 beinhalten wie schon erwähnt Beispiele, von denen analytische Lösungen vorhanden sind, zur Validierung der einzelnen Teile des Simulationsmodells.

Kapitel 5 enthält die Ergebnisse der Berechnung einer Wohnung mit unterschiedlichen Nutzungs-, Lüftungs- und Feuchtepufferungsszenarien. Als Ergebnis kann im wesentlichen festgehalten werden, dass ein Stosslüften bei dichten Fenstern zu einer höheren relativen Luftfeuchte des Innenklimas führt, als in den derzeit gültigen Berechnungsnormen zum Feuchteschutz angegeben ist. Des Weiteren wird gezeigt, dass ein Stosslüften mit einer Dauer von 15 Minuten aufgrund der vorhandenen Feuchtepufferung der Bauteile zu kurz ist, da in der Zeit die vom Bauteil gespeicherte Feuchtigkeit nicht weggelüftet werden kann und sich kurz nach Schließen des Fensters wieder die relative Luftfeuchte wie vor dem Öffnen des Fensters einstellt.

ABSTRACT

This master's thesis contains studies about the influence of moisture buffering and behaviour of ventilating on the room climate in apartments. Therefore a simulation model in "Matlab" with "Simulink" was developed, with the basics from Angela Sasics Klagasidis, PhD., (HT002), for simulating an apartment with different usage, ventilation behaviour and moisture buffering. In section 3 and 4 is referred about the validation of this model on some examples.

The explanation of the basics for the present calculation model is demonstrated in chapter 1.

Chapter 2 is concerned with the description of the zone model and his components. Furthermore this chapter contains a detailed description of the used solve algorithm and a description about the coherences which are necessary for modelling with the present calculation model.

Chapter 3 and 4 contain examples with an analytical solution for validating the separate parts of the simulation model.

Chapter 5 contains the results from the calculation of the apartment with different usage, ventilation behaviour and moisture buffering scenarios. The primarily conclusion is, that short ventilating with an high exchange rate assisted by leak-proofed windows maintain a higher humidity inside than it is specified in the currently valid standards. Furthermore it is shown that ventilating with a high exchange rate for 15 minutes is too short because of the moisture buffering of the constructions. During this interval the buffered moisture can not be disposed, so after closing the windows the humidity of the room air has nearly the same value before opening.

Inhaltsverzeichnis

1 GRUNDLAGEN	8
1.1 WÄRMESTRÖME UND BILANZEN	8
1.1.1 Energiebilanz einer Zone.....	8
1.1.2 Energiebilanz eines Bauteils	9
1.2 FEUCHTESTRÖME UND BILANZEN	9
1.2.1 Feuchtebilanz einer Zone.....	10
1.3 WETTERDATENKONVERTIERUNG.....	10
1.3.1 Direkte Strahlung auf eine Fläche – I_{dir} in W/m^2	10
1.3.2 Diffuse Strahlung auf eine Fläche – I_{diff} in W/m^2	11
1.3.3 Reflektionsstrahlung auf eine Fläche von der Umgebung – $I_{diff,ref}$ in W/m^2	11
1.4 WICHTIGE FORMELN.....	12
2 MODELL	13
2.1 BUSSYSTEME.....	14
2.1.1 Wetter.....	14
2.1.2 Konstruktion.....	15
2.1.3 System.....	16
2.1.4 Quellen.....	16
2.1.5 Zone.....	17
2.2 MODULE	18
2.2.1 Konstruktionen Module	18
2.2.2 System Module.....	36
2.2.3 Zonen Module	38
3 BEISPIEL 1: EINDIMENSIONALES WÄRME- UND FEUCHTEMODELL	46
3.1 SIMULATIONSPARAMETER.....	46
3.2 ERGEBNISSE	48
4 BEISPIEL 2: WÄRME- UND FEUCHTEMODELL MIT EINER ZONE (IEA ANNEX 41-1-0B)	50
4.1 BERECHNUNGSPARAMETER	51
4.2 SIMULATION	52

4.3	ERGEBNISSE	53
5	BEISPIEL 3: WÄRME- UND FEUCHTEMODELL MIT ACHT ZONEN (WOHNUNG)	57
5.1	SIMULATIONSPARAMETER	57
5.2	SIMULATIONSVARIANTEN	61
5.3	ERGEBNISSE	64
5.4	INTERPRETATION DER ERGEBNISSE	78
6	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG	79
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	80
8	TABELLENVERZEICHNIS	83
9	LITERATURVERZEICHNIS	84

1 Grundlagen

1.1 Wärmeströme und Bilanzen

Für die Berechnung der Temperaturen der einzelnen Zonen und Bauteile, werden die Energiebilanzen dieser gebildet und verkettet, wobei die Berechnung der Bauteile eindimensional erfolgen soll.

1.1.1 Energiebilanz einer Zone

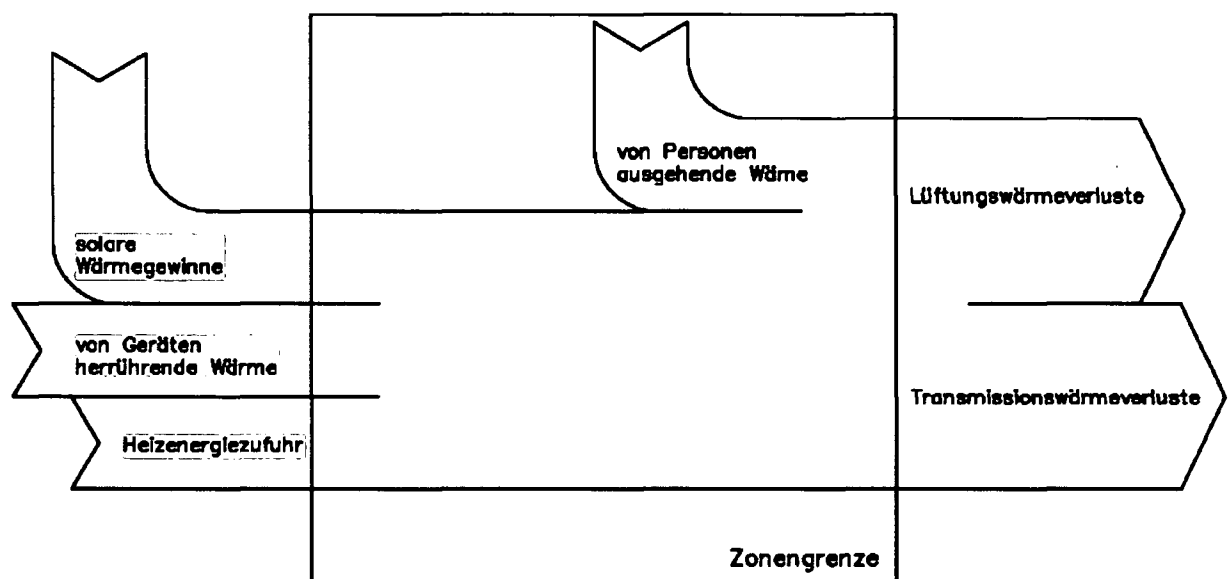


Abbildung 1: Energiebilanz einer Zone

Die Berechnung erfolgt über den Energieerhaltungssatz, welcher besagt, dass die Summe der Energieströme gleich der zeitlichen Änderung der gespeicherten Energie ist.

1.1.2 Energiebilanz eines Bauteils

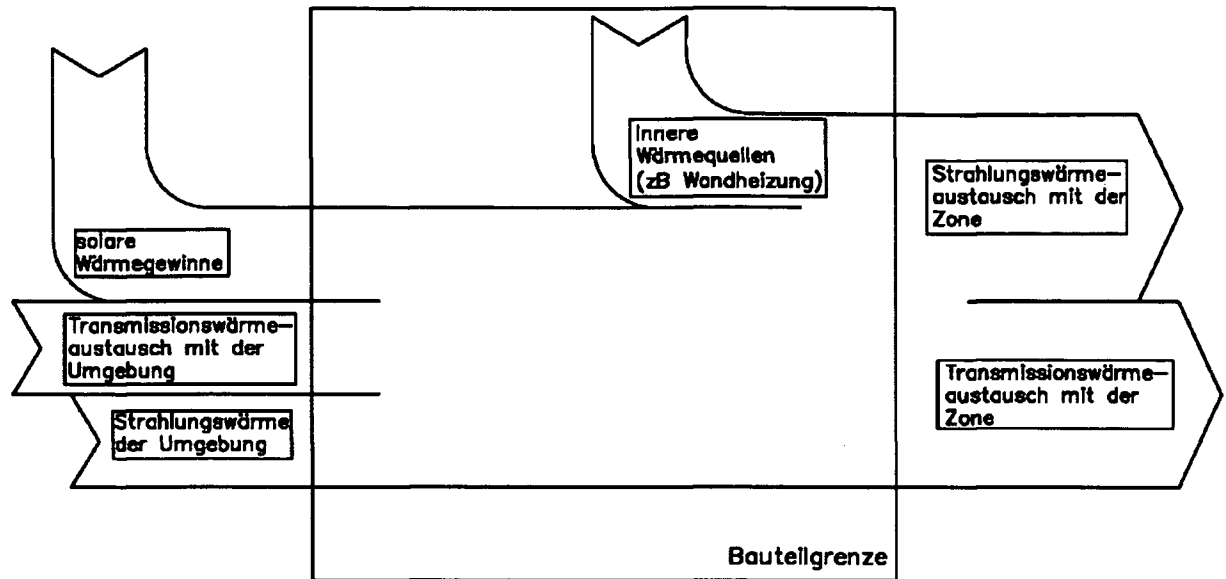


Abbildung 2: Energiebilanz eines Bauteils

Die Berechnung erfolgt wie bei den Zonen über den Energieerhaltungssatz, wobei, wie später erläutert, die Energiebilanz nicht nur einmal für jeden Bauteil berechnet wird, sondern die Bauteile in Schichten eingeteilt werden und die Energiebilanzen für die einzelnen Schichten berechnet werden.

1.2 Feuchteströme und Bilanzen

Für die Berechnung der Feuchtigkeit der einzelnen Zonen und Bauteile, werden die Massebilanzen dieser gebildet und verkettet, wobei die Berechnung der Bauteile wie bei den Wärmebilanzen eindimensional erfolgen soll.

1.2.1 Feuchtebilanz einer Zone

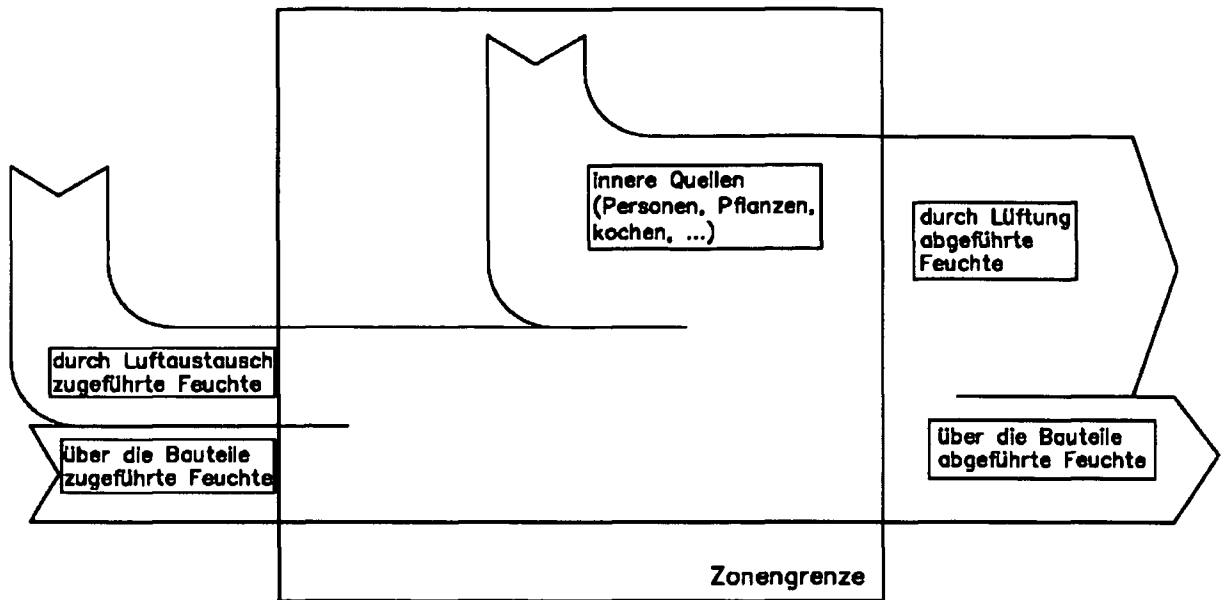


Abbildung 3: Feuchtebilanz einer Zone

Die Berechnung erfolgt über den Massenerhaltungssatz, welcher besagt, dass die Summe der Massenströme über die Oberfläche in ein Kontrollvolumen gleich der zeitlichen Änderung Masse im Kontrollvolumen ist.

1.3 Wetterdatenkonvertierung

Da bei Wetterdaten üblicherweise die Strahlungsdaten in Form von direkter Strahlung auf die normale Fläche, sowie diffuser Strahlung auf eine horizontale Fläche vorliegen, müssen diese Daten für die Berechnungen auf die gegebenen Flächen nach Orientierung und Neigung konvertiert werden [RIE94].

1.3.1 Direkte Strahlung auf eine Fläche – I_{dir} in W/m^2

$$I_{dir,S} = (1 - rF) \cdot I_{dir,n} \cdot \cos(\gamma_{SF}) \quad [1-1]$$

$I_{dir,S}$ direkte solare Strahlung auf eine Fläche in W/m^2

rF Reflektionsgrad der Fläche

$I_{dir,n}$ direkte solare Strahlung auf eine Fläche normal zur Sonne in W/m^2

$$\cos(\gamma_{SF}) = \cos(\gamma_F) \cdot \sin(\gamma_S) + \sin(\gamma_F) \cdot \cos(\gamma_S) \cdot \cos(|a_S - a_F|) \quad (1-2)$$

- γ_F Neigung der Fläche in rad (horizontal=0)
 γ_S Sonnenstand in rad (horizontal=0)
 a_S Orientierung der Sonne in rad (north=0)
 a_F Orientierung der Fläche in rad (north=0)

1.3.2 Diffuse Strahlung auf eine Fläche – I_{diff} in W/m^2

$$I_{diff,S} = (1 - r_F) \cdot I_{diff,H} \cdot \left(\cos \frac{\gamma_F}{2} \right)^2 \quad (1-3)$$

- $I_{diff,S}$ diffuse solare Strahlung auf eine Fläche in W/m^2
 $I_{diff,H}$ diffuse solare Strahlung auf eine horizontale Fläche in W/m^2
 r_F Reflektionsgrad der Fläche
 γ_F Neigung der Fläche in rad (horizontal=0)

1.3.3 Reflektionsstrahlung auf eine Fläche von der Umgebung – $I_{diff,refl}$ in W/m^2

$$I_{diff,refl} = r_U \cdot \left(\sin \frac{\gamma_F}{2} \right)^2 \cdot (I_{dir,n} \cdot \sin(\gamma_S) + I_{diff,H}) \quad (1-4)$$

- $I_{diff,refl}$ diffuse Reflektionsstrahlung auf eine Fläche in W/m^2
 $I_{diff,H}$ diffuse solare Strahlung auf eine horizontale Fläche in W/m^2
 $I_{dir,n}$ direkte solare Strahlung auf eine Fläche normal zur Sonne in W/m^2
 γ_F Neigung der Fläche in rad (horizontal=0)
 γ_S Sonnenstand in rad (horizontal=0)
 r_U Reflektionsgrad der Umgebung

1.4 Wichtige Formeln

Wasserdampfsättigungsdruck nach Magnus-Formel:

$$p_s = C1 \cdot e^{\frac{C2 \cdot \vartheta}{C3 + \vartheta}} \quad \text{in Pa} \quad (1-5)$$

ϑ Temperatur in °C

Konstante	Temperaturbereich	
	Über Wasser	Über Eis
C1	610,78	610,714
C2	17,08085	22,44294
C3	234,175	272,44

Tabelle 1: Konstanten der Magnusformel

Wasserdampfdruck:

$$p = p_s \cdot \varphi \quad \text{in Pa} \quad (1-6)$$

φ relative Luftfeuchte

Partialdruck des Wasserdampfes in Luft

$$p_v = w_v \cdot R_{H_2O} \cdot T \quad \text{in Pa} \quad (1-7)$$

w_v absolute Luftfeuchtigkeit in kg/m³

R_{H_2O} Gaskonstante für Wasser ist 461.5J/K.kg

T Temperatur in K

Feuchtestromdichte für Wasserdampftransport

$$g_v = -\frac{\delta_{p,0}(T)}{\mu(\Phi)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot p_v + r \cdot w_v = -\frac{1}{\mu(\Phi)} \cdot \frac{D_{c,0}(T)}{R_{H_2O} \cdot T} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot p_v + r \cdot w_v \quad \text{in kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (1-8)$$

$\delta_{p,0}(\text{I})$ Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient in kg/(m.s.Pa)

$\mu(\text{I})$ Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl

$D_{c,0}(\text{I})$ Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft in m²/s

Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft

$$D_{c,0}(T) = 2,31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{p_{\text{atm}}}{p_v + p_{\text{atm}}} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad \text{in m}^2/\text{s} \quad (1-9)$$

p_{atm} atmosphärischer Luftdruck ist 101300Pa

2 Modell

Das Berechnungsmodell ist aus einzelnen Modulen aufgebaut, wobei als Vorlage das Modell der „International Building Physics Toolbox“ von Angela Sasic Kalagasidis (HT002) bezüglich des Wärmemodells diente. Das Modell läßt sich in vier Modulgruppen unterscheiden:

- Konstruktionen
- Zonen
- Systeme
- Quellen und Wetter

Um das Berechnungsmodell in weiterer Folge so flexibel und erweiterbar wie möglich zu halten, funktioniert der Datenaustausch zwischen den einzelnen Modulgruppen und auch innerhalb der Modulgruppen über definierte Bussysteme, welche im folgenden angeführt und beschrieben sind.

2.1 Bussysteme

2.1.1 Wetter

Der Wetterbus legt fest, in welcher Form und Reihenfolge die Wetterdaten an die weiteren Module geleitet werden müssen.

Nr.	Symbol	Beschreibung	Einheit
1	$I_{dir,n}$	direkte Strahlung	W/m ²
2	$I_{diff,h}$	diffuse Strahlung	W/m ²
3	v_s	Windgeschwindigkeit	m/s
4	T_{air}	Lufttemperatur	°C
5	w_d	Windrichtung (0 = Norden)	Rad
6	φ	relative Luftfeuchte	-
7	γ_s	Sonnenstand (0 = horizontal)	Rad
8	a_s	Orientierung der Sonne (0 = Norden)	Rad
9	p_{air}	Luftdruck	Pa
10	α_c	konvektive Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² .K
11	T_r	Strahlungstemperatur	°C
12	α_r	Strahlungswärmeübergangskoeffizient	W/m ² .K
13	β	Feuchteübergangskoeffizient	kg/m ² .s.Pa

Tabelle 2: Wetterbus

2.1.2 Konstruktion

Der Konstruktionsbus legt fest, in welcher Form und Reihenfolge die Daten von den Konstruktionsmodulen (z.B. Außenwand, Decke, Fenster, ...) an die Zonenmodule geleitet werden müssen.

Nr.	Symbol	Beschreibung	Einheit
1	R_c	konvektiver Wärmeübergangswiderstand	$m^2 \cdot K/W$
2	T_s	Temperatur an der Oberfläche	$^{\circ}C$
3	R_p	Feuchteübergangswiderstand	$Pa \cdot s \cdot m^2/kg$
4	p_{surf}	Wasserdampfdruck an der Oberfläche	Pa
5	R_a	Luftstrom	kg/s
6	P_a	Luftdruck	Pa
7	Q_{sun}	weitergeleitete solare Strahlung	W/m^2
8	ϵ	Emissionsvermögen der Oberfläche	-
9	T_{air}	Temperatur des Luftstromes	$^{\circ}C$
10	φ_{air}	relative Luftfeuchte des Luftstromes	-
11	Snr	Nummer der Konstruktion	-
12	A	Fläche der Konstruktion	m^2

Tabelle 3: Konstruktionsbus

2.1.3 System

Der Systembus legt fest, in welcher Form und Reihenfolge die Daten von den Systemmodulen (z.B. Lüftung, Infiltration, ...) an die Zonenmodule geleitet werden müssen. Da die Anforderungen an den System Bus ähnlich sind wie an den Konstruktionen Bus wird hierfür dasselbe Schema verwendet.

Nr.	Symbol	Beschreibung	Einheit
1	-	nicht belegt	-
2	-	nicht belegt	-
3	-	nicht belegt	-
4	-	nicht belegt	-
5	R_a	Luftstrom	kg/s
6	P_a	Luftdruck	Pa
7	Q_{sun}	weitergeleitete solare Strahlung	W/m ²
8	-	nicht belegt	-
9	T_{air}	Temperatur des Luftstromes	°C
10	φ_{air}	relative Luftfeuchte des Luftstromes	-
11	Snr	Nummer des Systems	-
12	A	Fläche der Konstruktion	m ²

Tabelle 4: Systembus

2.1.4 Quellen

Der Quellenbus legt fest, in welcher Form und Reihenfolge die Daten von den Quellenmodulen (z.B. Heizung, Kühlung, Luftbefeuchter, Personen, ...) an die Zonenmodule geleitet werden müssen.

Nr.	Symbol	Beschreibung	Einheit
1	Q_c	konvektive Wärmeenergie	W
2	Q_r	Strahlungswärmeenergie	W
3	G	Feuchte	kg/s

Tabelle 5: Quellenbus

2.1.5 Zone

Der Zonenbus legt fest, in welcher Form und Reihenfolge die Daten von den Zonenmodulen an die angrenzenden Module geleitet werden.

Nr.	Symbol	Beschreibung	Einheit
1	T_a	Lufttemperatur	°C
2	P_a	Luftdruck	Pa
3	φ_a	relative Luftfeuchtigkeit	-

Tabelle 6: Zonenbus

2.2 Module

Wie erwähnt, lassen sich die Module in vier Gruppen unterteilen. Innerhalb dieser Gruppen sind die Module frei veränderbar, sie müssen nur an den Schnittstellen mit den anderen Modulen den Buskriterien genügen. Dadurch kann je nach Anwendung die Komplexität der einzelnen Module sehr groß werden, was wiederum eine lange Rechendauer zur Folge hat. Es sollte daher nur das Nötigste, dieses aber hinreichend genau in den einzelnen Modulen berücksichtigt werden. Die im Folgenden erläuterten Module dienen zur Erstellung und Berechnung ein- oder mehrzoniger Gebäude unter Berücksichtigung der thermischen und hygrischen Bilanzgleichungen, jedoch ohne Berücksichtigung des Flüssigwassertransportes.

2.2.1 Konstruktionen Module

2.2.1.1 Modul Außenwand

Das Außenwand Modul stellt eine Verbindung der Zone und dem Außenklima dar. Als Eingänge besitzt das Modul daher den Wetterbus, den Zonenbus und den Strahlungsbus. Die Ausgangsdaten werden über den Konstruktionsbus wie in Abbildung 4 dargestellt ausgegeben.

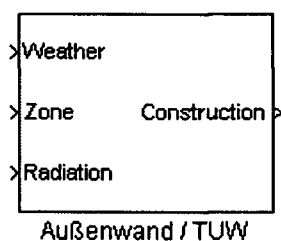


Abbildung 4: Außenwand Modul

Die weiteren Parameter, wie z.B. Orientierung oder Fläche, werden über eine Eingabemaske, welche bei „Doppelklick“ auf das Modul erscheint eingegeben. Die Parameter nach der Eingabereihenfolge laut Abbildung 5 sind:

- Bauteilnummer
- Orientierung in rad (0 = Nord)
- Neigung in rad (0 = horizontal)
- Fläche in m^2
- konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der inneren Oberfläche in $W/(m^2.K)$

- Feuchteübergangskoeffizient in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
- Temperatur bei Simulationsbeginn in $^{\circ}\text{C}$
- Feuchtigkeit bei Simulationsbeginn in %
- Faktor der Himmelssichtbarkeit (von der Neigung und der Verschattung abhängig)

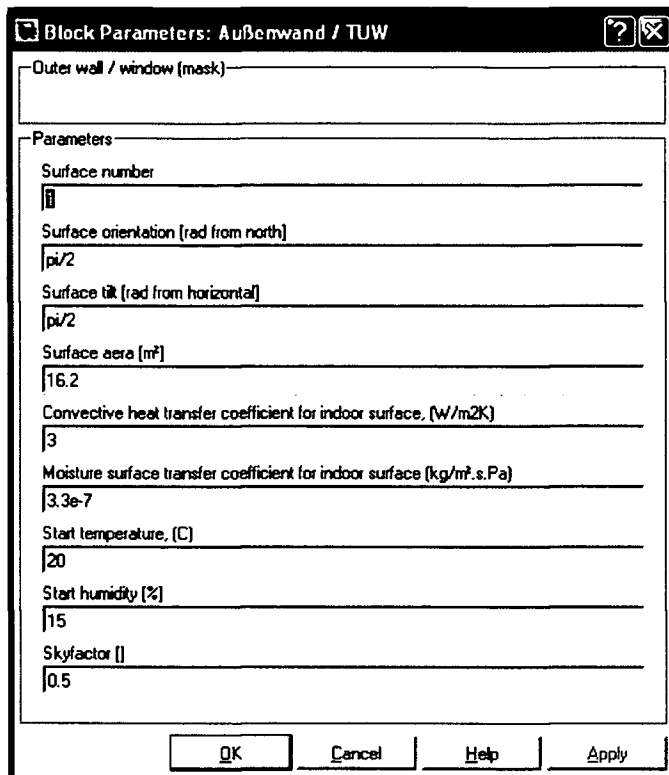


Abbildung 5: Parametermaske des Außenwandmoduls

Innerhalb des Außenwandmoduls wurde ebenfalls ein modularer Aufbau gewählt, um die Genauigkeit und Erweiterbarkeit bestmöglich zu gestalten. Hierfür gibt es drei Materialkategorien:

- Material an der Äußeren Oberfläche
- Material in der Konstruktion
- Material an der Inneren Oberfläche

Wobei jeweils das Außenwandmodul aus mindestens einem Material an der Äußeren und Inneren Oberfläche bestehen muss. Eine höhere Genauigkeit kann einfach über Zerlegung der Konstruktion in einzelne Schichten erfolgen, wobei jede Schicht durch ein Material der oben genannten Kategorien repräsentiert wird. Diese Materialblöcke repräsentieren die Berechnungsknoten, für welche die Bilanzgleichungen der Temperatur und des Feuchtegehaltes berechnet werden. Des Weiteren besteht die

Möglichkeit einzelne Schichten genauer zu behandeln, in dem man unterschiedliche Genauigkeiten in der Berechnung der Materialschichten festlegt. Als Beispiel gibt es Blöcke von Schichten, die aus einem Temperatur-, aber fünf Feuchteknoten bestehen. Dies ist sinnvoll zur Optimierung von Rechenzeit, da sich zum Beispiel an Oberflächenschichten Feuchtekonzentrationen sehr schnell ändern können, die Temperatur sich aber nur langsamer ändert. Ohne eine Optimierung würde für jeden Feuchteknoten auch ein Temperaturknoten mit berechnet werden und die Rechenzeit würde sich vervielfachen.

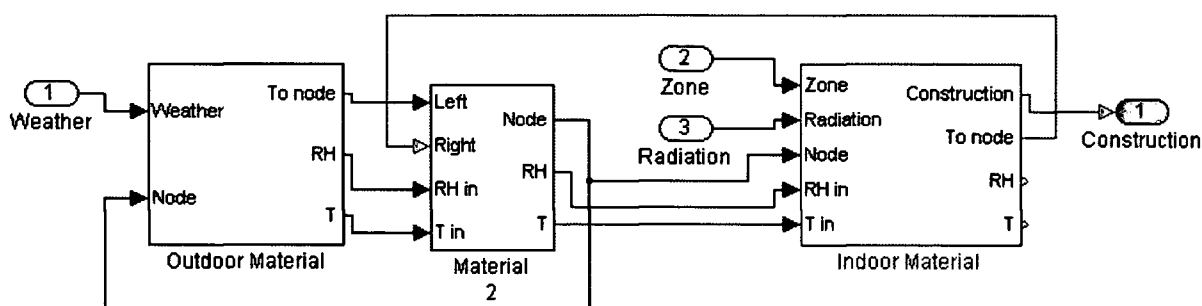


Abbildung 6: Beispiel einer Außenwandkonstruktion mit drei Schichten

Die Schichtenspezifikation erfolgt wieder über eine Parametermaske, die bei „Doppelklick“ auf das jeweilige Material erscheint.

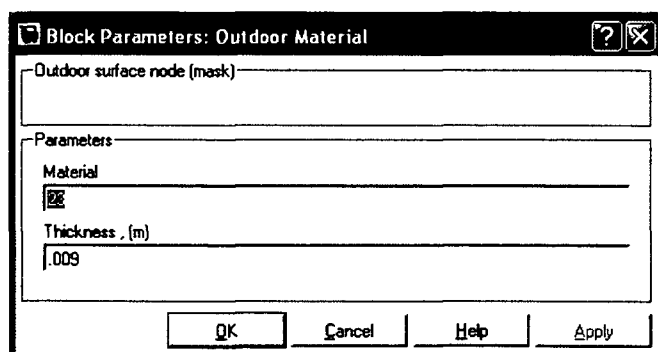


Abbildung 7: Parametermaske eines Materialblocks

Wie man in Abbildung 7 erkennen kann, besteht die Spezifikation lediglich aus dem Materialtyp und der Schichtstärke in Meter. Die restlichen benötigten Materialparameter sind in einer Materialdatenbank gespeichert. Dies hat den Vorteil, dass man bei Änderung eines Parameters nur den jeweiligen Parameter in der Datenbank ändern muss, wodurch die Änderung im Modell automatisch berücksichtigt wird.

