



Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Baustoffe
Institute for Building Materials

Schlussbericht Projekt 2012.11

Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von Flachdachelementen im Hohlkastensystem

Projektleitung:

Prof. Dr. Peter Niemz (ETH, IfB, Holzphysik)

Betreuer: Dipl.-Ing. Thomas Schnider, ETH, IfB

Experte: Dr. Karim Ghazi, Empa, Abt. Bauphysik

Praxispartner:

Pius Schuler AG Rothenthurm (Dipl.-Ing. Pius Schuler)

Pavatex SA ,Cham (Dipl. Forstwirt. Volker Brombacher)

Bearbeiter: Federico Gariglio

Berner Fachhochschule, Biel

Zürich, 28.Februar 2014

Bundesamt für Umwelt BAFU

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung

Bearbeitungszeit: 15.2.2013 – 28.2.2014



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Abstract

Das Umdenken der Bevölkerung hinsichtlich der Nachhaltigkeit ihres Wohnraumes zieht eine erhöhte Nachfrage unbelüfteter Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise nach sich. Die Ausweitung des Marktes aber bedeutet für Konstrukteure und Hersteller auch Bauteiloptimierungen und –entwicklungen im Grenzbereich, um weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben. Solche Optimierungen bringen erhöhte Anforderungen an die bauphysikalische Ausführung des Bauteils mit sich, die vermehrt zu Fragestellungen über Lebensdauer und Funktionstauglichkeit der Gesamtkonstruktion führen. Dabei weist vor allem die hölzerne Dachschalung unterhalb der dampfdiffusionsdichten Schicht ein feuchtetechnisch erhöhtes Gefahrenpotential auf. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Überschreitung von 20% Holzfeuchte über eine längere Zeitdauer erhebliche Folgen, wie Schimmelpilze etc., mit sich bringen können. Diese Tatsache bewegte die Pius Schuler AG, PAVATEX® und die ETH Zürich beim Bau eines Zweifamilienhauses dazu, eine Messtechnik im Hohlkastensystem zu installieren, die eine Einschätzung über die Wärme- und Feuchteverhältnisse innerhalb der Konstruktion ermöglichen. Zur Beurteilung des Feuchtegehaltes der Dreischichtplatte wurde dabei auf zwei experimentelle und ein numerisches Verfahren zurückgegriffen.

Die erste Komponente der experimentellen Verfahren beinhaltet die Erstellung einer Sorptionsisotherme der Dreischichtplatte nach dem HAILWOOD & HORROBIN-Modell. Anhand dessen Algorithmus kann der Holzfeuchteverlauf aus den gemessenen relativen Luftfeuchten berechnet werden. Die zweite Komponente beruht auf aufgezeichneten Messwerten von eingebauten Holzfeuchtesonden in Weich- und Mineraldämmung gedämmten Bereichen. Aufgrund aufgetretener Messfehler wird zusätzlich noch eine Sensorvalidierung durchgeführt. Die numerische Vorgehensweise hingegen umfasst eine instationäre hygrothermische Bauteilberechnung mittels des Simulationsprogramms WUFI® des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, inklusive zusätzlicher Messungen objektspezifischer Parameter und Daten.

Der Direktvergleich der Ergebnisse aller drei Verfahren zeigt, dass die Ausgleichsfeuchten einen ähnlichen Verlauf ergeben haben. Die grösste Differenz, mit etwas über 2% Holzfeuchte, zeigt sich im Sommer des Jahres 2013 zwischen der gemessenen und der berechneten Ausgleichsfeuchte. Der Verlauf der simulierten Ausgleichsfeuchte nimmt einen Wert zwischen den anderen beiden Messwert basierten Holzfeuchten ein und kommt in etwa deren Durchschnitt gleich.

Alle drei Verfahren scheinen auf ihre Art und Weise plausible Ergebnisse zu liefern, weisen aber auch in ihrer Funktionsweise über kleine Ungenauigkeiten und Verfehlungen auf. So entspricht die gemessene Holzfeuchte nicht der sich einstellenden Ausgleichsfeuchte im Bereich der Weichfaserdämmung, sondern jener im Bereich der Mineraldämmung. Die mit dem HAILWOOD & HORROBIN-Modell berechnete Ausgleichsfeuchte vernachlässigt die Auswirkungen einer Temperaturänderung, da sie lediglich auf die Sorptionsisotherme bei einer Temperatur von 20°C basiert. Der iterative Näherungsversuch mit WUFI zeigte, dass die etlichen verwendeten Materialkennwerte, Parameter und Rand- sowie Anfangsbedingungen eine eminente Fehleranfälligkeit bei mangelnder Kenntnis (bezüglich des Simulationsprogramms) bergen.

Aufgrund der relativ guten Übereinstimmung der Ergebnisse aller drei Verfahren kann davon ausgegangen werden, dass sich der schwankende Verlauf der Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte mit grosser Wahrscheinlichkeit in einem Bereich zwischen ca. 11% bis 18% Holzfeuchte bewegt. Somit liegt sie deutlich unter der kritischen Grenze von 20% und stellt keine feuchte-technische Gefahr dar.

Abstract

The rethinking of the public with regard to the sustainability of their living space is creating a higher demand for non-ventilated flat roof constructions in wood. But this expansion of the market means that constructing engineers and manufacturers will have to optimize and develop in the border area in order to remain competitive. Such optimizations increase the need for structural-physical construction execution of the component itself, which increasingly leads to questions about life and functional capability of the whole construction. The wooden roof sheathing below the vapour diffusion tight layer, in particular, runs an increased risk of hygric properties. Studies have shown that an excess of 20% moisture content during a longer period of time implicates significant consequences, such as moulds, etc.. This fact led Pius Schuler AG, PAVATEX® and the ETH Zurich to install a measurement technology in the construction of a two-family house that makes it possible to assess the heat and humidity conditions within the structure. Two experimental and one numerical methods were applied in order to assess the moisture content of the installed three-layer panel.

The first component of the experimental method involves the development of a sorption isotherm of the three-layer panel according to the HAILWOOD & HORROBIN model. Based on the algorithm generated it is possible to calculate the moisture profile from the measured relative humidities. The second component is based on measurements from wood moisture probes that were installed in the area of soft and mineral fibrous insulating material of the analysed flat roof. Due to possible measurement errors a sensor validation is additionally performed. The numerical method, however, includes a transient hygrothermal calculation of multi-layer building components using the simulation programme WUFI® of the Fraunhofer Institute for Building Physics with additional measurements of object-specific parameters and data.

The comparison of the results of all three methods shows that the equilibrium moisture contents bear similar trends. The biggest difference, with slightly more than 2% moisture, can be seen in the summer of 2013 between the measured and the calculated equilibrium moisture content. The development of the simulated equilibrium moisture with WUFI® has a value between the other two measurements based on wood moisture and has about the same average.

All three methods appear to provide plausible results, but also feature small inaccuracies and lapses in their functional principle. Thus, the measured moisture content does not reflect the equilibrium moisture content in the area of soft fibrous insulating material, but that in the area of mineral fibrous insulating material. The equilibrium moisture content calculated with the HAILWOOD & HORROBIN model neglects the effect of a temperature change as it is only based on the sorption isotherm at a temperature of 20°C. The attempt of an iterative approximation with WUFI showed that the number of material constants, parameters, boundary conditions and also initial conditions harbour eminent susceptibility to errors due to a lack of knowledge (referring to the simulation programme).

On the basis of the relatively good consensus of the results of all three methods it can be assumed that the fluctuating behaviour of the equilibrium moisture content of the three-layer panel most likely moves in a range between about 11% to 18% moisture. Thus it is situated well below the critical limit of 20% and does not constitute a risk of hygric properties.

Vorwort

Zur Erweiterung der Erkenntnisse instationärer hygrothermischer Vorgänge in Konstruktionen wurde das Forschungsprojekt „Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von Flachdachelementen im Hohlkastensystem“ von der Arbeitsgruppe Bauphysik am Institut für Baustoffe (IfB) der ETH Zürich unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz mit den Projektpartnern Pius Schuler AG und PAVATEX® durchgeführt. Finanziert wurde das Forschungsvorhaben durch die ETH Zürich mit der Unterstützung durch den „Fonds zur Förderung der Wald und Holzforschung und Aktionsplan Holz“ des Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Dieser Forschungsbericht ist gleichzeitig die Thesis zur Erlangung des Titels Bachelor of Science in Holztechnik mit der Vertiefungsrichtung TST (Timber Structures and Technology). Das Projekt wurde während dem 9-monatigen Praktikum des Studienlehrganges Bachelor of Science in Holztechnik an der Berner Fachhochschule für Architektur, Holz und Bau in Biel erarbeitet. Zweck dieses Praktikum ist es, den Studierenden einen Einblick in die Berufswelt, in diesem Falle in den Bereich der Forschung und Entwicklung, zu eröffnen und sowohl der Erweiterung der persönlichen Erkenntnissen zu dienen.

Der Autor hatte dabei die Gelegenheit zu Erfahren wie es ist, ein Forschungsprojekt auf Bundesebene mit den einzelnen Schritten selbstständig zu planen und zu bearbeiten.

An dieser Stelle möchte ich mich beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung dieses Projektes bedanken. Ferner bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Peter Niemz und der Arbeitsgruppe Holzphysik des Instituts für Baustoffe der ETH Zürich für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung während des Praktikums. Ein weiterer Dank richtet sich an meine betreuenden Dozenten Herrn Prof. Dr. Christoph Geyer und Frau Dipl. Ing. Barbara Wehle. Sie haben sich stets Zeit genommen und mich mit ihren Fachkenntnissen und Erfahrungen richtungsweisend unterstützt. Für dich fachliche Unterstützung möchte ich mich bei der EMPA und Herrn Dr. Karim Ghazi Wakili bedanken. Weiter möchte ich ein Dankeschön an die beiden Mitarbeiter des Ifb (ETHZ) Thomas Schnider und Franco Michel aus sprechen, welche mir als Betreuer stets zur Seite standen und wesentlich zum Gelingen dieser Thesis beigetragen haben. Ein besonderer Dank geht an die Firmen Pius Schuler AG und PAVATEX®, welche mir die nötigen Prüfmaterialien kostenlos zur Verfügung gestellt haben. Ebenfalls einen besonderen Dank richtet sich an Herrn Stefan Heinzer, Mitarbeiter der Firma Pius Schuler AG und Eigentümer des untersuchten Zweifamilienhauses, für die Hilfsbereitschaft bei Fragen und die aufgewendete Zeit für das Auslesen der Daten. Zum Schluss möchte ich mich ganz herzlich bei Thomas Schnider und Irene Sibler für die Korrektur dieser Bachelor-Thesis bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Vorwort	iii
Verzeichnis der verwendeten Symbole, Formelzeichen und Abkürzungen	vii

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau und Vorgehensweise	4
1.4 Rahmenbedingungen.....	5
1.4.1 Vor betrachtungen	5
1.4.2 Abgrenzungen	5

2 Stand des Wissens

2.1 Funktion eines Flachdaches	6
2.2 Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise	7
2.2.1 Belüftete Flachdachkonstruktionen (Kaltdach).....	8
2.2.2 Unbelüftete Flachdachkonstruktionen (Warmdach)	8
2.3 Einwirkungen auf das Bauteil.....	10
2.4 Thermisches Verhalten von Bauteilen	12
2.4.1 Wärmeentwicklung im Bauteil.....	12
2.4.2 Wärmefluss	13
2.4.3 Einfluss der Wärme	18
2.5 Hygrisches Verhalten von Bauteilen	19
2.5.1 Feuchteentwicklung im Bauteil.....	20
2.5.2 Einfluss der Feuchte	24
2.6 Berechnungsmöglichkeiten des Wärme- und Feuchtetransports in Bauelementen	25
2.6.1 Stationäre hygrothermische Bauteilberechnung - Glaser-Verfahren	25
2.6.2 Instationäre hygrothermische Bauteilberechnung - Simulationsverfahren mit WUFI®	27
2.7 Testobjekt – Erfassung der bauphysikalischen Daten im Flachdachelement.....	29

3 Ausgleichsfeuchtebestimmung

3.1 Theorieteil – Hygroskopisches Verhalten von Baustoffen.....	31
3.1.1 Feuchteaufnahme und –abgabe von organischen Baustoffen	31
3.1.2 Feuchteaufnahme und –abgabe von anorganischen Baustoffen	33

3.1.3 Feuchtetransport und Feuchteverteilung	35
3.1.4 Hygroskopisches Gleichgewicht von Holz	36
3.2 Material und Methodik	37
3.2.1 Material	39
3.2.2 Bestimmung der Darrdichte	40
3.2.3 Bestimmung der Holzfeuchte – Hygroskopisches Gleichgewicht	40
3.2.4 Das HAILWOOD & HORROBIN-Modell	42
3.3 Ergebnisse und Diskussion	44
3.3.1 Darrdichte	44
3.3.2 Ausgleichsfeuchten und Sorptionsisothermen	46

4 Datenanalyse

4.1 Theorieteil – Bauphysikalischer Vorgang im Flachdach und deren Folgen	52
4.1.1 Funktion der einzelnen Schichten und bauphysikalische Zusammenhänge	52
4.1.2 Schadensverursachende Mikroorganismen	54
4.2 Material und Methodik	56
4.2.1 Theoretisch berechnete Holzfeuchte u_b	57
4.2.2 Gemessene Holzfeuchte u_g und Sensorvalidierung	57
4.2.3 Sensorvalidierung	57
4.2.4 Darstellung der Daten mittels Diagrammen	59
4.2.5 Schimmelpilzmodell nach HUKKA & VIITANEN	60
4.3 Ergebnisse und Diskussion	61
4.3.1 Gemessene Holzfeuchte u_g	61
4.3.2 Sensorvalidierung	64
4.3.3 Datenanalyse	68

5 Instationäre hygrothermische Bauteilberechnung mit WUFI®

5.1 Theorieteil – Funktionsweise und Materialkennwerte	75
5.1.1 Rand- und Anfangsbedingungen	76
5.1.2 Materialparameter	79
5.1.3 Hygrothermische Quellen als zusätzliche Randbedingungen	83
5.2 Material und Methodik	85
5.2.1 Luftdichtigkeitsmessung – Blowerdoor-Test	86
5.2.2 Bestimmung der freien Wassersättigung	89
5.2.3 Modelle hygrothermischer Quellen	92

5.3 Ergebnisse und Diskussion.....	95
5.3.1 Luftpichtigkeitsmessung – Blowerdoor-Test.....	95
5.3.2 Bestimmung der freien Wassersättigung.....	97
5.3.3 Instationäre hygrothermische Bauteilberechnung mit WUFI®	98
6 Vergleich der Verfahren	
6.1 Ergebnisse im Vergleich und Diskussion.....	103
6.2 Ausblick.....	105
 Verzeichnisse	
Abbildungen	106
Tabellen.....	108
Geräte	108
Normen	109
Literatur.....	110
 Anhang	113

Verzeichnis der verwendeten Symbole, Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol/ Formelzeichen/ Abkürzungen	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche
A_g	W/m^2	atmosphärische Gegenstrahlung
a_s	-	kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl
c	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische Wärmekapazität
C	J/K	Wärmekapazität
D_w	m^2/s	Flüssigtransportkoeffizient
D_{ws}	m^2/s	Flüssigtransportkoeffizient Saugen
D_{ww}	m^2/s	Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen
g	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$	Diffusionsstromdichte
g_w	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$	Flüssigtransportstromdichte
G	W/m^2	Globalstrahlung
h_c	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Wärmeübertragungskoeffizient
h_v	J/kg	Verdunstungsenthalpie
H	J/m^3	Enthalpie des feuchten Baustoffes
m	kg	Masse
m_f	g	Masse bei Fasersättigung
$m_{w,t}$	kg	Tauwassermenge
m_0	g	Darrmasse
M_p	-	Hypothetisches Molekulargewicht des Holzes
n_{50}	1/h	Luftwechselrate
N	$\text{l}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$	Niederschlag
p	Pa	Wasserdampfpartialdruck
Δp	Pa	Druckdifferenz
p_{sat}	Pa	Wasserdampfsättigungsdruck
p_c	Pa	Kapillardruck
q	W/m^2	Wärmestromdichte
q_c	W/m^2	konvektive Wärmestromdichte
q_{50}	$\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$	Luftdurchlässigkeit
R_D	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Gaskonstante für Wasserdampf: 461.5
R_i	$(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$	Wärmedurchlasswiderstand
R_s	$(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$	Wärmeübergangswiderstand
R_T	$(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$	Wärmedurchgangswiderstand
RH_{crit}	%	kritische relative Luftfeuchte
s	$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$	Wärmespeicherzahl
s_D	m	äquivalente Luftschichtdicke
T	K	Temperatur
T_s	K	Oberflächentemperatur
u	%	Materialfeuchte
u_b	%	berechnete Holzfeuchte
u_D	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Wärmedurchgangskoeffizient
u_g	%	gemessene Holzfeuchte
u_s	%	simulierte Holzfeuchte
u_w	%	Wassergehalt
U_m	%	monomolekular sorbiertes Wasser
U_p	%	polymolekular sorbiertes Wasser

U_{tot}	%	total sorbiertes Wasser
v	kg/m^3	absolute Luftfeuchte
v_a	m/s	Ausströmungsgeschwindigkeit von Luft
v_{sat}	kg/m^3	maximale absolute Luftfeuchte
v_{50}	m^3/h	Leckagestrom
V	m^3	Volumen
w	kg/m^3	Wassergehalt
w_f	kg/m^3	freie Wassersättigung
w_{max}	kg/m^3	maximaler Wassergehalt
w_{50}	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	nettogrundflächenbezogener Leckagestrom
α	-	Absorptionsgrad
α_a	K^{-1}	Ausdehnungskoeffizient
α_w	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient
α_k	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
α_s	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	strahlungsbedingter Wärmeübergangskoeffizient
δ	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient
δ_a	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
ε_G	-	Emissionsgrad
ε	-	langwellige Strahlungsemissionszahl
ϕ	W	Wärmestrom
Φ_p	m^3/m^3	Porosität
λ_D	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
λ	m	Wellenlänge
φ	%	relative Luftfeuchte
μ	-	Diffusionswiderstandzahl
ρ	-	Reflexionsgrad
ρ_f	kg/m^3	Rohdichte bei Fasersättigung
ρ_{roh}	kg/m^3	Rohdichte
ρ_{terr}	-	terrestrischer kurzwelliger Reflexionsgrad
ρ_w	kg/m^3	Rohdichte des Wassers
ρ_0	kg/m^3	Darrdichte
σ	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5.67 \cdot 10^{-8}$
θ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
θ_a	$^{\circ}\text{C}$	Aussenlufttemperatur
θ_s	$^{\circ}\text{C}$	Oberflächentemperatur
τ	-	Transmissionsgrad

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFS	Bundesamt für Statistik
EDI	Eidgenössisches Departement des Innern
IBP	Fraunhofer Institut für Bauphysik
IfB	Institut für Baustoffe (ETHZ)
IQR	Interquartilsabstand
H/H-Modell	HAILWOOD & HORROBIN-Modell

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Entstehung des Dachs beruht auf dem Urverlangen des sesshaft gewordenen Menschen nach einer Behausung, welche ihm Schutz und Sicherheit vor den Naturgewalten bietet. Die Konstruktionsweisen richteten sich entsprechend nach funktionalen Bedürfnissen, wie dem Schutz vor Regen, Sonne und Feinden aber auch nach den von der Natur zur Verfügung gestellten Baumaterialien. Mit der Zeit entwickelten sich von Region zu Region unterschiedliche Dacharten und -formen. Dort, wo es die klimatischen Bedingungen zuliessen, hat der Mensch sogar schon in seinen frühen Siedlungen die Wohnstätten mit ungedämmten flachen Dächern abgeschlossen. Erst Anfang des 20. Jahrhunderts beginnt, bedingt durch die architektonischen Formen des Kubismus, die Entwicklung der ersten wärmegedämmten Flachdächer. Man erkannte vermehrt die vielen funktionalen Vorteile die flachgeneigte Dachsysteme mit sich brachten. Beispielsweise konnten Dank der begehbarer, horizontalen Konstruktionsweise zusätzliche Verweilzonen geschaffen werden, die vor allem in Grossstädten als Zufluchtsort vor dem chaotischen Treiben dienten. Aber auch der oftmals ungenutzte Dachstuhl bei Giebeldächern stellte bei Flachdächern keinen Raumverlust mehr dar. Mit dem zunehmenden Einsatz von Flachdächern bei Neubauten bemerkte man aber deren wärme- und feuchtetechnischen Mängel, die durch die verschiedenen Konstruktionsvarianten entstanden. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden deshalb konventionelle Dachaufbauten auch unter bauphysikalischen Gesichtspunkten geplant, was das vorhandene Potential des Flachdachs endgültig sicherte und seitdem nicht mehr aus der heutigen Architektur wegzudenken ist.

Seit mehr als 10 Jahren erfreut sich die Flachdachkonstruktion auch in Holzbauweise immer grösserer Beliebtheit. Dies im Zuge des langsam aber sichereren Umdenkens der Bevölkerung hinsichtlich der Nachhaltigkeit ihres Wohnraumes. Die Holzkonstruktion im Hohlkastensystem bringt einige konstruktive Vorteile mit sich. So wird in Fachkreisen gerne mit dem Vorteil des geringeren Eigengewichtes gegenüber dem Massivbau argumentiert. Diese Gewichtsabnahme resultiert aus dem einfachen Bauteilaufbau und der kleinen Bauteildicke. Immer wichtiger wird auch die ganze Abwicklung während der Bauphase, da Zeit Geld ist und die Verdichtung aufgrund der Bevölkerungszunahme in den Städten immer wie mehr zunimmt (BFS, 2014). Zudem kann der Bau oder die Sanierung eines Gebäudes ihre ganze Umgebung in Anspruch nehmen, wodurch immer mehr auch die Bauausführung in den Fokus rückt. Diesbezüglich ist die Elementbauweise eine gute Lösung für eine saubere und schnelle Abwicklung der Bauphase.

Das Bedürfnis nach kubischen Gebäudeformen bringt eine erhöhte Nachfrage an Flachdächern im Holzbau mit sich. Durch dieses vermehrte verdichtete Bauen wird auch der Wunsch von dünnen Gebäudehüllen grösser. So wird heute ein immer schlankerer Aufbau angestrebt, sodass mittlerweile vermehrt auf unbelüftete Flachdächer gesetzt wird. Dies zieht eine erhöhte Anforderung an die bauphysikalischen Ausführungen des Bauteils nach sich. Infolgedessen tauchen Fragen über Lebensdauer und Funktionstauglichkeit der Gesamtkonstruktion hinsichtlich des Feuchte- und Holzschutzes auf, welche bei den Konstrukteuren und Herstellern eine grosse Unsicherheit hervorrufen.

In bereits abgeschlossenen Projekten, die in der Arbeitsgruppe Holzphysik der ETH Zürich mit der Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt BAFU (Fonds zur Förderung der Wald und Holzforschung und Aktionsplan Holz) durchgeführt wurden, hat man der Thematik von bauphysikalischen Vorgängen in Wandkonstruktionen bereits Sorge getragen (JOSCAK, et al., 2008) (JOSCAK, et al., 2010) (JOSCAK, et al., 2011). Bezuglich wärme- und feuchtetechnischer Verhältnisse in einschaligen Flachdachkonstruktionen ohne Unterlüftung der Dachhaut, liegen bislang nur wenige systematische Untersuchungen vor. WINTER et al., TEIBINGER & NUSSER und MINKE et al. haben im Rahmen eines Forschungsprojekts vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung in Deutschland experimentelle und numerische Untersuchungen des hygrothermischen Verhalten auf Basis von Freilanduntersuchungen an verschiedenen Standorten in Deutschland und Österreich durchgeführt. (WINTER, et al., 2009) (TEIBINGER & NUSSER, 2010) (MINKE, et al., 2009) Die Untersuchungen wurden aber nicht auf die Schweiz ausgeweitet.

Aufgrund dessen und aktuell immer wieder auftretender Bauschäden hat man ein weiteres Projekt lanciert. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von Flachdachelementen im Hohlkastensystem“ sollen instationäre hygrothermische Vorgänge in Flachdachkonstruktionen näher untersucht werden. Die beteiligten Forschungspartner waren die Arbeitsgruppe Holzphysik am Institut für Baustoffe (IfB) der ETH Zürich unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Peter Niemz, die Firma Pius Schuler AG und die Firma PAVATEX®. Finanziert wurde das Projekt durch die ETH Zürich und dem „Fonds zur Förderung der Wald und Holzforschung und Aktionsplan Holz“ des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Dank dieser Finanzierung wurden beim Bau eines Zweifamilienhauses in Ibach bei Schwyz Messsensoren in die Flachdachkonstruktion eingebaut, die über mehrere Jahre bauphysikalische Parameter aufzeichnen sollen. Diese Messwerte können zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet und mit dem allgemein bekannten bauphysikalischen Simulationsprogramm WUFI® abgeglichen werden.

1.2 Zielsetzung

Wie bereits geschildert, wurden an der ETH Zürich, mit der Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), bereits Untersuchungen bezüglich der hygrothermischen Verhältnisse in Wandelementen durchgeführt. Das Ziel dieses Nachfolgeprojekts ist die Gewinnung von Grundlagen zu den instationären hygrothermischen Vorgängen in Flachdachelementen im Hohlkastensystem. Mit Hilfe der bislang, in Abhängigkeit der in der Schweiz herrschenden Aussenklimabedingungen und des konstruktiven Aufbaus, experimentell erfassten Daten des Testgebäudes in Ibach, sollen numerisch instationäre hygrothermische Simulationen des Berechnungsprogramms WUFI® validiert werden. Dabei wird versucht mit dem Berechnungsprogramm eine möglichst realitätsnahe Situation abzubilden, indem einige der verwendeten Berechnungsparameter durch eigene Messungen ergänzt werden.

Diese experimentellen und das numerische Beurteilungsverfahren sollen Fragestellungen betreffend der fachgerechten Ausbildung der Konstruktion seitens des Projektpartners Pius Schuler AG, sowie das Risiko eines Schimmelpilzbefalls klären. Auch der Einfluss des Weichfaserdämmstoffes PAVAFLEX von PAVATEX® auf das Wärme- und Feuchteverhalten der Flachdachkonstruktion soll untersucht werden, um Unterschiede gegenüber herkömmlichen Mineralfaserdämmstoffen zu ergründen, die der Erweiterung des aktuellen Kenntnisstandes über naturfaserbasierte Dämmstoffe dienen sollen. Zur iterativen Bearbeitung dieses Projektes sind zu Beginn folgende Meilensteine in Absprache mit den Industriepartnern, Pius Schuler AG und PAVATEX®, definiert worden.

- Bestimmung der Ausgleichsfeuchte der von der Schuler AG verwendeten Dreischichtplatten in Abhängigkeit der Lufttemperatur und -feuchte mittels Versuchen im Labor.
- Erstellung von Sorptionsisothermen für die Formulierung hygrothermischer Algorithmen.
- Aufbereiten und Auswerten des experimentell erfassten Datenmaterials.
- Darstellung der instationären hygrothermischen Verhältnisse im Flachdachelement.
- Durchführung instationärer hygrothermischer Bauteilberechnungen auf Basis des Konstruktionsaufbaus mittels WUFI®.
- Anpassung und Generierung verschiedener Berechnungsparameter zur Optimierung der Simulation.
- Direktvergleich der Ergebnisse aus der experimentellen und numerischen Untersuchung.
- Erarbeiten eines Tools zur einfachen Eingabe und Auswertung von Messdaten nach Abschluss der Arbeit für die Projektpartner.

1.3 Aufbau und Vorgehensweise

Aus der Zielsetzung und den daraus abgeleiteten Meilensteinen ergibt sich der dreiteilige Aufbau des zu bearbeitenden Projektes. In der schriftlichen Fassung verfügt jedes der drei Elemente über einen einführenden Theorieteil, der den Leser nebst dem Kapitel Stand des Wissens detailliert in den gerade diskutierten Bereich einführen soll. Dieser individuelle Aufbau weicht zwar von der klassischen Form ab, gewährleistet dem Leser aber eine übersichtliche und gut strukturierte Führung durch die behandelte Thematik. Nur so ist es möglich die drei bearbeiteten Teilbereiche am Ende auf einen zusammenfassenden Vergleich und entsprechende Schlussfolgerung zusammen zu führen.

Die Abbildung 1.1 zeigt, wie Anhand von drei verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte im Flachdach Theorie und Praxis gekoppelt wird. Die zwei experimentellen Verfahren zur Bestimmung der Ausgleichsfeuchte repräsentiert dabei die Praxis, während die numerische Vorgehensweise die Theorie vertritt.

Die erste Komponente der experimentellen Verfahren beinhaltet die Erstellung einer Sorptionsisotherme der Dreischichtplatte nach dem HAILWOOD & HORROBIN-Modell, dessen Algorithmus für die Berechnung des Holzfeuchteverlaufs mittels der im Flachdach gemessenen relativen Luftfeuchten Verwendung findet. Die zweite Komponente beruht auf der Auswertung von Messwerten, die durch eingebaute Holzfeuchtesonden aufgezeichnet werden. Aufgrund aufgetretener Messfehler wird zusätzlich noch eine Sensorvalidierung durchgeführt, bzw. die Holzfeuchtesonden auf ihre mess-technische Funktionstüchtigkeit geprüft.

Die numerische Vorgehensweise umfasst eine instationäre, hygrothermische Bauteilberechnung mittels des Simulationsprogramms WUFI® des Fraunhofer Instituts für Bauphysik. Für eine realitätsgerechte Simulation des Holzfeuchteverlaufs werden objektspezifische Parameter und Daten benötigt, die mit zusätzlichen Messungen, wie dem Blowerdoor-Test und der Bestimmung der freien Wassersättigung, ermittelt werden müssen. Ebenfalls sollen lokale Aussenklimadaten der MeteoSchweiz und die gemessenen Innenklimadaten die klimatischen Verhältnisse Vorort für die Simulation wiedergeben.

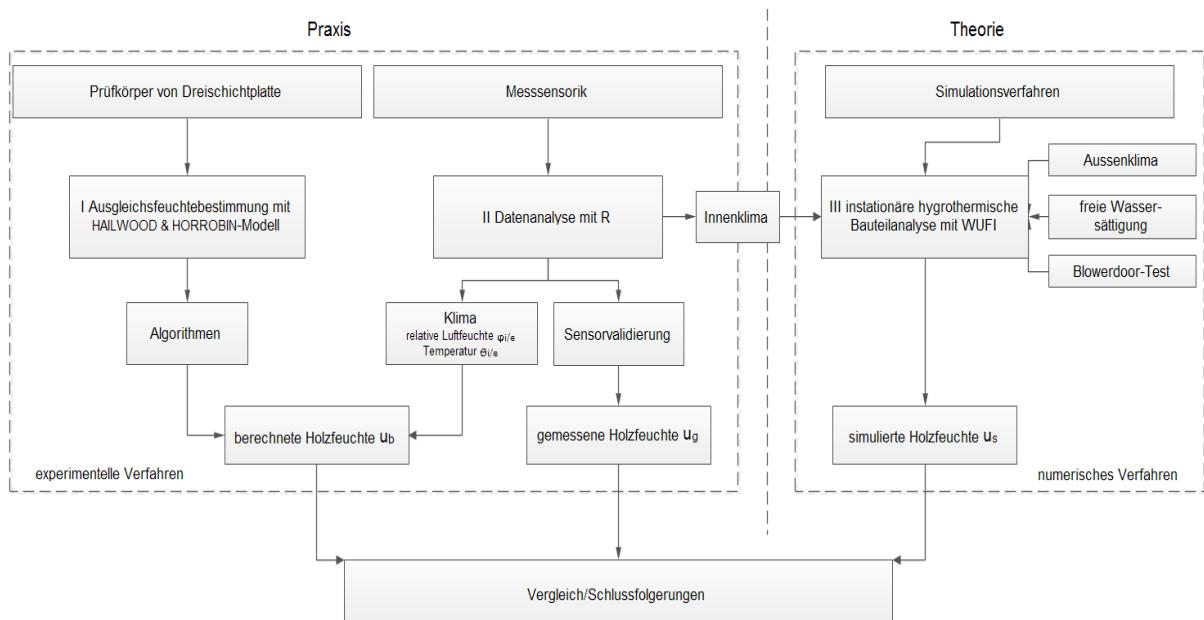


Abbildung 1.1: Aufbau und Gliederung des bearbeiteten Projektes.

1.4 Rahmenbedingungen

1.4.1 Vorbetrachtungen

Zur rechtzeitigen Initialisierung des Forschungsprojekts erfolgte der Einbau der Messtechnik bereits während der Bauphase des Testgebäudes im Jahre 2011. Zu diesem Zeitpunkt war der Autor dieses Berichtes noch nicht an der ETH Zürich tätig, weshalb die Planung und Umsetzung der ganzen Installation von Mitarbeitern der Pius Schuler AG und dem Institut für Baustoffe der ETH Zürich ausgeführt wurden. Zudem erfolgte das Auslesen der Daten vor Ort jeweils durch einen Mitarbeiter der Pius Schuler AG und Hauseigentümer Stefan Heinzer.

Zur Bewältigung der angefallenen Datenmenge musste auf eine freie Programmiersprache namentlich R zurückgegriffen werden, da das handelsübliche Programm Excel von Microsoft nicht mehr den rechentechnischen Anforderungen genügte. Das Programmsystem R erwies sich diesbezüglich als Alternative für die statistischen Analysen und grafische Darstellungen der erhaltenen Daten. Zudem handelt es sich bei R um ein opensource-Programm, das frei verfügbar und somit mit keinen zusätzlichen Kosten verbunden ist. Aufgrund der Komplexität nahm aber das Erlernen der Programmiersprache R einen Grossteil der Bearbeitungszeit in Anspruch.

Neben der Programmiersprache R musste das Simulationsprogramm WUFI® „Wärme und Feuchte instationär“ erlernt werden. Dieses Programm dient zur rechnerischen Untersuchung des Wärme- und Feuchtehaushalts bewitterter Bauteile und wurde vom Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelt.

1.4.2 Abgrenzungen

Aufgrund finanziellen aber auch zeitlichen Gründen musste auf eine wärme- und feuchtetechnische Untersuchung des Flachdachs mittels des Simulationsprogramms „Delphin“ (Instituts für Bauklimatik, TU Dresden) verzichtet werden. Das Einarbeiten in eine zweite Simulationssoftware hätte den Rahmen dieses Projektes gesprengt, auch wenn ein Vergleich der beiden numerischen Modelle interessant gewesen wäre.

Zudem musste in diesem Projekt grösstenteils auf die Untersuchung zum wärmtechnischen Verhalten des vorliegenden Flachdachs verzichtet werden. Obwohl Wärmeflussplatten während der ganzen Messperiode verlässliche Werte lieferten, konnte aus zeitlichen Gründen neben den feuchtetechnische Untersuchungen den Wärmefluss von Innen nach Aussen und umgekehrt nicht vertieft betrachtet werden.

2 Stand des Wissens

2.1 Funktion eines Flachdaches

Unter der Funktion im mathematischen Sinne versteht man eine eindeutige Zuordnung der Werte einer Definitionsmenge zu den Werten der Wertemenge. Im sprachlichen Gebrauch bedeutet sie das Ausüben einer Aufgabe innerhalb eines grösseren Zusammenhangs, also eine bestimmte Stellung innerhalb eines Systems einzunehmen. Die Funktion des Daches ist also nichts anderes, als dass das Objekt eine bestimmte Leistung als Teil der Gebäudehülle zu erbringen hat. Diese zugeordneten Leistungen definieren sich durch die Anforderungen an das Bauteil, die von den Umgebungs-einflüssen bestimmt werden. So ist die Aufgabe eines Daches in erster Linie die Nutzer eines Gebäudes vor der äusseren Witterung zu schützen und ein eigenes angenehmes Klimasystem innerhalb der vier Wände zu garantieren. Somit verhindert es, dass Wasser durch Regen oder Tau in den Innenraum gelangt und dient als Schutz vor Kälte und direkter Sonneneinstrahlung. Aber auch das Zurückhalten des Aussenlärms und die Funktion als Verweilzone sind weitere Aufgaben des flachgeneigten Daches. Die Notwendigkeit einer Funktion und die Intensität der einzelnen Einwirkungen hängen dabei vor allem vom Nutzen und Standort des Bauwerkes ab, definieren den Aufbau des Flachdachs und geben somit auch ihre Form vor.

Entsprechend der Beanspruchung übernehmen die einzelnen Schichten des Flachdachs verschiedene Aufgaben (Abbildung 2.1). Die oberste Schicht, die Dachhaut, ist wassererdicht und verhindert das Eindringen von Niederschlagswasser. Die darunter liegende Ebene, die Dachschalung, hat eine statische Aufgabe und ist in den meisten Fällen feuchtetechnisch die massgebendste Schwachstelle. Die Dämmsschicht zwischen den tragenden Quer- und Längsrinnen verringert den Wärmeabfluss durch die Konstruktion und verringert somit den Energieverlust. Das Tragwerk mit der Dämmung wird zum Schluss mit einer Bekleidung, deren Hauptaufgabe feuchtetechnischer und ästhetischer Art ist, gegen den Innenraum zugeschoben. Sie dient als dampfbremse Schicht und begrenzt die Diffusion von Wasserdampf in das Bauteil.

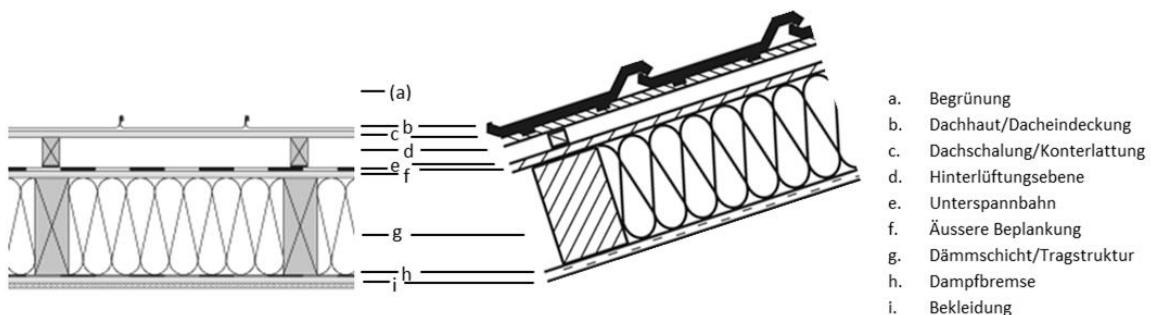


Abbildung 2.1: Aufbau Flachdach und Steildach im Vergleich. Quelle: www.proholz.at, www.hanffaser.de, Stand: 06.02.2014

Die Dachformen (Steildach, Flachdach, etc.) richten sich in erster Linie nach architektonischen und funktionalen Werten. So zählt das Argument der Platz einsparung als eine der wichtigsten Gründe für die flache Ausführung eines Daches. Das Flachdach ermöglicht zusätzlich das Erschaffen einer weiteren Verweilzone. Nebst diesen funktionalen Gründen wird oft auch mit der zeitgemässen und architektonischen Schönheit solcher Konstruktionen argumentiert, die eine gestalterische Aufwertung der Umgebung mit sich bringt.

Da das Flachdach als Erscheinung der modernen Zeit gilt und erst in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewinnen konnte, mangelt es folglich an Wissen über dessen bauphysikalischen Verhalten.

2.2 Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise

Die vielen positiven Aspekte eines Flachdachs haben eine deutliche Zunahme der Nachfrage zur Folge. Hinzu kommt eine Steigerung des Umweltbewusstseins der Bevölkerung, was die Architekten und Ingenieure vermehrt dazu zwingt, auf den nachhaltigen Rohstoff Holz zurück zu greifen. Ein weiteres Argument stellt der hohe Vorfertigungsgrad dar, der die Bauphase gegenüber dem Massivbau wesentlich verkürzt.

Auch die Holzindustrie und -wirtschaft hat das grosse Marktpotential von Flachdachkonstruktionen bemerkt und entsprechende Investitionen in die Forschung und Entwicklung getätigt, was zu einer Zunahme der auf dem Markt angebotenen Produkten führte. Mittlerweile existieren diverse Konstruktionstypen mit immer anderen Eigenschaften für die entsprechenden Einsatzgebiete. Die Abbildung 2.2 der Lignum gibt einen Überblick über die häufigsten Flachdachtypen und deren Eignung aufgrund des Tragsystems und der obersten Schutzschicht (WEBER, et al., 2003).

Nutzung	Nacktdach		bekiest		begrünt		begehbar	
Flachdachtyp								
Nicht belüftetes Flachdach	Warmdach	✓	✓	✓	✓	+	✓	+
	Verbunddach	0	✓	✓	0	✓	✓	✓
	Umkehrdach	0	0	0	+	✓	✓	✓
	Ungedämmtes Dach	+	+	+	+	+	+	+
Belüftetes Flachdach	Kaltdach	+	✓	✓	+	✓	✓	✓
	Tragsysteme der Unter- konstruktion (siehe Tabelle 14, Seite 31)	Stabtragwerk	Plattentragwerk	Deckensystem	Stabtragwerk	Plattentragwerk	Deckensystem	Stabtragwerk

Abbildung 2.2: Flachdachtypen und ihre Einsatzgebiete. Quelle: (WEBER, et al., 2003)

Die verschiedenen Flachdachtypen werden in zwei verschiedene Konstruktionssysteme eingeteilt. In „belüftete Flachdächer“, die über eine Belüftungsebene verfügen, und in das verbreiterte System „nicht belüftete Flachdächer“, das einschalig ausgebildet wird und über keine Belüftungsebene verfügt.

2.2.1 Belüftete Flachdachkonstruktionen (Kaltdach)

Bei Flachdächern können durch kleinste örtliche Leckagen in der Dachhaut Wasser in die Konstruktion eindringen und auf eine Dachschicht treffen, die grosse Wassermengen aufnehmen kann. Bei einer geringen Undichtigkeit der Dachhaut oder einem kurzzeitigen Wasserdurchtritt durch die Schutzschicht des Flachdachs kann der Schaden nur in Grenzen gehalten werden, wenn die Wiederaustrocknung auf Basis von Verdunstung gewährleistet werden kann.

Beim Steildach wird diese Funktion der Verdunstung durch die Belüftungsebene übernommen. Das gleiche Konzept wird bei belüfteten Flachdächern angewendet (Abbildung 2.3).

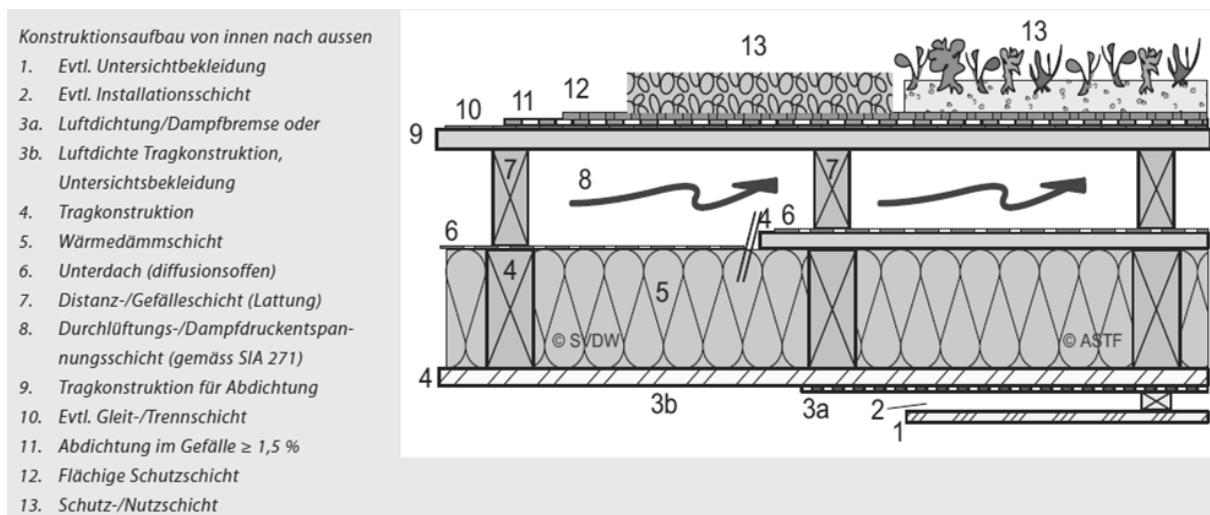


Abbildung 2.3: Möglicher Aufbau eines durchlüfteten Flachdaches. Quelle: (MERKBLATT FD 2/07, 2007)

WEBER et al. zählt weitere Vorteile eines belüfteten Flachdaches auf. So kann beispielsweise die durch die Konstruktion diffundierende Feuchte und die vorhandene Restfeuchte aus der Bauzeit durch die Hinterlüftung über der Wärmedämmung entweichen. Hinzu kommt, dass das Kaltdach für sämtliche Tragsysteme in Holzbauweise gut geeignet ist. Wärmotechnisch betrachtet kann während der warmen Jahreszeit die Belüftungsebene die Wärmebelastung der Räume unter dem Dach reduzieren, indem die erwärmte Luft über den Hohlraum abtransportiert wird (WEBER, et al., 2003). Die Problematik dieses belüfteten Konstruktionssystems besteht darin, dass keine Thermik sondern nur Luftbewegung durch Windeinwirkung, Druckdifferenzen an Dachkanten (Staudruck und Windsog) und temperaturbedingter Überdruck in der Belüftungsebene wirken. Somit entstehen nur sehr geringe Luftgeschwindigkeiten, die unter Umständen die in der Dachkonstruktion angesammelte Feuchte nicht in der gewünschten Menge nach aussen transportieren können, was zu Feuchteschäden führt. Ein weiterer Nachteil ist der Verlust an Raumhöhe durch den verhältnismässig hohen Aufbau.

2.2.2 Unbelüftete Flachdachkonstruktionen (Warmdach)

Die unbelüftete Dachkonstruktion (Warmdach) ist bei den Flachdächern als Strukturtyp sehr verbreitet. Bei dieser Flachdachkonstruktion handelt es sich um eine einschalige, wärmegedämmte und nicht durchlüftete, flache Bedachung, bei der sich die Abdichtung direkt auf der wärmegedämmten Schicht befindet.

Dabei wird zwischen Konstruktionen mit Volldämmung in der Tragebene und mit Dämmung oberhalb der Tragkonstruktion unterschieden. Wobei diese Platzierung der Dämmschicht und somit auch die

Reihenfolge der einzelnen Schichten des Dachaufbaus, das wichtigste Kriterium hinsichtlich der schadensfreien Erfüllung bauphysikalischer Anforderungen darstellt.

Der Flachdachaufbau mit der Dämmschicht oberhalb der Tragkonstruktion stellt hierbei die sicherste und robusteste Konstruktionsvariante dar, da die Tragkonstruktion keinen erheblichen Klimaschwankungen ausgesetzt ist. Somit kann ein Tauwasserausfall im Bereich der Tragkonstruktion und der tragenden Beplankung ausgeschlossen werden (Abbildung 2.4). Der Nachteil dieser Variante liegt jedoch in der dickeren Ausführung der Dachaufbauten und der Aufbau bedarf druckfester Aufdachdämmstoffe.

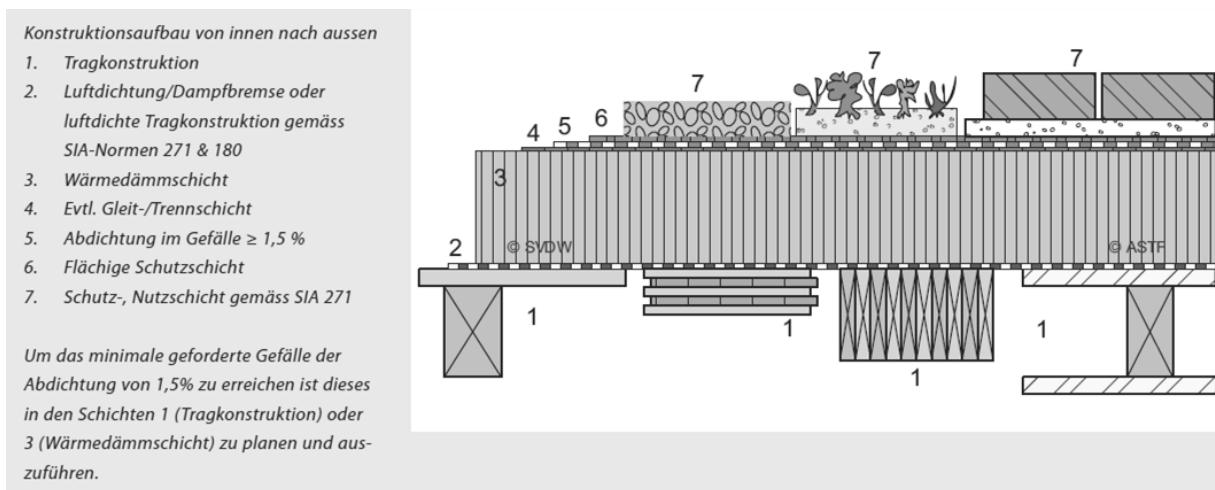


Abbildung 2.4: Möglicher Aufbau eines nicht belüfteten Flachdaches mit einer Aufdachdämmung.

Quelle: (MERKBLATT FD 2/07, 2007)

Unbelüftete Flachdächer mit der Dämmung in der Tragebene weisen in feuchtetechnischer Hinsicht eine geringere Fehlertoleranz auf (Abbildung 2.5). Es sind deshalb erhöhte Planungsaufwände und Ausführungskontrollen, wie z.B. die Gewährleistung der Luftdichtigkeit des Bauelements erforderlich. Der grosse Vorteil dieser Konstruktionsweise zeichnet sich durch einen sehr guten Wärmeschutz bei geringer Bauhöhe aus. Zudem ist ein hoher Vorfertigungsgrad mit einfachen Anschlussdetails möglich, bei vergleichbar geringen Baukosten.

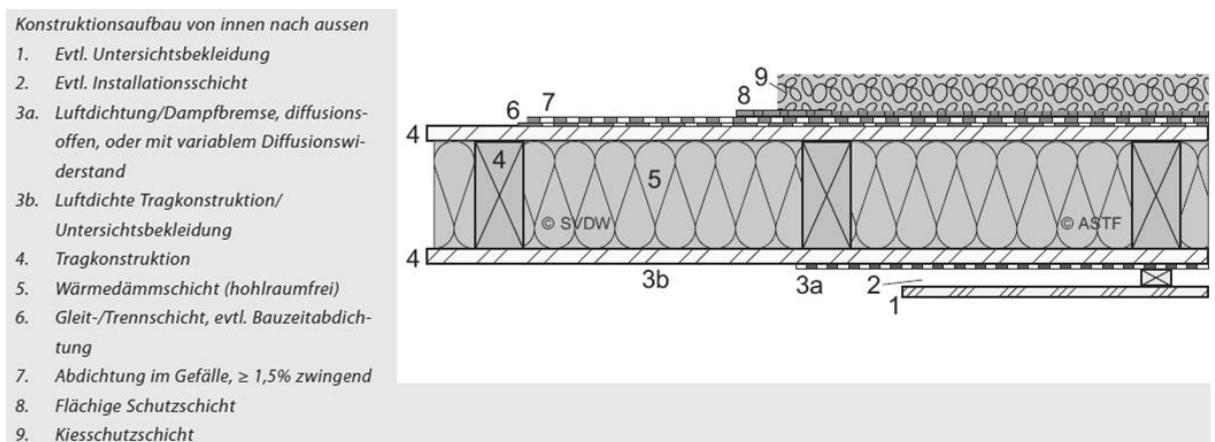


Abbildung 2.5: Möglicher Aufbau eines nicht belüfteten Flachdaches mit Dämmung in der Tragebene.

Quelle: (MERKBLATT FD 2/07, 2007)

Die grosse Herausforderung dieser Schichtanordnung ist, dass bei konstruktionsbedingter diffusionsdichter Dachabdichtung die ins Bauteil eingedrungene Feuchtigkeit wieder austrocknen kann. Dies

wird mittels Dampfbremsen mit einer äquivalenten Luftschichtdicke (s_d -Wert) zwischen 2 und 20 m erreicht. Diese lassen zwar im Winter eine grössere Menge an Feuchtigkeit in das Bauteil eindringen, ermöglichen aber der durch unplanmässige Baufeuchte und konvektiv eindringenden Feuchte auffeuchtende Konstruktion in Sommermonaten wieder auszutrocknen. Die treibende Kraft dabei ist die Umkehrdiffusion, die infolge Erwärmung der Dachfläche, vom Bauteil Richtung Gebäudeinnern wirkt. Dieses sommerliche Rücktrocknen wird oftmals auch als Rücktrocknungs-, Verdunstungspotenzial oder auch Schaffen von Trocknungsreserven bezeichnet.

Eine optimale Lösung bieten feuchteadaptive Dampfbremsen als kompensierende Schicht. Diese Bahnen variieren ihren Diffusionswiderstand jeweils nach den sich einstellenden relativen Luftfeuchten in den Sommer- oder Wintermonaten. So weisen diese speziell entwickelten Kunststofffolien, Dampfbremspappen aber auch viele Holzwerkstoffe in Perioden mit beheizter, trockener Innenluft hohe Diffusionswiderstände, respektive in Zeiträumen mit unbeheiztem, eher feuchterem Klima, tiefe Diffusionswiderstände auf.

2.3 Einwirkungen auf das Bauteil

Von der ganzen Gebäudehülle ist das Flachdach das am meisten beanspruchte Bauteil. Die Beanspruchung hängt dabei stark von klimatischen Bedingungen ab, aber auch von der Nutzung der Fläche.

Die klimatischen Anforderungen werden dabei in äussere und innere Bedingungen unterteilt. Die äussere Beanspruchung des Daches ist vor allem standortabhängig und kann stark variieren. diese Belastungen betreffen besonders die Dachoberfläche, bzw. die oberste Schicht des Dachquerschnittes. WEBER et al. spricht von folgenden bauphysikalischen (WEBER, et al., 2003):

- Wasser und Luftfeuchte
- Wärme und Kälte
- Lärm
- UV-Strahlung
- Brand
- Statische Beanspruchung durch Nutzlasten, Schnee, Wind

Der Schutz vor Regen und Tauwasser sowie der Schutz vor Kälte und vor der direkten Sonneneinstrahlung sind die wohl bedeutendsten Aufgaben des Daches. Der Schutz vor Lärm und Brand sind dagegen zivilisatorisch bedingte, auf die dichtbesiedelten und hochtechnisierten Bereiche der Erdoberfläche beschränkte Zusatzanforderungen.

Die Beanspruchungen von Innen werden primär durch die Raumlufttemperatur und -feuchtegehalt beeinflusst, wobei diese durch die objektspezifische Nutzung und das Verhalten des Benutzers charakterisiert werden. Insbesondere der Feuchtegehalt der Luft wird durch die Art der Lufterneuerung bestimmt, welche wiederum von der Nutzungsart, Geometrie und Orientierung des Raumes abhängt. WEBER et al. bezeichnet zusätzliche die Beanspruchung „Brand“ als mögliche bauphysikalische Einwirkung von Innen (WEBER, et al., 2003).

In den Tabellen 1 und 2 Tabelle 2 sind die einzelnen bauphysikalischen Einwirkungen von Innen und Aussen und deren Folgen (Schadensarten wie z.B. Schimmelpilz, Wärmedehnung etc.) für die Konstruktion ersichtlich.

Belastung von aussen

Tabelle 1: Belastungen von aussen, deren Ursachen und mögliche Folgen.

Belastungsart	Ursachen	Folgen
Temperaturbelastung	<ul style="list-style-type: none"> - Lufttemperatur - Direktes Sonnenlicht - Reflektiertes Sonnenlicht - Schnee - Hagelschauer - Nächtliche Wärmeabstrahlung - Verdunstungskälte - Luftströmung 	<ul style="list-style-type: none"> - Spannungen durch Wärmedehnung - Tauwasserausfall - Wachstumsbedingung für Schimmelpilz
Feuchtebelastung	<ul style="list-style-type: none"> - Freies Wasser (Regen-, Schmelzwasser) - Luftfeuchte - Kondensat in der Konstruktion 	<ul style="list-style-type: none"> - Quellen und Schwinden (Massgenauigkeit) - Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit - Schimmelpilzbildung - Korrosion und Schädigung durch Säure und Laugen (Saurer Regen) - Sprengwirkung infolge von Volumenzunahme
Lärmbelastung	<ul style="list-style-type: none"> - Aussenlärm (Luftschall) - Innenlärm (Luftschall) - Innenlärm (Trittschall) - Anlagegeräusche (Luft- und Körperschall) - Eigengeräusche, raumintern (Luftschall) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mehrheitlich Komfortprobleme - Langzeitschäden durch Vibration
UV-Belastung	<ul style="list-style-type: none"> - Sonnenlicht 	<ul style="list-style-type: none"> - Zersetzung des Materials (Alterung)
Brand	<ul style="list-style-type: none"> - Feuer - Explosion 	<ul style="list-style-type: none"> - Zersetzung des Materials

Belastung von innen

Tabelle 2: Belastungen von innen, deren Ursachen und mögliche Folgen.

Belastungsart	Ursachen	Folgen
Temperaturbelastung	<ul style="list-style-type: none"> - Lufttemperatur - Luftströmung 	<ul style="list-style-type: none"> - Spannungen durch Wärmedehnung - Tauwasserausfall
Feuchtebelastung	<ul style="list-style-type: none"> - Luftfeuchte - Kondensat in der Konstruktion - Bauteilfeuchte 	<ul style="list-style-type: none"> - Quellen und Schwinden - Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit - Schimmelpilzbildung - Korrosion und Schädigung durch Säure und Laugen
Brand	<ul style="list-style-type: none"> - Feuer - Explosion 	<ul style="list-style-type: none"> - Zersetzung des Materials

2.4 Thermisches Verhalten von Bauteilen

Eine der wichtigsten Aufgaben des Flachdachs ist es, die unter ihm liegenden Aufenthalts-, Arbeits- und Lagerräume vor Erwärmung oder Abkühlung zu schützen. Versucht wird die Raumlufttemperatur in einem bestimmten Bereich zu halten, die von Wetter und Klima, Tages- und Jahreszeit unabhängig ist. Diese Aufgabe wird im Allgemeinen durch den Wärmedurchgangswiderstand R_T des gesamten Bauteils definiert, wobei vor allem die Wärmedämmung den Löwenanteil ausmacht. Dabei wird zwischen dem winterlichen Wärmeschutz, wo sich der Wärmefluss vom Innern des Gebäudes nach Aussen bewegt, und dem sommerlichen Wärmeschutz, bei welchem die Wärme von Aussen nach Innen dringt, unterschieden.

2.4.1 Wärmeentwicklung im Bauteil

Die Wärmebewegung in einem Aussenbauteil eines Gebäudes hängt wesentlich von den Temperatur- und Strahlungswerten inner- und ausserhalb dieser Trennschicht ab. Verändern sich diese Größen über einen längeren Zeitraum hinweg nur geringfügig, spricht man von stationären Bedingungen. Solche Bedingungen können z.B. bei konstant gehaltener Raumlufttemperatur im Gebäudeinnern und längerfristig über Tag und Nacht nur wenig veränderliche Aussenlufttemperatur erreicht werden. Entsprechend stellt sich im Bauteilinnern einen stationären Wärmefluss ein.

In der Praxis sind die Bedingungen zu beiden Seiten des Bauteils jedoch oftmals nicht konstant. Dementsprechend ändert sich z.B. bei typischem Aprilwetter die Sonneneinstrahlung auf die Bauteiloberfläche und demzufolge auch die Oberflächentemperatur ständig. Bei diesen Voraussetzungen spricht man von instationären Bedingungen. Folglich entstehen im Bauteilinnern komplexe instationäre Wärmebewegungen.

Stationäre Wärmebewegung

Bei einer aus mehreren Schichten aufgebauten Bauteilkonstruktion verteilt sich der Temperaturgradient zwischen der Aussenluft- und Raumlufttemperatur anteilmässig entsprechend den Wärmedurchlasswiderständen der einzelnen Schichten und den Übergangswiderständen der ruhenden Luftsicht an den beiden Grenzflächen zur Umgebungsluft. STEIN definiert den stationären Zustand folgendermassen (STEIN, 1997):

„Denkt man sich senkrecht zum Wärmestrom ein Volumenelement herausgeschnitten, so muss die je Zeiteinheit in das Volumenelement eindringende Energiemenge gleich derjenigen sein, die das Volumenelement pro Zeiteinheit wieder verlässt. Das hat zur Folge, dass die Temperatur des Volumenelements zeitlich konstant bleibt.“

Das wärmetechnische Verhalten eines Bauteils wird dann ausreichend genau durch den Wärmedurchlasswiderstand R_i , d.h. durch die Wärmeleitfähigkeit λ_D der Baustoffe gekennzeichnet.

Der Gesamtwiderstand, den der Wärmetransport durch einen mehrschichtigen Aufbau hindurch überwinden muss, ist der Wärmedurchgangswiderstand R_T . Der reziproke Wert des Wärmedurchgangswiderstandes ist der Wärmedurchgangskoeffizient u_D und beschreibt die Wärmedurchlässigkeit des gesamten Bauteils.

Instationäre Wärmebewegung

Unter nicht stationären Bedingungen sind weitere Stoffgrößen neben der Wärmeleitfähigkeit λ_D erforderlich, um den Wärmetransport zu umschreiben.

So werden Kombinationen aus der Wärmeleitfähigkeit λ_D , der Rohdichte ρ_{roh} und der spezifischen Wärmekapazität c für die Berücksichtigung folgender Vorgänge benötigt:

- Auskühlen und Aufheizen von Bauteilen und Räumen
- Raumerwärmung durch Sonneneinstrahlung
- Kurzzeitige Wärmestromvorgänge z.B. beim Berühren von Stoffen
- Ausbreitung von Temperaturwellen im Bauteil bei periodischen Schwankungen der Außenluft- bzw. Außenoberflächentemperatur im Sommer

Die Oberflächen- bzw. Lufttemperaturen verändern sich massgebend aufgrund der von der Oberflächenfarbe beeinflussten Abstrahlung oder Aufheizung, aber auch anlässlich der materialspezifischen Wärmeleitung und der Luftströmung oder Verdunstungskälte. Um diese Temperaturbeanspruchung der Dachabdichtung zu verringern, wird häufig auf Oberflächenschutz, Nutzschichten sowie Dachbegrünungen zurückgegriffen.

Diese thermische Beanspruchung von Bauteilflächen unterteilt PECH et al. in massive und hohe thermische Beanspruchung (PECH, et al., 2011):

- Eine massive thermische Beanspruchung liegt vor, sobald keine hohen Aufheizungen und keine schnellen Temperaturveränderungen zu erwarten sind, z.B. auf Grund eines Oberflächenschutzes durch Bekiesung oder Begrünung.
- Thermisch hoch beansprucht sind Dachabdichtungen, die der Witterungseinwirkung unmittelbar ausgesetzt sind. Dazu zählen u.a. leichte Dachkonstruktionen, die mit Bitumenbahnen ausgeführt werden. Spiegelungen und Reflexionen von angrenzenden Bauteilen wie z.B. Glasfassaden können die Oberflächentemperatur lokal signifikant erhöhen.

2.4.2 Wärmefluss

Der Wärmeaustausch zwischen einem System und seiner Umgebung kann auf unterschiedliche Art erfolgen. In festen Stoffen durch Wärmeleitung, in Gasen und Flüssigkeiten zusätzlich durch Konvektion und bei strahlungsdurchlässigen Stoffen durch Wärmestrahlung. Diese verschiedenen Arten können allein oder kombiniert auftreten.

