

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Dauerhaftigkeit von Flachdächern im Holzbau – Experimentelle Bestimmung des Strömungswiderstandes im Randbereich fasriger Dämmstoffe und Analyse kritischer Zustände mit hygrothermischer Bauteilsimulation

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

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Christoph Harreither

E 206
Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Jakob Weißinger
Matr.Nr.: 0525597
Obere Viaduktgasse
1030 Wien

Wien, im Oktober 2012

.....

Danksagung

Ich möchte mich *bei Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar* sowie bei meinem Betreuer *Univ.Ass. Dipl.-Ing. Christoph Harreither* für die Unterstützung bei meiner Diplomarbeit bedanken.

Weiters gilt ein besonderer Dank dem Laborpersonal des Instituts für seine große Hilfsbereitschaft während meiner Versuche:

Dipl. Ing. Manfred Grüner

Ing. Harald Hofbauer

Einen besonderen Dank möchte ich hier auch meinen Freunden *Christoph Wikete, Stefan Ratzinger, Jürgen Stadler und Martin Rapp* übermitteln, mit denen ich viel Zeit verbracht und so manche harte Prüfung bewältigt habe.

Natürlich danke ich auch meinen Kollegen, die ich während des Studiums kennenlernte. Nämlich:

Georg Brandstetter, Bernhard Masar, Svetoslav Slachev, Darko Tasevski, Thomas Lampl, Christan Borlea, Gustav Benedikt, Martin Stadlbauer, Michael Schefbeck, Mario Ferchenbauer und Christian Anger.

Ein besonderer Dank geht an meine Eltern, *Ilse und Dr. Otto Weißinger*, die es mir ermöglicht haben, in Wien zu studieren. Zuletzt noch ein herzliches Dankeschön an meine Schwester *Mirjam*, ihren *Hans* und die kleine *Johanna*, die in Wien meine nächsten Ansprechpartner für „alle Lebenslagen“ sind, und die mit ihrer Musik immer wieder für gute Stimmung sorgen.

DANKE!

Kurzfassung

Dauerhaftigkeit von Flachdächern im Holzbau – Experimentelle Bestimmung des Strömungswiderstandes im Randbereich fasriger Dämmstoffe und Analyse kritischer Zustände mit hygrothermischer Bauteilsimulation

Ziel dieser Diplomarbeit war es, anhand verschiedener Versuche den Strömungswiderstand sowohl im Dämmmaterial als auch zwischen Dämmmaterial und angrenzenden Materialien zu ermitteln. Dabei wurde vor allem auf die Zone zwischen der Dämmung und dem angrenzenden Material (den Sparren) besonders Augenmerk gelegt.

Die Idee war folgende, durch verschiedene Umfang-Flächen-Verhältnissen auf einem Strömungswiderstand im Kern und am Rand der Dämmung zu ermitteln. Daher fanden bei dieser Untersuchung verschiedene Polokalrohre mit unterschiedlichen Durchmesser Verwendung. In diese Polokalrohre wurde das Dämmmaterial eingeführt. Hierbei wurde die Durchströmung des Randes nicht behindert. Für die Versuchsdurchführung wurden zwei unterschiedliche Dämmmaterialien angewendet.

Zur Bestimmung des Strömungswiderstands des zu untersuchenden Materials wurde die EN 29053 [DIN93] verwendet.

Mit Hilfe dieser Formeln für den Strömungszustand und der Formel von DIN ISO 4638 [DIN93b] musste ein formaler Zusammenhang für die Berechnung der Permeabilität im Randbereich gefunden werden.

Mit Kenntnis der Werte für die Permeabilität im Randstreifen konnten, diese Werte dann in HAM4D_VIE berücksichtigt werden. Für die Simulation in HAM4D_VIE wurden Flachdächer mit und ohne Begrünung verwendet. Diese Varianten unterschieden sich außerdem hinsichtlich der verwendeten Dampfbremse.

Untersucht wurde auch noch, ob sich die maßgebende Zelle für die relative Luftfeuchtigkeit bestimmen lässt, oder ob sich diese in einem bestimmten Bereich aufhält. Die Antwort auf diese Frage zeigt auf, wo ein Feuchtigkeitsmessgerät eingebaut werden soll.

Diese Diplomarbeit gliederte sich in einen praktischen und in einen theoretischen Teil.

Abstract

Durability of wood made flat roofs - Experimental determination of permeability resistance in boundary layers of fibrous insulation materials and hydrothermal simulation critical conditions.

Goal of this work is the determination of the permeability resistance in insulation materials as in the boundary layer. Special care would be made at the layer between insulation and rafts.

The idea was the calculation of the permeability resistance in the core and the boundary due to a variation of the circumference/surface ratio of the material. So Polokal-Pipes with different diameters would be used. The inside mounted insulation materials would be fixed to prevent dislocations of the fluid flow in the boundary layers. For the experiments two different kinds of insulation material would be used.

The experiments were performed in accordance with the European standard (EN 29053). For the calculation of the permeability resistance a relation between the formalism in the European and the German standard had to be found.

Finally these experimental determined values would be used as input parameter for a hydrothermal simulation program which is called HAM4D_VIE. In the simulation we were also interested in the influence of roof structure with and without plants in combination of different permeability resistance layers.

We are also interested to define the point or region of the maximum relative humidity. These regions will be of particular interest for future experiments to know where the humidity sensors have to be placed.

The master these is arranged in two main parts. In the first part the Experiment and in the second part the hydrothermal simulation would be descript.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	5
	2.1 Einwirkungen auf Flachdächer	5
	2.2 Sparrendämmung	7
	2.2.1 Luftdichte/winddichte Schichte	7
	2.2.2 Winddicht	7
	2.2.3 Luftdicht	8
	2.2.4 Funktionsprinzip der Dämmung.....	8
	2.2.5 Montage der Wärmedämmung im Gefach	9
	2.2.6 Einbaufehler.....	9
	2.3 Schäden	13
	2.3.1 Tauwasser durch Wasserdampfdiffusion	13
	2.3.2 Tauwasser durch Wasserdampfkonvektion	13
	2.3.3 Konvektive Wärmebrücke.....	14
	2.3.4 Schall	15
	2.3.5 Einbau - Regeln	15
	2.4 Formale Grundlagen.....	16
	2.4.1 Strömungswiderstand nach EN 29053.....	16
	2.4.2 Luftstrom-Durchlässigkeit nach DIN ISO 4638	19
	2.4.3 Strömungswiderstandsmessung nach EN 29053	20
	2.4.4 Typischer Aufbau der Versuchsanlage nach EN 29053	21
	2.5 Anforderung an Mineralwolle.....	22
	2.6 Messfehler	23
	2.6.1 Grobe Fehler.....	24
	2.6.2 Regelmäßige (systematische) Fehler.....	24
	2.6.3 Die unregelmäßigen Fehler	24
3	Versuchsaufbau	25
	3.1 Anlage.....	25
	3.2 Verwendete Messgeräte im endgültigen Versuch.....	27
	3.2.1 Luftgeschwindigkeits-Messwandler.....	27
	3.2.2 Differenzdruck-Messumformer	27
	3.2.3 Temperatur- und Feuchtemessung	28
	3.3 Erzeugung des Luftstroms.....	28
	3.4 Prüfgefäß	28
	3.5 Verwendete Materialien	30
	3.5.1 Perforierte Unterlage	30
	3.5.2 Proben	30
4	Versuchsdurchführung	31