Als Beispiel wird die Berechnung anhand eines einfachen Schichtenaufbaues wie in Abbildung 8 erklärt:

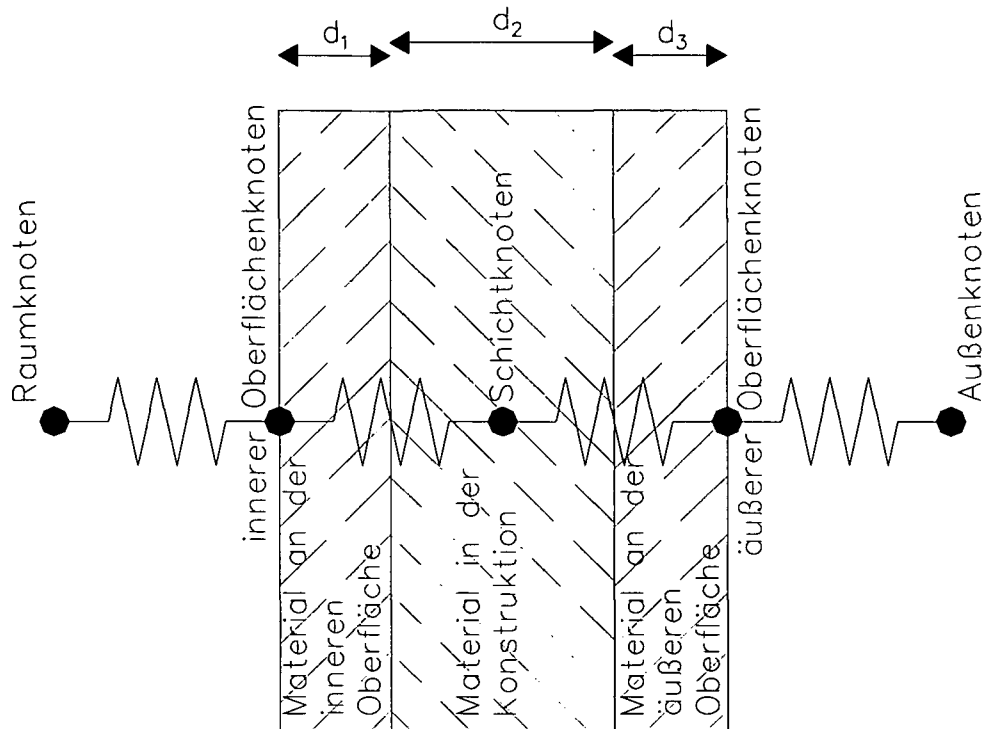


Abbildung 8: Schematische Darstellung einer Außenwandkonstruktion mit drei Schichten

In Abbildung 9 ist die Berechnungsstruktur schematisch dargestellt, wobei für jeden der dargestellten Knoten die Bilanzgleichung für Wärmeenergie und Feuchtegehalt erfüllt sein muss. Zwischen den Knoten befinden sich Widerstände, die materialabhängig, bzw. von der Oberfläche oder Witterungseinflüssen abhängig sind. Im Regelfall entspricht jeder dieser Konstruktionsknoten einem Temperaturknoten und einem Feuchteknotten, doch wie zuvor erwähnt können auch mehrere Feuchteknotten zur Verbesserung der Berechnungsergebnisse verwendet werden.

Im Folgenden werden die Bilanzgleichungen der einzelnen Konstruktionsknoten erläutert.

2.2.1.1.1 Temperaturknoten innerhalb einer Schicht

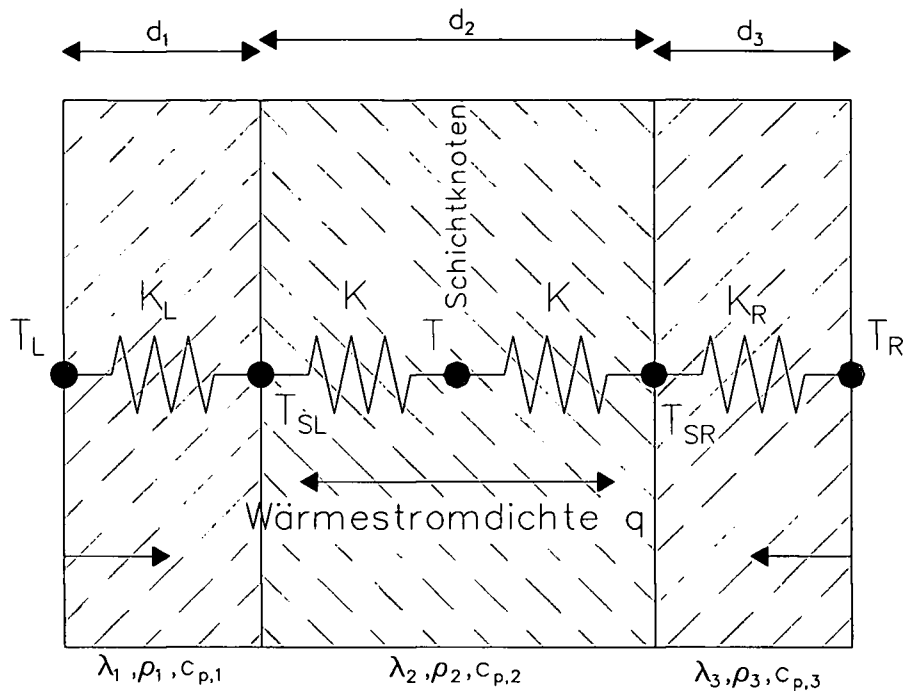


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Wärmestrombilanz einer Konstruktionsschicht

Die Berechnung erfolgt über den Energieerhaltungssatz, der besagt, dass die Summe der zu- und abströmenden Energie eines Kontrollvolumens mit konstantem Druck gleich der Änderung der gespeicherten Energie ist. Im Falle der Temperaturberechnung ist die Änderung der Temperatur gleich der Summe der Wärmeströme in bzw. aus dem Kontrollvolumen.

$$C \frac{dT}{dt} = q_{Li} + q_{Re} \quad (2-1)$$

- C Wärmekapazität der Schicht bezogen auf die Fläche in J/(m².K)
dT/dt zeitliche Änderung der Temperatur der Schicht in K/s
q_{Li} Wärmestromdichte von Links in J/(m².s)
q_{Re} Wärmestromdichte von Rechts in J/(m².s)

Die Wärmestromdichte aus der jeweiligen Richtung setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

$$q = q_{\text{cond}} + q_{\text{conv}} \quad (2-2)$$

q_{cond} Wärmestromdichte aus Wärmeleitung in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

q_{conv} Wärmestromdichte aus Konvektion in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Die Wärmekapazität der Schicht wird dabei aus den materialspezifischen Parametern aus der Datenbank und dem Feuchtegehalt berechnet:

$$C = (c_{p,0} + c_{p,l} \cdot u) \cdot \rho_M \cdot d \quad (2-3)$$

$c_{p,0}$ spezifische Wärmekapazität des trockenen Materials in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$c_{p,l}$ spezifische Wärmekapazität von Wasser ist $4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

u Feuchtegehalt der Schicht in kg/kg

ρ_M Trockendichte in kg/m^3

d Schichtdicke in m

Die Wärmestromdichte aus Wärmeleitung setzt sich aus einem Anteil von der linken Seite und einem Anteil von der rechten Seite zusammen, die jeder für sich berechnet und danach aufsummiert werden:

$$q_{\text{cond}} = K \cdot (T_S - T) \quad (2-4)$$

K Wärmedurchlasskoeffizient der halben Schicht in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

T_S Temperatur an der Schichtgrenze in K

$$K = \frac{\lambda}{\frac{d}{2}} \quad (2-5)$$

λ Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$$\lambda = \lambda_d + u \cdot \lambda_u + (T - T_{\text{ref}}) \cdot \lambda_T \quad (2-6)$$

λ_d Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials bei 10°C in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

λ_u Wärmeleitfähigkeitsänderung abhängig vom Feuchtegehalt in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

λ_T Wärmeleitfähigkeitsänderung abhängig von der Temperatur in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}^2)$

T_{ref} Referenztemperatur der Wärmeleitfähigkeit ist $283,15 \text{ K}$

Die Berechnung der Temperatur an der Schichtgrenze (T_S) wird nachfolgend anhand der Berechnung für die linke Seite erläutert. Die rechte Seite errechnet sich analog dazu.

$$T_{SL} = \frac{K \cdot T + K_L \cdot T_L}{K + K_L} \quad (2-7)$$

T_{SL} Temperatur an der linken Schichtgrenze in K

T Temperatur der Schicht in K

K_L Wärmedurchlasskoeffizient der halben, an der linken Seite angrenzenden Schicht in $W/(m^2 \cdot K)$

T_L Temperatur, der, an der linken Seite angrenzenden Schicht in K

Durch diese Darstellung der Wärmestromdichte aus Wärmeleitung gestaltet sich die Berechnung und Verknüpfung der Schichtknoten recht einfach, da als Parameter von einem Schichtknoten in die angrenzenden Schichtknoten nur die Schichttemperatur (T) und der Wärmedurchlasskoeffizient der halben Schicht (K) übergeben werden müssen. Die Wärmestromdichte aus Konvektion setzt sich aus den drei wesentlichen Anteilen Luftströmung, Feuchtigkeitsströmung und Kondensationswärme zusammen, die jeder für sich berechnet und danach aufsummiert werden können:

$$q_{conv} = c_{p,a} \cdot \Delta T \cdot g_a + c_{p,l} \cdot \Delta T \cdot g_l + h_e \cdot g_v$$

$c_{p,a}$ spezifische Wärmekapazität von Luft bei konstantem Druck in $J/(kg \cdot K)$

$c_{p,l}$ spezifische Wärmekapazität von Wasser ist $4180 J/(kg \cdot K)$

ΔT Temperaturdifferenz des Schichtknotens und des einströmenden Mediums in K

g_a Luftstromdichte in kg/m^2

g_l Feuchtigkeitsstromdichte in kg/m^2

h_e Phasenänderungsenthalpie des Wassers von flüssig auf gasförmig in J/kg

g_v Feuchtigkeitsstromdichte der kondensierenden Wassermenge in kg/m^2

In meinem Modell habe ich die Wärmestromdichte aus Konvektion nur in speziellen Modulen integriert, da sie in den meisten Berechnungsfällen einen sehr kleinen und meist vernachlässigbaren Anteil an der gesamten Wärmestromdichte hat, aber die Rechendauer erheblich verlängert.

Heat balance

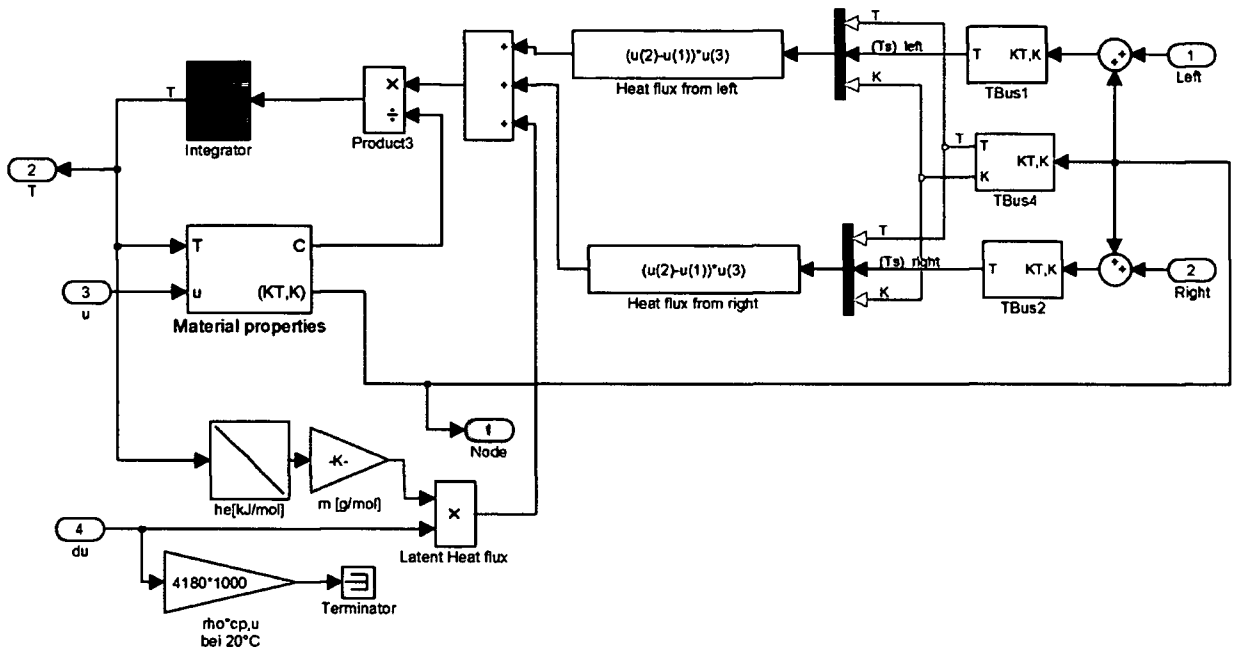


Abbildung 10: Darstellung der Temperaturberechnung eines Schichtknotens

2.2.1.1.2 Wärmestromdichte von außen in die Schicht an der Oberfläche

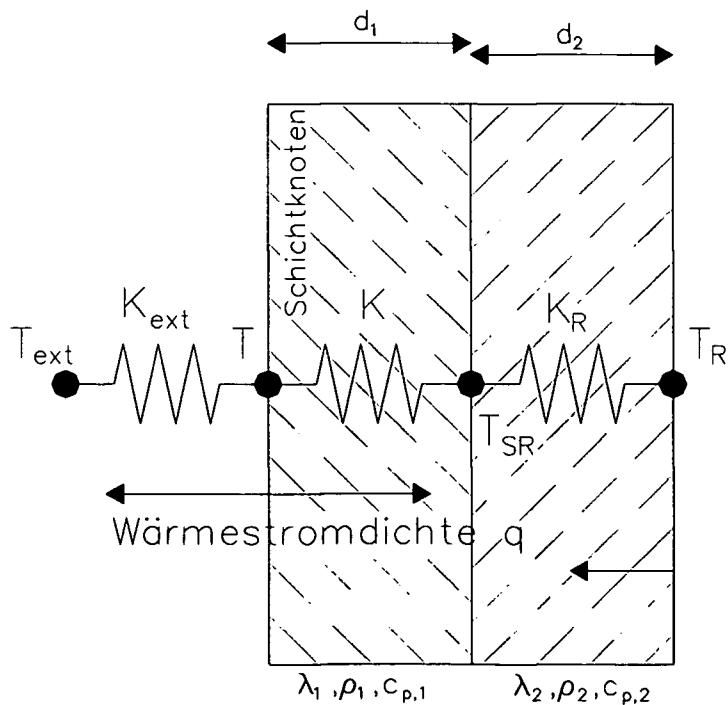


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Wärmestrombilanz der äußeren Konstruktionsschicht

Der äußere Oberflächenschichtknoten ist ähnlich aufgebaut wie ein Schichtknoten innerhalb der Konstruktion, nur mit dem Unterschied, dass der Knoten an der äußeren Schichtgrenze positioniert ist. Daher muss als Änderung zu einem innen liegendem Schichtknoten nur der Wärmedurchlasskoeffizient (K) auf die gesamte Schichtstärke bezogen werden. Weiters wird die Wärmestromdichte von außen über das angrenzende Wetter berechnet. Die Bilanzgleichung (2-1) gilt daher auch für diesen Knoten, es wird lediglich die Wärmestromdichte von außen aus Gleichung (2-2) über die Gleichung (2-8) wie folgt definiert:

$$q = (T_a - T_s) \cdot \alpha_c + (I_{\text{diff}} + I_{\text{dir}}) \cdot \alpha + (T_r - T_s) \cdot \varepsilon \cdot \alpha_r \quad (2-8)$$

T_a	Temperatur der Außenluft in °C
T_s	Temperatur der Oberfläche in °C
α_c	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in W/(m ² .K)
I_{diff}	diffuse Strahlung auf die Oberfläche in W/m ²
I_{dir}	direkte Strahlung auf die Oberfläche in W/m ²
α	Absorptionsgrad der Oberfläche
T_r	Strahlungstemperatur der Umgebung in °C
ε	Emissionsvermögen der Oberfläche
α_r	Strahlungswärmeübergangskoeffizient in W/(m ² .K)

Die Berechnung der einzelnen Parameter erfolgt in der Wetterkonvertierung wie in Kapitel 1.3 erläutert.

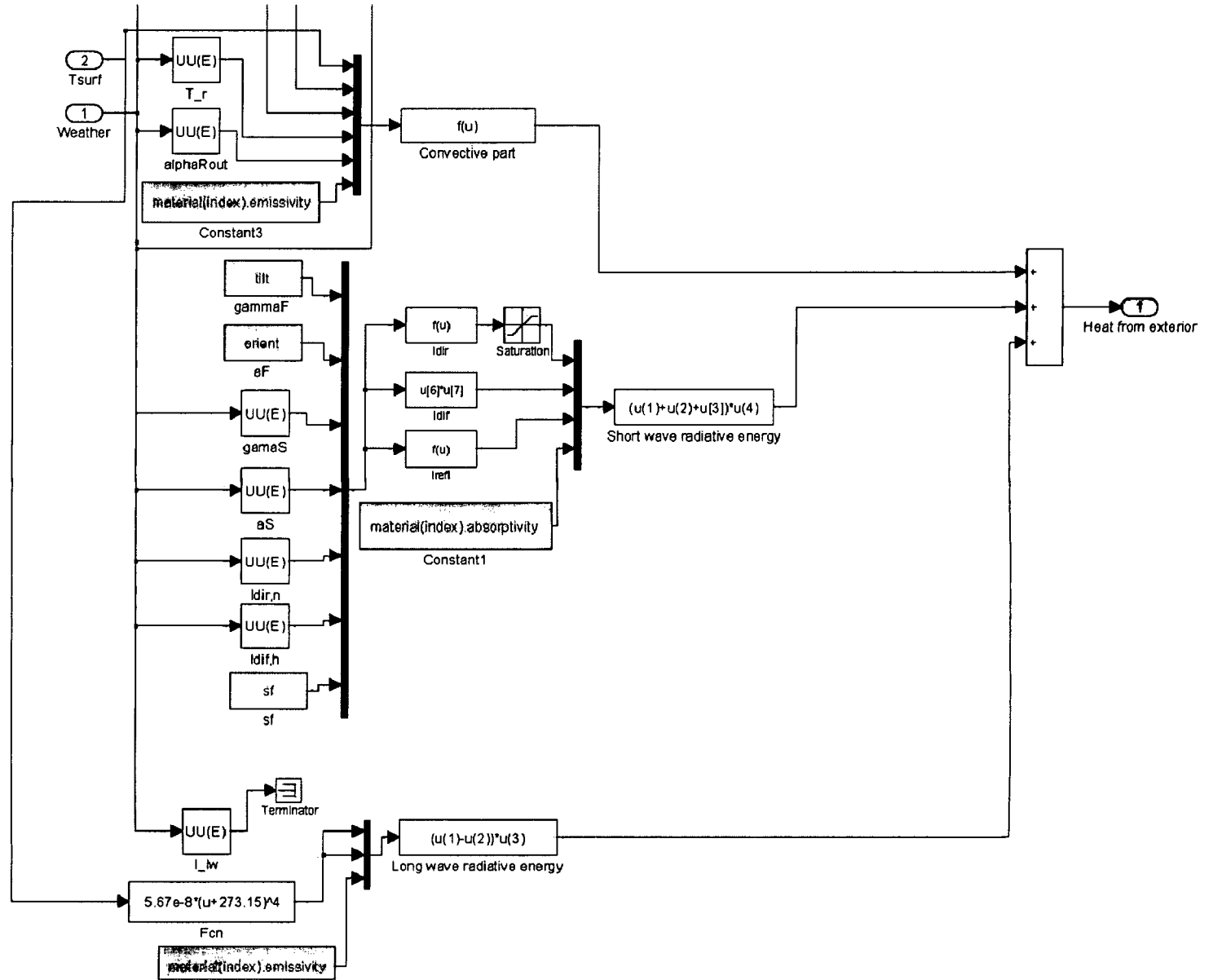


Abbildung 12: Darstellung der Berechnung der Wärmestromdichte von Außen

2.2.1.1.3 Wärmestromdichte von Innen in die Schicht an der Oberfläche

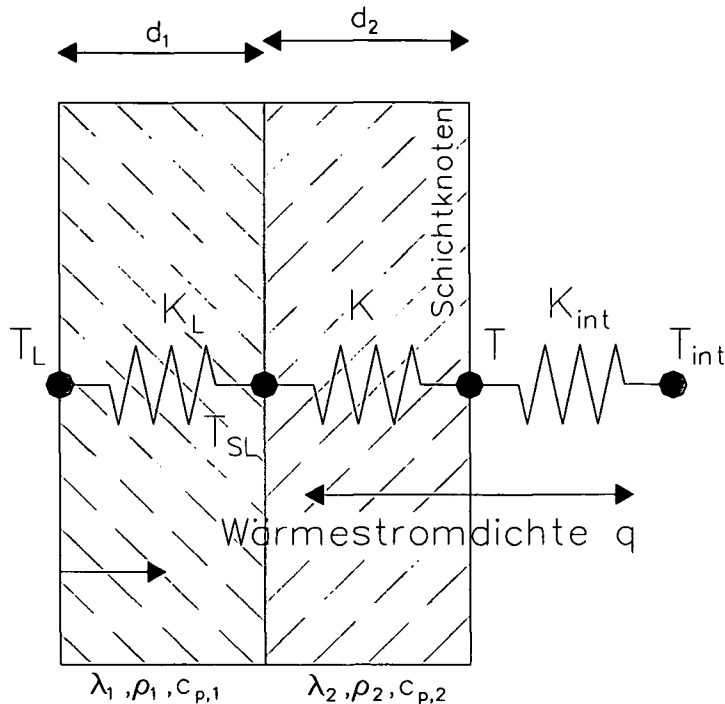


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Wärmestrombilanz der inneren Konstruktionsschicht

Der innere Oberflächenschichtknoten ist, wie der äußere, an der Schichtgrenze an der Oberfläche positioniert. Daher muss als Änderung zu einem innen liegendem Schichtknoten der Wärmedurchlasskoeffizient (K) auf die gesamte Schichtstärke bezogen werden. Weiters wird die Wärmestromdichte von innen über das angrenzende Raumklima berechnet. Die Bilanzgleichung (2-1) gilt daher auch für diesen Knoten, es wird lediglich die Wärmestromdichte von innen aus Gleichung (2-2) über die Gleichung (2-9) wie folgt definiert:

$$q = (T_a - T_s) \cdot \alpha_c + q_{rad} \quad (2-9)$$

- T_a Temperatur der Raumluft in °C
- T_s Temperatur der Oberfläche in °C
- α_c konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$
- q_{rad} Strahlung auf die Oberfläche in W/m^2

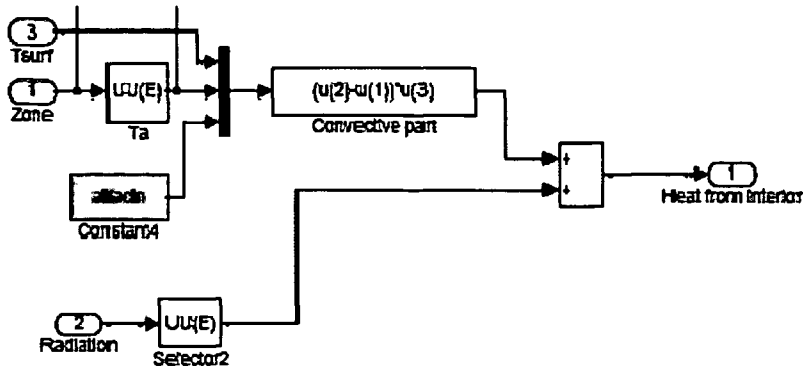


Abbildung 14: Darstellung der Berechnung der Wärmestromdichte von Innen

2.2.1.1.4 Feuchteknoten innerhalb einer Schicht

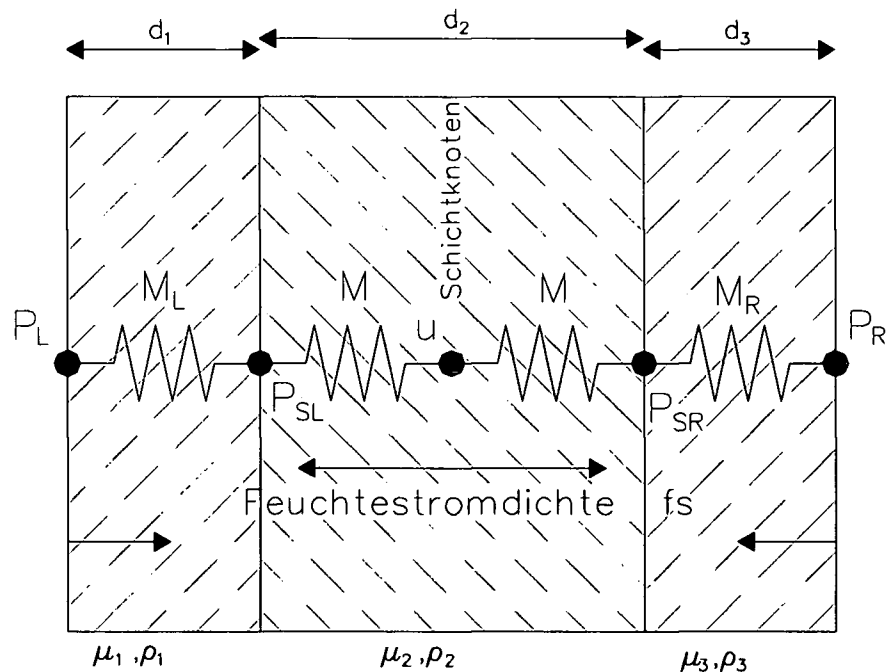


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Feuchtestrombilanz einer Konstruktionsschicht

Die Berechnung des Feuchtegehaltes erfolgt über den Massenerhaltungssatz, der besagt, dass die Summe der zu- und abströmenden Masse (Feuchtigkeit) eines Kontrollvolumens gleich der Änderung der gespeicherten Masse ist. Im Falle der Feuchtegehaltberechnung ist die Änderung des Feuchtegehaltes gleich der Summe der Feuchteströme in bzw. aus dem Kontrollvolumen.

$$\frac{\partial}{\partial t} w = -\frac{\partial}{\partial x} (g_v + g_l) + g_g \quad (2-10)$$

- w Feuchtegehalt der Schicht in kg/m^3
 g_v Dampfstromdichte in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 g_l Dichte des flüssigen Feuchtestroms in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 g_g Dichte des Feuchtestroms aus Quellen oder Senken in $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$

Da eine Feuchteproduktion innerhalb einer Wand nur in sehr seltenen Fällen vorkommt, wurde die Möglichkeit diese zu berücksichtigen bei diesem Wandmodell vernachlässigt. Weiters wird der Flüssigwassertransport nicht berücksichtigt, da dieser eigentlich nur bei mehrdimensionalen Berechnungen sinnvoll ist. Dadurch kann die Feuchtebilanzgleichung einer Schicht wie folgt dargestellt und berechnet werden.

$$m \frac{du}{dt} = g_{v,L} + g_{v,R} \quad (2-11)$$

- $m = \rho \cdot d$ Masse der Schicht bezogen auf die Fläche in kg/m^2 (2-12)
 du/dt zeitliche Änderung des Feuchtegehaltes der Schicht in $\text{kg}/(\text{kg} \cdot \text{s})$
 $g_{v,L}$ Dampfstromdichte vom linken benachbarten Knoten in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 f_{SR} Dampfstromdichte vom rechten benachbarten Knoten in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 d Schichtdicke in m
 ρ Dichte in kg/m^3

Die Dampfstromdichte (g_v) setzt sich aus einem Anteil vom linken benachbarten Knoten ($g_{v,L}$) und einem Anteil vom rechten benachbarten Knoten ($g_{v,R}$) zusammen, der jeder für sich berechnet und danach aufsummiert werden kann. Nachfolgend wird die Berechnung anhand der Dampfstromdichte vom linken benachbarten Knoten erläutert. Die Berechnung für den rechten Knoten verläuft analog.

$$g_{v,L} = M \cdot (p_{sL} - p_v) \quad (2-13)$$

$$M = \frac{D_0}{R_w \cdot T \cdot \mu(\varphi)} \cdot \frac{2}{d} \quad \text{Feuchtedurchlasskoeffizient der halben Schicht in } \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \quad (2-14)$$

$$D_0 = 2,31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{p_{\text{atm}}}{p_v + p_{\text{atm}}} \cdot \left(\frac{T + 273,15}{273} \right)^{1,81}$$

Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in
Luft in m²/s (2-15)

- p_{atm} atmosphärischer Luftdruck ist 101 328 Pa
 p_v Partialdruck des Wasserdampfes der Schicht in Pa
 R_w Gaskonstante für Wasser ist 461,5 J/kg.K
 $\mu(\varphi)$ Diffusionskoeffizient abhängig von der relativen Luftfeuchte
 T Temperatur in °C
 d Schichtdicke in m

$$p_{\text{SL}} = \frac{M \cdot p + M_L \cdot p_L}{M + M_L}$$

Partialdruck des Wasserdampfes an der Schichtgrenze zum
linken benachbarten Knoten in Pa (2-16)

- M_L Feuchtedurchlasskoeffizient der benachbarten halben Schicht in
kg/(m².s.Pa)