Wärmeleitung

Die Wärmeübertragung in festen Stoffen erfolgt durch Leitung. Dabei wird die Wärme sowohl durch thermische Gitterschwingungen (Phonen), als auch durch frei bewegliche Elektronen, vom Ort mit dem höheren Energieniveau zum Ort mit dem niedrigeren Energieniveau weitergegeben. Der Wärmeträger bleibt dabei ortsfest. Der unmittelbar zwischen benachbarten Molekülen entstandene Wärmeaustausch ist an eine Temperaturdifferenz gebunden und äußert sich als Wärmestrom ϕ , wie die Abbildung 2.6 zeigt.

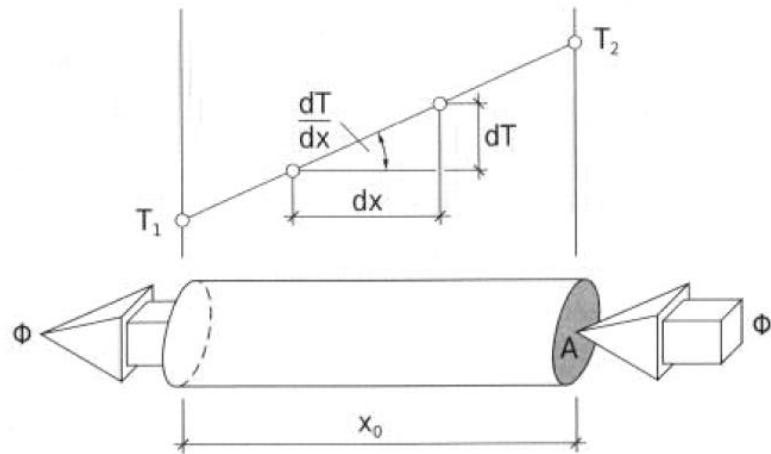


Abbildung 2.6: Temperaturverlauf und Wärmestrom in einem festen Körper bei Wärmeleitung. Quelle: (ZÜRCHER & FRANK, 2010)

Wird dieser Wärmestrom ϕ auf die Flächeneinheit A bezogen, spricht man von einer Wärmestromdichte q , die im stationären Zustand über den ganzen Querschnitt konstant ist (Gleichung 2.1).

$$q = -\lambda \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} q &= \text{Wärmestromdichte in } W/m^2 \\ \lambda_D &= \text{Wärmeleitfähigkeit in } W/(m \cdot K) \\ \frac{d\theta}{dx} &= \text{Temperaturgradient in } K/m \end{aligned}$$

Dabei ist die Wärmeleitfähigkeit λ_D die charakteristische Materialgrösse, die angibt, welche Wärme menge in 1 s zwischen zwei planparallelen Flächen von $1 m^2$ im Abstand von $1 m$ bei einer Temperaturdifferenz von $1 K$ fliesst.

Bei Metallen ist die Wärmeleitfähigkeit, wegen der vorhandenen freien Elektronen, sehr gross. Materialien mit einer hohen elektrischen Leitfähigkeit, wie z.B. Kupfer und Aluminium sind deshalb auch gute Wärmeleiter. Nach dem Gesetz von WIEDEMANN-FRANZ ist bei metallischen Stoffen das Verhältnis der thermischen zur elektrischen Leitfähigkeit nahezu konstant (KUCHLING, 2011). Als Materialkennwert ist die Wärmeleitfähigkeit nur experimentell bestimmbar.

Bei nichtmetallischen Stoffen sind die λ_D -Werte jedoch keine konstante Grösse mehr. Grund dafür sind die physikalischen und chemischen Strukturen der einzelnen Stoffe. Die Zusammensetzung, Rohdichte, Porenstruktur, der Feuchtegehalt und die Temperatur des Materials spielen demnach eine wesentliche Rolle. So ist bei amorphen Stoffen die Wärmeleitfähigkeit kleiner als bei solchen mit einer kristallinen Struktur. Bei anisotropen Stoffen ist die Wärmeleitfähigkeit abhängig von der Richtung des Wärmestroms. Bei Holz zum Beispiel ist ein deutlicher Unterschied zwischen senkrecht und parallel zur Faserrichtung verlaufenden Wärmestrom feststellbar.

Wärmeströmung (Konvektion)

Unterschiedlich zu den festen Stoffen erfolgt bei Gasen und Flüssigkeiten der Wärmetransport durch Bewegungsvorgänge, wobei die Moleküle innerhalb des zur Verfügung stehenden Raumes ihren Energiegehalt mit sich führen. Die molekulare Bewegung innerhalb der Gase oder Flüssigkeiten werden nach ZÜRCHER & FRANK folgendermassen unterschieden (ZÜRCHER & FRANK, 2010):

- **Freie Konvektion:** Strömung durch thermische Auftriebskräfte bei konstantem Druck (Dichteänderung), laminar oder turbulent
- **Erzwungene Konvektion:** Strömung infolge „mechanischer“ Druckdifferenz (z.B. Winddruck), vorwiegend turbulent

Wobei die folgenden Parameter den Wärmetransport massgebend beeinflussen können:

- Temperaturdifferenz Materialoberfläche/Luft $\Delta\theta$
- Anströmgeschwindigkeit der Luft v
- Art der Strömung: laminar/turbulent (Reynolds-Zahl Re)
- Wärmestromrichtung (horizontal, vertikal auf- oder abwärts)
- Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit)
- Mittlere Lufttemperatur θ_a
- Geometrie und Abmessungen des Bauteils (Ecken, Nischen, etc.)

Der Wärmeaustausch zwischen Gas oder Flüssigkeit und der angrenzenden, festen Oberfläche wird als Wärmeübergang bezeichnet. Die Übertragungsvorgänge sind relativ kompliziert und mathematisch nur schwer erfassbar. In Anlehnung an die Wärmeleitung λ lässt sich der konvektive Wärmestrom in erster Näherung über die Gleichung 2.2 linearisieren:

$$q_c = h_c \cdot \Delta\theta = h_c \cdot (\theta_a - \theta_{si}) \quad (2.2)$$

- q_c = konvektive Wärmestromdichte in W/m^2
 h_c = Wärmeübertragungskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$
 $\Delta\theta$ = Temperaturdifferenz in $^\circ C$
 θ_a = Lufttemperatur in $^\circ C$
 θ_{si} = Oberflächentemperatur in $^\circ C$

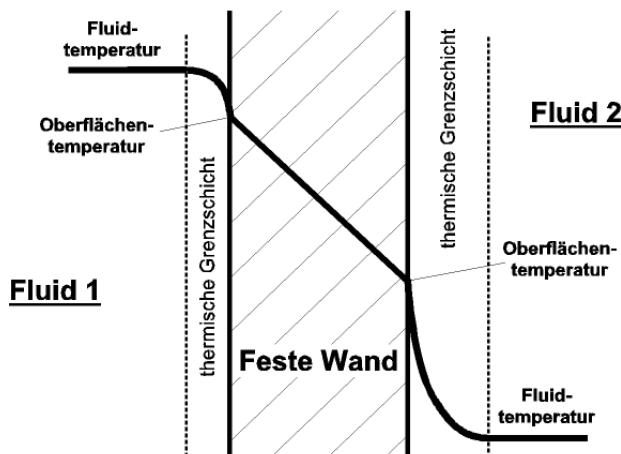


Abbildung 2.7: Temperaturverlauf in einer festen Wand mit beidseitigem, konvektivem Wärmeübergang. In der Wand werden keine Atome bewegt, deshalb liegt dort Wärmeleitung vor. Quelle: de.academic.ru, Stand: 06.02.2014

Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung, oder auch Temperaturstrahlung genannt, ist eine elektromagnetische Strahlung, die ein Körper aufgrund seiner Temperatur aussendet. D.h. die thermische Energie wird ohne physikalischen Körper als Träger übertragen. Sie tritt, im Gegensatz zur Konvektion und Wärmeleitung, auch im Vakuum auf. Dieser Wärmetransport benötigt keine Temperaturdifferenz als treibende Kraft. So strahlt jeder Körper, entsprechend seiner gespeicherten Energie, Wärme aus. Je höher also seine Temperatur, desto grösser die Intensität der Wärmestrahlung und desto weiter verschiebt sich das Emissionsmaximum in den Bereich der kürzeren Wellenlängen, wie auf der Abbildung 2.8 ersichtlich ist.

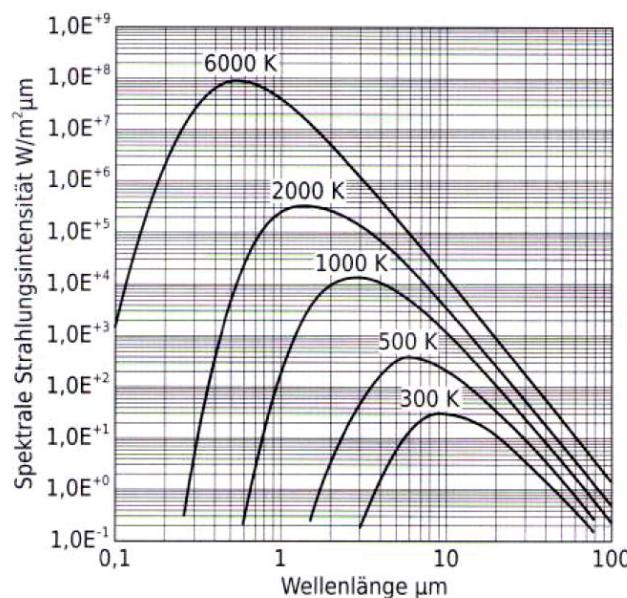


Abbildung 2.8: Strahlungsintensitätsverteilung bei verschiedenen Temperaturen in K. Quelle: (ZÜRCHER & FRANK, 2010)

Die langwellige Strahlung (Wellenlänge $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$) wird als Wärme-(Infrarot-)Strahlung wahrgenommen, die kurzwellige ($0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.8 \mu\text{m}$) als Licht.

Die Intensität des emittierenden Wärmestroms ϕ wird, nebst dem Flächeninhalt des abstrahlenden Körpers und dessen Temperatur, ebenfalls von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst (Gleichung 2.3). Dieser Einfluss wird durch den Emissionsgrad ε charakterisiert, der bei Spiegeln fast null ist und sein Maximum bei mattschwarzen Oberflächen erreicht. Körper mit einem Emissionsgrad $\varepsilon = 1$ werden schwarze Strahler genannt. Liegt der Emissionsgrad unter 1, wird von grauen Strahlern gesprochen.

$$\phi = \varepsilon_G \cdot \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (2.3)$$

ϕ = Wärmestrom in W

ε_G = Emissionsgrad

σ = Stefan – Boltzmann – Konstante: $5.67 \cdot 10^{-8}$ in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

T_s = Oberflächentemperatur in K

A = Flächeninhalt des Strahlers in m^2

Beim Auftreffen von Wärmestrahlung auf einen Körper kann die Strahlung reflektiert, absorbiert oder bei transparenten Stoffen durchgelassen werden. Sind der Ein- und Ausfallswinkel der Strahlung im Vergleich zu den Flächennormalen gleich, spricht man von einer spiegelnden Reflexion. Verteilt

sich die zurückgeworfene Strahlung jedoch gleichmässig über den ganzen Raum, handelt es sich um eine diffuse oder gerichtete Reflexion. In der Regel wird nicht die gesamte auftreffende Strahlung reflektiert, sondern nur ein Bruchteil. Entsprechend wird der reflektierte Bruchteil durch den Reflexionsgrad ρ gekennzeichnet (Gleichung 2.4).

$$\rho = \frac{\text{reflektierte Strahlung}}{\text{auftreffene Strahlung}} \quad (2.4)$$

$\rho = \text{Reflexionsgrad}$

Jener Teil der auftreffenden Strahlung, der vom Körper nicht reflektiert wird, passiert den Körper, falls es sich um ein strahlungsdurchlässiges Material handelt, oder wird ansonsten von ihm absorbiert. Die Absorptionsfähigkeit der Materialfläche wird durch den Absorptionsgrad α ausgedrückt (Gleichung 2.5).

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Strahlung}}{\text{auftreffene Strahlung}} \quad (2.5)$$

$\alpha = \text{Absorptionsgrad}$

Der Anteil an durchgelassener Strahlung wird als Transmissionsgrad τ bezeichnet (Gleichung 2.6).

$$\tau = \frac{\text{durchgelassene Strahlung}}{\text{auftreffene Strahlung}} \quad (2.6)$$

$\tau = \text{Transmissionsgrad}$

Diese drei Größen stehen in folgender Beziehung zueinander (Gleichung 2.7).

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.7)$$

- ρ = Reflexionsgrad
- α = Absorptionsgrad
- τ = Transmissionsgrad

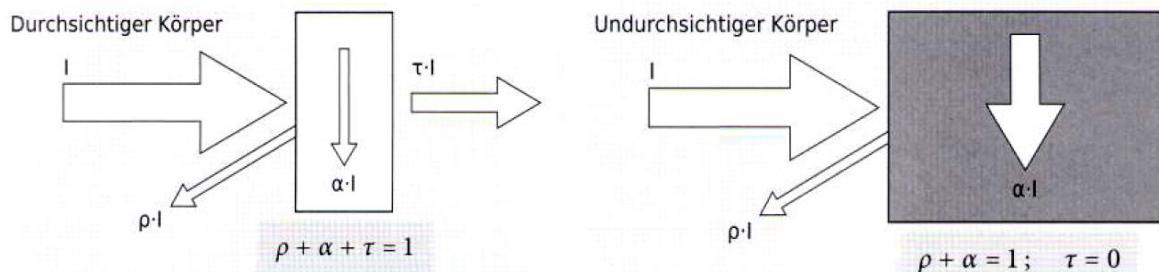


Abbildung 2.9: Wechselwirkung Strahlung-Materie. Ist der Körper undurchsichtig kann keine Strahlung den Körper passieren und der Transmissionsgrad ist demnach gleich null. Quelle: (ZÜRCHER & FRANK, 2010)

Das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz besagt, dass für alle Körper der Emissionsgrad ε_G bei jeder Temperatur T und für jede Wellenlänge λ gleich dem Absorptionsgrad α ist (Gleichung 2.8).

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \quad (2.8)$$

- ε_G = Reflexionsgrad des nicht schwarzen Körpers
- α = Absorptionsgrad
- λ = Wellenlänge der Strahlung in m
- T = Temperatur in K

Strahlungsaustausch zwischen zwei Oberflächen

In der Praxis emittieren sowohl die wärmeren, als auch die kälteren Körper Strahlungsenergie. D.h. es sind immer mehrere Oberflächen unterschiedlicher Temperaturen am gegenseitigen Wärmeaustausch beteiligt. Der Wärmeaustausch ist demnach die Differenz der von den Flächen jeweils absorbierten Strahlungsanteile.

Vereinfacht kann der Strahlungsaustausch zweier Oberflächen mit der Gleichung 2.9 beschrieben werden.

$$q_{1,2} = F_{1,2} \cdot \sigma \cdot (T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \quad (2.9)$$

- $q_{1,2}$ = Wärmestromdichte zwischen zwei Körper in W/m^2
- $F_{1,2}$ = Form-/Oberflächenfaktor
- σ = Stefan – Boltzmann – Konstante: $5.67 \cdot 10^{-8}$ in $W/(m^2 \cdot K^4)$
- $T_{s1,s2}$ = Oberflächentemperatur in K

Neben den Temperaturen und Strahlungseigenschaften der Oberflächen bestimmt also auch deren Geometrie und gegenseitige Lage den Wärmeaustausch (Form-/Oberflächenfaktor).

Gemäss dem Stefan-Boltzmann'sche Gesetz strahlt eine Gebäudeoberfläche proportional zur vierten Potenz ihrer Oberflächentemperatur T_s Energie ab (KUCHLING, 2011). Aufgrund dieser Gesetzmässigkeit kann sich in einer klaren Winternacht bei Flachdächern eine Abkühlung von mehreren Graden unter der Lufttemperatur einstellen.

2.4.3 Einfluss der Wärme

Temperaturbelastung

Die grösste Auswirkung einer Temperaturschwankung ist die Veränderung der Dachfläche, die durch thermisch bedingte Wärmedehnung hervorgerufen wird. Derartige Wärmedehnungen entstehen durch Jahres- oder Tag-Nacht-Zyklus, aber auch durch tageszeitliche Temperaturschwankungen, wie z.B. nach einem Gewitter oder Hagelschauer. Vor allem im Bereich der Wärmedämmung entstehen durch unterschiedliches Ausdehnen der einzelnen Dachschichten grosse Spannungen. So können die Längenänderungen von verschiedenen, miteinander verbundenen oder verklebten Materialien zu schädlichen Verformungen von Baustoffen oder Bauteilen und in extremen Fällen zu Leckagen in der Gebäudehülle führen. Das Ausmass dieses Effekts ist einerseits vom Ausdehnungskoeffizienten α_a des Baustoffes, aber auch von der Intensität der wärmenden Sonnenstrahlung, bzw. von der kühlenden Wirkung der Wärmeabstrahlung in der Nacht abhängig.

Nebst der Wärmedehnung hat die Temperaturschwankung der Aussen- und Innenluft ebenfalls einen indirekten Einfluss auf den Tauwasserausfall in der Baukonstruktion und an den Innenoberflächen. Sie ist ein bestimmender Faktor für die Höhe der Oberflächentemperaturen. So wird jene Oberflächentemperatur des Innenraums massgebend durch den direkten Kontakt mit der Innenluft, aber auch indirekt über die kühlende Wirkung der Aussenluft durch die Konstruktion hindurch, reguliert. Die Neigung zur Kondensation wird gemäss physikalischen Gesetzen folglich umso grösser, je tiefer die Oberflächentemperatur und je höher die relative Raumluftfeuchte ist. Ist im Raum zusätzlich die Nährstoffgrundlage von Schimmelpilzen, wie z.B. normalen Hausstaub und Aerosole, mit Kondenswasser und passender Lufttemperatur gegeben, muss mit bauschädigendem Schimmelpilzwachstum gerechnet werden.

2.5 Hygrisches Verhalten von Bauteilen

Das Flachdach ist ein Bauteil mit hohen technischen Anforderungen. Der sich einstellende Feuchtegehalt des verwendeten Materials ist dementsprechend eine wichtige Voraussetzung. Eine normgerechte Materialfeuchte erzielt die geforderte Gebrauchstauglichkeit, z.B. für Verbindungen, aber auch die Gewährleistung einer funktionierenden Wärmedämmung und keine Dauerhaftigkeitseinbussen durch Schimmelpilze. Übermässige und langanhaltende Feuchteinwirkungen in der Konstruktion entstehen durch Witterungseinflüsse während der Montage, aber auch durch die anfängliche Einbaufeuchtigkeit und durch die Nutzung. Solchen externen Feuchtelasten können durch den Einbau von trockenem Holz (Konstruktionsvollholz: $u=15 \pm 3\%$), dem Schutz vor Feuchteinwirkung auf die Holzkonstruktion während der Einbauphase und einer fachgerechten Konstruktionsweise entgegengewirkt werden (SCHMIDT & WINTER, 2008).

Die Anforderungen an den Feuchtegehalt von Holz und Holzwerkstoffen in Bauteilen sind in den folgenden Normen festgelegt:

- SIA 180 Holzbau, Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau (SIA 180, 1999)
- SIA 265 Holzbau (SIA 265, 2003)
- SIA 265/1 Holzbau, Ergänzende Festlegungen (SIA 265/1, 2003)
- DIN 4108-3, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 3 (DIN 4108-3, 2012)
- DIN 4108-7, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 7 (DIN 4108-7, 2009)
- DIN EN 15 026, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen (DIN EN 15 026, 2007)

Neben der Dauerhaftigkeit des Bauteils gegenüber der Feuchteinwirkung, wirkt das Bauwerk selbst für dessen Besitzer und Nutzer als schützendes Bauteil vor von aussen eindringender Feuchte in jeglichem Aggregatzustand. Somit kann einen Nutzungskomfort der Räume, der ein relativ eng definiertes Raumklima verlangt, gewährleistet werden. Normativ wird diese Behaglichkeit in Innenräumen in der SIA 180 geregelt (SIA 180, 1999).

2.5.1 Feuchteentwicklung im Bauteil

Feuchtespeicherung in Luft

Luft kann nur eine begrenzte Menge Wasser in Form von Wasserdampf aufnehmen. Die Grenze, bei der die Feuchtigkeit in der Luft als Wasser kondensiert, wird als Wasserdampfsättigungspunkt bezeichnet und ist von der Temperatur abhängig. Je höher die Lufttemperatur, desto mehr Feuchtigkeit kann sie aufnehmen. Ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt, bilden sich kleine Tröpfchen, welche als Nebel oder Wolke in Erscheinung treten.

Das Verhältnis der vorhandenen Wasserdampfkonzentration v zur maximalen löslichen Konzentration v_{sat} der betreffenden Temperatur, wird als die relative Luftfeuchte φ beschrieben (Gleichung 2.10).

$$\varphi = \frac{v}{v_{sat}} \cdot 100 \quad (2.10)$$

φ = relative Luftfeuchte in %

v = absolute Luftfeuchte in kg/m^3

v_{sat} = maximale absolute Luftfeuchte in kg/m^3

In Analogie zur relativen Luftfeuchte bezeichnet man die Wasserdampfkonzentration in der Luft als absolute Luftfeuchte (Gleichung 2.11).

$$v = \frac{m_{Luft}}{V_{Luft}} \quad (2.11)$$

v = absolute Luftfeuchte in kg/m^3

m_{Luft} = Masse des Wasserdampfes in kg

V_{Luft} = Gesamtvolumen der Luft m^3

Das Carrier-Diagramm auf der Abbildung 2.10 stellt den Wasserdampfgehalt der Luft v in Abhängigkeit der Temperatur und der relativen Luftfeuchte dar.

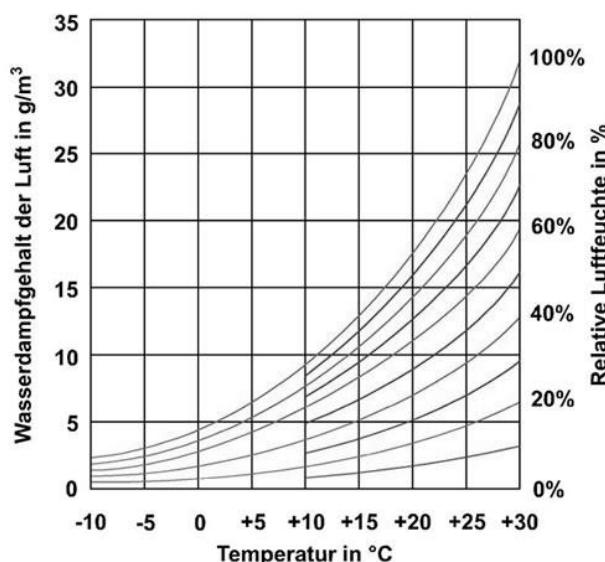


Abbildung 2.10: Das Carrier-Diagramm. Die mit $\varphi = 100\%$ bezeichnete Kurve stellt die Sättigungsfeuchte dar.
Quelle: www.ifbs.de, Stand: 06.02.2014

In der Bauphysik ist es üblich die Wasserdampfmenge in der Luft nicht als Konzentration (relative Luftfeuchte), sondern als Partialdruck anzugeben. Der Wasserdampfpartialdruck p ist jener Druck den man dem Wasserdampf, entsprechend seinem Anteil am Gasgemisch Luft, zuteilen müsste, damit zusammen mit den übrigen Gasbestandteilen der Luft (Stickstoff, Sauerstoff, Edelgasen, Kohlendioxid), die ebenfalls einen ihrer Menge entsprechenden Partialdruck zugeteilt bekommen, ein Gesamtdruck von etwa einem bar vorliegt. Der Gesamtdruck von 1 bar ist für das Luftgemisch auf der Erdoberfläche kennzeichnend. Mittels der idealen Gasgleichung 2.12 kann die Beziehung zwischen dem Wasserdampfpartialdruck p und der Wasserdampfkonzentration v beschrieben werden.

$$p = v \cdot R \cdot T \quad (2.12)$$

p = Wasserdampfpartialdruck in Pa

R = spez. Gaskonstante Wasserdampf: 461.5 in $J/(kg \cdot K)$

v = absolute Luftfeuchte in kg/m^3

T = absolute Temperatur in K

Der Wasserdampfkonzentration v , also dem absoluten Feuchtegehalt in der Luft, entspricht der Wasserdampfpartialdruck p . Die maximale Wasserdampfkonzentration v_{sat} , auch Wasserdampfsättigungsmenge oder Sättigungsfeuchte genannt, entspricht also dem maximalen Wasserdampfdruck p_{sat} oder Wasserdampfsättigungsdruck.

Analog zur relativen Sättigungsfeuchte ($\varphi = 100\%$) zeigen auch die Wasserdampfsättigungsmenge und der Wasserdampfsättigungsdruck p_{sat} eine starke Temperaturabhängigkeit, wobei wiederum warme Luft mehr Wasser aufnehmen kann als kalte (Abbildung 2.11). Aufgrund dieser Temperaturabhängigkeit kann der Wasserdampfsättigungsdruck p_{sat} jeweils mittels der Gleichung 2.13 oder 2.14 berechnet werden.

$$p_{sat} = 4.688 \cdot \left(1.486 + \frac{\theta}{100} \right)^{12.3} \quad \text{für } \theta \leq 0 \text{ C}^\circ \quad (2.13)$$

oder

$$p_{sat} = 288.58 \cdot \left(1.098 + \frac{\theta}{100} \right)^{8.02} \quad \text{für } \theta > 0 \text{ C}^\circ \quad (2.14)$$

p_{sat} = Wasserdampfsättigungsdruck in Pa

θ = Temperatur in $^\circ C$

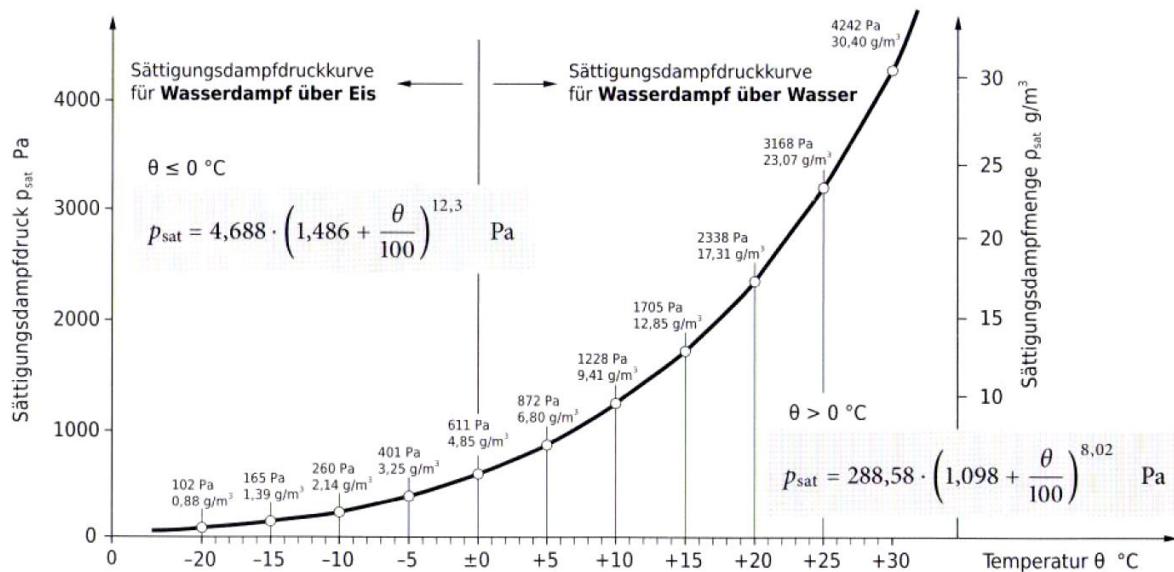


Abbildung 2.11: Verlauf des Sättigungsdampfdruckes p_{sat} bzw. -gehaltes als Funktion der Temperatur. Quelle: (ZÜRCHER & FRANK, 2010)

In der Realität verändert sich im Laufe eines Tages die relative Luftfeuchte von einem Maximalwert am frühen Morgen, kurz vor dem Sonnenaufgang bei der tiefsten Temperatur, zu einem Maximalwert am frühen Nachmittag, bei dem die höchste Tagstemperatur erreicht wird. Erstaunlicherweise verändert sich die absolute Luftfeuchte dabei nur gering, was darauf hinweist, dass die relative Luftfeuchte der Außenluft im Tagesrhythmus in erster Linie durch die Temperatur gesteuert wird.

Die jahreszeitliche Veränderung der relativen Luftfeuchte und Temperatur der Außenluft kann in zwei Phasen aufgeteilt werden. In der ersten Phase zwischen Januar und Juni (erste Jahreshälfte), nehmen die relative Luftfeuchte und Temperatur mit dem Verlauf der Zeit stetig zu (Aufheizphase) und liegen im Vergleich zur zweiten Jahreshälfte (Juli bis Dezember) allgemein tiefer. In der zweiten Jahreshälfte, der sogenannten Abkühlungsphase, nehmen demzufolge die relative Luftfeuchte und Temperatur mit Verlauf des restlichen Jahres beständig ab. Dieses variant verzögerte Einstellen der Ausgangsgrößen, von der relativen Luftfeuchte und Temperatur im Vergleich zu dessen Eingangsgrößen, wird Hysterese genannt und tritt bei vielen natürlichen und technischen Vorgängen, wie z.B. auch bei der sich einstellenden Gleichgewichtsfeuchte von Holz auf.

Tabelle 3: Typische Werte der relativen Luftfeuchte und Temperatur in Räumen und im Freien. Mittelwerte für Zürich berechnet aus Datensätze von MeteoSchweiz (EDI, 2005).

Bedingungen	Temperatur θ	Rel. Luftfeuchte φ
	[°C]	[%]
Aussenluft		
Mittelwert für Zürich im Winterhalbjahr	ca. 5.75	ca. 83.2
Mittelwert für Zürich im Sommerhalbjahr	ca. 15	ca. 74
Wohn- und Arbeitszimmer		
im Winterhalbjahr	20	30 bis 55
im Sommerhalbjahr	20	50 bis 70
Badezimmer	24	50 bis 100
Nebenräume, Treppenhäuser	10 bis 15	50 bis 70
Kühl- und Lagerräume für Lebensmittel	4 bis 10	75 bis 100
Werkstätte, Betriebe	18	40 bis 50

Wird Luft so schnell abgekühlt, dass sie dabei keinen Wasserdampf abgeben kann, steigt die relative Luftfeuchte an. Die Wasserdampfmenge bleibt also erhalten und die Sättigungsdampfmenge nimmt zu. Erreicht die Wasserdampfmenge die maximale Sättigungsdampfmenge, dann bezeichnet man die Luft als wasserdampfgesättigt ($\varphi=100\%$) und die entsprechende Grenztemperatur als Taupunkt-temperatur. Bei weiterer Abkühlung fällt notwendigerweise Wasserdampf in Form von Nebel oder Tau aus.

Die beiden Diagramme, das Carrier-Diagramm (Abbildung 2.10) und das h,x-Diagramm von Mollier (Abbildung 2.12), beschreiben die Zustandsgrößen feuchter Luft umfassend und erlauben eine übersichtliche Darstellung von Zustandsänderungen.

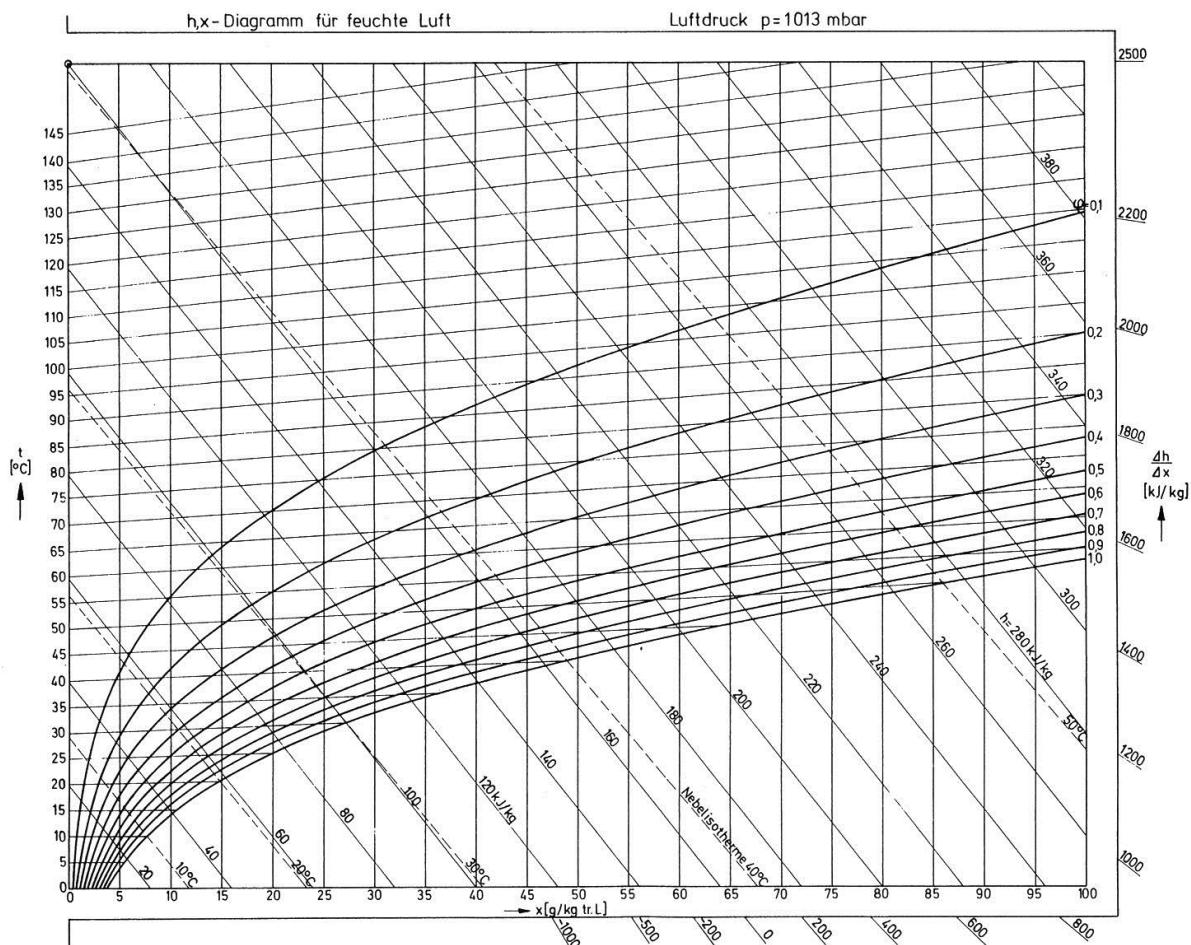


Abbildung 2.12: Das h,x-Diagramm von Mollier beschreibt die verschiedenen Zustandsgrößen von feuchter Luft. Quelle: www.picstopin.com, Stand: 06.02.2014

2.5.2 Einfluss der Feuchte

Aussenbauteile wie das Flachdach müssen einerseits vor Durchnässung von aussen und andererseits vor Feuchtigkeit aus dem Innern geschützt werden. Der Schutz gilt Kondenswasser, Bauteilfeuchte oder auch einer nutzungsbedingten Feuchtigkeit. Ohne diesen Feuchteschutz könnten zu hohe Feuchtelasten zu übermäßig hohen Wassergehalten in Baustoffen führen, die verschiedenste Folgen nach sich ziehen. HÄUPL beschreibt diese mögliche Folgen hoher Wassergehalte wie folgt (HÄUPL, 2008):

Quellung

Bei der Quellung von Baustoffen, infolge erhöhten Wassergehaltes, erfährt dieser eine Volumenzunahme, die mit weiteren Folgen verbunden sein kann. Diese sind oft schwerwiegender als die primäre Volumenzunahme. Beispielweise können Risse und Verformungen auftreten, die Festigkeit und der Elastizitätsmodul abnehmen und die Kriechverformungen forcieren werden. Chemische und die mechanische Dauerhaftigkeit des Baumaterials werden im gequollenen Zustand stark reduziert. Die Volumenänderung eines Baustoffs kann sogar Verklebungen bis zur kompletten Delaminierung föhren. Die Einwirkung von flüssigem Wasser kann Inhaltsstoffe aus dem gequollenen Baustoff herauslösen, was mehrheitlich aber nur aus optischen Gründen störend ist.

Biologisch bedingter Materialzerfall

Der biologisch bedingte Materialzerfall, der von Bakterien, Pilzen, Kleinlebewesen, Insekten oder deren Larven vorangetrieben wird, tritt nur bei genügend hohen Wassergehalten und nur bei solchen Stoffen auf, welche als Nahrungsmittel oder Lebensraum für die genannten Organismen dienen. Bei Holz sind es vor allem Pilze und Insekten, welche die Festigkeit von Bauteilen reduzieren können. Das Vorliegen eines biologischen Befalls auf einer Bauteilloberfläche kann deren Zerfall fördern, indem durch den Fruchtkörper Wasser gespeichert und die Wasserdampfdiffusion behindert wird. Zudem ist der biologische Bewuchs aus hygienischen Gründen bedenklich, da die Mikroorganismen schädliche Geruchstoffe und Keime an die Luft abgeben.

Chemisch-physikalisch bedingter Materialzerfall

Wasser ist ein gutes Lösemittel für viele Stoffe, wobei die Löslichkeit, sowie die Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur zunehmen. Mit steigender Temperatur und Feuchte erhöht sich auch die Geschwindigkeit des chemisch-physikalischen Materialzerfalls. Bei wiederkehrender langfristigen Wasserbelastungen kann es zu einem deutlichen Abtransport von Stoffmengen kommen. Dabei ist der Stoffverlust bei mineralischen Baustoffen in der Regel bei einem tiefen pH-Wert des Wassers wesentlich grösser. Ein Beispiel dafür ist die Aufrauhung glattgeschalter Sichtbetonoberflächen durch sauren Regen im Laufe der Jahre.

Korrosion

Schon ab einer relativen Luftfeuchte von 65% können metallische Oberflächen zu korrodieren beginnen. In Kontakt mit Holz oder Bitumen kann diese Korrosion sogar beschleunigt werden, da die Abbauprodukte dieser organischen Baustoffe einen sauren Charakter aufweisen.

2.6 Berechnungsmöglichkeiten des Wärme- und Feuchtetransports in Bauelementen

Wie im Abschnitt 2.5 beschrieben, resultiert aufgrund der Wasserdampfdiffusion im Innern eines Bauteils ein Dampfdruck, der vom momentan vorliegenden Feuchte- und Temperaturgradienten geregelt wird. Überschreitet der sich einstellende Wasserdampfdruck p an irgendeinem Punkt in der Konstruktion den entsprechenden Wasserdampfsättigungsdruck p_{sat} , kondensiert Wasser aus.

Fällt im Laufe eines Jahres mehr Kondenswasser in der Konstruktion aus als in der Austrocknungsperiode verdunsten kann, muss mit Schädigungen an den Baumaterialien gerechnet werden.

Für die Berechnung dieser Dampfdiffusion, als treibende Kraft für den Feuchtetransport, durch inhomogene Gebäudeelemente, wurden diverse Nachweisverfahren entwickelt. Diese beschreiben die physikalischen Prozesse entsprechend den material-, nutzungs- und standortspezifischen Randbedingungen.

In der SIA Dokumentation D 018 wird das vereinfachte Nachweisverfahren „Pascaltage“ vorgestellt (SIA Dok. D 018, 2008). Dieses Verfahren wurde speziell für inhomogene Konstruktionen mit vernachlässigbarem thermischem Widerstand kaltseitig der örtlich klar definierbaren Kondensationsebene entwickelt. Sind diese vereinfachenden Randbedingungen nicht erfüllt, muss auf andere Nachweisverfahren, wie dem stationären Verfahren nach Glaser oder den in den letzten Jahren neu entwickelten instationären Rechenverfahren „WUFI®“ oder „Delphin“ zurückgegriffen werden.

2.6.1 Stationäre hygrothermische Bauteilberechnung - Glaser-Verfahren

Beim Glaserverfahren handelt es sich um ein halbgrafisches stationäres Bewertungsverfahren, bei dem, im Gegensatz zum Verfahren „Pascaltage“, die Kondensationsebene nicht im Vorhinein klar bezeichnet sein muss oder deren Feuchtedaten nicht als „Pascaltage“ aufbereitet sind. So hat es sich zur Zeit, als computergestützte Analysen noch nicht in dem heute üblichen Umfang möglich waren, für die Beurteilung des Risikos einer übermässigen Durchfeuchtung, infolge Wasserdampfkondensation im Innern mehrschichtiger Bauteile, in den mitteleuropäischen Regionen bewährt.

Die Durchführung des Verfahrens gemäss DIN 4108-3 kann anhand den folgenden drei Schritte beschrieben werden (DIN 4108-3, 2012):

a. Tabellarische Berechnung

Mit Hilfe der tabellarischen Darstellung können die einzelnen Schichten des zu berechnenden Bauteils, einschliesslich der beiden Luftgrenzschichten, mit den untenstehenden Parametern und Materialeigenschaften übersichtlich dargestellt werden.

- Dicken d
- Diffusionswiderstandszahlen μ
- äquivalente Luftschichtdicken s_d
- Wärmeleitfähigkeiten λ_D
- Wärmedurchgangswiderstände R_T der beiden Grenzschichten
- Wärmedurchlasswiderstände R der Bauteilschichten

Aus dem Wärmedurchgangswiderstand R_T des Bauteils, der Gesamttemperaturdifferenz $\Delta\theta$ zwischen dem Innen- und Aussenklima und dem Übergangs- bzw. Durchlasswiderstand R der betreffenden Schicht, lässt sich die in allen Bauteilschichten und thermischen Grenzschichten auftretende Temperaturdifferenz berechnen.

Somit ergibt sich das Temperaturprofil aus den an den Schichtgrenzen auftretenden Temperaturen und die Möglichkeit die entsprechenden Wasserdampfsättigungsdrücke p_{sat} zu bestimmen.

Dieser sowie der folgende Rechenschritt werden jeweils für die in der DIN 4108-3 aufgeführten Tau- und Verdunstungsperiode inklusive den zugehörigen Randbedingungen durchgeführt (DIN 4108-3, 2012).

b. Erstellung des Glaser-Diagramms

Der Kernpunkt des Glaser-Verfahrens ist die lineare Darstellung des durch den Bauteilquerschnitt verlaufenden Wasserdampfsättigungsdrucks p_{sat} aus den im Schritt a tabellarisch aufgeführten Schichtkennwerten. Diese Darstellung erfolgt anhand des Glaser-Diagramms (Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14), bei dem die y-Achsenwerte dem Wasserdampfpartial-, sowie dem Wasserdampfsättigungsdruck p_{sat} zugeordnet sind und die x-Achsenwerte die äquivalenten Luftschichtdicken der Bauteilschichten repräsentieren.

Im selben Diagramm werden zusätzlich noch die beiden Wasserdampfpartialdrücke p_e/p_i an den Bauteiloberflächen eingetragen und linear miteinander verbunden.

Ergibt sich nun eine lineare Verbindung, die den vorhin gezogenen Wasserdampfsättigungs-polygonzug an keiner Stelle schneidet oder berührt, so ist im ganzen Querschnitt mit keinem schädigenden Tauwasserausfall zu rechnen (Abbildung 2.13). Wird die linear gespannte Verbindung jedoch durch den Verlauf des Wasserdampfsättigungsdrucks p_{sat} unterbrochen, bzw. gestört, deutet der entstandenen Knickpunkt auf kondensiertes Wasser hin (Abbildung 2.14).

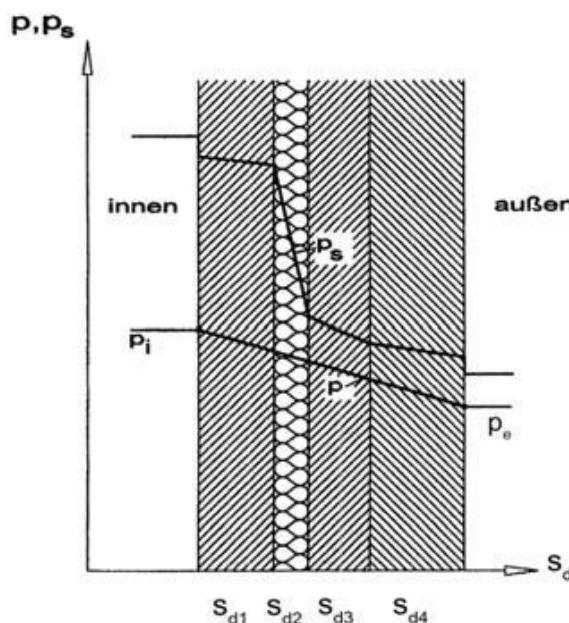


Abbildung 2.13: Glaserdiagramm für die Darstellung des Dampfdruckverlaufes während der Tauperiode. Quelle: (FISCHER, et al., 2008)

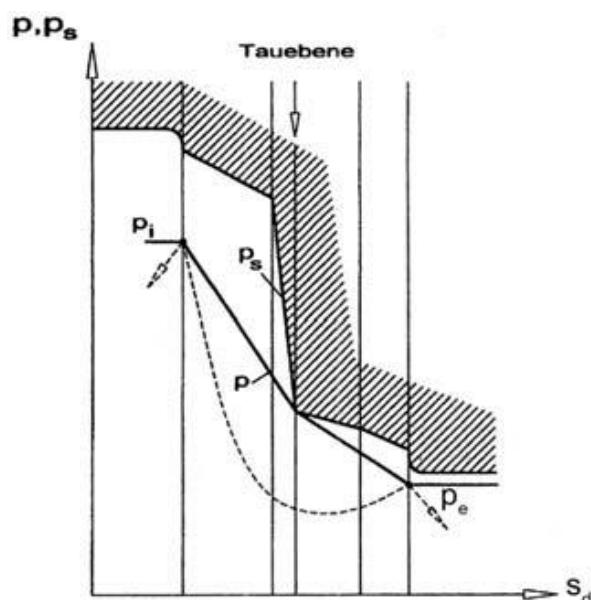


Abbildung 2.14: Der punktuelle Knick des Polygonzugs zeigt den Bereich an, wo Tauwasser ausfällt. Quelle: (FISCHER, et al., 2008)

c. Berechnung der Tauwasser- und Verdunstungswassermasse

Im dritten Schritt des Glaser-Verfahrens wird die Diffusionsstromdichte g , sowie die Tauwassermasse $m_{w,T}$ nach der DIN 4108-3 für eine Tauperiode von 60 Tagen ermittelt (DIN 4108-3, 2012). Fällt nun in dieser Zeit Tauwasser aus, muss die Verdunstungsmenge mittels eines zweiten Glaserdiagramms für die Verdunstungsperiode im Sommer bestimmt und mit der Tauwassermasse verglichen werden. An dieser Stelle gelten für die Berechnung der Verdunstungsmenge die normierten Randbedingungen für die Verdunstungsperiode.

In der Norm DIN EN ISO 13 788 steht geschrieben, dass für jeden einzelnen Monat des Jahres eine Berechnung der Tauwasserbildung und Verdunstung im Bauteilinnern mittels den entsprechenden monatlichen Durchschnittstemperaturen durchgeführt werden muss (DIN EN ISO 13 788, 2013). Die akkumulierte Menge der Tauwasserbildung am Ende der Taumonate kann dann mit dem Gesamtwert der Verdunstung der verbleibenden Monate des Jahres verglichen werden.

Der massgebendste Nachteil des Glaser-Verfahrens ist, dass ausschliesslich die gasförmige Wasserdampfwanderung (Dampfdiffusion) berechnet wird. Probleme mit anderen Feuchteeinwirkungen, wie z.B. die Befeuchtung und Trocknung durch den Transport von flüssigem Wasser oder dem Dampftransport per Luftströmung (Dampfkonvektion), bei der weitaus grössere Wassermengen anfallen können als bei der Wasserdampfdiffusion, werden hierbei nicht berücksichtigt. ZÜRCHER & FRANK weist so auf folgende vereinfachende Annahmen hin (ZÜRCHER & FRANK, 2010):

- Rechnung nur für stationäre Zustände, d.h. thermisch-hygrisches Gleichgewicht, keine Speichereffekte
- Vernachlässigung anderer Transportmechanismen wie kapillarer Wassertransport usw.
- Vernachlässigung von Wärmeein- und Wärmeabstrahlungsvorgängen (u.a. Sonne)
- Vernachlässigung der Dampfübertragungsphänomene an den Grenzflächen Bauteil-Luft
- Feuchteunabhängige Transportkoeffizienten

Zusätzlich sei noch die fehlende Berücksichtigung der Baufeuchte erwähnt, die beim heutigen Termindruck auf den Baustellen eine zunehmende Brisanz erfährt.

All diese mittlerweile bekannten Einflüsse verlangen aus heutiger Sicht einen Wechsel von den einfachen, stationären Bewertungsverfahren nach Glaser, zu realitätsnahen Simulationen mittels Computerprogrammen, wie WUFI® des Fraunhofer Instituts für Bauphysik oder Delphin® der technischen Universität Dresden.

2.6.2 Instationäre hygrothermische Bauteilberechnung - Simulationsverfahren mit WUFI®

Die Simulationssoftware WUFI® („Wärme und Feuchte instationär“) wurde in den letzten Jahren speziell für instationäre hygrothermische Bauteilbeurteilung vom Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelt. Diesem computergesteuerten Programm liegt ein Modell zugrunde, welches die zeitlich veränderlichen Wärme- und Feuchtetransportprozesse in Bauteilen mit Hilfe zweier gekoppelten Differentialgleichungen beschreibt.

Die erste Gleichung setzt sich aus der Wärmekapazität des Baustoffes und des darin enthaltenen Wassers einerseits und den entsprechenden Wärmetransporttermen andererseits zusammen. Der Wärmetransport basiert auf der feuchteabhängigen Wärmeleitung und dem Dampfenthalpiestrom, der häufig auch als Latentwärmeeffekt bezeichnet wird. Der Latentwärmeeffekt bezeichnet den Wärmetransport, indem Wasser an einer Stelle verdunstet und dabei dieser Stelle Wärme entzieht, anschliessend an eine andere Stelle diffundiert, dort kondensiert und dadurch Wärme zuführt.

Die zweite Gleichung, jene der Feuchtespeicherung, wird durch die Ableitung der Feuchtespeicherfunktion auf der einen Seite und dem Feuchtetransport durch Oberflächendiffusion, Kapillarleitung und Dampfdiffusion infolge eines Gradienten der relativen Luftfeuchte auf der anderen Seite beschrieben. Dabei hängt die Dampfdiffusion stark vom Temperaturfeld ab, da der Sättigungsdampfdruck gemäss der Gesetzmässigkeit Abbildung 2.11 exponentiell mit der Temperatur ansteigt. Mit Hilfe eines impliziten Finite-Volumen-Verfahrens nach PATANKAR werden die beiden Differentialgleichungen diskretisiert und entsprechend dem folgenden Ablaufschema (Abbildung 2.15) iterativ gelöst (PATANKAR, 1980).

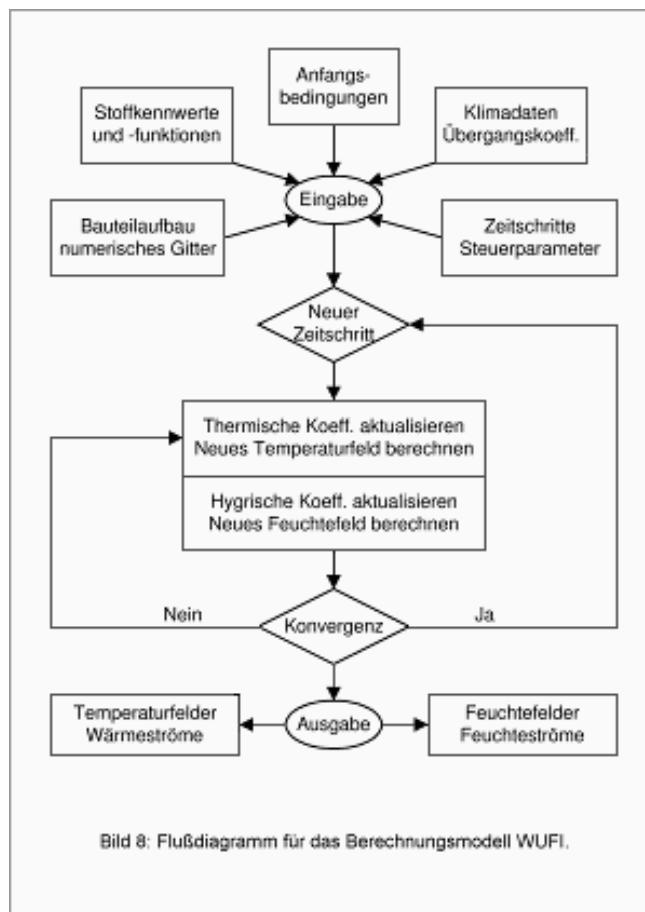


Abbildung 2.15: Ablaufschema des Berechnungsverfahrens von WUFI® (KÜNZEL, 1994)

2.7 Testobjekt – Erfassung der bauphysikalischen Daten im Flachdachelement

Beim Testobjekt handelt es sich um das auf der Abbildung 2.16 rotmarkierte Gebäude eines Mitarbeiters der Pius Schuler AG. Das Gebäude wurde als eines von insgesamt drei Zweifamilienhäusern der neuerrichteten Überbauung Grosssteinmatte in Ibach bei Schwyz im Jahre 2011 gebaut. Dabei wurde während der Errichtung ein Netz an Messsensoren in die Flachdachkonstruktion installiert. Der untersuchte Bereich des Flachdachs im Hohlkastensystem befindet sich beim Anschluss an die Brandschutzmauer und erstreckt sich von der Mitte des Gebäudes zur südwestlichen Außenwand hin und ist auf der Abbildung 2.17 rot gekennzeichnet.

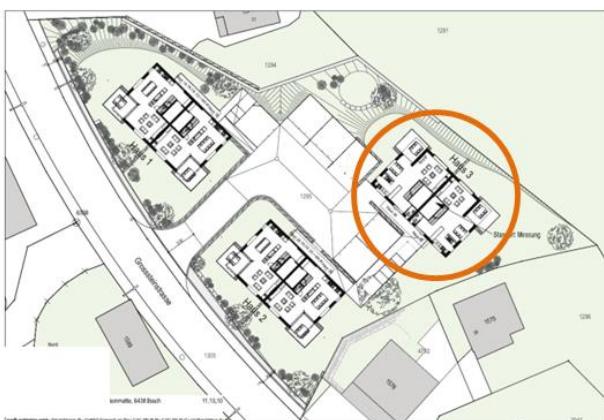


Abbildung 2.16: Lageplan der Überbauung Grosssteinmatte in Ibach. Standort des Gebäudes zur Untersuchung des Wärme- und Feuchttetransports an Flachdachelementen ist rot eingekreist.

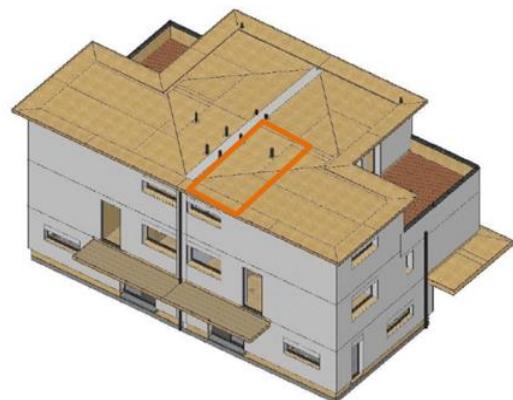


Abbildung 2.17: 3D-Animation des Doppeleinfamilienhauses. Im rot markierten Bereich werden die Messungen zum Wärme- und Feuchttetransport am Flachdach durchgeführt.

Unterhalb des Messbereichs liegen der Technik- und Waschraum. Im Bereich des Technikraums ist das Hohlkastenelement im grünen Gebiet mit Dämmstoff auf Holzfaserbasis (PAVAFLEX) der Firma PAVATEX® gedämmt (Abbildung 2.17). Der restliche Teil des Hohlkastensystems ist zum Vergleich mit mineralischem Dämmmaterial isoliert.

Insgesamt wurden zwei Messlinien mit identischer Sensorik eingebaut, um eine gegenseitige Kontrolle zu ermöglichen und zusätzlich bei Ausfall eines Sensors als Ersatz zu fungieren. Es wird jeweils an drei Stellen gemessen. Die Messstelle mit der Bezeichnung W (Weichfaserdämmung) liegt im Bereich der Dämmung auf Holzfaserbasis. Die Messstelle Mi (Mineraldämmung Innen) liegt im inneren Bereich der Dämmung aus Mineralwolle, bzw. die Messstelle Ma (Mineraldämmung Außen) in der Nähe des Übergangs vom Flachdachelement zum Wandelement. Somit ergeben sich sechs Messachsen, wie auf der Abbildung 2.18 ersichtlich ist.

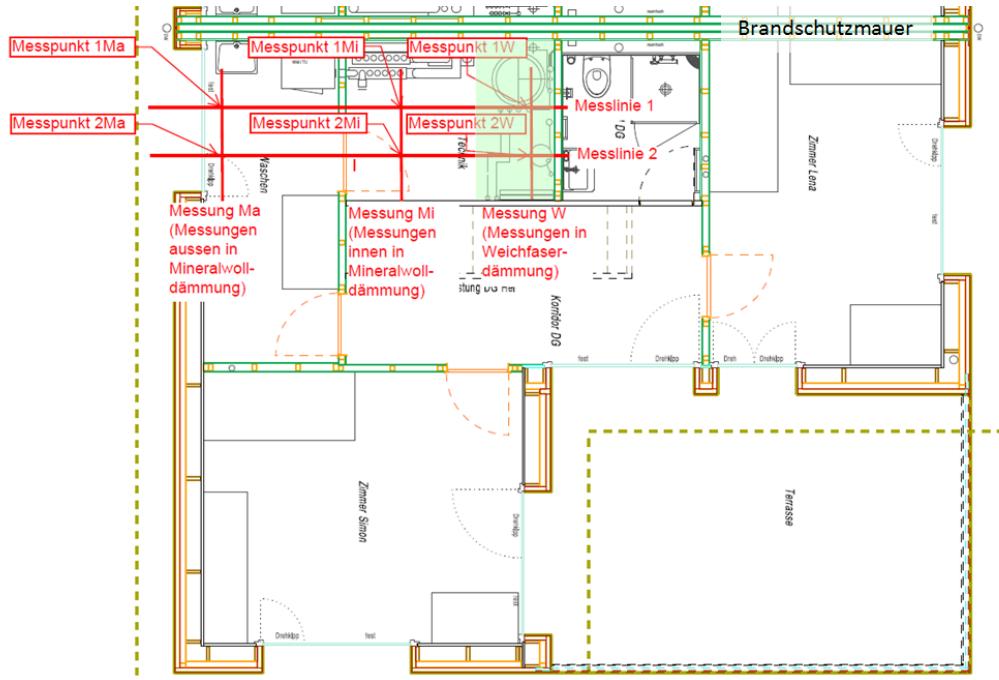


Abbildung 2.18: Anordnung der beiden Messlinien 1 und 2, sowie die Positionen der einzelnen Messsensoren.
Quelle: Schuler AG

Vier Messpunkte befinden sich im Bereich des Technikraums. Von diesen liegen je zwei Messpunkte im Dämmmaterial auf Holzfaserbasis und zwei in der Mineralwolle-Dämmung. Zwischen den Grenzschichten der Dämmstoffe sind verschiedene Temperatur- und Luftfeuchtesensoren angebracht. Zusätzlich schraubte man in die obere Dreischicht- (G3) und untere Blockholzplatte (G1) Dreischichtplatte Messkabel und zog diese in den Innenraum für eine manuelle Messung der Holzfeuchte mittels eines handelsüblichen Materialfeuchtemessgeräts. Über eine Wärmestromplatte zwischen den Messpunkten im Dämmmaterial auf Holzfaserbasis (1W und 2W), sowie im Bereich der Mineralwolle-Dämmung (1Mi und 2Mi, bzw. 1Ma und 2Ma) wird die Wärmestromdichte durch das Bauelement gemessen. Zudem wird pro Messpunkt die Innenoberflächentemperatur der Dreischichtplatte gemessen.

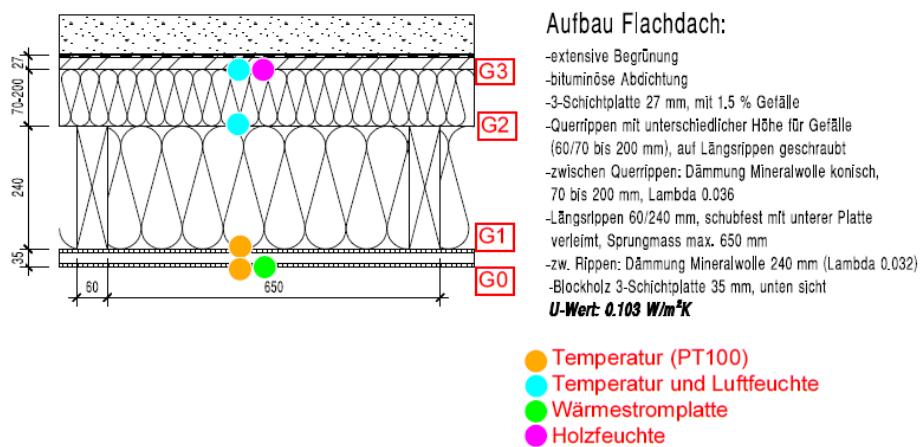


Abbildung 2.19: Anordnung der Sensoren über den Querschnitt des Dachaufbaus. Quelle: Schuler AG

Zusätzlich zu den in der Abbildung 2.19 ersichtlichen Messparametern, werden das Raumklima im Technik- und Waschraum (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) und das Außenklima an der Südwestseite des Gebäudes aufgezeichnet.

3 Ausgleichsfeuchtebestimmung

3.1 Theorieteil – Hygrokopisches Verhalten von Baustoffen

Abhängig von der Stoff- und Porenstruktur können organische sowie anorganische Konstruktionsmaterialien bei verschiedenen Temperaturen unterschiedliche Mengen Wasser in Form von Dampf und/oder Flüssigkeit aufnehmen. Entsprechend dem Feuchtegehalt und der Temperatur der Umgebungsluft stellt sich in den Hohlräumen poröser Baustoffe eine hygrokopische Gleichgewichtsfeuchte ein, auch Ausgleichsfeuchte genannt. Die Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchte von der relativen Luftfeuchte bei bestimmter Temperatur wird experimentell bestimmt und als sogenannte Sorptionsisothermen dargestellt.