4.1	Messeinrichtung.....	31
4.2	Messung der Dichtigkeit	31
4.3	Geschwindigkeit im Plexiglasrohr.....	32
4.4	Einbaulage der Dämmung.....	32
4.5	Probenvorbereitung.....	32
4.6	Messprotokoll.....	33
4.7	Messung Rollino 10, Prüfgefäß 3.....	34
4.8	Messungen, Rio 10.....	35
5	Messauswertung.....	36
5.1	Allgemein	36
5.2	Bestimmung Kernfläche und Randfläche.....	37
5.3	Ermittlung der Permeabilität	38
5.4	Ergebnisse Permeabilität Isover ROLLINO und RIO	44
6	Simulation.....	45
6.1	HAM4D_VIE.....	45
6.2	Glaser	46
6.3	Vergleich Glaser und HAM4D_VIE.....	47
6.4	Verwendete Flachdächer.....	49
6.5	Klima	50
6.5.1	Innenklima.....	50
6.5.2	Außenklima	50
6.6	Verwendete Materialien.....	51
6.6.1	Feuchteadaptive Dampfbremse	51
6.6.2	PE-Folie	51
6.6.3	EPDM (Ethylene-Propylene-Diene-Monomer) Dichtungsbahn.....	51
6.6.4	MiWo - Rand.....	52
6.6.5	ÖNORM EN ISO 13788.....	52
6.7	Analyse der Ergebnisse aus der Bauteilsimulation	53
6.7.1	Gesamtwassergehalt.....	54
6.7.2	Auswertung für Flachdach 1, 2, 3 und 4.....	55
6.7.3	Vergleich Luftströmung ein und aus.....	56
6.7.4	Wahl der Zellen.....	59
6.7.5	Auswertung für Flachdach 5, 6, 7 und 8.....	63
6.7.6	Vergleich der acht Varianten	65
7	Zusammenfassung	67
8	Abbildungsverzeichnis.....	68
9	Tabellenverzeichnis.....	70
10	Literaturverweis	71

1 Einleitung

Im Wohnungs- und Industriebau gehören flach geneigte Dachkonstruktionen zu den architektonischen Trendbauweisen. Diese können im hohen Ausmaß vorgefertigt werden, und ermöglichen außerdem eine große Spannweite. Diese Bauweise war bei Flachdachkonstruktionen aus Holz schon immer beliebt; Holzflachdächer werden gerne im Wohnungsbau eingesetzt, besonders bei Aufstockungen und bei Umbauten im städtischen Raum finden sie große Einsatzmöglichkeiten. Diese Bauweise bietet aber auch für den Industrie- und den Gewerbebau ein großes Ausbaupotenzial, auch wenn diese Bautechnik hier bis jetzt nur geringfügig zum Einsatz kam. [SPE08]

Feuchteadaptive Dampfbremsen (FADAB) weisen bei einer geringen mittleren relativen Luftfeuchtigkeit einen höheren s_d -Wert auf, bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit und feuchten Randbedingungen besitzt die FADAB einen geringen s_d -Wert. Diese Umkehrdiffusion wird durch die Dampfsperren „unterbunden“, dadurch kann der winterliche Feuchteintrag durch unvermeidliche Restleckagen durch die sommerliche Umkehrdiffusion nicht ausdiffundieren. Im Winter wird das Klima bei normalen Nutzungsbedingungen (nicht z.B. in Bädern) trockener sein, dadurch wird die Wasserdampfdiffusion in das Gefach verringert. Im Sommer findet man an der Dampfbremse im Gefach bei hoher Raumlufffeuchte und durch die Feuchteumverteilung eine eher hohe relative Luftfeuchte; da ist der s_d -Wert der Dampfbremse dann deutlich geringer, und dadurch wird das Rücktrocknen der bestehenden Feuchtigkeit aus dem Gefach möglich gemacht. [TEI10]

Definition des Bauschadenfreiheitspotenzials [PRO12a]:

Die Menge der Feuchtigkeit, die unvorhergesehen durch Flankendiffusion, Undichtheit und feuchte Baustoffe in eine Konstruktion eindringen kann, ohne dass ein Bauschaden entsteht oder Schimmel auftritt, gibt das Bauschadenspotenzial an.

Die Rückdiffusion im Sommer und die dadurch entstehende Austrocknung ist ein wesentlicher Faktor für die Bauschaden- und Schimmelfreiheit im Sommer. Die Temperatur an der Außenseite der Wärmedämmung ist für die Höhe der Austrocknung verantwortlich. Die Dach- sowie die Wandoberfläche außen haben durch die direkte Sonneneinstrahlung eine höhere Temperatur als die umgebende Luft. Hierfür ist entscheidend, wie viel Zeit vergeht, bis die Wärme von außen an der Wärmedämmung ankommt.

Dämmschichtstärke [PRO12a]:

Durch den Energieausweis, der in der letzten Zeit größere Anforderungen stellt, erhöht sich die Stärke der eingebauten Dämmschichten. Immer häufiger werden Dämmstärken von 30 cm und mehr auch bei konventionellen Gebäuden verwendet; bei diesen Bauten wurden in der Vergangenheit äußerst selten solche Dämmstärken verwendet. Die hoch wärmegeprägten Baukonstruktionen weisen ein verringertes Bauschadenfreiheitspotenzial auf. Die steigende Dämmstärke ergibt eine langsamere Durchwärmung des Baukörpers; dadurch wird auch der Verdunstungsvorgang von Feuchtigkeit, die unvorhergesehen eintritt, verzögert. Die Bedingungen, die das Außenklima schafft, bleiben jedoch gleich, dadurch sinken - bezogen auf ein Jahr - die Rücktrockenmengen.