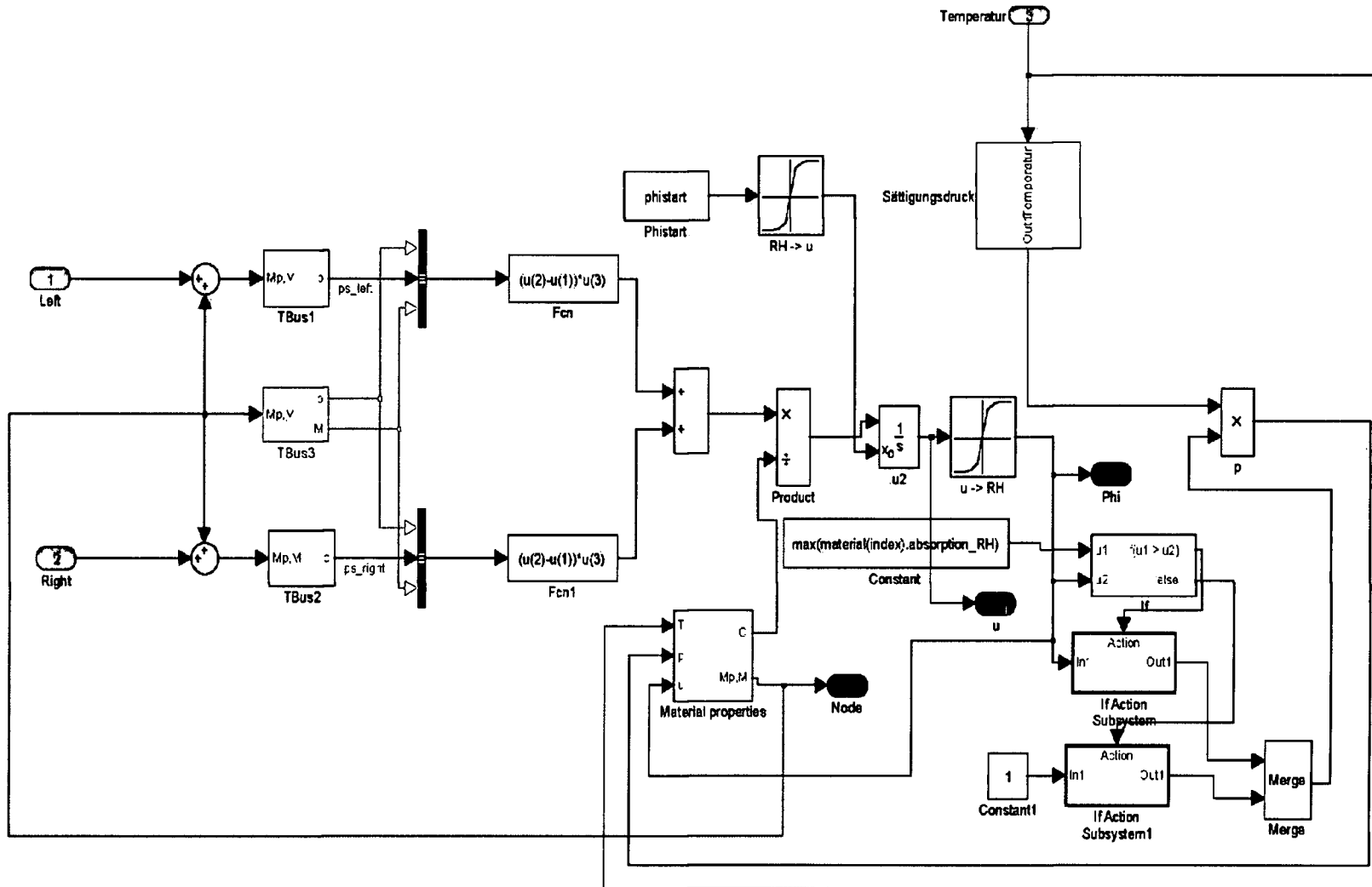


Abbildung 16: Darstellung der Feuchtegehaltsberechnung eines Schichtknotens

2.2.1.1.5 Dampfstromdichte von außen in die Schicht an der Oberfläche

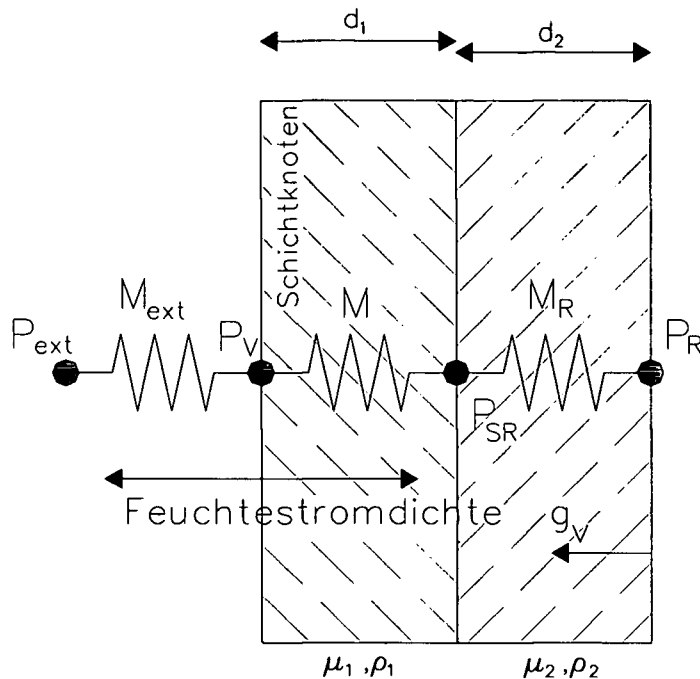


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Feuchtestrombilanz der äußeren Konstruktionsschicht

Der äußere Oberflächenschichtknoten ist ähnlich aufgebaut wie ein Schichtknoten innerhalb der Konstruktion, nur mit dem Unterschied, dass der Knoten an der äußeren Schichtgrenze positioniert ist. Daher muss als Änderung zu einem innen liegendem Schichtknoten nur der Feuchtedurchlasskoeffizient (M) auf die gesamte Schichtstärke bezogen werden. Weiters wird die Feuchtestromdichte von außen über das angrenzende Wetter berechnet. Die Bilanzgleichung (2-11) gilt daher auch für diesen Knoten, es wird lediglich die Feuchtestromdichte von außen über Gleichung (2-17) wie folgt definiert:

$$g_{v,L} = \beta \cdot (p_a - p_s) \quad (2-17)$$

- β Wasserdampfübergangskoeffizient in $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$
 p_a Wasserdampfpartialdruck der Außenluft in Pa
 p_s Wasserdampfpartialdruck an der Oberfläche in Pa

Die Berechnung der einzelnen Parameter erfolgt in der Wetterkonvertierung, wie in Kapitel 1.3 erläutert.

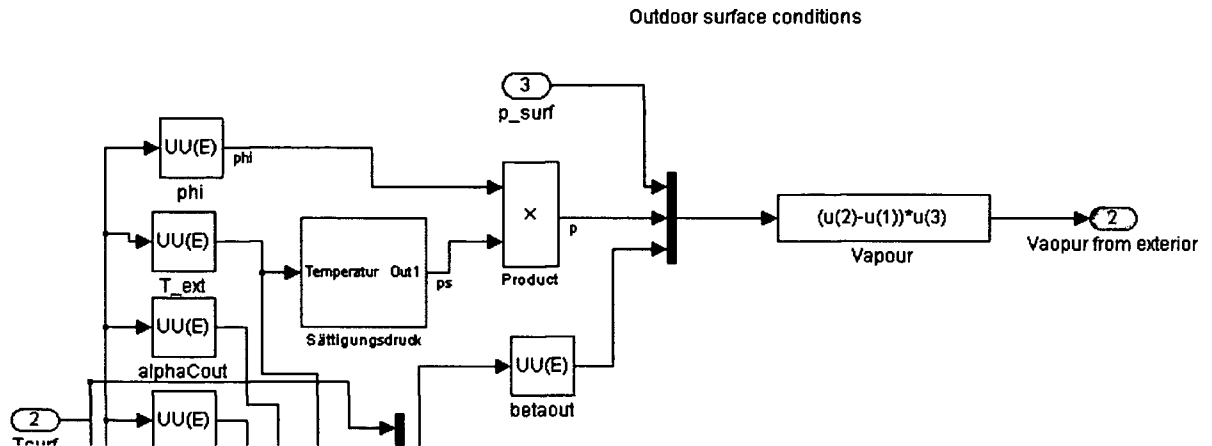


Abbildung 18: Darstellung der Berechnung der Feuchtestromdichte von Außen

2.2.1.1.6 Dampfstromdichte von Innen in die Schicht an der Oberfläche

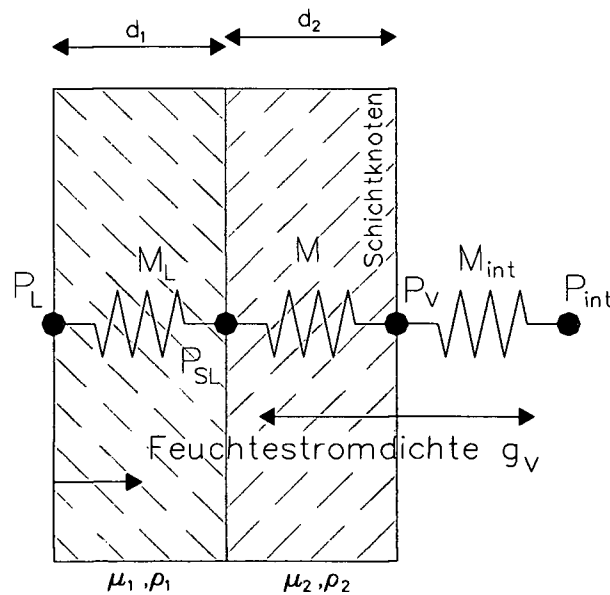


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Wärmestrombilanz der inneren Konstruktionsschicht

Der innere Oberflächenschichtknoten ist, wie der äußere, an der Schichtgrenze an der Oberfläche positioniert. Daher muss als Änderung zu einem innen liegendem Schichtknoten der Feuchtedurchlasskoeffizient (M) auf die gesamte Schichtstärke bezogen werden. Weiters wird die Feuchtestromdichte von innen über das angrenzende Raumklima berechnet. Die Bilanzgleichung (2-11) gilt daher auch für

diesen Knoten, es wird lediglich die Feuchtestromdichte von innen über die Gleichung (2-18) wie folgt definiert:

$$g_{v,L} = \beta \cdot (p_a - p_s) \quad (2-18)$$

- β Wasserdampfübergangskoeffizient in $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$
- p_a Wasserdampfpartialdruck der Innenluft in Pa
- p_s Wasserdampfpartialdruck an der Oberfläche in Pa

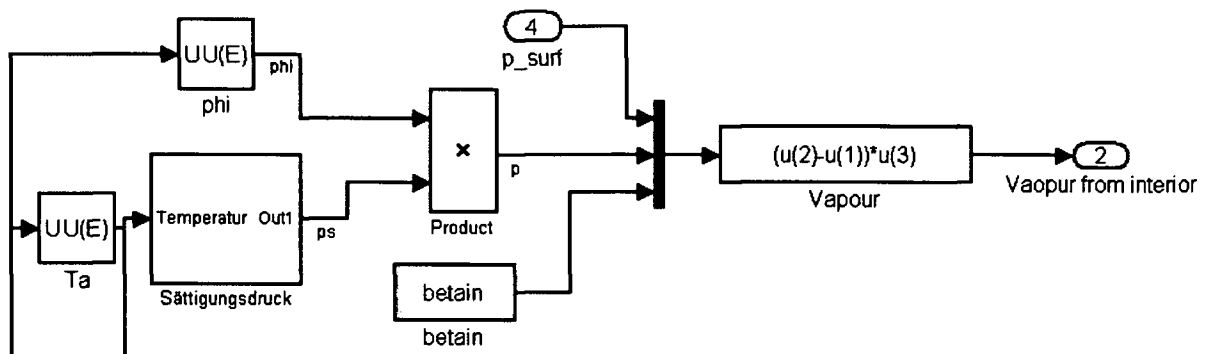


Abbildung 20: Darstellung der Berechnung der Feuchtestromdichte von Innen

2.2.2 Systemmodule

Als Systemmodule werden Systeme bezeichnet, die über definierte Eigenschaften bestimmte Wechselwirkungen zwischen Zonen oder Zonen und der Außenluft herstellen (z.B. Lüftungsanlagen, Fensterlüftung, Infiltration,...).

Wie solche Module aussehen, wird anhand eines einfachen Beispiels, welches den Luftwechsel durch Infiltration abbildet, im Folgenden gezeigt.

2.2.2.1 Modul Luftwechsel durch Infiltration

Für das Modell des Luftwechsels durch Infiltration wird als Ansatz der Energieerhaltungssatz mit einem Massenstromwiderstand über die Gleichung

$$\dot{m} = a \cdot \Delta P^b \quad (2-19)$$

laut [CLAD1] definiert.

\dot{m}	Massestrom des Mediums in kg/s
a,b	Empirisch ermittelte Koeffizienten
ΔP	Druckunterschied zwischen den betrachteten Knoten in Pa

Die Koeffizienten a und b können etwa durch einen Blower Door Test an einem Gebäude ermittelt werden, da hierbei der Volumenstrom bei einer bestimmten Druckdifferenz ermittelt wird. Steht eine Messkurve zu Verfügung können die Koeffizienten direkt bestimmt werden.

Es können aber auch wesentlich einfachere Modelle (z.B. mit einer konstanten Luftwechselzahl) je nach Erfordernis zur Anwendung kommen.

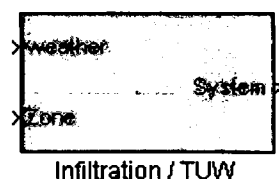


Abbildung 21: Symbolische Darstellung des Infiltrationmoduls

Die erforderlichen Parameter werden über eine Eingabemaske, welche bei „Doppelklick“ auf das Modul erscheint, eingegeben. Die Parameter nach der Eingabereihenfolge sind:

- Höhenunterschied der betrachteten Knoten in m
- Parameter a
- Parameter b

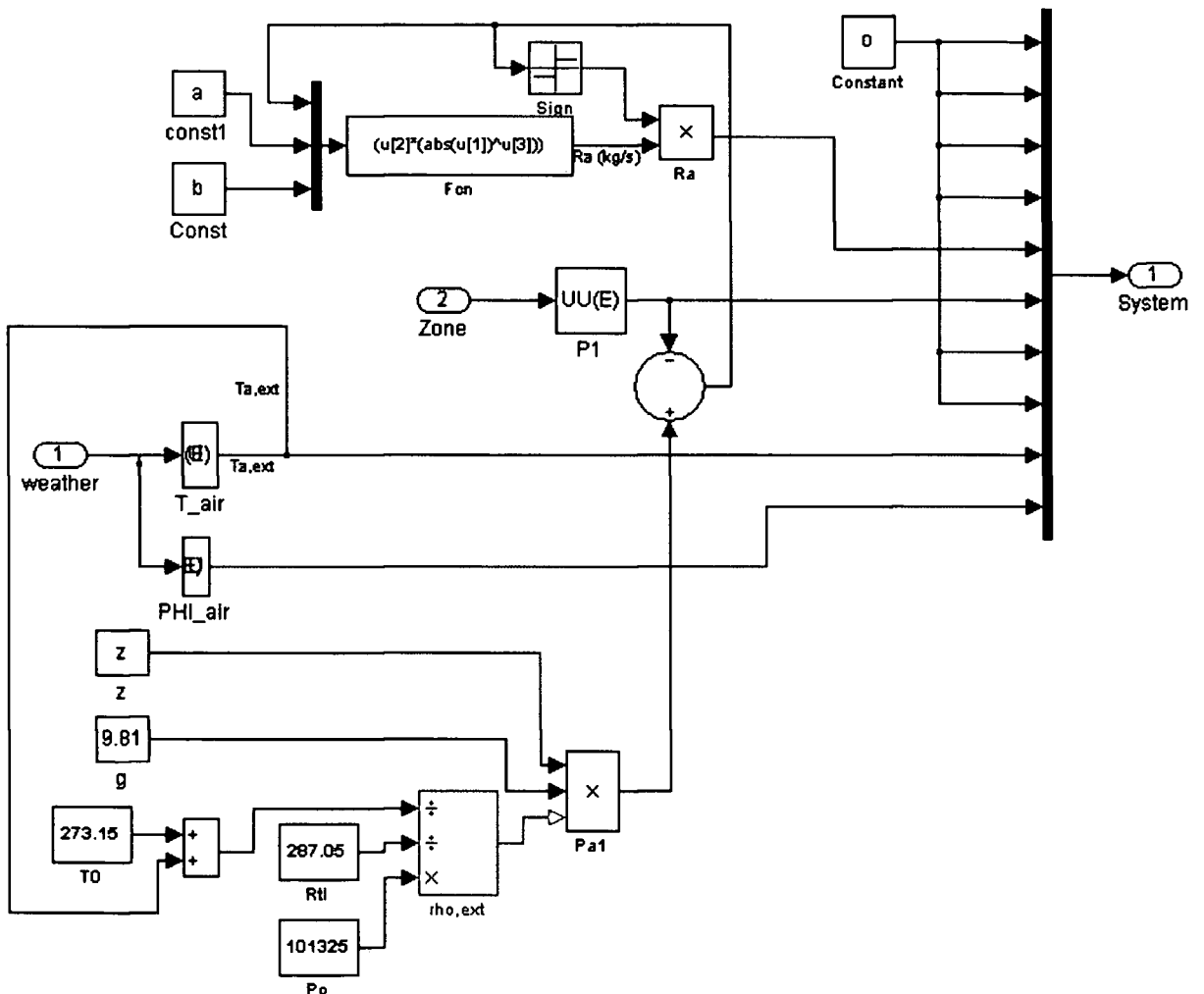


Abbildung 22: Darstellung der Berechnung des Infiltrationsmoduls

2.2.3 Zonenmodule

2.2.3.1 Raummodul

Das Raummodul stellt den zentralen Knoten einer Zone dar, wobei alle angrenzenden Konstruktionen (Wände, Fenster, ...), Systeme (Lüftungen, ...) und Quellen (Personen, Heizungen, Kühlungen...), sowie alle die Zone betreffenden Module über die vordefinierten Bussysteme angeschlossen werden. Als Output stehen der Zonen- und Strahlungsbus zu Verfügung, um die errechneten Daten weiterzuleiten und zu verarbeiten.

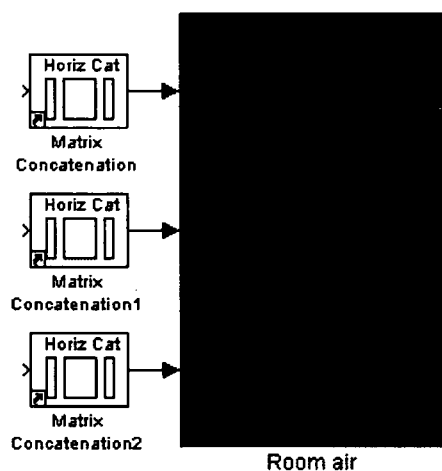


Abbildung 23: Symbolische Darstellung des Raummoduls

Die erforderlichen Parameter, wie z.B. Volumen oder Starttemperatur, werden über eine Eingabemaske, welche bei „Doppelklick“ auf das Modul erscheint, eingegeben. Die Parameter nach der Eingabereihenfolge laut Abbildung 24 sind:

- Raumnettovolumen in m^3
- Zusätzliche Speicherkapazität in J/K (z.B. Einrichtung)
- Konvektiver Anteil von solaren Quellen
- Starttemperatur der Raumluft in $^{\circ}C$
- Startfeuchtigkeit der Raumluft in %
- Anzahl der angeschlossenen Konstruktionenmodule
- Anzahl der angeschlossenen Systemmodule
- Anzahl der angeschlossenen Quellenmodule

Block Parameters: Room air

Room air (two node model) (mask)

Parameters

Room volume, [m3]
129.6

Additional vol. heat capacity, [J/K]
0

Convective fraction of solar gains, [-]
0

Start temperature of the room air, [oC]
20

Start humidity [%]
90

Number of constructions
7

Number of systems
1

Number of gains
2

OK Cancel Help Apply

Abbildung 24: Parametermaske des Außenwand Moduls

Innerhalb des Raummoduls wurde ebenfalls eine Struktur gewählt, die leicht erweiterbar, bzw. austauschbar ist. So wurden der Wärmeberechnungsknoten und der Feuchteberechnungsknoten getrennt, weshalb bei dem angeführten Modell von einem Zwei - Knoten Modell gesprochen werden kann.

2.2.3.1.1 Wärmeknoten

Um die Temperatur in der Zone zu berechnen, wurde der Wärmeknoten in zwei Teile unterteilt, einen Strahlungsknoten und einen konvektiven Wärmeknoten. Wobei für diese beiden Knoten die Energiebilanzen getrennt berechnet und ausgewertet werden.

2.2.3.1.2 Energiebilanz des konvektiven Wärmeknoten

Die Energiebilanz des konvektiven Wärmeknoten umfasst alle Energieströme, die durch Konvektion über Konstruktionen, Luftwechsel oder durch Quellen mit dem Raum in Verbindung stehen. So lässt sich die Energiebilanz wie in (2-20) angeben.

$$C \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_V + \dot{Q}_R + \dot{Q}_G \quad (2-20)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} \quad \text{zeitliche Änderung der Lufttemperatur des Raumes in } ^\circ\text{C}$$

$$C = \rho_a \cdot c_{p,a} \cdot V + C_m \quad \text{Speicherkapazität des Raumes in J/K} \quad (2-21)$$

ρ_a Dichte der Luft in kg/m^3

$c_{p,a}$ spezifische Wärmekapazität von Luft ist $1200 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

V Netto-Raumvolumen in m^3

C_m Zusätzliche speicherwirksame Masse in J/K (z.B. Einrichtung, ...)

$$\dot{Q}_C = \sum_{i=1}^n (T_{S,i} - T_a) \cdot A_i \cdot \alpha_{c,i} \quad \text{Wärmestrom aus den Konstruktionen [W]} \quad (2-22)$$

$T_{S,i}$ Oberflächentemperatur der Konstruktion mit dem Index i in $^\circ\text{C}$

A_i Fläche der Konstruktion mit dem Index i in m^2

$\alpha_{c,i}$ konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der Konstruktion mit dem Index i in $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$

n Anzahl der Konstruktionen, die mit der Zone verbunden sind

$$\dot{Q}_V = \sum_{i=1}^n q_{a,i} \cdot (T_{e,i} - T_a) \cdot c_{p,a} \quad \text{Wärmestrom, resultierend durch Luftaustausch in W}$$

(2-23)

$q_{a,i}$ Luftvolumenstrom des Systems mit dem Index i in m^3/s

$T_{e,i}$ Lufttemperatur, die über das System mit dem Index i in die Zone transportiert wird in $^\circ\text{C}$

$c_{p,a}$ spezifische Wärmekapazität von Luft ist $1200 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

n Anzahl der Lüftungssysteme

$$\dot{Q}_R = \sum_{i=1}^n q_{\text{sol},i} \cdot A_i \cdot \text{CF}_s \quad \text{Wärmestrom resultierend durch Strahlung in W} \quad (2-24)$$

$q_{\text{sol},i}$	Solarer Energieeintrag durch das Fenster mit dem Index i in W/m^2
A_i	Fläche des Fensters mit dem Index i in m^2
CF_s	Faktor für konvektiven Anteil von solaren Quellen
n	Anzahl der Fenster
\dot{Q}_G	konvektiver Wärmestrom von Quellen

2.2.3.1.3 Strahlung zwischen dem Luftknoten und den Konstruktionen

Als zweite Energiebilanz wird, wie bereits erwähnt, der Strahlungsaustausch zwischen dem Luftknoten und den Konstruktionsoberflächen, sowie die Strahlung aus Quellen berechnet. Wobei die Strahlung der Oberflächen berechnet werden kann über:

$$I = \sum_{j=1}^n A_j \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot T_j^4 \quad (2-25)$$

A_j	Fläche des emittierenden Bauteils mit dem Index j in m^2
ε_j	Emissionsgrad der Oberfläche mit dem Index j
σ	Stefan Boltzmann Konstante ist $5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
T_j	Oberflächentemperatur des Bauteils mit dem Index j in K

Weiters wird angenommen, dass die Summe der absorbierten und der weitergeleiteten Strahlung per m^2 gleich für jede Fläche ist. Da jede Fläche Strahlung auch emittiert ergibt sich der Strahlungsaustausch zu:

$$Q_{\text{rad},i} = \frac{\Phi_r + \sum_{j=1}^n A_j \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot T_j^4}{A_i} - \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 \quad (2-26)$$

Als Näherung kann die Gleichung mittels konstantem Strahlungsübergangskoeffizienten α_r wie folgt vereinfacht werden.

$$Q_{\text{rad},i} = \frac{\Phi_r + \alpha_r \sum_{j=1}^n A_j \cdot T_j}{A_t} - \alpha_r \cdot T_i \quad (2-27)$$

$Q_{\text{rad},i}$	Strahlung, die von der Fläche mit dem Index i absorbiert wird in W
Φ_r	Strahlungsteil, der von Quellen abgegeben wird in W
A_t	Gesamtfläche aller Konstruktionen der betrachteten Zone in m ²
α_r	Strahlungsübergangskoeffizient ist 5 W/m ² .K

Nach Ergänzung der Strahlung, die durch durchlässige Bauteile (Fenster) in den Raum geleitet wird, erfolgt die Berechnung im Modell durch nachfolgende Gleichung, wobei diese Strahlung über den Zonenbus an jede Konstruktion wieder ausgegeben wird.

$$Q_{\text{rad},i} = \frac{\sum_{j=1}^n T_j \cdot A_j \cdot \alpha_r + \sum_{j=1}^n q_{\text{sol},j} \cdot A_j \cdot (1 - \text{CFs}) + \sum_{k=1}^m q_{r,k}}{\sum_{j=1}^n A_j} - T_i \cdot \alpha_r \quad (2-28)$$

T_j	Oberflächentemperatur des Bauteils mit dem Index j in K
A_j	Fläche des emittierenden Bauteils mit dem Index j in m ²
α_r	Strahlungsübergangskoeffizient ist 5 W/m ² .K
$q_{\text{sol},j}$	Solarer Eintrag der Konstruktion mit dem Index j in W
CFs	Der Konvektionsfaktor gibt an, welcher Anteil der eingebrachten Energie konvektiv und welcher Strahlung ist.
n	Anzahl der Konstruktionen der betrachteten Zone
$q_{r,k}$	Strahlungsteil der Quelle mit dem Index k in W
m	Anzahl der Quellen der betrachteten Zone
T_i	Oberflächentemperatur des Bauteils, für den die Strahlungsmenge berechnet wird in K

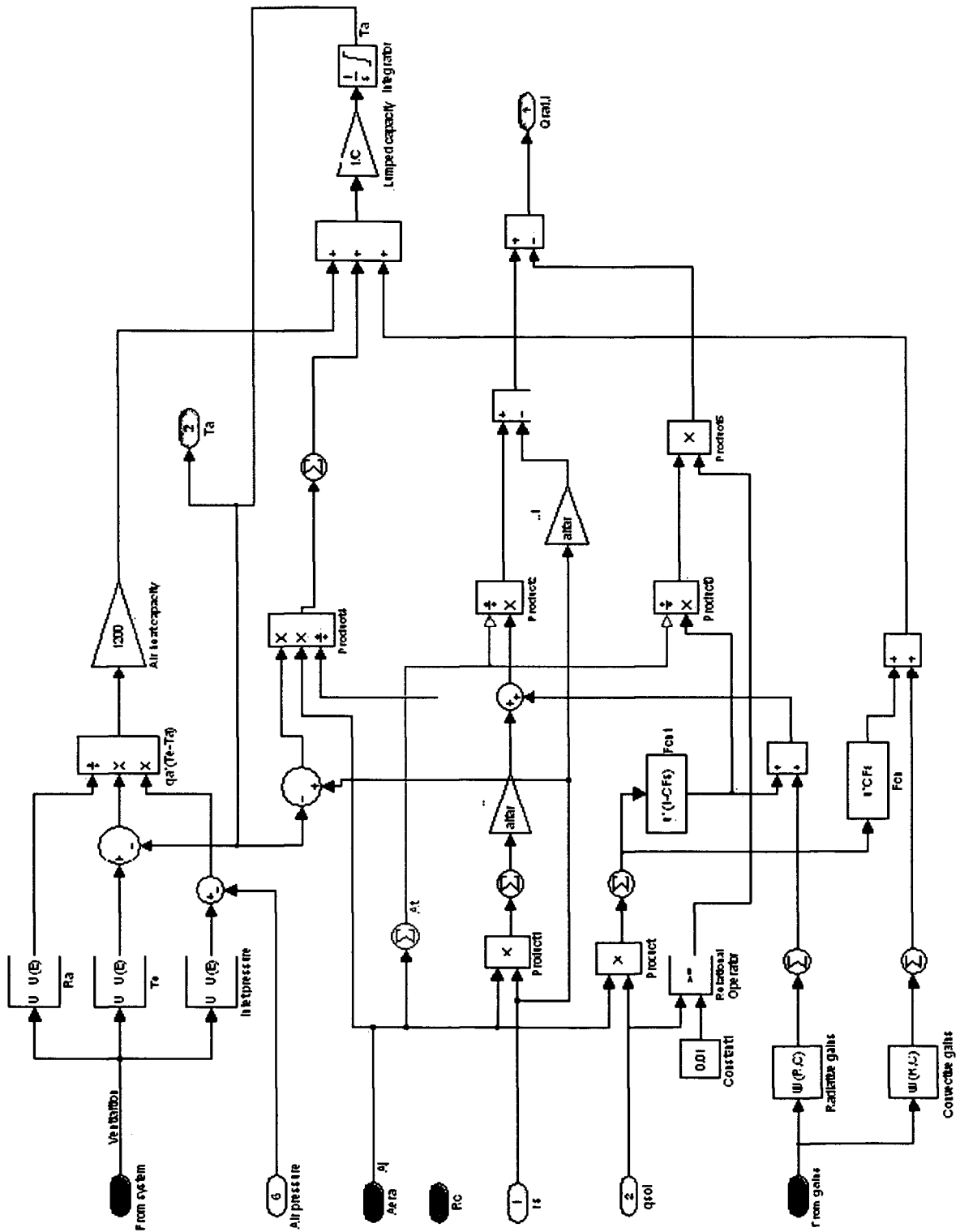


Abbildung 25: Darstellung der Berechnung des Wärmeknotens des Raummoduls

2.2.3.1.4 Feuchteknoten

Die Feuchtigkeit der Raumluft wird wieder über den Massenerhaltungssatz berechnet, nachdem die Summe der zu- und abströmenden Feuchtigkeit gleich dem Feuchtegehalt der Luft entspricht, wobei ein Flüssigwassertransport in dem gegenständlichen Modell nicht berücksichtigt wird.