3.1.1 Feuchteaufnahme und –abgabe von organischen Baustoffen

Bei der Feuchteaufnahme von organischen Baustoffen, wie z.B. von Holz, werden in der Startphase bei einer noch niedrigeren Materialfeuchte (Darrzustand des Holzes) die grossen inneren Porenoberflächen mit einer Wassermolekülschicht belegt. Später bei höheren Feuchtelasten lagern sich weitere Wassermoleküle an diese Schicht an bis sich Wasserinseln bilden und schliesslich das gebundene Wasser den ganzen Porenraum ausfüllt. Die Sorptionserscheinungen von Wasser in Holz treten bis zum Fasersättigungsbereich auf und werden als Absorption bezeichnet. Nach NIEMZ kommt es bei der Absorption zur Überlagerung folgender Vorgänge (Abbildung 3.1) (NIEMZ, 1993):

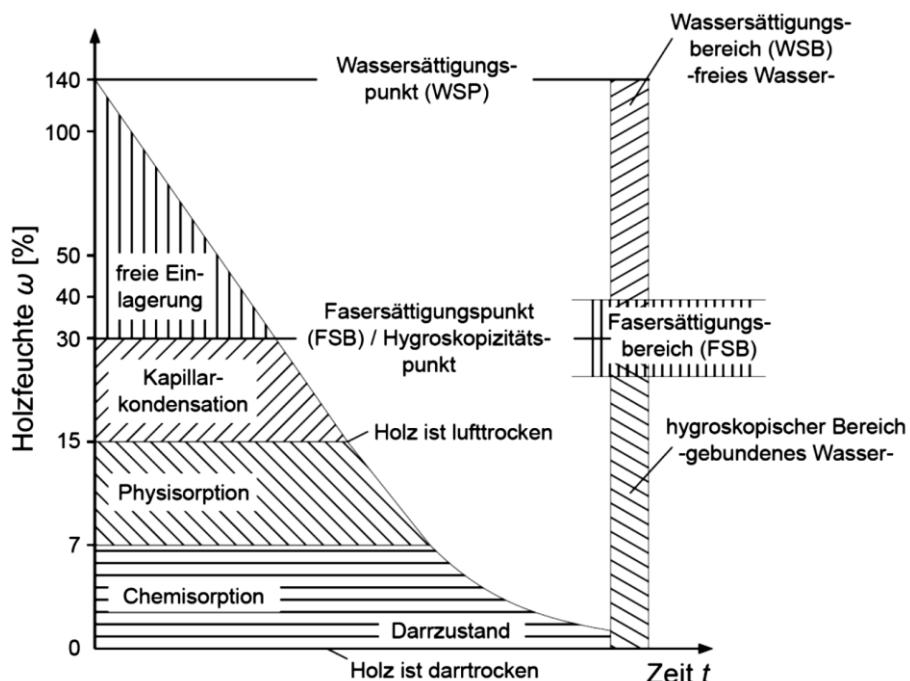


Abbildung 3.1: Die sich überlagernden Sorptionserscheinungen bis zum Fasersättigungsbereich (FSB) im Holz.
Quelle: (NIEMZ, 1993)

Chemisorption ($u=0-6\%$, $\varphi \leq 20\%$)

Die erste Phase der Sorption beschreibt die Chemisorption. In dieser Phase kommt es, durch die Einlagerung von Wasserstoffmolekülen über Wasserstoffbindungen zwischen benachbarten Zelluloseketten, zur Ausbildung einer monomolekularen Schicht. Die volle Ausbildung einer monomolekularen Schicht entspricht nach POPPER & BARISKA einem Feuchtegehalt zwischen 4% und 6% (POPPER & BARISKA, 1972). Die Chemisorption beginnt in den amorphen Bereichen des Zellulose-

gerüstes, wo mehr Hydroxylgruppen für die Ausbildung von Wasserstoffbrücken freiliegen (Abbildung 3.2). Somit ist in diesem Bereich kaum ein Quellen möglich, womit es auch zu keiner Verschiebung der kristallinen Bereiche kommt.

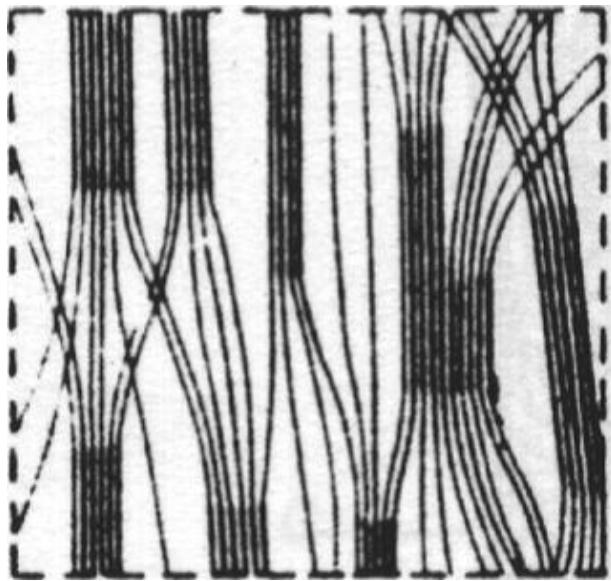


Abbildung 3.2: Sich abwechselnde kristalline und amorphe Bereiche im Holz. Quelle: (BRAUN, 1982)

Adsorption oder Physisorption ($u=6\text{-}15\%$, $\varphi \leq 60\%$)

Die Adsorption definiert sich durch die Anlagerungen weiterer Wassermoleküle an die durch die Chemisorption entstandene monomolekulare Schicht. Dabei kommt es zur Ausbildung einer polymolekularen Wasserschicht, welche sich nicht gleichmäßig über die gesamte Oberfläche erstreckt. So absorbieren einige Stellen vielmehr ein zweites oder drittes Wassermolekül, ehe andere überhaupt aktiv werden. Der Einfluss der Grenzschicht auf die Struktur des sorbierten Wassers nimmt mit zunehmender Dicke der Molekülschichten ab und das Sorbat zeigt immer mehr Flüssigkeitscharaktere, wie Oberflächenspannung und Fliessfähigkeit.

Kapillarkondensation ($u > 15\%$ bis Fasersättigungsbereich (FSB), $\varphi = 60\text{-}100\%$)

NIEMZ schreibt, dass für Kapillaren mit einem Radius $r > 5 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-6}$ nach Thomson gilt, dass der Sättigungsdruck über den Kapillaren geringer ist als über einer ebenen Flüssigkeitsoberfläche (NIEMZ, 1993). Daraus folgt, dass ein Teil des Wasserdampfes in den Kapillaren eher kondensiert und sich als Feuchtigkeit im Zellwandsystem niederschlägt. Mit zunehmendem Feuchtegehalt lagert sich Wasser in den intermizellaren und interfibrillaren Hohlräumen ein (Abbildung 3.3). Dabei rücken die Fibrillen so weit auseinander, bis die relativ festen Bindungen eine Ausdehnung der Zellwand verunmöglichen. In diesem sogenannten Fasersättigungsbereich ist somit die Möglichkeit der Feuchteaufnahme im Mikrosystem des Holzes erschöpft und das restliche Wasser muss in die makroskopischen Hohlräume eingelagert werden. In diesem Fall spricht man von freiem Wasser. Diese Einlagerung der Wassermoleküle unterhalb des Fasersättigungsbereiches haben eine starke Quell-, bzw. die Auslagerung eine starke Schwinderscheinung zur Folge.

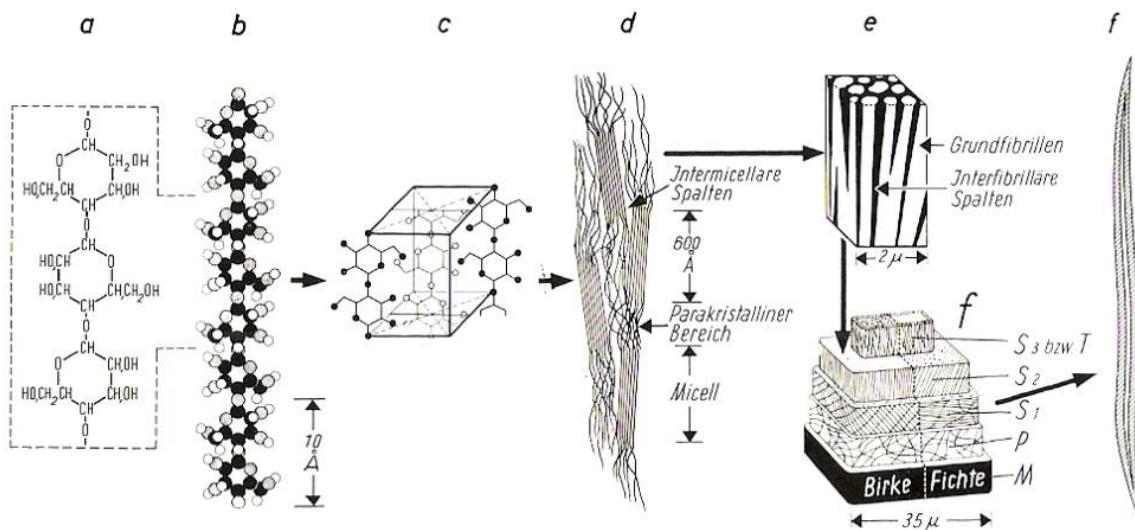


Abbildung 3.3: Verbindung der Zellulosemakromoleküle zur hölzernen Zellwand, phasenweise Darstellung. Quelle: (KNIGGE & SCHULZ, 1966)

3.1.2 Feuchteaufnahme und –abgabe von anorganischen Baustoffen

Analog zu den drei Sorptionsvorgängen bei Holz spricht man bei feinporen, mineralischen Baustoffen von Wassergehaltsbereichen von absoluter Trockenheit bis zur völligen Porenfüllung mit Wasser. Nach HÄUPL wird demnach zwischen folgenden drei Wassergehaltbereichen unterschieden (Abbildung 3.4) (HÄUPL, 2008):

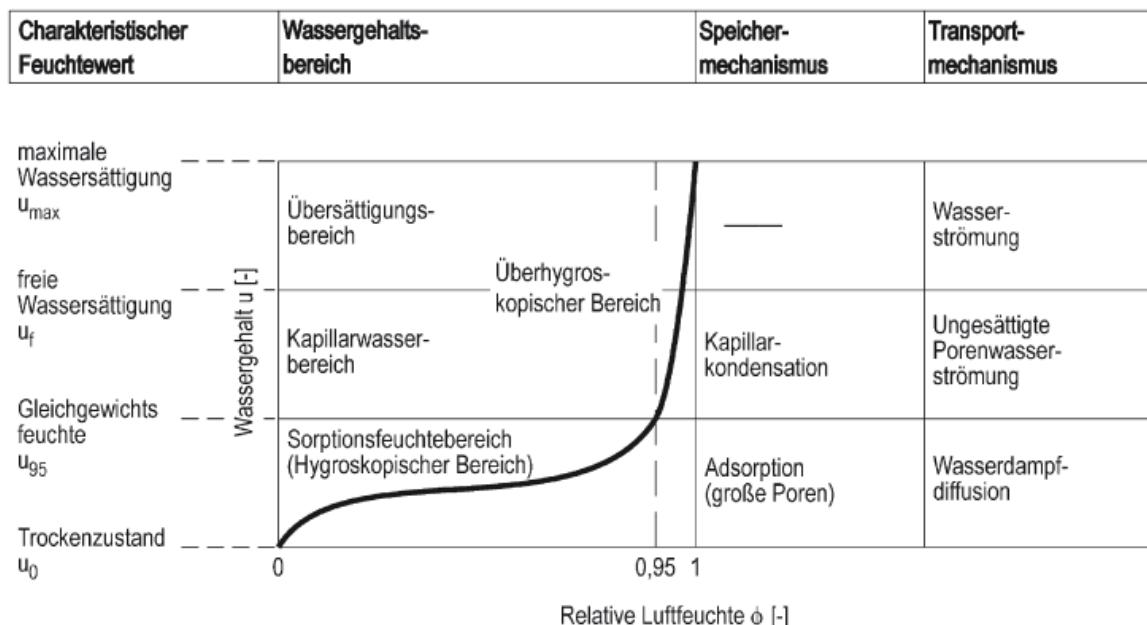


Abbildung 3.4: Wassergehaltsbereiche in einem feinporen, hygrokopischen Baustoff. Quelle: (HÄUPL, 2008)

Hygrokopischer Bereich (Bereich niedriger Feuchte)

Im Bereich niedriger Feuchte, den sogenannten hygrokopischen Bereich, bestimmen Diffusionsvorgänge den Feuchtetransport und Absorptionsvorgänge die Wasserspeicherung.

Kapillarwasserbereich (Bereich höherer Feuchte)

Im Bereich der höheren Feuchte, dem sogenannten Kapillarwasserbereich, wird der Wassertransport durch die ungesättigte Porenwasserströmung bestimmt. Dabei beeinflussen die Oberflächenspannung des Wassers und der dadurch bedingte Kapillardruck den Transport entscheidend. Die Wasserspeicherung wird durch Füllung von Porenbereichen, beginnend bei den kleinsten Porenweiten und ansteigend zu immer größeren Porenweiten, bewerkstelligt.

Übersättigungsbereich

Die relative Luftfeuchte hat den Wert 1, die Menisken (konkave Wasseroberfläche im Kapillarsystem) sind entspannt und ein Gleichgewichtszustand zwischen Luft- und Wassergehalt existiert nicht mehr. Die fortlaufende Wassereinlagerung kann anhand der Sorptionsstadien und der dabei auftretenden Transporteffekten nach Rose in sechs Abschnitte unterteilt werden (Abbildung 3.5) (HÄUPL, 2008).

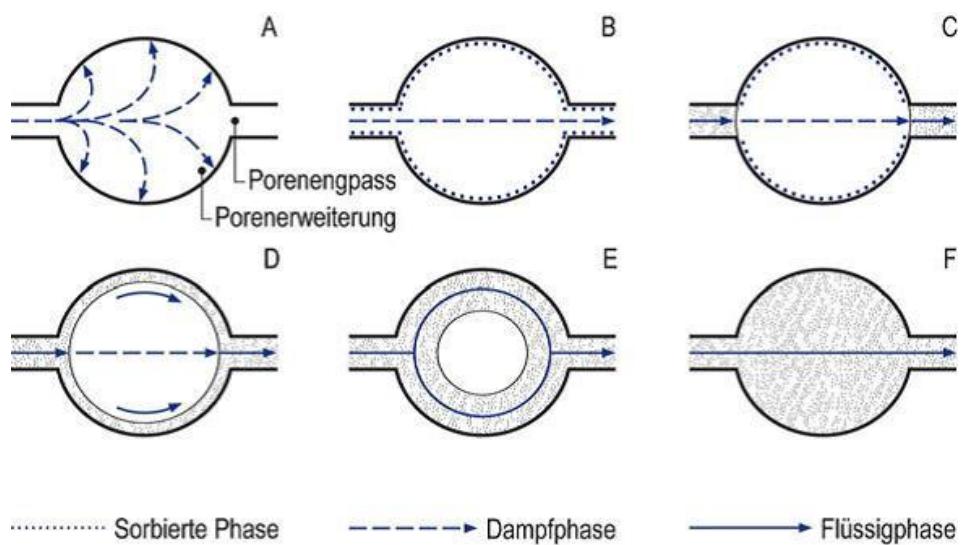


Abbildung 3.5: Einlagerung von Wasser in einer Baustoffpore schematisch dargestellt. Von A bis F nimmt der Wassergehalt stetig zu. Quelle: (HÄUPL, 2008)

In einem Baustoff bei darrtrockenem Zustand (A) wird der in die Poren eindringende Wasserdampf an den Wandoberflächen absorbiert. In diesem Stadium der Feuchteaufnahme kann noch nicht von einem „Transport“ gesprochen werden, da das Wasser lediglich gespeichert wird. Der Porenraum wird für Wasserdampf erst diffundierbar, wenn die Porenwände mit einer oder mehreren Molekülschichten belegt sind (B). Dabei steht die Dicke des absorbierten Wasserfilms im Gleichgewicht zur relativen Luftfeuchte im Porenraum. Als Folge von Kapillarkondensation sind die Porenengpässe im nächsten Stadium (C) mit flüssigem Wasser gefüllt. In den Erweiterungen indessen befindet sich Luft und Wasserdampf und an den Wänden eine Sorbatschicht. Diese Sorbatschicht ist aber noch so dünn, dass der Wassertransport in der Porenerweiterung nur durch Wasserdampfdiffusion erfolgen kann. Im Stadium D ist nun in den Erweiterungen ein kontinuierlicher Wassertransport in der Flüssigphase im Gange. Grund dafür ist die genügend dicke Sorbatschicht, welche einen Flüssigwassertransport in nennenswerter Menge ermöglicht und die Leistungsfähigkeit für den Wassertransport im Vergleich zur Wasserdampfdiffusion deutlich steigert. Das Stadium E charakterisiert sich durch die noch vorhandenen Luftblasen in den Porenerweiterungen. Zu diesem Zeitpunkt ist jedoch bereits so viel Wasser vorhanden, dass die Luftblase als frei schwimmend charakterisiert werden kann und sich eine wirksame ungesättigte Strömung ausbildet. Im Endstadium (F) ist dann der Porenraum komplett mit Flüssigkeit gefüllt und der Transport erfolgt über eine gesättigte Strömung.

3.1.3 Feuchtetransport und Feuchteverteilung

NIEMZ schreibt, dass kapillarporöse Systeme wie Holz aus durchgehende, miteinander verbundenen, aber auch aus luftgefüllten Kapillaren bestehen. Eine reine Kapillarbewegung im ganzen System ist demnach nicht mehr möglich (NIEMZ, 1993). Zwischen einem Feuchtegehalt von 4-6% und dem Fasersättigungsbereich (FSB) kommt die Feuchtebewegung vielmehr durch die Diffusion des Wassers durch die luftgefüllten Poren zustande.

Diffusion

Die Diffusion sind alle molekularen Bewegungsvorgänge, bei denen Moleküle aufgrund von Teildruck- bzw. Konzentrationsunterschieden wandern. Somit tritt sie in flüssigen Lösungen, in Flüssigkeiten, die an der Oberfläche von Feststoffen absorbiert werden, sowie in Gasen und Dämpfen auf. Die treibende Kraft dabei sind die Feuchte-, Feuchtekonzentrations- und oder Dampfdruckunterschiede.

Bei der Diffusion in den Kapillaren des Holzes verdampft das Wasser zuerst an den ausgelasteten Menisken bei dem vorhandenen Dampfdruckgefälle, diffundiert dann in die luftgefüllten Poren und kondensiert an den gegenüberliegenden, nicht ausgelasteten Menisken. Der Transport des kondensierten Wassers wird durch Zugunterschiede in den Menisken angetrieben, wobei diese Zugkräfte dazu führen, dass die feinsten Kapillaren im Zellwandsystem zunächst das Wasser aus den grösseren Kapillaren (Gefässen, Tracheiden) aussaugen, solange ein Feuchteunterschied zwischen beiden herrscht.

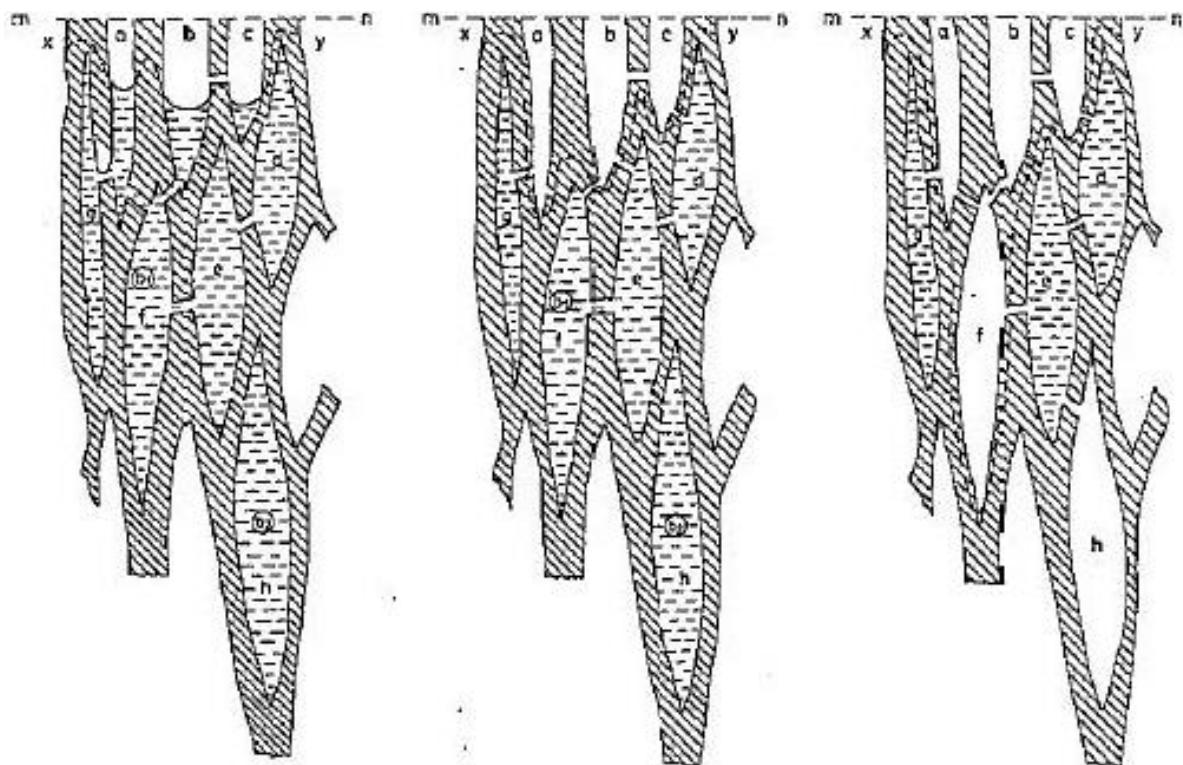


Abbildung 3.6: Kapillare Feuchtebewegung im Holz während dem Trocknungsvorgang. Quelle: (HAWLEY, 1931)

Oberhalb des Fasersättigungsbereiches (FSB) fliesst das Wasser in das Makrosystem des Holzes, wo es eingelagert wird. Die Richtung, Intensität und Geschwindigkeit dieser Wasserleitung hängt vor allem von der Verteilung der Kapillaren, der Temperatur, der Viskosität und der Oberflächenspannungen ab und wird rechnerisch durch die Feuchteleitzahl beschrieben.

SIAU kommt zum Schluss, dass im Makrosystem des Holzes folgende Fliesszustände möglich sind (SIAU, 1971):

- Viskoses oder laminares Fliessen (vorausgesetzt wird eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung über dem Querschnitt)
- Turbulentes Fliessen, z.B. beim Austritt der Flüssigkeit aus engen Kapillaren der Schliesshaut der Tüpfel in die weiteren Lumina der Tracheiden (Entstehung von Wirbeln)
- Molekulares Gleiten

Dabei ist Permeabilität eine wichtige Kenngröße des Flusses, welche die Fliessgeschwindigkeit bestimmt.

3.1.4 Hygrokopisches Gleichgewicht von Holz

Wie in den Abschnitten 3.1.2 und 3.1.3 bereits erwähnt, nimmt das Holz durch Chemisorption, Adsorption und Kapillarkondensation innerhalb des hygrokopischen Bereiches Wasser aus der Umgebungsluft auf bis zum Einstellen eines Gleichgewichtszustandes. Das Ausmass dieser Dampfaufnahme steht in engem Zusammenhang mit den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Körpers zusammen. So hängt dieses hygrokopische Verhalten des Holzes unter anderem von der relativen Luftfeuchte, der Temperatur, dem Luftdruck und dem chemischen und strukturellen Aufbau des Holzes ab. Am Beispiel der Sitka-Fichte ist auf der Abbildung 3.7 der Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf den Feuchtegehalt von Holz gut erkennbar. Gemäss diesem Diagramm nach R. Keylwerth sinkt der sich im Gleichgewichtzustand einstellende Feuchtegehalt mit zunehmender Temperatur nur geringfügig, während die relative Luftfeuchte den entscheidenden Faktor ausmacht.

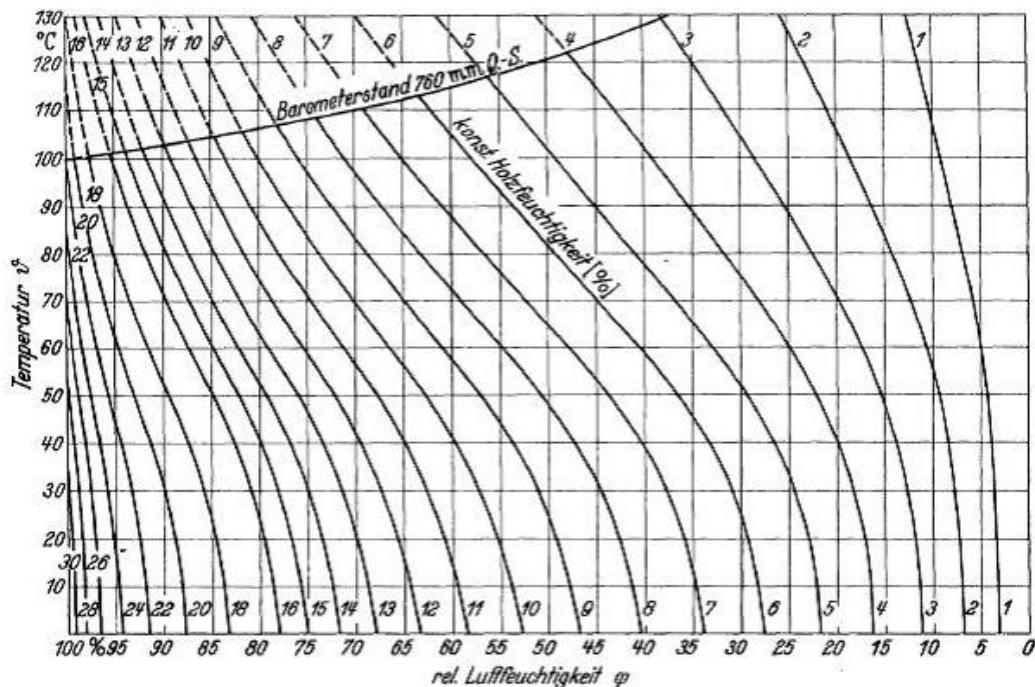


Abbildung 3.7: Hygrokopisches Gleichgewicht der Sitka-Fichte in Abhängigkeit der Temperatur nach R. Keylwerth und Angaben des U.S. Forest Products Laboratory, Madison 1951. Quelle: (KEYLWERTH, 1952)

Sorptionsisotherme

Die sogenannte Sorptionsisotherme ist die graphische Darstellung des Sorptionsverhaltens von Holz und beschreibt die Beziehung zwischen seinem Wassergehalt und der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft in Abhängigkeit einer festgelegten Temperatur (Abbildung 3.8). Bei Holz und Holzwerkstoffen hat diese Kurve einen typischen S-förmigen Verlauf. Dabei sind die Isothermen bei Feuchteaufnahme (Absorption) und Feuchteabgabe (Desorption) nicht deckungsgleich. So kommt das Sorptionsgleichgewicht bei der Desorption höher zu liegen als bei der Absorption. Dieser Unterschied zwischen dem hygrokopischen Gleichgewicht bei Desorption und Absorption wird als Hysterese bezeichnet und kann bis zu 1-2% betragen. Da die Hysterese im Bereich niedriger Dampfspannungen (Chemisorption) verschwindet, lässt sich schliessen, dass es sich hierbei um einen reversiblen Vorgang handelt. In den Bereichen der Adsorption und Kapillarkondensation ist dies jedoch nicht der Fall. Bei oszillierender Sorption, wie z.B. bei Temperaturschwankungen, rücken die Hysterese-Schleifen enger zusammen. Bis heute ist das Phänomen der Hysterese physikalisch noch nicht eindeutig geklärt.

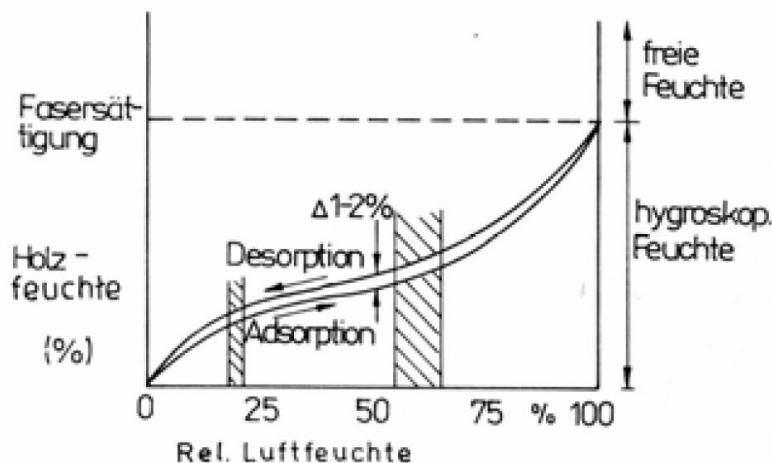


Abbildung 3.8: Hystereseeffekt bei Holz in der Trocknungsphase. Quelle: (NIEMZ, 1993)

3.2 Material und Methodik

An den im Flachdach verbauten Holzwerkstoffen und einer Vergleichsholzart wurden die Ausgleichsfeuchten bei verschiedenen Klimabedingungen gemessen. Bei den Holzwerkstoffen handelte es sich dabei um eine Dreischichtplatte der Fima Pfeifer und einer Blockholzplatte der Fima Pius Schuler AG. Die Vergleichsholzart repräsentiert die Fichte, die den Hauptbestandteil der Dreischicht- und Blockholzplatte ausmacht. Die Ausgleichsfeuchtebestimmung richtet sich nach der Norm DIN EN ISO 12 571 (DIN EN ISO 12 571, 2013). Die Probenauswahl sowie -herstellung und die Bestimmungen wurden nach folgenden Normen durchgeführt.

- **ISO 3129** Wood – Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens (ISO 3129, 2012)
- **DIN 52 182** Prüfung von Holz - Bestimmung der Rohdichte (DIN 52 182, 1976)
- **DIN 52 183** Prüfung von Holz - Bestimmung des Feuchtegehaltes (DIN 52 183, 1977)

Nach der Holzfeuchtebestimmung werden die erhaltenen Werte in Matrizen der entsprechenden Temperaturbereiche eingetragen. Diese Matrizen ermöglichen das Modellieren von verschiedenen Sorptionsisothermen, die Aufschluss über die Feuchteaufnahme der geprüften Materialien geben. Diese Sorptionsisothermen sind dann Algorithmen, über welche mittels der herrschenden Temperaturen und der relativen Luftfeuchten im zu untersuchenden Objekt die Materialfeuchte bestimmt werden kann. Der Ablauf der Ausgleichsfeuchtebestimmung und der darauffolgenden Modellierung der Sorptionsisothermen ist in der Abbildung 3.9 schrittweise aufgezeigt.

Neben den im Flachdach verbauten Holzwerkstoffen und der Fichte, wurden zusätzlich die Holzfeuchten herkömmlicher Vollholzarten (Lärche, Buche, Eiche und Accoya-Holz) bestimmt. Die Bestimmung des hygrokopischen Gleichgewichts dieser Hölzer hat jedoch einen rein informativen und nebensächlichen Zweck und wird an dieser Stelle lediglich erwähnt, um den Aufbau des ID-Schlüssels zu begründen.

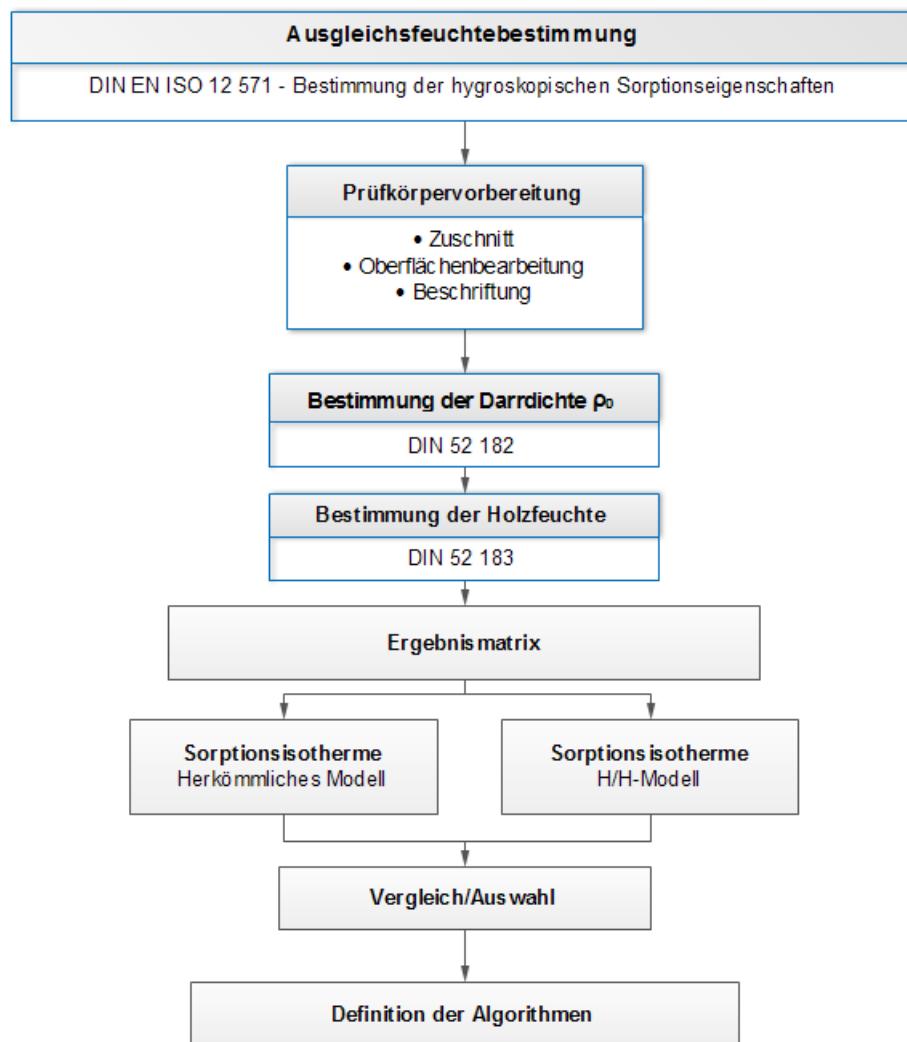


Abbildung 3.9: Schematischer Ablauf der Bestimmung des hygrokopischen Gleichgewichtes der Prüfkörper.

3.2.1 Material

Für die Bestimmung der Ausgleichsfeuchte der im Flachdach verbauten Holzwerkstoffe, Dreischicht- und Blockholzplatte, wurden auf der Formatkreissäge [1] je 30 Prüfkörper auf die Masse 20mm x 20mm x Plattendicke zugeschnitten. Bei beiden Platten beträgt die Dicke 27mm. Die wichtigsten Informationen zu den Holzwerkstoffen sind in der Tabelle 4 zusammengefasst. Für weitere und detailliertere Informationen können die Produktdatenblätter im CD-Anhang konsultiert werden.

Die Prüfkörper der Fichte und der zusätzlichen Holzarten haben die Form eines Kubus mit einer Kantenlänge von 20mm. Die Anzahl pro Holzart beträgt in diesem Fall 20 Prüfkörper.

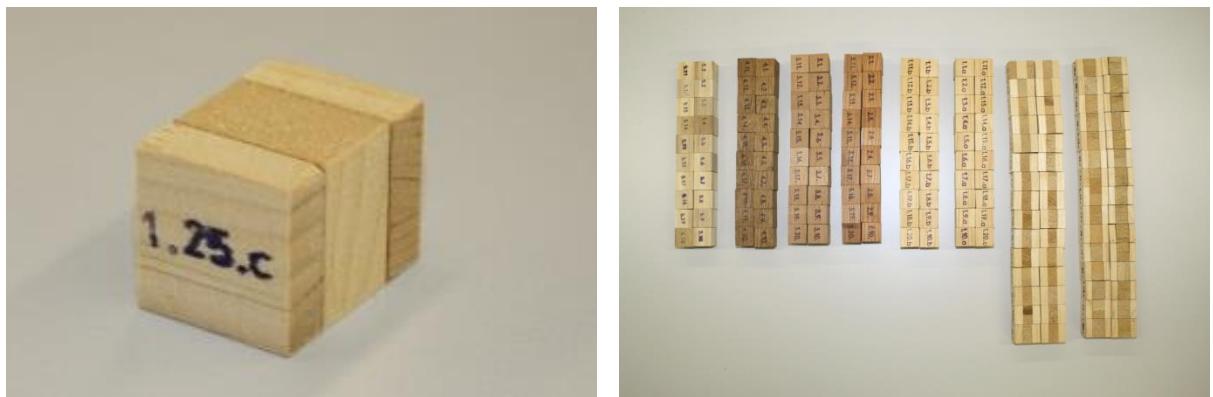


Abbildung 3.10: Einzelner Prüfkörper für die Ausgleichsfeuchtebestimmung mit dem entsprechenden ID-Schlüssel links und alle geprüften Holzproben rechts.

Tabelle 4: Darstellung der geprüften Holzwerkstoffe und deren Herkunftsangabe.

Dreischichtplatte

Bezugsquelle:	Pfeifer Group
Holzart:	Fichte
Verleimung:	Formaldehydgehalt $\leq 5 \text{ ppm}$
Rohdichte ρ_{roh} :	430-450 kg/m ³

Blockholzplatte

Bezugsquelle:	Pius Schuler AG
Holzart:	Ficht/Tanne/Kiefer/Lärche/Douglasie
Verleimung:	Formaldehydfrei (Leimanteil: 1.5-2%)
Rohdichte ρ_{roh} :	430 kg/m ³

Um später bei der Gewichtsabnahme den Überblick nicht zu verlieren und den gemessenen und errechneten Werten die richtige Holzart, bzw. die richtigen Versuchsproben zuzuordnen, wurden die einzelnen zugeschnittenen Prüfkörper mit einem Buchstaben-Stempelset entsprechend eines ID-Schlüssels beschriftet. Der zugehörige Nummernplan des ID-Schlüssels ermöglicht den numerischen Kombinationen die verbale Zuteilung und ist unten abgebildet (Tabelle 5).

Tabelle 5: Nummernplan des ID-Schlüssels zur Wiedererkennung der Prüfkörper inklusive eines Beispiels des ID-Schlüssels

Holzart			Prüfkörper		Zusatz	
Latein	Deutsch	ID	ID		ID	
Picea abies	Fichte	1	Probennummer	1	Fichte grosse Dichte	a
Larix decidua	Lärche euopäisch	2	Probennummer	2	Fichte geringe Dichte	b
Fagus sylvatica	Buche	3	Probennummer	...	3-Schichtplatte Pfeifer 27 mm	c
Quercus robur	Eiche	4	Probennummer	29	Blockholz Schuler AG 27 mm	d
Pinus radiata	Radiata Pine (Accoya-Holz)	5	Probennummer	30		
Bsp. 1.16.a	Prüfkörper Nr. 16 von Fichte mit feinjährigen Jahrringen					

3.2.2 Bestimmung der Darrdichte

Zur Bestimmung der Darrdichte müssen die Prüfkörper zuerst auf den Zustand einer nullprozentigen Holzfeuchte getrocknet werden. Dies geschieht im Darrofen [2] bei einer Temperatur von 103 °C ± 3°C. Der darrtrockene Zustand ist nach der DIN 52 183 dann erreicht, wenn sich das Gewicht der Proben gegenüber der vorherigen Wägung im Abstand von 24 Stunden um nicht mehr als 0.1% geändert hat (DIN 52 183, 1977).

Um die Feuchteaufnahme der Holzproben in der Abkühlphase nach dem Darrtrocknen zu verhindern, werden sie in einem Exsikkator zwischengelagert.

Nach Erreichen der Gewichtskonstanz ist laut Norm die Darrmasse m_0 und die einzelnen Abmessungen (Breite, Länge und Dicke) der Proben mit einer Genauigkeit von 1%, sowie die resultierende Volumen auf ebenfalls 1%, zu nehmen. In dieser Versuchsreihe wird auf die Waage Mettler [7] und den Messschieber Mitutoyo [4] zurückgegriffen, die den Vorgaben der Norm in punkto Genauigkeit genügen

Die Darrdichte ergibt sich dann als den Quotienten aus der ermittelten Masse m_0 und dem berechneten Volumen V_0 .

$$\rho_0 = \frac{m_0}{b_0 \cdot l_0 \cdot d_0} = \frac{m_0}{V_0} \quad (3.1)$$

ρ_0 = Darrdichte in g/m^3

m_0 = Darrmasse in g

V_0 = Volumen in cm^3



Abbildung 3.11: Darrvorgang bei 103°C ± 3°C.



Abbildung 3.12: Massabnahme der Proben nach dem Darrtrocknen.

3.2.3 Bestimmung der Holzfeuchte – Hygrokopisches Gleichgewicht

Der Vorgang der Holzfeuchtemessung wird einerseits durch die später entstehende Ergebnismatrix (Abbildung 3.13) festgelegt und andererseits durch den Effekt der Hysterese. So legt die Ergebnismatrix die Anzahl und Positionen der für die Erstellung der Sorptionsisothermen notwendigen Messpunkte fest. D.h. es wird im Vorhinein definiert bei welchen Temperaturen welche relativen Luftfeuchten herrschen, bzw. wie viele Temperaturschritte innerhalb der gleichen Stufe der relativen Luftfeuchte abgefahren werden. Der Hystereseeffekt wiederum bestimmt die Reihenfolge der einzelnen Messpunkte, sodass die Prüfkörper bei jeder Temperaturstufe nur aufgefeuchtet

(Adsorption) werden. So kann die durch den Hystereseffekt hervorgerufene Abweichung von der Adsorptionskurve auf ein Minimum reduziert werden.

Insgesamt durchlaufen die Prüfkörper drei bis sechs Feuchtestufen (40%, 70%, 80%, 90%, 95% und 98% relativer Luftfeuchte). Bei jeder dieser Feuchtestufen wird die Temperatur nach erreichen der Massenkonstanz der Proben in vier Stufen um 5 K gesenkt. Die Anfangstemperatur beträgt 25°C und endete somit bei 10°C. Die Unterteilung der Temperaturstufen erfolgt nach dem mathematischen Rundungsgesetz der IEEE-754-Standard für das Rechnen mit binären Gleitkommazahlen in Computern (IEEE 754, 2008).

Aufgrund dieser Einteilung und Vorgehensweise kommt es zu keiner Desorption und somit zu keiner Verfälschung der Resultate, da die Änderung der relativen Luftfeuchte einen wesentlich grösseren Einfluss auf das hygrokopische Gleichgewicht hat, als jene der Temperatur (Abschnitt 3.1.4). Aus den erhaltenen Mittelwerten der jeweiligen Messpunkte kann nun eine Massenmatrix erstellt werden.

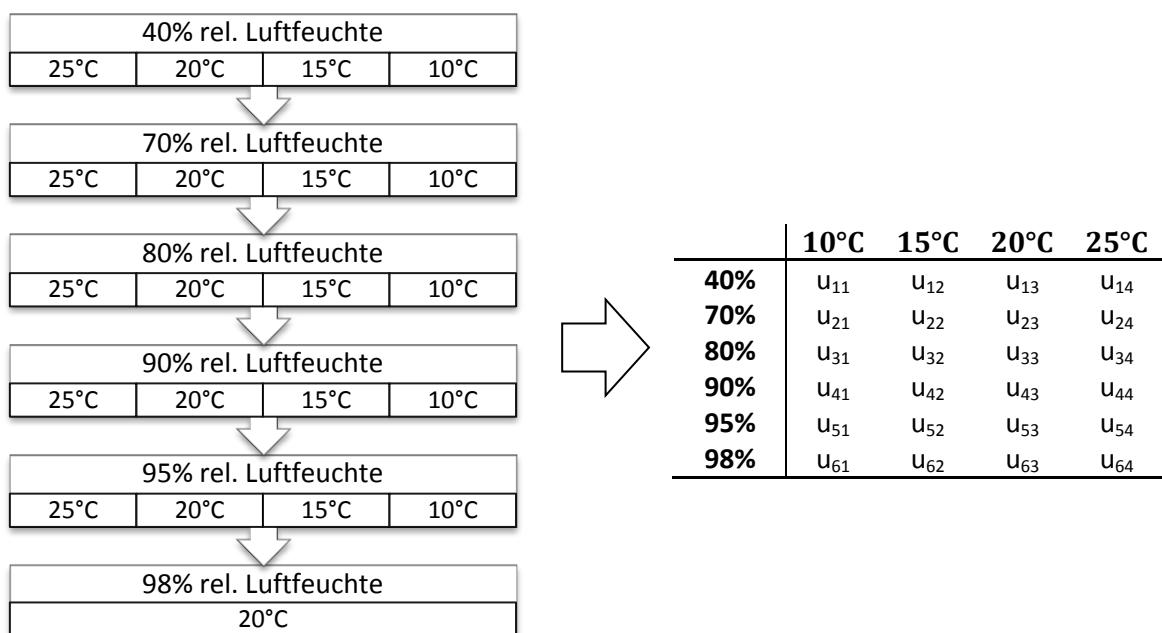


Abbildung 3.13: Vorgehensweise Ausgleichsfeuchtebestimmung: Von der Reihenfolge der Ausgleichsfeuchtemessung zur Massenmatrix.

Über das Verhältnis der Masse des in der Holzprobe enthaltenen Wassers zur entsprechenden Darrmasse kann mittels der Gleichung 3.2 aus der DIN 52 182 den prozentualen Holzfeuchtegehalt berechnet werden (DIN 52 182, 1976).

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (3.2)$$

u = Holzfeuchte in %

m_u = Masse der feuchten Proben in g

m₀ = Masse der darrtrockenen Proben in g

3.2.4 Das HAILWOOD & HORROBIN-Modell

Die HAILWOOD & HORROBIN-Theorie (1946) wurde speziell für die Erklärung der sigmoidschen Form der Sorptionsisotherme von Wasserdampf in Polymeren, hauptsächlich Textilpolymeren, entwickelt. Des Öfteren wird sie auch für die Beschreibung des Sorptionsverlaufes von Holz verwendet. Das Sorptionsmodell (H/H-Modell) ist unter der Annahme entstanden, dass das Wasser bei der Wasserdampfsorption durch die Lignozellulose als einfache Lösung und als Hydrat der Lignozellulose existiert. Weiter wird angenommen, dass die sorbierte Schicht eine ideale feste Lösung bildet. Diese Schicht besteht aus nichthydratisierten und hydratisierten Lignozellulosen, sowie aus freiem, flüssigem Wasser. Dieses Sorptionsmodell ermöglicht unter anderem die Trennung der mono-(U_m) von der polymolekularen Sorption (U_p), sowie die Abschätzung des experimentell nur schwer zu bestimmenden Fasersättigungsbereichs (U_{FS}). Des Weiteren lassen sich durch das H/H-Modell die Unzugänglichkeit der sorptiv aktiven Stellen des Sorbens zum Sorbat und das hypothetische Molekulargewicht des Sorbens (M_p) abschätzen. Somit ergibt sich folgende Gleichung:

$$U_{tot} = U_m + U_p \quad (3.3)$$

$$U_{tot} = \frac{1'800}{M_p} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \beta \cdot \varphi}{100 + \alpha \cdot \beta \cdot \varphi} \right) + \frac{1'800}{M_p} \cdot \left(\frac{\beta \cdot \varphi}{100 - \beta \cdot \varphi} \right) \quad (3.4)$$

- U_{tot} = total sorbiertes Wasser in %
- U_m = monomolekular sorbiertes Wasser in %
- U_p = polymolekular sorbiertes Wasser in %
- φ = relative Luftfeuchte in %
- M_p = hypothetisches Molekulargewicht des Holzes
- α = Gleichgewichtskonstante des hydratisierten Holzes
- β = Gleichgewichtskonstante des nichthydratisierten Holzes

Herkömmliches Modell nach Schnider

Beim herkömmlichen Modell nach Schnider handelt es sich um Algorithmen, die aus dem Diagramm für das hygrokopische Gleichgewicht von Sitka-Fichte nach R. Keylwerth abgeleitet wurden. Der Mitarbeiter Thomas Schnider des Instituts für Baustoffe an der ETH Zürich hat dabei für verschiedene Temperaturbereiche Exponentialfunktionen hergeleitet, die die Ausgleichsfeuchten bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten beschreiben. Die verwendete Exponentialfunktion ist folgend dargestellt (Gleichung 3.5).

$$u(\varphi) = a \cdot e^{(b \cdot \varphi)} \quad (3.5)$$

- u = Materialfeuchte in %
- φ = relative Luftfeuchte in %
- a = 1. Parameter
- b = 2. Parameter

Je nach Temperaturbereich zwischen -20°C und 40°C ändern sich die in der Gleichung 3.5 verwendeten Parameter. Die jeweiligen Parameter und die entsprechenden Kurven sind in der Abbildung 3.14 abgebildet.

Da es bei diesem Modell um kein offiziell anerkanntes Modell handelt, wird es in diesem Bericht weiter als „herkömmliches Modell“ bezeichnet.

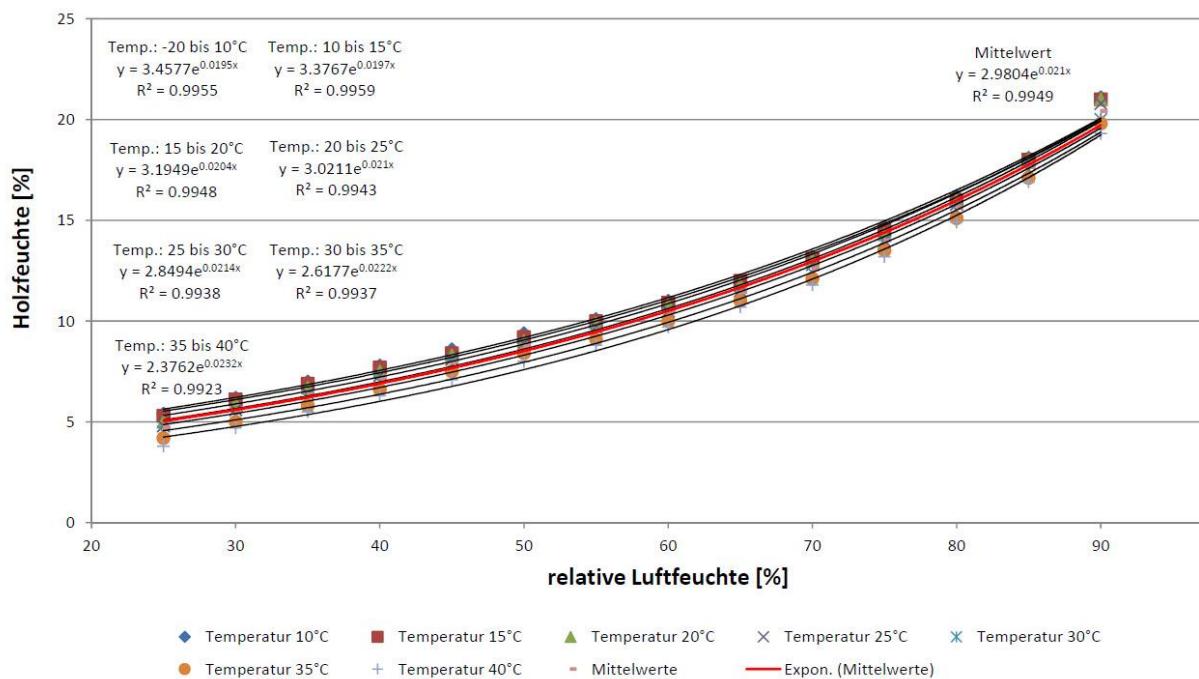


Abbildung 3.14: Von Schnider hergeleitete Algorithmen zur Beschreibung der Sorptionsisothermen von Holz verschiedener Temperaturbereiche. (SCHNIDER, 2012)

Nach der Einsicht in die ersten Messdaten war deutlich erkennbar, dass sich die relative Luftfeuchten in einem eher höheren Bereich bewegen. So erreichten die gemittelten relativen Luftfeuchten in der Schicht G3 der Messlinien 1 im Bereich der Mineralfaser aussen (Ma) ein Maximum von ca. 95%. Einzelne Messwerte übersteigen sogar die 95%.

Um den Bereich der Ausgleichsfeuchte oberhalb 90% relativer Luftfeuchte zuverlässiger nachbilden zu können, muss auf das H/H-Modell zurückgegriffen werden. Dieses Modell beschreibt mit seinem den Verlauf der Sorptionsisothermen, oberhalb von den gemessenen 90% relative Luftfeuchte, die zu erwartende Materialfeuchte besser als die Algorithmen aus dem Keylwerth-Diagramm von Schnider (Abbildung 3.14). Ein weiteres Argument das gegen das herkömmliche Modell, bzw. für das H/H-Modell spricht, ist, dass die Algorithmen beim herkömmlichen Modell nicht durch den Nullpunkt verlaufen. Sie schneiden die y-Achse bei 0% relativer Luftfeuchte im Bereich zwischen 0% und 5% Materialfeuchte, was nicht dem natürlichen Verhalten des hygrokopischen Gleichgewichts entspricht. Weiter bestätigen der 1973 von SIMPSON publizierte Artikel und die häufige Verwendung des H/H-Modell in anderen Arbeiten, wie zum Beispiel in POPPERs Untersuchungen des Hystereseeffekts, dessen Eignung für die Generierung von Sorptionsisothermen von Holz (SIMSPON, 1973) (POPPER, et al., 2009) (PAPADOPOULOS & MANTANIS, 2012).

3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.1 Darrdichte

Tabelle 6: Gemittelte Darrdichten der geprüften Probekörper und deren Standardabweichung sowie Variationskoeffizient.

Holztyp	Picea abies	3-Schichtplatte	Blockholzplatte	Larix decidua	Fagus sylvatica	Quercus robur	Accoya-Holz	
ID	1a	1b	1c	1d	2	3	4	5
Mittelwert [g/cm ³]	0.455	0.313	0.462	0.399	0.624	0.664	0.778	0.448
Standardabweichung [%]	0.02	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00	0.03	0.01
Variationskoeff. [%]	4.29	2.90	9.24	3.35	3.59	0.70	4.26	1.92

Die Mittelwerte in der Tabelle 6 entsprechen der nach dem Darrverfahren (siehe Abschnitt 3.2.2) bestimmten Darrdichte der geprüften Holztypen, die für die nach Gleichung 3.2 zu berechnende Ausgleichsfeuchte notwendig ist. Zusätzlich zu den Mittelwerten kann auch die entsprechende Standardabweichung und die Varianz herausgelesen werden. Die Standardabweichungen liegen alle im Bereich zwischen 0 und 0.04, wobei speziell jene der Buche (*Fagus sylvatica* L.) auffällt, die annähernd gegen Null geht.

Im Anhang liegt zusätzlich eine Tabelle vor, die die Darrdichten der einzelnen Prüfkörper bei einer relativen Luftfeuchte von 0% und einer Lufttemperatur von 103°C zeigt (Tabelle 19). Aus dieser Tabelle geht hervor, dass bei der Dreischicht- und Blockholzplatte als einzige die mittlere Darrdichte aus 30 Prüfkörpern bestimmt worden ist. Die Darrdichten der restlichen Holztypen beziehen sich auf jeweils 20 Prüfkörper.

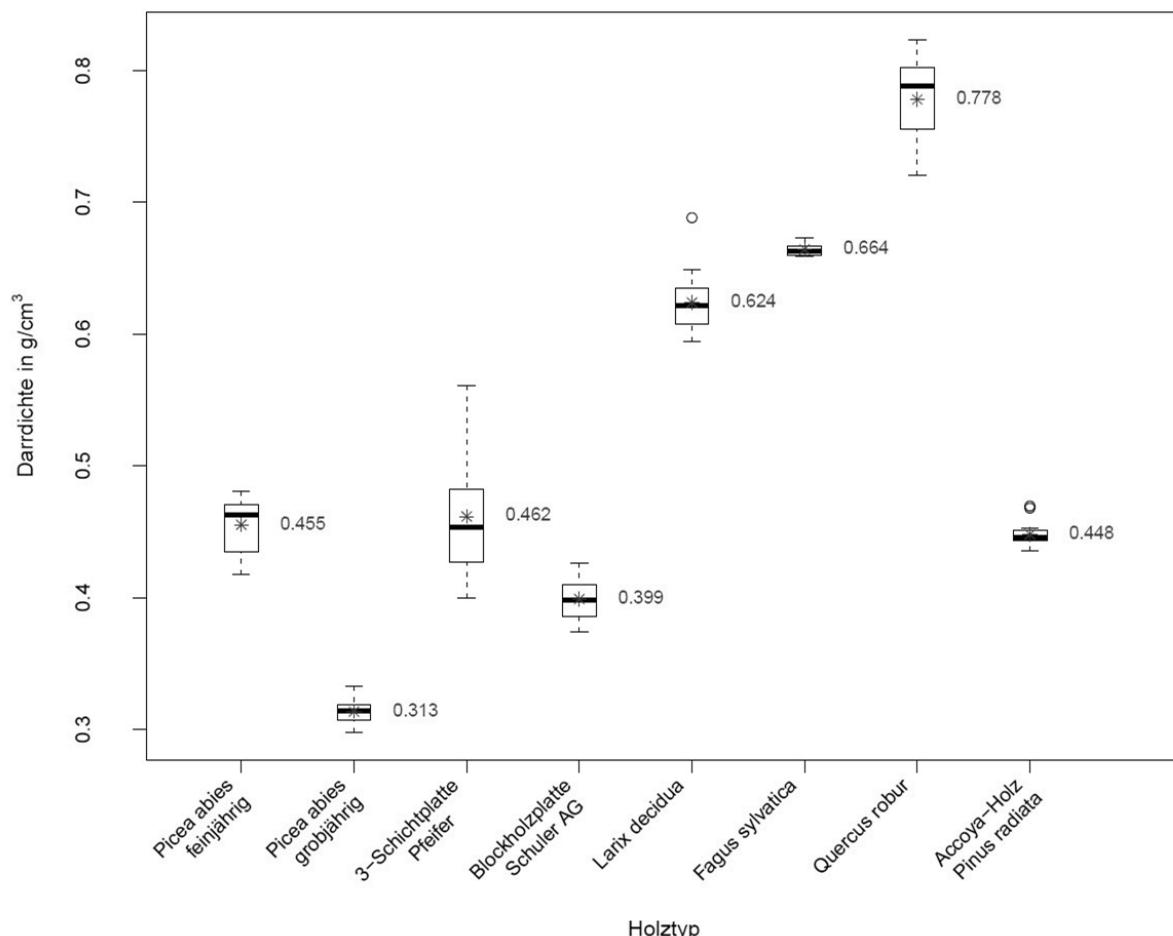


Abbildung 3.15: Boxplot der berechneten Darrdichten und die entsprechenden Mittelwerte.

Auf der Abbildung 3.15 sind die Boxplots der Darrdichten der verschiedenen Holztypen zu sehen. Der dunkle Balken in der Mitte der Box zeigt den Median. Das obere Ende der Box stellt das empirische 75%-Quantil dar, das untere Ende das empirische 25%-Quantil. Die Länge der Box ist daher der Interquartilsabstand (IQR). Die gestrichelten Linien, die aus der Box oben und unten herausgehen, werden als Whisker bezeichnet und beschreiben die Lage der Daten in den Randbereichen. Alle Werte die mehr als $1,5 \times \text{IQR}$ von der oberen oder unteren Box abweichen, stellen Ausreisser dar und werden separat durch Punkte gekennzeichnet. Neben den Boxplots sind auf der Abbildung kleine Sternchen zu sehen, die die einzelnen gemittelten Darrdichten der Holztypen nach Tabelle 6 darstellen.

Bei den Boxplots der Dreischichtplatte, der Eiche (*Quercus robur* L.) und des Accoya-Holzes ist eine deutliche Asymmetrie der beiden Whiskers zu sehen. Bei der Eiche liegt der Median nicht in der Mitte der Box. Dies ist auch bei der feinjährigen Fichte (*Picea abies* L. KARST) der Fall. Dazu sind je ein Wert bei der Lärche (*Larix decidua* Mill.) und dem Accoya-Holz als Ausreisser gekennzeichnet. Die Fichte, die Dreischichtplatte und die Eiche weisen eine deutliche Abweichung des Mittelwerts vom Median auf.

Vergleicht man die gemessenen mittleren Darrdichten in Tabelle 6 mit den in Tabelle 7 zusammengeführten Literaturwerten aus WAGENFÜHR, fällt auf, dass alle gemessenen Darrdichten innerhalb der angegebenen Bereichen liegen, ausser jene des Accoya-Holzes (WAGENFÜHR, 1996).

Tabelle 7: Darrdichten verschiedener Holzarten aus WAGENFÜHR (WAGENFÜHR, 1996).

Holztyp	<i>Picea abies</i>	3-Schichtplatte	Blockholzplatte	<i>Larix decidua</i>	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus robur</i>	Accoya-Holz
Darrdichte [g/cm^3]	0.3...0.43...0.64	-	-	0.4...0.55...0.82	0.49...0.68...0.88	0.39...0.65...0.93	0.36...0.43

3.3.2 Ausgleichsfeuchten und Sorptionsisothermen

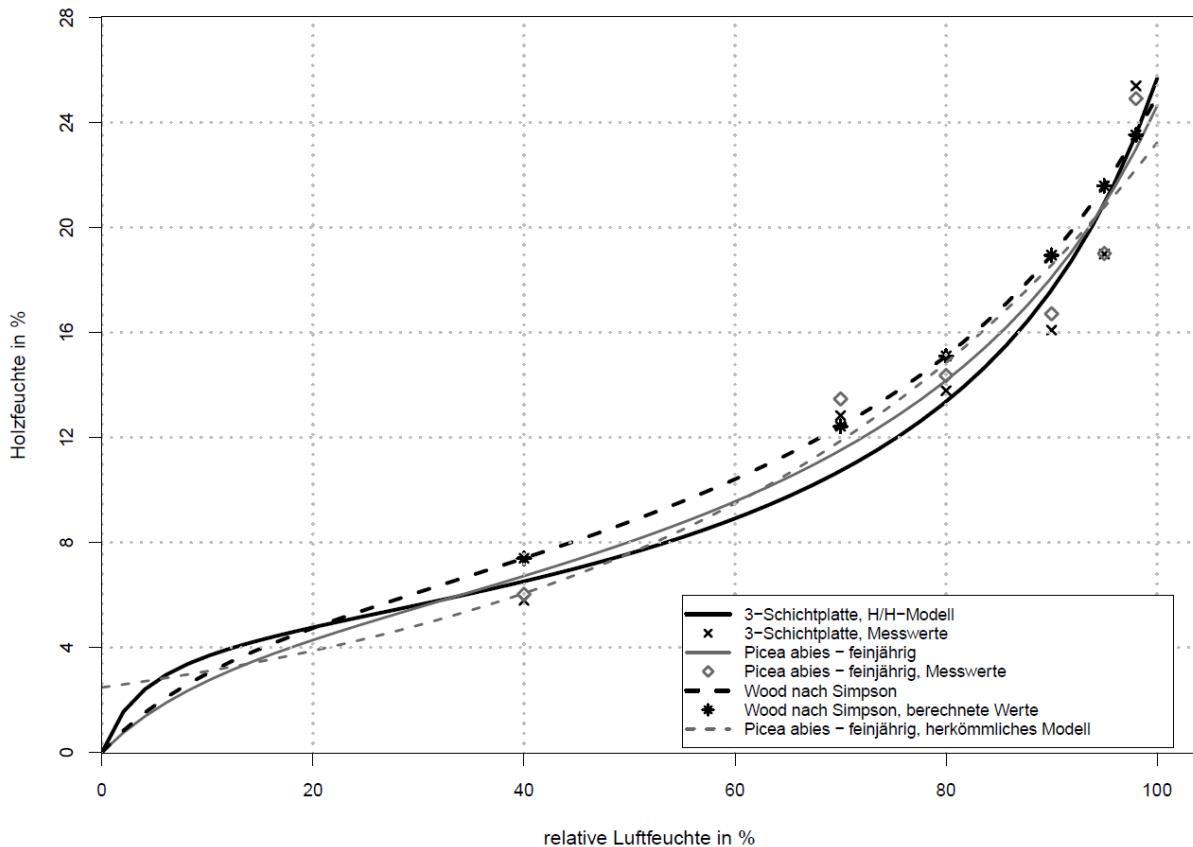


Abbildung 3.16: Vergleich der Sorptionsisothermen von der Dreischichtplatte nach H/H-Modell mit Literaturwert von SIMSPON und Picea abies – feinjährig, H/H-Modell und herkömmliches Modell, bei 20°C Lufttemperatur.

Die Abbildung 3.16 bildet die Sorptionsisothermen der Dreischichtplatte und der feinjährigen Fichte (*Picea abies* L. KARST) nach dem H/H-Modell bei einer Temperatur von 20°C ab. Diese Graphen stellen nicht lineare Regressionskurven aus den entsprechenden gemittelten Messwerten an den Positionen 40%, 70%, 80%, 90%, 95% und 98% relativer Luftfeuchte dar und wurden mit Hilfe der Gleichung 3.4 und dem Statistikprogramm R generiert.