2 Grundlagen

2.1 Einwirkungen auf Flachdächer

Auf das Dach wirken vielschichtige Belastungen ein, das ist bei keinem anderen Bauteil in dem Maße der Fall. Das sind z.B.: 1.) die mechanischen Belastungen, die durch die Witterung, aber auch durch die Wartung auf die äußere Dachhaut einwirken, und 2.) die hygrischen und thermischen Belastungen, die vom Rauminneren, aber auch von außen auf die Konstruktion einströmen. Die Randbedingungen, die am Dachelement vorherrschen, bestimmen somit die Wahl der zu verwendenden Materialien als auch die Bauart der gesamten Konstruktion. Daraus folgt, dass vor der Konstruktionsplanung die gesamten Belastungen, nicht nur die statischen, aufgenommen werden müssen. [TEI10]

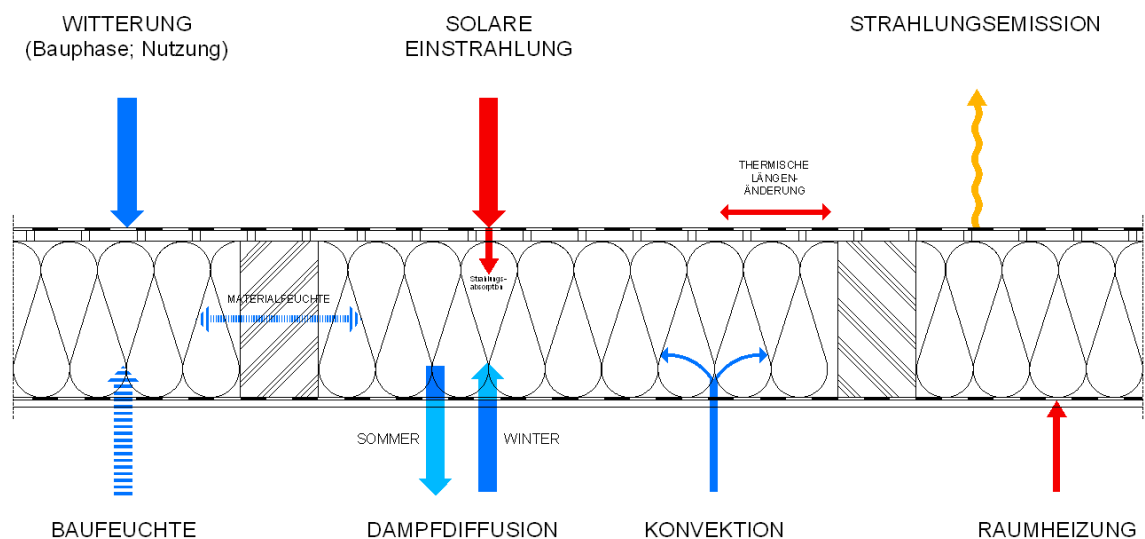


Abb. 1: Einwirkung auf Flachdachkonstruktionen; [TEI10] und [SPE08]

Durch Feuchtigkeit kann in einem Flachdach ein möglicher Bauschaden entstehen. Feuchteschäden entstehen dadurch, dass die Feuchtigkeitsmenge, die in die Flachdachkonstruktion eindringt, größer ist als die möglichen Austrocknungen. Die warme Raumluft kann mehr Feuchtigkeit speichern als die kalte Außenluft. Die Außenluft ist zu einem großen Teil von der Innenluft durch eine Wärmedämmung getrennt. Vereinfacht betrachtet richtet sich die Richtung des Diffusionsstroms vom hohen zum niedrigen Partialdruck, d.h. im Sommer von außen nach innen und im Winter umgekehrt. Daraus folgt, dass im Winter eine erhöhte Feuchtigkeit auf der Außenseite und im Sommer eine erhöhte Feuchtigkeit auf der Innenseite vorzufinden ist.

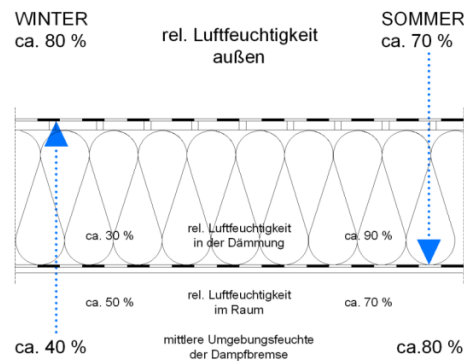


Abb. 2: Funktionsprinzip feuchtevariabler Bahnen; adaptiert [PRO12a]

Eine diffusionsoffene Schicht ist nach DIN 4108-3 [DIN12] ein Bauteile mit einem s_d -Wert von kleiner als 0,5 m. Diffusionshemmend wirkt die Schicht, wenn der s_d -Wert zwischen 0,5 m und 1500 m liegt und eine diffusionsdichte Wirkung entsteht, wenn der s_d -Wert größer oder gleich 1500 m ist.

Es werden drei Massentransporte unterschieden.

- Diffusion
- Konvektion
- Flüssigwassertransport

Welche Ursachen können Feuchtebelastungen in einer Dachkonstruktion haben?

- Undichte Dachhaut (rascher Feuchteschaden)
- Leckagen (schleichender Feuchteschaden)
- Diffusion
- Flankendiffusion
- Einbaufeuchte

Aufbauten, welche innen aus einer Dampfbremse $s_d > 100$ m und außen mit einer „relativ“ dampfdichten Abdichtung versehen sind, sind nicht mehr Stand der Technik. Dadurch wird die sommerliche Umkehrdiffusion verhindert. [PRO12a] Dies ist eigentlich ein Widerspruch, da gilt: Je weniger Dampf in die Konstruktion eindringen kann, desto weniger Bauschäden können auftreten. Jedoch ist die Herstellung einer völlig dichten Konstruktion nicht möglich. Dies betrifft Flachdachaufbauten. Eine Möglichkeit stellt die Verwendung einer funktionsfähigen Hinterlüftung dar bzw. verfügt das Bauteil über Rücktrocknungspotenzial. Rücktrocknungspotenzial wird durch Diffusionsoffenheit erreicht. Trocknungsmöglichkeit nach innen geschieht dadurch, dass die Temperatur außenseitig höher ist als innen. Der Diffusionsstrom dreht sich um und nimmt vorhandene Feuchtigkeit in der Konstruktion nach innen mit. Dies setzt eine diffusionsoffene Dampfbremse voraus. Diese Dampfbremse lässt aber im Winter einen Bauschaden entstehen, da zu viel Feuchtigkeit in die Konstruktion hineindiffundiert. Daher verwendet man Dampfbremsen mit einem feuchtevariablen s_d -Wert. Das bedeutet, dass die Dampfbremse im Winter einen hohen Diffusionswiderstand und im Sommer einen

niedrigen Diffusionswiderstand aufweist. Im Winter ist die Dampfbremse diffusionsdichter, dadurch wird die Konstruktion vor Feuchtigkeit geschützt. Als Beispiel können die Produkte der Firma ProClima angeführt werden. Die Hochleistungs-Dampfbremse Intello besteht aus einem feuchtevariablen Diffusionswiderstand von 0,25 m bis über 10 m, die DB+ von 0,6 m bis 4 m. Dies bedeutet, dass im Winter ein s_d -Wert bei Intello von über 10 m erreicht wird, dadurch kann fast kein Wasserdampf in das Bauteil gelangen. Ein geringer s_d -Wert von 0,25 m im Sommer bewirkt, dass eine mögliche vorhandene Feuchtigkeit in der Konstruktion rasch nach innen austrocknen kann. Der niedrige s_d -Wert von 0,6 m bei DB+ und besonders der Wert von Intello mit 0,25 m ermöglicht, im Sommer ein schnelles Austrocknen des in der Dachkonstruktion möglicherweise vorhandenen Kondensats.