$$\frac{df}{dt} = M_C + M_V + M_G \quad (2-29)$$

f	Wassermenge der Raumluft in kg
M_C	Wasserdampfstrom von oder zu Konstruktionselementen in kg/s
M_V	Wasserdampfinfiltration durch Lüftungssysteme in kg/s
M_G	Wasserdampfstrom von Quellen in kg/s

Die einzelnen Elemente der Gleichung (2-29) lassen sich durch die Gleichungen (2-30), (2-31) und (2-32) berechnen.

$$M_C = \sum_{i=1}^n (p_{S,i} - p_a) \cdot A_i \cdot \beta_{v,i} \quad (2-30)$$

$p_{S,i}$	Wasserdampfpartialdruck an der Oberfläche der Konstruktion mit dem Index i in Pa
p_a	Wasserdampfpartialdruck der Raumluft in Pa
A_i	Fläche der Konstruktion mit dem Index i in m ²
$\beta_{v,i}$	Feuchteübergangskoeffizient in kg/m ² ·s·Pa
n	Anzahl der Konstruktionen

$$M_V = \sum_{i=1}^n q_{a,i} \cdot (u_e - u_a) \quad (2-31)$$

q_a	Luftvolumenstrom des Lüftungssystems mit dem Index i in m ³ /s
u_e	Absolute Luftfeuchte der Außenluft in kg/m ³
u_a	Absolute Luftfeuchte der Raumluft in kg/m ³
n	Anzahl der Lüftungssysteme

$$M_G = \sum g_v \quad (2-32)$$

g_v	Feuchteproduktion der Quelle in kg/s
-------	--------------------------------------

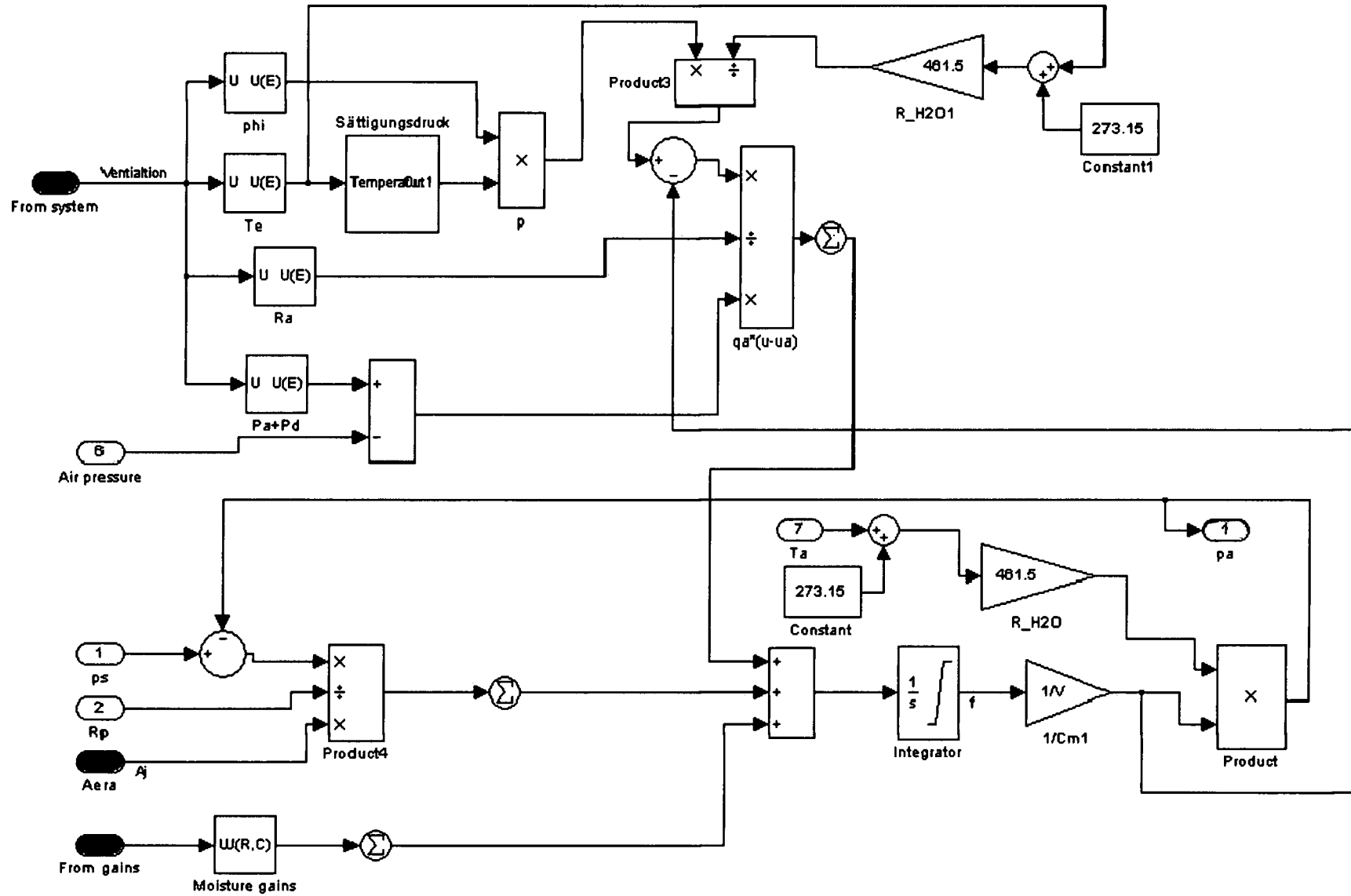


Abbildung 26: Darstellung der Berechnung des Feuchteknotts des Raummoduls

3 Beispiel 1: Eindimensionales Wärme- und Feuchtemodell

Zur Validierung des Berechnungsmodells wurde ein einschichtiger Wandaufbau aus 25 cm Porenbeton mit festem Innen- und Außenklima simuliert. Danach wurden die Ergebnisse mit der analytischen Lösung verglichen.

3.1 Simulationsparameter

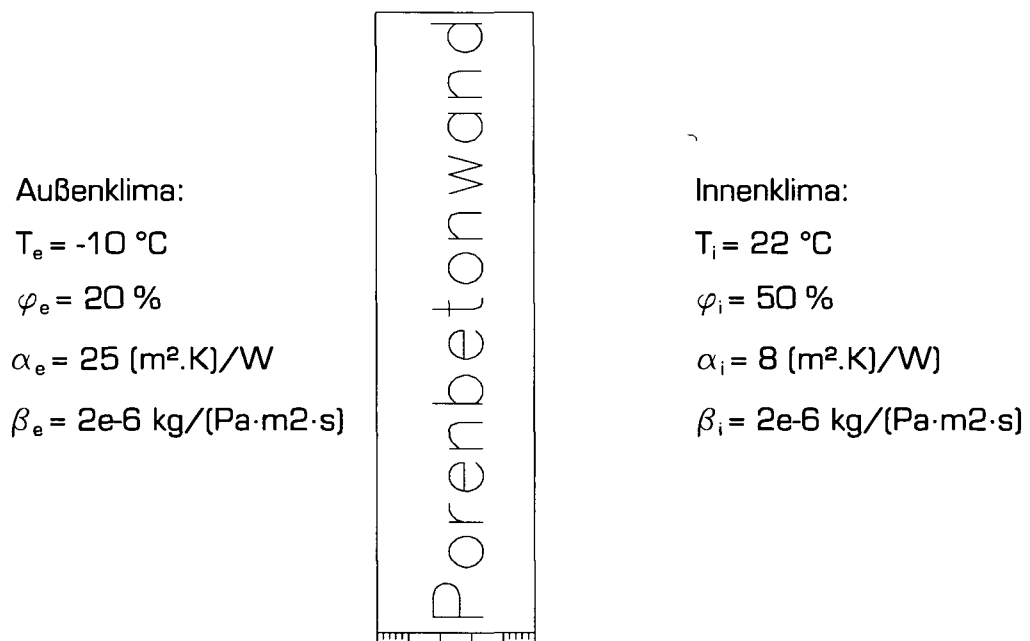


Abbildung 27: System der Angabe „Eindimensionales Wärme- und Feuchtemodell“

Materialparameter:

Trockendichte $\rho = 625 \text{ kg/m}^3$

spez. Speicherkapazität $c = 900 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0.17 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

Diffusionswiderstandszahl $\mu = 8.3$

Feuchteübergangswiderstand $R_f = 5.0 \cdot 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$

Da es sich bei dieser Vergleichsrechnung um ein sehr kleines Modell handelt, kann das Simulationsnetz sehr fein gewählt werden, wodurch die Genauigkeit sehr hoch ist und die Simulationszeit trotzdem noch in einem annehmbaren Zeitraum bleibt.

Als Netz wurde folgende Schichtaufteilung gewählt:

Maße in Zentimeter

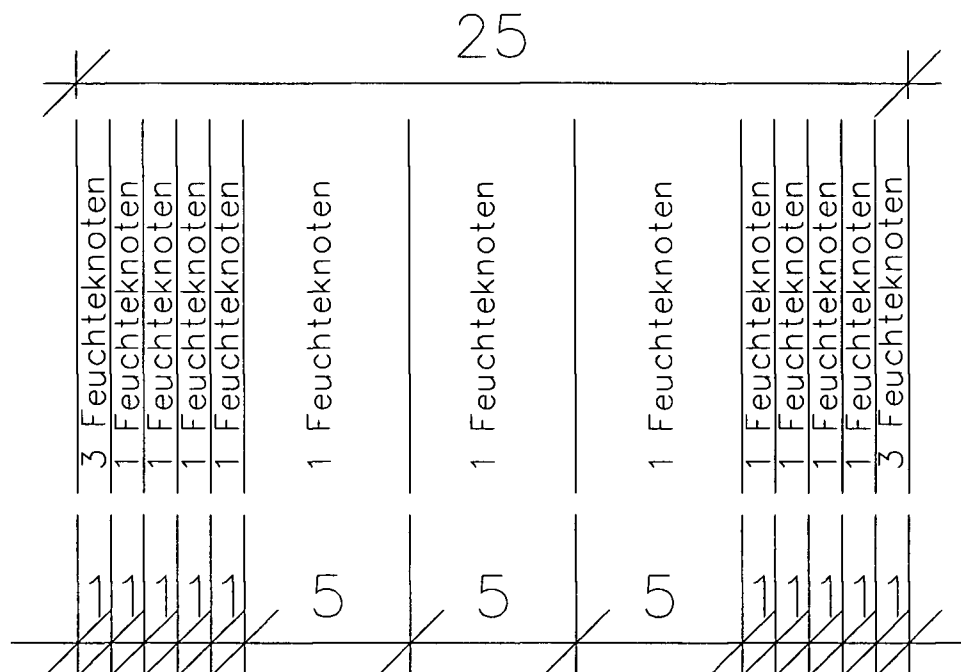


Abbildung 28: Übersicht der Schichteneinteilung des Rechenmodells

Wobei jeder Teilbereich einem Temperaturknoten und seinen zugehörigen Feuchteknoten entspricht.

3.2 Ergebnisse

Analytische Lösung:

	Dicke	λ	d/λ	T	μ	$\mu \cdot d$	P	Ps	RH
	m	W/m.K	m ² .KW	°C		m	Pa	Pa	%
Außen			0.0400	-10.00		0.00	51.94	259.68	20.00
OE	0.015	0.17	0.0882	-9.22	8.30	0.12	51.94	278.31	18.66
1	0.01	0.17	0.0588	-7.49	8.30	0.08	128.27	323.79	39.61
2	0.01	0.17	0.0588	-6.34	8.30	0.08	179.15	357.77	50.07
3	0.01	0.17	0.0588	-5.19	8.30	0.08	230.04	394.98	58.24
4	0.03	0.17	0.1765	-4.04	8.30	0.25	280.92	435.70	64.48
5	0.05	0.17	0.2941	-0.59	8.30	0.42	433.58	581.88	74.51
6	0.05	0.17	0.2941	5.17	8.30	0.42	688.01	883.23	77.90
7	0.03	0.17	0.1765	10.92	8.30	0.25	942.44	1307.60	72.07
8	0.01	0.17	0.0588	14.38	8.30	0.08	1095.09	1640.32	66.76
9	0.01	0.17	0.0588	15.53	8.30	0.08	1145.98	1766.61	64.87
10	0.01	0.17	0.0588	16.68	8.30	0.08	1196.86	1901.33	62.95
12	0.015	0.17	0.0882	17.83	8.30	0.12	1247.75	2044.95	61.02
IO			0.1250	19.55		0.00	1324.08	2278.16	58.12
Innen		R=	1.6356	22.00	$\Sigma(\mu \cdot d)=$	2.08	1324.08	2648.16	50.00
		U=	0.6114	W/m ² .K					
		$\Delta T=$	32.00	K		$\Delta P=$	1272.142		

Tabelle 7: Analytische Lösung

Die analytische Lösung kann, wie in der Tabelle 7 gezeigt, direkt über die gegebenen Materialparameter und Randbedingungen bestimmt werden. Dabei wurden die Formeln aus Kapitel 1.4 sowie Grundlagen aus (BPH1) sowie (BPH2) angewandt.

Vergleich der Ergebnisse:

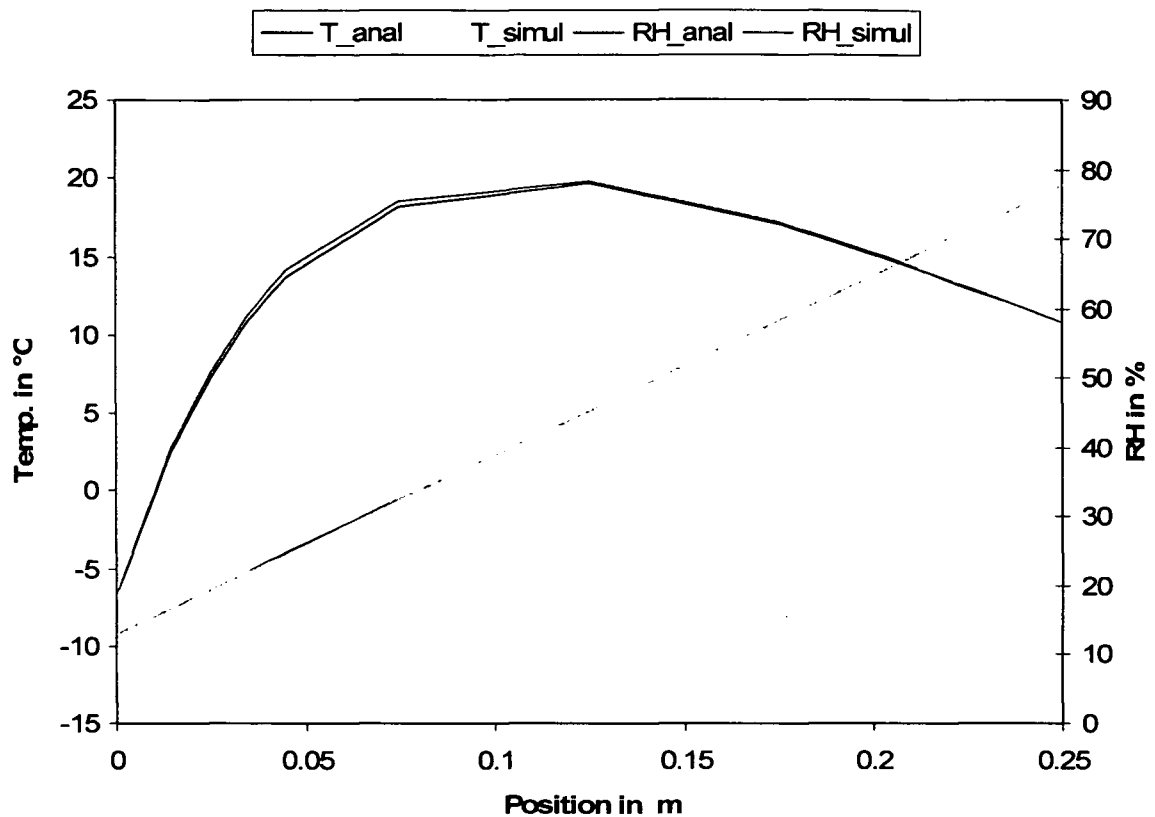


Abbildung 29: Ergebnisse der analytischen und simulierten Berechnung

Wie man in Abbildung 29 gut erkennen kann, stimmt die simulierte Lösung sehr gut mit der analytischen überein. Bei der geringen Abweichung der relativen Luftfeuchte kann entweder von einem Rundungsfehler oder von einer zu kurzen Simulationsdauer (1 Jahr) ausgegangen werden. Der Fehler ist jedoch so gering, dass er vernachlässigt werden kann. Somit kann für die weiteren Berechnungen davon ausgegangen werden, dass das im Kapitel 2.2.1.1 beschriebene Modell für eine Außenwand richtig abgebildet wurde.

4 Beispiel 2: Wärme- und Feuchtemodell mit einer Zone (IEA Annex 41-1-OB)

Zur weiteren Validierung des Berechnungsmodells wurde ein Testbeispiel gemäß „International Energy Agency“ Annex 41 WHOLE BUILDING HEAT, AIR AND MOISTURE RESPONSE gewählt. Es wurde aus der Beispielreihe 1 das Testbeispiel „OB“, ein Wärmemodell mit einer Zone und einer Konstruktion gewählt. Das Außenklima sowie der Luftwechsel sind konstant, als Konstruktion dient eine 15 cm Porenbetonwand.

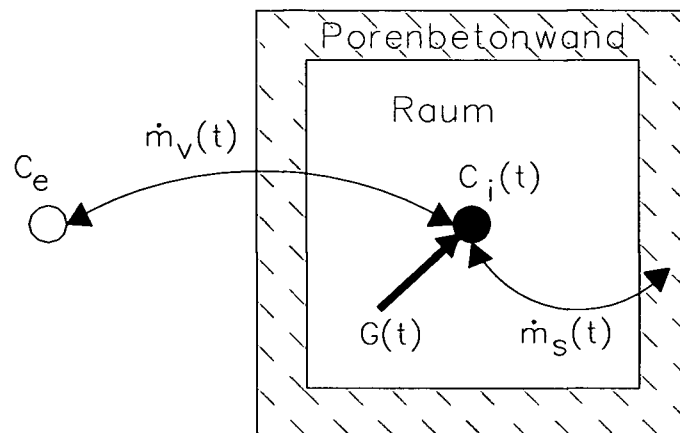


Abbildung 30: System der Angabe „IEA Annex 41 Beispielreihe 1 Testbeispiel OB“

Das Simulationsergebnis wurde mit dem Ergebnis der analytischen Lösung verglichen, wobei gleichzeitig ein Vergleich mit verschiedenen Gitterfeinheiten bei der Simulation durchgeführt wurde.

4.1 Berechnungsparameter

- Seehöhe: 0 m.
- Konstruktionen sind aus Porenbeton mit konstanten bzw. linearen Eigenschaften.
- das Gebäude hat keine Fenster
- Außentemperatur konstant $T_a = 20 \text{ °C}$
- Luftfeuchte außen konstant $\varphi_a = 30 \text{ %}$
- Anfangstemperatur des Baustoffes und des Raumes $T_0 = 20 \text{ °C}$
- Anfangsluftfeuchte des Baustoffes und des Raumes $\varphi_0 = 30 \text{ %}$
- innerer Wärmeübergangswiderstand $R_i = 0.121 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$
- äußerer Wärmeübergangswiderstand $R_a = 0.034 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$
- Feuchteübergangswiderstand $R_f = 5.0 \cdot 10^7 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$
- Volumen des Raumes $V = 6 \times 8 \times 2.7 = 129.6 \text{ m}^3$
- konstanter Luftwechsel von $n = 0.5 \text{ 1/h}$
- innere Feuchtequelle $g_q = 500 \text{ g/h}$ von 9:00 – 17:00 jeden Tag. Außerhalb dieses Zeitraumes keine Feuchtequellen.
- keine Heizquellen vorhanden
- Materialdaten der Porenbetonwand:
 - Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0.18 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
 - spez. Speicherkapazität $c = 840 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
 - Trockendichte $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$
 - Wasserdampfdurchlässigkeit $\delta_p = 3.0 \cdot 10^{-11} \text{ kg/(m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa)}$
 - Sorptionskurve $u = 0.0661 \cdot \varphi$
 - mit u als Feuchtegehalt in kg/kg
 - und φ als relative Luftfeuchte
- Die Porenbetonwand besitzt an der Außenseite eine dichte Schicht, sodass es zu keinem Feuchteaustausch zwischen Innenraum und Außenklima über die Konstruktion kommt.

4.2 Simulation

Um einen Vergleich der Rechengenauigkeit über die gewählte Knotenanzahl der Konstruktion zu erhalten, wurden 3 Fälle mit unterschiedlicher Netzdichte simuliert und deren Ergebnisse gegenübergestellt (Maße in Zentimeter):

Fall A: 3 Temperaturknoten mit 9 Feuchteknoten

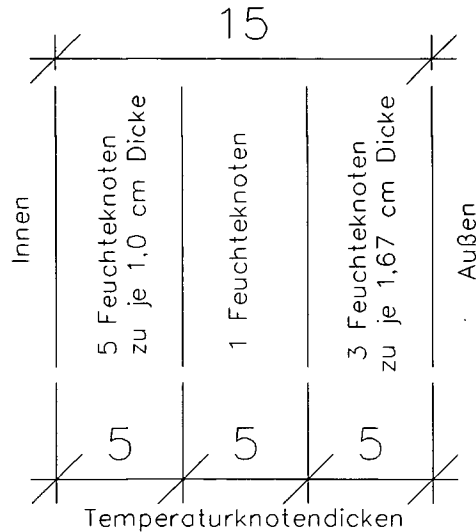


Abbildung 31: Schichtenaufbau der Außenwandkonstruktion Fall A

Fall B: 7 Temperaturknoten mit 13 Feuchteknoten

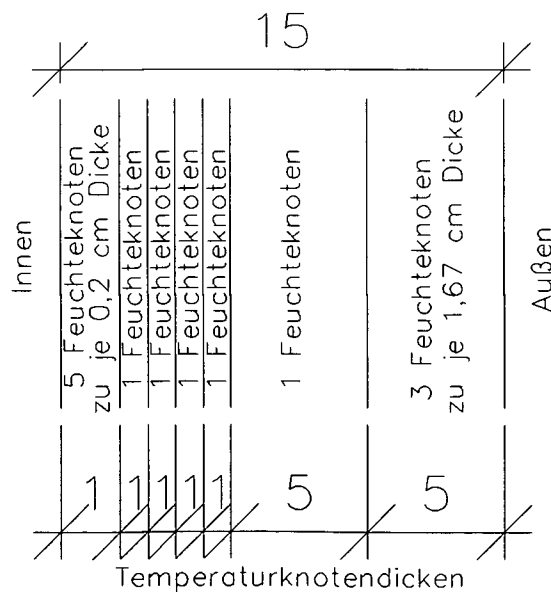


Abbildung 32: Schichtenaufbau der Außenwandkonstruktion Fall B

Fall C: 7 Temperaturknoten mit 13 Feuchteknoten

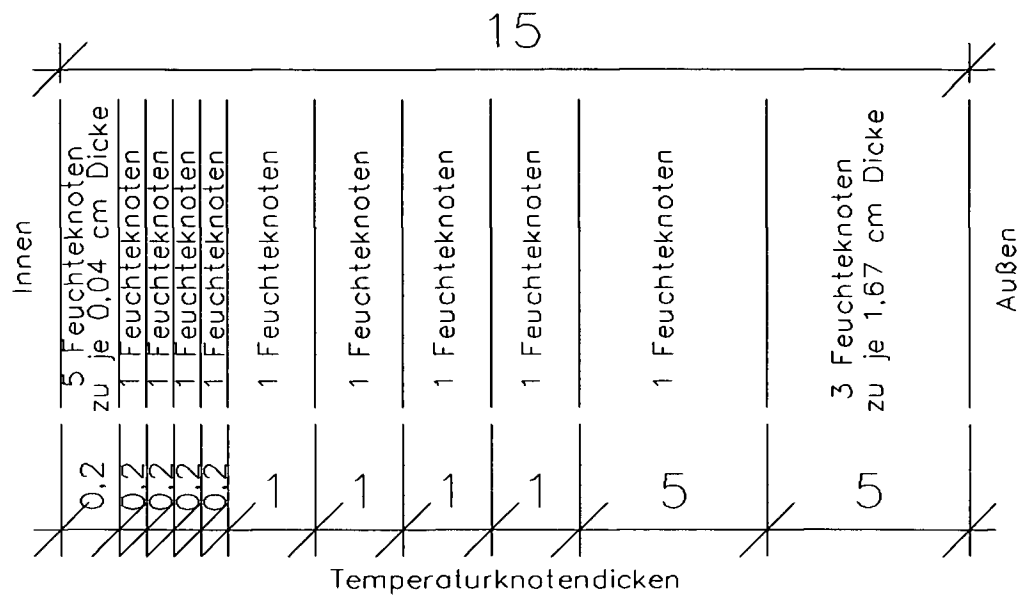


Abbildung 33: Schichtenaufbau der Außenwandkonstruktion Fall C

4.3 Ergebnisse

Analytische Lösung [BEDOO]:

$$\delta_v = \delta_p \cdot R \cdot T \tag{4-1}$$

δ_p Permeabilität für partiellen Wasserdampfdruck in $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$

R Gaskonstante von Wasserdampf ist $461,5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

T Temperatur in K

δ_v Permeabilität für Wasserdampfkonzentration in m^2/s

$$a_v = \frac{\delta_v \cdot c_{\text{sat}}}{\zeta} \quad \zeta = \frac{du}{d\varphi} \tag{4-2}$$

c_{sat} Wasserdampfkonzentration in kg/m^3

u Sorptionsfeuchte in kg/m^3

φ Relative Feuchte

$$Z_s = \frac{1}{\beta_p \cdot R \cdot T} \quad (4-3)$$

β_p Feuchteübergangskoeffizient in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$

$$d_s = \delta_v \cdot Z_s \quad (4-4)$$

$$d_2 = d_s + \frac{A \cdot \delta_v}{Ra} \quad (4-5)$$

A Fläche der Konstruktion im Raum in m^2

Ra Luftvolumenstrom in m^3/s

Die Lösung wird durch Überlagerung einzelner Schritte berechnet:

$$c_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n(t) \quad (4-6)$$

$$y \geq 0 \quad c_n(t) = c_{0,n} + \Delta c_n \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{d_s}{d_2} \right) \cdot e^y \cdot \text{erfc}(\sqrt{y}) \right) \quad (4-7)$$

$$y < 0 \quad c_n(t) = c_{0,n} \quad (4-8)$$

$$y = \frac{a_v \cdot (t - t_{s,n})}{d_2^2} \quad (4-9)$$

$t_{s,n}$ Zeit des n-ten Schrittes in s

t Zeit in s

G Produktionsrate in kg/s

	0	1	2m m=1..∞	2m+1 m=1..∞
$c_{0,n}$	$0.3 \cdot v_{\text{sat}}$	0	0	0
Δc_n	$+G/Ra$	$-G/Ra$	$+G/Ra$	$-G/Ra$
$t_{s,n}$	9	17	$9+24 \cdot m$	$17+24 \cdot m$

Tabelle 8: Parameter für die verschiedenen Schritte

Anfangsbedingung: $\varphi_e(t) = \varphi_i(0) = \varphi(x,0) = 30\%$

Vergleich der Ergebnisse:

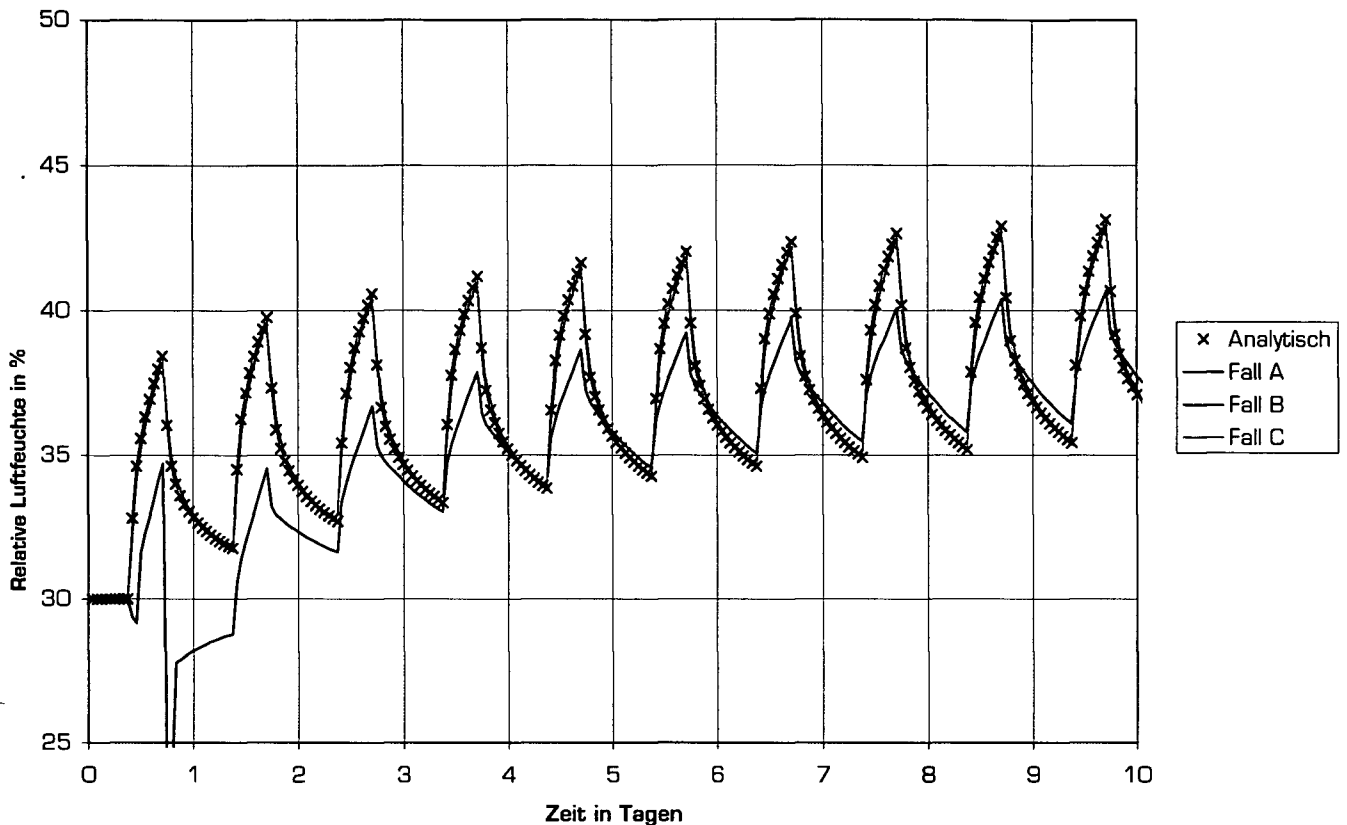


Abbildung 34: Verlauf der relativen Luftfeuchte des Raumes der ersten 10 Tage

Wie der Vergleich der Simulation mit der analytischen Lösung zeigt, stimmt die Simulation gut mit der Analytischen Lösung überein. Wobei sich jedoch durch ein zu grobes Gitter wie in Fall A die Extremwerte (Maxima und Minima) zu nieder bzw. zu hoch ergeben. Weiters kann es am Anfang der Berechnung zu numerischen Problemen kommen, die jedoch weitestgehend durch die Wahl des geeigneten „Solvers“ (Berechnungsalgorithmus) vermieden werden können. Dahingehend sei bemerkt, dass bei der Simulation oft ein Kompromiss geschlossen werden muss, da sehr schnelle „Solver“ oft Probleme bei der Berechnung einzelner Sequenz haben. daher sollte eine Berechnung immer mit verschiedenen Algorithmen analysiert und die jeweiligen Ergebnisse miteinander verglichen werden.