Zum Vergleich mit dem herkömmlichen Modell von Schnider ist das verwendete H/H-Modell anhand der Vergleichsholzart, der feinjährigen Fichte (*Picea abies* L. KARST), dargestellt. Ebenfalls hier wurde auf die gemittelten Messwerte an den vorhin erwähnten Positionen zurückgegriffen. Zusätzlich zeigt der Plot eine Vergleichssorptionsisotherme des Materials Wood (Holz allgemein), der aus Literaturwerten von SIMSPON berechnet wurde (SIMSPON, 1973).

Die verwendeten Mittelwerte der Ausgleichsfeuchten und die Gleichgewichtskoeffizienten, sowie Parameter der Regressionskurven, sind in der Tabelle 8, respektive Tabelle 9, auffindbar.

Auffällig auf der Abbildung 3.16 ist der sehr ähnliche Verlauf der beiden Sorptionsisothermen der Fichte (*Picea abies* L. KARST) und des Holzes nach SIMSPON, wobei erstere tendenziell auf einem tieferen Niveau verläuft. An der Kurve der Dreischichtplatte, nach dem H/H-Modell, ist die holztypische sigmoidische Form von Sorptionsisothermen sehr gut erkennbar, während die Regressionskurve nach dem herkömmlichen Modell eher einer flachen exponentiell wachsenden Kurve entspricht.

Die Messwerte, in der Abbildung als Punkte dargestellt, weichen bei allen Sorptionsisothermen mehr oder weniger stark von deren Regressionskurve ab, ausser jene von SIMPSON, die alle exakt auf der Linie liegen.

Tabelle 8: Gemittelte Ausgleichsfeuchten der Dreischicht- und Blockholzplatte bei den verschiedenen Klimabedingungen.

Klima		3-Schichtplatte			Blockholzplatte			Picea abies - feinjährig		
Temperatur	rel. Feuchte	Holzfeuchte	s	v	Holzfeuchte	s	v	Holzfeuchte	s	v
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	80	15.02	0.24	1.63	15.55	0.20	1.28	15.75	0.21	1.33
	85	16.52	0.44	2.69	17.25	0.15	0.87	17.12	0.29	1.69
	90	16.99	0.47	2.79	18.05	0.36	1.97	17.85	0.44	2.46
15	40	5.84	0.10	1.73	6.00	0.10	1.62	6.08	0.21	3.45
	70	13.47	0.23	1.73	14.19	0.16	1.13	14.22	0.22	1.55
	80	14.33	0.27	1.86	15.14	0.17	1.16	14.93	0.22	1.47
	90	16.31	0.38	2.32	17.47	0.22	1.25	17.20	0.35	2.03
20	40	5.79	0.10	1.72	5.95	0.09	1.57	6.02	0.21	3.49
	70	12.83	0.19	1.47	13.52	0.15	1.12	13.47	0.15	1.11
	80	13.78	0.28	2.02	14.59	0.43	2.94	14.36	0.20	1.39
	90	16.09	0.31	1.93	17.07	0.21	1.24	16.71	0.28	1.68
	95	18.99	0.81	4.29	19.28	0.69	3.59	19.01	0.81	4.26
	98	25.39	0.79	3.10	26.38	0.81	3.08	24.91	0.73	2.93
25	40	7.60	0.11	1.43	7.93	0.10	1.21	8.07	0.27	3.34
	70	11.40	0.16	1.37	11.61	0.15	1.27	11.63	0.15	1.29
	80	12.43	0.15	1.21	12.87	0.16	1.21	13.17	0.21	1.59
	90	16.06	0.36	2.25	16.83	0.29	1.74	16.72	0.33	1.97
	95	18.18	0.47	2.59	18.62	0.21	1.11	18.43	0.46	2.50

s = Standardabweichung

v = Variationskoeffizient

In der Tabelle 8 sind die gemittelten Ausgleichsfeuchten der Dreischicht- und Blockholzplatte, sowie der feinjährigen Fichte (*Picea abies* L. KARST), in Abhängigkeit der Temperatur und relativen Luftfeuchte dargestellt. Dazu sind die jeweiligen Standardabweichungen und Variationskoeffizient. Die Angaben zu den restlichen Holztypen sind im Anhang im Abschnitt 2.1 hinterlegt.

Tabelle 9: Verwendete Gleichgewichtskoeffizienten und Parameter für die Sorptionsisothermen, bzw. Regressionskurven, nach dem H/H-Modell und dem herkömmlichen Modell von Schnider verschiedener Materialien.

Temperatur	Holztyp	ID	H/H-Modell				herkömmliches Modell		
			α	β	M_p	s_r	a	b	s_r
[°C]									
10	3-Schichtplatte	1c	-	-	-	-	5.7899	0.01208	0.4405
	Blockholzplatte	1d	-	-	-	-	4.867831	0.014659	0.4069
15	3-Schichtplatte	1c	-	-	-	-	3.39709	0.01791	1.453
	Blockholzplatte	1d	-	-	-	-	3.409219	0.018601	1.518
20	Picea abies	1a	8.2073	0.773	311.996	2.121	2.474635	0.022396	2.039
	3-Schichtplatte	1c	27.3027	0.8183	382.737	2.209	2.04268	0.024409	2.272
	Blockholzplatte	1d	12.4471	0.80155	340.07041	2.439	2.242728	0.023814	2.386
	Wood (Simspon)	-	8.32	0.75	278	0	-	-	-
25	3-Schichtplatte	1c	46.71607	0.72434	315.85163	0.1691	3.770698	0.016316	0.5405
	Blockholzplatte	1d	86.77457	0.72857	311.19752	0.1643	3.912712	0.016258	0.574
	3-Schichtplatte fikt. W.		48.94669	0.83387	432.72065	1.962	-	-	-

α = Gleichgewichtskonstante des hydratisierten Holzes

β = Gleichgewichtskonstante des nichthydratisierten Holzes

M_p = Hypothetisches Molekulargewicht des Holzes

s_r = Standardabweichung der Regressionskurve

a = 1. Parameter

b = 2. Parameter

Die Tabelle 9 zeigt die sich ergebenen und verwendeten Gleichgewichtskoeffizienten und Parameter der Sorptionsisothermen, bzw. der Regressionskurven, bei verschiedenen Temperaturen. Dabei

unterscheidet sie zwischen den zwei untersuchten Modellen, H/H-Modell und herkömmliches Model von Schnider. Zusätzlich zeigt sie die einzelnen Standardabweichungen der berechneten Regressionskurven. Bei den Temperaturen 10°C und 15°C konnte, aufgrund fehlender Messwerte, für die beiden Holzwerkstoffe mit dem H/H-Modell keine Sorptionsisotherme generiert werden, weshalb diese Stellen leer sind.

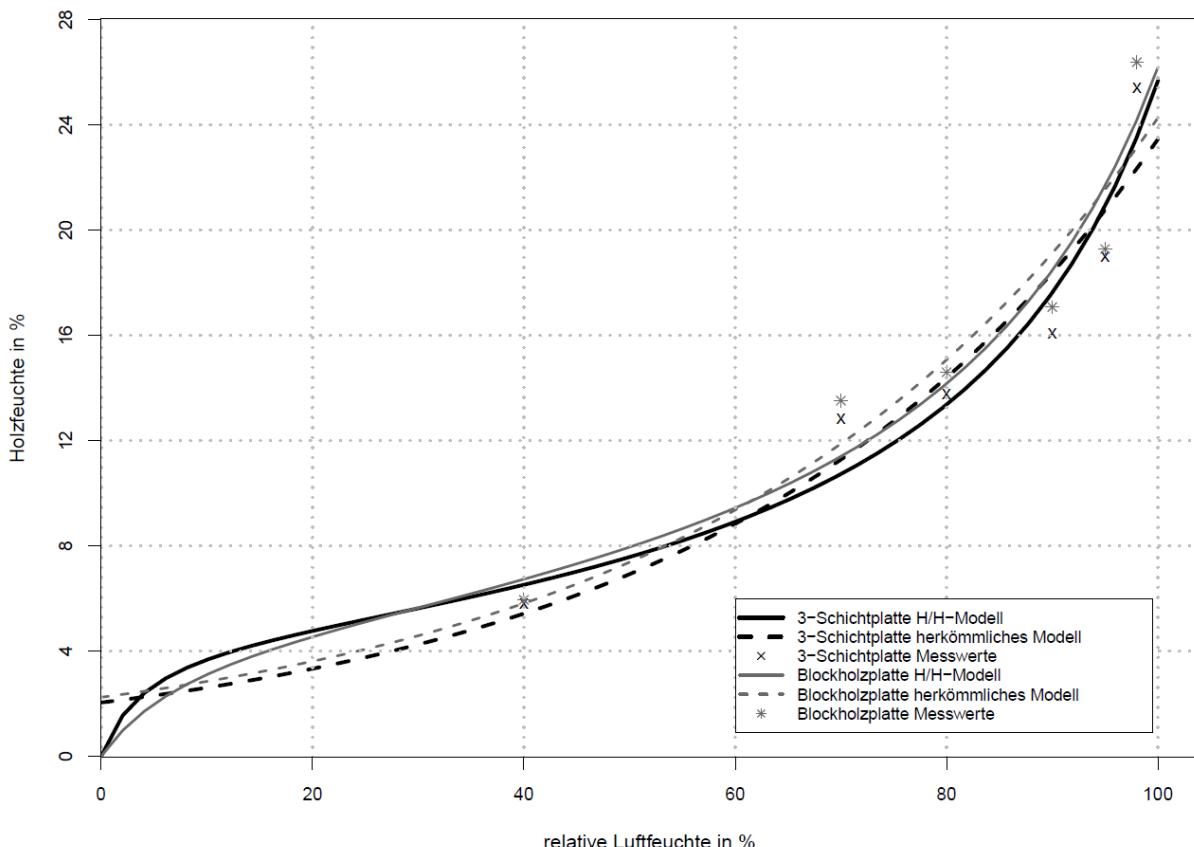


Abbildung 3.17: Sorptionsisothermen der Dreischicht- und Blockholzplatte bei einer Temperatur von 20°C. H/H-Modell im Vergleich mit dem herkömmlichen Modell.

Die Abbildung 3.17 stellt die berechneten Sorptionsisothermen der Dreischicht- und Blockholzplatte bei einer Temperatur von 20°C dar. Dabei sind die durchgezogenen Linien die Regressionskurven nach dem H/H-Modell, während die gestrichelte Kurve die berechnete Regression nach dem herkömmlichen Modell von Schnider aufzeigt. Die gemittelten Messwerte bei den jeweiligen relativen Luftfechten sind als Punkte gekennzeichnet.

Auf dieser Abbildung ist gut sichtbar wie die Regressionskurven nach dem herkömmlichen Modell bei einer relativen Luftfeuchte von 0% bereits eine Holzfeuchte von ca. 2% aufweisen und ab da exponentiell ansteigen. Im Verlauf der Feuchezunahme befindet sie sich dabei anfangs unterhalb und ab einem Wert von ca. 60% relative Luftfeuchte oberhalb der Sorptionsisothermen nach dem H/H-Modell. Ihre freie Wassersättigung erreichen sie bei einer Holzfeuchte von knapp 24%. Dieser Wert liegt zwischen 1% und 2% unterhalb der freien Wassersättigung nach dem H/H-Modell.

Analog zu diesem Diagramm ist im Anhang die Abbildung 2.5 mit den Sorptionsisothermen bei 25°C vorzufinden.

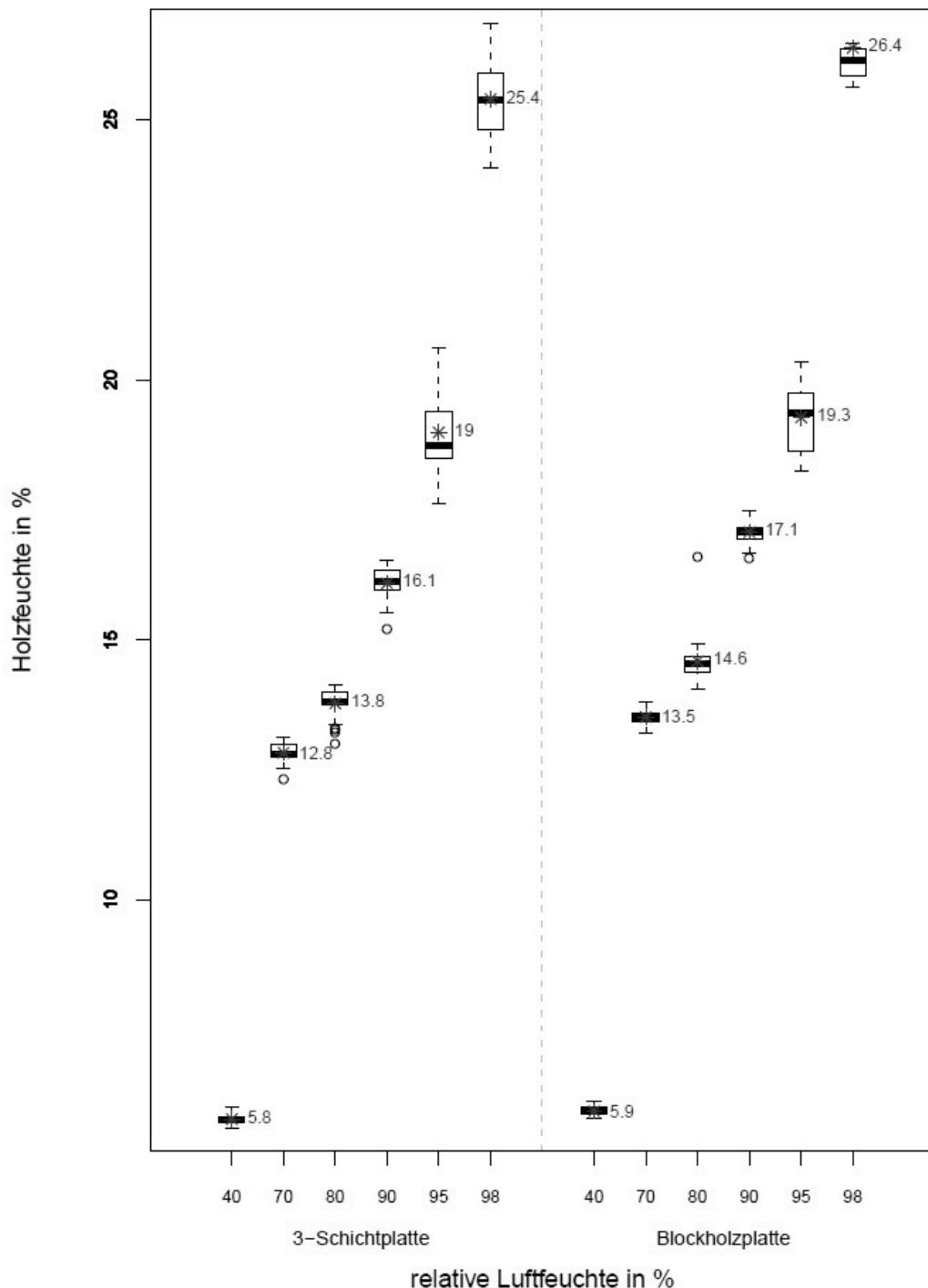


Abbildung 3.18: Boxplot der berechneten Holzfeuchten der Dreischicht- und Blockholzplatte bei 20°C und die entsprechenden Mittelwerte.

In der Abbildung 3.18 sind die Boxplots der Ausgleichsfeuchten von Dreischicht- und Blockholzplatten bei einer Temperatur von 20°C zu sehen. Neben den Boxplots zeigen auf der Abbildung die kleinen Sternchen wiederum die einzelnen gemittelten Holzfeuchten nach der Tabelle 6.

An diesen Boxplots, als Gesamtbild gesehen, ist die Andeutung an eine S-förmige Holzfeuchte-zunahme gut erkennbar. Gut sichtbar am Gesamtbild ist ebenfalls der Sprung der Holzfeuchte zwischen 95% und 98% relativer Luftfeuchte.

Die Mediane der Dreischicht- und Blockholzplatte bei 95% relativer Luftfeuchte weichen etwas von der Mitte der Boxen ab. Zusätzlich liegt der Mittelwert der Ausgleichsfeuchte der Blockholzplatte bei 98% relativer Luftfeuchte sichtbar über der Box. Einzelne Ausreisser sind bei der Dreischichtplatte bei 70%, 80% und 90% relativer Luftfeuchte zu verzeichnen. Die Blockholzplatte dagegen weist zwei Ausreisser bei einer relativen Luftfeuchte von 80% und 90% auf.

Die restlichen Boxplots zu den Holzfeuchten anderer Temperaturbereichen können im Anhang unter dem Abschnitt 2.2 nachgeschlagen werden.

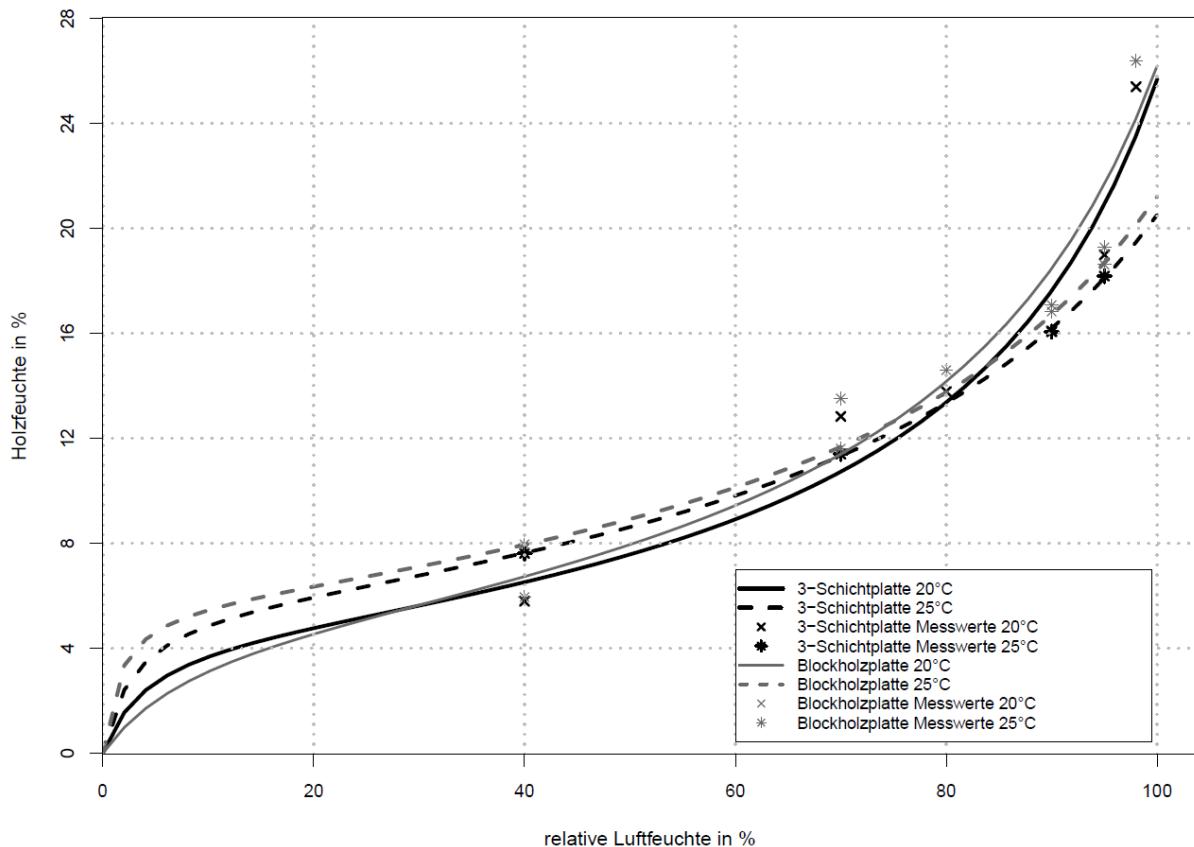


Abbildung 3.19: Vergleich der Sorptionsisothermen von Dreischicht- und Blockholzplatten bei 20°C und 25°C Lufttemperatur.

Auf der Abbildung 3.19 sind die Sorptionsisothermen der Dreischicht- und Blockholzplatte bei Temperaturen von 20°C und 25°C ersichtlich. Die Abbildung zeigt auf, dass bei der Temperatur von 25°C die sich einstellende Holzfeuchte bei beiden Holzwerkstoffen anfangs deutlich höher und bei freier Wassersättigung ersichtlich tiefer liegt als bei einer Temperatur von 20°C. Der Schnittpunkt der Kurven liegt im Bereich von 75% bis 80% relativer Luftfeuchte.

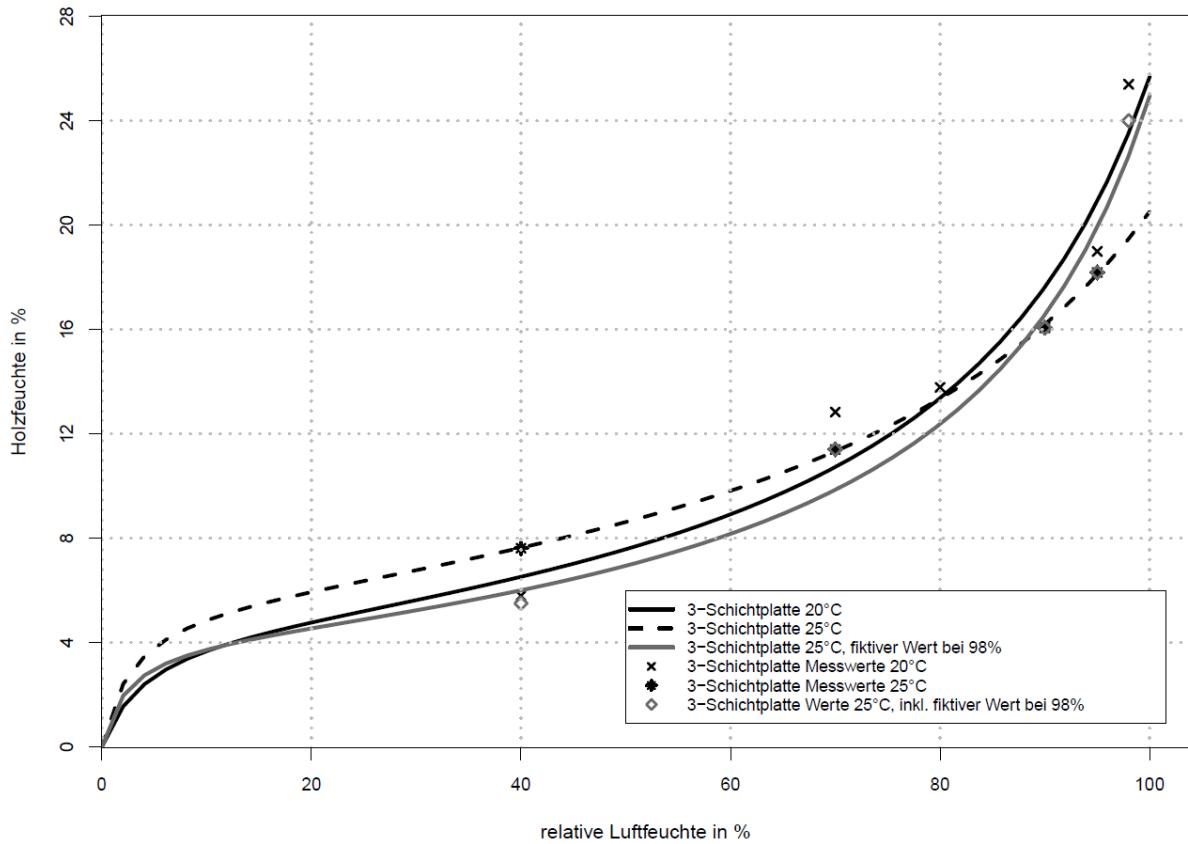


Abbildung 3.20: Generierte Sorptionsisotherme der Dreischichtplatte bei einer Temperatur von 25°C mit fiktivem Wert bei 98% relative Luftfeuchte.

Der Sorptionsisotherme der Dreischichtplatte, bei der Temperatur von 25°C, fehlt der gemittelte Messwert der Ausgleichsfeuchte bei einer relativen Luftfeuchte von 98% (siehe Tabelle 8). Zum Vergleich wurde der gleichen Regressionsgeraden einen fiktiven Wert von 24% Holzfeuchte hinterlegt. Die neue Regressionsgerade berechnet sich nun auch, wie die Sorptionsisothermen bei 20°C, aus den sechs Holzfeuchten bei 40%, 70%, 80%, 90%, 95% und 98% relativer Luftfeuchte.

Die neue Kurve verläuft nun ähnlich wie die Sorptionsisotherme der Dreischichtplatte bei 20°C und erreicht bei freier Wassersättigung eine Holzfeuchte von knapp 25%. Diese Konkretisierung zeigt, wie wichtig ein sechster Messwert für die Ausbildung der Regressionskurve ist.

Für die Berechnung der Holzfeuchte im Flachdach wird deshalb der Algorithmus der Sorptionsisotherme der Dreischichtplatte bei 20°C verwendet. Grund sind die Anzahl Messwerte, vor allem der Mittelwert bei 98% relativer Luftfeuchte, die die typische S-Form einer Sorptionsisotherme von Holz nachbilden lassen. Somit ist der Bereich ab 90% relativer Luftfeuchte für die Berechnung der Holzfeuchte im Flachdach gut abgedeckt und entspricht somit den Sorptionsisothermen ähnlicher Materialien der Literatur.

Ein analoges Prozedere wurde auch bei der Blockholzplatte durchgeführt. Die entsprechende Abbildung 2.6 ist im Anhang abgelegt.

4 Datenanalyse

4.1 Theorieteil – Bauphysikalischer Vorgang im Flachdach und deren Folgen

4.1.1 Funktion der einzelnen Schichten und bauphysikalische Zusammenhänge

Das unbelüftete Flachdach, bei dem die Wärmedämmung innerhalb der Tragwerkkonstruktion liegt, ist bauphysikalisch komplexer als die belüfteten Varianten. Die einzelnen Schichten sind so konzipiert, dass sie den entsprechenden äusserlichen Einwirkungen genügen und reagieren dementsprechend unterschiedlich gegenüber Wärme und Feuchte. Folglich differieren sich Wärmetransporte bezüglich Zeit und Raum über den gesamten Querschnitt.

Die verschiedenen Funktionen der einzelnen Schichten eines unbelüfteten Flachdachs sollen im nächsten Abschnitt am Beispiel des Gebäudeaufbaus der Familie Heinzer (Abbildung 4.1) erläutert und die physikalischen Zusammenhänge erklärt werden.

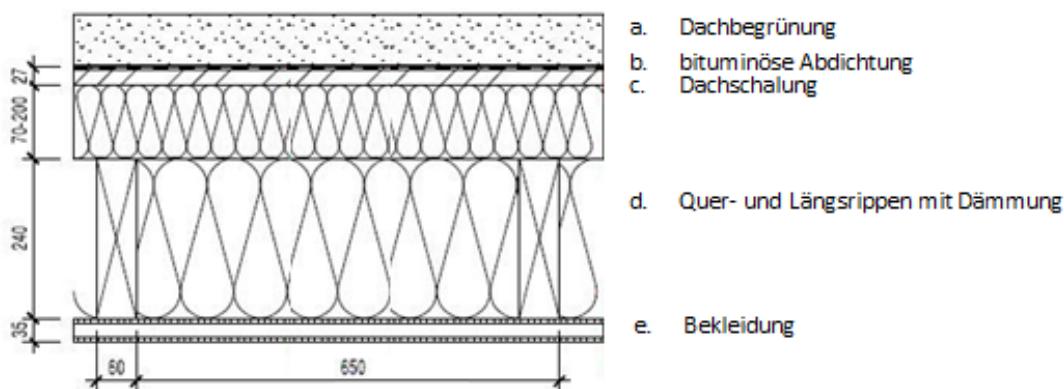


Abbildung 4.1: Aufbau des zu untersuchenden Hohlkastensystems der Familie Heinzer.

a. Dachbegrünung – extensive Begrünung

Die oberste Schicht des Aufbaus besteht aus einer extensiven Dachbegrünung. Sie zeichnet sich durch ihren dünnenschichtigen Aufbau (bis zu 15cm), geringes Gewicht und minimalen Pflegeaufwand aus. Diese Vegetationsform ist zwar nicht als Nutzfläche geeignet, erhält sich aber weitgehend selbst und passt sich auch extremen Standortsbedingungen an.

Die extensive Begrünung muss gleichzeitig alle drei Funktionen von Vegetations-, Filter- und Drainageschicht erfüllen. So übernimmt sie die Aufgabe der Wasser- und Nährstoffspeicherung und dient gleichzeitig der Ableitung von überschüssigem Wasser. Zusätzlich verhindert die Vegetationsschicht das Verschlämmen der Drainageschicht durch eingeschwemmtes Dachsubstrat und ist Wurzelraum. Neben dieser Pufferwirkung schützt die extensive Begrünung zusätzlich die Dachabdichtung (Dachhaut) gegen direkte äussere Umwelteinwirkungen, wie Sonne, Hagel und Schnee.

In bauphysikalischer Hinsicht wirkt die Dachbegrünung durch ihre Masse vor allem ausgleichend gegenüber Temperaturextremen und vermindert die Rückstrahlung. Somit verbessert sich der Wärmedämmwert des Flachdachs und die Luftfeuchte unterhalb der Dachbegrünung bleibt konstanter. Aus der grossen Masse des Substrats resultiert eine zusätzliche Gewichtskraft, welche als Nachteil gewertet werden kann. Diese stellt neben Schnee und Nutzlast hohe statische Anforderungen an die Unterkonstruktion.

Ebenfalls das Dämpfen der Temperaturamplituden kann negative Nebeneffekte mit sich bringen, da die treibende Kraft für die Austrocknung der Konstruktion die Sonne, bzw. deren Strahlen, ist. Die

ungebremst auf die äussere Oberfläche des Flachdaches eintreffenden Sonnenstrahlen erwärmen die Konstruktion und erzeugen im Sommer somit einen Dampfdruck zum Innenraum. Die physikalischen Gesetze versuchen diesen Dampfdruck auszugleichen, wodurch es zu einer Austrocknung nach innen kommt. Durch die Begrünung wird diese treibende Kraft jedoch reduziert und die Konstruktion trocknet möglicherweise nicht ausreichend aus.

b. Bituminöse Dachabdichtung

Unter der Dachbegrünung kommt die Dachabdichtung zu liegen, deren Hauptaufgabe ist, das Eindringen von Niederschlagswasser in den Flachdachaufbau und das Gebäude dauerhaft zu verhindern. Sie muss wasserdicht an Dachdurchstößen, wie Dachabläufe, Lichtkuppeln etc. angeschlossen werden. Zudem soll sie mindestens zweilagig mit durchwurzelungsfesten Polymerbitumen-Abdichtungsbahnen mit Kunststoffvlieseinlage hergestellt sein, damit sie den verschiedenen Beanspruchungen, wie extreme Wetterereignisse und thermische Schwankungen, gewachsen ist. Auch unter Berücksichtigung der Bewegungen der Unterlage soll die Funktion der Dachabdichtung nicht beeinträchtigt werden.

c. Dachschalung

Dachschalungen sind flächenartige Abdeckungen, die die Aufgabe haben die Auf- und Nutzlasten aufzunehmen. In unserem Falle sind das Dacheindeckungen, wie die bituminöse Abdichtung und die Dachbegrünung aber auch umweltbedingte Belastungen, wie Regenwasser und Schnee. Hinzu kommen Nutzlasten durch Reinigungs- und Instandsetzungsarbeiten, denen die Schalung Widerstand leisten muss. Nebst der tragenden Funktion wirkt sie zudem als aussteifendes Element der Unterkonstruktion, die aus Quer- und Längsrippen besteht. Aus diesem Grund werden für die Dachschalung Bretter, Bohlen oder Holzwerkstoffe verwendet. Am Beispiel des Testobjekts ist es die Dreischichtplatte.

Weil die Dachschalung direkt unter der bituminösen Abdichtung liegt, ist sie das feuchtetechnisch meist beanspruchte Element unter der dampfsperrende Schicht und deshalb massgebender Indikator für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit einer Flachdachkonstruktion im Hohlkastensystem.

d. Dämmschicht (Quer- und Längsrippen)

Zwischen den Quer- und Längsrippen liegt die Wärmedämmung. Sie verringert den Wärmefluss im Winter von innen nach aussen und im Sommer von aussen nach innen. Einerseits werden somit Energieverluste gemindert, aber auch temperaturbedingte Dehnungen, Spannungen und Risse in der Dach- und Deckenkonstruktion verringert. In Kombination mit Dampfsperren wird die Entstehung von Kondenswasser innerhalb der Konstruktion vermieden. Die Dämmschichten werden zweilagig mit versetzten Stößen ausgeführt, um durchgehende Fugen zu vermeiden. Das Hauptkriterium für den Einbau des Dämmstoffes ist sicherlich die Wärmeleitfähigkeit. Aber auch Charakteristika wie Temperatur- und Frostbeständigkeit, Brennbarkeit, Druckfestigkeit und das Verhalten gegenüber Feuchte sind mitentscheidend für die Wahl eines Dämmstoffes.

Im Flachdach des zu untersuchenden Zweifamilienhauses wurden Mineral- und Holzfaserdämmung verbaut. Die Mineralfaserdämmstoffe werden aus Mineralschmelze künstlicher Zusammensetzung, aus Basaltschmelzen oder Hochofenschlacken gewonnen und weisen sehr gute Eigenschaften hinsichtlich Temperaturbeständigkeit, Brennbarkeit, Diffusionsoffenheit und Verarbeitung auf. Sie verfügen jedoch nicht immer über eine hohe Druckfestigkeit, weshalb Punktbelastungen oder Belastungswechsel möglichst zu vermeiden sind. Ebenfalls verlieren sie unter längerer Feuchteinwirkung an Festigkeit und an Dämmvermögen, obwohl sie feuchteständig sind.

Weichfaserdämmstoffe werden aus zerfaserten Holzabfällen durch Pressung unter Dampfeinwirkung hergestellt. Die Fasern können bis zu einer gewissen Festigkeit ohne fremde Bindemittel verfestigt werden. Platten mit und ohne fremde Bindemittel sind feuchteempfindlich und können sich durch Wasseraufnahme verziehen.

e. Bekleidung

Die Ausführung der raumseitigen, dampfbremsenden Ebene nimmt bei unbelüfteten Flachdächer eine besonders wichtige Rolle ein. Mit der Auswahl der richtigen Dampfbremse, wird versucht eine Begrenzung der Dampfdiffusion in das Bauteil hinein zu erreichen. Hierbei wird häufig auf Materialien mit einem s_d -Wert zwischen 2 m und 5 m zurück gegriffen.

Somit handelt es sich bei Flachdachaufbauten mit der Tragkonstruktion innerhalb der Dämmschicht um eine nach aussen dampfdichtere Konstruktion. Da bei Dachkonstruktionen immer damit zu rechnen ist, dass es zu unplanmässigen Feuchteeinträgen, wie zum Beispiel durch Konvektion, kommt, versucht man über den geringen Sperrwert der Dampfbremse auf der Innenseite im Sommer ein möglichst grosses Dampfgefälle zur Raumseite hin zu erreichen. Somit kann gewährleistet werden, dass ein gewisses Rücktrocknungsvermögen entsteht und die eingedrungene Feuchte wieder zum Innenraum austrocknen kann. Dieser Effekt wird auch als Umkehrdiffusion bezeichnet. Hätte aber die dampfbremende Schicht gegen den Innenraum einen zu hohen s_d -Wert, würden die oberhalb dieser Schicht liegenden Bauteile, hier die Dreischichtplatte von Pfeifer, Dämmung und Tragkonstruktion aus Vollholz, über die Jahre auffeuchten und Schaden nehmen.

Durch die Verwendung feuchtevariabler Dampfbremsen kann dieser Umkehreffekt im Sommer noch verstärkt werden. Als feuchtevariabel gelten die speziell dafür entwickelten Kunststofffolien und Dampfbremspappen, aber auch viele Holzwerkstoffe, wie die Blockholzplatte der Pius Schuler AG, welche in diesem Aufbau verwendet wurde. Diese feuchtevariablen Materialien verändern ihren Diffusionswert mit der Materialfeuchte, bzw. mit der relativen Feuchte ihrer Umgebungsluft. So nimmt der Dampfdiffusionswiderstand im Winter, bei tendenziell tieferen relativen Luftfeuchten, zu und es dringt somit weniger Wasserdampf in die Konstruktion ein. Im Sommer, wenn die relativen Luftfeuchten höher zu liegen kommen, nimmt der Widerstand gegen Dampfdiffusion ab und die Konstruktion kann raumseitig gut austrocknen.

4.1.2 Schadensverursachende Mikroorganismen

Der mikrobielle Abbau von organischem Material, wie z.B. Holz und Blättern, ist ein natürlicher und notwendiger Prozess im Stoffkreislauf. So werden komplexe Makromoleküle, wie die Zellulose, in kleinere, einfachere Moleküle zerlegt und in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Dieser Abbauvorgang findet überall dort statt, wo Temperatur- und Feuchteverhältnisse die Entwicklung von Mikroorganismen erlauben. Folglich wird auch verbautes Holz von Mikroorganismen angegriffen und abgebaut. Die Voraussetzung ist die Anwesenheit einer genügend hohen Holzfeuchte. Pilze sind von grösster Bedeutung für den Abbau von Holz und Holzwerkstoffen in Innenräumen. Die Einteilung der holzbewohnenden Pilze nach ihrer Wirkung auf das Holz ist, eine der anschaulichsten Varianten. So unterscheidet man zwei Hauptgruppen, die holzverfärbenden und die holzzerstörenden Pilze. Wie schon die Bezeichnung aussagt, stellen die holzverfärbenden Pilze in erster Linie lediglich ein ästhetisches Problem dar. Einer ihrer bekanntesten Vertreter ist der Schimmelpilz. Die holzzerstörenden Pilze bedeuten jedoch einen weitgehend substanziellen Verlust an Holzmasse und folglich auch an Materialfestigkeit. Als die bekanntesten holzzerstörenden Pilze gelten die Moderfäule, sowie die Braun- und Weissfäule (Abbildung 4.2).

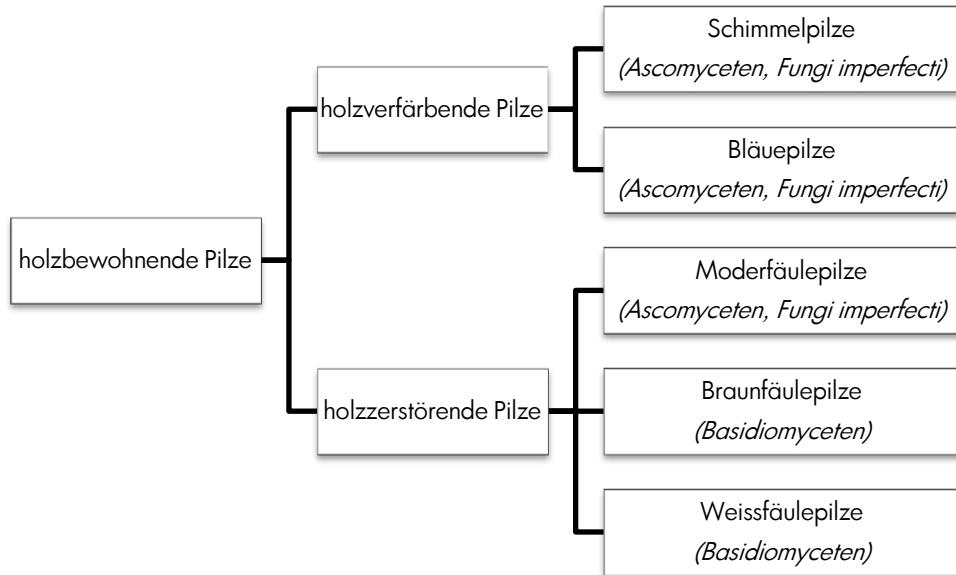


Abbildung 4.2: Einteilung der holzbewohnenden Pilze nach ihrem Schadensbild.

Obwohl Schimmelpilze in der Regel Holzbestandteile, wie Lignin und Zellulose nicht abbauen und somit die physikalischen Eigenschaften des Holzes nicht verändern, wird in der Bauphysik oftmals nur von möglichem Schimmelpilzbefall, bzw. Schimmelpilzfreiheit gesprochen und die holzzerstörenden Pilze vergessen. Dies, weil das Auftreten von Schimmelpilzen ein Indiz ist, dass die Wachstumsbedingungen für holzabbauende Mikroorganismen gegeben sind. Somit gilt der Schimmelpilzbefall bei Holz als Indikator eines erhöhten Feuchtigkeitszustandes, der auch das Wachstum anderer, gefährlicherer Pilze ermöglichen kann.

Nach ZÜRCHER & FRANK wird der mikrobielle Befall von Holz durch Pilze, vor allem aber durch den Hausschimmelpilz, durch folgende Faktoren massgebend beeinflusst (ZÜRCHER & FRANK, 2010).

Wachstumsbeeinflussende Faktoren bei Schimmelpilzen						
Feuchte:	pH-Wert:	Nährstoffe:	Temperatur:	Sauerstoff:	Licht:	Zeit:
Wachstums- grenze $\varphi=80-85\%$ Wachstums- optimum $\varphi=90-98\%$	Opt. Bereich zwischen 4.5 und 6.5	Minimal, Staub reicht völlig aus	Mindesttemp. $\theta = 0^\circ\text{C}$ Optimaltemp. $\theta = 30-45^\circ\text{C}$	geringe Ansprüche	nicht erforderlich	bei $\varphi \approx 90\%$ 1-2 Wochen $\varphi \approx 85\%$ 2-3 Wochen $\varphi \approx 80\%$ 5-6 Wochen

Abbildung 4.3: Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze und deren Optima nach ZÜRCHER & FRANK (ZÜRCHER & FRANK, 2010).

Auf die Zerstörung des Holzes durch tierische Holzschädlinge, also holzzerstörende Insekten, wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da der Feuchtezustand einer Konstruktion kein massgebender Faktor für deren Auftreten ist und somit nicht über den Feuchtehaushalt reguliert werden kann.

4.2 Material und Methodik

Die im Flachdach eingebaute Messsensorik liefert bei den Messparametern, relative Luftfeuchte und Temperatur, alle zwei Minuten einen Messwert. Die Holzfeuchte wiederum kann aufgrund technischer Grenzen lediglich alle zwei Stunden aufgezeichnet werden. Trotzdem sind so über die letzten zwei Jahre über eine Million Messwerte zusammengekommen, die ausgewertet den Feuchte- und Wärmefluss durch die ganze Konstruktion abbilden und deren Reaktion beschreiben sollen.

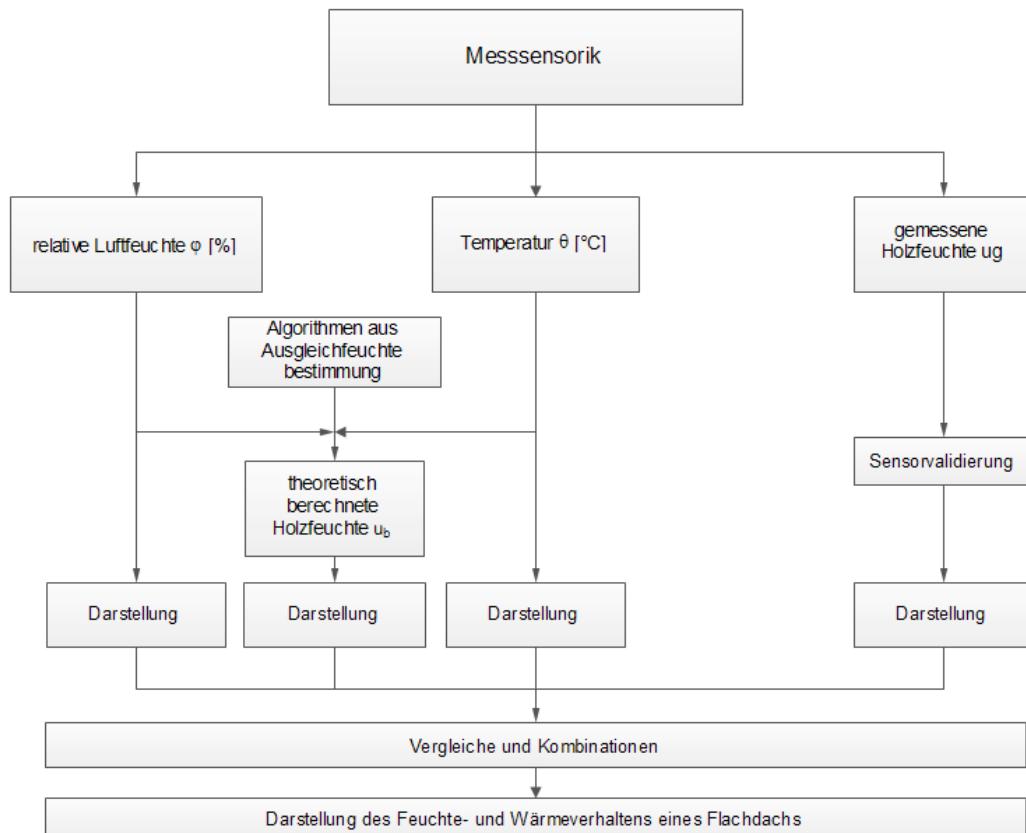


Abbildung 4.4: Ablauf der Datenanalyse

Die im Abschnitt 2.7 beschriebenen Sensorpositionen und gemessenen bauphysikalischen Parameter haben zum Zweck, die durch die ganze Konstruktion durchgehend verlaufenden Größen, relative Luftfeuchte φ und Temperatur θ , direkt über der Zeit in Grafiken darzustellen. Aus diesen beiden gemessenen Größen kann zusätzlich die theoretische Holzfeuchte u_b berechnet werden, wie die Abbildung 4.4 zeigt. Hierfür sind jedoch die berechneten Algorithmen der Sorptionsisothermen der verbauten Holzwerkstoffen aus dem Kapitel 3 nötig. Somit kann auch die theoretisch berechnete Holzfeuchte u_b in Abhängigkeit der Zeit dargestellt werden und zum Beispiel mit der im Flachdach gemessenen Holzfeuchte u_g verglichen werden. Da aber die Aufzeichnungen der Holzfeuchtemessdaten unzuverlässig verliefen und es technisch bedingte Lücken in den Holzfeuchtemessdaten gab, war eine zusätzliche Sensorvalidierung im Labor notwendig. Diese Sensorvalidierung ermöglicht schlussendlich die Genauigkeit der gemessenen Holzfeuchte u_g zu beurteilen.

Diese vier, teils neu entstandenen, physikalischen Parameter können am Ende miteinander verglichen und untereinander wiederum kombiniert werden. Somit kann der Feuchte- und Wärmetransport, bzw. das Verhalten der Konstruktion gegenüber Feuchte und Wärme, spezifisch in diesem einen Flachdach grafisch dargestellt und interpretiert werden.

4.2.1 Theoretisch berechnete Holzfeuchte u_b

Die berechnete Holzfeuchte u_b ist ein theoretischer Wert, der von den Umgebungsbedingungen, relative Luftfeuchte und Temperatur, bestimmt wird. In diesem Fall sind die Sorptionsisothermen (Abschnitt 3.3) des jeweiligen Materials nötig, die das Verhalten gegenüber der herrschenden relativen Luftfeuchte, bei definierter Temperatur beschreiben. Diese angenäherten Kurven sind die grafische Darstellung von den zuvor bestimmten Funktionen, die für jegliche relative Luftfeuchte eine sich einstellende Holzfeuchte u_b berechnen lässt. Da nach HÄUPL der Einfluss der Temperatur auf die Materialfeuchte nur sehr gering ist und somit für die Belangen der Bauphysik im Holzbau ausser Betracht bleiben kann, können die im Bauteil herrschenden Bedingungen in Temperaturgruppen von 10 °C, 15 °C, 20 °C und 25 °C eingeteilt werden (HÄUPL, 2008). Diese Gruppen bekommen jeweils ihre eigene Funktion zur Beschreibung der Materialfeuchte zugewiesen.

4.2.2 Gemessene Holzfeuchte u_g und Sensorvalidierung

Die gemessene Holzfeuchte u_g bezieht sich direkt auf die Ausgleichsfeuchte des Holzes, welche über das Leitwertprinzip, mit Hilfe von Holzfeuchtesonden, für Langzeitmessungen [5] bestimmt wird. Die Holzfeuchtesonden werden an ein gewöhnliches kompaktes Universalmessgerät [6] angeschlossen. Erfahrungsgemäss muss bei dieser Messmethode mit vielen Ausfällen gerechnet werden. Aus diesem Grund wurde entschieden eine Sensorvalidierung durchzuführen, die die Zuverlässigkeit der Messinstrumente bestätigen oder allenfalls die Messfehler aufdecken soll. Im folgenden Abschnitt soll nun das Vorgehen dieser Sensorvalidierung erläutert werden

4.2.3 Sensorvalidierung

Bei der Validierung der Holzfeuchtesonden [5] (Abbildung 4.5) wird versucht eine möglichst realitätsnahe und nachvollziehbare Feuchtezunahme der Dreischichtplatte von Pfeifer zu simulieren und zu dokumentieren.



Abbildung 4.5: Holzfeuchtesonden für Langzeitmessungen FHA 636 MF10 des Herstellers Ahlborn [5].



Abbildung 4.6: Installierte Klimabox mit Laptop [8] für die kontinuierliche Gewichtsabnahme.

In einer Klimabox soll ein zuvor auf den Darrzustand getrocknetes Prüfstück einem Klima mit annähernd 100% relative Luftfeuchte und konstanter Temperatur von 20°C ausgesetzt werden. Von diesem Prüfstück werden während der Validierung fortlaufend die Masse mittels einer Waage [3],

sowie die Holzfeuchte mit den eingesetzten Holzfeuchtesonden gemessen. Die parallel zur direkten Holzfeuchtemessung laufende Gewichtsabnahme, ermöglicht zu einem späteren Zeitpunkt die Berechnung des Wasseranteils in der Dreischichtplatte mittels der Gleichung 3.2. Diese berechnete Holzfeuchte kann nun mit der gemessenen Holzfeuchte verglichen und somit die Genauigkeit dieser Holzfeuchtesonden beurteilt werden.

Methodik

Insgesamt werden zwei von den sechs eingebauten Holzfeuchtesonden [5] validiert. Es wurden absichtlich jene Holzfeuchtesonden gewählt, die unregelmässig zuverlässige Messwerte lieferten. Somit führt der Ausbau der Sensoren zu keinem Verlust von projektrelevanten Daten. Hierbei handelt es sich um die Holzfeuchtesonde 2-W-G3 im Bereich der Weichfaserdämmung (W) in der Schicht G3 der Messlinie 2, sowie um die Sonde 2-Mi-G3 in der Schicht G3 der Messlinie 2 im Bereich der innenliegenden Mineraldämmung (Mi) (Abbildung 2.18). Die Messspitzen der Messkabel der Holzfeuchtesonden bestehen aus zwei Edelstahl-Stockschrauben und werden in einem Abstand von 2.5cm quer zur Holzfaserrichtung in das Holz geschraubt (Abbildung 4.7). Das restliche Zubehör, das kompakte Universalmessgerät [6] und Verbindungskabel, liegen auf der Dreischichtplatte auf.

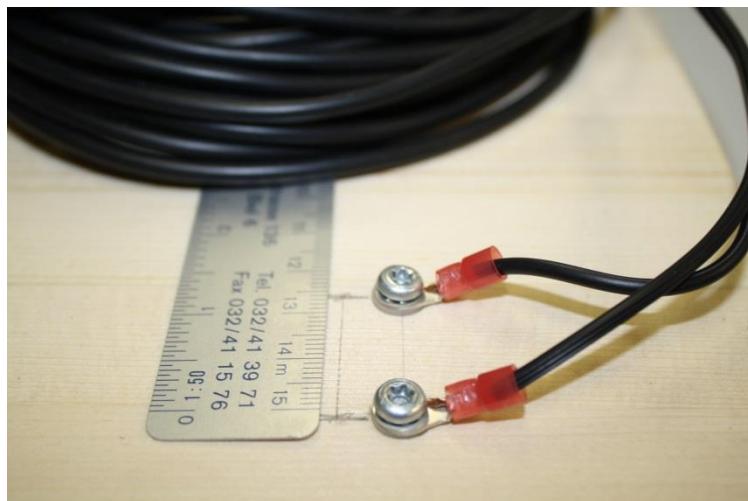


Abbildung 4.7: Eingeschraubte Messspitzen der Holzfeuchtesonden [5].

Die Dreischichtplatte mit der Messapparatur wird auf der Waage [3] positioniert, die wiederum in die Klimabox eingeschlossen und für die Aufzeichnung der Werte über ein Netzkabel mit einem Laptop [8] verbunden wird.

Für die Klimatisierung der Box auf annähernde 100 % relative Luftfeuchte wird ein Wasserbad mit vollentsalztem Wasser verwendet. Der Deckel wird zusätzlich mittels eines Klebebands verschlossen, sodass die Klimabox komplett abgedichtet ist. Damit aber die Waage und die oben aufliegende Dreischichtplatte mit der zugehörigen Messapparatur nicht im freien Wasser stehen, muss ein Lochgitter oberhalb des Wasserspiegels angebracht werden (Abbildung 4.8). Auf dieses Lochgitter kann die ganze Vorrichtung positioniert und die für die Elektronik benötigten Kabel durch ein Loch in der Rückwand gezogen werden (Abbildung 4.9). Bei der Installation der Kabel muss darauf geachtet werden, dass diese keinen verfälschenden Einfluss auf die Gewichtsabnahme haben. Wären diese zum Beispiel lose, könnten Berührungen am Kabel ausserhalb der Box bis in den Innenraum geleitet werden, wo sie die Konstanz des Gewichts der Prüfvorrichtung stören. Ein in der Klimabox fest eingebauter Ventilator sorgt alle halbe Stunde während 15 Minuten für die nötige Luftumwälzung.

Dieses zyklische Verfahren hat zum Zweck, dass sich das Klima in der Box durch die Wärmebelastung des Ventilators nicht zusätzlich erhitzt. Zusätzlich zur Messapparatur wird ein USB-Datenlogger von LASCAR electronics [9] zur Messung der relativen Luftfeuchte und Temperatur dazugelegt, um die Klimabedingungen in der Box zu bestimmen.

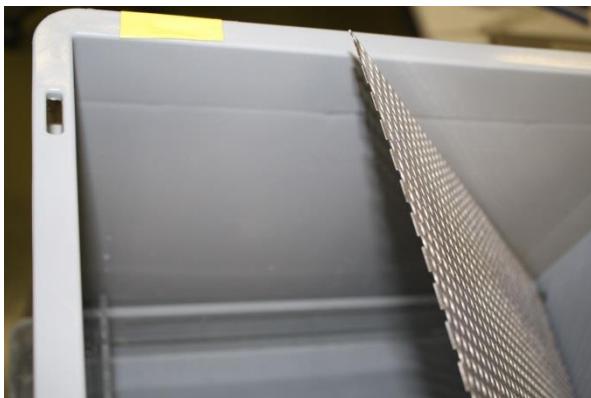


Abbildung 4.8: Das Lochgitter hält den Prüfkörper und die Messtechnik über dem Wasserspiegel.



Abbildung 4.9: Der Prüfkörper und die darauf liegenden Holzfeuchtesonden [5], inklusive Universalmessgerät [6] liegen auf der Waage [3].

Das Messintervall des USB-Datenloggers und der Waage war 5 Minuten. Das an den Holzfeuchtesonden angeschlossene Universalmessgerät wiederum liefert Werte in einem Messintervall von 120 Minuten. Dieses geschaltete Messintervall verhindert eine Materialversalzung, sprich –austrocknung, die die Holzfeuchte massgebend beeinflussen kann.

4.2.4 Darstellung der Daten mittels Diagrammen

Die Aufzeichnung der Werte selbst ist lediglich der erste Schritt zur Beschreibung des Wärme- und Feuchteflusses durch eine Konstruktion. Erst die zu einem späteren Zeitpunkt ausgeführten Auswertungen der Messparameter zeigen das Verhalten der Konstruktion gegenüber Wärme und Feuchte so auf, dass sie interpretierbar werden. Eine der bevorzugtesten Darstellungsformen ist die Betrachtung der einzelnen bauphysikalischen Parameter über den Verlauf der Zeit. Andererseits können einzelne Parameter in Abhängigkeit anderer physikalischen Größen wiedergegeben werden. Aber auch sogenannte Scatterplots, die die einzelnen Messwerte zweier physikalischen Größen innerhalb einer definierten Zeitperiode als Punktewolke aufzeigt, ist ein nützliches Mittel zur Darstellung des herrschenden Klimas in der Konstruktion. So können zum Beispiel anhand einer Grenzkurve die Messwerte hervorgehoben werden, die den gestellten Bedingungen dieser Funktion nicht genügen.

Die bis anhin aufgezählten Darstellungsformen geben lediglich die aufgezeichneten Daten der Vorgänge in der Konstruktion von der Vergangenheit bis zum heutigen Tage realitätsgerecht wieder. Heutzutage existieren aber dank computerunterstützten Statistikprogrammen mit diversen Berechnungsmodellen (R, MATLAB oder origin) Möglichkeiten, Aussagen über die künftige Entwicklung laufender Prozesse zu generieren. So kann zum Beispiel mittels folgender asymptotisch abflachender Sinusfunktion die Auffeuchtung innerhalb des Flachdachs beschrieben und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch vorausgesagt werden (Gleichung 4.1).

$$u(t) = t^\alpha + \sin(t \cdot \beta + \gamma) \cdot \delta + \varepsilon \quad (4.1)$$

$u(t)$ = Materialfeuchte in Abhängigkeit der Zeit in %

t = Zeit

α = 1. Parameter

β = 2. Parameter

γ = 3. Parameter

δ = 4. Parameter

ε = 5. Parameter

Je mehr Messdaten in diese Berechnungsmodelle integriert werden können, desto genauer werden die vorausgesagten Verläufe. Dennoch sind diese Vorhersagen stets mit Vorsicht zu genießen, da allfällige Anomalien (Aufzeichnungsunterbrüche, -sprünge und -störungen) nur sehr schwer berücksichtigt und klimatische Abweichungen nur mit einer grossen Datenmenge ausgeglichen werden können.

4.2.5 Schimmelpilzmodell nach HUKKA & VIITANEN

Um das Schimmelpilzwachstum vorhersagen zu können, sind in den letzten Jahren verschiedene Schimmelpilzmodelle aus umfangreichen Laboruntersuchungen entwickelt worden. Massgebende Faktoren für solche Modelle sind z.B. die relative Luftfeuchte an der Materialoberfläche, die Temperatur und die Art des Materials. Die mathematische Beschreibung des Schimmelpilzwachstums kann für hygrothermische Simulationen oder Scatterplots verwendet werden. Das in dieser Arbeit für die Scatterplots angewendete Modell stammt von HUKKA & VIITANEN und basiert auf der Dauer der Klimbeanspruchung (HUKKA & VIITANEN, 1999). Dabei wurde besondere Aufmerksamkeit auf die sogenannte Reaktionszeit gelegt, bei der sich unter unterschiedlichen Temperaturen- und Feuchteverhältnissen Schimmelpilze bilden. Dieses Modell beruht auf grossen Laboruntersuchungen an Kiefern- (*Pinus sylvestris* L.) und Fichtenholz (*Picea abies* L. KARST), welche mit Abstand die Mehrheit des verbauten Konstruktionsholzes ausmachen. Das verwendete Schimmelpilzmodell von HUKKA & VIITANEN wird wie folgt mit der Gleichung 4.2 mathematisch beschrieben (HUKKA & VIITANEN, 1999).

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.0026T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0 & \text{wenn } \theta \leq 20 \\ 80\% & \text{wenn } \theta > 20 \end{cases} \quad (4.2)$$

RH_{crit} = kritische relative Luftfeuchte in %

θ = Temperatur in °C

4.3 Ergebnisse und Diskussion

Während den zwei Jahren Datenerfassung kam es immer wieder zu Ausfällen. Diese Datenlücken sind einerseits auf das Versagen der Messtechnik selbst, aber auch auf unsachgemäße Bedienung zurückzuführen, wobei der erstgenannte Punkt überwiegend für die Verluste verantwortlich gemacht werden kann. Trotz regelmässiger Kontrolle und Wartung der Installation konnte nicht verhindert werden, dass Messdaten verloren gingen. Entsprechend konnten nur die vorhandenen Daten verwendet und ausgewertet werden. Der folgende Zeitstrahl auf der Abbildung 4.10 zeigt die gemessenen bauphysikalischen Parameter mit der jeweiligen Aufzeichnungsperiode auf.

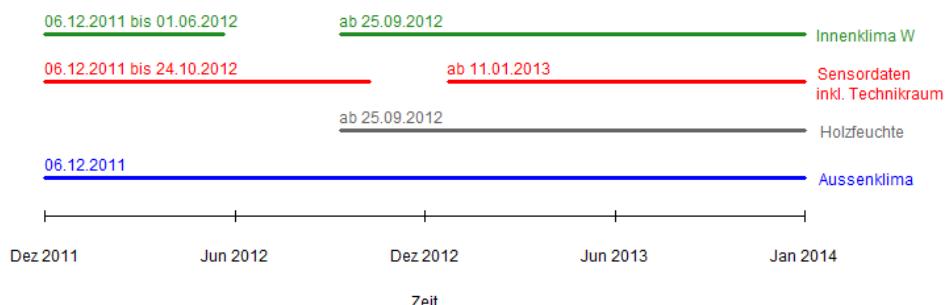


Abbildung 4.10: Aufzeichnungsperioden der gemessenen Parameter.

Wie auf dem Zeitstrahl der Abbildung 4.10 zu sehen ist, gab es während den Messungen des Innenklimas im Waschraum und der relativen Luftfeuchte und Temperatur in der Flachdachkonstruktion je einen längeren Ausfall, der sich in der Grafik als Lücke zeigt. Das Aussenklima konnte, dank dem rechtzeitigen Einbau eines zweiten Sensors, über die zwei Jahre ohne grössere Unterbrüche aufgezeichnet werden.

4.3.1 Gemessene Holzfeuchte u_g

Messdaten zur Holzfeuchte in der Flachdachkonstruktion sind erst ab Ende September 2012 vorhanden. Die Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 zeigen die Verläufe der Holzfeuchten an verschiedenen Messpositionen und die Qualität der Aufzeichnungen. Dabei sind auf der Abbildung 4.11 die Holzfeuchtsonden dargestellt, die plausible Messdaten lieferten. Drei der vier Holzfeuchtsonden haben über die ganze Messperiode Daten aufgezeichnet. Einzig die Holzfeuchtsonde an der Position G3 der Messlinie 1, im Bereich der Weichfaserdämmung, scheint zwischen Ende April und Ende November ausgefallen zu sein. Zudem fällt auf, dass die Messsonde 1-W-G3_HF deutlich höhere Holzfeuchten (anfangs Frühling Werte bis zu 30%) aufzeigt als die restlichen drei Sonden. Diese erreichen Maximalwerte zwischen 18% und 23%. Ebenfalls ist deren Verlauf relativ ähnlich und weicht nur zeitweise voneinander ab. Über den ganzen Zeitraum gesehen lieferte die Messsonde 1-Mi-G3_HF der Messlinie 1, im Bereich der Mineralfaserdämmung innen, die tiefsten und konstantesten Werte. Die Werte der Holzfeuchtesonden im Bereich der Mineralfaserdämmung aussen, also an den Positionen 1-Ma-G3_HF und 2-Ma-G3_HF, kommen knapp über den Messdaten der Sonde 1-Mi-G3_HF zu liegen, wobei auf der Messlinie 2 tendenziell höhere Holzfeuchten festgestellt werden konnte als auf der Messlinie 1.