2.2 Sparrendämmung

Je nachdem, wo sich die Wärmedämmung befindet, unterscheidet man Zwischensparrendämmung und Aufsparrendämmung.

Bei der Zwischensparrendämmung wird zwischen Vollsparrendämmung und Teilsparrendämmung unterschieden. Hierbei befindet sich die Dämmung zwischen den Sparren bzw. beim Flachdach zwischen den Holzträgern. Wird die gesamte Sparrenhöhe ausgedämmt, so bezeichnet man dies als Vollsparrendämmung. Wird ein Teil ausgefüllt, nennt man dies Teilsparrendämmung. Bei diesen beiden Varianten muss noch die Unterseite der Dämmung verkleidet werden. Bei der Aufsparrendämmung wird die Außenseite der Sparren mit Holzbrettern verkleidet, und darauf kommt die Isolierung. Die Träger bzw. Sparren bleiben dabei vom Innenraum aus sichtbar.

2.2.1 Luftdichte/winddichte Schichte

Die Funktion der Wärmedämmung hängt von der Wirkung der Winddichtheit und der Luftdichtheit ab. Die DIN 4108 Teil 7 [DIN11] beschreibt die Anforderung an die Luftdichtheit.

2.2.2 Winddicht

Die Winddichtung befindet sich auf der kalten Außenseite der Wärmedämmung. Sie verhindert ein Durchströmen der Wärmedämmung von kalter Luft im Winter. Durch die kalte Luft würde es zu Wärmeverlusten kommen. Im Sommer verhindert sie eine Durchströmung der Dämmung mit warmer Luft. Eine weitere Aufgabe der Winddichtung ist, das Dämmmaterial von Flugschnee, Treibregen oder Kondensat, welches sich auf der

Unterseite von Ziegeln bilden kann, zu schützen. Das setzt voraus, dass sie für Wasser undurchlässig ist, aber nicht für den Wasserdampf.

2.2.3 Luftdicht

Auf der anderen Seite der Wärmedämmung befindet sich die Luftdichtung. Diese nennt man Dampfbremse. Auch sie verhindert, dass im Winter kalte Außenluft in den Raum strömt. Weiters verhindert sie, dass Wasserdampf aus dem Rauminnen in die Konstruktion gelangen kann.

2.2.4 Funktionsprinzip der Dämmung

Im Dämmmaterial befindet sich eingeschlossene Luft. Diese eingeschlossene Luft muss vor Luftbewegung, die sich infolge von Luftdurchströmungen bildet, geschützt werden. Dies geschieht durch eine Luft- und Winddichtung.

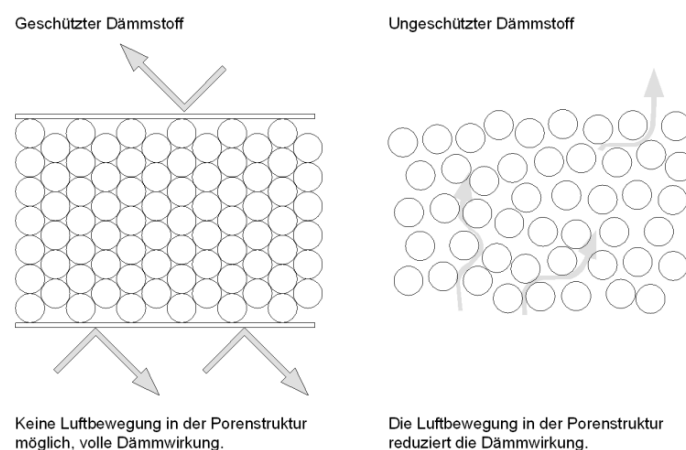


Abb. 3: links: keine Luftbewegung in der Porenstruktur möglich, volle Dämmwirkung; rechts: Die Luftbewegung in der Porenstruktur reduziert die Dämmwirkung; adaptiert [NAT12]

Luftdurchströmungen in Dämmmaterialien sind zu vermeiden, da die Dämmwirkung der Dämmung auf dem Prinzip der eingeschlossenen ruhenden Luft beruht. Dieses Funktionsprinzip ist in Abb. 3 dargestellt.

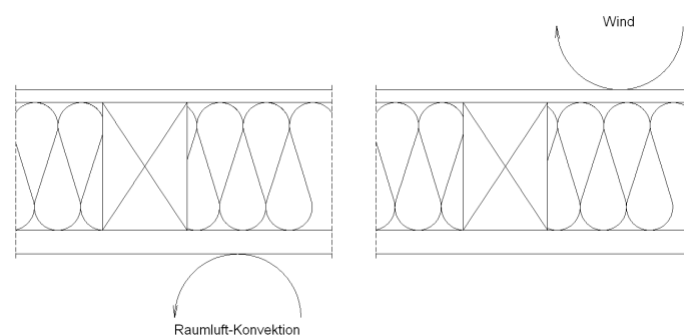


Abb. 4: links: luftdichte Schicht; rechts: winddichte Schicht [SCH96]

Wenn Wasserdampf in die Konstruktion eintreten kann, dann lagert sich die Feuchtigkeit in den Luftzwischenräumen ab, dadurch wird die Luft verdrängt. Die Dämmwirkung wird durch das vorhandene Wasser herabgesetzt, da Wasser ein besserer Wärmeleiter als Luft ist. In der folgenden Abb. 5 ist einmal die trockene Dämmung mit Luft gefüllten Poren dargestellt, in der anderen Abbildung sind die Poren mit Wasser gefüllt.

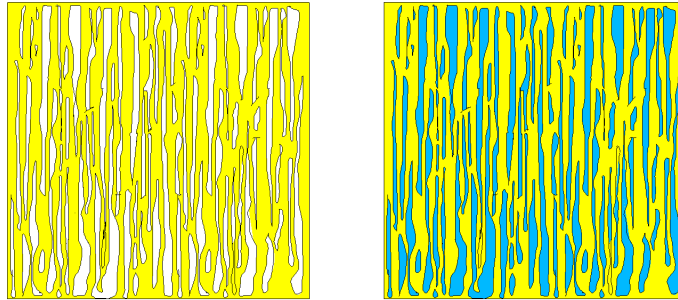


Abb. 5: links: trockener Dämmstoff; rechts feuchter Dämmstoff [DÄM12]

2.2.5 Montage der Wärmedämmung im Gefach

Es ist vorteilhaft, wenn die Breite des Gefachs um 1 cm geringer als die Breite der gekauften Wärmedämmung ist. Auch der Stoß von Wärmedämmung zu Wärmedämmung muss fugenlos sein. Der fugenlose Einbau verhindert Konvektion. Daraus ergibt sich ein Übermaß, welches einen satten Anschluss an die Holzträger ermöglicht. Jedoch kann es aus statischen Gründen vorkommen, dass der Abstand zwischen den Sparren nicht der Breite der Dämmung entspricht, in diesem Fall muss die Dämmung zugeschnitten werden. Der Zuschnitt für Mineralwolle erfolgt mit einem Messer, welches von den jeweiligen Dämmmaterialherstellern bezogen werden kann. Für die Wärmedämmplatten kann ein Schneidegerät verwendet werden.