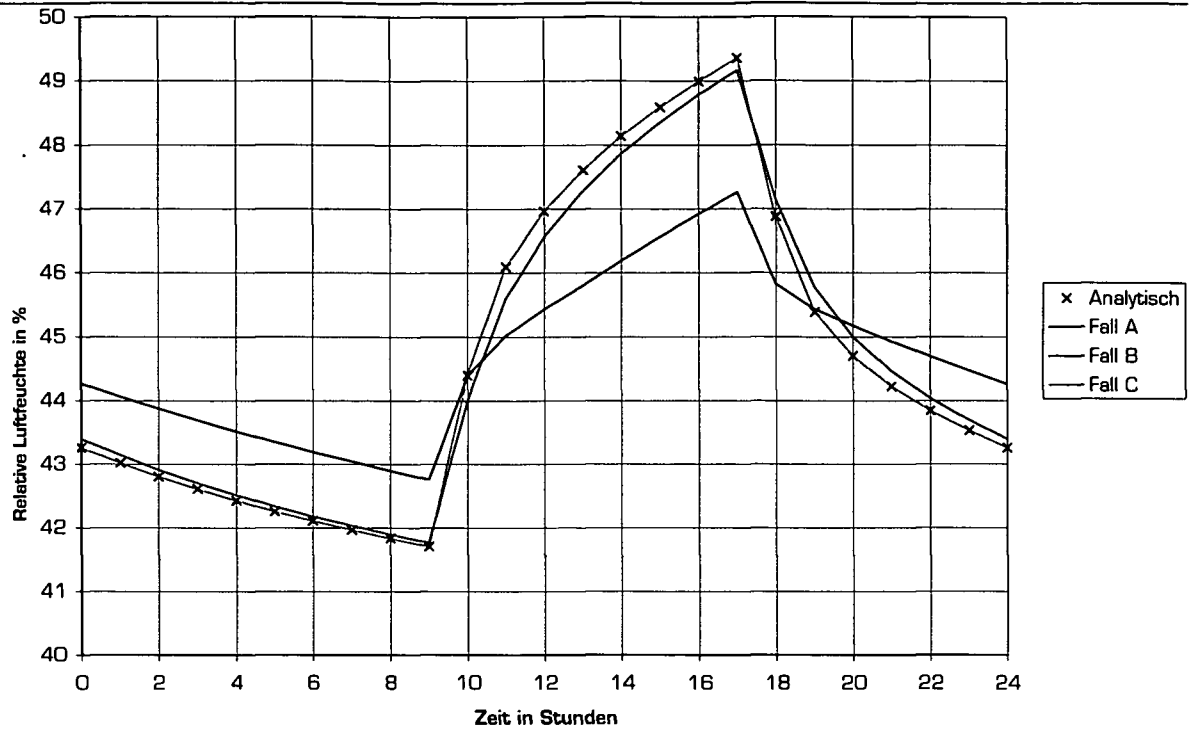


Abbildung 35: Verlauf der relativen Luftfeuchte des Raumes, wenn der periodische Zustand erreicht ist.

Auch bei genauer Betrachtung eines Tages, bei dem bereits der periodische Zustand erreicht ist folgt das Ergebnis, dass die Ergebnisse aller 3 Fälle mit der analytischen Berechnung übereinstimmen, wobei jedoch eine maximale Schichtstärke an der Oberfläche von 1 cm (Fall B) gewählt werden sollte, um die Extremwerte sehr gut anzunähern.

5 Beispiel 3: Wärme- und Feuchtemodell mit acht Zonen (Wohnung)

Zur Untersuchung des Einflusses der Feuchtepufferung und des Lüftungsverhaltens auf das Raumklima wurde eine Wohnung mit 96.1m² für verschiedene Nutzungs-, Lüftungs- und Feuchtepufferszenarien simuliert.

5.1 Simulationsparameter

Die betrachtete Wohnung besteht aus 8 Räumen, wobei jeder Raum im Simulationsmodell einer Zone entspricht (siehe Abbildung 36). Die Wohnung besitzt zwei Außenwände und ist an allen anderen Seiten von beheizten Zonen mit gleichen klimatischen Verhältnissen umgeben. Als Orientierung wurden für das WZ und die KÜ Westfenster gewählt und für die anderen Osten.

Geometrische Abmessungen:

Zonennr.	Bezeichnung (Kurzeichen)	Raumhöhe in m	Breite in m	Länge in m
1	Küche (KÜ)	2,50	2,60	3,06
2	Wohnzimmer (WZ)	2,50	2,60	3,06
3	WC (WC)	2,50	1,97	0,95
4	Bad (BAD)	2,50	1,97	2,15
5	Vorraum (VR)	2,50	1,20	11,71
6	Arbeitszimmer (AZ)	2,50	3,25	2,28
7	Kinderzimmer (KZ)	2,50	4,45	4,24
8	Schlafzimmer (SZ)	2,50	3,60	4,24

Tabelle 9: Übersicht der Zonen und der geometrischen Abmessungen

Aufbauten der Bauteile:

Außenwand:

1,5 cm Innenputz
25,0 cm Hochlochziegel
0,5 cm Kleber
10,0 cm EPS-F
0,5 cm Kleber
0,2 cm Außenputz

Wohnungstrennwand:

1,5 cm Innenputz
25,0 cm Hochlochziegel
1,5 cm Innenputz

Zwischenwand:

1,5 cm Gipskartonplatte
5,0 cm Mineralwolle
1,5 cm Gipskartonplatte

Decke / Boden:

1,0 cm Belag
5,0 cm Zementestrich
0,01 cm PE-Folie
3,0 cm Trittschalldämmplatte
3,0 cm gebundene Schüttung
20,0 cm Stahlbeton
0,5 cm Spachtelung

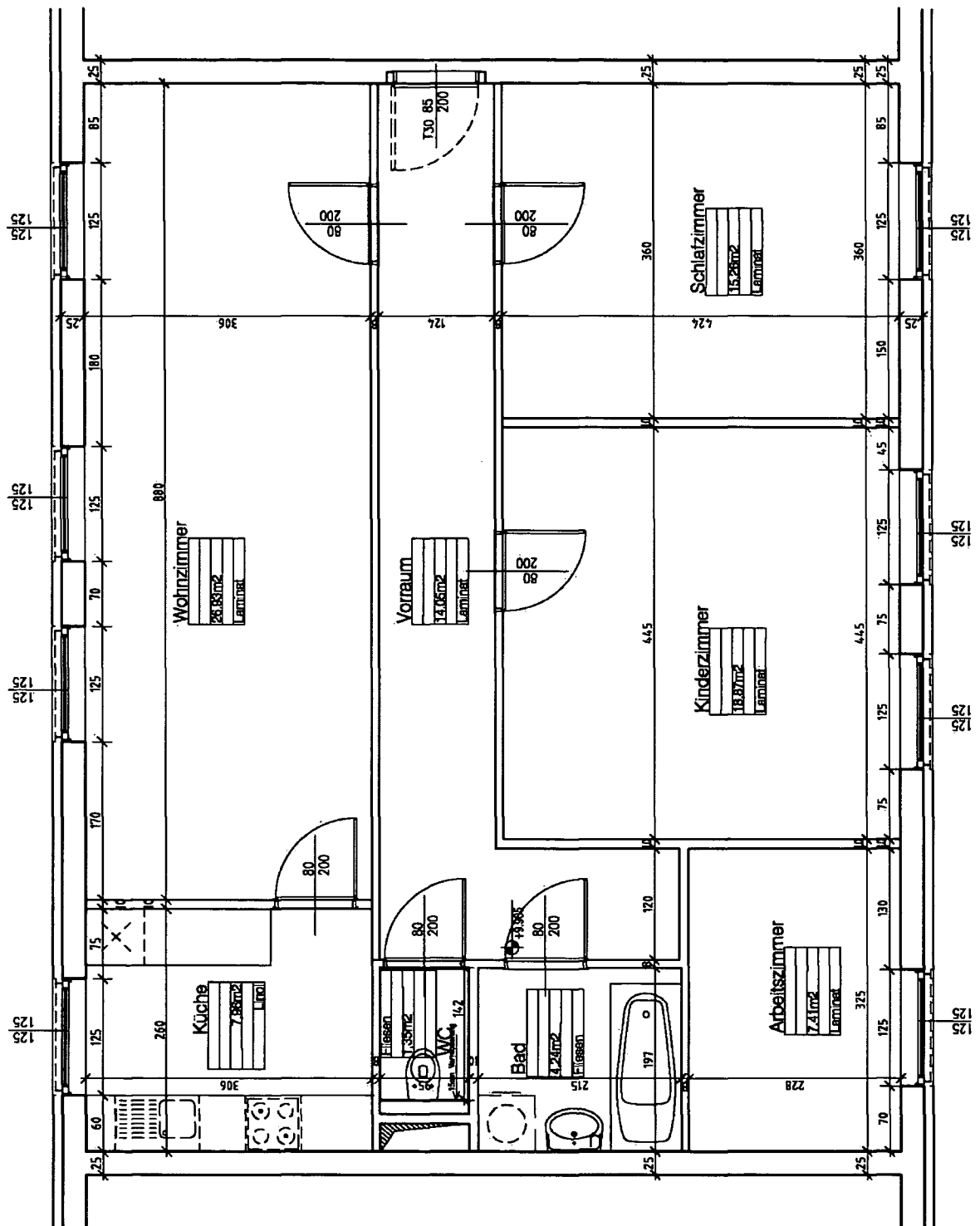


Abbildung 36: Übersichtsplan der simulierten Wohnung, ohne Maßstab

Materialdaten:

Bezeichnung	Dichte kg/m ³	spez. WKP J/(kg.K)	Wärmeleit- fähigkeit W/(m.K)	Wassergehalt in kg/m ³					Porosität in m ³ /m ³	Diffusionswiderstandszahl					
				bei 20%	bei 50%	bei 80%	bei 95%	bei fWS		bei 0%	bei 20%	bei 50%	bei 80%	bei 95%	Bei 100%
1_Innenputz	1300	1000	0.7	5	10	20	80	160	0.305	22	22	20	16	0.5	0.001
2_Hochlochziegel	800	1000	0.252	0.87	3.42	13	49.3	193	0.6	16	14	12	10	10	10
3_Kleber	1300	850	0.8	20	28	44.5	72.7	163	0.43	39.05	37	35	15.8	2.3	0.001
4_EPS_F15	15	1450	0.04	0.1	0.2	0.3	0.4	100	0.95	63	58	52	42	30	0.001
5_Außenputz	1800	850	0.7	20	28	44.5	72.7	163	0.43	1000	300	300	300	300	300
6_GKBauplatte	900	1000	0.21	0.69	2.7	10	34.6	100	0.65	6	6	6	5	4	3.21
7_Mineralwolle	16	1030	0.04	0.1	0.2	0.3	0.4	100	0.95	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
8_Spachtelung, Kleber	1300	850	0.8	20	28	44.5	72.7	163	0.43	39.05	37	35	15.8	2.3	0.001
9_Stahlbeton	2300	1050	2.3	35	45	85	118	150	0.18	180	180	180	180	180	180
10_Schüttung	1800	1000	0.7	2.5	9.7	35	113.2	280	0.25	25	25	25	25	25	25
11_TDP	16	1030	0.035	0.1	0.2	0.3	0.4	100	0.95	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
12_PE-Folie	800	1000	1	5	1	1.1	1.2	1.3	0.001	100000	100000	100000	100000	100000	100000
13_Zementestrich	1600	1080	0.77	10	21.7	37.4	100	152	0.18	69	69	69	69	69	69
14_Belag	1200	1400	0.17	0.1	0.18	0.5	0.6	0.6	0.001	1000	1000	900	800	800	800

Tabelle 10: verwendete Materialdaten

Luftstromnetzwerk und Luftwechsel:

Für das interne Luftstromnetzwerk wurde für jede Tür (Annahme: Tür geöffnet) zwischen den Räumen ein Luftaustausch von 200 m³/h angenommen.

Für den Außenluftwechsel wurde die errechnete ausgetauschte Luftmenge zu gleichen Teilen auf die 8 Fenster aufgeteilt.

5.2 Simulationsvarianten

Es wurden 2 Fälle der Nutzung (Feuchte- und Wärmeproduktion) in der Berechnung unterschieden, wobei die Feuchtemengen nach [EHROO] abgebildet wurden:

- 1) Familie (4 Personen) **tagsüber nicht zuhause**
- 2) Familie **tagsüber zuhause**

Für diese Nutzungsszenarien wurden nun verschiedene Lüftungsszenarien berechnet:

- **konstanter Luftwechsel** von 0,5 1/h ständig
- **2x täglich Stosslüften** mit einem Luftwechsel von 10,0 1/h für je 15 min
- im Fall 2 zusätzlich **3x täglich Stosslüften**

All diese Kombinationen von Lüftungs- und Nutzungsszenarien wurden mit den Feuchtepufferoptionen:

- **mit Feuchtepufferung**; die Oberflächen der Bauteile sind gemäß der Materialdaten (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) fähig Feuchtigkeit der Luft aufzunehmen und in dem Bauteil zu speichern.
- **ohne Feuchtepufferung**; dabei wurde die Diffusionswiderstandszahl der Oberflächenbaustoffe (Innenputz, Spachtelung und Belag) auf 100000 geändert, wodurch keine Feuchtigkeit der Luft durch Diffusion in den Bauteil geleitet werden kann.

kombiniert.

Die Berechnung wurde jeweils für 1 Jahr durchgeführt, wobei die Anfangsbedingungen für alle Bauteile und Zonen mit 50 % relativer Luftfeuchtigkeit und 20 °C Temperatur angenommen wurden. Des Weiteren wurde eine Vorlaufzeit von einem Monat berechnet, um einen eingeschwungenen Zustand der Bauteile und Zonen zu erreichen.

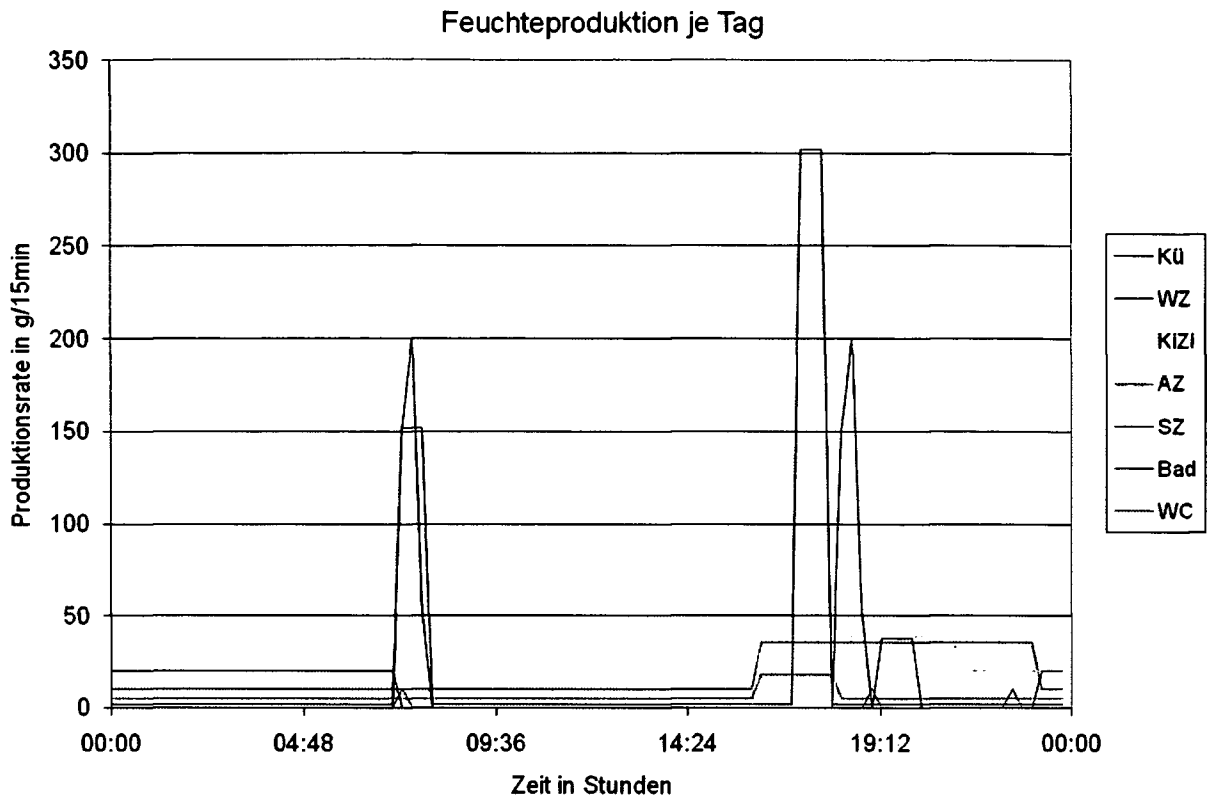


Abbildung 37: Tagesverlauf der Feuchteproduktion für das Nutzungsprofil 1

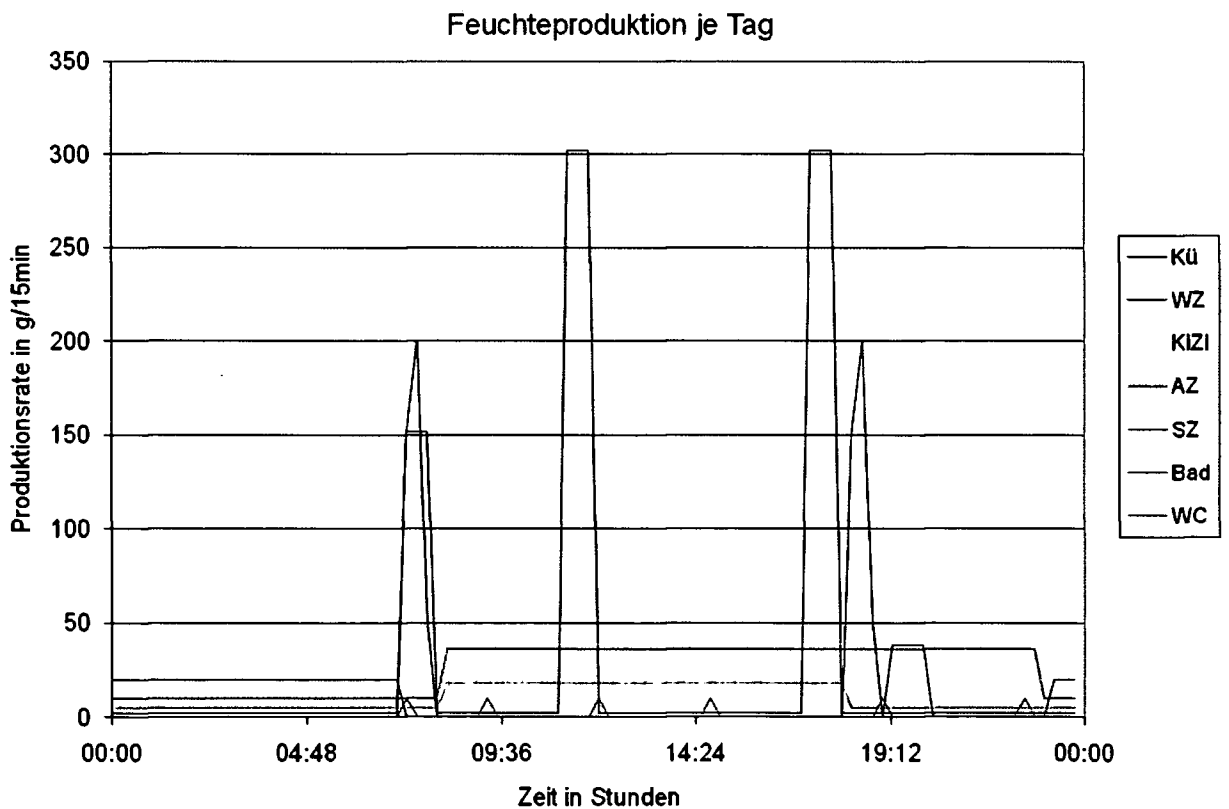


Abbildung 38: Tagesverlauf der Feuchteproduktion für das Nutzungsprofil 2

In den Abbildungen 37 und 38 sind die Feuchteproduktionen für Berechnungen mit dem Nutzungsprofil 1 und 2 dargestellt, die an jedem Tag des Jahres entsprechend der Raumnutzung angesetzt wurden. In Tabelle 11 sind die Tagesfeuchteproduktionen der unterschiedlichen Nutzungsvarianten angegeben, worin ersichtlich ist, dass ein Unterschied von 3,4kg Wasser je Tag bei den Simulationen angenommen wurde.

	Feuchteproduktion in	
	g/Tag	
Kü	1542	2442
WZ	1688	2494
KiZi	1580	2828
AZ	584	1000
SZ	640	640
Bad	952	952
WC	30	60
VR	0	0
Summe	7016	10416

Tabelle 11: Tagesfeuchteproduktion der verschiedenen Nutzungsprofile

Raumhöhe = 2.5 m LW = 0.5 1/h V' = 15.011 m³/(h.Fenster)
 Volumen = 240.175 m³ LW = 10 1/h V' = 300.219 m³/(h.Fenster)

				LW = 0.5 1/h	LW = 10 1/h
	Fläche in m²		Fenster	LW in 1/h	LW in 1/h
Küche	7.96		1	0.7543	15.0864
WZ	26.93		3	0.6689	13.3777
WC	1.35		0	0.0000	0.0000
Bad	4.24		0	0.0000	0.0000
VR	14.05		0	0.0000	0.0000
AZ	7.41		1	0.8103	16.2061
KiZi	18.87		2	0.6364	12.7279
SZ	15.26		1	0.3935	7.8694
Summe	96.07		8	0.5000	10.0000

Tabelle 12: Luftwechselraten der einzelnen Räume

5.3 Ergebnisse

Fall 1: Verlauf der relativen Luftfeuchte der einzelnen Zonen in den ersten 100 Tagen

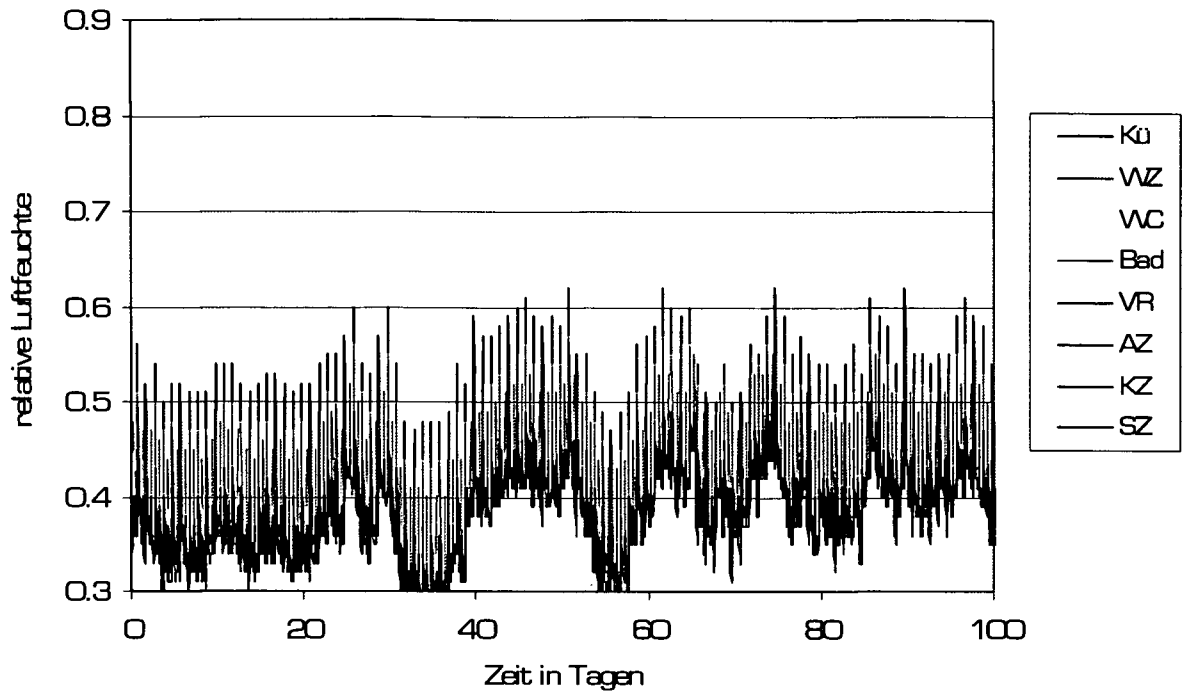


Abbildung 39: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 bei konstantem Luftwechsel mit Feuchtepufferung

Verlauf der relativen Luftfeuchte der einzelnen Zonen in den ersten 100 Tagen

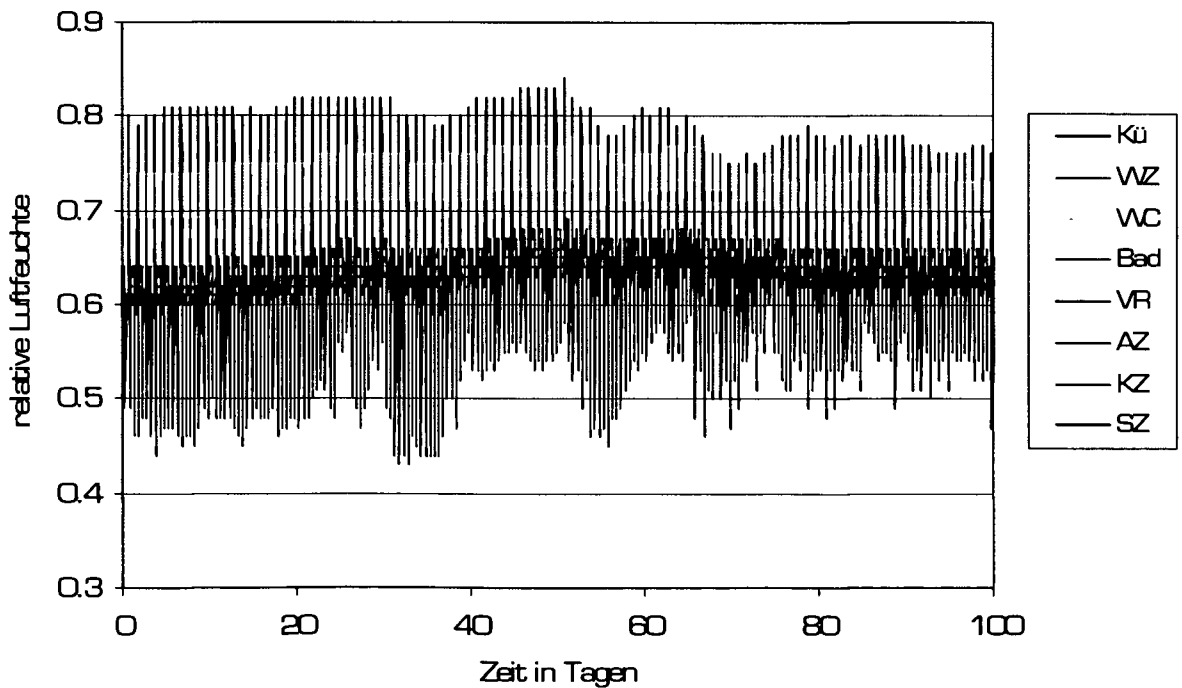


Abbildung 40: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 bei 2x tägl. Stosslüften mit Feuchtepufferung