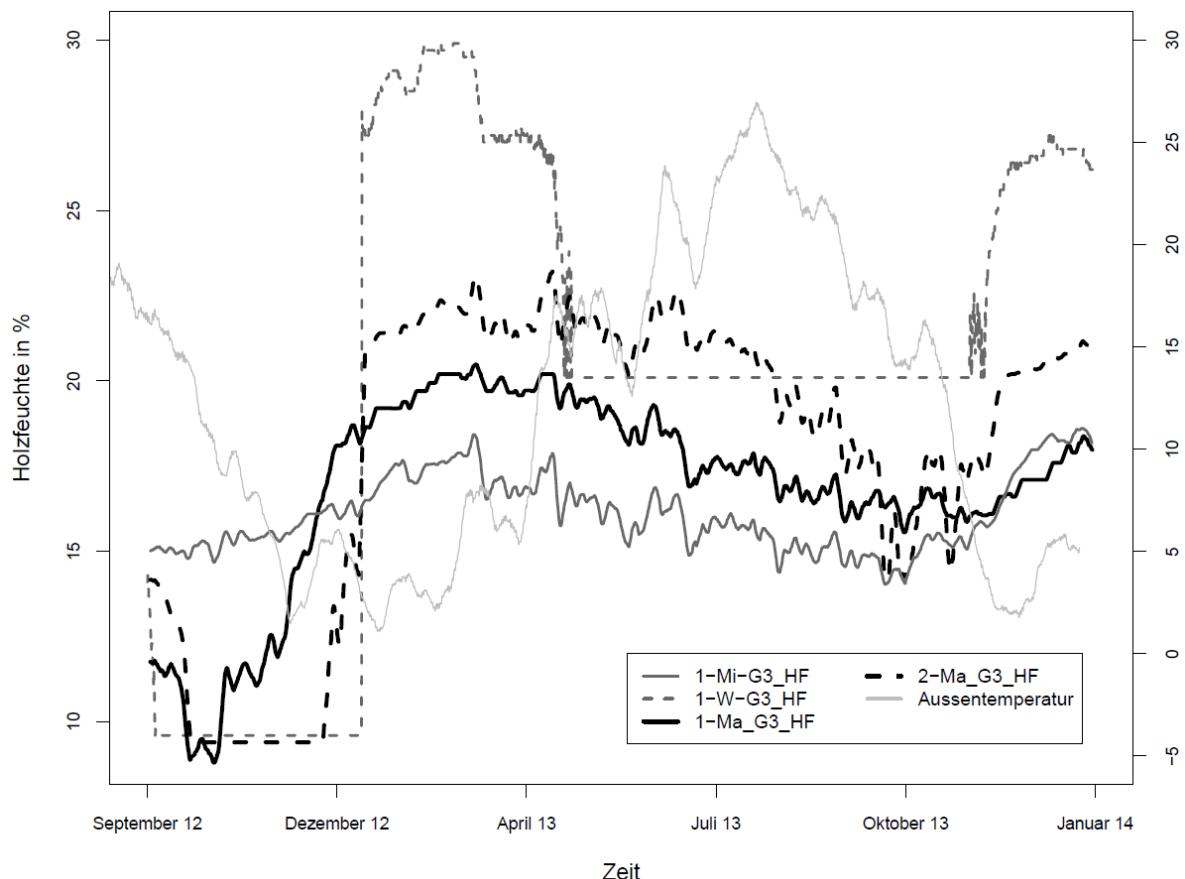


Abbildung 4.11: Aufzeichnungen des Holzfeuchteverlaufes durch vermutlich intakte Holzfeuchtesonden an verschiedenen Messpositionen.

Inwiefern und wie genau diese gemessenen Werte der realen Situation im Flachdach entsprechen, ist schwierig zu beurteilen. Der typische sinusförmige Verlauf deutet sicherlich darauf hin, dass der Vorgang des Feuchtetransports durch das Flachdach grob den äusseren und inneren Klimabedingungen entspricht. Tiefe Aussentemperaturen im Winter führen zu hohen relativen Feuchten in der Konstruktion, was ein verzögertes Holzfeuchtemaximum anfangs Frühjahr nach sich zieht. Im Sommer kann das Flachdach dank hohen Temperaturen wieder austrocknen, wie das Feuchteminimum Mitte Oktober zeigt. Der Direktvergleich des relativen Luftfeuchteverlaufes auf der Abbildung 4.17 zeigt keinen massgebenden Unterschied zwischen den Bereichen Weichfaser- und Mineraldämmung innen. Einzig scheint im Bereich der Weichfaserdämmung das Klima tendenziell ausgeglichener zu sein. Basierend auf dem physikalischen Zusammenhang der relativen Luftfeuchte und der Ausgleichsfeuchte, sowie der Grundaussage der Abbildung 4.17, wird klar, dass die gemessene Holzfeuchte 1-W-G3_HF keinesfalls der realen Situation entspricht. Somit bleibt keine gemessene Ausgleichsfeuchte im Bereich der Weichfaserdämmung übrig. Aufgrund des ähnlichen Verlaufes der relativen Luftfeuchte und der Temperatur, siehe wiederum Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18, kann nun aber davon ausgegangen werden, dass das feuchtetechnische Verhalten der Dreischichtplatte beider Bereiche im Verlauf der Zeit ebenfalls nahezu identisch ist. Möglicherweise fällt der Verlauf der Holzfeuchte im Bereich der Weichfaserdämmung sogar ein bisschen flacher, also mit weniger ausgeprägten Extrema aus, angesichts der kleineren Amplituden der relativen Luftfeuchte. Für den Vergleich der drei verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Feuchtegehalts der Dreischichtplatte im Bereich der Weichfaserdämmung, wird nun also auf die gemessene Holzfeuchte u_g im Bereich der Mineraldämmung innen zurückgegriffen.

Die Abbildung 4.12 zeigt die Holzfeuchtesonden, die offensichtlich fehlerhafte Messdaten lieferten oder komplett ausfielen. Erkennbar werden diese Ausfälle durch konstante Werte, die auf der Abbildung 4.12 als Gerade zu erkennen sind. Diese Messwerte werden folglich nicht für die Auswertung herangezogen. Angesichts der vorhin angesprochenen Problematik der Genauigkeit der Messwerte sind diese defekten Holzfeuchtesonden trotzdem von wichtiger Bedeutung, indem 1-W-G3_HF und 2-Mi-G3_HF anfangs Oktober ausgebaut und für die Validierung der Sensoren verwendet wurden (siehe Abschnitt 4.2.3). Dieser Ausbau ist als Ausbruch auf der Abbildung 4.12 gut erkennbar. Anhand dieser Sensorvalidierung kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Holzfeuchtesonden geprüft und beurteilt werden. Die entsprechenden Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt 4.3.2 diskutiert.

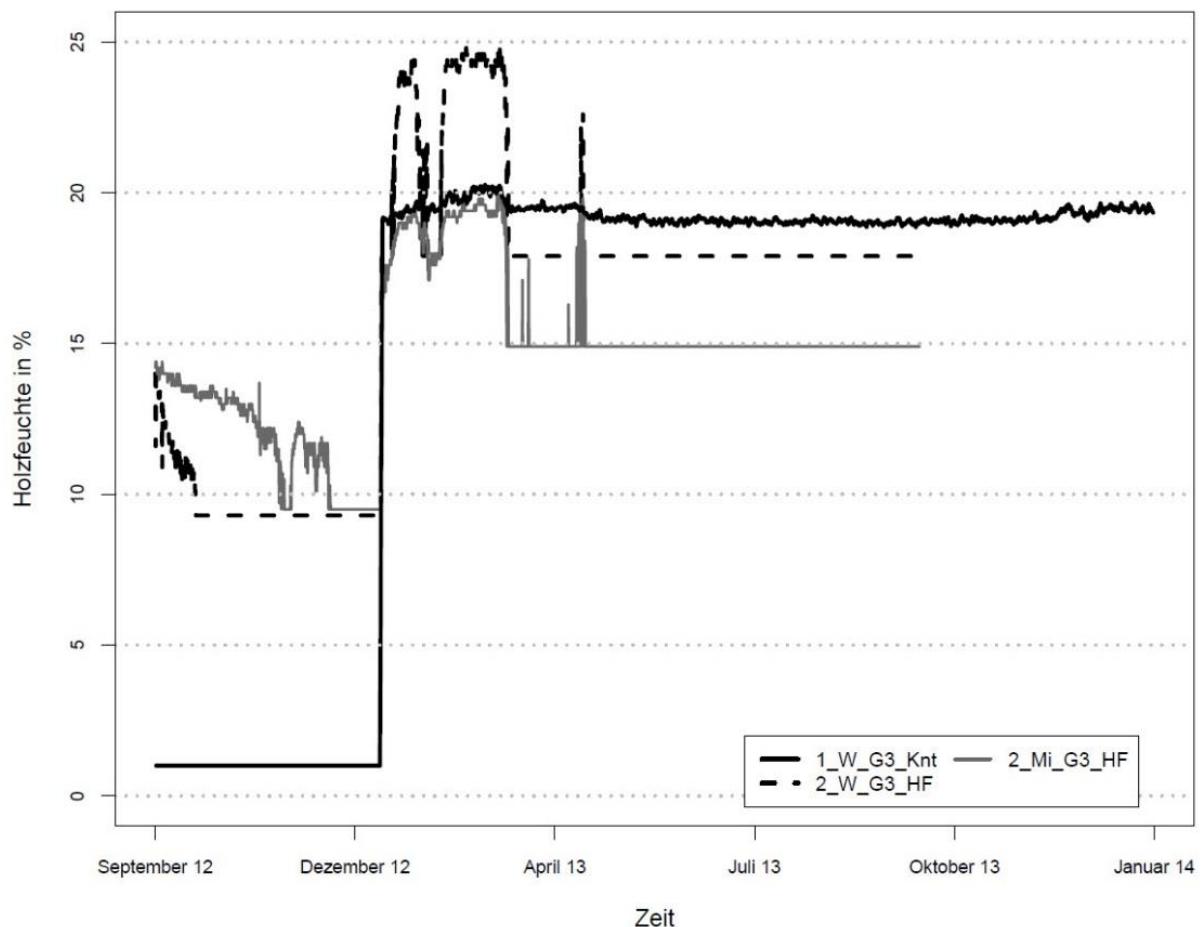


Abbildung 4.12: Aufzeichnungen des Holzfeuchteverlaufes durch vermutlich fehlerhafte Holzfeuchtesonden an verschiedenen Messpositionen.

4.3.2 Sensorvalidierung

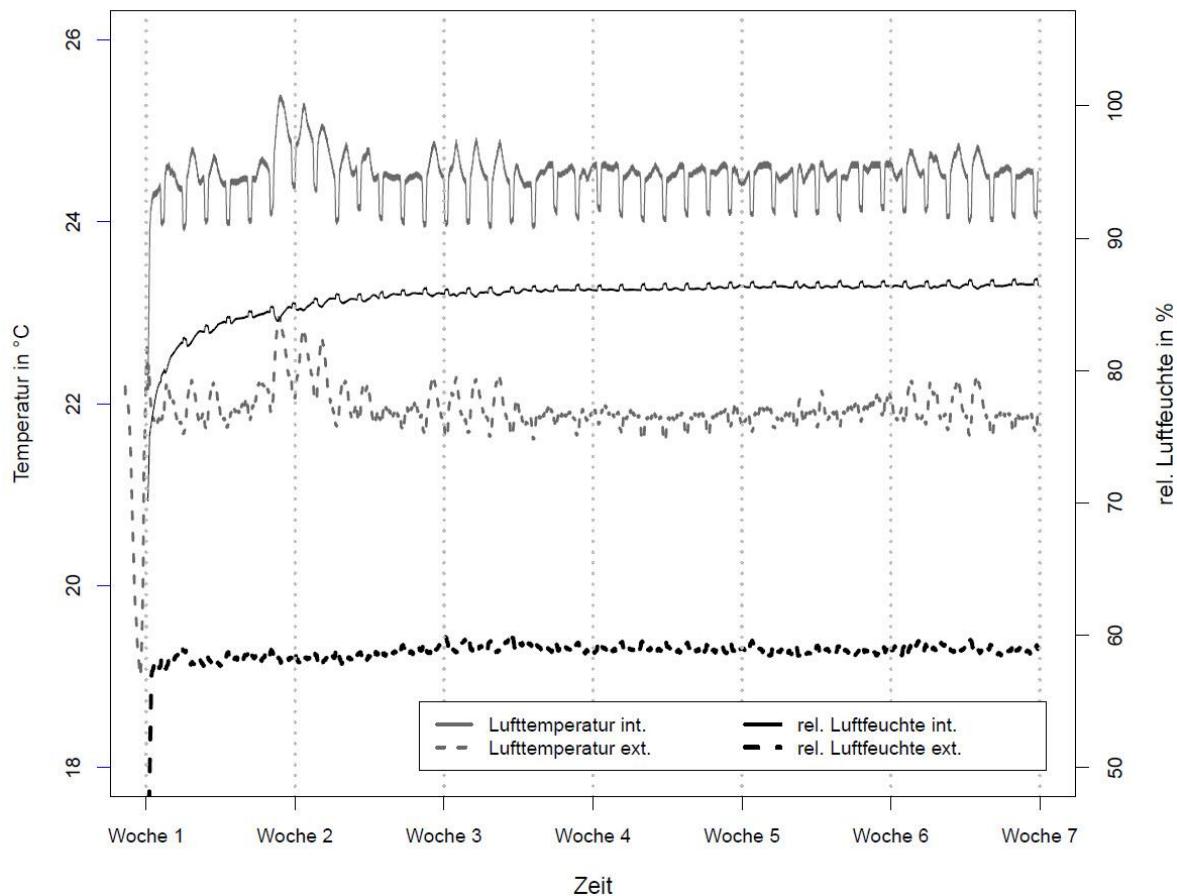


Abbildung 4.13: Klimabedingungen inner- und ausserhalb der Klimabox.

Die Abbildung 4.13 zeigt die Klimabedingungen inner- und ausserhalb der für die Sensorvalidierung verwendeten Klimabox. Im Vergleich zur stärker schwankenden Temperatur, ist die Konstanz der relativen Luftfeuchte auffallend. In der Klimabox wurde durch das Wasserbad gegen Ende des Versuchs eine relative Luftfeuchte um die 87% erreicht. Ausserhalb der Box und somit im konstant klimatisierten Prüfraum (20°C/65%) bewegte sich die gemessene relative Luftfeuchte um die 60%. Die Temperaturen inner- und ausserhalb der Klimabox unterschieden sich ebenfalls. So wurde mit Hilfe des USB-Datenloggers [9] in der Box eine schwankende Temperatur zwischen 24°C und 25°C gemessen und ausserhalb der Box einen Durchschnittswert von 22°C.

Die Diskrepanz zwischen dem gemessenen und erwarteten Wert der relativen Luftfeuchte ausserhalb der Klimabox könnte einerseits durch eine messtechnische Abweichung des USB-Datenloggers [9] begründet und anderseits auf die Position des Loggers zurückgeführt werden. Der Klimastick befand sich in einem mehr oder weniger stark von Personen frequentierten Klimaraum in der Nähe eines Laptops. Somit könnte die einströmende Aussenluft durch das Betreten sowie Verlassen des Raumes, aber auch der Ventilator des Laptops die Aufzeichnungen des Datenloggers beeinflusst haben. Dieselben Argumente gelten für die gemessene Temperatur, die ebenfalls, mit einer Differenz von 2°C, über dem erwarteten Wert liegt.

Der Unterschied der stark schwankenden und hohen Temperatur in der Box zur Aussentemperatur ist eindeutig auf den eingebauten Ventilator und die Waage [3] zurückzuführen. Die Waage wirkte

dabei als Wärmequelle, während der Ventilator, der für die Luftumwälzung zuständig war, die starken Schwankungen verursachte.

Anhand der über die sieben Wochen aufgezeichneten Masse, kann mit Hilfe der Gleichung 3.2 die Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte berechnet werden. Der Masseverlauf und die Ausgleichsfeuchte sind im Anhang abgebildet. Diese Kurven zeigen logischerweise einen ähnlichen Verlauf auf, da sich die prozentuale Ausgleichsfeuchte auf die Massendifferenz aufgrund der Wasseraufnahme durch Sorption bezieht. Typisch für die Entwicklung der Holzfeuchte in einem konstanten Klima ist der asymptotisch abflachende Verlauf, der ebenfalls auf dieser Abbildung gut sichtbar ist. Dieser abflachende Verlauf zeigt auf, dass die Dreischichtplatte entsprechend der sie umgebenden relativen Luftfeuchte bis zu ihrer Massenkonstanz auffeuchtet. Bei dieser Sensorvalidierung erreicht der Prüfkörper innerhalb 6 Wochen, bei einer relativen Luftfeuchte von 87%, eine Holzfeuchte von 15%. Dies entspricht einer Wassermenge von knapp 178 g, welches von der Dreischichtplatte in Form von Wasserdampf aufgenommen wurde, wie der Tabelle 10 entnommen werden kann.

Tabelle 10: Anfangs- und Endmasse des Aufbaus und Massendifferenz durch Feuchteaufnahme.

	Messvorrichtung	Zubehör	Dreischichtplatte
m_0 [g]	2387.19	1183.75	1203.44
$m_{7\text{Wochen}}$ [g]	2564.76	1183.75	1381.01
Δm [g]	177.57	0	177.57

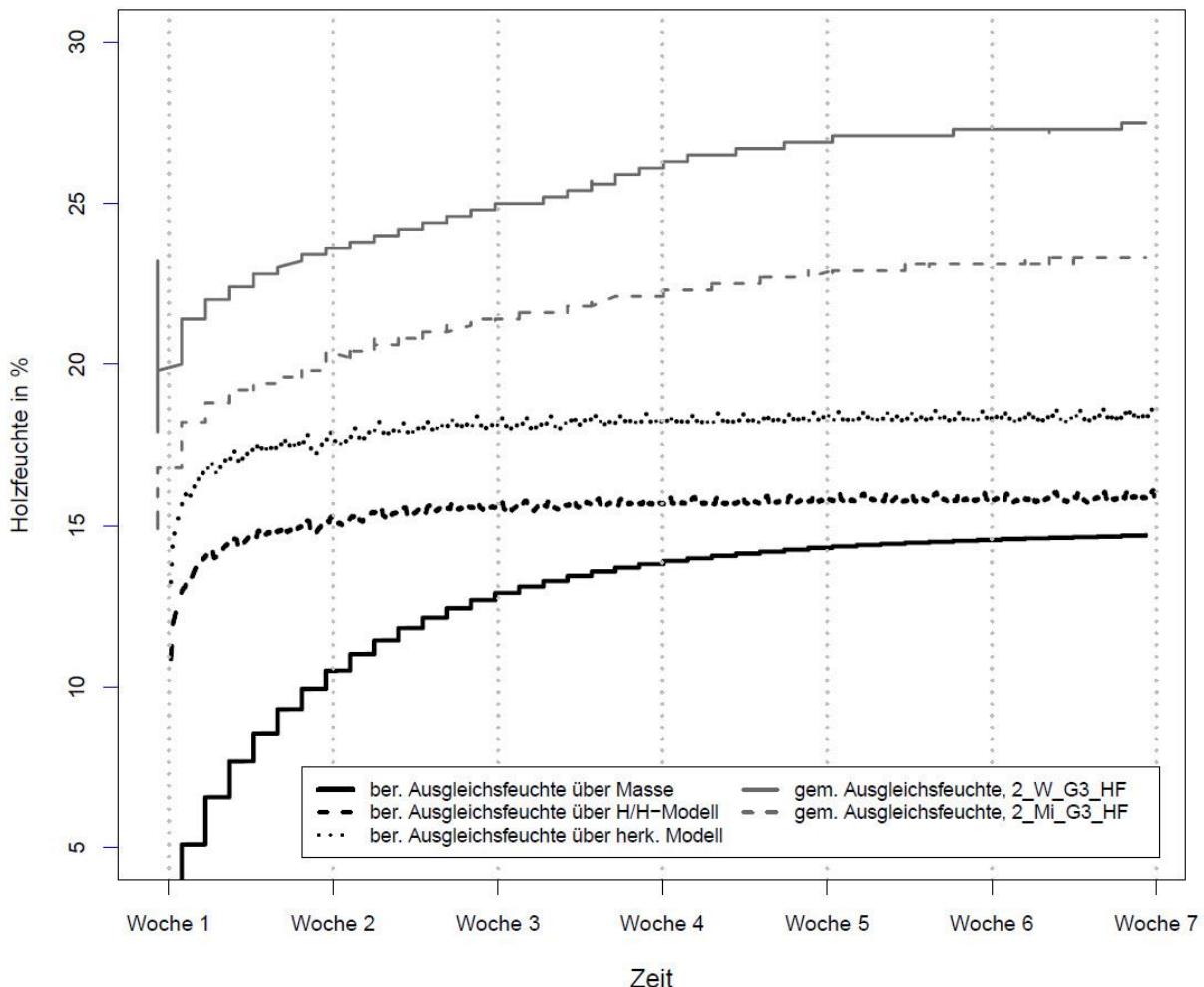


Abbildung 4.14: Ausgleichfeuchte der Dreischichtplatte auf verschiedene Art und Weise im Labor bestimmt.

Auf der Abbildung 4.14 wird die berechnete Ausgleichsfeuchte mit den Ergebnissen anderer Methoden zur Ausgleichsfeuchtebestimmung der Dreischichtplatte verglichen. Die Ausgleichsfeuchtebestimmung nach Norm DIN 52 183 ergibt die tiefste prozentuale Holzfeuchte von 14.75% (DIN 52 183, 1977). Knapp darüber mit 15.6% und einer absoluten Differenz von weniger als einem Prozent kommt die berechnete Ausgleichsfeuchte nach dem H/H-Modell zu liegen. Die Kurve der Holzfeuchtebestimmung über das herkömmliche Modell nach Schnider pendelt sich auf einem Niveau von etwas mehr als 18% ein. Die Holzfeuchten nach den beiden Holzfeuchtesonden aber liegen mit 23.3% und 27.5% weit über den anderen drei Werten und weisen eine Differenz zum erst erwähnten Verfahren von 8.5%, respektive 12.75% auf. Die Tabelle 11 zeigt als Ergänzung zur Abbildung 4.14 die maximal erreichten Holzfeuchten als numerische Werte.

Tabelle 11: Maximale Ausgleichsfeuchten der Dreischichtplatte nach verschiedenen Verfahren.

ber. nach ISO 3130	Modelle		Holzfeuchtesonden		Feuchtemessgerät	
	H/H-Modell	herk. Modell	2-W-G3_HF	2-Mi-G3_HF		
u_{max} [%]	14.75	15.6	18.4	27.5	23.3	15.86

Der Holzfeuchteverlauf nach Norm und mit den Holzfeuchtesonden gemessen, gleichen sich in ihrer langsam aber stetigen Zunahme. Die Kurven nach den zwei Modellen jedoch weichen von diesem Verlauf ab, indem sie zunächst stark ansteigen und sich früh auf ihrem maximalen Niveau einpendeln. Grund dafür ist, dass diese Modelle die Ausgleichsfeuchte über die relative Feuchte der Umgebungsluft berechnen, während sich die anderen Verfahren direkt auf den sich verzögert einstellenden Feuchtegehalt im Holz beziehen.

Da die Methode nach der DIN 52 183 die prozentuale Holzfeuchte über die Massendifferenz durch die aufgenommene Feuchte bestimmt, ist diese als Referenz anzusehen (DIN 52 183, 1977). Entsprechend wird sichtbar, dass die Holzfeuchtesonden [5] mit ihren gemessenen Ausgleichsfeuchten viel zu hohe Werte erreichen. Im Vergleich mit Werten für die Sitka-Fichte aus dem KEYLWERTH-Diagramm (ca. 18%) wird diese Tendenz ebenfalls bestätigt.

Diese hohen Holzfeuchten können mit dem Messverfahren der Holzfeuchtesonden begründet werden. Dieses Leitwertprinzip basiert auf der Messung des elektrischen Widerstands, den das Holz dem erzeugten Stromfluss zwischen den Sonden aufbringt. Da Wasser den besseren Leitkoeffizienten besitzt als Holz, wird dieser Widerstand kleiner je höher die prozentuale Materialfeuchte ist. Nun ist sehr wahrscheinlich, dass die Leimfugen der Dreischichtplatte als dampfdiffusionshemmende Schichten fungieren und sich somit die diffundierende Feuchte davor aufstaut. Dieser Effekt zieht demnach eine lokal erhöhte Feuchtekonzentration in der Dreischichtplatte nach sich. Nach dem Prinzip des Energieminimums suchen sich die elektrischen Ströme der Holzfeuchtesonden den Weg mit dem geringsten Widerstand. Diese lokal erhöhte Feuchtekonzentration nahe der Leimfuge wirkt als Feuchteband zwischen den beiden Sonden und scheint auszureichen, um den gesamten elektrischen Fluss der Holzfeuchtesonden durch diesen Bereich führen zu lassen. Entsprechend weisen die Datenlogger auf erhöhte Werte hin, welche aber in Wahrheit nur der direkt an der Leimfuge befindenden, nicht aber der mittleren Holzfeuchte entsprechen. Um diesen Effekt ansatzweise zu bestätigen, wurde nach der Sensorvalidierung zusätzlich noch die Holzfeuchte der Dreischichtplatte mit einem Feuchtemessgerät [11] gemessen. Dieses Gerät basiert zwar ebenfalls auf das Messverfahren des elektrischen Widerstandes, ermöglicht aber aufgrund der kurzen Messspitzen eine lokale Messung der Holzfeuchte. Somit kann jede Schicht der Dreischichtplatte separat gemessen und die Leimfugen mit den erhöhten Feuchtekonzentrationen umgangen werden.

Der entsprechende Mittelwert von 15.83% Holzfeuchte in der Tabelle 12 zeigt im Vergleich mit den Ergebnissen der Holzfeuchtesonden einen deutlich tieferen Wert, was die vorhin erläuterte Theorie bestätigt.

Tabelle 12: Mit dem Feuchtemessgerät [11] erhaltene Holzfeuchten, inkl. deren Mittelwert, Standardabweichung und Varianz.

	Messnr.	Schicht			Mittelwert
		1	2	3	
	1	16.3	16.7	16.5	
	2	15.9	16.5	15.3	
	3	16.2	16.8	14.7	
	4	16.9	17.6	15.6	
	5	15.1	15.2	14.2	
	6	14.5	16.2	15.3	
Mittelwert [%]		15.82	16.50	15.27	15.86
Standardabweichung [%]		0.87	0.79	0.79	0.82
Variationskoeff. [%]		5.52	4.79	5.15	5.15

Der Vergleich der Ergebnisse auf der Abbildung 4.14 bestätigt den Einsatz des H/H-Modells für die Berechnung der Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte im Flachdach. Die berechneten Werte liegen nur knapp über der Referenzfeuchte der Methode nach der Massendifferenz und bilden damit die Realität am plausibelsten ab. Einziger Nachteil dieses Modells ist, dass die Phasenverschiebung durch die verzögerte Feuchteaufnahme nicht berücksichtigt wird, zumal sich die Ausgleichsfeuchte aus der relativen Feuchte der Umgebungsluft ergibt und der Faktor der zeitlichen Verschiebung aufgrund von Sorptionsvorgängen vernachlässigt wird.

Da es sich aber um eine Verzögerung ohne intensitätsdämpfende Wirkung handelt, wird der Feuchtefluss in der Dreischichtplatte um den Faktor Zeit, nicht aber in der Amplitude verschoben. Der Verlauf der Holzfeuchte und deren Extremwerte, Maximum wie Minimum, bleiben deshalb in beiden Fällen die gleichen.

4.3.3 Datenanalyse

Aufgrund fehlender Messwerte während des Zeitraumes von Ende Oktober 2012 bis Anfangs Januar 2013 weisen die Kurven auf den erstellten Abbildung 4.15 bis Abbildung 4.20 im folgenden Abschnitt eine markante Lücke auf (siehe Abbildung 4.10). Die Qualität und Aussagekraft der Abbildungen bleiben aber erhalten, da es sich bei der gestörten Periode um eine Übergangsphase handelt und somit die richtungsweisenden Extrema, bzw. Amplituden, nicht wesentlich betroffen sind.

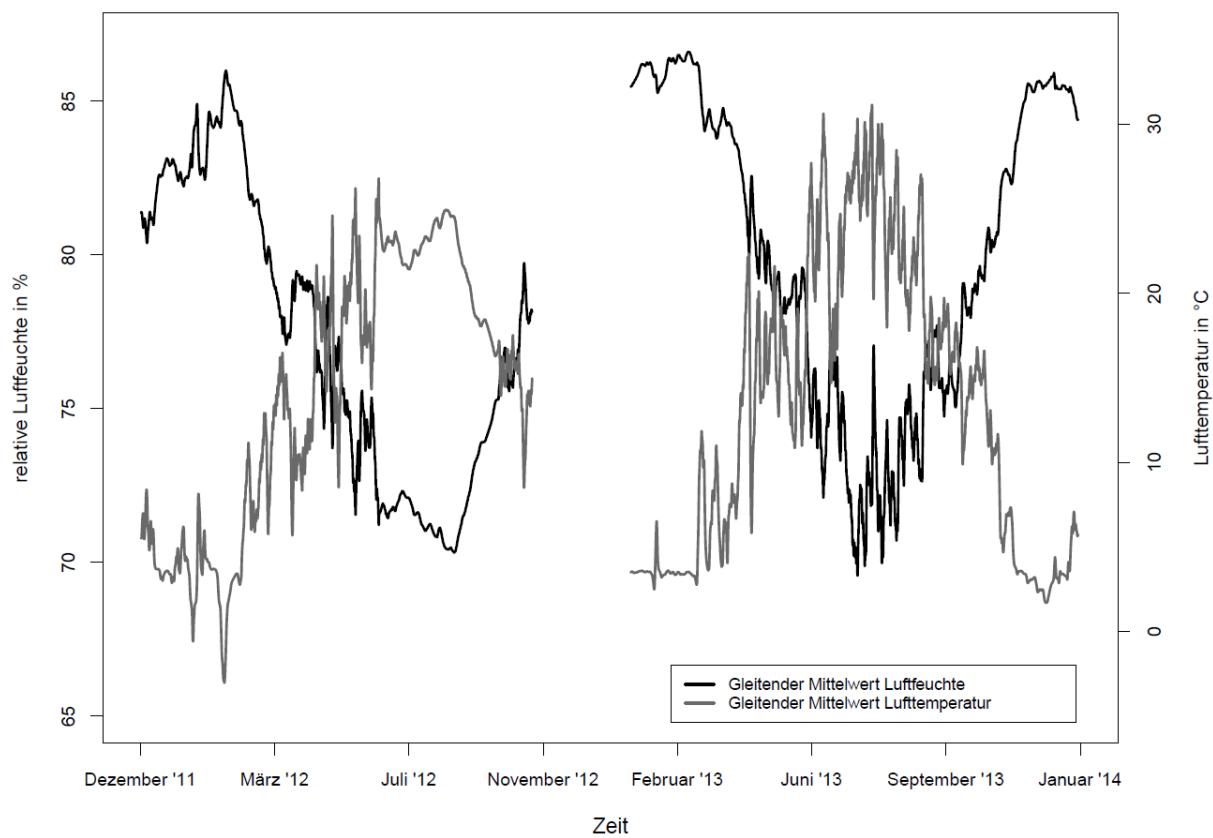


Abbildung 4.15: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der relativen Luftfeuchte und der Temperatur in der Schicht G3 im Bereich der Weichfaserdämmung (W) der Messlinie 1.

Die Abbildung 4.15 stellt die herrschenden Klimaverhältnisse in der Schicht G3 der Flachdachkonstruktion im Bereich der Weichfaserdämmung dar. Der direkte Vergleich der relativen Luftfeuchte mit der Temperatur zeigt deutlich die Abhängigkeit des relativen Wassergehaltes der Luft von deren Temperatur. Im Winter, wenn tiefe Temperaturen überwiegen, stellt sich eine erhöhte relative Luftfeuchte ein, die Spitzenwerte bis zu 95% erreichen kann. Auf dieser Abbildung sind diese Spitzenwerte nicht zu sehen, da sich die Kurve aus gleitenden Mittelwerten zusammensetzt. Entgegengesetzt dem Verhalten im Winter ergeben sich im Sommer bei hohen Lufttemperaturen tiefere relative Luftfeuchten. So wie das feuchtetechnische Verhalten im Flachdach mit der Außen temperatur korreliert, wird die Konstruktion massgebend wärmetechnisch durch Schneefall beeinflusst. Am gleichmässigen Temperaturverlauf im Februar 2013 ist zu erkennen, dass während dieser Zeit auf dem Flachdach liegengebliebener Schnee, wie eine zusätzliche Dämmschicht auf den Wärmefluss durch die Konstruktion wirkte. Diese puffernde Wirkung des Schnees spricht ebenfalls SCHAFCZEK et al. in ihrem Bericht zum Einfluss von Dachbegrünungen auf Flachdächer an (SCHAFCZEK, et al., 2013).

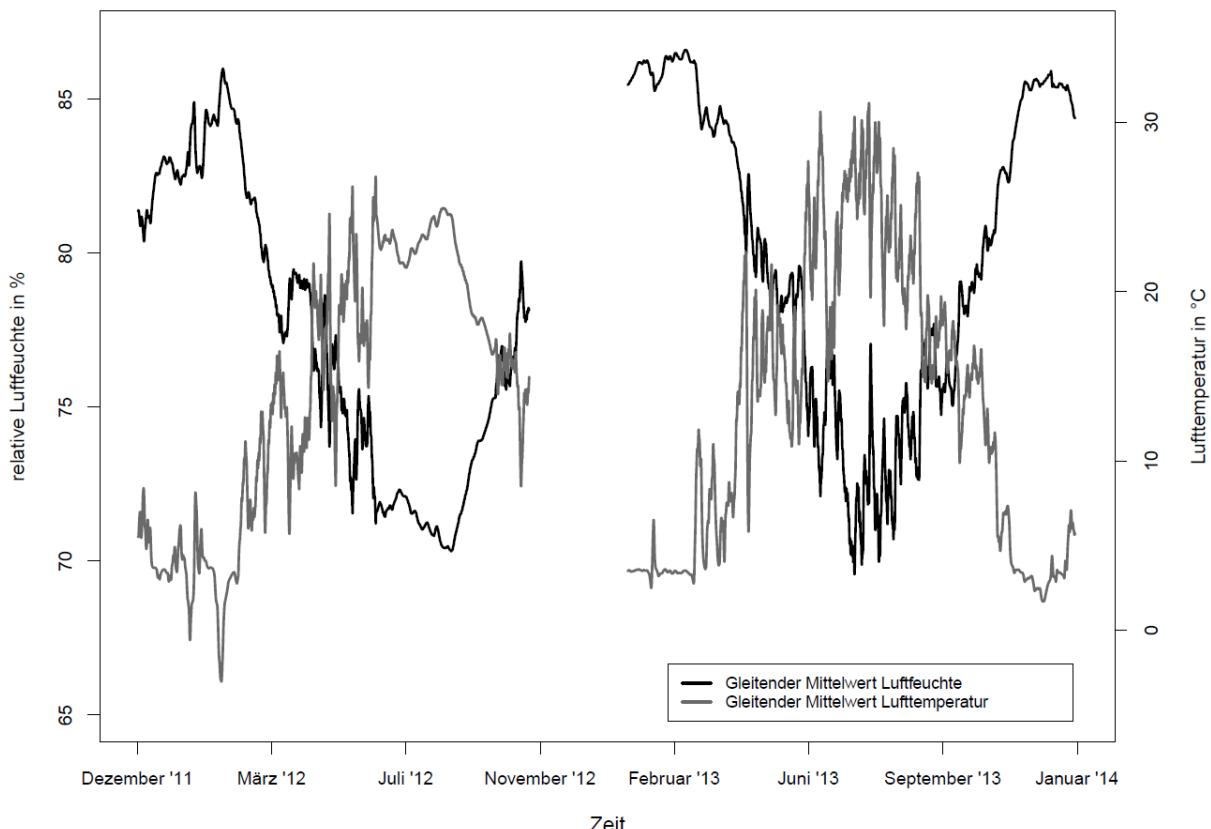


Abbildung 4.16: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der relativen Luftfeuchte und der Temperatur in der Schicht G3 im Bereich der Mineralfaserdämmung innen (Mi) der Messlinie 1.

Analog zur Abbildung 4.15 sind auf der Abbildung 4.16 die Klimabedingungen im Bereich der Mineralfaserdämmung innen dargestellt. Einzig festzustellender Unterschied zum Bereich der Weichfaserdämmung sind die minim höheren Maxima, respektive tieferen Minima der relativen Luftfeuchte.

Den direkten Vergleich der Bereiche Weich- und Mineralfaserdämmung innen bezüglich der relativen Luftfeuchte und Temperatur wird auf der Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 separat aufgezeigt. Auffallend dabei ist, dass die Temperatur im Sommer 2013 deutlich höher ausfiel als im Jahre 2012. Die temperaturabhängigen relativen Luftfeuchten der beiden Sommern aber unterscheiden sich im Bereich der Weichfaserdämmung nur unmerklich, während jene im Bereich der Mineralfaserdämmung innen eine geringe Diskrepanz aufweisen. Diese im Sommer höhere relative Luftfeuchte im Bereich der Weichfaserdämmung könnte auf die unterschiedliche Wasserdampfsorptionsfähigkeit der Dämmmaterialien zurückzuführen sein. So vermag die hygrokopische Weichfaserdämmung während der kalten Jahreszeit Feuchte in Form von Wasser aufzunehmen, was eine Senkung der relativen Luftfeuchte im Winter zur Folge hat. Diese gespeicherte Feuchte wirkt aber im Sommer als zusätzliche Feuchtequelle und hält die relative Luftfeuchte während der Trocknungsphase auf einem höheren Niveau. Dieser Speichereffekt der Weichfaserdämmung bewirkt somit eine aus feuchte-technischer Sicht positive Amplitudendämpfung der relativen Luftfeuchte. Aus wärmetechnischer Betrachtungsweise aber nimmt, durch das im Dämmmaterial gespeicherte Wasser, die Wärmeleitfähigkeit der Weichfaserdämmung zu, was zu tieferen Temperaturen in den unteren Schichten des Flachdaches führen kann.

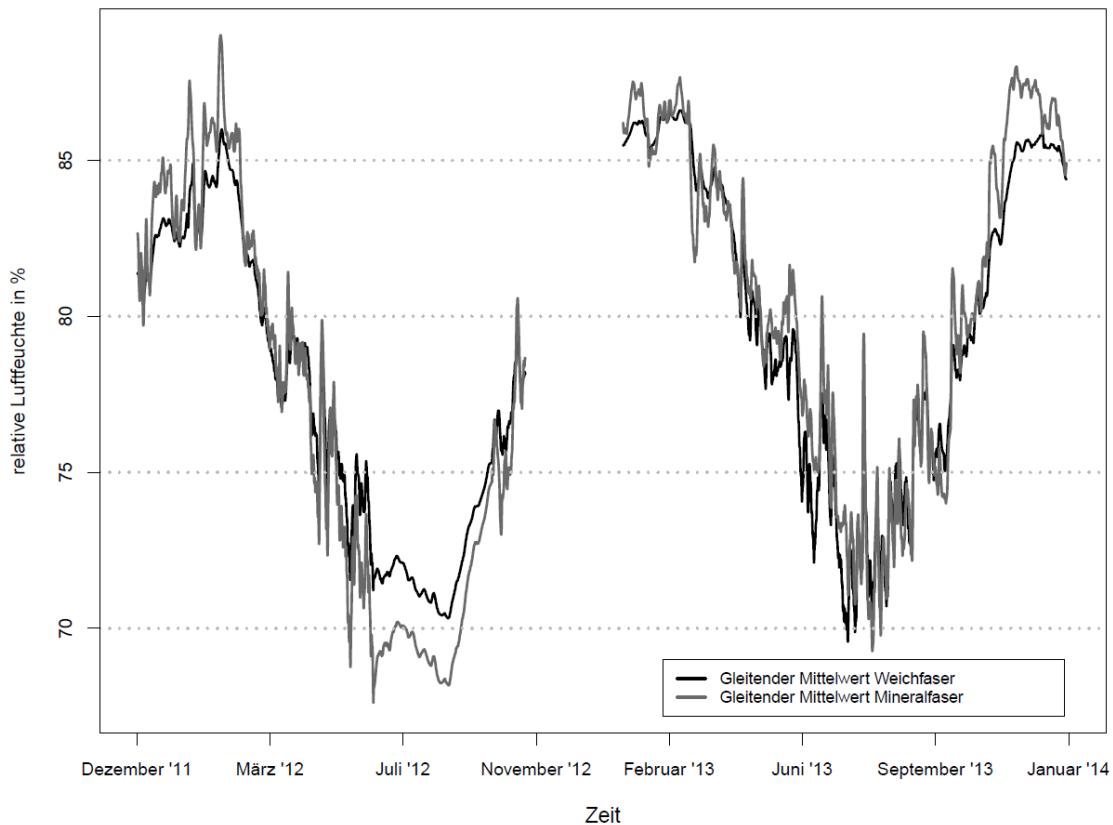


Abbildung 4.17: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der relativen Luftfeuchte in der Schicht G3 im Bereich der Weich- und Mineralfaserdämmung innen der Messlinie 1 im Vergleich.

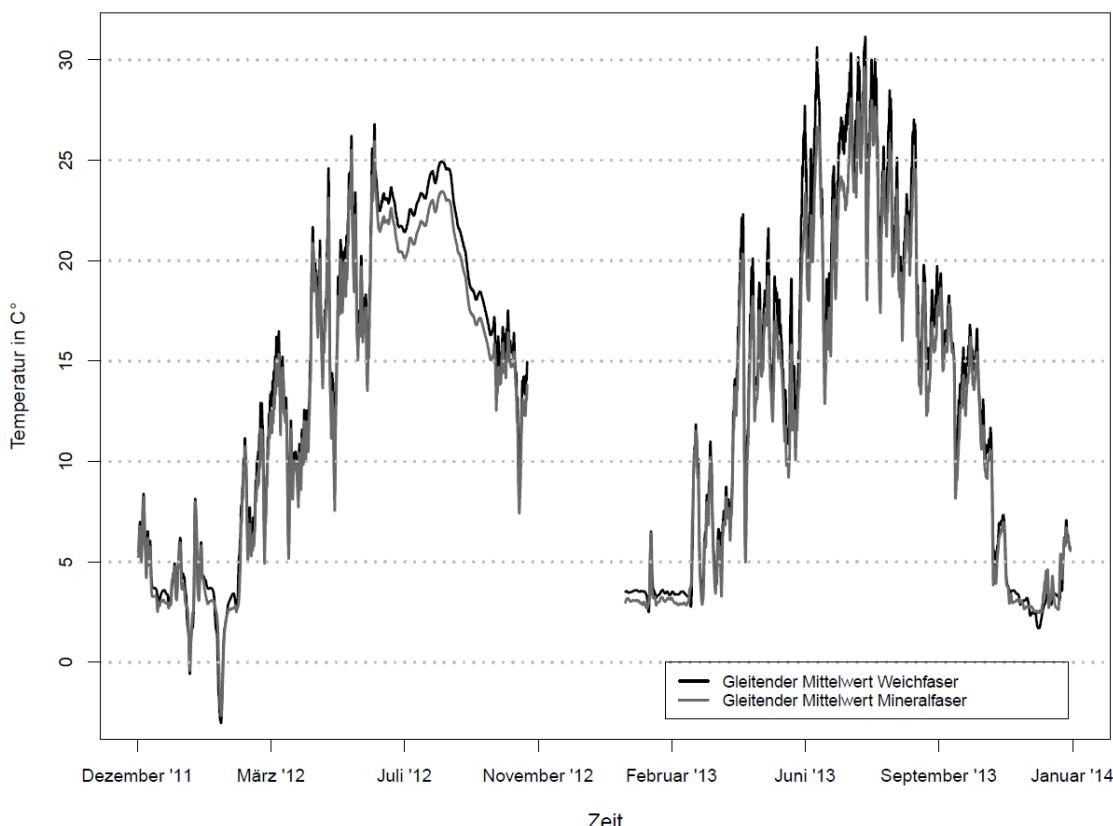


Abbildung 4.18: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der Temperatur in der Schicht G3 im Bereich der Weich- und Mineralfaserdämmung innen der Messlinie 1 im Vergleich.

Die Abbildung 4.19 zeigt die aus der relativen Luftfeuchte berechnete Holzfeuchte der Dreischichtplatte im Bereich der Weichfaserdämmung. Die dafür verwendete Funktion stammt vom im Abschnitt 3.3.2 ausgiebig diskutierten H/H-Modell, wobei die verwendeten Parameter den Werten der entwickelten Sorptionsisotherme der Dreischichtplatte bei 20°C Lufttemperatur aus der Tabelle 9 entsprechen. Daraus ergibt sich für die Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte folgende Gleichung 4.3.

$$U_{tot} = \frac{1'800}{382.737} \cdot \left(\frac{27.3027 \cdot 0.8183 \cdot \varphi}{100 + 27.3027 \cdot 0.8183 \cdot \varphi} \right) + \frac{1'800}{382.737} \cdot \left(\frac{0.8183 \cdot \varphi}{100 - 0.8183 \cdot \varphi} \right) \quad (4.3)$$

U_{tot} = total sorbiertes Wasser in %
 φ = relative Luftfeuchte in %

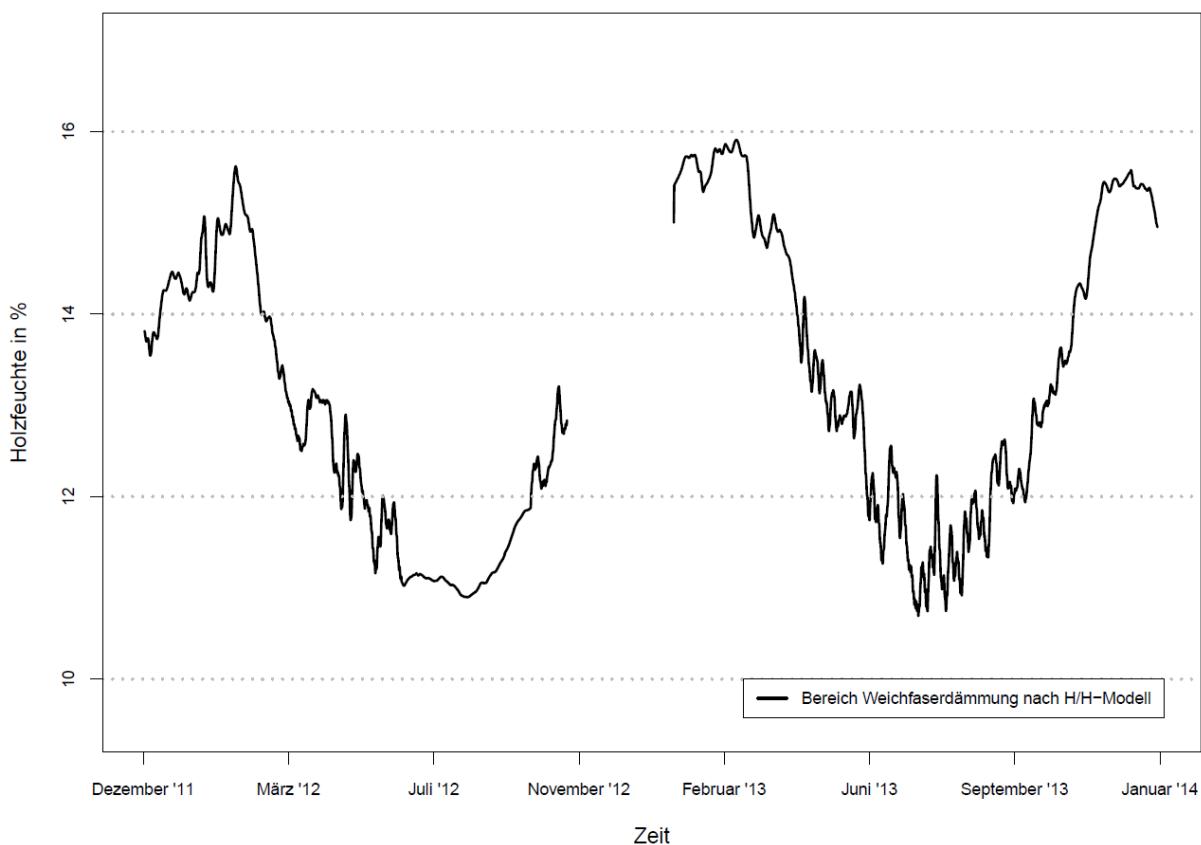


Abbildung 4.19: Verlauf des Feuchtegehaltes der Dreischichtplatte im Bereich der Weichfaserdämmung berechnet mit dem H/H-Modell.

Entsprechend der im Flachdach herrschenden relativen Luftfeuchte fällt eine allgemein eher tiefe Ausgleichsfeuchte aus, die ebenfalls den typischen sinusförmigen Verlauf aufweist. Zudem fällt auf, dass im Winter des zweiten Jahres eine höhere Holzfeuchte resultierte, als im ersten Winter. Dies kann einerseits auf einen strengeren Winter mit tieferen Temperaturen, aber auch auf eine mögliche Auffeuchtung infolge Feuchtestaus zurückgeführt werden. Erst anhand der verhältnismässig tieferen Ausgleichsfeuchte im dritten Winter wird sichtbar, dass die Werte im Vorjahr aufgrund der strengeren Klimabedingungen erhöht ausfielen. Dies bestätigt ebenfalls den Blick auf die Abbildung 4.1 im Anhang mit der Darstellung der Aussenklimabedingungen. Da sich, abgesehen von den Schwankungen aufgrund unterschiedlicher Klimabedingungen, die Extrema der Kurve immer etwa

auf derselben Höhe befinden und sich nicht massgebend voneinander unterscheiden, kann die Annahme getroffen werden, dass sich die Holzfeuchte im Flachdach bereits eingependelt hat. Diese Tendenz wird auch im Bereich der Mineralfaserdämmung aussen (siehe Abbildung 4.20) sehr deutlich sichtbar. Die maximalen Ausgleichsfeuchten im zweiten und dritten Winter weisen in dem Fall eine Differenz von knapp 2% auf, wobei der letzte Winter den tieferen Wert darstellt. Die sich einstellende Holzfeuchte im Winter 2013/2014 im Bereich der Mineralfaserdämmung innen jedoch bleibt ungefähr auf demselben Niveau wie im Winter 2012/2013.

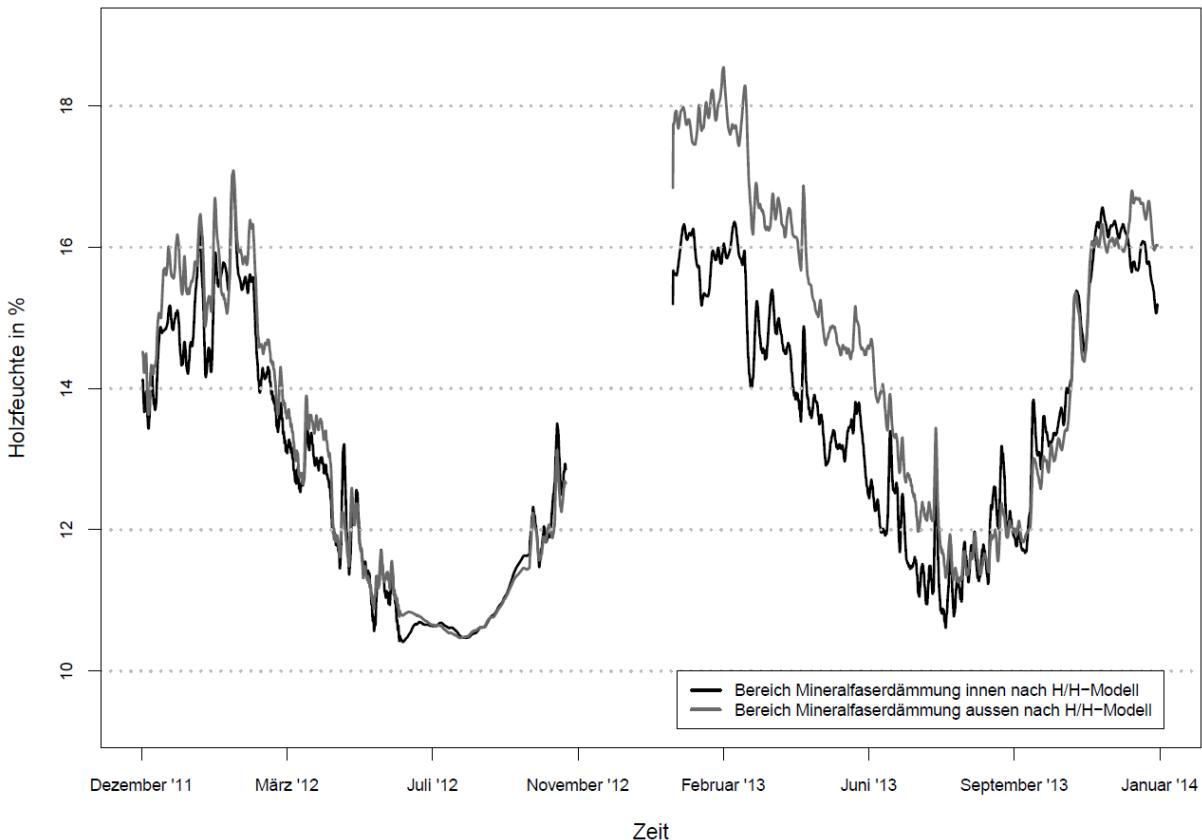


Abbildung 4.20: Verlauf des Feuchtegehaltes der Dreischichtplatte im Bereich der Mineralfaserdämmung innen/aussen berechnet mit dem H/H-Modell.

Die durchschnittlich hohen relativen Luftfeuchten im Winter 2012/2013, die in einer erhöhten Ausgleichsfeuchte resultieren, können mit Hilfe von sogenannten Scatterplots dargestellt werden. Die Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 zeigen solche Plots, welche die relativen Luftfeuchten in Abhängigkeit der Temperaturen ab Anfangs Winter 2011 bis Anfangs Winter 2012, respektive 21.12.2012 bis 20.12.2013 abbilden. Dabei weist die unterschiedliche Form der Punkte auf die entsprechende Ebene, Schicht G3 und G2, in der Konstruktion hin und die Farben auf die vier Jahreszeiten. Die zusätzlich eingefügte Kurve stellt das im Abschnitt 4.2.5 erläuterte Wachstumsmodell nach HUKKA & VIITANEN dar und zeigt auf, ab welchen klimatischen Verhältnissen die Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze erfüllt sind. Anhand dieser Kurve kann der Anteil an Messwerten, die diese Wachstumsbedingungen erfüllen, berechnet werden und ist als Prozentsatz in den Abbildungen vorhanden.

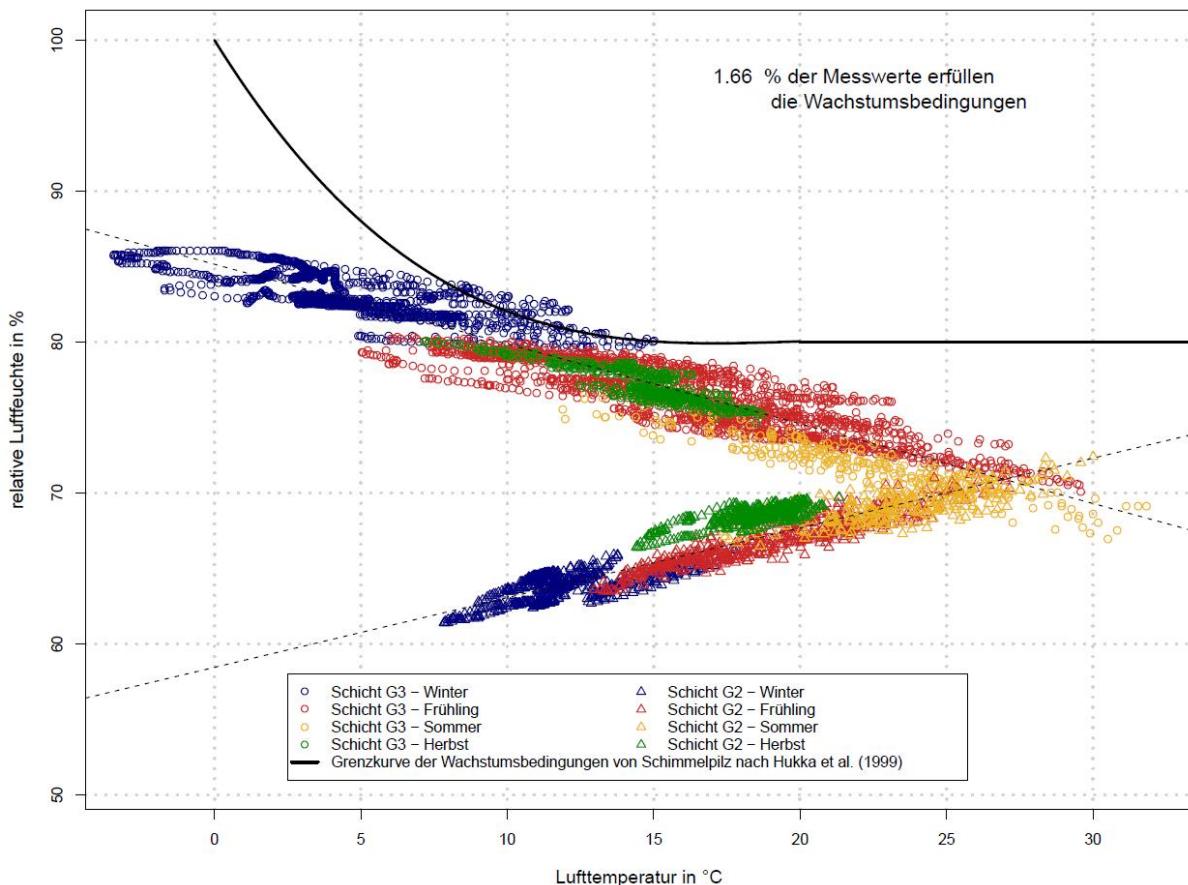


Abbildung 4.21: Verteilung der aufgezeichneten relativen Luftfeuchten und Temperaturen in der Schicht G3 im Bereich der Weichfaserdämmung zwischen Winter 2011 und 2012 und Prozentsatz, der die Wachstumsbedingungen nach HUKKA & VIITANEN erfüllt.

Die Abbildung 4.21 zeigt die einzelnen Messwerte ab Winter 2011 bis Winter 2012 in der Schicht G3, sowie der Schicht G2 im Bereich der Weichfaserdämmung. Lediglich 1.66% aller in der Schicht G3 gemessenen Werte liegen oberhalb des Schimmelpilzmodells nach HUKKA & VIITANEN und erfüllen somit die klimatischen Bedingungen für das Wachstum von Schimmelpilzen. Auffallend ist, dass alle diese Werte im Winter gemessen wurden. Zusätzlich zeigen die Regressionsgeraden durch die beiden Punktwolken, dass in der Schicht G3 mit steigender Temperatur die relative Luftfeuchte abnimmt, im Gegensatz zur Schicht G2, bei der die Regressionskurve eine zunehmende Tendenz der relativen Luftfeuchte bei steigender Temperatur darlegt. Diese Tendenz der Punktwolke der Schicht G2 stellt einen unvorteilhafteren Verlauf dar, da sich die Regressionsgerade dem Schimmelpilzmodell annähert, während sich jene der Schicht G3 vom Bereich der optimalen Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze fortbewegt. Trotzdem stellt die Bedingung in der Schicht G2 kein Risiko eines Schimmelpilzbefalls dar, zumal die Werte deutlich unterhalb der kritischen Zone liegen.

Zwischen Winter 2012 bis Winter 2013 liegen mit 8.06% wesentlich mehr Messwerte oberhalb des Wachstumsmodells, wobei die Mehrheit dem Frühling zugeordnet werden kann. Dieser Anteil erscheint im ersten Moment sehr hoch und wirkt entsprechend Besorgnis erregend. Beachtet man bei der Interpretation dieser Grafik jedoch den Faktor Zeit und die auf der Abbildung 4.3 umschriebenen wachstumsbeeinflussenden Faktoren bei Schimmelpilzen, relativiert sich das Risiko eines Schimmelpilzbefalls in der Schicht beträchtlich. So zeigen die Scatterplots nicht, welchem Zeitpunkt die Messwerte zuzuordnen sind und somit wie lange die Bedingungen für ein Schimmelwachstum erfüllt sind. ZÜRCHER & FRANK sprechen von einer notwendigen relativen Luftfeuchte

von 85% über eine Zeitdauer von 2-3 Wochen, bis sich erste Spuren der Anwesenheit von Schimmelpilzen zeigen (ZÜRCHER & FRANK, 2010). Zusätzlich müssen neben den klimatischen Bedingungen im Flachdach noch weitere Faktoren, wie vorhanden Nährstoffe und pH-Wert erfüllt sein. In Anbetracht der Zeit und dieser zusätzlichen Faktoren erscheint es also eher unwahrscheinlich, dass sich im Winter 2012/2013 erste Sporen von Schimmelpilzen gebildet haben. Dennoch besteht theoretisch die Möglichkeit eines Befalls und verlangt eine weitere Beobachtung und Einschätzung der Verhältnisse in der Schicht G3 im Flachdach.

Dieselbe Problematik zeigt sich im Bereich der Mineralfaser innen, wobei die Prozentsätze mit 2.57% im ersten und 10.92% im zweiten Jahr eher noch etwas höher liegen als im Bereich der Weichfaserdämmung. Die entsprechenden Scatterplots können im Anhang eingesehen werden.

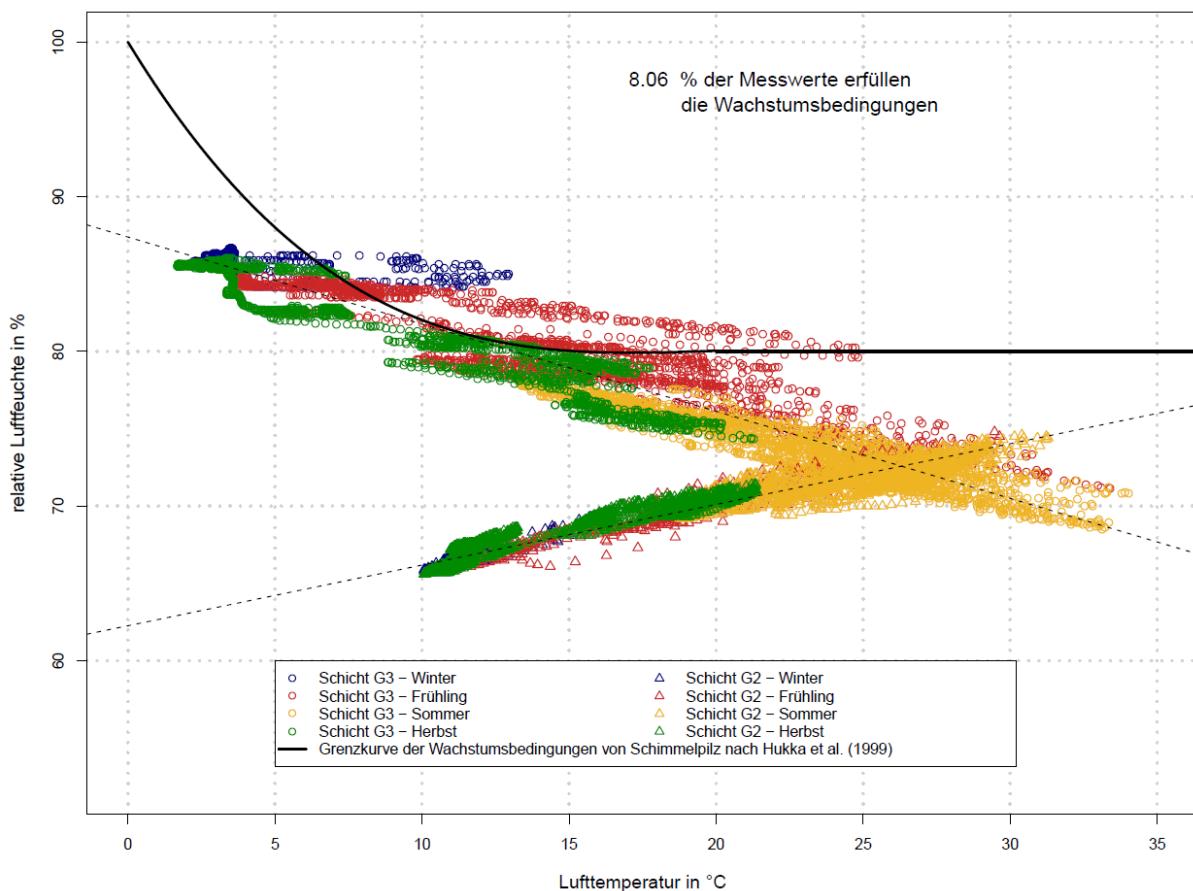


Abbildung 4.22: Verteilung der aufgezeichneten relativen Luftfeuchten und Temperaturen in der Schicht G3 im Bereich der Weichfaserdämmung zwischen Winter 2012 und 2013 und Prozentsatz, der die Wachstumsbedingungen nach HUKKA & VIITANEN erfüllt.