2.2.6 Einbaufehler

2.2.6.1 Zu großer, zu kleiner Abstand

Wird die Wärmedämmung zu groß ausgeschnitten und eingebaut, so wird diese komprimiert. Diese Komprimierung vergrößert die Wärmeleitfähigkeit, das stellt eine Verschlechterung der Wärmedämmung dar. Ist der Abstand zwischen den Holzträgern zu groß, entsteht zwischen den beiden Materialien eine Luftbewegung.

In der Abb. 6 links sieht man eine zu klein zugeschnittene Dämmung in der Breite bzw. ist hier der Ständerabstand zu groß. Die Abb. 6 wie auch das Diagramm der Abb. 7 beziehen sich auf eine Wand.

In der Abb. 6 rechts ist die Dämmung zu groß bzw. der Ständerabstand zu klein. Hier kommt es zu einer Stauchung des Dämmmaterials. Die Kompression der WD verdrängt

die eingeschlossene Luft. Da die eingeschlossene Luft für die Wärmedämmung verantwortlich ist, wegen ihrer schlechten Wärmeleitung ($\lambda = 0,01 - 0,2 \text{ W/mK}$) [RAU12], erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit der komprimierten Dämmung.

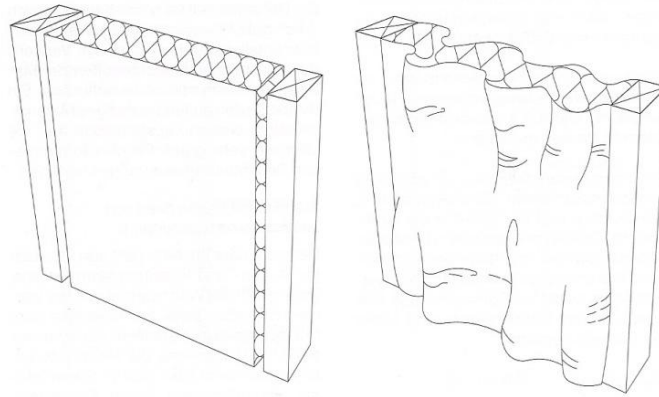


Abb. 6: links: zu klein ausgeschnitten; rechts: zu groß ausgeschnitten [BEC04]

In Abb. 7 ist erkennbar, wie sich der Wärmedurchlasswiderstand, bezogen auf die Dämmstärke und auf den Luftspalt verändert. Je stärker die Dämmung ist, desto negativer wirkt sich ein Luftspalt aus.

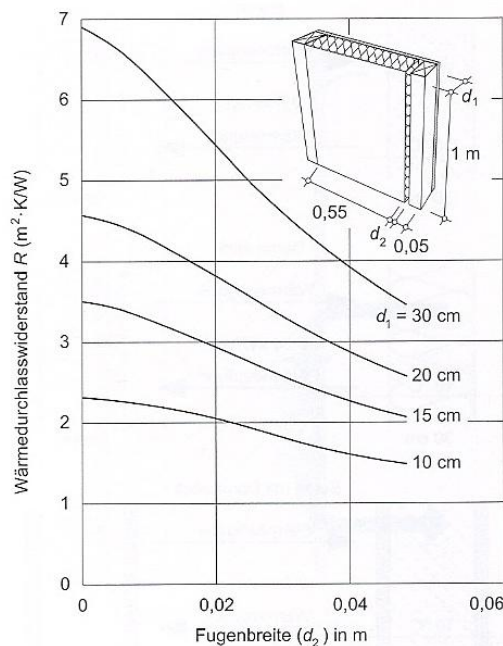


Abb. 7: Auswirkung des Luftspaltes auf die Dämmwirkung [BEC04]

Der zuvor beschriebene Fehler kann auch auf ein Flachdach adaptiert werden. Dabei ergeben sich Einbaufehler, die sich ebenfalls im Gefach schädlich auf die Wärmedämmung auswirken, und zwar in Form von offenen Fugen. Diese Fugen können zum Beispiel zwischen zwei benachbarten Dämmungen entstehen, oder es kann sich eine Fuge zwischen Anschlussbereich von Dämmung und Sparren befinden. Daher muss

die Dämmung um einige Zentimeter größer ausgeschnitten werden, als der tatsächliche Sparrenabstand ist. Dadurch wird die Dämmung leicht gestaucht.

Fehler, die bei der Verlegung der Dämmung auftreten können.

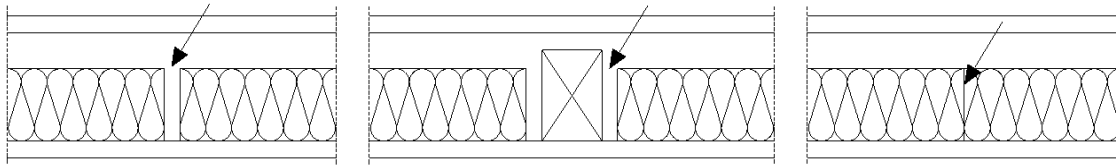


Abb. 8: links: offene Fuge in der Dämmschicht; Mitte: offene Fuge Anschluss Balken; rechts: zu dichtes Anpressen; adaptiert [SCH96]

Solche Einbaufehler wie in Abb. 8 können dadurch entstehen, dass zu kurze Reststücke eingebaut werden.

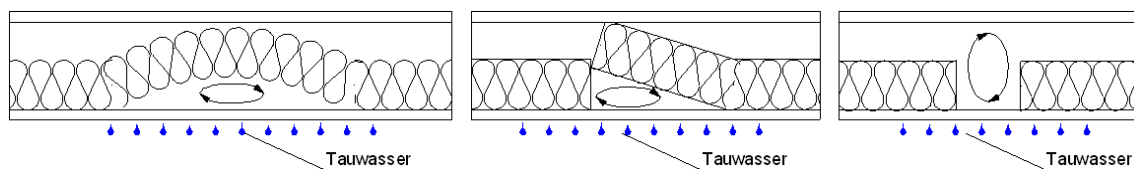


Abb. 9: In allen drei Fällen kann sich eine Konvektionsströmung bilden. [RAU12]

In den in Abb. 9 abgebildeten Fällen kann sich eine Konvektionsströmung bilden, in diesem Bereich kann sich Tauwasser bilden und zu Schimmelbildung führen.