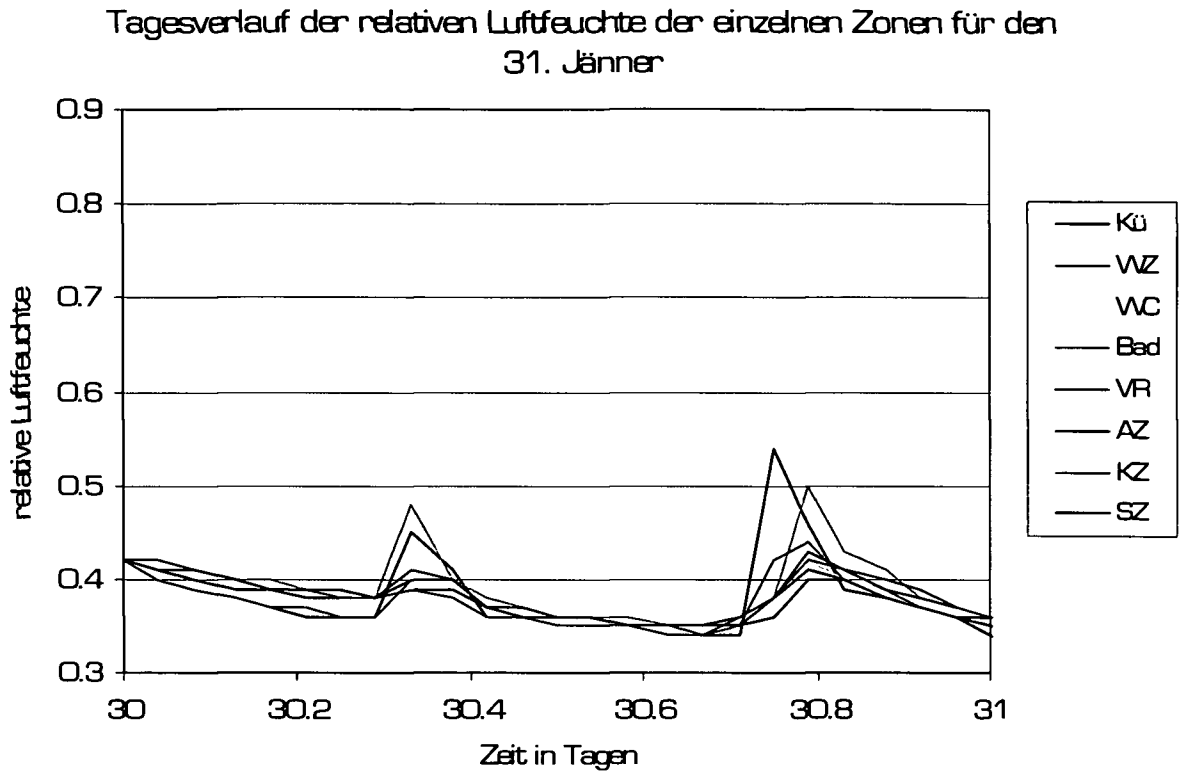


Abbildung 41: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 bei konstantem Luftwechsel für den 31. Jänner mit Feuchtepufferung

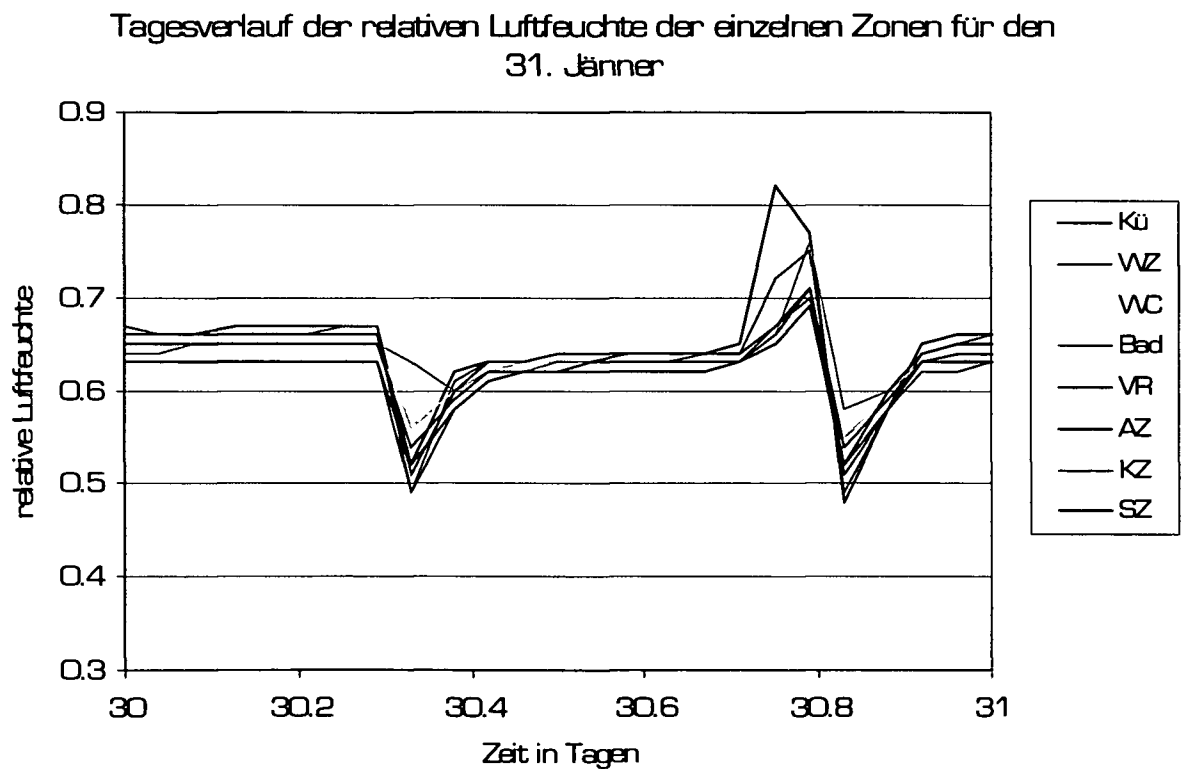


Abbildung 42: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 bei 2x tägl. Stosslüften für den 31. Jänner mit Feuchtepufferung

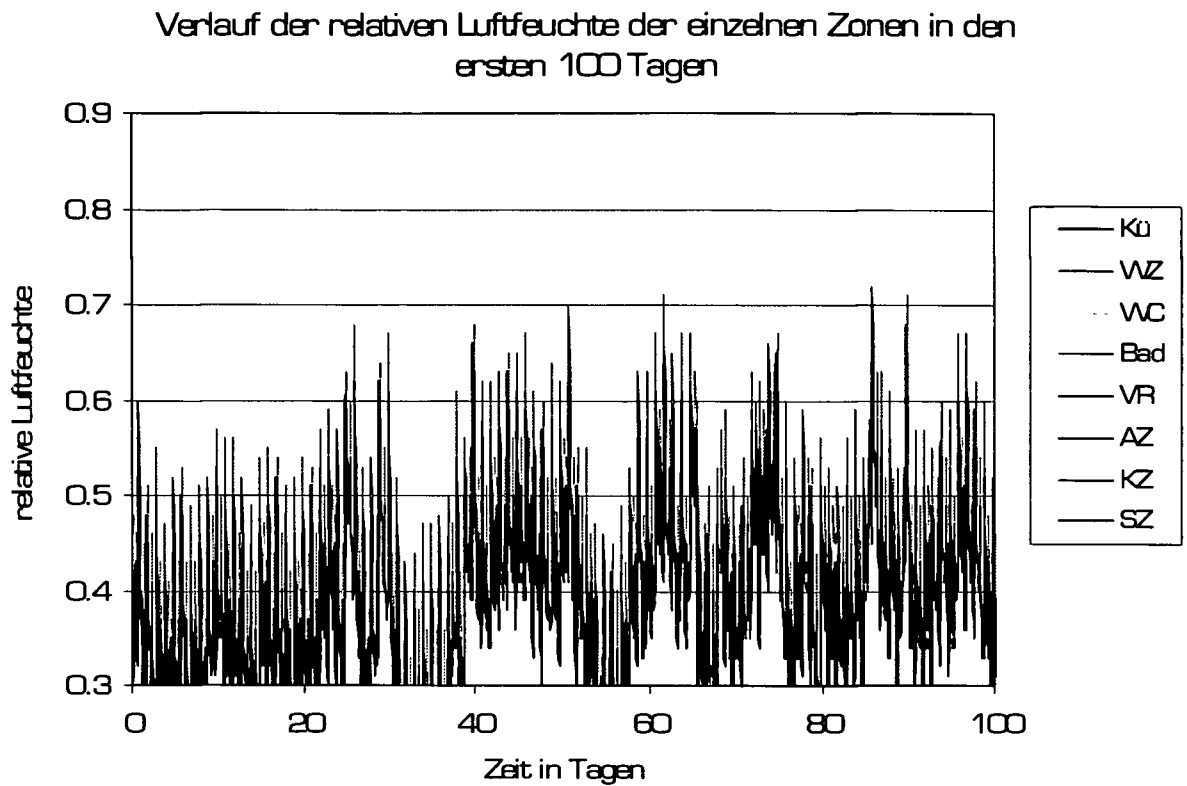


Abbildung 43: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 bei konstantem Luftwechsel ohne Feuchtepufferung

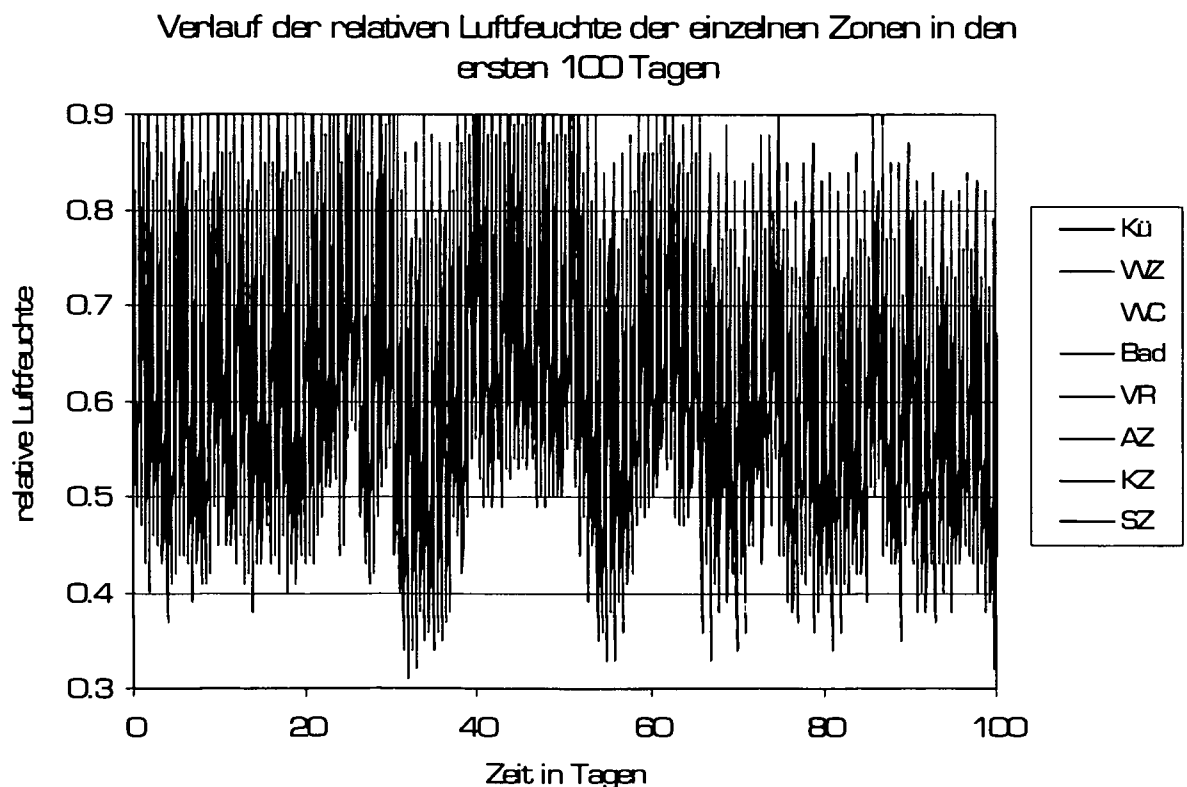


Abbildung 44: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 bei 2x tägl. Stosslüften ohne Feuchtepufferung

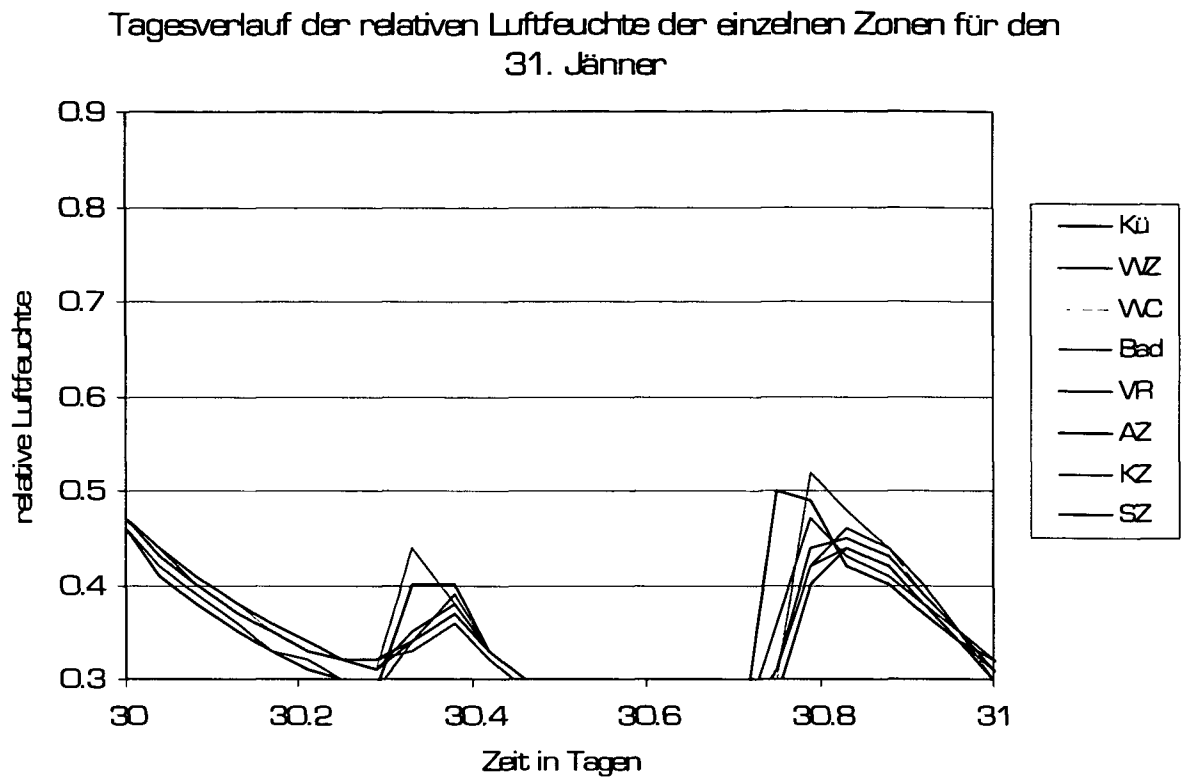


Abbildung 45: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 bei konstantem Luftwechsel für den 31. Jänner ohne Feuchtepufferung

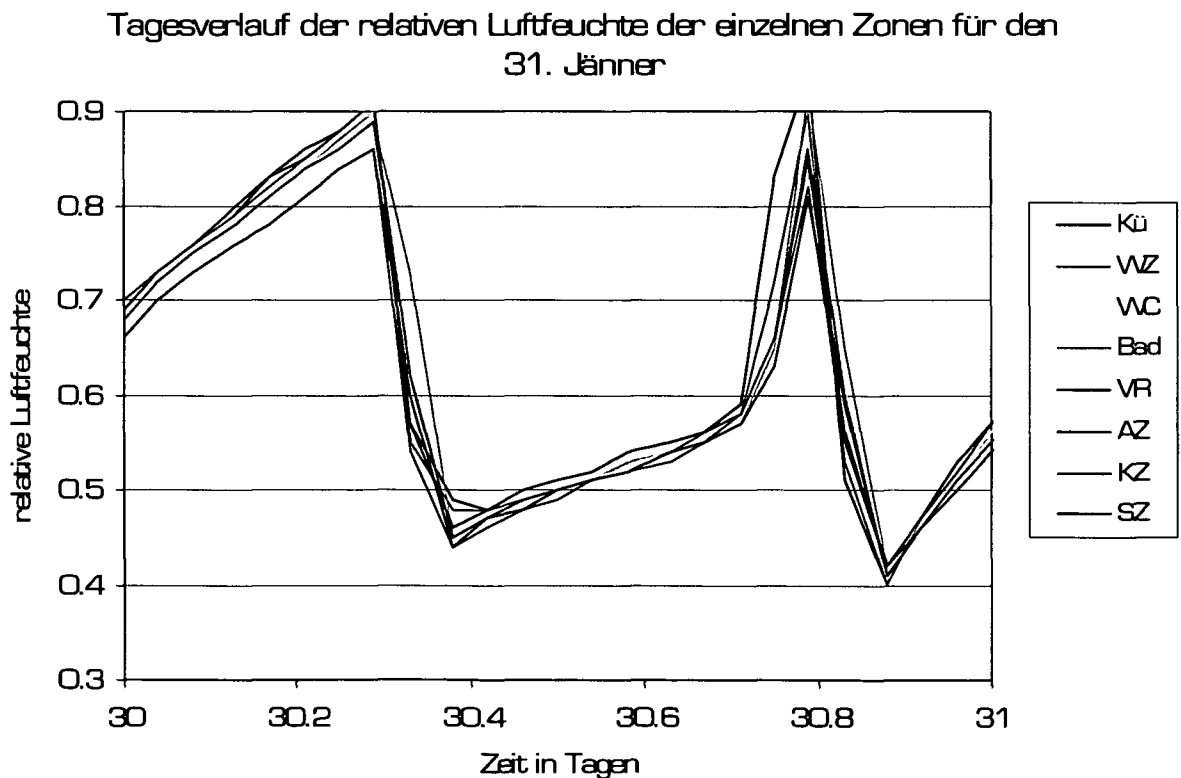


Abbildung 46: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 bei 2x tägl. Stosslüften für den 31. Jänner ohne Feuchtepufferung

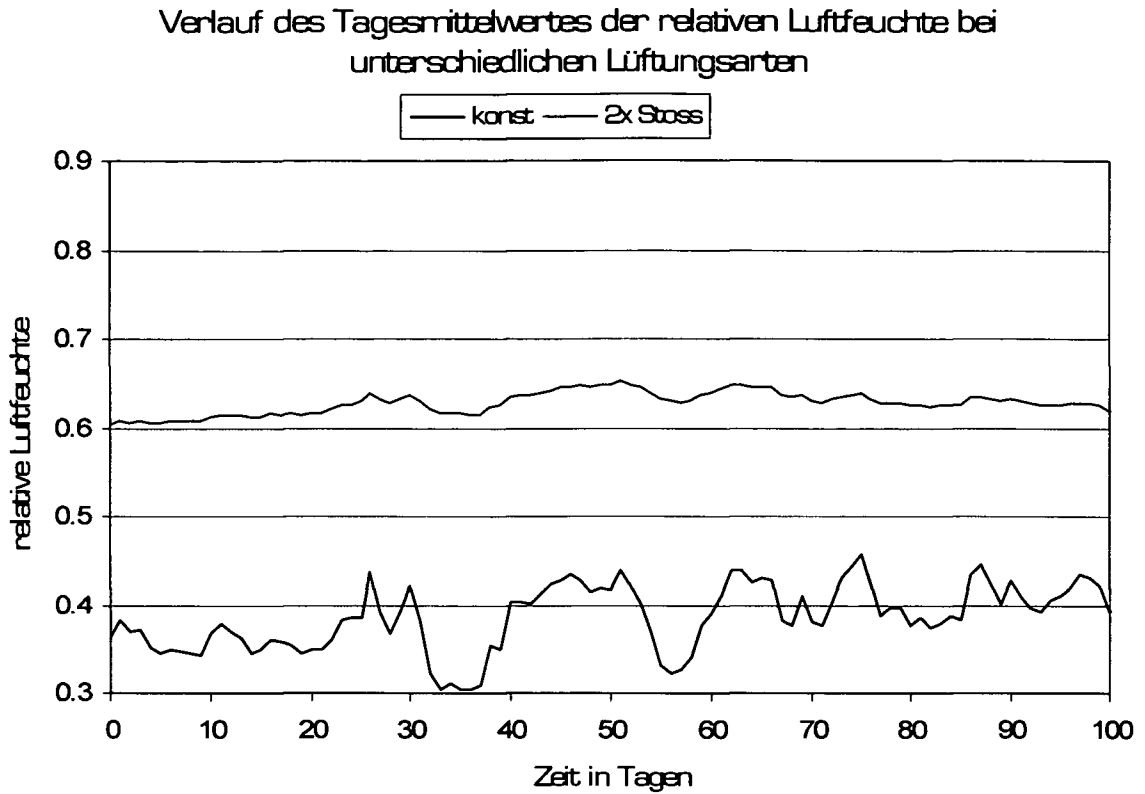


Abbildung 47: Verlauf des Tagesmittelwertes der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 mit Feuchtepufferung

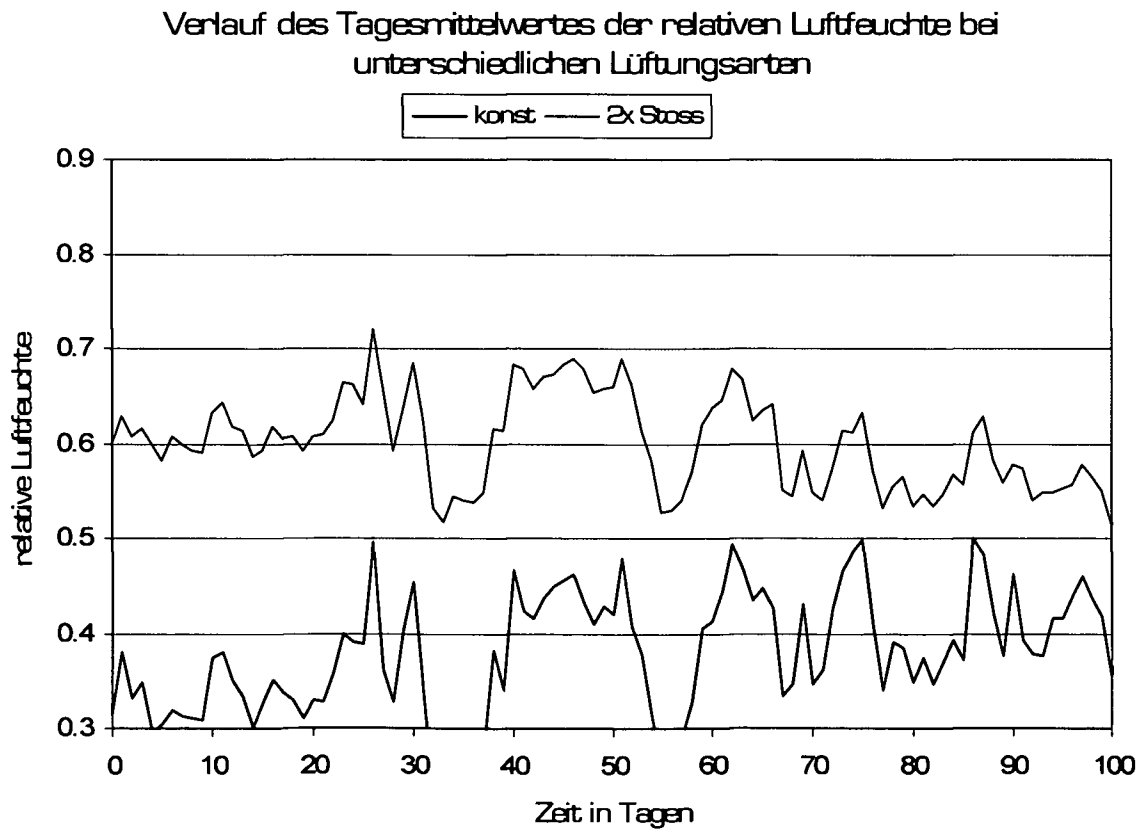


Abbildung 48: Verlauf des Tagesmittelwertes der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 1 ohne Feuchtepufferung

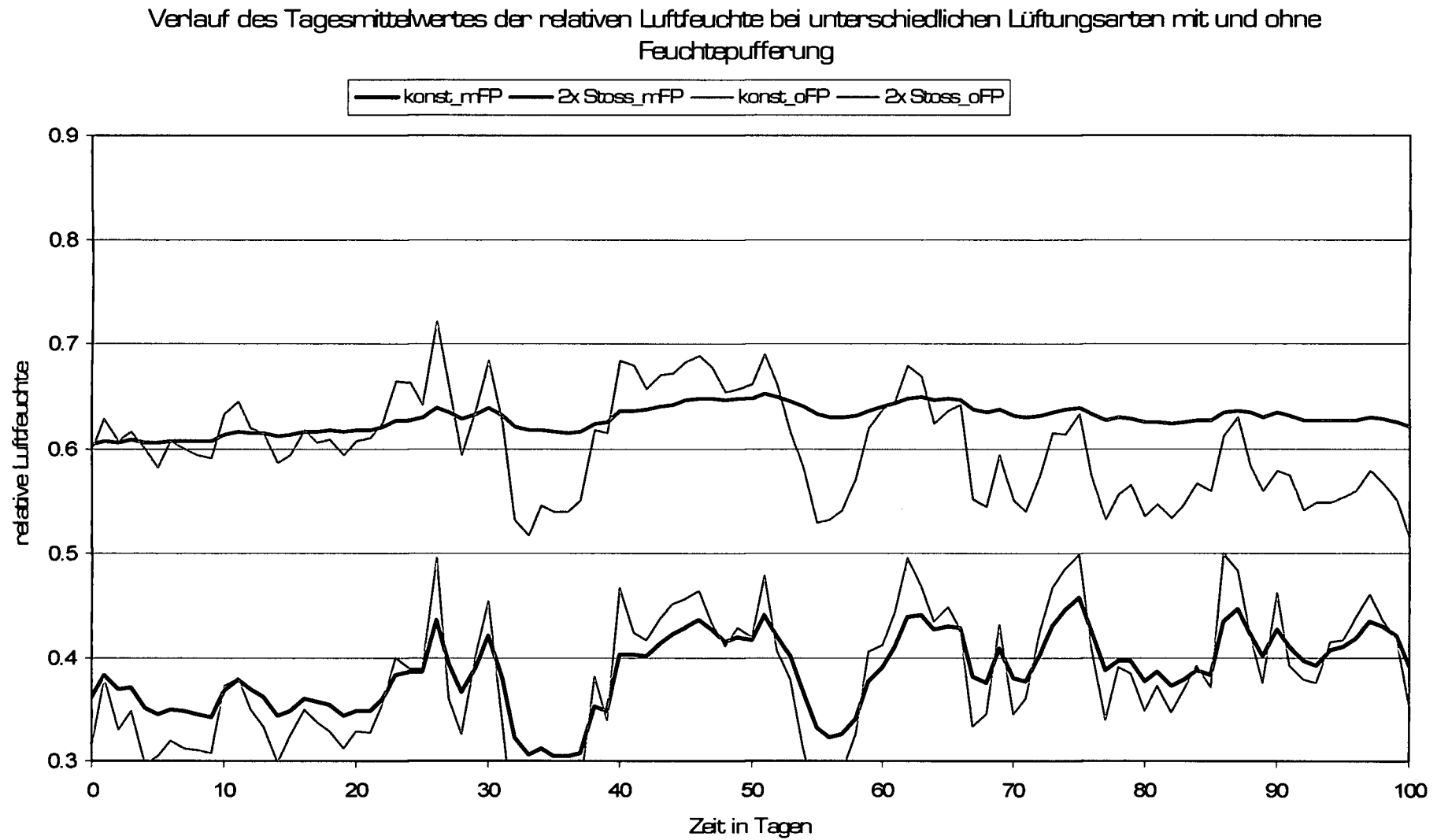


Abbildung 49: Vergleich der unterschiedlichen Lüftungsarten mit und ohne Feuchtepufferung

Fall 2:

Verlauf der relativen Luftfeuchte der einzelnen Zonen in den ersten 100 Tagen

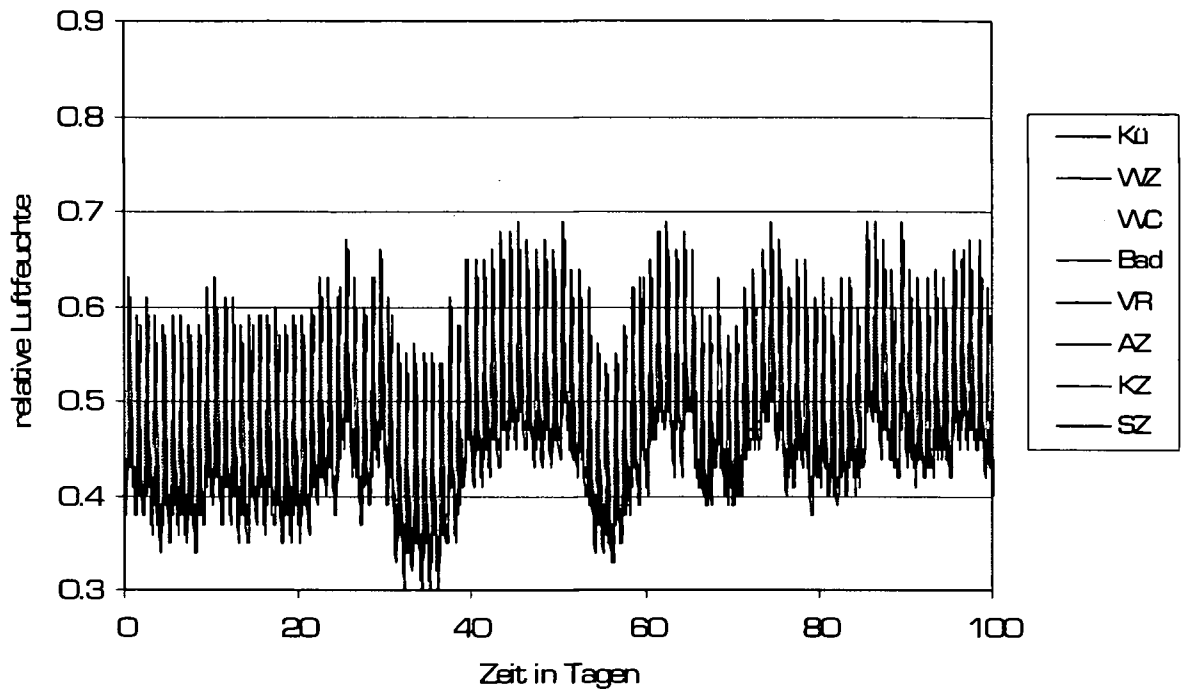


Abbildung 50: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei konstantem Luftwechsel mit Feuchtepufferung

Verlauf der relativen Luftfeuchte der einzelnen Zonen in den ersten 100 Tagen

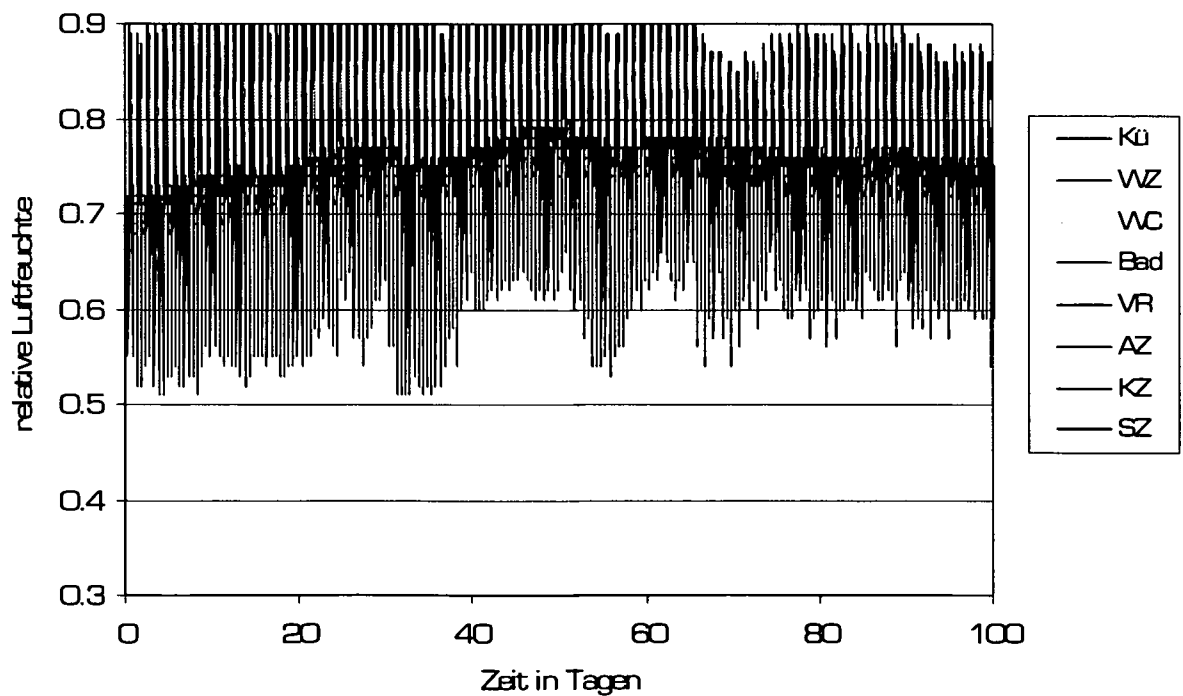


Abbildung 51: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei 2x tägl. Stosslüften mit Feuchtepufferung

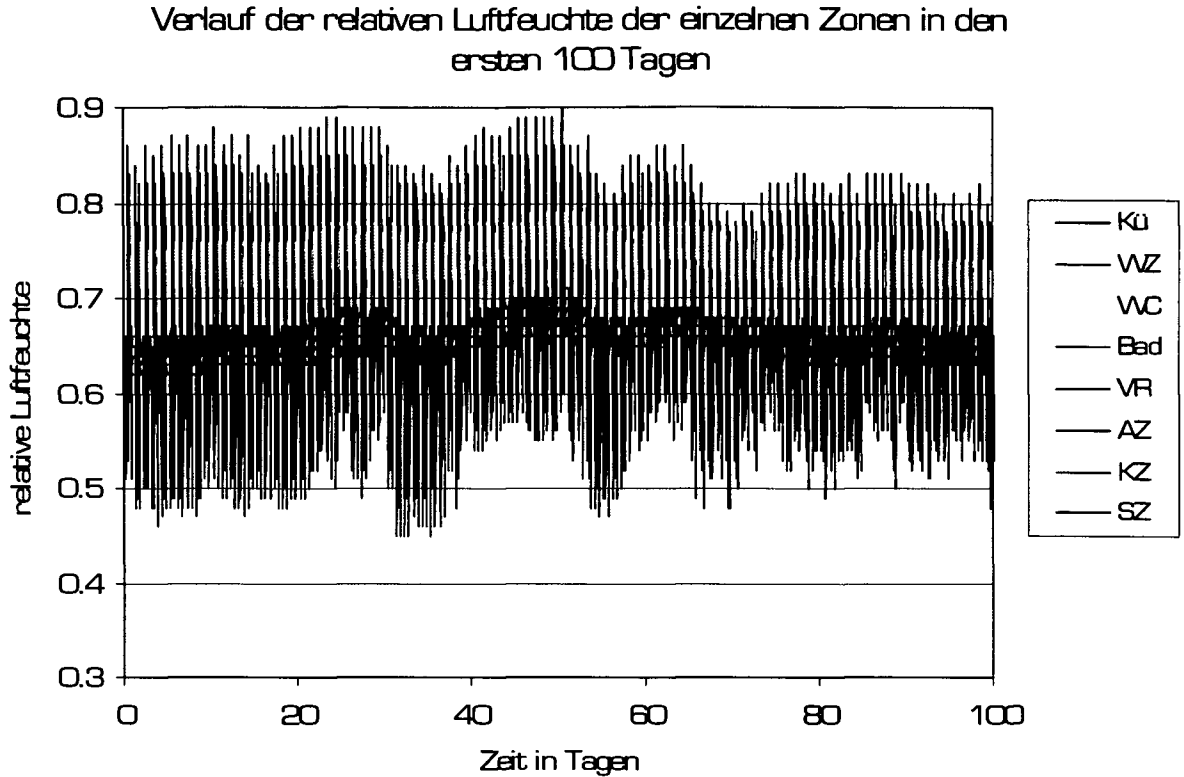


Abbildung 52: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei 3x tägl. Stosslüften mit Feuchtepufferung

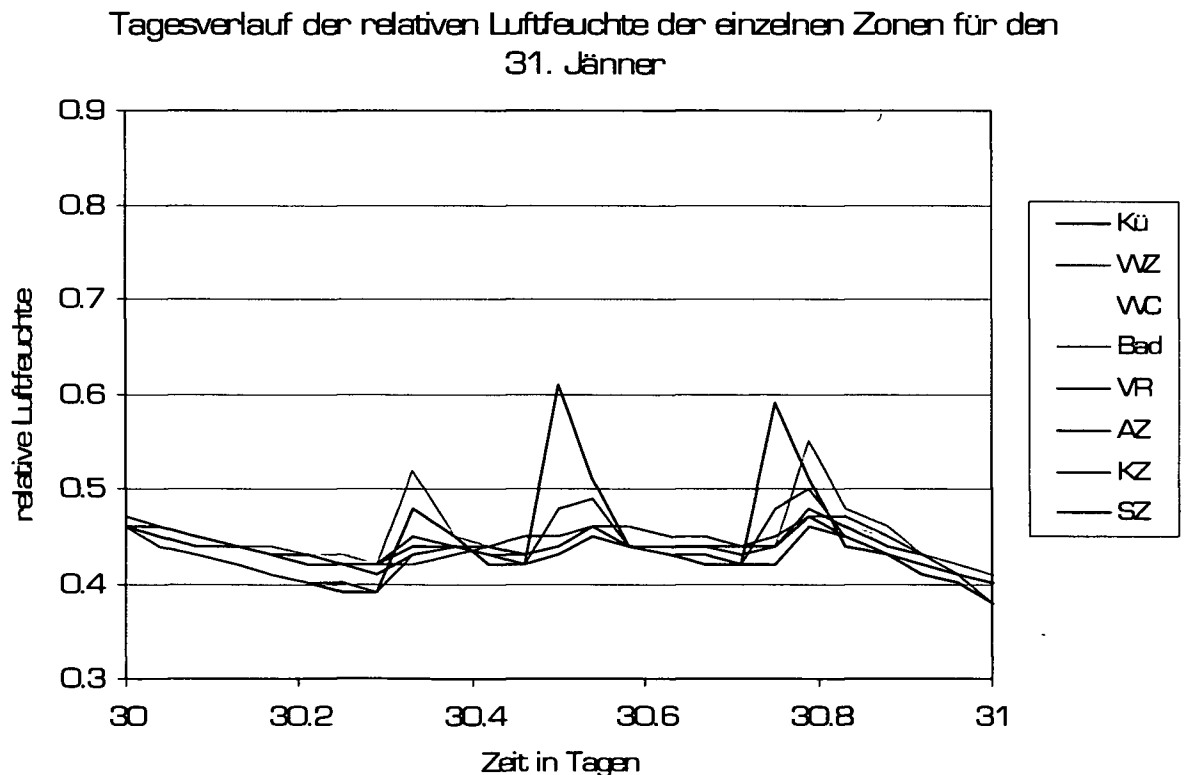


Abbildung 53: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei konstantem Luftwechsel für den 31. Jänner mit Feuchtepufferung

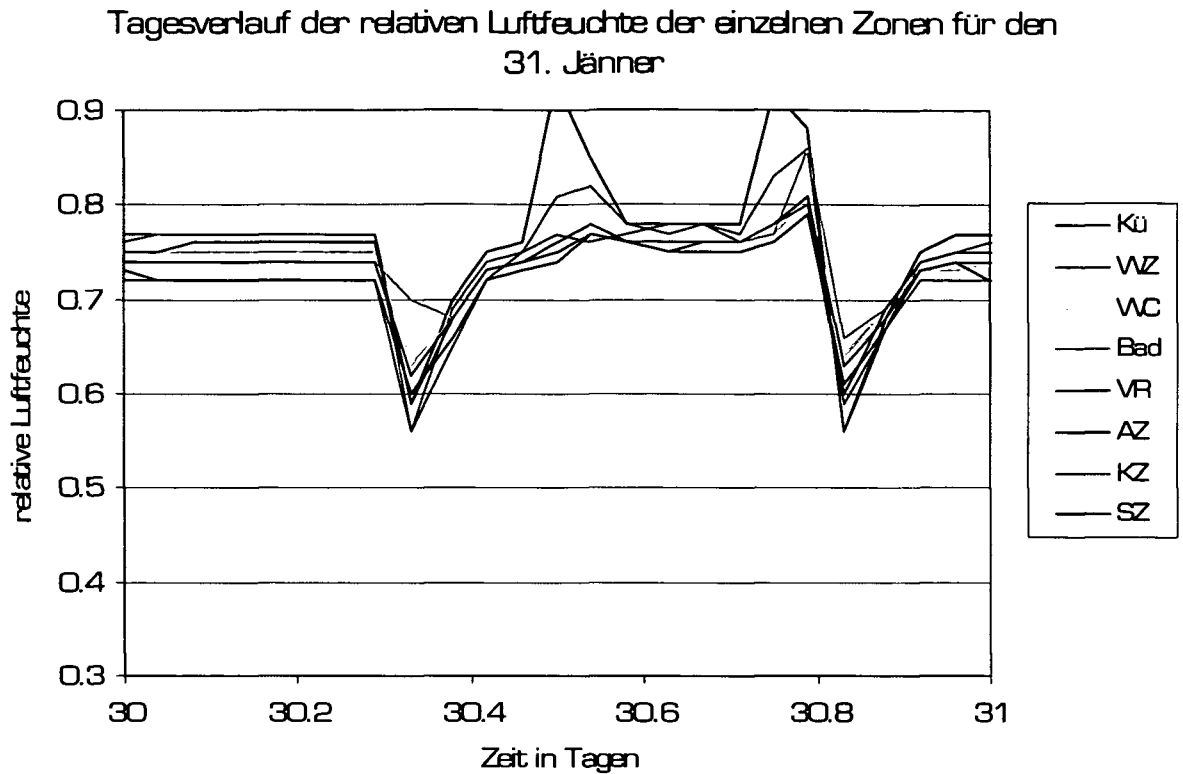


Abbildung 54: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei 2x tägl. Stosslüften für den 31. Jänner mit Feuchtepufferung

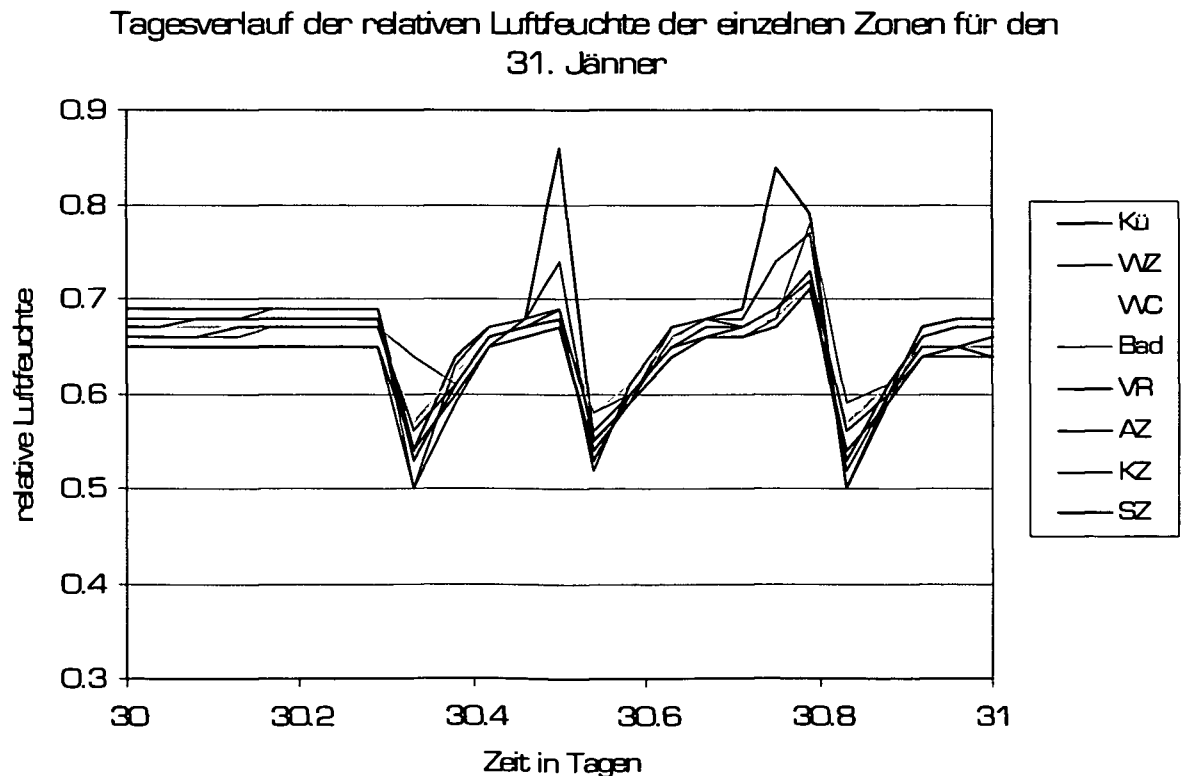


Abbildung 55: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei 3x tägl. Stosslüften für den 31. Jänner mit Feuchtepufferung

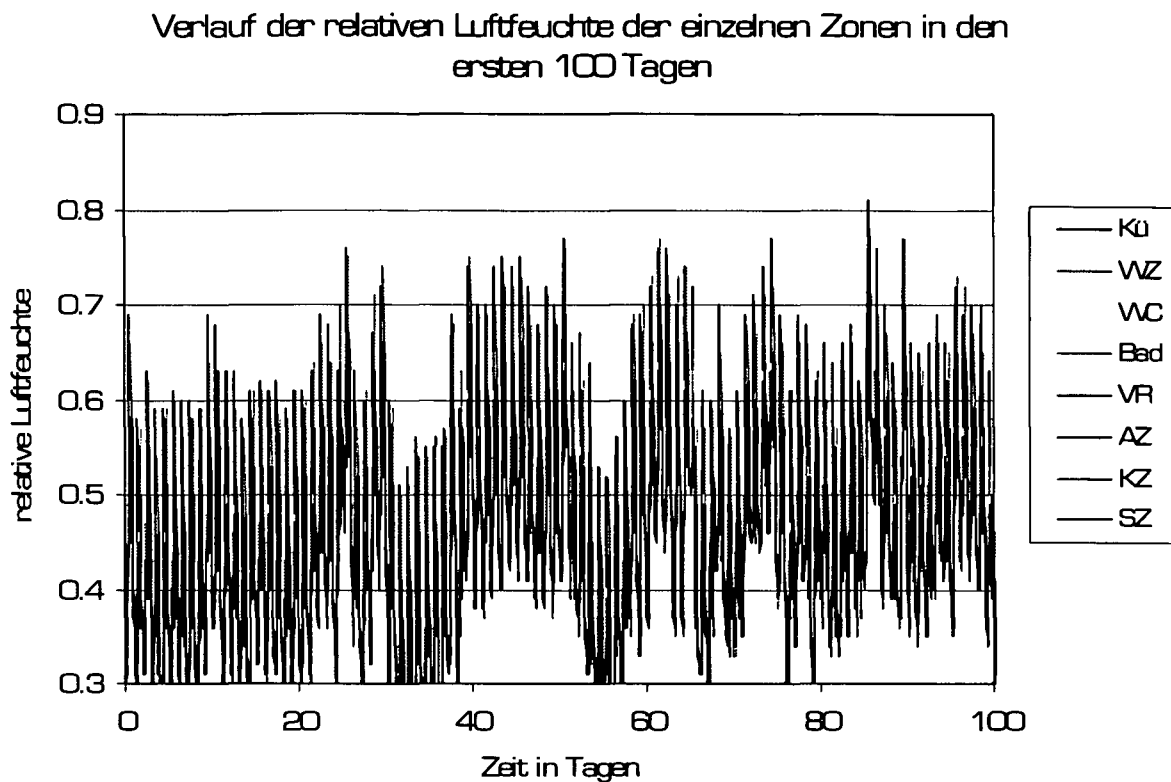


Abbildung 56: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei konstantem Luftwechsel ohne Feuchtepufferung

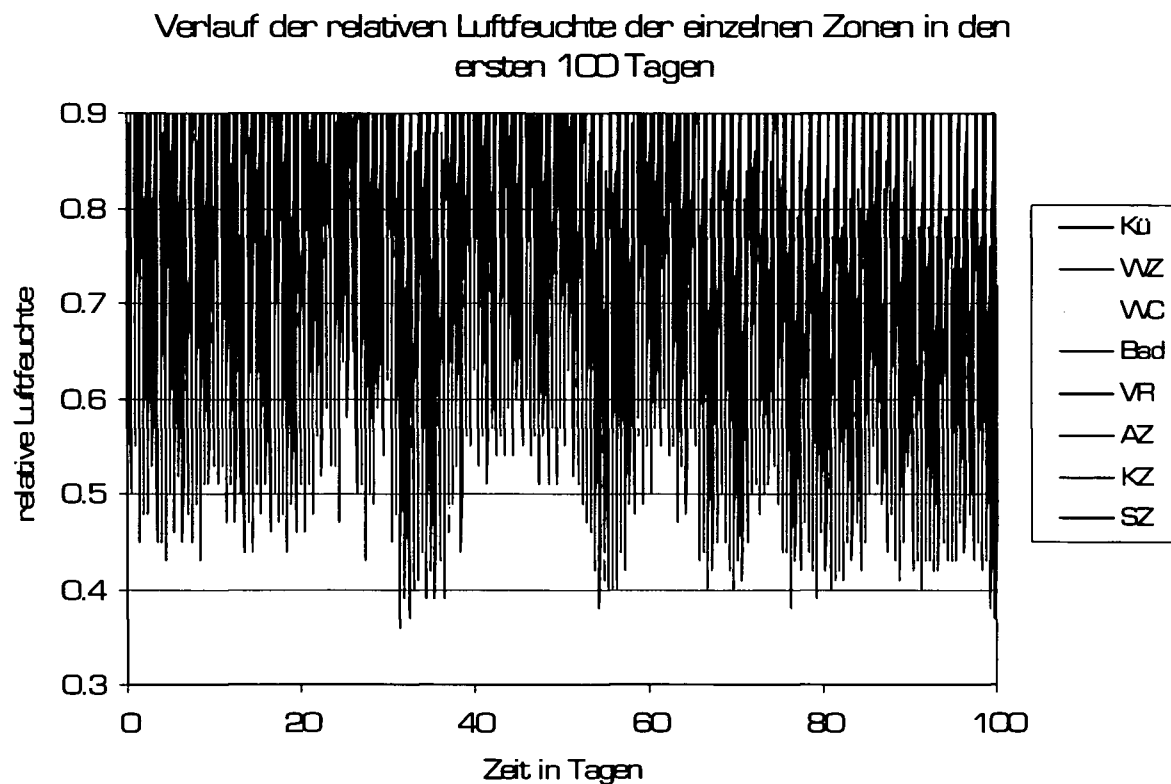


Abbildung 57: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei 2x tägl. Stosslüften ohne Feuchtepufferung

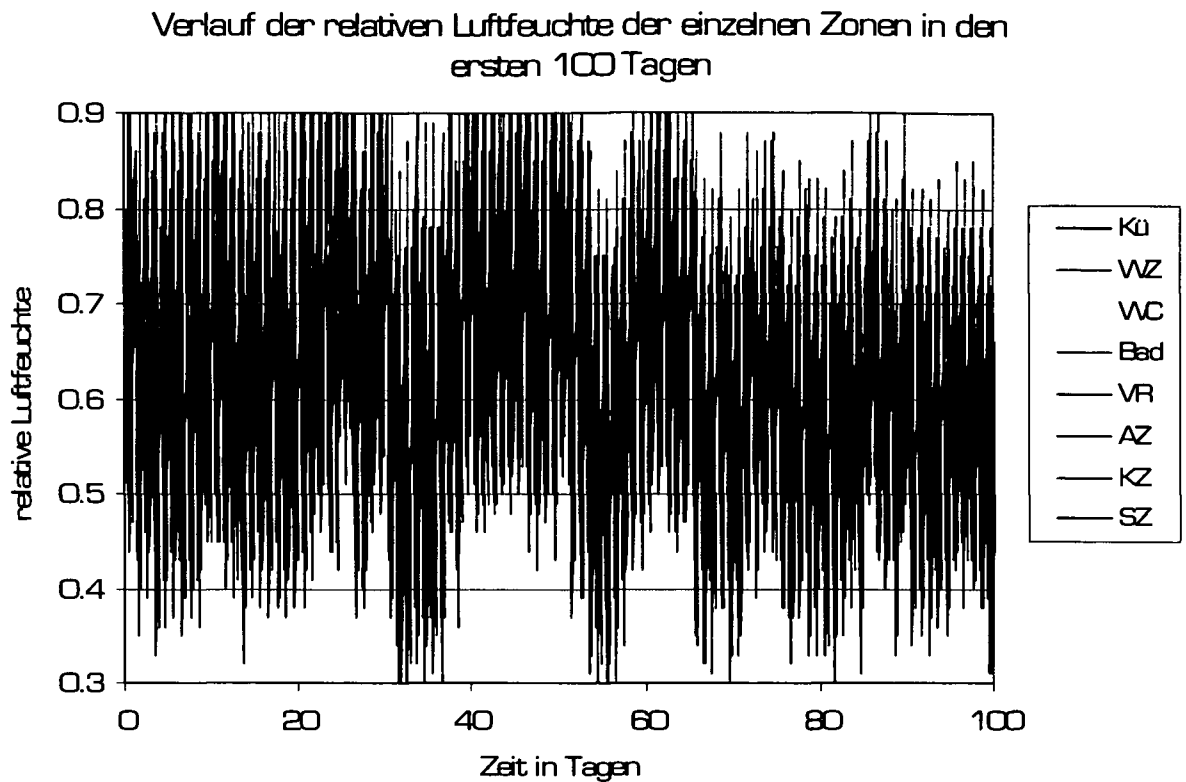


Abbildung 58: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei 3x tägl. Stosslüften ohne Feuchtepufferung

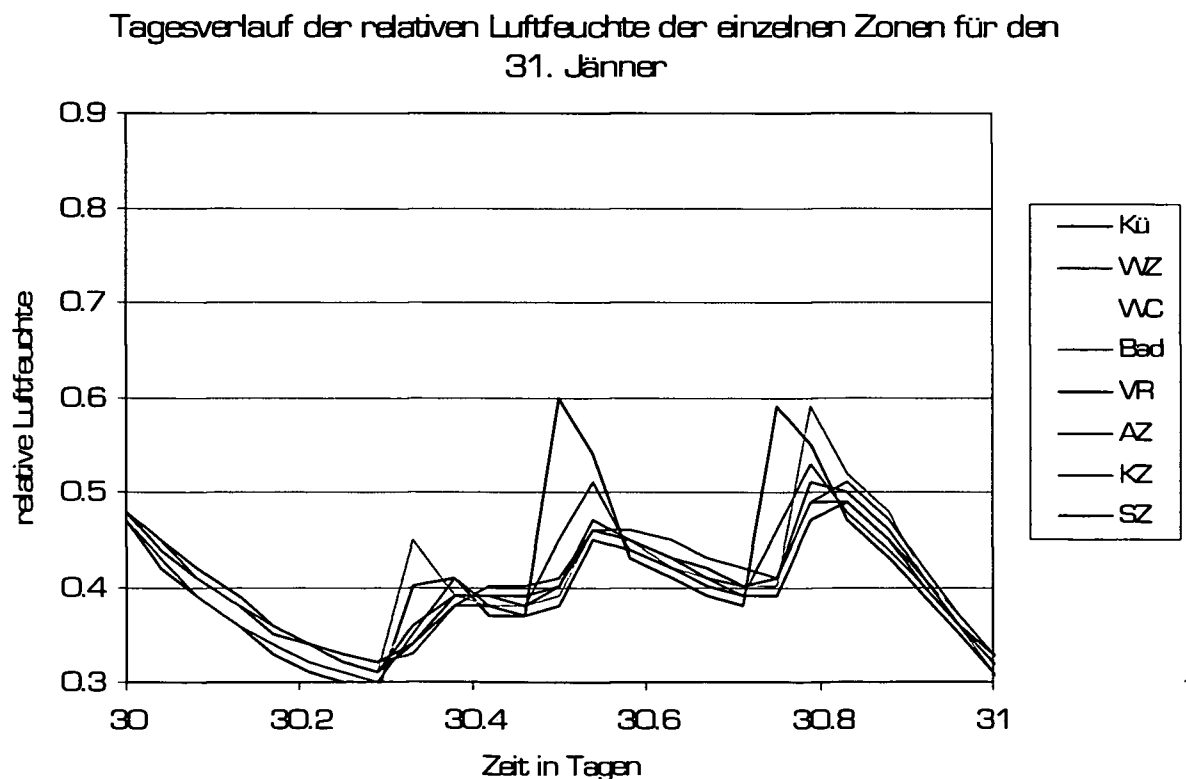


Abbildung 59: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei konstantem Luftwechsel für den 31. Jänner ohne Feuchtepufferung