5 Instationäre hygrothermische Bauteilberechnung mit WUFI®

5.1 Theorieteil – Funktionsweise und Materialkennwerte

Wie bereits im Abschnitt 2.6.2 erläutert, ist die Basis der Simulationssoftware WUFI® eine Funktion zur Beschreibung der Feuchtespeicherung und die Erkenntnis, dass sich die Oberflächendiffusion und der Flüssigtransport mit der relativen Feuchte als Transportpotential beschreiben lassen.

Die zeitlich veränderlichen Wärme- und Feuchtetransportprozesse in Bauteilen werden nach KÜNZEL mit Hilfe folgender gekoppelten Differentialgleichungen 5.1 und 5.2 beschrieben (KÜNZEL, 1994).

Wärmetransport

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + h_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (5.1)$$

Feuchtetransport

$$p_w \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w \cdot D_w \cdot \frac{\partial u_w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (5.2)$$

D_w/s	= Flüssigtransportkoeffizient in m^2
H	= Enthalpie des feuchten Baustoffes in J/m^3
h_v	= Verdunstungsenthalpie des Wassers in J/kg
p	= Wasserdampfpartialdruck in Pa
u_w^3	= Wassergehalt in kg/m^3
δ	= Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft in $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$
θ	= Temperatur in C°
λ_D	= Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes in $W/(m \cdot K)$
ρ_w	= Dichte des Wassers in kg/m^3
φ	= relative Feuchte in %

Die instationäre hygrothermische Bauteilbeurteilung mittels dieses Modells der gekoppelten Differentialgleichungen ist jedoch immer nur so gut, wie die angenommenen Rand- und Anfangsbedingungen und die zugrunde gelegten Materialparameter. In den folgenden Abschnitten sollen die wichtigsten dieser Rand- und Anfangsbedingungen, aber auch der Materialparameter für eine instationäre Berechnung erläutert werden.

5.1.1 Rand- und Anfangsbedingungen

Klimabedingungen

Bauteile stehen über ihre Oberflächen in direkter oder indirekter hygrothermischer Wechselwirkung mit der Umgebung. Somit wirkt nicht nur die Umgebung auf das Bauteil, sondern auch umgekehrt. So kann ein von der Sonne beschienenes Bauteil über den Tag Energie in Form von Wärme speichern und diese anschliessend in der Nacht, sobald kühlere Temperaturen herrschen, wieder an die Umgebungsluft abgeben. Nach HOLM kann dem Einfluss solcher Wechselwirkungen zwischen äusseren, aber auch inneren Umgebungsbedingungen und Bauteil eine genauso wichtige Rolle, wie der Wahl des Modells, respektive der Materialparameter zugeschrieben werden (HOLM, 2001).

Je nach Position des Bauteils wird zwischen den drei Bereichen, äussere Umgebungsbedingungen über sowie unter Geländerkante und Innenraumverhältnisse unterschieden. Bedingt durch die jeweiligen Austauschprozesse, mittels Konvektion und Strahlung bzw. Leitung und Diffusion, sind in allen Fällen unterschiedliche Oberflächenübergangsbedingungen anzusetzen.

Aussenklima

Zu den auf ein Bauteil einwirkenden Aussenklimabedingungen zählen die Lufttemperatur und – feuchte, sowie die Strahlung und der Niederschlag. Dabei hängen die Strahlungs- und Niederschlagbelastungen von der Neigung und Orientierung des Bauteils ab und müssen deshalb auf die vorliegenden Verhältnisse umgerechnet werden. Zusätzlich sind Windgeschwindigkeit und Windrichtung, sowie Kenntnisse der Gebäudeströmungsverhältnisse zur Ermittlung des Schlagregens erforderlich. Mit Hilfe von Daten zur terrestrischen und atmosphärischen Gegenstrahlung besteht noch die Möglichkeit die langwellige Abstrahlung zu berücksichtigen. Für hygrothermische Simulationsrechnungen hat sich der Einsatz von Stundenmittelwerten als günstig erwiesen, da die täglichen Schwankungen der Witterungsverhältnisse in der Regel kurzfristige Betrachtungsintervalle erfordern (KÜNZEL, 1994). Das Fraunhofer Institut für Bauphysik stellt hierfür Referenzjahre diverser Regionen in ganz Europa zur Verfügung. Dabei werden zwischen einem kalten und warmen Jahresverlauf unterschieden, da normalerweise Feuchteprobleme nicht bei durchschnittlicher Witterung, sondern eher bei extremen Verhältnissen auftreten. Die ausgewählten meteorologischen Datensätze repräsentieren jeweils das statistisch kälteste bzw. wärmste Jahr innerhalb von zehn Jahren.

Neben den Test-Referenzjahren besteht die Möglichkeit eigene Klimafiles in WAC-Format zu erstellen. Hierfür hat das Fraunhofer Institut für Bauphysik zusätzlich ein passendes Hilfsprogramm in Excel-Format entwickelt, das beim Kauf des Simulationsprograms WUFI® mitgeliefert wird.

Umgebungsbedingungen im Erdreich (Dachbegrünung – extensive Begrünung)

Im Erdreich werden die Temperaturschwankungen der Aussenluft nur stark gedämpft weitergeleitet. Bereits ab einer Tiefe von einem Meter ist die Dämpfung bereits so gross, dass keine Tageschwankungen mehr feststellbar sind. Neben dieser Dämpfung findet zusätzlich eine mehrwöchige Phasenverschiebung zur Lufttemperatur statt. Diese macht sich vor allem im Frühjahr und im Herbst bemerkbar. Im Erdreich mit existierender Vegetation, wie dies zum Beispiel auf begrünten Flachdächern der Fall ist, beträgt die Feuchte zwischen 99% und 100%, da Pflanzen nur in diesem Feuchtebereich der Umgebung Wasser entziehen können.

Raumklima

Im Gegensatz zum Aussenklima wird das Raumklima durch das Nutzverhalten bestimmt. Da aber der Verlauf der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte schon durch die Wärmekapazität und Wasserdampfsorptionsfähigkeit der Inneneinrichtung genügend gedämpft wird, sind nur noch für spezielle Fragestellungen stündliche Messwerte der Raumklimadaten erforderlich.

Da die in der DIN 4108-3 spezifizierte Raumklimabedingungen für die Tau- und Verdunstungsperiode allenfalls nur für einfache stationäre Verfahren Randbedingungen für einen Jahresverlauf darstellen, hat KÜNZEL Messungen in Wohnungen durchgeführt (DIN 4108-3, 2012) (KÜNZEL, 1997). Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass die innere Feuchtelast in Zusammenhang mit der Raumluftfeuchte, aber auch mit der Außenlufttemperatur steht und fast linear mit letzterer abnimmt. Die interne Feuchtelast ergibt sich somit aus der Feuchteproduktion und der Luftwechselrate und ist die Differenz zwischen der Wasserdampfkonzentration der Innen- und Außenluft. Daraus lassen sich die monatlichen Innenluftfeuchten errechnen. KÜNZEL definiert für den Jahresverlauf eine Sinusfunktion mit Maximalwerten im August und Minimalwerten im Februar, die mit entsprechender Amplitude auch im WUFI® verwendet werden kann (KÜNZEL, 1997). Neben der Sinuskurve besteht zusätzlich die Möglichkeit das Innenraumklima über die DIN EN ISO 13 788 zu definieren (DIN EN ISO 13 788, 2013). Diese verfügt über eine ähnliche Einteilung, basiert aber vor allem auf Ergebnissen einer skandinavischen Studie.

Wie schon beim Aussenklima ist es ebenfalls beim Innenklima möglich, eigene Klimafiles in WAC-Format zu erstellen, dies analog mit entsprechenden Datensätzen von Innenräumen.

Wärme- und Feuchteübergang

Die Bauteiloberfläche wird über eine Grenzschicht durch das Aussenklima, mit Ausnahme der Situation im Erdreich, und durch das Innenklima beansprucht. Diese Grenzschicht stellt einen strömungsabhängigen Widerstand für den Wärme- und Fechtetransport dar, der mittels Übergangskoeffizienten beschrieben wird. Der Wärmeaustausch an der Oberfläche wird in der Bauphysik mit dem Wärmeübergangskoeffizienten α berücksichtigt und setzt sich aus einem konvektiven und einem strahlungsbedingten Anteil zusammen (Gleichung 5.3).

$$\alpha_w = \alpha_k + \alpha_s \quad (5.3)$$

α_w = Wärmeübergangskoeffizienten in $W/(m^2 \cdot K)$

α_k = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$

α_s = strahlungsbedingter Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$

Dabei ist der strahlungsbedingte Wärmeübergangskoeffizient α_s lediglich für den Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen zuständig, die sich mehr oder weniger auf der Umgebungstemperatur befinden.

WUFI® stellt, neben der Möglichkeit eigene Werte einzugeben, vordefinierte Wärmeübergangswiderstände für geneigte oder flache Dächer und Aussenwänden zur Verfügung. Der Wärmeübergangswiderstand R_s ist der reziproke Wert des Wärmeübergangskoeffizienten α_w .

Äusserer Wärmeübergangswiderstand:

- $0 \frac{m^2 K}{W}$ für Kellerwände in direktem Kontakt zum Erdreich
- $0.052 \frac{m^2 K}{W}$ für geneigte oder flache Dächer
- $0.056 \frac{m^2 K}{W}$ für Aussenwände (KÜNZEL, 1994)

Innerer Wärmeübergangswiderstand:

- $0.13 \frac{m^2 K}{W}$ für Kellerwände, Aussenwände und Dächer (ERHORN & SZERMAN, 1992)

Absorptions- und Emissionsgrade für Strahlung

Dem langwelligen Strahlungsaustausch zwischen zwei Körpern wird bereits über die vorhin beschriebenen Wärmeübergangskoeffizienten Rechnung getragen. Dabei wird die Temperatur dieser Oberflächen näherungsweise gleich der Lufttemperatur gesetzt, zumal die ausgetauschten Netto-Strahlungsströme aufgrund der untereinander ähnlichen Temperaturen relativ gering sind.

Die Sonnenstrahlung hingegen hat mit der Lufttemperatur nichts zu tun, beeinflusst aber die Oberflächentemperatur der Aussenbauteile massgebend, da ein Teil der kurzweligen Strahlung in Wärme umgewandelt werden kann. Somit lassen sich die Einwirkungen der Strahlung am besten als zusätzliche Wärmequelle beschreiben. Dieser Bruchteil an absorbiert kurzwelliger Strahlung des gesamten Spektrums wird als kurzwellige Strahlungabsorptionszahl a_s bezeichnet und ist hauptsächlich von der Oberflächenfarbgebung des Materials abhängig (siehe Abschnitt 2.4.2). Aus diesem Grund bietet WUFI® neben der benutzerdefinierten Eingabe auch eine Auswahl an verschiedenen Oberflächen an. Diese reicht von hell gefärbten Oberflächen, wie Putz mit einem Absorptionsgrad von 0.4, bis hin zu dunkel gefärbten Oberflächen, wie Bitumendachhaut mit einem Absorptionsgrad von 0.8.

Der in der Sonnenstrahlung enthaltene langwellige Anteil ist gegenüber der langwelligen Strahlung aus irdischen Quellen völlig vernachlässigbar (HTML Help, 2013).

Hygrothermische Ausgangszustände

Die Anfangsbedingungen für die Feuchte und Temperatur in einem Bauteil müssen zu Beginn einer Simulation gegeben sein. Die Temperaturverteilung stellt sich in der Regel viel schneller ein, als die Feuchteverhältnisse. Deshalb reicht die Vorgabe einer einheitlichen Anfangstemperatur mehrheitlich aus. Bei der Anfangsfeuchte kann entweder von einem „lufttrockenen Zustand“ der einzelnen Bauteilschichten ausgegangen werden, oder bei einer längerfristigen Betrachtung von einem eingeschwungenen Zustand unter den gegebenen Klimabedingungen. Im ersten Fall darf für alle Bauteilschichten die Ausgleichfeuchte bei 80% relativer Luftfeuchte angesetzt werden (HTML Help, 2013). Im zweiten Fall werden die Berechnungen über mehrere Jahreszyklen mit demselben Klimadatensatz durchgeführt, bis sich von einem Zyklus zum nächsten keine Änderungen im Feuchteprofil zu einem bestimmten Stichtag mehr ergeben. Die ergebene Ausgleichfeuchte kann dann in einer weiteren Simulation eingelesen und als Anfangsfeuchte definiert werden.

5.1.2 Materialparameter

Neben den Rand- und Anfangsbedingungen hängen die Wärme- und Feuchteströme in einem Bauteil im Wesentlichen auch von den Leit- und Speicherfähigkeiten der einzelnen Materialien ab. Diese Materialeigenschaften stehen in Zusammenhang mit Grundkennwerten, wie Darrdichte, Wärmekapazität oder Porosität. Die Bestimmung einiger Materialparameter sind heute auf nationaler, wie internationaler Ebene normativ geregelt und in Datenbanken oder Tabellenwerken zusammengetragen (HOHMANN, 2011). Trotzdem existiert bis heute kein vollständiger Satz an Messvorschriften für die Bestimmung aller Transportkoeffizienten.

Grundkennwerte

Rohdichte

Die Rohdichte ρ_{roh} ist das Verhältnis der Masse m des Probestücks zum Gesamtvolume V_{ges} .

$$\rho_{roh} = \frac{m}{V_{ges}} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}\rho_{roh} &= \text{Rohdichte in kg/m}^3 \\ m &= \text{Masse in kg} \\ V_{ges} &= \text{Volumen in m}^3\end{aligned}$$

Die Rohdichte ist relevant für die optionale Berechnung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit. Zudem dient sie zur Umrechnung der massen- in die volumenspezifischen Wärmekapazität und Wassergehalte sowie umgekehrt.

Da die hygrothermische Simulation in der Regel nicht sehr empfindlich von den vorhin genannten Werten abhängt, muss sie nicht mit grosser Genauigkeit vorliegen.

Porosität

Die Porosität ϕ_p in m^3/m^3 stellt das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolume dar. Aus ihr ergibt sich der maximale Wassergehalt w_{max} . Sie kann entweder aus der Darrdichte ρ_0 und Rohdichte ρ_{roh} geschätzt oder durch eine direkte Messung der maximalen Wassersättigung bestimmt werden. Wie schon bei der Rohdichte zuvor hängen auch hier die meisten Rechnungen nicht sehr empfindlich von diesem Kennwert ab.

Der maximale Wassergehalt w_{max} eines Materials entspricht nicht der freien Wassersättigung w_f , die der gespeicherten Wassermenge bei einer relativen Luftfeuchte von 100% gleichkommt. Grund dafür sind eingeschlossene Luftinseln.

Wärmekapazität

Die Wärmekapazität C in J/K gibt an, wie viel thermische Energie zum Erwärmten eines Körpers um 1 K erforderlich ist. Dabei kann sie in zwei Arten von Wärmekapazität umgerechnet werden. Einerseits in die spezifische Wärmekapazität c, die sich auf die Masse des Körpers bezieht und andererseits in die Wärmespeicherzahl s, die in Bezug zum Volumen steht. Der Vorteil der erstgenannten Art ist, dass der Wert nur von der chemischen Zusammensetzung des Materials abhängt, nicht aber von seiner Porosität. Die zusätzliche Wärmekapazität von eventuell im Porenraum enthaltener Feuchtigkeit wird von WUFI® automatisch berücksichtigt und verfälscht die Ergebnisse somit nicht.

Wärmeleitfähigkeit trocken, 10°C

Die Wärmeleitfähigkeit λ_D in W/mK beschreibt die Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs im trockenen Zustand und bei 10°C. Praktisch gesehen ist sie die Wärmemenge in Ws, die in einer Sekunde durch eine ein Meter dicke Stoffschicht der Fläche 1 m² fliesst, wenn der Temperaturunterschied 1 K beträgt.

WUFI® wurde so konzipiert, dass der Latentwärmeeffekt explizit berücksichtigt wird und deshalb Werte möglichst ohne diese thermische Auswirkung des Dampftransports benötigt. Diesen Effekt aus den gemessenen Daten zu eliminieren ist allerding schwierig oder in bestimmten Situationen sogar unmöglich.

Sofern aber nicht speziell die Wärmeströme betrachtet werden wollen, kann der Einfluss dieser Grösse meist vernachlässigt werden.

Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, auch μ -Wert, gibt an, um welchen Faktor der Diffusionswiderstand im Material höher ist als in ruhender Luft. Der μ -Wert ist also das Verhältnis der Diffusionskoeffizienten D_a von Wasserdampf in der Luft und im Baumaterial. Für sehr diffusionsoffene Materialien, wie z.B. Mineralwolle ist er nahe 1, während er für Materialien mit höherem Diffusionswiderstand grösser ist. Aufgrund des in der Herleitungsformel enthaltenen Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten in Luft δ hängt der μ -Wert praktisch nicht von Temperatur und Druck ab, sodass er nur eine bestimmte Konstante vom betreffenden Material ist.

WUFI® behandelt den μ -Wert, selbst wenn er nicht als feuchteabhängig eingegeben wurde, bei Wassergehalten über der freien Wassersättigung w_f als feuchteabhängig. Der Diffusionsleitkoeffizient δ wird proportional zum Feuchteüberschuss über w_f , bis er bei maximaler Sättigung w_{max} den Wert 0 erreicht, also μ unendlich gross wird, reduziert. Damit wird annähernd berücksichtigt, dass bei sehr hohen Wassergehalten auch die grossen Kapillaren zunehmend mit Wasser gefüllt sind und nicht mehr zum Dampftransport beitragen können.

Feuchtespeicherfunktion

WUFI® verwendet insgesamt sieben hygrothermische Funktionen für die Berechnung der Wärme- und Feuchtetransporte innerhalb einer Konstruktion.

- Feuchtespeicherfunktion $w(\varphi)$
- Flüssigtransportkoeffizient D_{ws} , Saugen
- Flüssigtransportkoeffizient D_{ww} , Weiterverteilung
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , feuchteabhängig
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda(u)$, feuchteabhängig
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda(\theta)$, temperaturabhängig
- Enthalpie H , temperaturabhängig

Dabei ist die Feuchtespeicherfunktion, neben den Flüssigtransportkoeffizienten Saugen und Weiterverteilungen, eine der wichtigsten und einflussreichsten hygrothermischen Funktionen der Materialparameter. Sie gibt an, welchen Wassergehalt das Material bei einer gegebenen relativen Luftfeuchte annimmt (Abbildung 5.1). Die Temperaturabhängigkeit kann dabei vernachlässigt werden. Somit hängt die Funktion nur von der relativen Luftfeuchte als einzige Variabel ab.

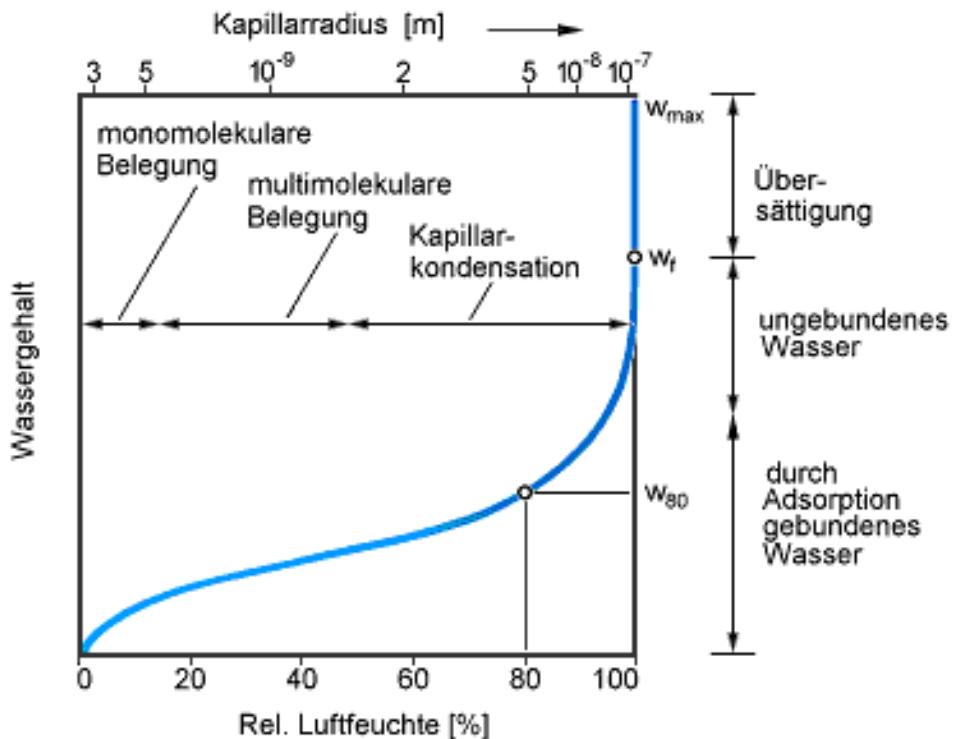


Abbildung 5.1: Kurve als Beispiel der Feuchtespeicherfunktion. Quelle: (HTML Help, 2013)

Die freie Wassersättigung w_f eines kapillaraktiven Stoffes entspricht bei der Feuchtespeicherfunktion der relativen Luftfeuchte 100% von, bzw. 1. Dennoch können, beispielsweise durch Kondensation im Temperaturgefälle, über die freie Wassersättigung hinausgehende Wassergehalte erreicht werden. Dieser Übersättigungsbereich reicht bis zum maximalen Wassergehalt w_{max} , der durch die Porosität bestimmt wird. WUFI® berücksichtigt diese Wassergehalte im Übersättigungsbereich, indem das Simulationsprogramm intern den zugehörigen Materialdatensatz um einen zusätzlichen Eintrag erweitert. Dem Wassergehalt werden auf diese Weise fiktive relative Luftfeuchten von 1 bis 1.01 zugewiesen, die eine mathematisch eindeutige Lösung der Transportgleichungen ermöglichen.

Einerseits kann die Feuchtespeicherfunktion durch Messungen im Labor bestimmt werden. In diesem Fall kann sie nach KRUS aus einer Sorptionsisothermen, die bis zu einer relativen Luftfeuchte von 90% reicht, und einer Saugspannungsmessung für die Werte oberhalb von 95% zusammengesetzt werden (KRUS, 1995). Andererseits kann die hygrothermische Funktion über ein Approximationsverfahren nach HOLM et al. definiert werden, das wesentlich weniger arbeitsintensiv ist (HOLM, et al., 2002). Die verwendete Approximationsfunktion bietet eine Hilfestellung für den Fall, dass nicht genügend Messwerte für einen kompletten Datensatz für die Erstellung einer Feuchtespeicherfunktion zur Verfügung stehen.

Approximation der Feuchtespeicherfunktion

HOLM et al. setzt die komplette Feuchtespeicherfunktion nicht mehr als Funktion der relativen Luftfeuchte an, sondern als Funktion des Kapillardrucks (HOLM, et al., 2002). Somit ergibt sich für nahezu alle Materialien einen typisch S-förmigen Verlauf. Die Approximationsfunktion wird vor allem durch den Gradienten im Bereich der Feuchtespeicherfunktion zwischen 80% (entspricht 300 bar) und 95% (entspricht 60 bar) bestimmt.

$$u(p_c) = \frac{w_f}{1 + \left(\frac{p_c}{p_{k1}}\right)^{p_{k2}}} = \frac{w_f}{1 + \left(\frac{\rho_w \cdot R_D \cdot T \cdot \ln(\varphi)}{p_{k1}}\right)^{p_{k2}}} \quad (5.5)$$

$u(p_c)$	= Materialfeuchte in %
p_c	= Kapillardruck in Pa
p_{k1}, p_{k2}	= freie Parameter
R_D	= Gaskonstante für Wasserdampf: 461,5 in $J/(kg \cdot K)$
T	= Temperatur in K
w_f	= freie Wassersättigung in kg/m^3
ρ_w	= Dichte von Wasser in kg/m^3
φ	= relative Luftfeuchte

Die freien Parameter p_{k1} und p_{k2} lassen sich durch Einsetzen der beiden Sorptionsfeuchten bei 80% und 95% relativen Luftfeuchte berechnen. Die Bestimmung des Kapillardrucks p_c erfolgt durch die Umrechnung mittels der Kelvin-Gleichung 5.6.

$$p_c = \rho_w \cdot R_D \cdot T \cdot \ln(\varphi) \quad (5.6)$$

p_c	= Kapillardruck in Pa
R_D	= Gaskonstante für Wasserdampf: 461,5 in $J/(kg \cdot K)$
T	= Temperatur in K
ρ_w	= Dichte von Wasser in kg/m^3
φ	= relative Luftfeuchte

Flüssigtransportkoeffizient (Generierung)

Der kapillare Flüssigtransport beeinflusst den Feuchtetransportmechanismus in kapillarporösen Materialien am massgebendsten. Für bauphysikalische Zwecke lässt er sich, obwohl es sich eigentlich um eine Strömungserscheinung handelt, mit hinreichender Genauigkeit durch die Gleichung 5.7 beschreiben.

$$g_w = -D_w(w) \cdot \text{grad } w \quad (5.7)$$

g_w	= Flüssigtransportstromdichte in $kg/(m^2 \cdot s)$
w	= Wassergehalt in kg/m^3
D_w	= Flüssigtransportkoeffizient in m^2/s

KRUS zeigt, dass der Flüssigtransportkoeffizient D_w stark vom Wassergehalt w und den Randbedingungen abhängt (KRUS, 1995). Somit ist er keine reine Materialeigenschaft.

Dabei wird zwischen dem Flüssigtransportkoeffizient Saugen D_{ws} und dem kleineren Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D_{ww} unterschieden. Der erstere bildet die kapillare Wasseraufnahme bei

vollständiger Benetzung einer Bauteiloberfläche ab. Der Saugvorgang wird von den grösseren Kapillaren im Material definiert, trotz der Gegebenheit, dass sie eine geringere Saugkraft aufweisen als die kleinen Kapillaren. Der verhältnismässig geringe Strömungswiderstand ihres grösseren Durchmessers wird in diesem Fall massgebend.

Der Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D_{ww} übernimmt die Beschreibung der Umverteilung des aufgesaugten Wassers, wenn nach Beendigung der Benetzung kein neues Wasser mehr eindringt und das vorhandene Wasser sich zu verteilen beginnt. Dies entspricht im Bauteil der Feuchtwanderung in Abwesenheit von Regen. In diesem Fall wird das Weiterverteilen von den kleineren Kapillaren bestimmt. Mit ihrer grösseren Saugkraft entziehen sie den grossen Kapillaren das Wasser. Ihr höherer Strömungswiderstand aber ist der Grund, weshalb das Weiterverteilen in den kleinen Kapillaren langsamer abläuft. Folglich fällt auch der zugeordnete Flüssigtransportkoeffizient deutlich kleiner aus gegenüber dem des Saugens. Aufgrund dieser Diskrepanz zwischen den beiden Flüssigtransportkoeffizienten definiert WUFI® für kapillaraktive Materialien jeweils eigene voneinander unabhängige Datensätze (Tabellen), die je nach Randbedingungen (Regen/kein Regen) in der Rechnung zur Anwendung kommen.

5.1.3 Hygrothermische Quellen als zusätzliche Randbedingungen

a. Feuchtequelle im Substrat, Spezifisches Gründachmodell

Die Substratschicht eines extensiv begrünten Flachdachs hat wesentlichen Einfluss auf die Wärme- und Feuchtevorgänge innerhalb der Konstruktion. Sie ist dabei einerseits bestimmender Faktor der Wärmegewinne und –verluste, sowie der Temperaturamplitudendämpfung und andererseits der Aufnahme, Speicherung und Weiterverteilung von Niederschlagswasser. Dennoch dürfen die energetischen Vorteile des Gründachs im Gegenzug natürlich nicht zu Feuchteproblemen und Bauschäden führen. Aus diesem Grund beschäftigten sich in den letzten Jahren mehrere Arbeiten mit den feuchte- und wärmetechnischen Verhältnissen in und unter der Eindeckungsschicht. Einige entwickelten sogar Berechnungsmodelle zur Berücksichtigung des Einflusses der Substratschicht in hygrothermischen Simulationen (PALOMO DEL BARRIO, 1998) (THEODOSIOU, 2003) (SAILOR, 2008) (SCHAFAZCEK, et al., 2013).

SCHAFAZCEK et al.'s Ergebnisse der Studie zeigen, dass die relative Luftfeuchte unter der Substratschicht die meiste Zeit, mit Werten nahe 100%, sehr hoch liegt. Einige Ausnahmen bilden sehr warme und trockene Perioden im Sommer bei Aufbauten ohne wasserspeichernde Drainageschicht, wo für kurze Zeit die relative Luftfeuchte unter 90% fallen kann (SCHAFAZCEK, et al., 2013). Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde mit Hilfe hygrothermischer Simulationen die Materialkennwerte des zuvor vom Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelten spezifische Berechnungsmodell der Substratschicht iterativ so angepasst, dass sich die wärme- und feuchte-technischen Verhältnisse im Flachdach gut nachrechnen lassen. Da das Niederschlagswasser aber nicht nur durch die Kapillarleitung vom Substrat aufgenommen wird, sondern auch durch dieses hindurch sickert, bzw. –fliesst, kann dessen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Konstruktion nicht nur mittels den Materialkennwerten berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde zusätzlich in den unteren 2 cm des Substrats eine Feuchtequelle angesetzt. Diese wird mit einem 40% Anteil des Schlagregens, begrenzt auf die freie Wassersättigung des Substrats, beschrieben und gewährleistet damit eine konstant hohe Feuchte unter der Substratschicht aufgrund von Sickerwasser.

b. Konvektiver Feuchteintrag, Dampfkonvektionsmodell

Die Diffusion von Wasserdampf aus dem Innenraum in die Konstruktion in der kalten Jahreszeit, ist eine wesentliche Ursache von Feuchte auf und vor allem in Konstruktionen. Durch zusätzliche Unterschreitung der Taupunkttemperatur an Oberflächen eines Aufbaus kann es zur Bildung von Tauwasser kommen. Neben der Wasserdampfdiffusion gelangen aber auch kleinere Feuchtemengen durch Luftinfiltration, durch kaum vermeidbare Restleckagen, in die Konstruktion. Dabei stellt aber nicht jede luftdurchströmbar Fehlstelle im Bauteil ein feuchtetechnisches Problem dar. Daher wird zwischen zwei Arten von Leckagen unterschieden (Abbildung 5.2). Bei „Wärme-Leckage“ strömt die Raumluft auf relativ geradem Weg von innen nach aussen. Im Normalfall nimmt sie dabei so viel Wärme mit, dass es nicht zur Tauwasserbildung kommt, da die Temperatur im Strömungskanal durchgehend oberhalb der Taupunkttemperatur der Raumluft bleibt und so die Leckagen feuchtetechnisch unproblematisch sind. „Feuchte-Leckage“ hingegen sind enge und verzweigte Strömungskanäle im Bauteilinnern, die die Raumluft nur sehr langsam und über längere Distanz nach aussen strömen lassen. Dabei kühlst sich die Luft soweit ab, dass ein Teil des mitgenommenen Wasserdampfes in der kälteren Zone des Bauteils als Tauwasser ausfällt. Nach ZIRKELBACH et al. beträgt ihr Anteil an der Luftdurchlässigkeit der gesamten Gebäudehülle nur etwa 7% (ZIRKELBACH, et al., 2009). Die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle kann mit Hilfe einer Gebäudedichtheitsprüfung, auch unter dem Begriff „Blowerdoor-Test“ bekannt, quantifiziert werden.

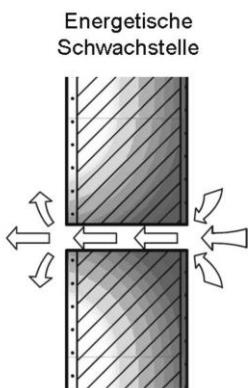


Abbildung 5.2: Kurze und gerade "Wärme-Leckage" rechts sowie lange und verwundete "Feuchte-Leckage" links.
Quelle: (KÜNZEL, et al., 2010)

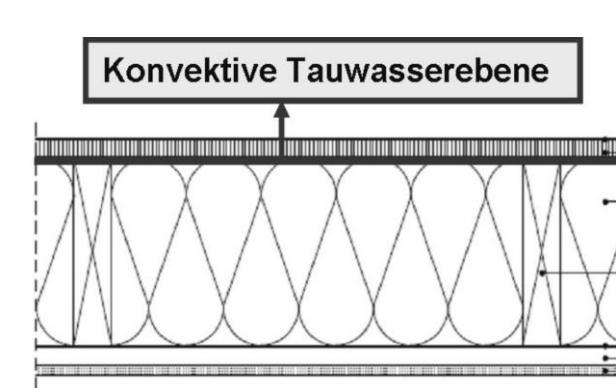
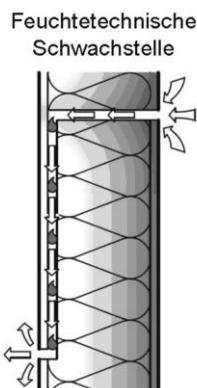


Abbildung 5.3: Mögliche konvektive Befeuchtungsebene in einer Konstruktion. Quelle: (KÜNZEL, et al., 2010)

Angetrieben wird die Dampfkonvektion durch windinduzierte und thermische Druckdifferenzen, die im Mittel häufig eine ähnliche Größenordnung erreichen. Eine feuchtetechnisch relevante Randbedingung stellen jedoch nur die thermisch bedingten Auftriebskräfte dar. So führen thermisch bedingte Luftströmungen durch das Bauteil im Winter zu einer gleichmässigen und kontinuierlichen Befeuchtung, wohingegen bei den stark schwankenden windinduzierten Druckdifferenzen aufgrund Durchströmungsspitzen aus „Feuchte-Leckagen“ feuchtetechnisch unkritische „Wärme-Leckagen“ werden können (Abbildung 5.2). Zusätzlich wirken diese vom Wind angetriebenen Luftströmungen das ganze Jahr über in ähnlicher Weise, was im Sommer zu einer konvektiven Austrocknung des im Winter angefallenen Tauwassers führt. Bei den thermisch bedingten Luftströmungen jedoch findet dieser Effekt so gut wie nie statt, da die Temperaturunterschiede und damit auch die Differenzdrücke im Sommer sehr klein werden.

Neben dem Modell zur Berücksichtigung des Sickerwassers, entwickelte das Fraunhofer Institut für Bauphysik basierend auf Untersuchungen von TENWOLDE et al. ebenfalls ein Modell zur Quantifizierung des vorhin beschriebenen Dampfkonvektionsflusses (ZIRKELBACH, et al., 2009) (TENWOLDE, et al., 1998). Dieses Dampfkonvektionsmodell ermöglicht eine instationäre Ermittlung der konvektiv eingetragenen Feuchtemengen in Abhängigkeit vom Dichtheitsgrad der Gebäudehülle, des zusammenhängenden Luftvolumens innen, dem jeweiligen Bauteilaufbau, der möglichen Durchströmungsebene und von den aktuellen Außen- und Raumklimabedingungen. Dabei wird das ausfallende Tauwasser als Feuchtequelle innerhalb der Konstruktion und nicht die Durchströmung selbst abgebildet. Dies weil es sich beim konvektiven Eintrag von Feuchte über Fehlstellen der Luftpfechtigkeitsebene um einen mehrdimensionalen Effekt handelt, der mit einer eindimensionalen Berechnung nicht unmittelbar erfasst werden kann. Eine mögliche mehrdimensionale Berechnung scheitert wiederum am unverhältnismässig grossen rechnungstechnischen Aufwand und an der Unbekannten der genau geometrischen Ausbildung der Leckagen. Diese Feuchtequelle wird mit den entsprechenden Werten der Gebäudedichtheit (aus Blowerdoor-Test oder Annahmen) und der Höhe der Luftsäule in der möglichen konvektiven Befeuchtungsebene angesetzt (Abbildung 5.3).

5.2 Material und Methodik

Das Berechnungsprogramm WUFI® des Fraunhofer Instituts für Bauphysik wird mehrheitlich von Konstruktionsplanern und Baustoffproduzenten für hygrothermische Simulationen von geplanten Konstruktionen verwendet. D.h. noch nicht ausgeführte Bauteilaufbauten, wie Außenwände und Flachdächer, werden auf ihr wärme- und feuchtetechnisches Verhalten geprüft und somit beurteilt, inwiefern diese den normierten bautechnischen Anforderungen genügen. Bei solchen Simulationen wird stets vom schlimmsten Fall ausgegangen, um als Konstruktionsplaner auch bei extremen Bedingungen und Ausnahmefällen die Funktionstüchtigkeit der Konstruktion gewährleisten zu können. Entsprechend fallen minim von der Realität abweichende Materialkennwerte, sowie Anfangs- und Randbedingungen nicht so stark ins Gewicht.

In der Wissenschaft jedoch wird WUFI® hauptsächlich für realitätsgetreue hygrothermische Simulationen verwendet, mit dem Ziel das effektive Wärme- und Feuchteverhalten von Konstruktion und Baustoffen abzubilden. Dabei werden die Materialparameter aus Materialkenndaten abgeleitet, die auch den verwendeten Materialien entsprechen und die Rand- und Anfangsbedingungen den klimatischen Verhältnissen Vorort angepasst.

Ein kompletter Datensatz von Materialparametern wird vom Fraunhofer Institut für Bauphysik zur Verfügung gestellt. Einige dieser Kennwerte der verbauten Materialien können somit gleich verwendet werden, ohne diese anpassen zu müssen. Andere jedoch weichen stark von der vorliegenden Situation ab, oder existieren erst gar nicht. Die entsprechenden Materialkennwerte, und somit auch die Materialparameter, müssen deshalb abgestimmt oder neu generiert werden, damit sie den effektiven, konstruktiven Verhältnissen am Bau entsprechen. Diese Anpassungen und Generierungen, aber auch die Bestimmung der Anfangs- und Randbedingungen, sind jedoch lediglich über einen iterativen Prozess möglich. Dabei werden die einzelnen Parameter und deren Einfluss auf das Wärme- und Feuchteverhalten miteinander verglichen und validiert. Somit werden verschiedenste Szenarien mit immer anderen Parameter durchgerechnet, bis eine weitere Annäherung an die vorliegende Situation im Flachdach nicht mehr möglich ist.

Einige dieser Parameter können erst mit Hilfe von Messungen bestimmt werden. Die Abbildung 5.4 zeigt auf, welche Größen für eine hygrothermische Bauteilberechnung notwendig sind und welche Inputgrößen zusätzlich separat bestimmt und/oder ermittelt werden mussten. Eine komplette Übersicht über die verwendeten Parameter und Datensätze ist im CD-Anhang vorzufinden.

Diese notwendigen Mess- und Prüfverfahren und deren Ergebnisse werden noch in diesem Kapitel kurz beschrieben.

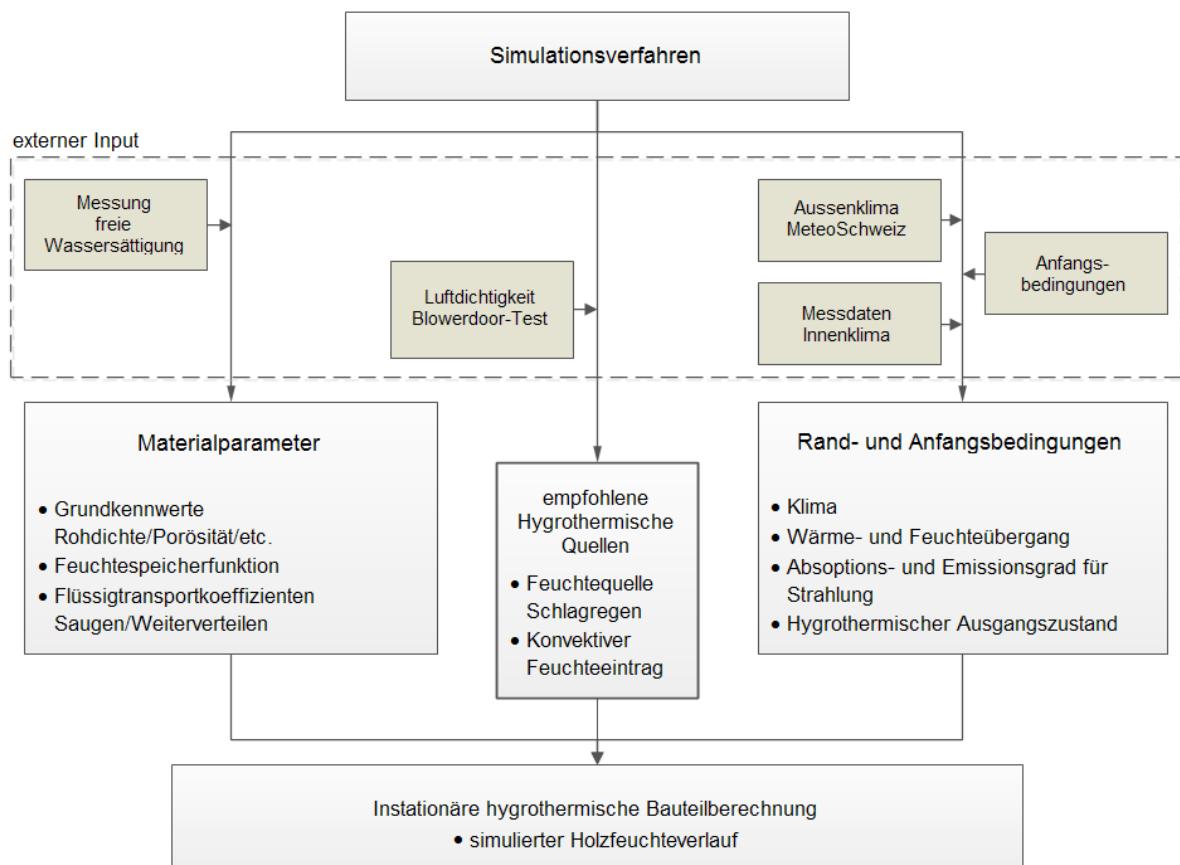


Abbildung 5.4: Ablauf des Simulationsverfahrens mit WUFI®.

5.2.1 Luftdichtigkeitsmessung – Blowerdoor-Test

Der Blowerdoor-Test dient in erster Linie der Ermittlung der Luftdurchlässigkeit q_{50} der Gebäudehülle bei einer Druckdifferenz von 50 Pa. Erst durch ihren Wert ist es möglich das Dampfkonvektionsmodell, also den konvektiven Feuchteeintrag so zu modellieren, dass jenes mit hoher Genauigkeit die reale Situation wiedergibt. Ohne diesen gemessenen Wert müsste man vom schlechtesten Fall ausgehen, der einen q_{50} -Wert von $5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ besäße und im Bereich der Luftdichtigkeitsklasse C eingeteilt würde. Diese Luftdichtigkeitsklasse C entspräche jedoch nicht den vorherrschenden Verhältnissen am Zweifamilienhaus der Familie Heinzer.

Im Folgenden wird das Messverfahren des Blowerdoor-Tests kurz beschrieben. Auf nähere Angaben zu den Messgeräten, Prüfparametern und Planungsunterlagen sowie zum Prüfobjekt und deren Messzone wird an dieser Stelle jedoch verzichtet, da schon ein vollständiger Prüfbericht existiert. Dieser, inklusive allen nötigen Angaben, sind dem Prüfprotokoll im CD-Anhang zu entnehmen.

Messverfahren

Im Falle dieses Objektes bestand das zu messende Gebäudevolumen aus allen beheizten, gekühlten und mechanisch belüfteten Räumen, d.h. aus der gesamten Wohnung der Familie Heinzer, da diese über keinen Keller oder Dachstock verfügt. Der gesamte zu untersuchende Gebäudeteil wurde so gestaltet, dass er sich bei Druckbeaufschlagung als eine Zone verhält. Dazu werden alle Innentüren geöffnet, damit im Innern ein gleichmässiger Druck erreicht werden kann.

Der Einbau der Minneapolis Blowerdoor-Apparatur der Firma Blower Door GmbH [10] wird im Bereich der Küche getätigigt, da die Norm vom Einbau im Bereich der Hauseingangstür abrät (Abbildung 5.5). Die Vorrichtung, die nun die ausgehängte Aussentür ersetzt, wird zusätzlich bei der Fuge im Bereich Übergang Luftfördereinrichtung- und Küchentürrahmen abgeklebt (Abbildung 5.6). Somit kann eine maximale Dichtigkeit gewährleisten werden.

Ebenfalls die Luftpülchlässe (in diesem Fall Ab- und Zuluftöffnungen) der kontrollierten Lüftungsanlage werden mit Abdichtungsbalkonen verschlossen, wie auf der Abbildung 5.7 ersichtlich.

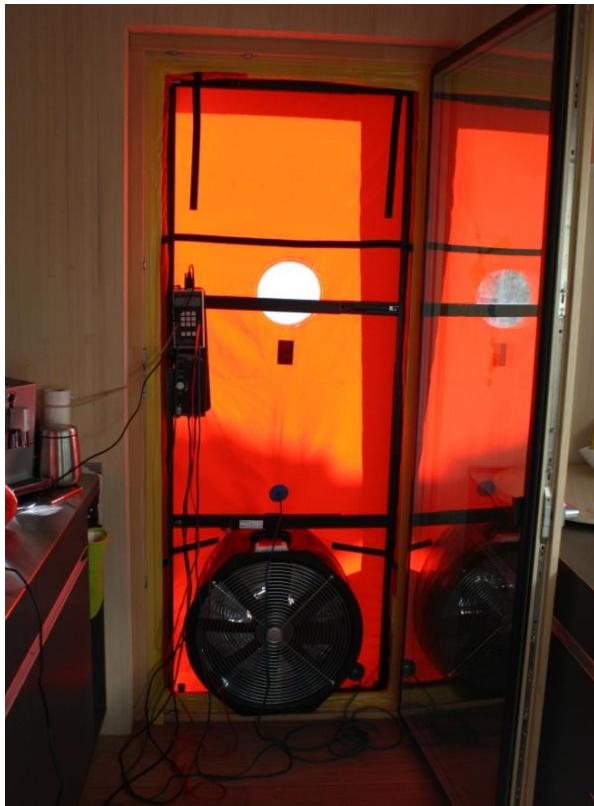


Abbildung 5.5: In die Küchentür eingesetzte Blowerdoor-Apparatur, Modell Minneapolis der Firma Blower Door GmbH [10].



Abbildung 5.6: Abkleben der Fuge zwischen dem Rahmen der Apparatur und dem Rahmen der Aussentür.



Abbildung 5.7: Mit Ballon abgedichteter Luftschaft der kontrollierten Lüftungsanlage.

Nach dem normierten Aufbau der ganzen Apparatur und einem zusätzlichen Kontrollgang kann mit dem eigentlichen Messverfahren begonnen werden. Die Durchführung dieses Messverfahrens, gemäss der Norm DIN EN 13 829, besteht aus folgenden drei Teilschritten (DIN EN 13 829, 2000):

Vorausgehende Prüfung

Mit Hilfe eines raucherzeugenden Glühstiftes wird die ganze Gebäudehülle, v.a. Anschlüsse an die Konstruktion (Fenster und Aussentüren), bei einer Druckdifferenz zwischen Aussen und Innen von 50 Pa, auf Leckagen geprüft (Abbildung 5.8). Diese protokollierten Schwachstellen sind wiederum im Prüfbericht vorzufinden, der sich im CD-Anhang befindet.

Neben der Leckagenortung ist die Windgeschwindigkeit, bzw. die Windstärke, zu protokollieren, sodass der Luftvolumenstrom entsprechend der Dichte der Luft korrigiert werden kann.

Natürliche Druckdifferenz

Für die Messung der natürlichen Druckdifferenz wird die Öffnung der Luftfördereinrichtung vorübergehend verschlossen (Abbildung 5.9). Über einen Zeitraum von mindestens 30 s werden jeweils die Mittelwerte der positiven Werte Δp_{01+} und der negativen Werte Δp_{01-} der natürlichen Druckdifferenz ermittelt und aufgezeichnet. Ist der Betrag eines dieser Mittelwerte grösser als 5 Pa, kann die Messung nicht durchgeführt werden. Wird die 5 Pa-Grenze eingehalten, muss wiederum über den Zeitraum von 30 s der Mittelwert aller Werte der natürlichen Druckdifferenz Δp_{01} ermittelt und aufgezeichnet werden.

Am Ende der Differenzdruckmessung wird der ganze Vorgang der natürlichen Druckdifferenzmessung wiederholt (Δp_{02+} , Δp_{02-} , Δp_{02}) und erneut mit der 5 Pa-Grenze verglichen. Fällt einer der Werte über den Grenzwert, muss die Messung für ungültig erklärt werden.



Abbildung 5.8: Mittels Rauch können grössere Leckagen gefunden und sichtbar gemacht werden.



Abbildung 5.9: Verschliessen der Luftfördereinrichtung mittels Verschlusskappe.

Differenzdruck-Messreihe

Für die Differenzdruck-Messreihe wird die zuvor aufgesetzte Verschlusskappe wieder weggenommen und die Luftfördereinrichtung eingeschaltet. Insgesamt werden zwei Messreihen durchgeführt, wobei die erste bei Unterdruck und die zweite bei Überdruck aufgenommen werden. Für jede Messreihe werden 5 Messpunkte in ungefähr gleichen Abständen zwischen der grössten und der kleinsten Druckdifferenz aufgezeichnet. Beide Messreihen werden bei einer maximalen Druckdifferenz von 70 Pa zwischen Innen und Aussen gestartet und bei einer Druckdifferenz von 25 Pa beendet. Hierbei soll darauf geachtet werden, dass die einzelnen Schritte zwischen den insgesamt sieben Messpunkten laut Norm nicht mehr als 10 Pa betragen (DIN EN 13 829, 2000).

5.2.2 Bestimmung der freien Wassersättigung

Für die realitätsgerechte hygrothermische Bauteilberechnung der Flachdachdachkonstruktion ist, nebst den vielen anderen Materialkennwerten, auch die freie Wassersättigung w_f des Dämmmaterials von Belangen. Dieser Wert, wie bereits im Abschnitt 5.1.2 beschrieben, beeinflusst den für die Berechnung massgebenden Materialparameter „Feuchtespeicherfunktion“.

Für das Dämmmaterial aus Holzfaser PAVAFLEX stehen zwei Datensätze zur Verfügung. Einen älteren Datensatz, welcher vom Fraunhofer Institut für Bauphysik (IPB) entwickelt worden ist, und einen aktuelleren, inoffiziellen von PAVATEX®, dem Hersteller dieser Weichfaserdämmung. Der Datensatz von PAVATEX® basiert auf den Daten des IPB, wobei einige Materialkennwerte aktualisiert und angepasst wurden. Dieser Datensatz ist bis anhin noch nicht offiziell validiert worden und darf deshalb nur mit Vorsicht verwendet werden. Der massgebendste Unterschied dieser beiden Datensätze liegt in der freien Wassersättigung w_f des Dämmstoffes. Diese beiden Werte differenzieren sich mit einem Faktor 10. Entsprechend ergeben sich unterschiedliche Feuchtespeicherfunktionen, die mittels der freien Wassersättigung und dem Feuchtegehalt des Materials bei einer relativen Luftfeuchte von 80% berechnet werden. Die Werte und jeweiligen Feuchtespeicherfunktionen sind untenstehend dargestellt.

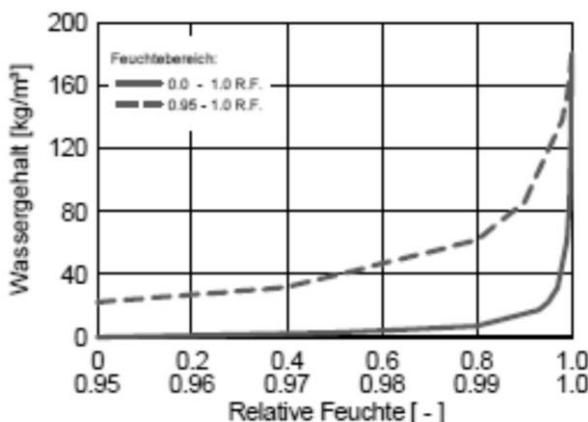


Abbildung 5.10: Feuchtespeicherfunktion von PAVAFLEX mit dem Datensatz des IPB. Quelle: (WUFI Pro 5.2, 2013)

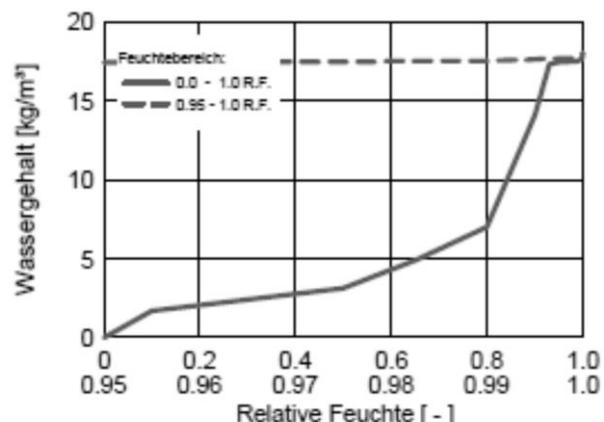


Abbildung 5.11: Feuchtespeicherfunktion von PAVAFLEX mit dem Datensatz des Herstellers PAVATEX®. Quelle: (WUFI Pro 5.2, 2013)

Bezugsfeuchtegehalt	7 kg/m ³	Bezugsfeuchtegehalt	7 kg/m ³
Freie Wassersättigung	180 kg/m ³	Freie Wassersättigung	18 kg/m ³

Der Wassergehalt der Holzfaserdämmung erreicht bei 100% relativer Luftfeuchte beim IPB-Datensatz einen Wert von 180 kg/m³, d.h. die freie Wassersättigung w_f des Materials liegt ebenfalls auf diesem Niveau. Der PAVATEX®-Datensatz berechnet die Feuchtespeicherfunktion mit einem Wert für die freie Wassersättigung w_f von 18 kg/m³.

Diese Diskrepanz und die Frage welcher dieser beiden Werte dem wahren Verhalten des Weichfaserdämmstoffes entspricht, kann erst über eine eigene Messung beurteilt werden.

Die Messung der freien Wassersättigung des Dämmstoffes PAVAFLEX des Herstellers PAVATEX® orientiert sich an der Norm DIN EN ISO 15 148 (DIN EN ISO 15 148, 2002). Das hier verwendete Verfahren wurde so abgeändert, dass es die Bedingungen für die Bestimmung der freien

Wassersättigung erfüllt. Dabei soll vor dem Versuch die Masse von klimatisierten (20°C/65%) Prüfkörper bestimmt werden. Nach dieser Massenbestimmung werden die Prüfkörper über eine längere Zeit in Wasser getaucht und schliesslich ganz untergetaucht. Haben sich die Prüfkörper komplett mit Wasser vollgesaugt, ist es möglich den maximalen Wassergehalt w_{\max} zu bestimmen. Um aber einen Wert für die angenäherte freie Wassersättigung w_f zu erhalten, müssen die Prüfkörper zuerst abtropfen, bis sich kein freies Wasser mehr in den Zwischenräumen des Dämmstoffes befindet. Dieser Zustand ist dann vergleichbar mit dem Wassergehalt bei einer relativen Luftfeuchte von 100% und kann den Werten der Datensätze gegenüber gestellt, bzw. für die Berechnung der Feuchtespeicherfunktion verwendet werden.

Die freie Wassersättigung w_f ergibt sich aus der Differenz zwischen der Rohdichte ρ_f bei Fasersättigung und der Darrdichte ρ_0 (Gleichung 5.8).

$$w_f = \rho_f - \rho_0 \quad (5.8)$$

w_f = freie Wassersättigung in kg/m^3

ρ_f = Rohdichte bei Fasersättigung in kg/m^3

ρ_0 = Darrdichte in kg/m^3

Messverfahren

Aus den Weichfaserdämmstoffplatten PAVAFLEX werden insgesamt 12 Prüfkörper in Form eines Würfels mit der Kantenlänge von 120 mm zugeschnitten und mit einem wasserfesten Marker beschriftet (Abbildung 5.12). Die wichtigsten Angaben zum Weichfaserdämmstoff PAVAFLEX und dessen Eigenschaften nach dem Produktdatenblatt (siehe CD-Anhang) von PAVATEX® sind folgend aufgelistet.

Tabelle 13: Eigenschaften des Holzfaserdämmstoffes PAVAFLEX.

PAVAFLEX	
Rohdichte ρ_{roh} :	55 kg/m^3
Wärmeleitfähigkeit λ_D :	0.038 W/mK
Spez. Wärmekapazität c:	2100 J/kgK
Dampfdiffusionswiderstandszahl μ :	2
Inhaltsstoffe:	82% Nadelholz 8% Polyolefin 10% Ammoniumpolyphosphat

Von jedem vorklimatisierten (20°C/65%) Prüfkörper werden die Dimensionen mit einem gewöhnlichen Zollstab und die Masse mit der Waage [7] genommen und dokumentiert. Die 12 Würfel werden nun auf zwei Gitter verteilt, die in die zwei vorbereiteten Boxen gelegt werden. Diese Boxen sind mit so viel Wasser gefüllt, dass bei vollständigem Absinken die Oberseite der Prüfkörper mindestens 2 bis 3 cm über den Wasserspiegel ragen (Abbildung 5.13). Dies hat die Absicht, dass bei der Wasseraufnahme von den fünf Seiten keine Luft vom Wasser eingeschlossen wird. Somit saugen sich die Prüfkörper von unten mit Wasser voll, welches die Luft nach oben verdrängen kann.



Abbildung 5.12: Zugeschnittene Prüfkörper in Würfelform mit einer Kantenlänge von 120 mm.



Abbildung 5.13: In Wasser gelagerte Prüfkörper.

Nach 24 Stunden werden die Prüfkörper vollständig mit Wasser überdeckt und einen weiteren Tag gelagert bis diese komplett mit der Flüssigkeit gesättigt sind (Abbildung 5.14). Zu diesem Zeitpunkt haben die Prüfkörper den maximalen Wassergehalt w_{max} erreicht und erfahren keine Massenänderung mehr. Die Prüfkörper werden nun aus dem Wasser gehoben und auf ein Gitter gelegt. Hier können sie so lange abtropfen, bis sich kein freies Wasser mehr in den Zwischenräumen des Dämmstoffes befindet (Abbildung 5.15). Das einzige, visuell sichtbare Indiz für das Vorhandensein von freiem Wasser, sind die dunkleren Stellen im unteren Bereich der Prüfkörper. Die Würfel werden demnach solange gedreht bis kein Wasser mehr in flüssiger Form aus dem Würfeln tritt. Da es aber auch mit dieser Methode schwierig ist festzustellen, wann kein freies Wasser mehr im Dämmstoff vorhanden ist, werden zur Sicherheit die Massen nach 1, 2 und 4 Stunden abtropfen genommen. Somit kann in der Auswertung der Mittelwert verwendet und analog zur Bestimmung der Darrdichte und Holzfeuchte (siehe Abschnitte 3.2.2 und 3.2.3) das Volumen und der Feuchtegehalt berechnet werden.



Abbildung 5.14: Prüfkörper komplett im Wasser eingetaucht.



Abbildung 5.15: Abtropfen der Prüfkörper, um den Zustand der freien Wassersättigung zu erreichen.

5.2.3 Modelle hygrothermischer Quellen

Die für die instationäre hygrothermische Bauteilberechnung notwendigen Modelle zur Berücksichtigung des Sickerwasser, sowie des konvektiven Feuchteintrags wurden bereits im Abschnitt 5.1.3 eingehend diskutiert. Auf Basis der zugrunde liegenden Phänomene, können nun diese Modelle in Form von Feuchtequellen in die Simulation integriert werden. Wie stark diese Berechnungsmodelle von WUFI® gewichtet werden sollen, hängt von den eingegebenen Parametern ab, die sich auf breit akzeptierte Artikel, Studien und Seminarunterlagen des Fraunhofer Institut für Bauphysik beziehen.

Spezifisches Gründachmodell

WINTER et al., TEIBINGER & NUSSER und MINKE et al. haben im Rahmen eines vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung in Deutschland finanziertes Forschungsprojekt ein generisches Gründachmodell auf Basis von Freilanduntersuchungen an verschiedenen Standorten entwickelt (WINTER, et al., 2009) (TEIBINGER & NUSSER, 2010) (MINKE, et al., 2009). Aufbauend auf diesem generischen Modell wurden Ansätze für produktsspezifische Begrünungssysteme anhand von Labor- und Freilandversuchen am Standort Holzkirchen entwickelt (SCHAFAZZEK, et al., 2013).

Da es bei dem untersuchten Flachdach, um eine Konstruktion mit einer einschichtigen, extensiven Begrünung von 6 cm Dicke handelt, wird die Feuchtequelle in den unteren 2 cm der Substratschicht angesetzt. Der verwendete Materialdatensatz „generische Substrat.xml“ wurde vom IBP für eine Substratschichtdicke von maximal 15 cm entwickelt, was beim untersuchten Aufbau der Familie Heinzer völlig ausreichend ist (IBP, 2013). Der Anteil der Quelle beträgt 40% des Schlagregens, begrenzt auf die freie Wassersättigung des Materials von 300 kg/m^3 . Einen Überblick über die angesetzte Feuchtequelle mit den entsprechenden Daten ist auf der Abbildung 5.16 zu sehen.