Die meisten Schimmelpilzarten können schon ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % gedeihen. Schimmel stellt ein Gesundheitsrisiko dar. Ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % wird auch die Konstruktion kaputt. Daher müssen solche Konvektionsströme verhindert werden. Die Stauchung der Dämmung hängt von dem verwendeten Dämmmaterial ab. Ein Stauchen der Dämmung kann bei mineralischen Faserdämmstoffen vorkommen. Dagegen ist eine Stauchung ohne Gewalteinwirkung bei Hartschaumplatten nicht möglich. Bei diesen Hartschaumplatten verwendet man eine Profilierung der Platten.

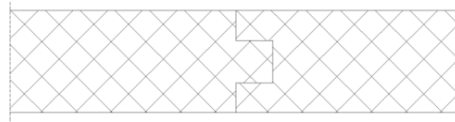


Abb. 10: Hartschaumplatten, Verwendung von randprofilierten Platten[SCH96]

Daher sind Hartschaumplatten für eine Dämmung in einem Holzgefach wenig geeignet. Der Abstand zwischen den Sparren kann sich ändern. Unter Feuchteeinwirkung, durch Wind oder durch Last verändert das Holz seine Form. Die Hartschaumplatte bleibt jedoch in der Form, wie sie eingebaut wurde. Wenn der Abstand zwischen den Holzsparren größer wird, entsteht ein Spalt zwischen Hartschaumplatte und Dämmung.

Wird eine zu kurze Dämmung eingebaut und befindet sich beidseitig der Dämmung eine Luftebene, welche sich daraus ergibt, dass die Dämmung hinterlüftet wird bzw. ist der Sparren höher als die eingebaute Dämmung und befindet sich auf der Unterseite eine Installationsebene, die nicht gedämmt ist, kommt es zu einer Wärmekonvektion im Gefach. Die warme Luft in der Installationsebene steigt auf, bewegt sich zwischen Dämmung und Sparren und kühlt an der Oberseite ab. Diese Konstruktion, bei der zwei Luftschichten gegenüberliegen, ist stärker gefährdet als eine Konstruktion, bei der auch die Installationsebene gedämmt wird.

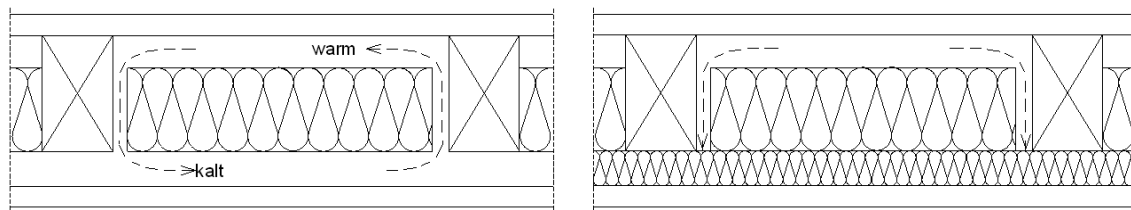


Abb. 11: links: Konvektion gegeben; rechts: Konvektion verhindert; adaptiert [SCH96]

2.2.6.2 Einbauhöhe

Die meisten Dämmungen haben eine Produkthöhe von 10 cm, die Trägerhöhe kann jedoch ein Vielfaches dieser Höhe betragen. Die Dämmung kann in einem Gefach nicht kreuzweise verlegt werden. Es werden mehrere Dämmstärken mit zum Beispiel einer Einbauhöhe von 10 cm übereinander gelegt. Jeder Stoß der Dämmung muss mit der Dämmung lückenlos verbunden sein sowie auch der Stoß zu den umgebenden Bauteilen lückenlos zu sein hat.

2.3 Schäden

2.3.1 Tauwasser durch Wasserdampfdiffusion

Besteht die Konstruktion aus einer luftdichten Schichte innen und einer winddichten Schichte außen, so kann bei einem Dampfdruckgefälle warme Luft in die Konstruktion wandern. Der Wasserdampf wandert in einem Bauteil in Richtung des geringeren Dampfdruckes. Vorhandener Wasserdampf kann im Winter als Tauwasser ausfallen, dieses Tauwasser lässt sich nach DIN 4108 Teil 3 [DIN12] berechnen. [ALT12]

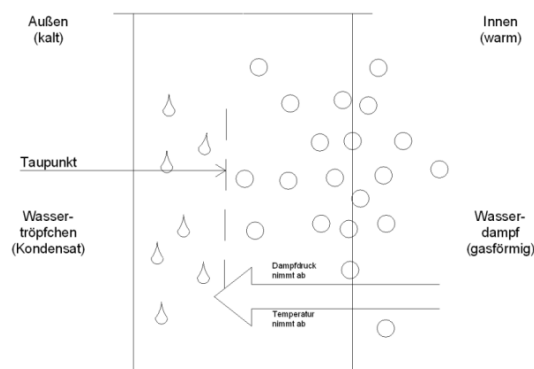


Abb. 12: unterschiedliche Druckverhältnisse → Wasserdampfdiffusion → Abhilfe Dampfbremse; adaptiert [ALT12]

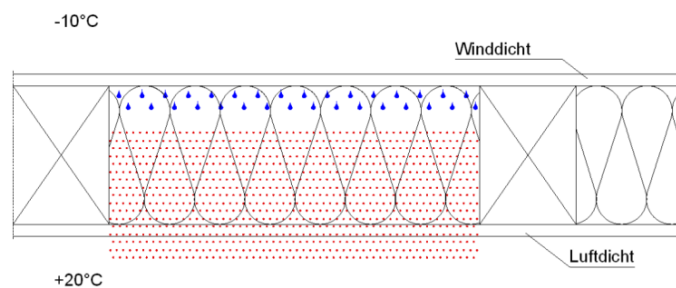


Abb. 13: Tauwasser durch Wasserdampfdiffusion; adaptiert [DÄM12]

2.3.2 Tauwasser durch Wasserdampfkonvektion

Durch den Luftdruckunterschied zwischen innen und außen entsteht Wasserdampfkonvektion. Dieser Transport kann durch Aufbringung einer luftdichten Schicht auf der Innenseite verhindert werden. Befinden sich Leckagen in der luftdichten Schichte, kann feuchte Raumluft in die Dämmung gelangen. Wird der Taupunkt in der Konstruktion unterschritten, so kommt es zu einem Tauwasserausfall und dabei sammelt sich Wasser in der Dämmung an. Die Dämmeigenschaften werden bei einer feuchten Dämmung herabgesetzt. Schimmel kann sich auch am Holz bilden, wodurch die statische Eigenschaften des Trägers bzw. des Sparrens gefährdet sind. Bei dieser Wasserdampfkonvektion ist es möglich, dass in kürzester Zeit eine große Menge an

Wasserdampf in die Konstruktion gelangt, was bei der Wasserdampfdiffusion nicht möglich ist.