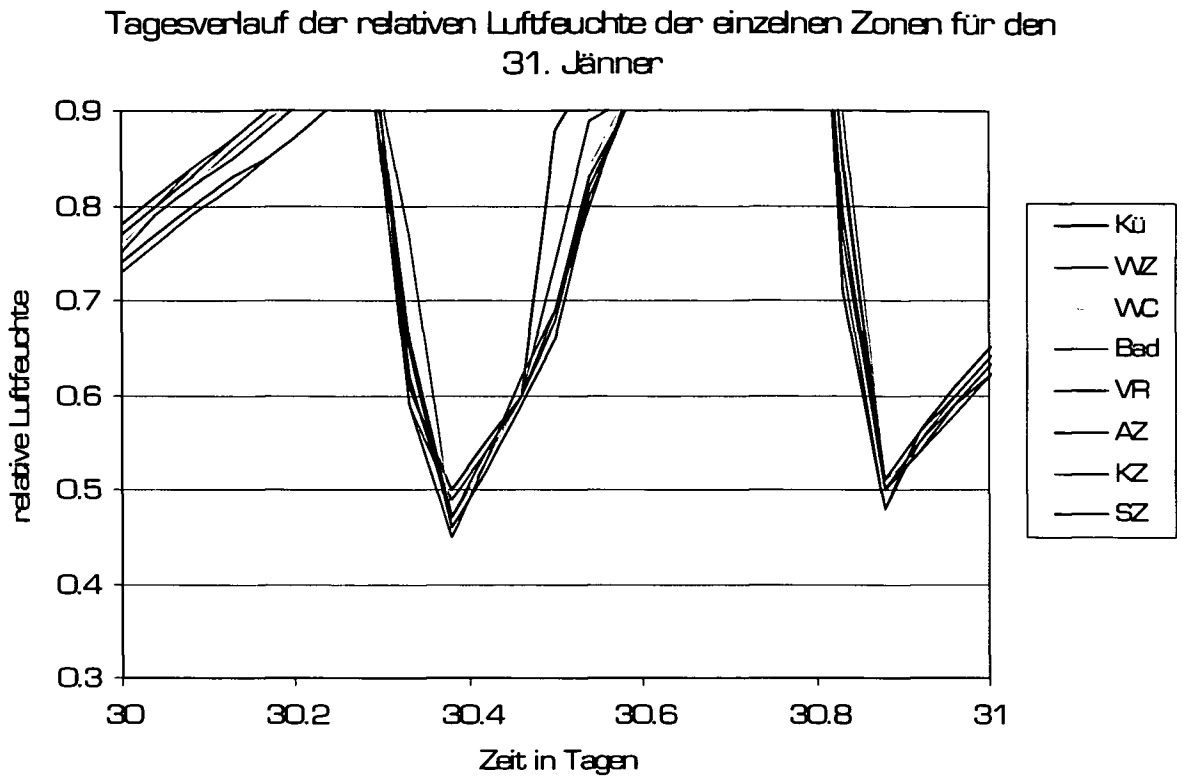


Abbildung 60: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei 2x tägl. Stosslüften für den 31. Jänner ohne Feuchtepufferung

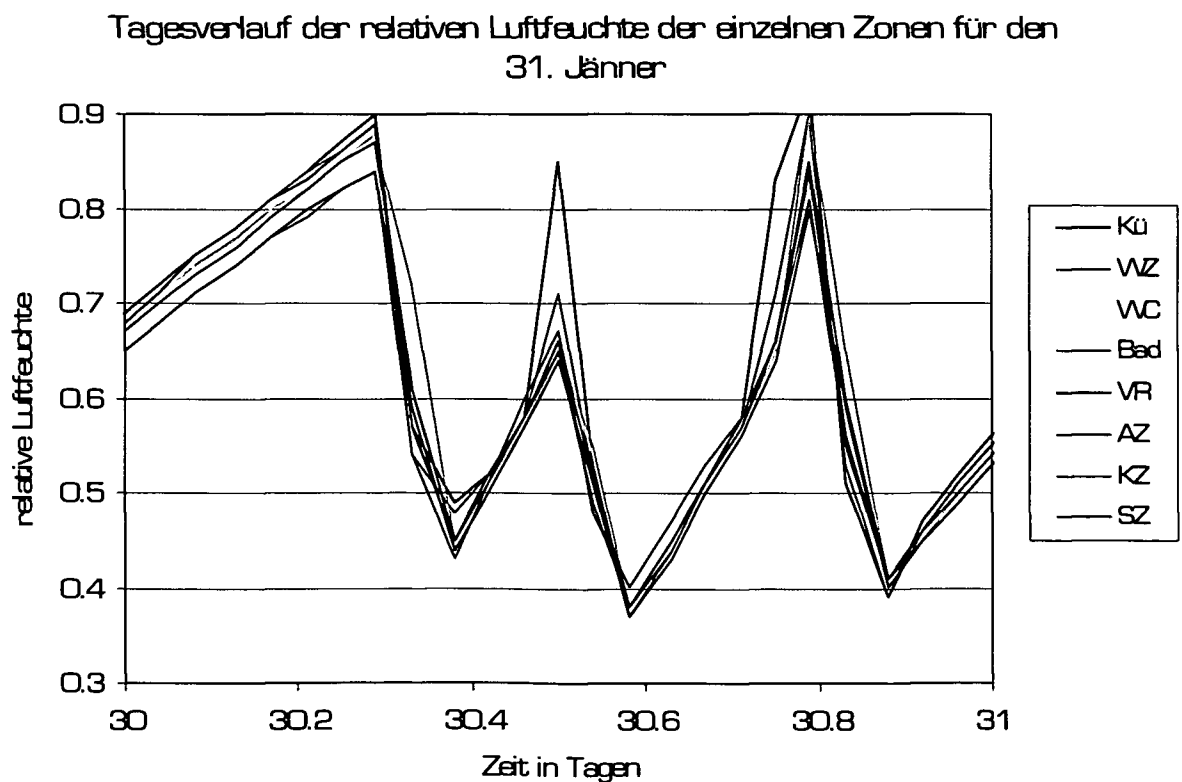


Abbildung 61: Verlauf der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 bei 3x tägl. Stosslüften für den 31. Jänner ohne Feuchtepufferung

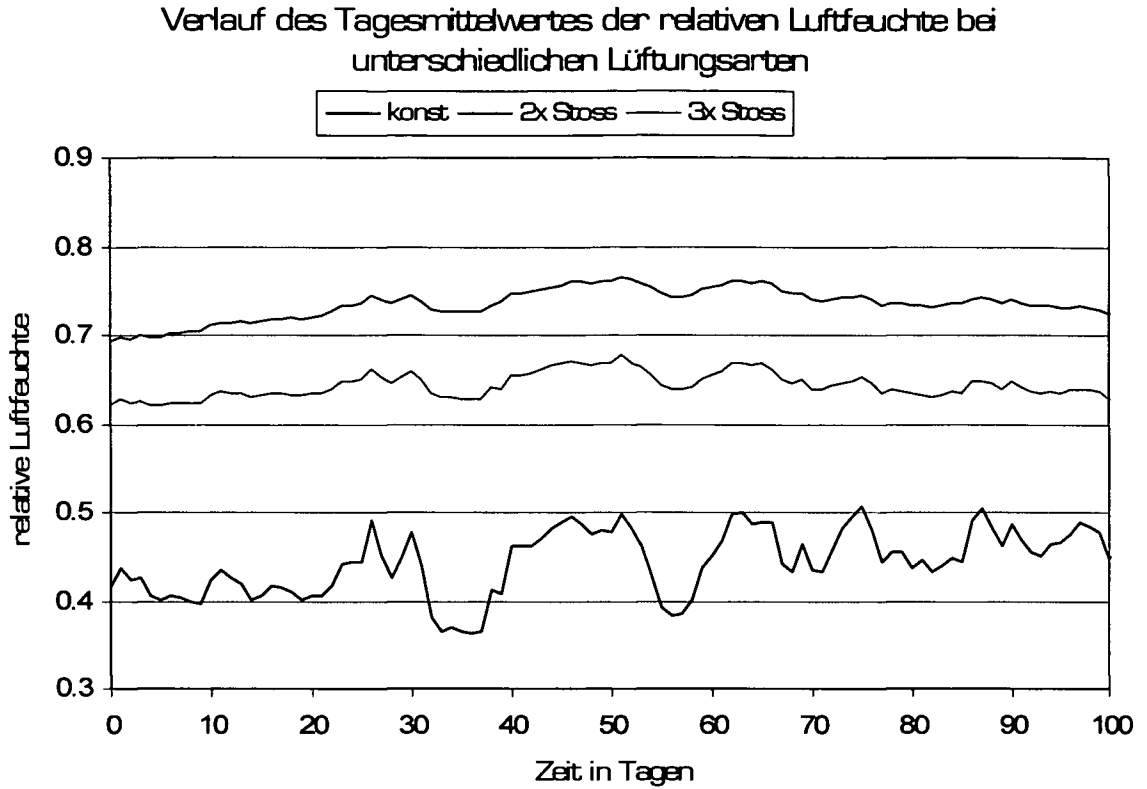


Abbildung 62: Verlauf des Tagesmittelwertes der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 mit Feuchtepufferung

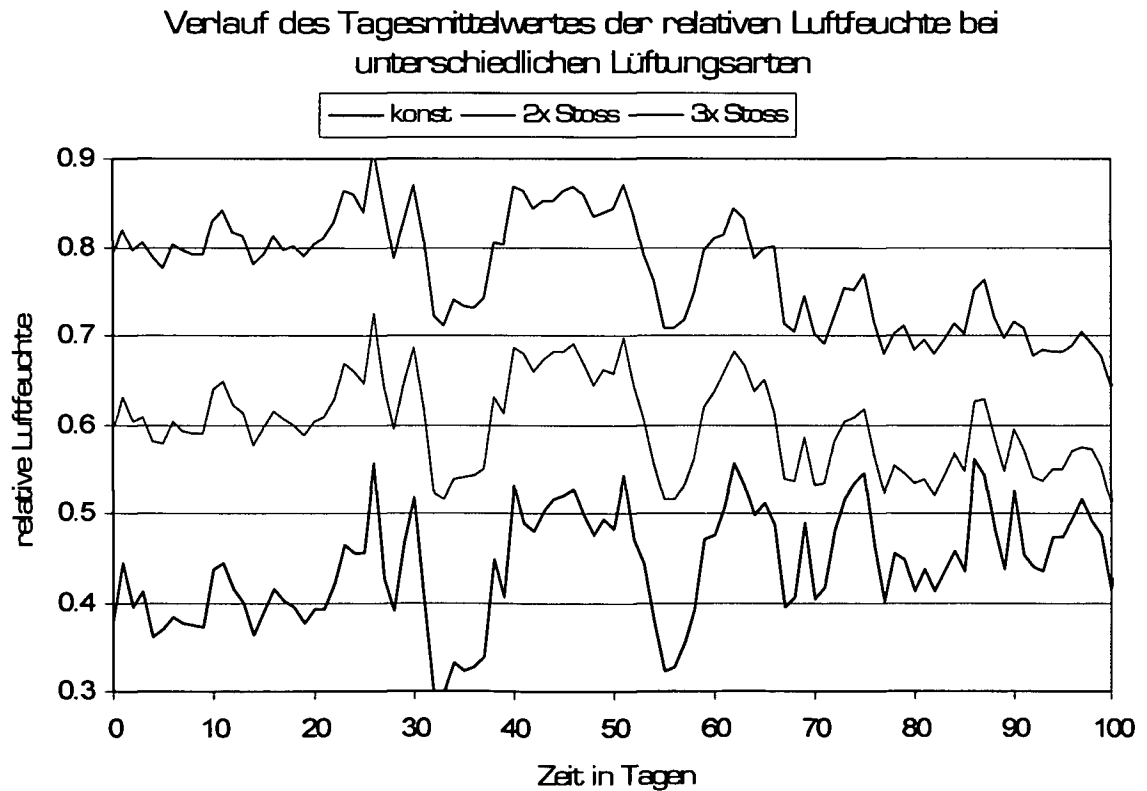


Abbildung 63: Verlauf des Tagesmittelwertes der relativen Luftfeuchte für das Nutzungsprofil 2 ohne Feuchtepufferung

Verlauf des Tagesmittelwertes der relativen Luftfeuchte bei unterschiedlichen Lüftungsarten mit und ohne Feuchtepufferung

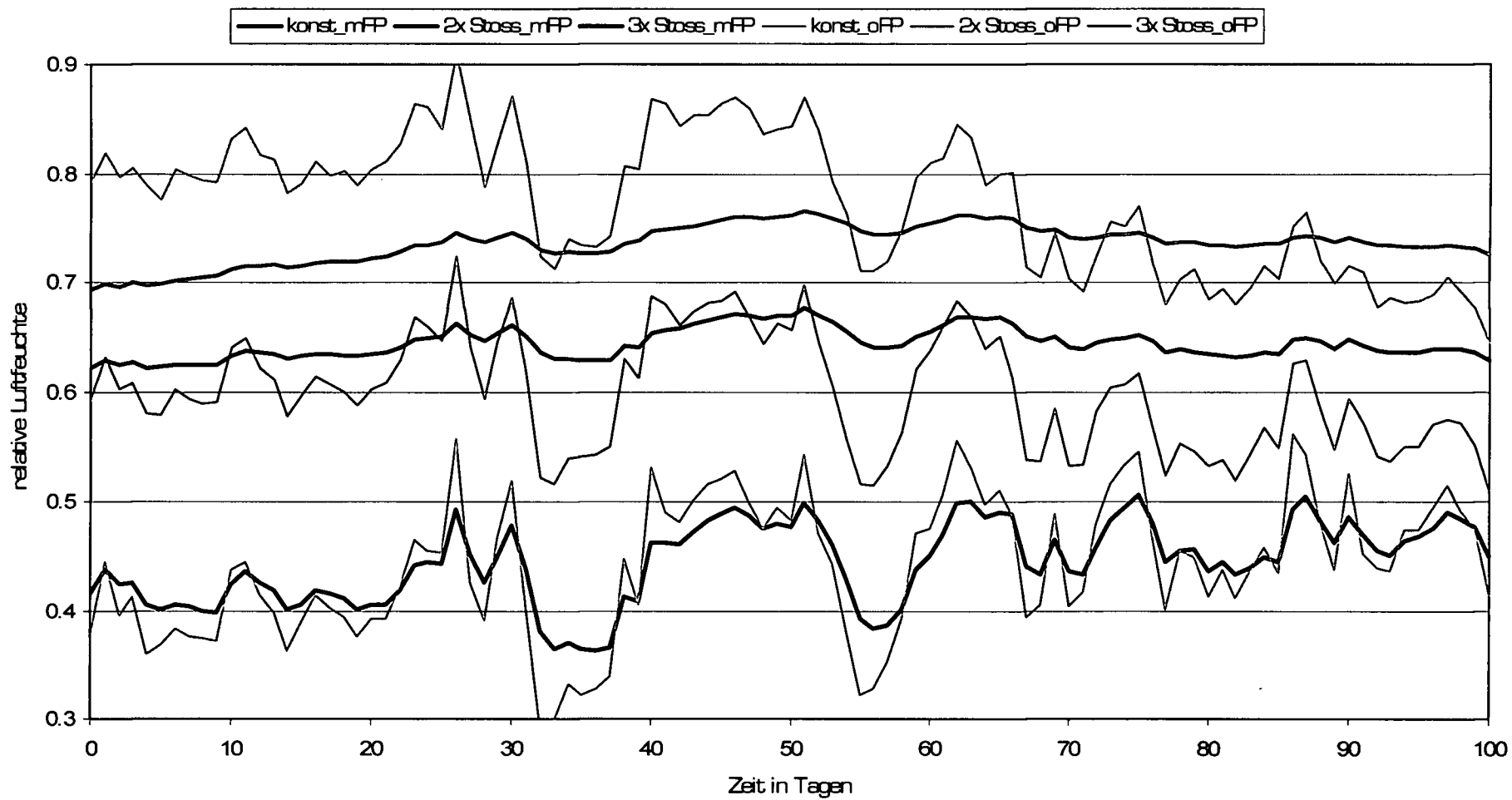


Abbildung 64: Vergleich der unterschiedlichen Lüftungsarten mit und ohne Feuchtepufferung

5.4 Interpretation der Ergebnisse

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass ein zwei- bzw. dreimaliges Stosslüften für je 15 Minuten pro Tag zu einer höheren Feuchtebelastung im Winter führt, als in den derzeit gültigen Nachweisgrundlagen (ÖN8110) angenommenen Innenklimabedingungen. Als realistisch bei dichten Fensterkonstruktionen, wie sie derzeit üblich sind, können diese eigentlich nur bei einem konstanten Luftwechsel, der z.B. durch kontrollierte Wohnraumlüftung realisiert ist, angenommen werden.

Bei Vergleich der unterschiedlichen Nutzungsszenarien mit Stosslüften bemerkt man, dass die höhere Feuchteproduktion durch die Anwesenheit der Nutzer durch ein häufigeres Stosslüften (3x statt 2x täglich) kompensiert werden kann.

Bei Analyse des Einflusses der Feuchtepufferung der Bauteile ergibt sich bei vorhandener Feuchtepufferung zwar ein höherer mittlerer Wert der relativen Tagesluftfeuchte, es sind jedoch die Spitzen (Maxima und Minima) der relativen Luftfeuchte wesentlich höher, was im Extremfall zu einem Oberflächenkondensat an den Bauteilen führen kann. Man sieht daher, dass wesentlich längere Lüftungsintervalle erforderlich wären um den Einfluß der Feuchtepufferung auf die mittlere relative Luftfeuchte zu kompensieren. Als Grenzwert kann die Kurve des konstanten Luftwechsels angesehen werden, bei der die Mittelwerte der relativen Luftfeuchte mit und ohne Berücksichtigung der Feuchtepufferung ungefähr gleich sind.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG

Zusammenfassend sollte erwähnt werden, dass viele Probleme der heutigen Zeit bezüglich Kondenswasser- und Schimmelbildung im Wohnungsbau aufgrund nicht zeitgemäßer Angaben beziehungsweise Vorgaben in den vorliegenden Nachweisgrundlagen hervorgehen. Denn bei den Ergebnissen dieser Diplomarbeit ergibt sich eindeutig, dass durch den Einbau „dichter“ Fenster, wie es in der heutigen Zeit Standard geworden ist, andere Nutzungsspezifikationen definiert werden müssen. Früher wurde durch die Undichtheit der Fenster ja ein ständiger Mindestluftwechsel garantiert, was wie in den Berechnungen des Kapitels 5 gezeigt zu Ergebnissen wie in den derzeit gültigen Nachweisgrundlagen führt. Dieser ständige Mindestluftwechsel sollte auch in zukünftigen Wohnungsbauten garantiert werden, da sich sonst andere Anforderungen an die Bauteile sowie an die Planung von Wohnbauten ergeben. Dieser Mindestluftwechsel (der auch aus hygienischen Gründen vorhanden sein sollte) kann durch geeignete Maßnahmen (kontrollierte Wohnraumlüftung) garantiert werden. Des Weiteren ergibt sich, dass wie oft angenommen ein zweimal tägliches Stosslüften genüge um ein Klima in der Wohnung zu schaffen, welches dem Normklima vor allem im Winter entspricht, nicht zutrifft, da die Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchte beträchtlich über den angenommenen Werften liegen. Daher sollten unterschiedliche Anforderungen an Bauteile und Haustechnik je nach Nutzungskategorie und technischer Ausstattung von Wohnbauten überarbeitet und genauer definiert werden.

7 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ENERGIEBILANZ EINER ZONE	8
ABBILDUNG 2: ENERGIEBILANZ EINES BAUTEILS.....	9
ABBILDUNG 3: FEUCHTEBILANZ EINER ZONE	10
ABBILDUNG 4: AUßENWAND MODUL	18
ABBILDUNG 5: PARAMETERMASKE DES AUßENWANDMODULS	19
ABBILDUNG 6: BEISPIEL EINER AUßENWANDKONSTRUKTION MIT DREI SCHICHTEN.....	20
ABBILDUNG 7: PARAMETERMASKE EINES MATERIALBLOCKS	20
ABBILDUNG 8: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER AUßENWANDKONSTRUKTION MIT DREI SCHICHTEN.....	21
ABBILDUNG 9: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WÄRMESTROMBILANZ EINER KONSTRUKTIONSSCHICHT	22
ABBILDUNG 10: DARSTELLUNG DER TEMPERATURBERECHNUNG EINES SCHICHTKNOTENS.....	25
ABBILDUNG 11: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WÄRMESTROMBILANZ DER ÄUßEREN KONSTRUKTIONSSCHICHT	25
ABBILDUNG 12: DARSTELLUNG DER BERECHNUNG DER WÄRMESTROMDICHTHE VON AUßEN.....	27
ABBILDUNG 13: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WÄRMESTROMBILANZ DER INNEREN KONSTRUKTIONSSCHICHT	28
ABBILDUNG 14: DARSTELLUNG DER BERECHNUNG DER WÄRMESTROMDICHTHE VON INNEN	29
ABBILDUNG 15: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER FEUCHTESTROMBILANZ EINER KONSTRUKTIONSSCHICHT	29
ABBILDUNG 16: DARSTELLUNG DER FEUCHTEGEHALTSBERECHNUNG EINES SCHICHTKNOTENS ..	32
ABBILDUNG 17: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER FEUCHTESTROMBILANZ DER ÄUßEREN KONSTRUKTIONSSCHICHT	33
ABBILDUNG 18: DARSTELLUNG DER BERECHNUNG DER FEUCHTESTROMDICHTHE VON AUßEN.....	34
ABBILDUNG 19: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WÄRMESTROMBILANZ DER INNEREN KONSTRUKTIONSSCHICHT	34
ABBILDUNG 20: DARSTELLUNG DER BERECHNUNG DER FEUCHTESTROMDICHTHE VON INNEN.....	35
ABBILDUNG 21: SYMBOLISCHE DARSTELLUNG DES INFILTRATIONSMODULS.....	36
ABBILDUNG 22: DARSTELLUNG DER BERECHNUNG DES INFILTRATIONSMODULS	37
ABBILDUNG 23: SYMBOLISCHE DARSTELLUNG DES RAUMMODULS.....	38
ABBILDUNG 24: PARAMETERMASKE DES AUßENWAND MODULS	39
ABBILDUNG 25: DARSTELLUNG DER BERECHNUNG DES WÄRMEKNOTENS DES RAUMMODULS .	43
ABBILDUNG 26: DARSTELLUNG DER BERECHNUNG DES FEUCHTEKNOTENS DES RAUMMODULS.	45

ABBILDUNG 27: SYSTEM DER ANGABE „EINDIMENSIONALES WÄRME- UND FEUCHTEMODELL“ ..	46
ABBILDUNG 28: ÜBERSICHT DER SCHICHTENEINTEILUNG DES RECHENMODELLS	47
ABBILDUNG 29: ERGEBNISSE DER ANALYTISCHEN UND SIMULIERTEN BERECHNUNG	49
ABBILDUNG 30: SYSTEM DER ANGABE „IEA ANNEX 41 BEISPIELREIHE 1 TESTBEISPIEL OB“....	50
ABBILDUNG 31: SCHICHTENAUFBAU DER AUßENWANDKONSTRUKTION FALL A.....	52
ABBILDUNG 32: SCHICHTENAUFBAU DER AUßENWANDKONSTRUKTION FALL B.....	52
ABBILDUNG 33: SCHICHTENAUFBAU DER AUßENWANDKONSTRUKTION FALL C.....	53
ABBILDUNG 34: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE DES RAUMES DER ERSTEN 10 TAGE ..	55
ABBILDUNG 35: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE DES RAUMES, WENN DER PERIODISCHE ZUSTAND ERREICHT IST.	56
ABBILDUNG 36: ÜBERSICHTSPLAN DER SIMULIERTEN WOHNUNG, OHNE MAßSTAB.....	59
ABBILDUNG 37: TAGESVERLAUF DER FEUCHTEPRODUKTION FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1	62
ABBILDUNG 38: TAGESVERLAUF DER FEUCHTEPRODUKTION FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2	62
ABBILDUNG 39: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 BEI KONSTANTEM LUFTWECHSEL MIT FEUCHTEPUFFERUNG	64
ABBILDUNG 40: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 BEI 2X TÄGL. STOSSLÜFTEN MIT FEUCHTEPUFFERUNG	64
ABBILDUNG 41: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 BEI KONSTANTEM LUFTWECHSEL FÜR DEN 31. JÄNNER MIT FEUCHTEPUFFERUNG	65
ABBILDUNG 42: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 BEI 2X TÄGL. STOSSLÜFTEN FÜR DEN 31. JÄNNER MIT FEUCHTEPUFFERUNG.....	65
ABBILDUNG 43: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 BEI KONSTANTEM LUFTWECHSEL OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	66
ABBILDUNG 44: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 BEI 2X TÄGL. STOSSLÜFTEN OHNE FEUCHTEPUFFERUNG.....	66
ABBILDUNG 45: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 BEI KONSTANTEM LUFTWECHSEL FÜR DEN 31. JÄNNER OHNE FEUCHTEPUFFERUNG.....	67
ABBILDUNG 46: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 BEI 2X TÄGL. STOSSLÜFTEN FÜR DEN 31. JÄNNER OHNE FEUCHTEPUFFERUNG.....	67
ABBILDUNG 47: VERLAUF DES TAGESMITTELWERTES DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 MIT FEUCHTEPUFFERUNG.....	68
ABBILDUNG 48: VERLAUF DES TAGESMITTELWERTES DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 1 OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	68
ABBILDUNG 49: VERGLEICH DER UNTERSCHIEDLICHEN LÜFTUNGSARTEN MIT UND OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	69

ABBILDUNG 50: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI KONSTANTEM LUFTWECHSEL MIT FEUCHTEPUFFERUNG	70
ABBILDUNG 51: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI 2X TÄGL. STOSSLÜFTEN MIT FEUCHTEPUFFERUNG	70
ABBILDUNG 52: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI 3X TÄGL. STOSSLÜFTEN MIT FEUCHTEPUFFERUNG	71
ABBILDUNG 53: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI KONSTANTEM LUFTWECHSEL FÜR DEN 31. JÄNNER MIT FEUCHTEPUFFERUNG	71
ABBILDUNG 54: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI 2X TÄGL. STOSSLÜFTEN FÜR DEN 31. JÄNNER MIT FEUCHTEPUFFERUNG	72
ABBILDUNG 55: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI 3X TÄGL. STOSSLÜFTEN FÜR DEN 31. JÄNNER MIT FEUCHTEPUFFERUNG	72
ABBILDUNG 56: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI KONSTANTEM LUFTWECHSEL OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	73
ABBILDUNG 57: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI 2X TÄGL. STOSSLÜFTEN OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	73
ABBILDUNG 58: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI 3X TÄGL. STOSSLÜFTEN OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	74
ABBILDUNG 59: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI KONSTANTEM LUFTWECHSEL FÜR DEN 31. JÄNNER OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	74
ABBILDUNG 60: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI 2X TÄGL. STOSSLÜFTEN FÜR DEN 31. JÄNNER OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	75
ABBILDUNG 61: VERLAUF DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 BEI 3X TÄGL. STOSSLÜFTEN FÜR DEN 31. JÄNNER OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	75
ABBILDUNG 62: VERLAUF DES TAGESMITTELWERTES DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 MIT FEUCHTEPUFFERUNG	76
ABBILDUNG 63: VERLAUF DES TAGESMITTELWERTES DER RELATIVEN LUFTFEUCHTE FÜR DAS NUTZUNGSPROFIL 2 OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	76
ABBILDUNG 64: VERGLEICH DER UNTERSCHIEDLICHEN LÜFTUNGSARTEN MIT UND OHNE FEUCHTEPUFFERUNG	77

8 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: KONSTANTEN DER MAGNUSFORMEL	12
TABELLE 2: WETTERBUS	14
TABELLE 3: KONSTRUKTIONENBUS.....	15
TABELLE 4: SYSTEMBUS.....	16
TABELLE 5: QUELLENBUS	16
TABELLE 6: ZONENBUS	17
TABELLE 7: ANALYTISCHE LÖSUNG	48
TABELLE 8: PARAMETER FÜR DIE VERSCHIEDENEN SCHRITTE	54
TABELLE 9: ÜBERSICHT DER ZONEN UND DER GEOMETRISCHEN ABMESSUNGEN	57
TABELLE 10: VERWENDETE MAERIALDATEN.....	60
TABELLE 11: TAGESFEUCHTEPRODUKTION DER VERSCHIEDENEN NUTZUNGSPROFILE	63
TABELLE 12: LUFTWECHSELRATEN DER EINZELNEN RÄUME	63

9 Literaturverzeichnis

[RIE94] Rietschel: *Raumklimatechnik 1.Grundlagen 16.Auflage* ; Springer-Verlag 1994

[CHE] Lide, David R.: *Handbook of Chemistry and Physics*; CRC Press

[BED00] Bednar/Hagentoft: Analytical solution for moisture buffering effect, validation exercises for simulation tools; IEA Annex 41 Homepage

<http://www.kuleuven.ac.be>

[ÖN15026] ÖNORM EN 15026 Ausgabe 2004-10-01: Wärme- und

Feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen –

Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation

[ÖN8110] ÖNORM B 8110-2 Ausgabe 2003-07-01: Wärmeschutz im Hochbau –

Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz

[CLAO1] J. A. Clarke: *Energy Simulation in Building Design 2nd Edition*

[EHRO0] Ehrenfried Heinz: *Kontrollierte Wohnungslüftung* ; Verlag Bauwesen Berlin
2000

[BPH1] Dreyer: *Bauphysikalischer Wärmeschutz*; Skriptum zur Bauphysik1 Vorlesung
an der TU-Wien

[BPH2] Dreyer: *Bauphysikalischer Feuchteschutz*; Skriptum zur Bauphysik1 Vorlesung
an der TU-Wien

[HTO02] Angela Sasics Kalagasidis; *H-Tools International Building Physics Toolbox*
Block documentation; Department of Building Physics, Chalmers Institute of
Technology, Sweden, Report R-02:3