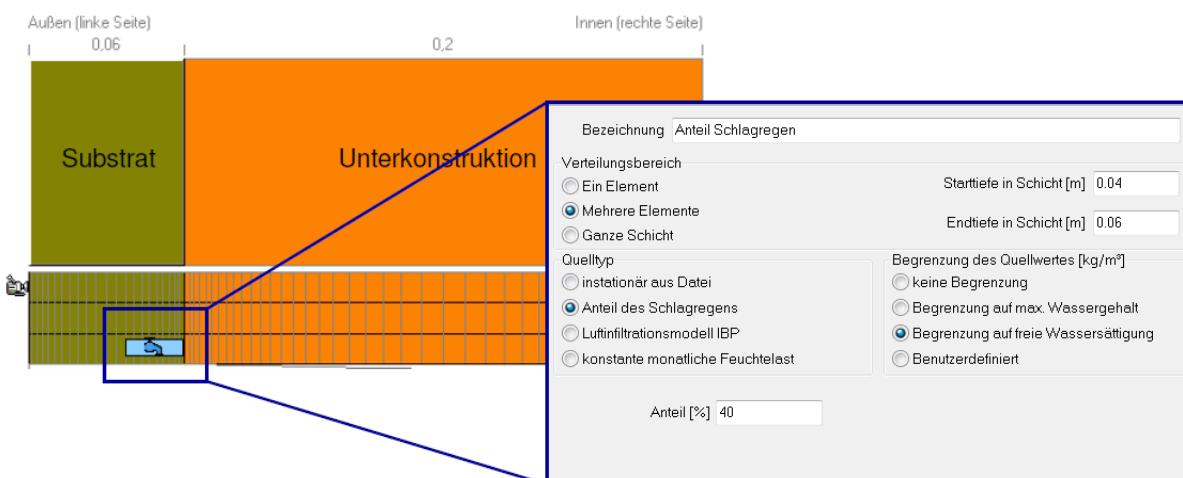


Abbildung 5.16: Angesetzte Feuchtequelle für das spezifische Gründachmodell.

Die für die Bauteilberechnung zu verwendenden Randbedingungen sind für alle produktspezifische Ansätze identisch und folgend aufgelistet:

- Wärmeübergangskoeffizient α aussen:	19 W/(m ² ·K)
- Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl a_s :	0.6
- Langwellige Strahlungsemissionszahl ε :	0.9
- Explizite Strahlungsbilanz:	Ein

Im Abschlussbericht des vorhin erwähnten Forschungsprojektes schreibt SCHAFACZEK et al., dass beim spezifischen Gründachmodell auch langwellige Gegenstrahlung und damit alle Klimaelemente explizit berücksichtigt werden. Daher sollte es prinzipiell auch für Anwendungen in anderen Klimaregionen geeignet sein. Die Voraussetzung hierfür ist demnach das Vorliegen von Gegenstrahlungsdaten im Aussenklimadatensatz. Dieser Aussenklimadatensatz wird mit Hilfe eines integrierten Zusatzprogramms von WUFI® Pro 5.2 generiert (WUFI Pro 5.2, 2013). Das File in WAC-Format basiert auf Klimadaten des Standortes Altdorf vom Datenportal IDAweb des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (EDI, 2005). Da es keinen aktuellen und vollständigen Datensatz, aufgrund einer fehlenden Messstation, vom Standort Ibach bei Schwyz gibt, musste auf den Datensatz des Standortes Altdorf zurückgegriffen werden. Diese Messstation befindet sich in näherer Umgebung und deren Klima ist vergleichbar mit jenem Standort des Testgebäudes. Für die Generierung des Aussenklimadatensatzes schreibt SCHAFACZEK et al. die Berücksichtigung folgender Klimaelemente vor (SCHAFACZEK, et al., 2013):

- Temperatur θ
- Relative Luftfeuchte φ
- Globalstrahlung G
- Atmosphärische Gegenstrahlung A_g
- Niederschlag N

Optional kann noch der Wind, also dessen Richtung und Stärke, berücksichtigt werden. Dieses Klimaelement hat jedoch nur geringen Einfluss auf die hygrothermische Bauteilberechnung, da das Flachdach zu allen Himmelsrichtungen hin der Einwirkung gleich ausgestellt ist.

Der erstellte Aussenklimadatensatz kann im CD-Anhang eingesehen werden.

Konvektiver Feuchteintrag

Bei einem bauphysikalischen Nachweis einer Konstruktion sind die Planer und Baustoffhersteller stets um einen Sicherheitszuschlag bemüht. Entsprechend ist es für sie sinnvoll einen möglichen konvektiven Feuchteintrag durch Undichtigkeiten in der Luftdichtheitsebene zu berücksichtigen. Für das Ansetzen des Modells gehen sie dafür von einem worst-case-Szenario aus und orientieren sich dabei an dem in der Fachwelt breit akzeptierten Referenzwert nach KÜNZEL (KÜNZEL, 1999). Dieser Wert von 250g/m² bezieht sich auf amerikanische Verhältnisse und ist für eine möglichst realitätsnahe hygrothermische Simulation des vorliegenden Flachdaches eher zu hoch. Er entspricht der von WUFI® definierten Luftdichtheitsklasse C mit einem q_{50} -Wert für die Durchströmung der Gebäudehülle von 5 m³/(m²·h).

Um eine realitätsnahe Situation abzubilden, wird hier eine Feuchtequelle mit den entsprechenden Werten aus dem Blowerdoor-Test (Tabelle 14) angesetzt. Somit ergibt sich eine benutzerdefinierte Luftdichtheitsklasse mit einem gemessenen q_{50} -Wert von 0.58 m³/(m²·h). Als Standardfall für die

Berechnung wird der thermisch bedingten Druckdifferenz über dem Flachdach des Zweifamilienhauses eine Höhe von 5 m zugrunde gelegt. Als konvektive Befeuchtungsebene wird die in der Abbildung 5.17 eingezeichnete Zone zwischen der Dreischichtplatte und der darunter liegenden Dämmschicht gewählt. Ein Überblick über die angesetzte Feuchtequelle mit den entsprechenden Daten ist auf der Abbildung 5.17 zu sehen.

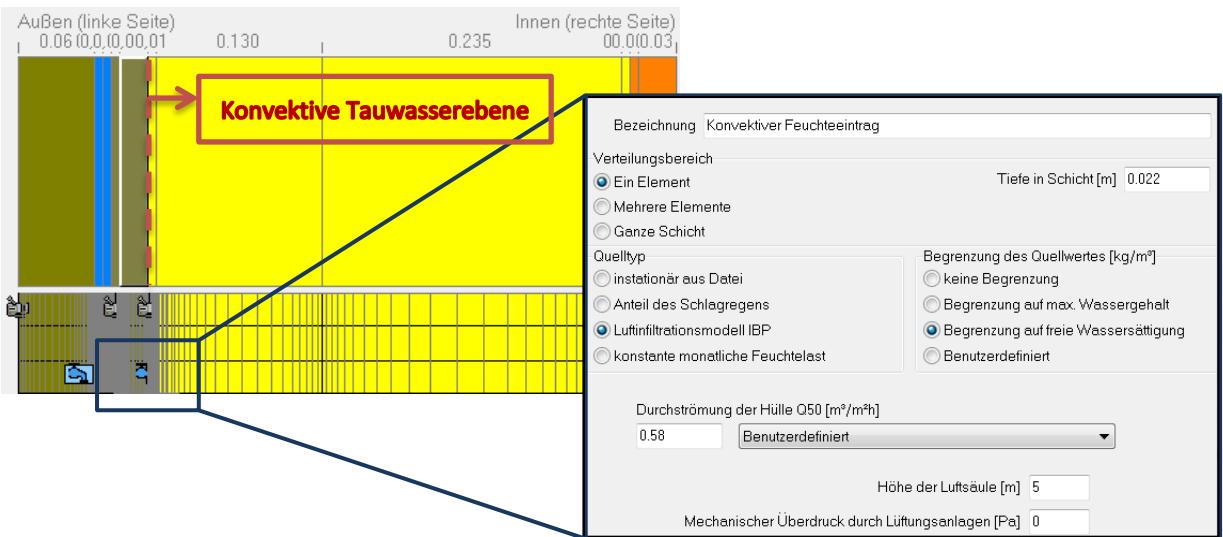


Abbildung 5.17: Angesetzte Feuchtequelle für das Modell des konvektiven Feuchteeintrages und konvektive Tauwasserebene.

5.3 Ergebnisse und Diskussion

5.3.1 Luftdichtigkeitsmessung – Blowerdoor-Test

In diesem Abschnitt wird lediglich kurz zur besseren Veranschaulichung auf die Ergebnisse des Blowerdoor-Tests am Gebäude der Familie Heinzer eingegangen. Es werden vor allem die, für die instationäre hygrothermische Bauteilberechnung mit WUFI®, relevanten Kenn- und Messwerte sowie Zahlen dargestellt. Wie diese Zustände gekommen und zu interpretieren sind, kann im kompletten Prüfbericht im CD-Anhang nachgelesen werden, weshalb hier auf nähere Erklärungen und Erläuterungen verzichtet wird.

Wetterbedingungen

Nach den Prüfanforderung der DIN EN 13 829 darf die gemessene Windstärke maximal 6 m/s betragen (DIN EN 13 829, 2000). Die geschätzte Windstärke beträgt rund 1 Beaufort, was einem „leisen Zug“ entspricht, bzw. einer mit technischen Hilfsmitteln gemessenen Windgeschwindigkeit zwischen 0.45 – 1.5 m/s.

Neben den Anforderungen an die Windgeschwindigkeit verlangt die Norm, dass das Produkt aus der Temperaturdifferenz innen/aussen und der Höhe der Gebäudehülle kleiner ist als 500 mK.

$$\Delta T \cdot h < 500mK \quad \rightarrow \quad 2K \cdot 10m = 20mK << 500mK$$

ΔT = Temperaturdifferenz innen / aussen in K

h = Gebäudehöhe in m

In diesem Falle werden beide Anforderungen, Windgeschwindigkeits- sowie die Temperaturbedingung, problemlos eingehalten.

Die optimalen Wetterbedingungen werden ebenfalls durch die natürlichen Druckdifferenzmessungen bestätigt, die einen Maximalwert von 1.7 Pa bei der Zweitmessung im Unterdruck erreichen und damit deutlich unter dem normierten Grenzwert von 5 Pa liegen (siehe CD-Anhang).

Leckagensuche

Die Leckagensuche mittels eines raucherzeugenden Glühstiftes bei einer Druckdifferenz von 50 Pa deutet auf 5,6 Stellen hin, die einen klaren, auch mit der Hand spürbaren, Luftzug aufweisen. Die Mehrheit der Leckagen befindet sich im Bereich der Anschlussfugen zwischen den Tür- bzw. Fensterrahmen und Aussenwand. Je eine Leckage wurde ebenfalls im Bereich der Mechanik einer Türklinke, sowie bei einem Durchstoss der Lüftungsanlage durch die Konstruktion aufgefunden. Die oftmals anfälligsten Anschlüsse der Elektroinstallationen jedoch zeigen keinerlei Anzeichen von Undichtheiten.

Differenzdruck-Messungen

Die Messergebnisse bei 50 Pa Druckdifferenz und die entsprechenden Messunsicherheiten sind in der Tabelle 14 zusammengefasst aufgelistet. Die Messunsicherheit in der Klammer ist dabei die Standardabweichung der Apparatur, also die Schwankung um den eigentlichen Wert. Die Leckagendatenparameter, Gesamtmittelwerte der natürlichen Druckdifferenzen und die Herleitung der standardisierten Luftwechselrate $n_{50,st}$ für den Abgleich mit den Minergie-Anforderungen sind im Prüfbericht im CD-Anhang vorzufinden.

Tabelle 14: Messergebnisse bei 50 Pa Druckdifferenz mit deren Messunsicherheit in Klammern.

Messergebnisse bei 50 Pascal	Einheit	Unterdruck (-)	Überdruck (+)	Mittelwerte
Leckagestrom V_{50}	[m ³ /h]	280 (+/-7%)	275 (+/-7%)	277 (+/-7%)
Luftwechselrate n_{50}	[1/h]	0.40 (+/-9%)	0.40 (+/-9%)	0.40 (+/-9%)
Nettogrundflächenbezogener Leckagestrom w_{50}	[m ³ /m ² ·h]	1.2 (+/-9%)	1.1 (+/-9%)	1.2 (+/-9%)
Luftdurchlässigkeit q_{50}	[m ³ /(m ² ·h)]	0.58 (+/-9%)	0.58 (+/-9%)	0.58 (+/-9%)

Die Differenzdruck-Messungen im Unter- und Überdruck ergaben sehr gute Ergebnisse, wie die Tabelle 14 zeigt. Die automatisch berechnete Luftwechselrate n_{50} von $0.4 \text{ h}^{-1} +/ - 9\%$ schneidet im Vergleich mit den Angaben in der Norm DIN 4108-7 sehr gut ab. Für die Erfassung des konvektiven Feuchteintrags als Feuchtequelle in der instationären hygrothermischen Bauteilberechnung wird der gemessene q_{50} -Wert von $0.58 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) +/ - 9\%$ angesetzt.

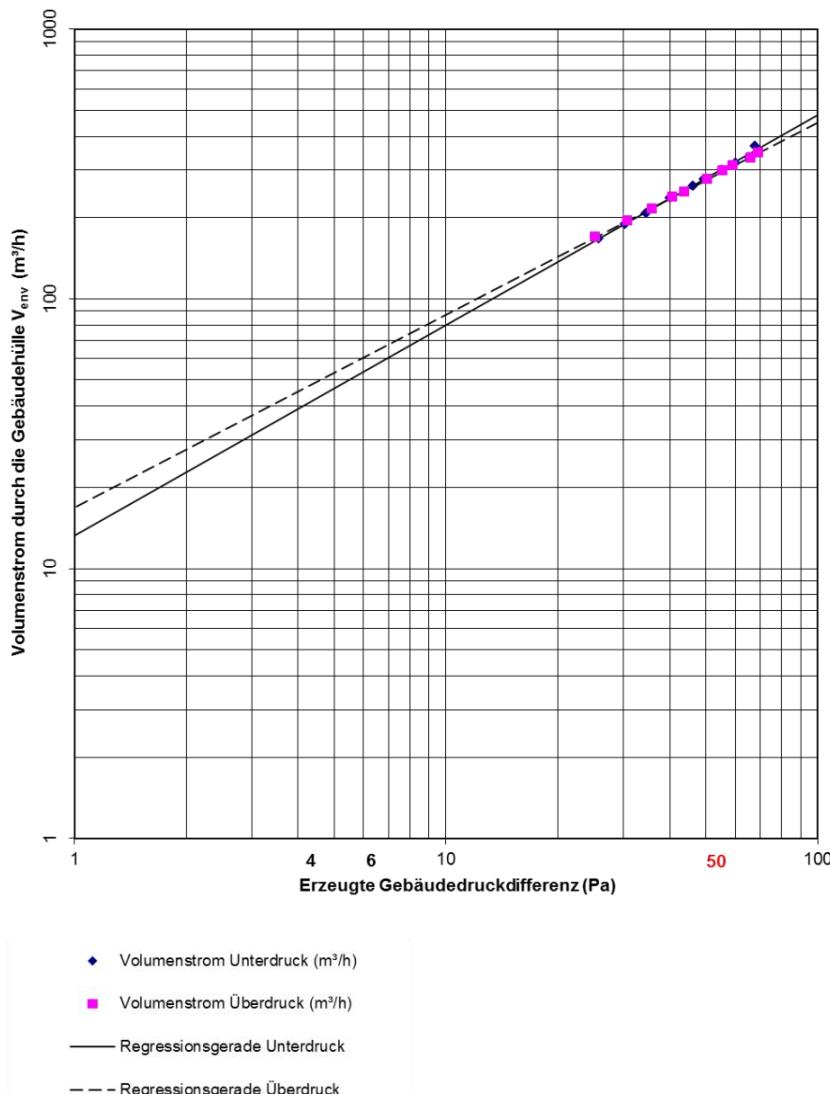


Abbildung 5.18: Leckagekurven für Unter- und Überdruck. Doppeltlogarithmische Darstellung des Volumenstroms durch die Gebäudehülle über der erzeugten Druckdifferenz.

5.3.2 Bestimmung der freien Wassersättigung

Tabelle 15: Kennwerte der Weichfaserdämmplatte PAVAFLEX von PAVATEX® für die Bestimmung der freien Wassersättigung.

ID	Breite [mm]	Länge [mm]	Dicke [mm]	Grundfläche $[m^2] \cdot 10^{-3}$	Volumen $[m^3] \cdot 10^{-3}$	m_0 [g]	$m_{20/65}$ [g]	$\rho_{20/65}$ [kg/m³]	ρ_0 [kg/m³]
Mittelwert	123.5	124.1	122.9	15.3	1.9	82.2	91.2	48.5	43.7
Standardabweichung [%]	1.85	1.11	2.43	0.28	0.04	3.54	3.93	2.07	1.86
Variationskoeff. [%]	1.50	0.90	1.98	1.85	2.23	4.30	4.30	4.27	4.27

$m_{20/65}$ = Masse bei 20°C und 65% relative Luftfeuchte

$\rho_{20/65}$ = Rohdichte bei 20°C und 65% relative Luftfeuchte

m_0 = Darrmasse

ρ_0 = Darrdichte

Die Tabelle 15 zeigt die nötigen gemittelten Kenn- und Messwerte der Prüfkörper der Weichfaserdämmung PAVAFLEX von PAVATEX® für die Berechnung der freien Wassersättigung w_f . Die berechneten Darrmassen, bzw. Darrdichten basieren auf Messwerten aus der Literatur (MICHEL, 2012). Eine Tabelle mit den Angaben zu allen Prüfkörpern ist im Anhang abgelegt.

Tabelle 16: Berechnete freie Wassersättigung w_f von PAVAFLEX nach 1h, 2h und 4h abtropfen.

	Nennwerte	Einheit	Mittelwert	Standardabweichung [%]
1h abtropfen	m_f	[g]	352.35	22.35
	ρ_f	[kg/m³]	187.08	10.92
	w_f	[kg/m³]	143.42	9.88
2h abtropfen	m_f	[g]	331.57	18.28
	ρ_f	[kg/m³]	176.07	9.22
	w_f	[kg/m³]	127.61	7.44
4h abtropfen	m_f	[g]	327.19	18.23
	ρ_f	[kg/m³]	173.74	9.14
	w_f	[kg/m³]	125.29	7.41
Schnitt	m_f	[g]	337.04	1.93
	ρ_f	[kg/m³]	178.96	0.82
	w_f	[kg/m³]	132.11	1.16

m_f = Masse bei Fasersättigung

ρ_f = Rohdichte bei Fasersättigung

w_f = freie Wassersättigung

In der Tabelle 16 sind die gemittelten Wassermassen m_f und Rohdichten ρ_f bei 100% relativer Luftfeuchte, sowie die nach der Gleichung 5.8 berechnete freie Wassersättigung w_f nach 1 Stunde, 2 Stunden und 4 Stunden nach Abtropfen dargestellt. Dieselben Angaben zu den einzelnen Prüfkörpern sind aus dem Anhang zu entnehmen. Der Schnitt der drei Mittelwerte nach unterschiedlich langem Abtropfen kann mit den Angaben zu PAVALFEX in WUFI® (siehe Abschnitt 5.2.2) verglichen werden, auch wenn es sich bei dieser angewandten Methode zur Bestimmung der freien Wassersättigung lediglich um ein Näherungsverfahren handelt. Der berechnete Mittelwert zeigt ungefähr den Bereich auf, in welchem die freie Wassersättigung des Materials zu erwarten ist und kann als Tendenz interpretiert werden. Im Direktvergleich mit den beiden verschiedenen Werten aus dem hygrothermischen Simulationsprogramm WUFI® fällt auf, dass die freie Wassersättigung mit 18 kg/m³ bei PAVAFLEX des PAVATEX®-Datensatzes deutlich zu niedrig ist und die Tendenz der gemessenen freien Wassersättigung w_f eher Richtung 180 kg/m³, also dem Wert aus dem Datensatz des Fraunhofer Instituts, geht. Auf Basis dieser Feststellung kann angenommen werden, dass der

Wert aus dem Datensatz des IBP eher der Realität entspricht als jener aus dem Datensatz von PAVATEX®. Für die folgenden instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen wurde deshalb die freie Wassersättigung von PAVAFLEX dem Datensatz des Fraunhofer Instituts für Bauphysik entnommen.

5.3.3 Instationäre hygrothermische Bauteilberechnung mit WUFI®

Für die einzelnen instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen wurde, für die iterative Annäherung an eine realitätsgerechte Situation, einerseits der Aufbau der Konstruktion verändert und andererseits diverse Parameter sowie Rand- und Anfangsbedingungen verwendet. Die zwei folgenden Tabellen Tabelle 17 und Tabelle 18 sowie die Abbildungen sollen zeigen wo, wann und wie die wichtigsten Veränderungen vorgenommen wurden. Eine komplette Tabelle mit näheren Details und weiteren Simulationen ist im CD-Anhang abgelegt.

Tabelle 17: Verwendete Parameter für die einzelnen instationären hygrothermischen Bauteilsimulationen.

Iteration	Bezeichnung	Aufbau	Oberflächenübergangskoeff.			Anfangsbedingungen		Klima		Feuchtequellen
			α	ε	$\rho_{s,terr.}$	φ	θ	aussen	innen	
0	Basis	a	0.5	0.95	0.2	80	20	Zürich kalt	EN 15060	Nein
1	Aufbau	b	0.5	0.9	0.2	80	20	Zürich kalt	EN 15060	Nein
2	Feuchtequellen	b	0.5	0.9	0.2	80	20	Zürich kalt	EN 15060	Ja
3	Wärmedämmung	c	0.5	0.9	0.2	80	20	Zürich kalt	EN 15060	Ja
4	Oberflächenkoeff.	c	0.65	0.9	0.2	60	20	Zürich kalt	EN 15060	Ja
5	freie Wassersättigung	d	0.65	0.9	0.2	60	20	Zürich kalt	EN 15060	Ja
6	Klima - Endsimulation	d	0.65	0.9	0.2	60	20	Altdorf	Heizraum	Ja

α_s = kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl

ε = langwellige Strahlungsemissionszahl

$\rho_{s,terr.}$ = terrestrischer kurzwelliger Reflexionsgrad

φ = relative Luftfeuchte in %

θ = Temperatur in °C

Auf der Tabelle 17 sind der Aufbau, die Parameter und Rand- und Anfangsbedingungen zu sehen, die für die einzelnen Simulationen verwendet wurden. Der Aufbau des Flachdachs wird dabei in vier Typen unterteilt, a, b, c und d. Die Tabelle 18 zeigt, welche Baustoffe für die einzelnen Schichten der vier Typen eingesetzt wurden und welche zusätzlich modifiziert wurden, während die Abbildung 5.19 die grundlegendsten konstruktiven Unterschiede darlegen. Die Konstruktionsweisen b, c und d ähneln sich stark und unterscheiden sich lediglich in der Modifikation der Materialien, weshalb auf der Abbildung auf die Typen c und d an dieser Stelle verzichtet wird.

Tabelle 18: Die vier verwendeten Aufbauten für die instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen.

Schichtnr.	a	b	c	d
1	Subrat	Subrat	Subrat	Subrat
2	Dampfsperre (sd=1500m)	Dampfsperre (sd=250m)	Dampfsperre (sd=250m)	Dampfsperre (sd=250m)
3	-	Dampfsperre (sd=180m)	Dampfsperre (sd=180m)	Dampfsperre (sd=180m)
4	Dreischichtplatte	Dreischichtplatte	Dreischichtplatte	Dreischichtplatte
5	Pavaflex (IBP)	Pavaflex (IBP)	PAVAFLEX (PAVATEX)	PAVAFLEX (PAVATEX)
6	Pavaflex (IBP)	Pavaflex (IBP)	PAVAFLEX (PAVATEX)	PAVAFLEX (PAVATEX)
7	Weichholz	Blockholz (Schuler)	Blockholz (Schuler)	Blockholz (Schuler)

Modifiziert

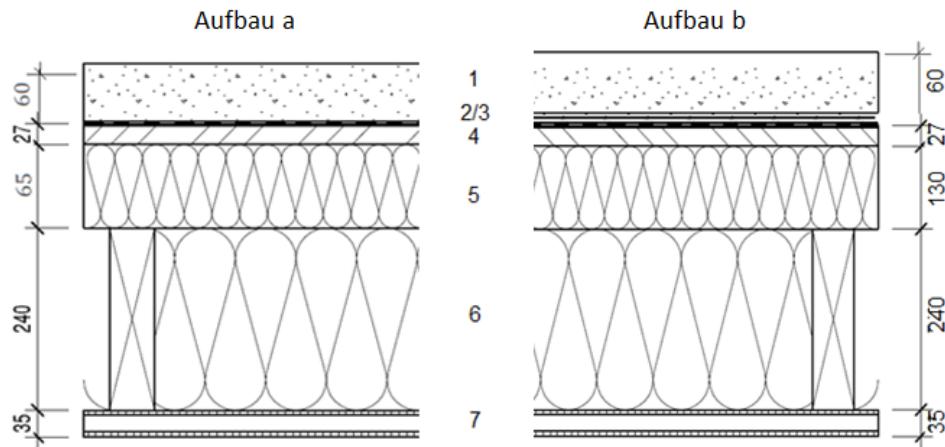


Abbildung 5.19: Konstruktive Darstellung der verwendeten Konstruktionsweisen für die instationäre hygrothermische Bauteilberechnung.

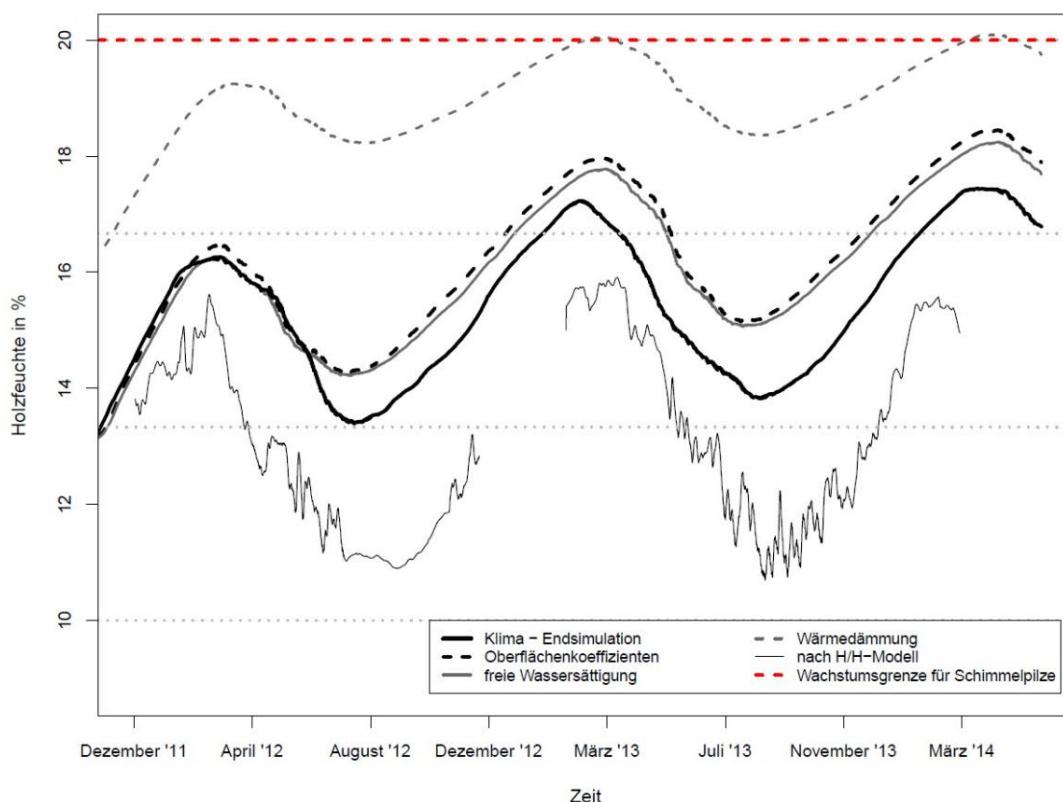
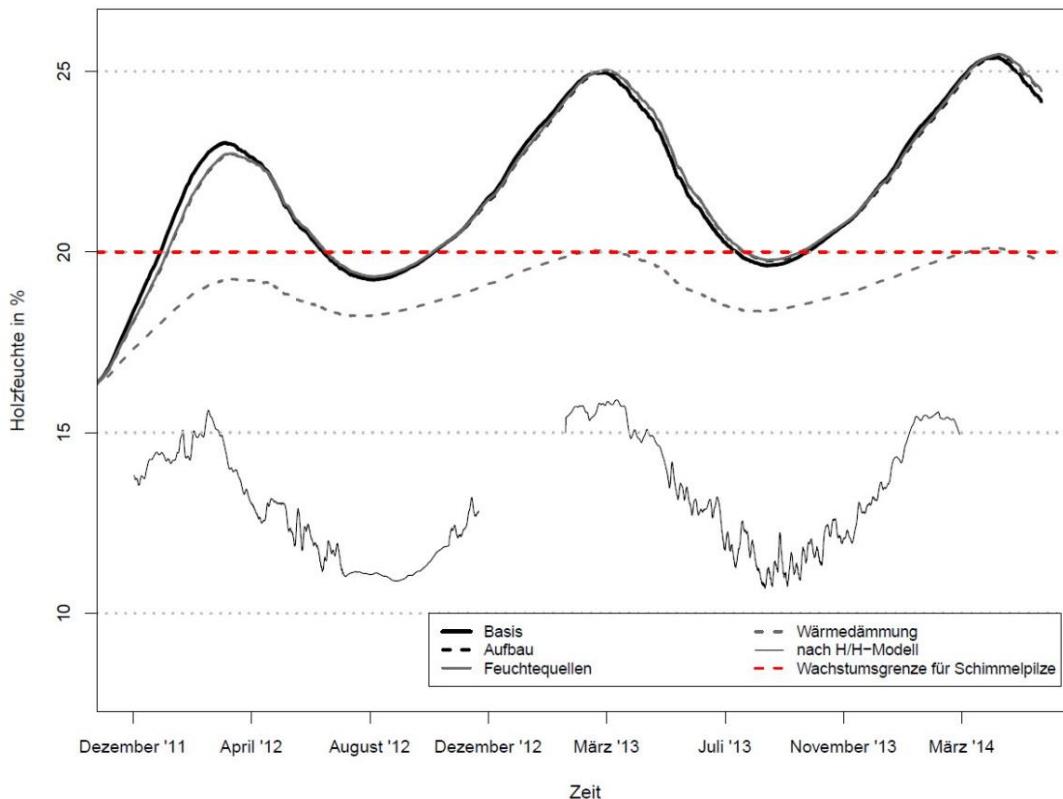
Die erste instationäre hygrothermische Bauteilberechnung stellt die Ausgangssimulation dar und wurde während der Planungsphase des Gebäudes von der Firma Pius Schuler AG durchgeführt. Jegliche Materialkennwerte basieren auf dem Datensatz des Fraunhofer Instituts für Bauphysik und die meisten Rand- und Anfangsbedingungen wurden so belassen, wie die Grundeinstellung des Simulationsprogramms diese vorgibt. Lediglich die Klimabedingungen und die Oberflächenfarbe der obersten Schicht, bzw. die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl a_s , wurden den Verhältnissen in Ibach bei Schwyz angepasst. Die resultierende Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte ist auf der Abbildung 5.20 ersichtlich und erreicht im Frühjahr 2014 einen Maximalwert von über 25%.

Iteration 1 - Aufbau

Der erste Iterationsschritt umfasst die Anpassung des Aufbaus, respektive die Modifizierung der Dampfsperre und der Blockholzplatte. In dieser, wie in der Basissimulation, wurde ohne das spezifische Gründachmodell gerechnet, was die fehlende Feuchtequelle erklärt. Die genauen Angaben zu den verwendeten Materialien, Rand- und Anfangsbedingungen, sowie zum Rechenverlauf dieser aber auch der übrigen Simulationen können in den Simulationsprotokollen von WUFI® im CD-Anhang nachgelesen werden. Die Abbildung 5.20 zeigt, dass der Einfluss des veränderten Aufbaus nur sehr gering ist und deshalb lediglich im ersten Winter/Frühjahr nach der Errichtung des Gebäudes eine unmerklich tiefere Holzfeuchte resultiert, dessen Differenz aber während dem folgenden Sommer/Herbst wieder egalisiert wird. Die relativen Luftfeuchten in der Schicht G3 auf der Abbildung 5.22 zeugen ebenfalls von der geringen Wirkung dieses Annäherungsversuches.

Iteration 2 - Feuchtequellen

Der Aufbau der zweiten Iteration entspricht jenem der ersten, berücksichtigt aber zusätzlich noch die hygrothermischen Quellen nach Abschnitt 5.1.3. Der Unterschied der sich durch das Einfügen von zusätzlichen Feuchtequellen ergibt, ist mit diesem Aufbau der Konstruktion auf der Abbildung kaum sichtbar. Der Einfluss wird erst in Kombination mit der Änderung der Wärmedämmenschicht im nächsten Iterationsschritt und des Klimas im letzten Schritt geltend. Grund dafür sind die Abhängigkeit der Feuchtequelle im Substrat vom Schlagregen und die sich unterscheidenden Feuchtespeicherfunktionen des Dämmstoffes der beiden Datensätze (Fraunhofer Institut und PAVATEX).



Iteration 3 und 5 – Wärmedämmung und freie Wassersättigung

Iterationsnummer drei beinhaltet den Austausch des Datensatzes der Wärmedämmung des Fraunhofer Instituts für Bauphysik durch den neueren von PAVATEX®. Die sich einstellende Holzfeuchte unterscheidet sich massgebend von der vorigen Simulation. Die maximale Differenz beträgt über 5% Holzfeuchte und entscheidet darüber, ob sich die Holzfeuchte unter- oder oberhalb der Wachstumsgrenze für Schimmelpilze bewegt. Auf welchen Materialkennwert oder Rechenprozess dieser grosse Einfluss zurückzuführen ist, ist nicht ganz klar. Die grösste numerische Abweichung der Kennwerte weist eindeutig die freie Wassersättigung auf, was zur Folge hat, dass sich auch die Feuchtespeicherfunktion im Bereich der relativen Luftfeuchten über 93% massgebend verändert. Wie der Iterationsschritt fünf auf der Abbildung 5.21 aber offenbart, beeinflusst eine Änderung der freien Wassersättigung und somit der Feuchtespeicherfunktion den Verlauf der Ausgleichsfeuchte nur sehr gering.

Da man auch nur sehr bedingt einen Einblick in den Rechenprozess von WUFI® erhält, ist es entsprechend schwierig über die Funktionsweise des Programms die Ursache der Holzfeuchtedifferenz ausfindig zu machen.

An dieser Stelle ist für die weiteren Simulationen die einzige Möglichkeit der Korrektheit des Datensatzes von PAVATEX® Glauben zu schenken, zumal im Vergleich den Holzfeuchte u_b die Werte eher den berechneten Holzfeuchten entsprechen.

Iteration 4 - Oberflächenkoeffizient

Der vierte Iterationsschritt bezieht sich auf die Oberflächenkoeffizienten sowie auf die Anfangsbedingungen im Flachdach. Wie die Abbildung 5.21 zeigt, beeinflussen diese Berechnungsparameter den Verlauf der Berechnung wesentlich und bergen somit die ausschlaggebendste Fehleranfälligkeit für schnelle und nicht durchdachte Simulationen von Bauteilen. Die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl a_s zum Beispiel wird standardgemäß über die Wahl der Oberflächenfarbe der obersten Schicht der Konstruktion definiert. SCHAFACZEK et al. untersuchte den Einfluss dieses Oberflächenübergangskoeffizienten bei extensiv begrünten Dachflächen und zeigt auf, wie wichtig dieser Faktor für die Austrocknung der Konstruktion im Sommer ist (SCHAFACZEK, et al., 2013). Dies fällt ebenfalls auf der Abbildung 5.23 beim Vergleich der relativen Luftfeuchte auf, die im Sommer ein wesentlich tieferer Wert einnimmt und somit der Realität eher entspricht, als jene der vorgängigen Simulationen. Ausschlaggebender Faktor für die ersten Jahre sind zudem die Klimabedingungen, die zu Beginn der Simulation im Flachdach herrschten. Vom Fraunhofer Institut werden eine relative Luftfeuchte von 80% und eine Temperatur von 20°C empfohlen. Der Verlauf der gemessenen relativen Luftfeuchte im Flachdach hat aber gezeigt, dass diese mit 80% zu hoch angesetzt ist und folglich eine zu hohe Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte nach sich zieht. Wie bereits erwähnt, nimmt die Anpassung der freien Wassersättigung bei der Wärmedämmung keine bedeutsame Rolle ein. Grund ist der Verlauf der relativen Luftfeuchte auf der Abbildung 5.23, welcher bei der Simulation zu keinem Zeitpunkt 85% überschreitet. Liegt diese über 93%, wie es in der Realität der Fall ist, wäre der Einfluss in Anbetracht der Feuchtespeicherfunktion um einiges grösser, da diese ab diesem Punkt exponentiell zu steigen beginnt.

Iteration 6 – Klima - Endsimulation

Der letzte Schritt dieser mehrstufigen Annäherung der hygrothermischen Bauteilberechnung an die Realität ist die Abstimmung der Wetterdaten mit dem Klima der letzten zwei Jahre in Ibach. Bis anhin wurde den Datensatz „Zürich kalt“ des Fraunhofer Instituts verwendet. Dieser bildet jedoch

einerseits das lokale Klima in Zürich ab und entspricht andererseits aussergewöhnlich kalten Referenzjahren, um bei der Bauteilberechnung auf der sicheren Seite zu liegen. Mit dem nach dem Klima in Altdorf generierten Klimafile erreicht die Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte zusätzlich tiefere Werte und nähert sich somit bis auf unter 2% der nach dem H/H-Modell berechneten Holzfeuchte an.

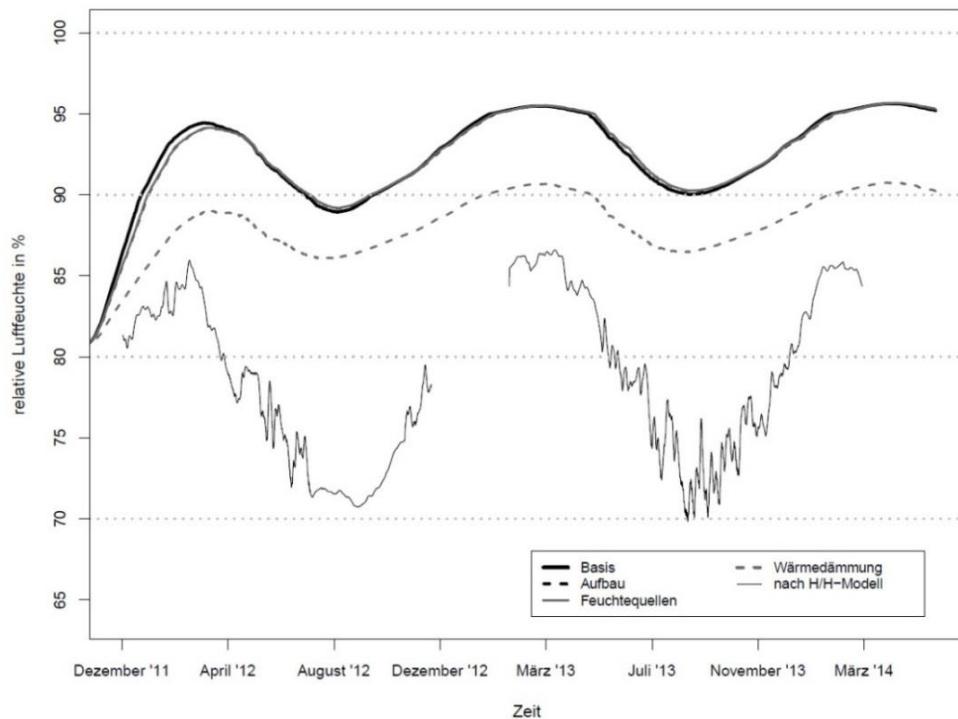


Abbildung 5.22: Die entsprechenden relativen Luftfeuchten der verschiedenen Simulationsvarianten der ersten iterativen Näherung im Vergleich mit der gemessenen Luftfeuchte der Schicht G3 im Bereich der Weichfaserdämmung.

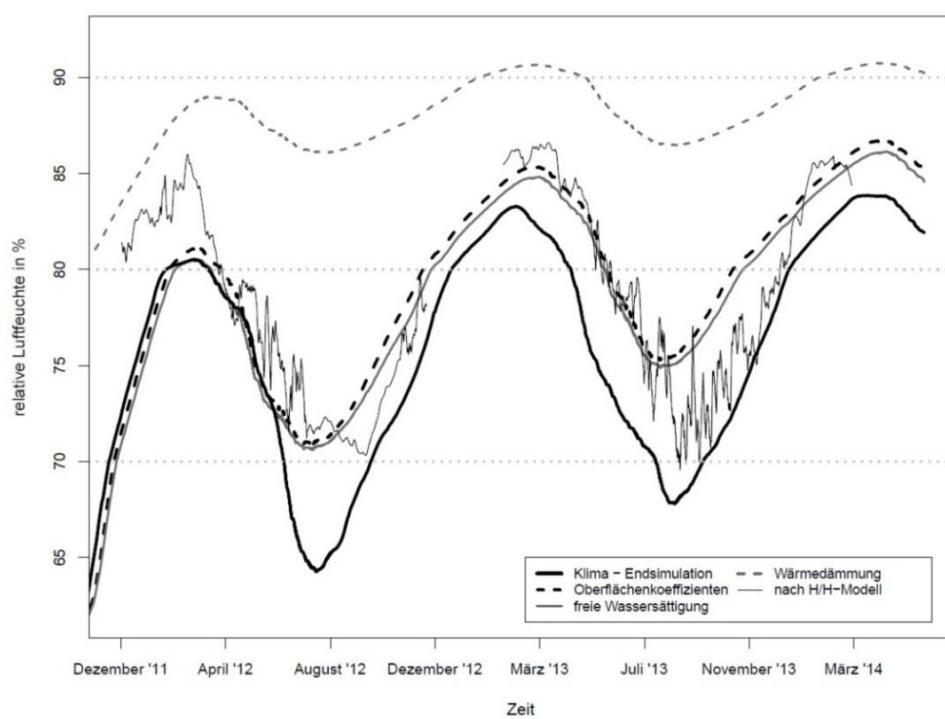


Abbildung 5.23: Die entsprechenden relativen Luftfeuchten der verschiedenen Simulationsvarianten der zweiten iterativen Näherung im Vergleich mit der gemessenen Luftfeuchte der Schicht G3 im Bereich der Weichfaserdämmung.

6 Vergleich der Verfahren

6.1 Ergebnisse im Vergleich und Diskussion

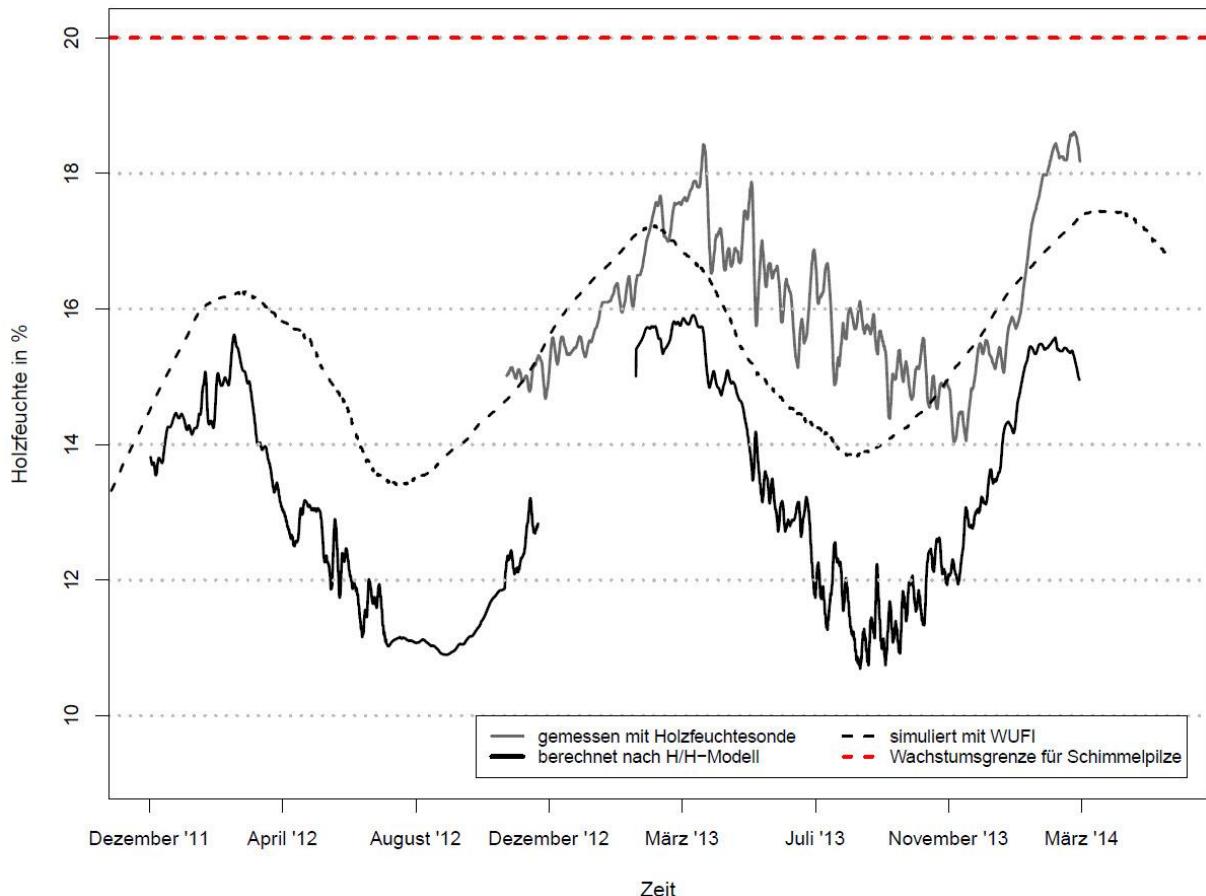


Abbildung 6.1: Direktvergleich der nach dem H/H-Modell berechneten und mit dem WUFI® simulierten Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte im Bereich der Wärmedämmung mit der gemessenen Ausgleichsfeuchte im Bereich der Mineralfaserdämmung.

Die Bestimmung der Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte in der Schicht G3 über die relative Luftfeuchte mit Hilfe des H/H-Modells (Kapitel 3 und 4), die Messung mittels eingebauten Holzfeuchtesonden (Kapitel 4) und die instationäre hygrothermischen Bauteilberechnung anhand des Simulationsprogramms WUFI® (Kapitel 5), ermöglichen nun eine Einschätzung über die Feuchteverhältnisse im Flachdach des Zweifamilienhauses der Familie Heinzer in Ibach. Der Direktvergleich auf der Abbildung 6.1 zeigt, dass alle drei Verfahren einen ähnlichen Verlauf ergeben haben. Die grösste Differenz, mit etwas über 2% Holzfeuchte, zeigt sich im Sommer des Jahres 2013 zwischen der gemessenen und der berechneten Ausgleichsfeuchte. Der Verlauf der simulierten Ausgleichsfeuchte nimmt eine Position zwischen den anderen beiden messwertbasierten Holzfeuchten ein und kommt in etwa deren Durchschnitt gleich.

Welcher dieser Verläufe nun am ehesten der realen Situation im Flachdach entspricht, ist jedoch schwierig zu sagen. Alle drei Verfahren scheinen auf ihre Art und Weise plausible Ergebnisse zu liefern, weisen aber auch in ihrer Funktionsweise über kleine Ungenauigkeiten und Verfehlungen auf. So entspricht die gemessene Holzfeuchte nicht der sich einstellenden Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte im Bereich der Weichfaserdämmung, sondern jener im Bereich der Mineralfaserdämmung innen. Grund sind die defekten Holzfeuchtesonden im Bereich der Weichfaserdämmung.

Obwohl die Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18 zeigen, wie ähnlich die klimatischen Verhältnisse in den beiden Bereichen sind, ist festzustellen, dass die Weichfaserdämmung durch ihre Fähigkeit als Feuchtepuffer, einen gleichmässigeren Verlauf der relativen Luftfeuchte und somit tiefere Maxima mit sich bringt. Die auf der Abbildung 6.1 dargestellte gemessene Holzfeuchte u_g kann also als tendenziell zu hoch interpretiert werden. Zusätzlich sprechen die Ergebnisse der durchgeföhrten Sensorvalidierung im Abschnitt 4.3.2 gegen vertrauenswürdige Messwerte durch die Holzfeuchtesonden. Auch wenn in diesem Fall der Verlauf der Ausgleichsfeuchte zu stimmen scheint, muss letzten Endes mit einer messtechnischen Abweichung nach Herstellerangaben gerechnet werden.

Auch die berechnete Ausgleichsfeuchte u_b mit dem auf die Dreischichtplatte abgestimmten H/H-Modell darf nicht als komplett fehlerfrei betrachtet werden. So wird bei der Berechnung des Holzfeuchteverlaufs im Abschnitt 4.3.3 der Einfluss der Temperatur einfacheitshalber vernachlässigt. Trotz der scheinbar unwesentlichen Auswirkung einer Temperaturänderung auf die Sorptionsisothermen von Holz, wie zum Beispiel die Modelle von KEYLWERTH oder SCHNIDER zeigen, nimmt die Ausgleichsfeuchte mit sinkender Temperatur geringfügig zu. Der Verlauf der berechneten Holzfeuchte u_b basiert lediglich auf die Sorptionsisotherme bei einer Temperatur von 20°C. Im Abgleich mit dem Temperaturverlauf auf der Abbildung 4.18 wird aber sichtbar, dass sich der Jahresmittelwert im Bereich um 13.5°C aufhält und somit die berechnete Ausgleichsfeuchte nach dem H/H-Modell bei 20°C als tendenziell zu tief interpretiert werden darf. Zudem resultiert die Holzfeuchte dieses Verfahrens direkt aus der relativen Luftfeuchte, ohne eine Berücksichtigung träger Transport- und Speichervorgänge von Wasser im Holz, die eine amplitudendämpfende Phasenverschiebung nach sich ziehen. Die Konsequenz wäre ein flacherer Verlauf mit weniger stark ausgeprägten Extrema.

Die instationäre hygrothermische Bauteilberechnung mit WUFI® ist wahrscheinlich das am schwierigsten nachvollziehbare Verfahren für die Abbildung des Ausgleichsfeuchteverlaufs der Dreischichtplatte. Der iterative Näherungsversuch im Kapitel 5 zeigt, dass die etlichen verwendeten Materialkennwerte, -parameter und Rand- sowie Anfangsbedingungen eine eminente Fehleranfälligkeit bei mangelnder Kenntnis (bezüglich des Simulationsprogramms) bergen. Kleinste Abweichungen können somit kumuliert aber auch einzeln den Verlauf der Simulation verfälschen. Der komplexe Rechenprozess, der versteckt im Hintergrund abläuft, verkompliziert zudem ein Nachvollziehen der einzelnen Rechenschritte. Dieser Mangel an Transparenz erschwert das Isolieren von Fehlerquellen, die schlussendlich die Ergebnisse massgebend affektieren können. Nichtdestotrotz ist WUFI® bei korrekter und bedachter Handhabung ein potentes Instrument für die Simulation von instationären hygrothermischen Vorgängen in Bauteilen, wie der Verlauf der Ausgleichsfeuchte auf der Abbildung 6.1 bestätigt. Diese simulierte Holzfeuchte bildet wahrscheinlich, in Anbetracht des vorhin erwähnten Korrekturpotentials der anderen beiden Verfahren, am treffendsten die reale Situation im Flachdach ab.

Aufgrund der relativ guten Übereinstimmung der Ergebnisse aller drei Verfahren kann davon ausgegangen werden, dass sich der Verlauf der Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte mit grosser Wahrscheinlichkeit in einem Bereich zwischen ca. 11% bis 18% Holzfeuchte bewegt und somit deutlich unter der als kritisch besagten Grenze von 20% liegt.

6.2 Ausblick

Wie sich der Verlauf der Ausgleichsfeuchte in Zukunft entwickeln wird, ist relativ schwierig zu beurteilen. Die gemessene und berechnete Ausgleichsfeuchten zeigen durch den Verlauf der Kurve keine klare Tendenz einer zyklischen Auffeuchtung im Flachdach. Dabei bietet das Messverfahren mit den Holzfeuchtesonden gar keine Möglichkeit einer Prognose, während das Verfahren mit dem H/H-Modell durch eine sinusförmige Exponentialfunktion (Gleichung 4.1) nur bedingt den weiteren Verlauf der Holzfeuchte zu beschreiben vermag. Dieser Prognose ist nur mit sehr viel Vorsicht Glauben zu schenken und ist im Anhang vorzufinden (Abbildung 6.1). Die instationäre hydrothermische Bauteilberechnung mit WUFI® jedoch bietet eine gute Möglichkeit Vorhersagen über die Feuchteentwicklung im Flachdach zu konstruieren. Einzig die für die Zukunft verwendeten Klimabedingungen stellen eine Schwachstelle dar und können das Ergebnis der Simulation massgebend beeinträchtigen. Dennoch wurde eine solche Prognose erstellt, die ebenfalls im Anhang aufzufinden ist (Abbildung 6.2). Diese zeigt, dass die auf der Abbildung 6.1 festzustellende ansteigende Tendenz abflacht und sich die Ausgleichsfeuchte der Dreischichtplatte auf einem Niveau unterhalb von 18% Holzfeuchte einpendelt.

Solche Prognosen, auch mit WUFI®, basieren jedoch immer auf Annahmen und ziehen gezwungenermassen eine gewisse Unsicherheit nach sich. Aus diesem Grund kann lediglich im Verlauf der nächsten Jahre mit Sicherheit gesagt werden, wie sich der Verlauf der Ausgleichsfeuchte entwickelt und auf welchem Niveau diese sich einpendeln wird. Hierfür müsste jedoch das Projekt weiterlaufen und die bestehende Messtechnik im Flachdach weiterhin die nötigen physikalischen Größen aufzeichnen.

Dieser Meinung sind ebenfalls die involvierten Projektpartner, Pius Schuler AG und PAVATEX®, und haben sich vorerst darauf geeinigt noch mindestens für das laufende Jahr das Projekt von der ETH Zürich zu übernehmen und die finanziellen Mittel beizusteuern. Ziel ist es in erster Linie definitive Klarheit zu schaffen hinsichtlich der Schadensfreiheit der Dreischichtplatte aufgrund erhöhter feuchtetechnischer Belastung. Je nach Erkenntnisstand Ende Jahr wird wiederum darüber entschieden, ob die Messungen weitergeführt werden sollen oder nicht.

Nebst der Beurteilung der Ausgleichsfeuchte in der Schicht G3, wäre ebenfalls sehr interessant zu untersuchen inwiefern und worauf begründet der Einsatz von Weichfaserdämmung einer herkömmlichen Mineralfaserdämmung vorzuziehen ist. Zudem bieten die verschiedenen Messpunkte und -linien die Möglichkeit den Einfluss einer Außenwand oder der Brandschutzmauer zwischen den beiden Wohnungen auf den Wärme- und Feuchtetransport im Flachdach zu erforschen. Weiter kann der Wärme- und Feuchtefluss vertikal durch die Konstruktion und innerhalb der einzelnen Schichten genauer untersucht werden oder lediglich der Unterschied durch diverse Innenklimata (Wasch- und Technikraum) analysiert werden.

Wie diese Beispiele aufzeigen, deckt die eingebaute Messtechnik in ihrer Aufteilung und Variation an Messgrößen ein sehr breites Forschungsgebiet ab und bietet somit unzählige Möglichkeiten das noch relativ unerforschte wärme- und feuchtetechnische Verhalten eines Flachdachs im Hohlkastensystem zu beobachten und zu beschreiben, weshalb es einen Verlust für die Forschung und Entwicklung im Bereich der Bauphysik wäre, würde dieses Projekt auf Eis gelegt werden.

Verzeichnisse

Abbildungen

Abbildung 1.1: Aufbau und Gliederung des bearbeiteten Projektes.	4
Abbildung 2.1: Aufbau Flachdach und Steildach im Vergleich.....	6
Abbildung 2.2: Flachdachtypen und ihre Einsatzgebiete.....	7
Abbildung 2.3: Möglicher Aufbau eines durchlüfteten Flachdaches.....	8
Abbildung 2.4: Möglicher Aufbau eines nicht belüfteten Flachdaches mit Aufdachdämmung.....	9
Abbildung 2.5: Möglicher Aufbau eines nicht belüfteten Flachdaches mit Dämmung in Tragebene....	9
Abbildung 2.6: Temperaturverlauf und Wärmestrom in einem festen Körper	14
Abbildung 2.7: Temperaturverlauf in einer festen Wand	15
Abbildung 2.8: Strahlungsintensitätsverteilung bei verschiedenen Temperaturen in K.....	16
Abbildung 2.9: Wechselwirkung Strahlung-Materie.....	17
Abbildung 2.10: Das Carrier-Diagramm.....	20
Abbildung 2.11: Verlauf des Sättigungsdampfdruckes p_{sat} bzw. -gehaltes.....	22
Abbildung 2.12: Das h,x -Diagramm von Mollier	23
Abbildung 2.13: Glaserdiagramm.....	26
Abbildung 2.14: Tauwasserausfall.....	26
Abbildung 2.15: Ablaufschema des Berechnungsverfahrens von WUFI®	28
Abbildung 2.16: Lageplan der Überbauung Grosssteinmatte in Ibach.....	29
Abbildung 2.17: 3D-Animation des Doppeleinfamilienhauses. I	29
Abbildung 2.18: Anordnung der beiden Messlinien 1 und 2	30
Abbildung 2.19: Anordnung der Sensoren über den Querschnitt des Dachaufbaus.....	30
Abbildung 3.1: Die sich überlagernden Sorptionserscheinungen bis zum Fasersättigungsbereich	31
Abbildung 3.2: Sich abwechselnde kristalline und amorphe Bereiche im Holz.....	32
Abbildung 3.3: Verbindung der Zellulosemakromoleküle zur hölzernen Zellwand	33
Abbildung 3.4: Wassergehaltsbereiche in einem feinporigen, hygrokopischen Baustoff.....	33
Abbildung 3.5: Einlagerung von Wasser in einer Baustoffpore schematisch dargestellt.....	34
Abbildung 3.6: Kapillare Feuchtebewegung im Holz während dem Trocknungsvorgang	35
Abbildung 3.7: Hygrokopisches Gleichgewicht der Sitka-Fichte	36
Abbildung 3.8: Hysterese Effekt bei Holz in der Trocknungsphase	37
Abbildung 3.9: Schematischer Ablauf der Bestimmung des hygrokopischen Gleichgewichtes.....	38
Abbildung 3.10: ID-Schlüssel	39
Abbildung 3.11: Darrvorgang bei $103^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$	40
Abbildung 3.12: Massabnahme der Proben nach dem Darrtrocknen.....	40
Abbildung 3.13: Vorgehensweise: Ausgleichsfeuchtemessung zur Massenmatrix.....	41
Abbildung 3.14: Sorptionsisothermen verschiedener Temperaturbereiche nach SCHNIDER.....	43
Abbildung 3.15: Boxplot der berechneten Darrdichten und die entsprechenden Mittelwerte.....	44
Abbildung 3.16: Vergleich der Sorptionsisotherme von der Dreischichtplatte nach H/H-Modell	46
Abbildung 3.17: Sorptionsisothermen der Dreischicht- und Blockholzplatte bei 20°C	48
Abbildung 3.18: Boxplot der berechneten Holzfeuchten bei 20°C	49
Abbildung 3.19: Vergleich der Sorptionsisothermen von Dreischicht- und Blockholzplatten.....	50
Abbildung 3.20: Generierte Sorptionsisotherme der Dreischichtplatte bei $e 25^\circ\text{C}$	51
Abbildung 4.1: Aufbau des zu untersuchenden Hohlkastensystems der Familie Heinzer.....	52
Abbildung 4.2: Einteilung der holzbewohnenden Pilze nach ihrem Schadbild.....	55

Abbildung 4.3: Wachstumsbedingungen für Schimmelpilz und deren Optima.....	55
Abbildung 4.4: Ablauf der Datenanalyse.....	56
Abbildung 4.5: Holzfeuchtesonden für Langzeitmessungen.....	57
Abbildung 4.6: Installierte Klimabox mit Laptop für die kontinuierliche Gewichtsabnahme.....	57
Abbildung 4.7: Eingeschraubte Messspitzen der Holzfeuchtesonden.....	58
Abbildung 4.8: Das Lochgitter hält den Prüfkörper und die Messtechnik über dem Wasserspiegel ..	59
Abbildung 4.9: Der Prüfkörper und die darauf liegenden Holzfeuchtesonden	59
Abbildung 4.10: Aufzeichnungsperioden der gemessenen Parameter.	61
Abbildung 4.11: Aufzeichnungen des Holzfeuchteverlaufes durch intakte Holzfeuchtesonden.....	62
Abbildung 4.12: Aufzeichnungen des Holzfeuchteverlaufes durch fehlerhafte Holzfeuchtesonden...	63
Abbildung 4.13: Klimabedingungen inner- und ausserhalb der Klimabox.....	64
Abbildung 4.15: Ausgleichfeuchte der Dreischichtplatte im Labor bestimmt.....	65
Abbildung 4.16: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der rel. Luftfeuchte und der Temp. in G3, W ..	68
Abbildung 4.17: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der rel. Luftfeuchte und der Temp. in G3, Mi.	69
Abbildung 4.18: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der rel. Luftfeuchte in G3, W und Mi.....	70
Abbildung 4.19: Verlauf des gleitenden Mittelwertes der Temp. in G3, W und Mi	70
Abbildung 4.20: Verlauf des Feuchtegehaltes der Dreischichtplatte im Bereich W.....	71
Abbildung 4.21: Verlauf des Feuchtegehaltes der Dreischichtplatte im Bereich Mi und Ma.....	72
Abbildung 4.22: Verteilung der aufgezeichneten rel. Luftfeuchten und Temp. in G3.....	73
Abbildung 4.23: Verteilung der aufgezeichneten rel. Luftfeuchten und Temp. in G3.....	74
Abbildung 5.1: Kurve als Beispiel der Feuchtespeicherfunktion.....	81
Abbildung 5.2: "Wärme-Leckage", "Feuchte-Leckage".....	84
Abbildung 5.3: Mögliche konvektive Befeuchtungsebene in einer Konstruktion.....	84
Abbildung 5.4: Ablauf des Simulationsverfahrens mit WUFI®	86
Abbildung 5.5: In die Küchentür eingesetzte Blowerdoor-Apparatur	87
Abbildung 5.6: Abkleben der Fuge	87
Abbildung 5.7: Mit Ballon abgedichteter Luftschaft der kontrollierten Lüftungsanlage.	87
Abbildung 5.8: Mittels Rauch können grössere Leckagen gefunden und sichtbar gemacht werden...	88
Abbildung 5.9: Verschliessen der Luftförderanlage mittels Verschlusskappe.....	88
Abbildung 5.10: Feuchtespeicherfunktion von PAVAFLEX mit dem Datensatz des IBP.	89
Abbildung 5.11: Feuchtespeicherfunktion von PAVAFLEX mit dem Datensatz von PAVATEX®	89
Abbildung 5.12: Zugeschnittene Prüfkörper in Würfelform.	91
Abbildung 5.13: In Wasser gelagerte Prüfkörper.....	91
Abbildung 5.14: Prüfkörper komplett im Wasser eingetaucht.	91
Abbildung 5.15: Abtropfen der Prüfkörper, um freie Wassersättigung zu erreichen.	91
Abbildung 5.16: Angesetzte Feuchtequelle für das spezifische Gründachmodell.....	92
Abbildung 5.17: Angesetzte Feuchtequelle für das Modell des konvektiven Feuchteintrages.....	94
Abbildung 5.18: Leckagekurven für Unter- und Überdruck.....	96
Abbildung 5.19: Konstruktive Darstellung der verwendeten Konstruktionsweisen.....	99
Abbildung 5.20: Erste iterative Näherung.....	100
Abbildung 5.21: Zweite iterative Näherung.	100
Abbildung 5.22: Die entsprechenden rel. Luftfeuchten der Simulationsvarianten im Vergleich.....	102
Abbildung 5.23: Die entsprechenden rel. Luftfeuchten der Simulationsvarianten im Vergleich	102
Abbildung 6.1: Direktvergleich:bererchnete, simulierte und gemessene Ausgleichsfeuchte	103

Tabellen

Tabelle 1: Belastungen von aussen, deren Ursachen und mögliche Folgen	11
Tabelle 2: Belastungen von innen, deren Ursachen und mögliche Folgen	11
Tabelle 3: Typische Werte der relativen Luftfeuchte und Temperatur.	22
Tabelle 4: Nummernplan des ID-Schlüssels	39
Tabelle 5: Darstellung der geprüften Holzwerkstoffe und deren Herkunftsangabe.	39
Tabelle 6: Darrdichten der geprüften Probekörper und deren Mittelwerte.	44
Tabelle 7: Darrdichten verschiedener Holzarten aus WAGENFÜHR.	45
Tabelle 8: Gemittelte Ausgleichsfeuchten der Dreischicht- und Blockholzplatte.....	47
Tabelle 9: Verwendete Gleichgewichtskoeffizienten und Parameter für die Sorptionsisothermen....	47
Tabelle 10: Anfangs- und Endmasse des Aufbaus und Massendifferenz durch Feuchteaufnahme....	65
Tabelle 11: Maximale Ausgleichsfeuchten der Dreischichtplatte nach verschiedenen Verfahren	66
Tabelle 12: Mit dem Feuchtemessgerät erhaltene Holzfeuchten.....	67
Tabelle 13: Eigenschaften des Holzfaserdämmstoffes PAVAFLEX.	90
Tabelle 14: Messergebnisse bei 50 Pa Druckdifferenz.....	96
Tabelle 15: Kennwerte der Weichfaserdämmplatte PAVAFLEX von PAVATEX®	97
Tabelle 16: Berechnete freie Wassersättigung w_f von PAVAFLEX nach 1h, 2h und 4h abtropfen	97
Tabelle 17: Verwendete Parameter für hygrothermischen Bauteilsimulationen.....	98
Tabelle 18: Die vier Aufbauten für die instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen	98

Geräte

	Maschine	Name	Typ	Messbereich
[1]	Formatkreissäge	FELDER	BF6-26	
[2]	Darrofen	Salvis	Pantatherm D	103°C
[3]	Waage	Mettler	PM4000	10 mg
[4]	Messschieber	Mitutoyo	Absolute Digimatic	0.01 mm
[5]	Holzfeuchtesonden	Holzfeuchtesonde für Langzeitmessungen	FHA 636 MF10	5 bis 50%
[6]	kompaktes Universalmessgerät	Ahlborn ALMEMO	2590-2	
[7]	Waage	Mettler	AE200	0.1 mg
[8]	Laptop	Dell LATITUDE	D800	
[9]	USB-Datenlogger	RH/Temperatur/Dew Point Data Logger	EL-USB-2+	-35 bis +80°C
[10]	Blowerdoor-Apparatur	Minneapolis BlowerDoor Standard	Modell Minneapolis	19 –7.200 m³/h
[11]	Feuchtemessgerät	BES-BOLLMANN	COMBO 100	
[12]	Klimaschrank	Feutron	KPK 200	

Normen

DIN 4108-3, 2012. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN 4108-7, 2009. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtigkeit von Bauteilen und Anschläßen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN 52 182, 1976. *Prüfung von Holz - Bestimmung der Rohdichte*. Berlin und Köln: Beuth Verlag GmbH.