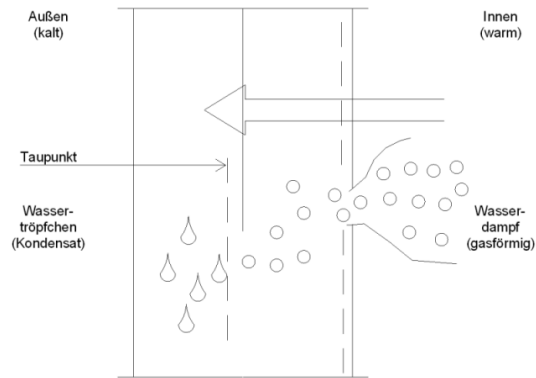


Abb. 14: Leckage in der Luftdichtung → Wasserdampfkongvektion; adaptiert [ALT12]

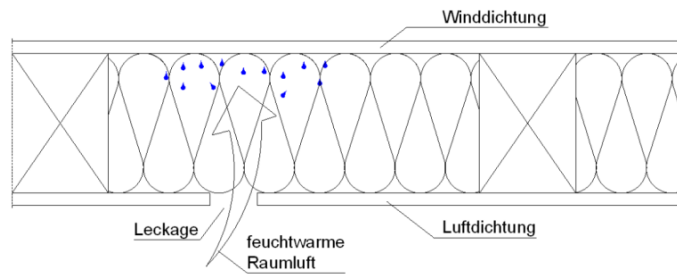


Abb. 15: Tauwasser durch Wasserdampfkongvektion; adaptiert [DÄM12]

2.3.3 Konvektive Wärmebrücke

Diese Wärmebrücke resultiert aus der Ursache, dass zwischen der Wärmedämmung und den umgebenden Bauteilen Platz vorhanden ist. In diesen Lücken kann sich eine Luftströmung infolge von thermischen Unterschieden einstellen. Im Winter kann es aufgrund der kalten Unterseite der Wärmedämmung zu einer Tauwasserbildung kommen.

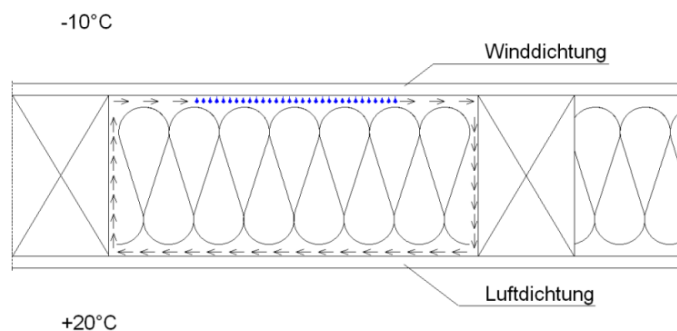


Abb. 16: Konvektive Wärmebrücke; adaptiert [DÄM12]

2.3.4 Schall

Bei undichten Stellen im Stoßbereich zwischen Wärmedämmungen und im Randbereich der umgebenden Bauteile kann sich der Luftschall ungehindert ausbreiten.

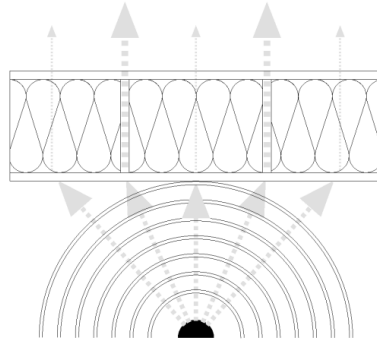


Abb. 17: Schallausbreitung; adaptiert [DÄM12]

2.3.5 Einbau - Regeln

Folgende Punkte sollten bei der Planung und bei der Ausführung beachtet werden:
[POL12]

- Dämmmaterial ist vor und nach dem Einbau vor Feuchte zu schützen.
- Die maximale Einbaufeuchte ist laut Hersteller zu beachten.
- Die Dämmung muss fugenlos verlegt werden.
- Bei mehrlagigen Wärmedämmungen sind die Stöße versetzt anzuordnen.
- Fehlstellen sind zu vermeiden, vorhandene sollen mit demselben Dämmmaterial verschlossen werden.
- Die Stöße und Anschlüsse müssen so gebildet werden, dass keine Außenluft in die warme Seite der Wärmedämmung strömen kann.
- Bei steileren Dächern ist die Wärmedämmung gegen Absacken zu sichern.
- Die vorhandene Wärmedämmung muss durchgehend dieselbe Stärke aufweisen.
- Teile, die die Wärmedämmung durchdringen, stellen eine Wärmebrücke dar und müssen daher wärmetechnisch entkoppelt werden.

2.4 Formale Grundlagen

2.4.1 Strömungswiderstand nach EN 29053

Die Europäische Norm 29053 [DIN93] trägt den Namen „Materialien für akustische Anwendung“. Mit dieser Norm kann der Strömungswiderstand in Wärmedämmungen gemessen und berechnet werden. Die EN beschreibt den Versuchsaufbau und die dazugehörigen Berechnungen. Der Hauptanwendungsbereich dieser Norm befindet sich in der Akustik. Um Kenngrößen für die Akustik von Materialien zu bekommen, benötigt man den Strömungswiderstand.

2.4.1.1.1 Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand R errechnet sich aus dem Verhältnis zwischen Druckdifferenz und der Geschwindigkeit der durchströmenden Luft.

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \quad (1)$$

R	Strömungswiderstand in Pa s/m ³
Δp	Druckdifferenz vor und nach der Probe in Pa
q_v	Volumenstrom durch die Probe in m ³ /s

2.4.1.2 Spezifischer Strömungswiderstand

Hier wird der Strömungswiderstand mit der Querschnittsfläche multipliziert.

$$R_s = R \cdot A \quad (2)$$

R_s	spezifischer Strömungswiderstand in Pa s/m
R	Strömungswiderstand in Pa s/m ³
A	Querschnittsfläche der Probenkörpers senkrecht zur Durchströmungsrichtung in m ²

2.4.1.3 Längenbezogener Strömungswiderstand

$$r = \frac{R_s}{d} \quad (3)$$

r	längenbezogener Strömungswiderstand in Pa*s/m ²
R_s	spezifischer Strömungswiderstand in Pa s/m
d	die Dicke des Probenkörpers in Durchströmungsrichtung in m

2.4.1.4 Lineare Strömungsgeschwindigkeit

$$u = \frac{q_v}{A} \quad (4)$$

u	lineare Strömungsgeschwindigkeit in m/s
q _v	der durch den Probenkörper hindurchströmende Volumenstrom in m ³ /s
A	die Querschnittsfläche des Probekörpers in m ²

2.4.1.5 Anwendungsbereich

Diese EN 29053 [DIN93] gilt nur für Probekörper, die aus porösen Materialien ausgeschnitten werden können.