DIN 52 183, 1977. *Prüfung von Holz - Bestimmung des Feuchtegehaltes*. Berlin und Köln: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 13 829, 2000. *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN 15 026, 2007. *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN ISO 12 571, 2013. *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygrokopischen Sorptionseigenschaften*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN ISO 13 788, 2013. *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinnern - Berechnungsverfahren*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN ISO 15 148, 2002. *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisen Eintauchen*, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V..

IEEE 754, 2008. *Standard for Floating-point Arithmetic*, New York: IEEE Standards Association.

ISO 3129, 2012. *WOOD- Sampling methods and general requirements for physical and mechanical testing of small clear wood specimens*. Geneva: ISO copyright office.

MERKBLATT FD 2/07, 2007. *Merkblatt - Technische Kommission Flachdach - Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise*, Uzwil: GEBÄUDEHÜLLE SCHWEIZ.

SIA 180, 1999. *Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.

SIA 265/1, 2003. *Holzbau - Ergänzende Festlegungen*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.

SIA 265, 2003. *Holzbau*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.

SIA Dok. D 018, 2008. *Wasserdampfdiffusion - Grundlagen, Berechnungsverfahren, Diffusionsnachweis*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband.

Literatur

- BFS, 2014.** *Statistik Schweiz*. www.bfs.admin.ch. Zugriff am 05 02 2014.
- BORSCH-LAAKS, R. et al., 2004.** Flaches Dach, aber sicher! - Flachdach ohne Belüftung mit Attika. *Die neue Quadriga*, Heft 6.
- BRAUN, H., 1982.** *Lehrbuch der Forstbotanik*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.
- EDI, 2005.** *MeteoSchweiz.admin*. www.meteoschweiz.admin.ch. Zugriff am 16 10 2014.
- ERHORN, H. & SZERMAN, M., 1992.** Überprüfung der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten in Aussenwandecken von Wohnbauten. *Gesundheitsingenieur*, Heft 113, S. 177-186.
- FISCHER, H. et al., 2008.** *Lehrbuch der Bauphysik - Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag | GWV Fachverlag GmbH.
- HAILWOOD, A. & HORROBIN, S., 1946.** Absorption of water by polymers. Analysis in terms of a simple model.. *Trans. Farady Soc.*, Heft 42B:84-92, S. 94-102.
- HÄUPL, P., 2008.** *Bauphysik - Klima, Wärme, Feuchte, Schall - Grundlagen, Anwendungen, Beispiele*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co..
- HAWLEY, L., 1931.** Wood-Liquid Relations. *US Department Agric.* , Heft 248.
- HOHMANN, R., 2011.** Materialtechnische Tabellen. In: *Bauphysik Kalender 2011*. Berlin: Ernst & Sohn.
- HOLM, A., 2001.** *Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochiastischen Konzeptes*, Stuttgart: Universität Stuttgart.
- HOLM, A., KRUS, M. & KÜNZEL, H., 2002.** *Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus einfach bestimmmbaren Kennwerten*, Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bausphysik.
- HTML Help, 2013.** www.wufi.de. Zugriff am 12 12 2013.
- HUKKA, A. & VIITANEN, H., 1999.** A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology*, Heft 33, S. 11.
- IBP, 2010.** *Simulation von Dachbegrünungen*. s.l.:Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- IBP, 2013.** *WUFI - generisches Substrat.xml*, Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- JOSCAK, M. et al., 2008.** *Vergleichende Untersuchungen zum optimierten Wärmeschutz in unterschiedlichen Holzbausystemen*, Zürich: ETH Zürich.
- JOSCAK, M. et al., 2010.** *System Appenzellerholz*, Zürich: ETH Zürich.
- JOSCAK, M. et al., 2011.** *Vergleichende Untersuchungen zum Feuchte- und Wärmeverhalten in unterschiedlichen Holzwandelementen*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- KEYLWERTH, R., 1952.** Hochtemperatur-Trockenanlagen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Band 10.
- KNIGGE, W. & SCHULZ, H., 1966.** *Grundriss der Forstbenutzung: Entstehung, Eigenschaften, Verwertung und Verwendung des Holzes und anderer Forstprodukte*. Hamburg: Parey .
- KOLLMANN, F., 1951.** *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin: Springer-Verlag.
- KRUS, M., 1995.** *Feuchtetransport- und Speicherkoefizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken*, Stuttgart: Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- KUCHLING, H., 2011.** *Tschenbuch der Physik*. 20. Auflage Hrsg. München: Carl Hanser Verlag.
- KÜNZEL, H., 1994.** *Einfluss der Mittelwertbildung von Klimadaten auf die Ergebnisse von Feuchteberechnungen*, Dresden: Tagungsband 9. Bauklimatisches Symposium .
- KÜNZEL, H., 1997.** *Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen*, s.l.: Fraunhofer Institut für Bauphysik.

- KÜNZEL, H., 1999.** *Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser - quo vadis?*, Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik .
- KÜNZEL, H. M., 1994.** *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchttetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*, Stuttgart: Lehrstuhl für konstruktive Bauphysik.
- KÜNZEL, H., ZIRKELBACH, D. & SCHAFACZEK, B., 2010.** *Berücksichtigung der Wasserdampfkonvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen*, s.l.: wksb.
- MICHEL, F., 2012.** *Bestimmung bauphysikalisch relevanter Eigenschaften bei Materialkombination von porösen Holzfaserplatten und anderen Materialien*, Biel/Bienne: BFH AHB.
- MINKE, G., OTTO, F. & GROSS, R., 2009.** *Ermittlung des Wärmedämmverhaltens von Gründächern*, Kassel: s.n.
- NIEMZ, P., 1993.** *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co..
- NUSSER, B., TEIBINGER, M. & BEDNAR, T., 2010.** Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvolldämmung - Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zelluslose- und Mineralwolleddämmung. *Bauphysik* 32, Heft 2.
- PALOMO DEL BARIO, E., 1998.** Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, Heft 27, S. 179-193.
- PAPADOPoulos, N. & MANTANIS, G., 2012.** Vapour Sorption Studies of Belmadur Wood. *Advances in Forestry Letter (AFL)*, Heft 1.
- PATANKAR, S., 1980.** *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington: Verlag McGraw-Hill.
- PECH, A., HUBNER, W. & ZACH, F., 2011.** *Flachdach*. Wien: Springer-Verlag.
- POPPER, R. & BARISKA, M., 1972.** Die Azylierung des Holzes. 1. Mitteilung: Wasserdampf-Sorptionseigenschaften. *HOLZ als Roh- und Werkstoff*, Band 30, S. 289-294.
- POPPER, R., NIEMZ, P. & CROPTIER, S., 2009.** Adsorption and desorption measurements on selected exotic wood species. Analysis with the Hailwood-Horrobin Model to describe the sorption hysteresis. *Wood Research*, Heft 54.
- SAILOR, D., 2008.** A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, Heft 40, S. 1466-1478.
- SCHAFAczEK, B. & ZIRKELBACH, D., 2012.** Feuchtetechnische Beurteilung von Innendämmssystemen mit Faserdämmstoffen. *WKSb*, Heft 67, S. 7.
- SCHAFAczEK, B., ZIRKELBACH, D. & KÜNZEL, H., 2013.** *Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparametern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten*, Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- SCHMIDT, D., 2007.** Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise. Teil 2: Holzschutz bei Flachdachkonstruktionen. *Holzbau Quadriga*, Heft 4.
- SCHMIDT, D. & WINTER, S., 2008.** *Flachdächer in Holzbauweise - Spezial*, Bonn: Informationsdienst HOLZ.
- SCHNIDER, T., 2012.** *Formeln zur Berechnung der Ausgleichsfeuchte von Holz in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte und Temperatur nach R. Keylwerth und Angaben des U.S. Forest Products Laboratory*, Zürich: ETH Zürich, interne Daten.
- SCHNYDER, H. & SAHLI, H., 2007.** *Merkblatt - Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise*, Uzwil: Gebäudehülle Schweiz.
- SIAU, J., 1971.** *Flow in Wood*. New York: Syracuse University Press.

- SIMSPON, W., 1973.** Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *WOOD AND FIBER*, Heft 5(1).
- STEIN, J., 1997.** *Physik für Bauingenieure - Wärme und Feuchte*. Hamburg: AVH - Verlag Hamburg.
- TEIBINGER, M. & NUSSER, B., 2010.** *Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen*, Wien: s.n.
- TENWOLDE, A., CARLL, C. & MALINAUSKAS, V., 1998.** Air Pressures in Wood Frame Walls. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII. Clearwater*, Heft VII.
- THEODOSIOU, T., 2003.** Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, Heft 35, S. 909-917.
- v. BUSSE, H., WAUBKE, N., GRIMME, R. & MERTINS, J., 2000.** *Atlas Flache Dächer*. Basel: Birkhäuser.
- WAGENFÜHR, R., 1996.** *Holzatlas*. Leipzig: Fachbuchverlag.
- WEBER, H., BLASER, C., FISCHER, J. & WIEDERKEHR, R., 2003.** Flachdach - Konstruktionen im Holzbau. *Lignitec*, Heft 15.
- WINTER, S., FÜLLE, C. & WERTHER, N., 2009.** *Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprod. zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerechter Konst.*, Holzkirchen: Fraunhofer IRB Verlag.
- WUFI Pro 5.2, 2013.** *CreateClimateFile*, Holzkirchen: s.n.
- ZIRKELBACH, D., KÜNZEL, H., SCHAFACZEK, B. & BORSCH-LAAKS, R., 2009.** *Dampfkonvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen*, Berlin: s.n.
- ZÜRCHER, C. & FRANK, T., 2010.** *Bauphysik - Bau & Energie*. 3. Auflage Hrsg. Zürich: vdf Hochschulverlag AG.

Anhang

Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Baustoffe
Holzphysik
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich

ANHANG DES SCHLUSSBERICHTES**Experimentelle und numerische Untersuchung des
hygrothermischen Verhaltens von Flachdachelementen
im Hohlkastensystem****Projekt 2012.11**

Inhaltsverzeichnis

1	Darrdichten.....	1
2	Ausgleichsfeuchten	
2.1	Ausgleichsfeuchten in Tabellenform	2
2.2	Ausgleichsfeuchten Boxplots	3
2.3	Sorptionsisothermen	5
3	Sensorvalidierung.....	7
4	Datenanalyse	
4.1	Kurven	8
4.2	Scatterplots	10
5	Freie Wassersättigung	11
6	Prognostizierte Ausgleichsfeuchten	12
7	CD-Anhang.....	13

1 Darrdichten

Tabelle 19: Darrdichten der geprüften Probekörper und deren Mittelwerte.

Holztyp	Picea abies	3-Schichtplatte	Blockholzplatte	Larix decidua	Fagus sylvatica	Quercus robur	Accoya-Holz	
ID	1a	1b	1c	1d	2	3	4	5
1	0.470	0.319	0.511	0.414	0.625	0.672	0.820	0.468
2	0.470	0.309	0.561	0.385	0.622	0.666	0.822	0.445
3	0.458	0.315	0.544	0.401	0.594	0.671	0.736	0.444
4	0.429	0.306	0.510	0.409	0.631	0.662	0.823	0.452
5	0.447	0.304	0.466	0.394	0.630	0.665	0.801	0.451
6	0.428	0.315	0.438	0.399	0.606	0.665	0.787	0.436
7	0.471	0.310	0.400	0.426	0.603	0.662	0.762	0.447
8	0.470	0.319	0.482	0.411	0.618	0.666	0.809	0.449
9	0.471	0.324	0.425	0.382	0.621	0.659	0.757	0.444
10	0.433	0.309	0.535	0.414	0.640	0.659	0.754	0.451
11	0.437	0.333	0.433	0.386	0.646	0.659	0.792	0.440
12	0.456	0.298	0.468	0.385	0.609	0.673	0.738	0.443
13	0.418	0.315	0.455	0.407	0.595	0.671	0.764	0.470
14	0.477	0.326	0.444	0.385	0.620	0.660	0.789	0.450
15	0.467	0.307	0.452	0.418	0.622	0.659	0.721	0.453
16	0.428	0.313	0.425	0.403	0.689	0.663	0.757	0.441
17	0.461	0.302	0.427	0.384	0.642	0.660	0.723	0.446
18	0.481	0.303	0.427	0.417	0.596	0.660	0.801	0.437
19	0.469	0.327	0.518	0.406	0.649	0.668	0.804	0.444
20	0.464	0.315	0.429	0.385	0.620	0.663	0.801	0.444
21	-	-	0.418	0.374	-	-	-	-
22	-	-	0.445	0.386	-	-	-	-
23	-	-	0.480	0.409	-	-	-	-
24	-	-	0.457	0.392	-	-	-	-
25	-	-	0.403	0.392	-	-	-	-
26	-	-	0.509	0.412	-	-	-	-
27	-	-	0.464	0.398	-	-	-	-
28	-	-	0.462	0.395	-	-	-	-
29	-	-	0.423	0.388	-	-	-	-
30	-	-	0.436	0.410	-	-	-	-
Mittelwert [g/cm ³]	0.455	0.313	0.462	0.399	0.624	0.664	0.778	0.448
Standardabweichung [%]	0.02	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00	0.03	0.01
Variationskoeff. [%]	4.29	2.90	9.24	3.35	3.59	0.70	4.26	1.92

2 Ausgleichsfeuchten

2.1 Ausgleichsfeuchten in Tabellenform

Tabelle 20: Gemittelte Ausgleichsfeuchten der Fichte (*Picea abies*), fein- und grobjährig, bei den verschiedenen Klimabedingungen.

Klima		Picea abies - feinjährig			Picea abies - grobjährig		
Temperatur	rel. Feuchte	Holzfeuchte	Standardabweichung	Variationskoeff.	Holzfeuchte	Standardabweichung	Variationskoeff.
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	80	15.75	0.21	1.36	15.23	0.23	1.54
10	85	17.12	0.29	1.71	16.73	0.27	1.59
10	90	17.85	0.44	2.48	17.30	0.48	2.79
15	40	6.08	0.21	3.43	6.08	0.21	3.43
15	70	14.22	0.22	1.55	14.22	0.22	1.55
15	80	14.93	0.22	1.46	14.93	0.22	1.46
15	90	17.20	0.35	2.05	17.20	0.35	2.05
20	40	6.02	0.21	3.41	5.59	0.14	2.50
20	70	13.47	0.15	1.14	13.00	0.20	1.56
20	80	14.36	0.20	1.37	13.92	0.87	6.24
20	90	16.71	0.28	1.67	16.14	0.26	1.62
20	95	19.01	0.81	4.26	18.32	0.98	5.35
20	98	24.91	0.73	2.95	25.44	0.48	1.89
25	40	8.07	0.27	3.38	7.57	0.17	2.22
25	70	11.63	0.15	1.27	11.06	0.20	1.82
25	80	13.17	0.21	1.60	12.58	0.19	1.54
25	90	16.72	0.33	1.97	15.77	0.22	1.40
25	95	18.43	0.46	2.47	17.57	0.20	1.15

Tabelle 21: Gemittelte Ausgleichsfeuchten der Lärche (*Larix decidua*) und Buche (*Fagus sylvatica*) bei den verschiedenen Klimabedingungen.

Klima		Larix decidua			Fagus sylvatica		
Temperatur	rel. Feuchte	Holzfeuchte	Standardabweichung	Variationskoeff.	Holzfeuchte	Standardabweichung	Variationskoeff.
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	80	15.29	0.22	1.45	15.60	0.44	2.79
10	85	17.29	0.20	1.17	17.44	0.70	4.00
10	90	17.60	0.35	2.01	18.02	0.43	2.37
15	40	5.83	0.11	1.95	5.61	0.06	1.16
15	70	13.78	0.17	1.25	14.00	0.26	1.84
15	80	14.92	0.21	1.39	14.99	0.29	1.92
15	90	17.33	0.32	1.87	17.21	0.46	2.69
20	40	5.96	0.07	1.21	5.57	0.06	1.13
20	70	13.18	0.16	1.19	13.28	0.18	1.33
20	80	14.14	0.18	1.25	14.24	0.20	1.43
20	90	16.93	0.22	1.30	16.85	0.32	1.89
20	95	19.76	0.47	2.39	20.06	0.63	3.17
20	98	30.64	0.62	2.03	27.04	0.35	1.29
25	40	8.08	0.08	1.04	7.43	0.43	5.81
25	70	11.85	0.22	1.86	11.17	0.11	1.01
25	80	13.05	0.13	0.96	12.88	0.10	0.76
25	90	16.93	0.20	1.20	16.96	0.27	1.60
25	95	19.05	0.21	1.12	19.56	0.31	1.56

Tabelle 22: Gemittelte Ausgleichsfeuchten der Eiche (*Quercus robur*) und Accoya-Holz (*Pinus radiata*) bei den verschiedenen Klimabedingungen.

Klima		Quercus robur			Accoya-Holz (<i>Pinus radiata</i>)		
Temperatur	rel. Feuchte	Holzfeuchte	Standardabweichung	Variationskoeff.	Holzfeuchte	Standardabweichung	Variationskoeff.
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
10	80	15.00	0.31	2.07	4.13	0.11	2.63
10	85	16.55	0.55	3.35	4.64	0.06	1.31
10	90	16.24	0.34	2.06	4.77	0.13	2.65
15	40	4.99	0.05	0.97	1.35	0.10	7.62
15	70	13.57	0.22	1.60	3.56	0.10	2.69
15	80	14.20	0.23	1.62	3.92	0.10	2.54
15	90	15.63	0.34	2.16	4.61	0.11	2.41
20	40	5.12	0.05	0.97	1.30	0.11	8.27
20	70	12.95	0.16	1.24	3.36	0.09	2.58
20	80	13.64	0.18	1.33	3.69	0.10	2.61
20	90	15.42	0.22	1.45	4.44	0.10	2.27
20	95	17.81	0.56	3.17	4.75	0.14	3.04
20	98	23.84	0.89	3.72	8.00	0.41	5.10
25	40	7.85	0.06	0.79	1.67	0.09	5.21
25	70	11.51	0.28	2.39	2.92	0.09	3.25
25	80	12.21	0.09	0.77	3.38	0.09	2.71
25	90	15.46	0.21	1.33	4.35	0.16	3.67
25	95	17.69	0.25	1.43	4.58	0.13	2.89

2.2 Ausgleichsfeuchten Boxplots

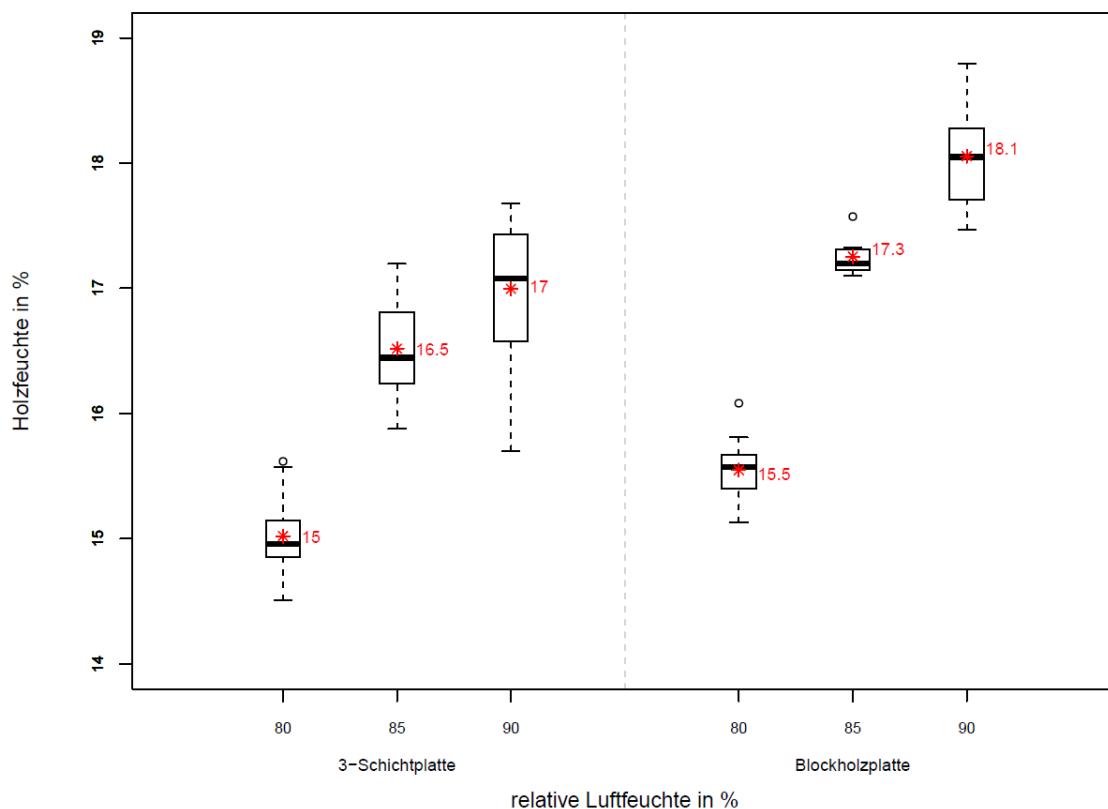


Abbildung 2.1: Boxplot der berechneten Holzfeuchten von Dreischicht- und Blockholzplatte bei 10°C und die entsprechenden Mittelwerte.

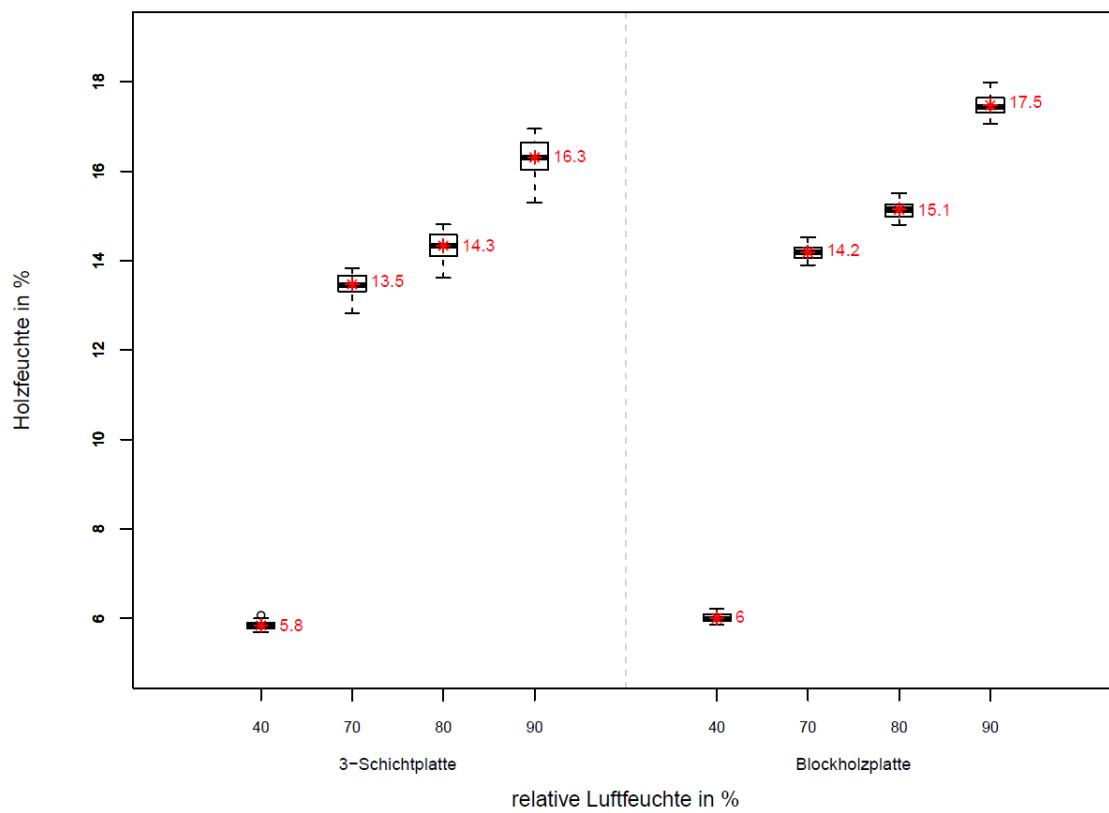


Abbildung 2.2: Boxplot der berechneten Holzfeuchten von Dreischicht- und Blockholzplatte bei 15°C und die entsprechenden Mittelwerte.

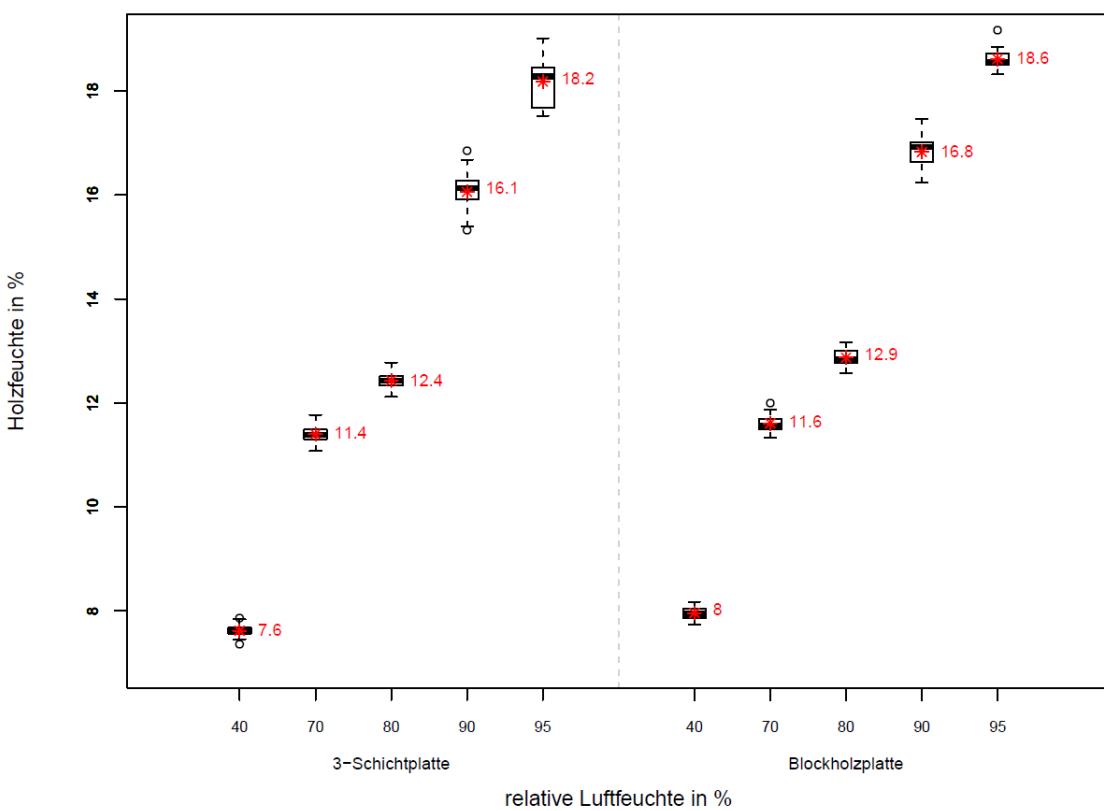


Abbildung 2.3: Boxplot der berechneten Holzfeuchten von Dreischicht- und Blockholzplatte bei 25°C und die entsprechenden Mittelwerte.

2.3 Sorptionsisothermen

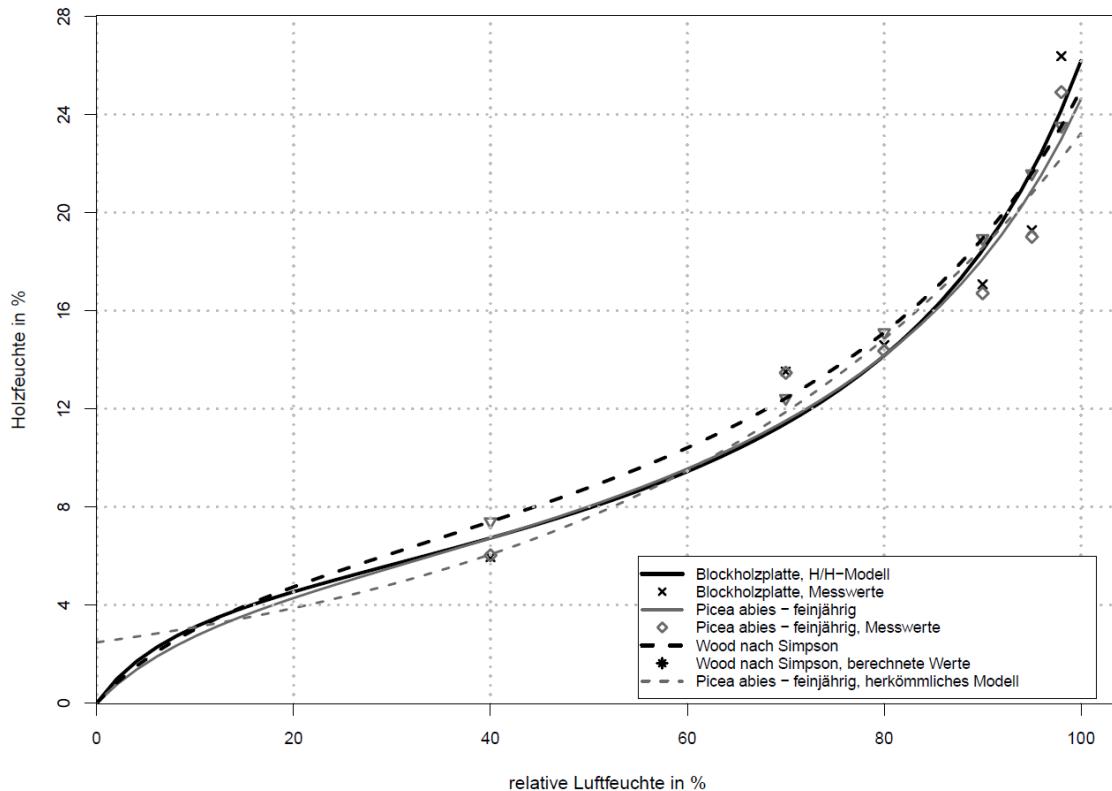


Abbildung 2.4: Vergleich der Sorptionsisotherme von der Blockholzplatte nach H/H-Modell mit Literaturwert von SIMPSON und Picea abies – feinjährig, H/H-Modell und herkömmliches Modell, bei 20°C Lufttemperatur.

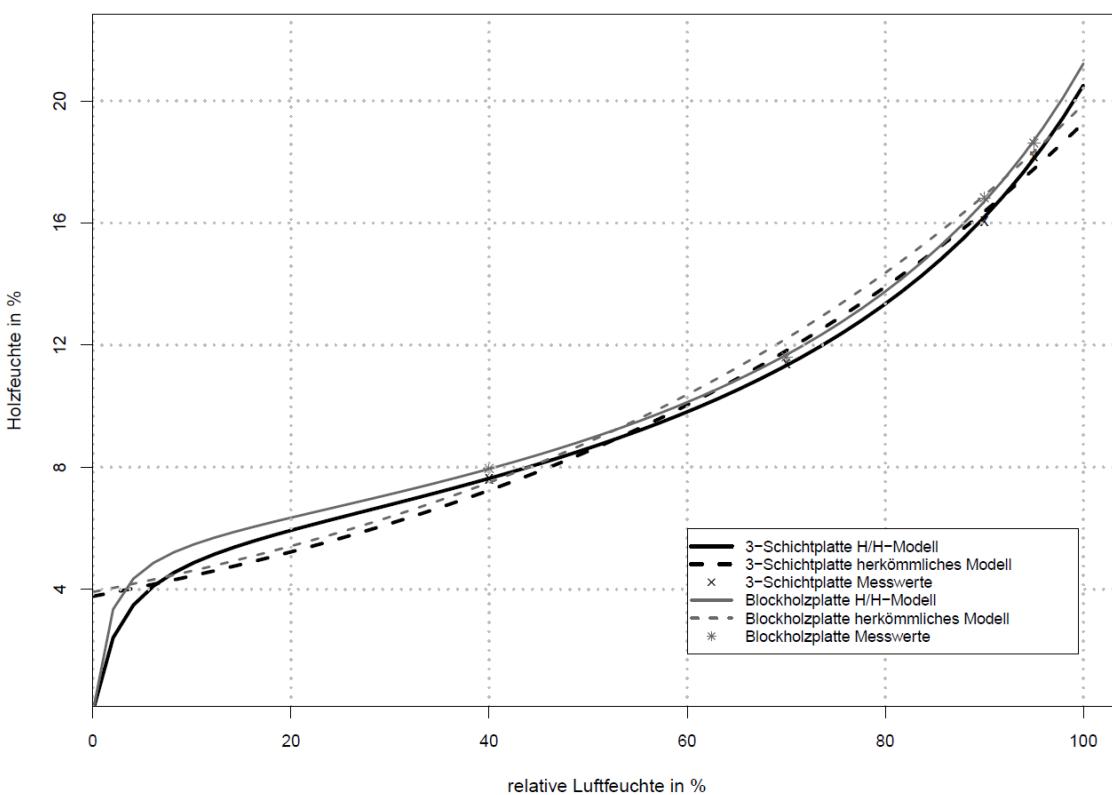


Abbildung 2.5: Sorptionsisothermen der Dreischicht- und Blockholzplatte bei einer Temperatur von 25°C. H/H-Modell im Vergleich mit dem herkömmlichen Modell.

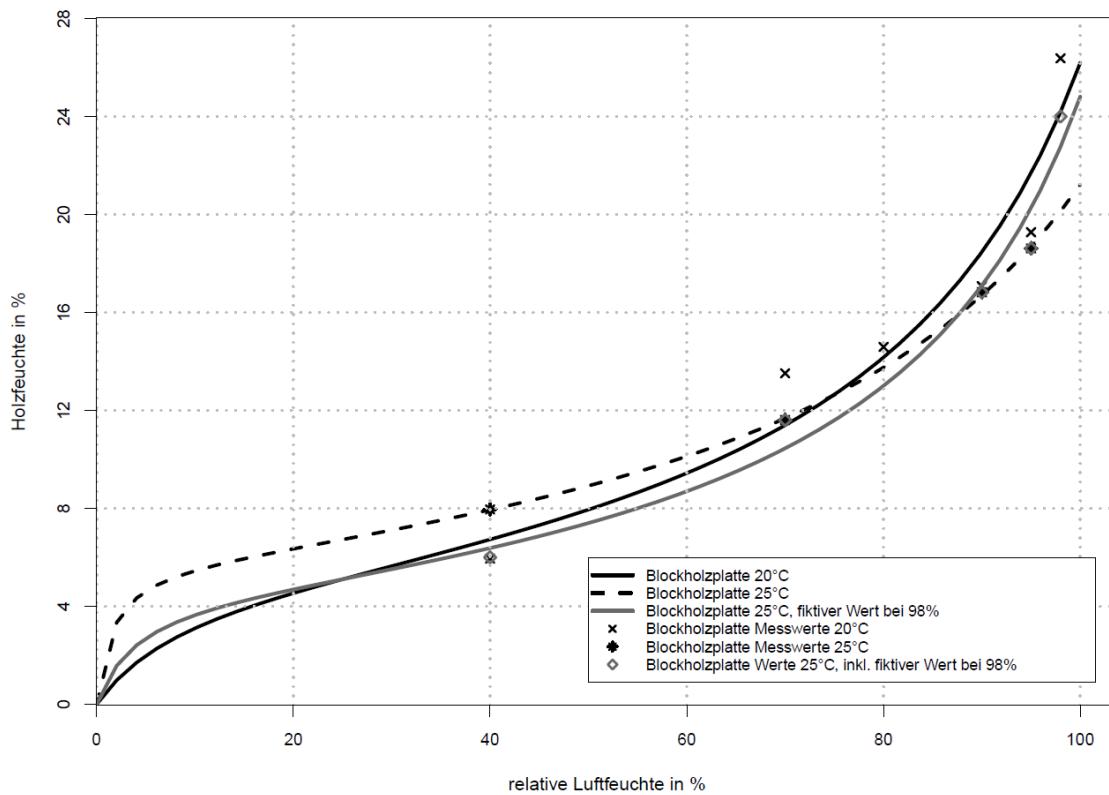


Abbildung 2.6: Generierte Sorptionsisotherme der Blockholzplatte bei einer Temperatur von 25°C mit fiktivem Wert bei 98% relativer Luftfeuchte.

3 Sensorvalidierung

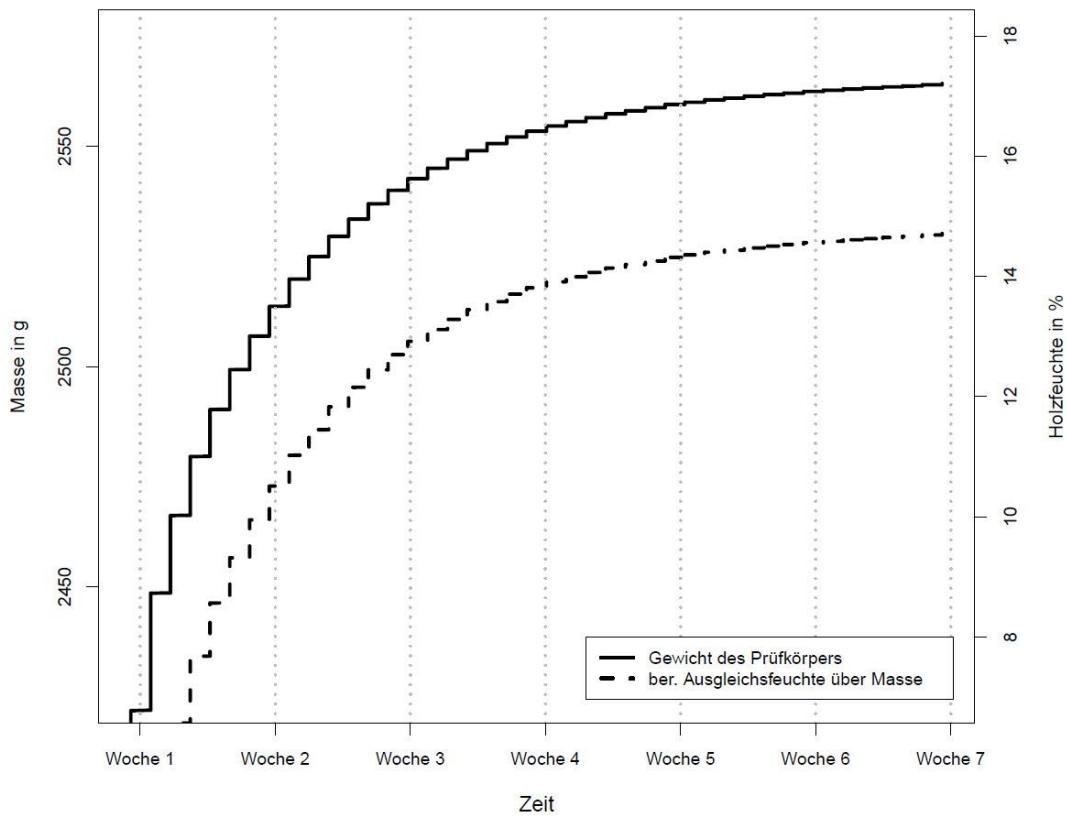


Abbildung 3.1: Verlauf der Masse der geprüften Dreischichtplatte und die daraus berechnete Ausgleichsfeuchte.

4 Datenanalyse

4.1 Kurven

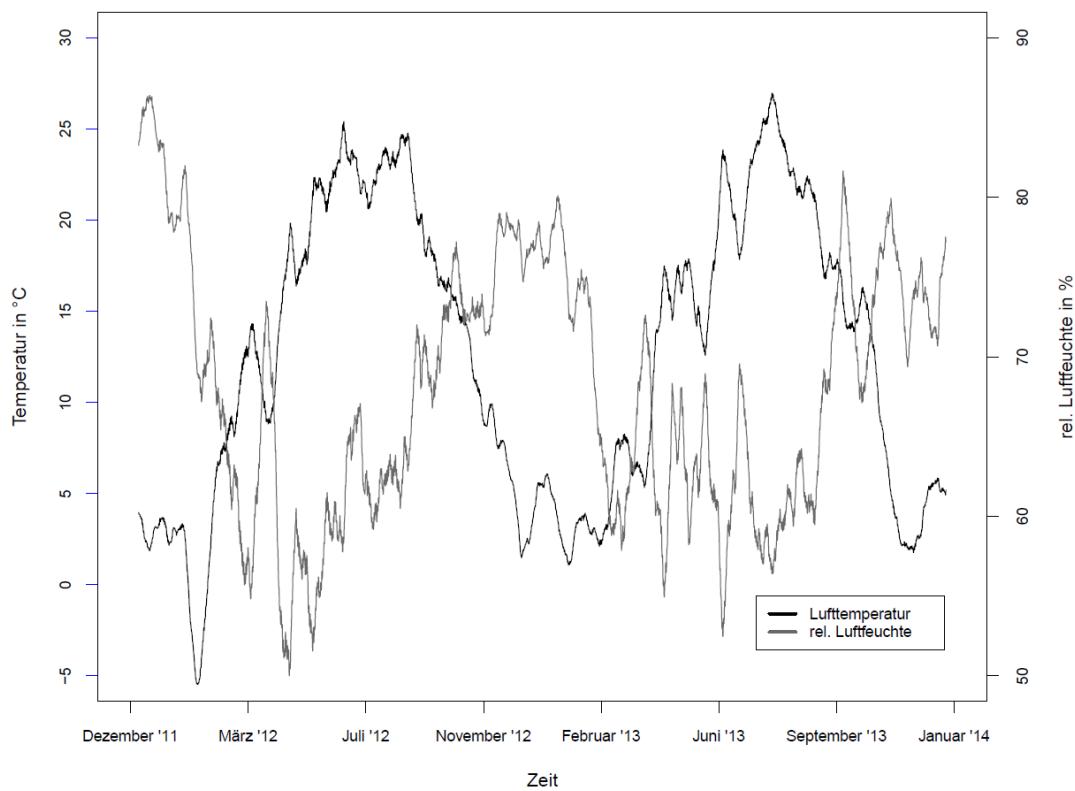


Abbildung 4.1: Gemessenes Außenklima in Ibach bei Schwyz.

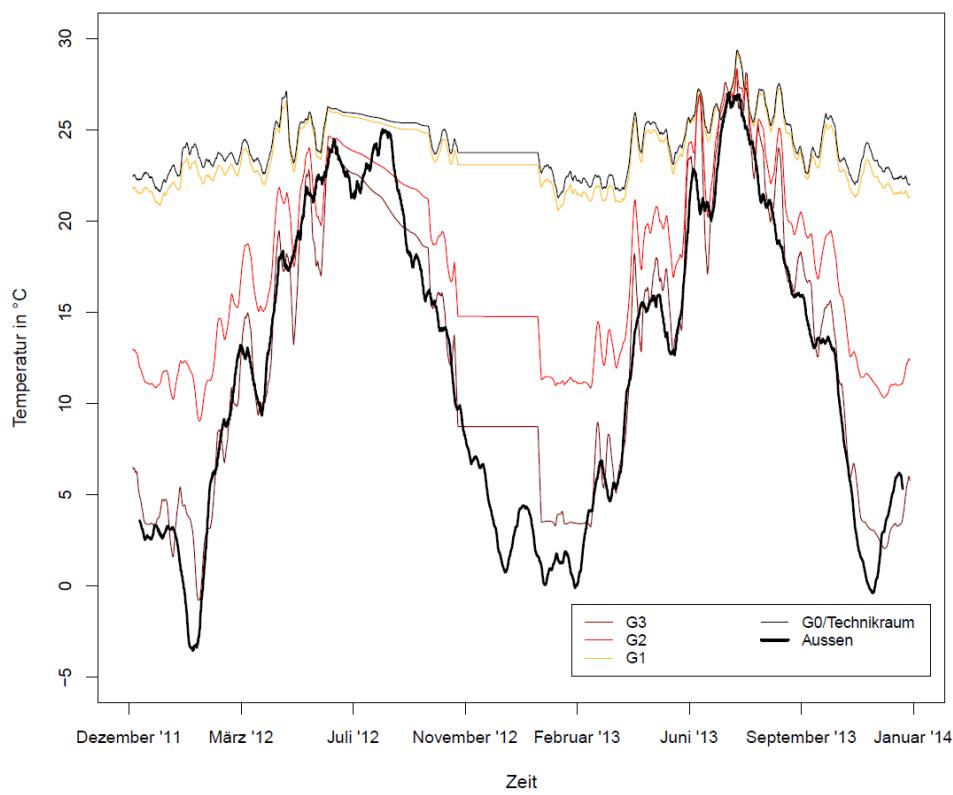


Abbildung 4.2: Temperaturverlauf im Bereich der Weichfaserdämmung und Messlinie 1.

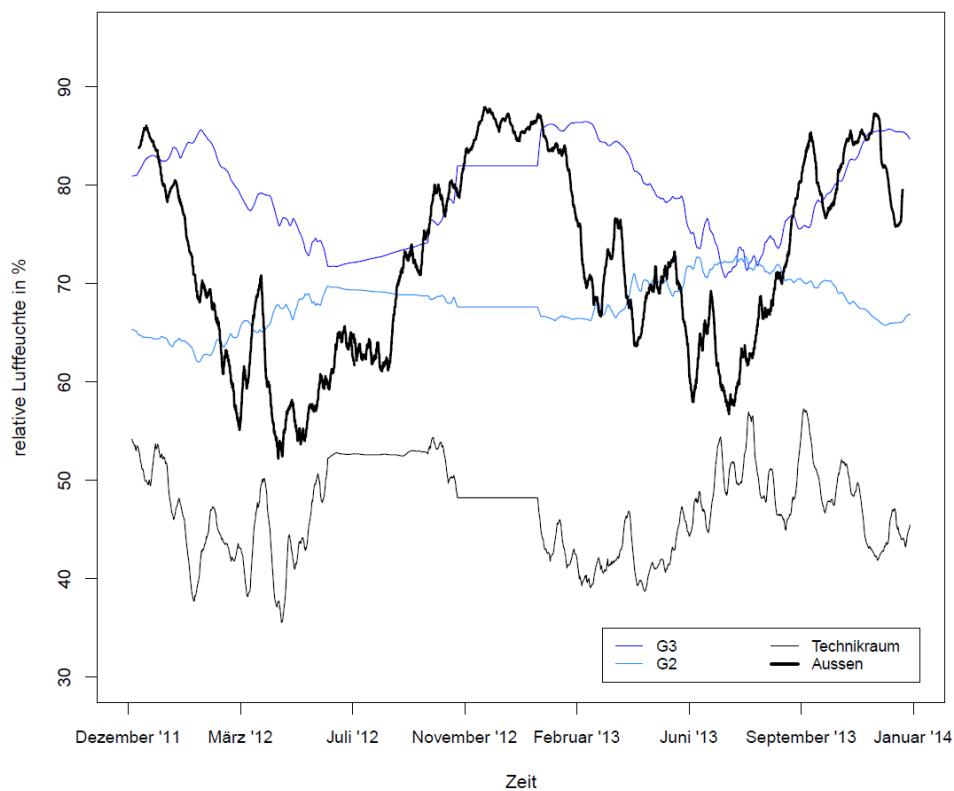


Abbildung 4.3: Verlauf der relativen Luftfeuchte im Bereich der Weichfaserdämmung und Messlinie 1.

4.2 Scatterplots

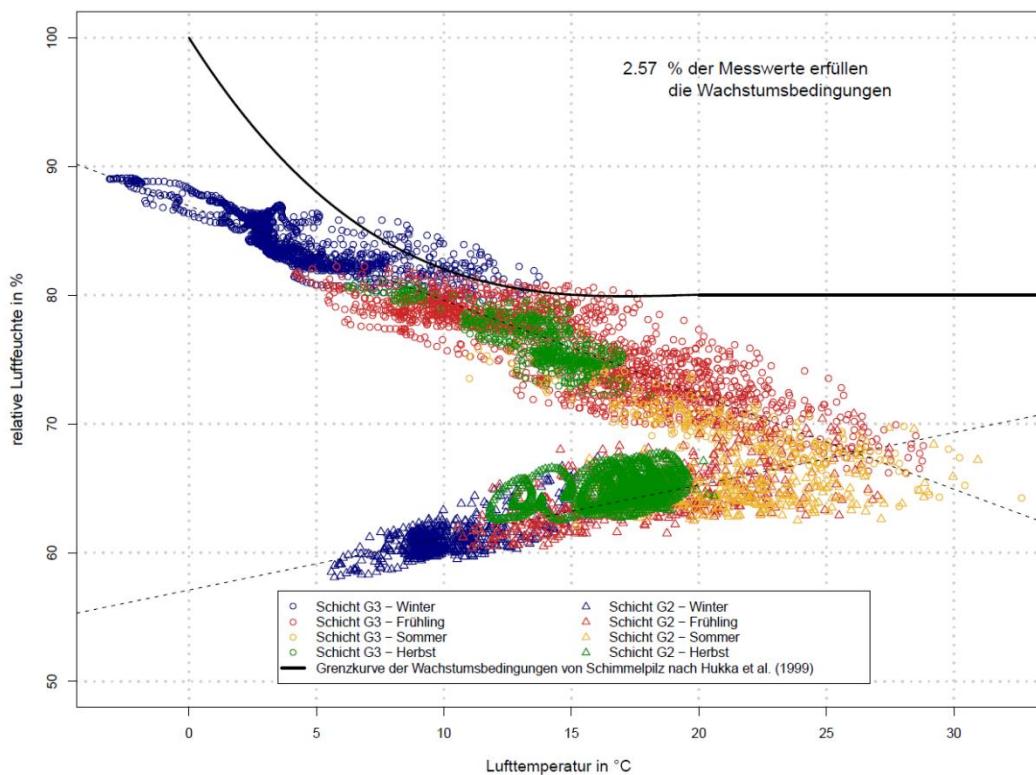


Abbildung 4.4: Verteilung der aufgezeichneten relativen Luftfeuchte und Temperatur in der Schicht G3 im Bereich der Mineralfaserdämmung zwischen Winter 2011 und Winter 2012 und Prozentsatz, die die Wachstumsbedingungen nach HUKKA & VIITANEN erfüllen.

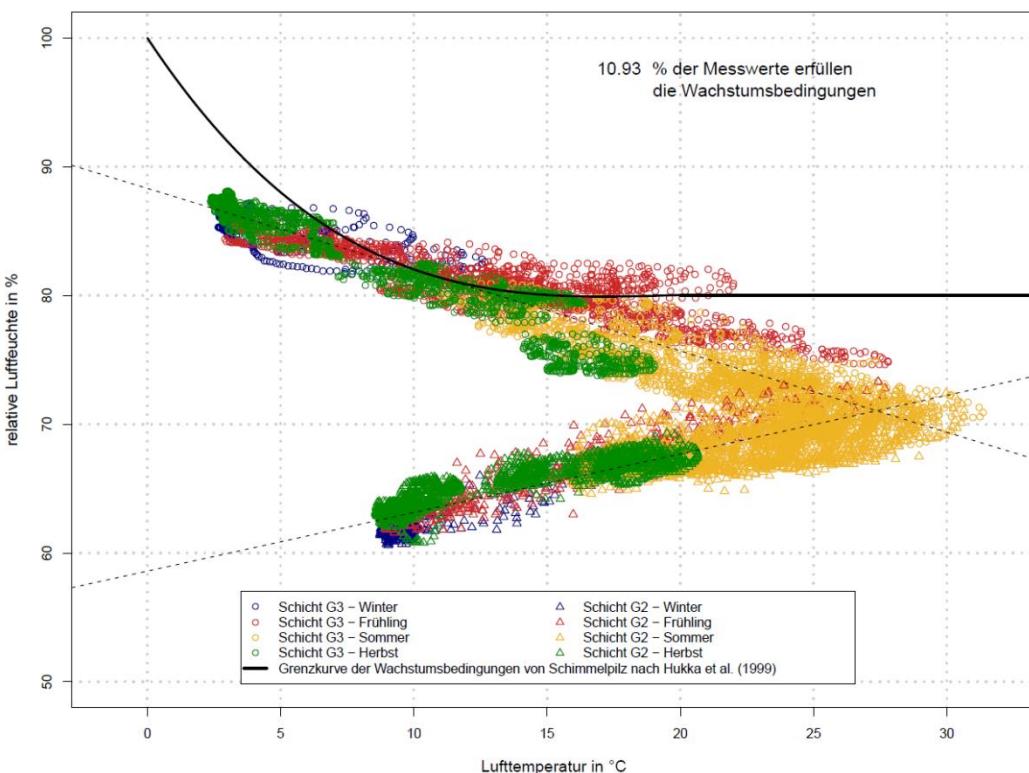


Abbildung 4.5: Verteilung der aufgezeichneten relativen Luftfeuchte und Temperatur in der Schicht G3 im Bereich der Mineralfaserdämmung zwischen Winter 2012 und Winter 2013 und Prozentsatz, die die Wachstumsbedingungen nach HUKKA & VIITANEN erfüllen.

5 Freie Wassersättigung

Tabelle 23: Kennwerte der Weichfaserdämmplatte PAVAFLEX von PAVATEX® für die Bestimmung der freien Wassersättigung.

ID	Breite [mm]	Länge [mm]	Dicke [mm]	Grundfläche $[m^2] \cdot 10^{-3}$	Volumen $[m^3] \cdot 10^{-3}$	m_0 [g]	$m_{20/65}$ [g]	$\rho_{20/65}$ [kg/m³]	ρ_0 [kg/m³]
1	122	123	123	15.01	1.85	81.00	89.91	48.71	43.88
2	123	124	123	15.25	1.88	84.26	93.53	49.86	44.92
3	122	123	124	15.01	1.86	79.25	87.97	47.28	42.59
4	125	123	124	15.38	1.91	77.22	85.71	44.96	40.50
5	125	122	124	15.25	1.89	78.59	87.23	46.13	41.56
6	125	125	124	15.63	1.94	80.91	89.81	46.35	41.76
7	120	124	124	14.88	1.85	88.22	97.92	53.07	47.81
8	123	126	125	15.50	1.94	86.16	95.64	49.37	44.48
9	125	125	125	15.63	1.95	86.17	95.65	48.97	44.12
10	123	125	123	15.38	1.89	85.56	94.97	50.22	45.24
11	122	124	120	15.13	1.82	78.28	86.89	47.86	43.12
12	127	125	116	15.88	1.84	80.81	89.70	48.71	43.88
Mittelwert	123.5	124.1	122.9	15.3	1.9	82.2	91.2	48.5	43.7
Standardabweichung [%]	1.85	1.11	2.43	0.28	0.04	3.54	3.93	2.07	1.86
Variationskoeff. [%]	1.50	0.90	1.98	1.85	2.23	4.30	4.30	4.27	4.27

$m_{20/65}$ = Masse bei 20°C und 65% relative Luftfeuchte

$\rho_{20/65}$ = Rohdichte bei 20°C und 65% relative Luftfeuchte

m_0 = Darrmasse

ρ_0 = Darrdichte

6 Prognostizierte Ausgleichsfeuchten

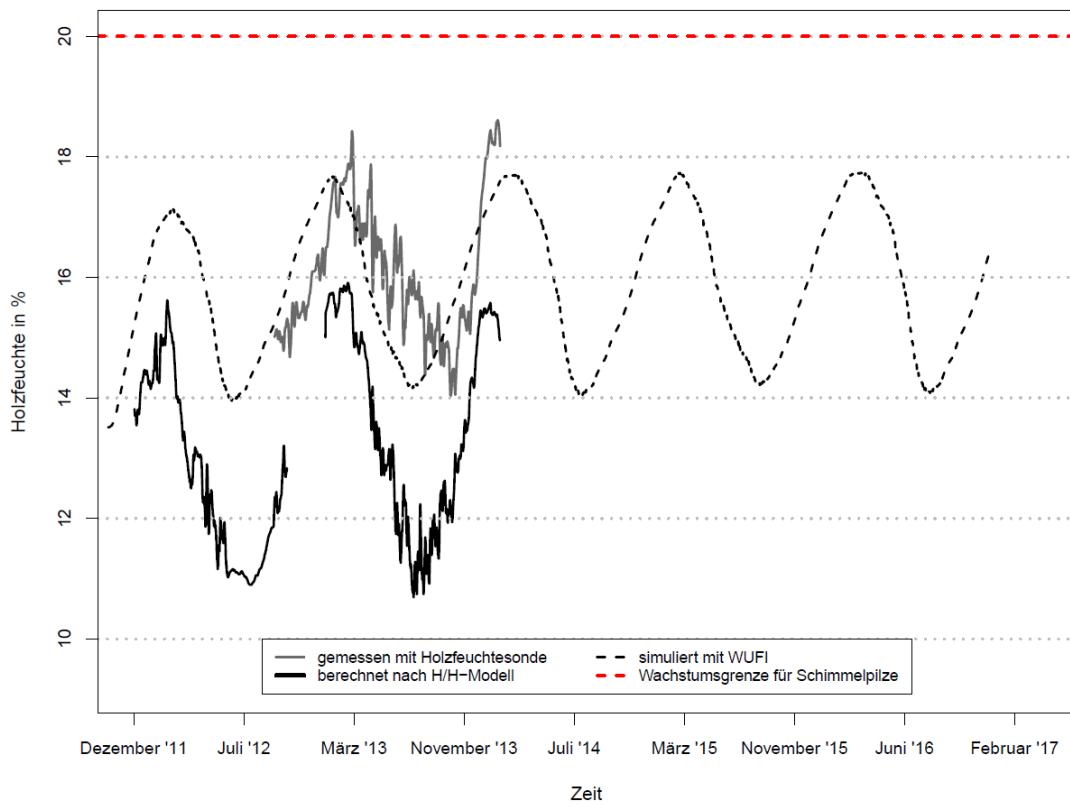


Abbildung 6.1: Prognostizierter Holzfeuchteverlauf der Dreischichtplatte mit WUFI im Bereich der Weichfaserdämmung.

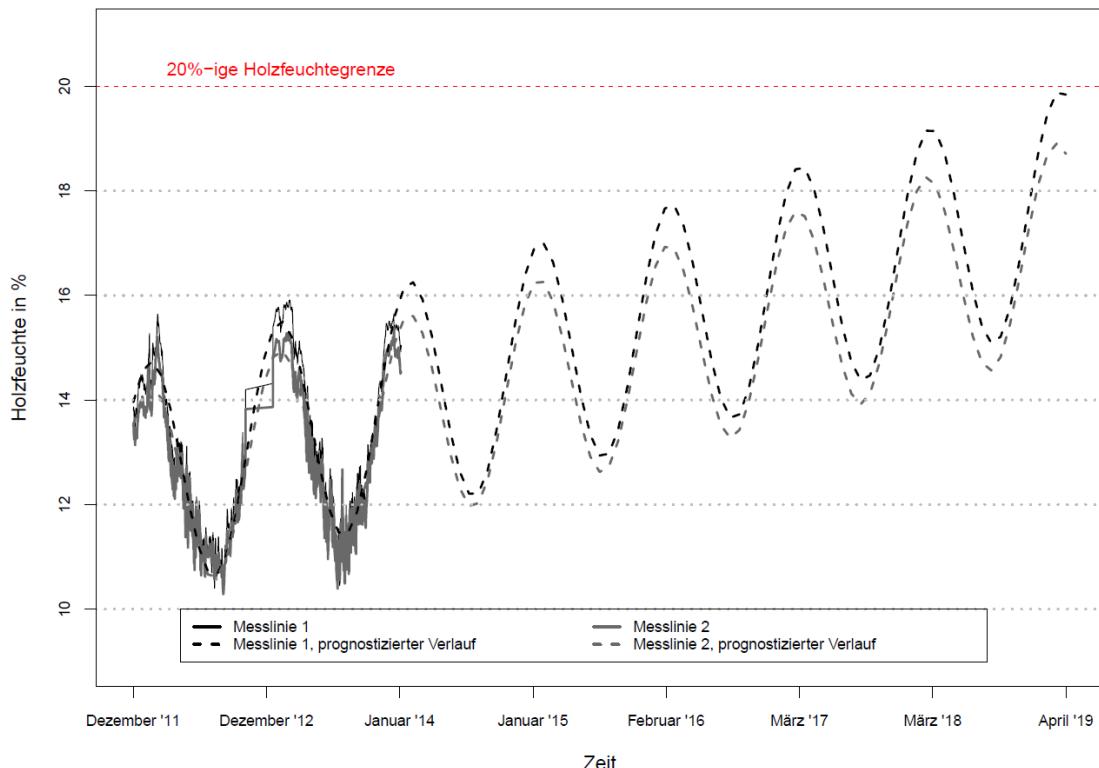


Abbildung 6.2: Prognostizierter Holzfeuchteverlauf der Dreischichtplatte mit Exponentialfunktion im Bereich der Weichfaserdämmung.

7 CD-Anhang