2.4.1.6 Verfahren

In der EN 29053 [DIN93] werden zwei Verfahren beschrieben. Verfahren A ist das Luftgleichstromverfahren, das Verfahren B nennt man Luftwechselstromverfahren.

2.4.1.6.1 Luftgleichstromverfahren (Verfahren A)

Bei diesem Verfahren befindet sich der Probekörper in einem Messbehälter mit einem rechteckigem Querschnitt, oder in einem Messzylinder. Diesen Probekörper durchströmt eine kontrolliert gerichtete Luftströmung. Zwischen den beiden Seiten misst man dann den Druckverlust, der im Probekörper entsteht.

2.4.1.6.2 Luftwechselstromverfahren (Verfahren B)

Hierbei wird der Probekörper, der in einem Messbehälter (Messzylinder) mit rechteckigen Querschnitt oder in einem Messzylinder eingebaut ist, von einer langsamen Luftströmung durchströmt. Dabei wird der Druckwechsel gemessen.

2.4.1.7 Prüfeinrichtung

2.4.1.7.1 Prüfeinrichtung für Verfahren A

Laut EN 29053 [DIN93] muss die Prüfeinrichtung aus folgenden Teilen bestehen:

- „Einem Messgefäß zur Aufnahme des Probekörpers
- einer Einrichtung zur Erzeugung eines Luftgleichstroms
- einer Einrichtung zur Messung des Volumenstroms
- einer Einrichtung zur Messung der Druckdifferenz über dem Probenkörper
- einer Einrichtung zur Messung der Dicke des Probekörpers in Prüfposition“

2.4.1.7.2 Prüfgefäß

Folgende Querschnittsformen sind für das Prüfgefäß verwendbar: ein kreisförmiger oder ein rechteckförmiger Querschnitt. Der Mindestdurchmesser für den kreisförmigen Querschnitt soll über 95 mm betragen. Für den rechteckförmigen Querschnitt werden quadratische Abmessungen bevorzugt verwendet, wobei die Seitenabmessungen mindestens 90 mm betragen sollen. Die Höhe des Prüfgefäßes richtet sich nach der Probenhöhe. Eine laminare Luftströmung muss vor und nach dem Verlassen des Probekörpers stattfinden. Jedenfalls hat die Höhe des Prüfgefäßes um mindestens 100 mm größer als die Probe zu sein. Der Probekörper liegt auf einer perforierten Unterlage auf. Diese Unterlage muss einen Lochanteil von mindestens 50 % aufweisen, und dieser Lochanteil soll gleichmäßig verteilt sein, dabei beträgt der Durchmesser der Perforierung mindestens 3 mm. Unterhalb der perforierten Unterlage wird die Druckmesseinrichtung angebracht.

2.4.1.7.3 Einrichtung zur Erzeugung des Luftstroms

Den Luftstrom kann man entweder mittels Druckerzeugung oder mittels Unterdruck entstehen lassen. Zur Druckerzeugung verwendet man den Luftkompressor. Die Unterdruckerzeugung kann mittels eines wassergefüllten Behälters entstehen oder sie wird mit einer Vakuumpumpe erzeugt. Bei der Druckerzeugung darf keine kontaminierte Luft verwendet werden. In beiden Fällen muss eine Feinsteuerung der Luftströmung vorhanden sein, die eine stabile Luftströmung im unteren Teil des Prüfgefäßes ermöglicht.

Die gemessenen Strömungswiderstände sollen unabhängig von der Geschwindigkeit sein, das entsteht dadurch, dass die Strömungsquellen Durchflussraten mit niedriger Geschwindigkeit erlauben.

Die Strömungsquellen sollten hierfür eine Strömungsgeschwindigkeit bis zu $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s erzeugen können.

2.4.1.7.4 Einrichtung zur Messung des Volumenstroms

Die Messung des Volumenstroms muss innerhalb des Probengefäßes möglichst nahe dem Probekörper stattfinden.

Die Luftstrommesseinrichtung sollte eine Unsicherheit von ± 5 % des angezeigten Wertes ermöglichen.

2.4.1.7.5 Einrichtung zur Messung der Druckdifferenz

Mit dem Gerät, das die Druckdifferenz misst, muss man kleine Drücke bis 0,1 Pa messen können. Die verwendete Messanordnung soll den Differenzdruck mit einer Unsicherheit von ± 5 % messen können.

2.4.1.8 Probenkörper

2.4.1.8.1 Form

Je nach verwendetem Prüfgefäß ergibt sich die Form des Probenkörpers, nämlich kreisförmig oder rechteckig.

2.4.1.8.2 Seitliche Maße

Werden weiche, kompressible Materialien (Faserdämpfstoffe, Weichschäumen) geprüft, so muss man mit großer Sorgfalt vorgehen, damit keine undichten Stellen entlang der Kanten entstehen können. Das geschieht, indem man die seitlichen Maße der Probekörper etwas (geringfügig) größer als das Prüfgefäß sein lässt. Der Probekörper, der aus festem Material besteht, muss hingegen die gleichen Maße wie das Prüfgefäß aufweisen. Achtzugeben ist, dass sich der Probekörper nicht verschiebt.

2.4.1.8.3 Dicke

Damit man messbare Druckverluste unter optimalen Bedingungen erhält und dabei die gegebene Tiefe des Prüfgefäßes genutzt wird, muss die Dicke des Probekörpers richtig gewählt werden.

Es kann vorkommen, dass der Probekörper nicht ausreichend dick ist und dadurch ein entsprechender Druckverlust entsteht, in diesem Fall kann man bis zu fünf gleichwertige Probekörper aufeinanderlegen, aber nicht mehr als fünf.

2.4.2 Luftstrom-Durchlässigkeit nach DIN ISO 4638

Für die Bestimmung der Permeabilität K wurde folgende Formel aus der DIN ISO 4638 [DIN93c] umgeformt.

$$u = \frac{q_v}{A} = \frac{K \cdot \Delta p}{\eta \cdot \delta} \quad (5)$$

$$K = \frac{u \cdot \eta \cdot \delta}{\Delta p} = \eta \cdot \frac{u}{\Delta p} \cdot \delta = \eta \cdot \frac{q_v}{A \cdot \Delta p} \cdot \delta \quad (6)$$

K	Permeabilität in m^2
η	dynamische Viskosität der Luft in $\text{Pa} \cdot \text{s}$
q_v	Volumenstrom durch die Probe in m^3/s
δ	die Dicke des Probenkörpers in Durchströmungsrichtung in m
A	Querschnittsfläche des Probenkörpers senkrecht zur Durchströmungsrichtung in m^2
Δp	Druckdifferenz vor und nach der Probe in Pa

Die dynamische Viskosität von Luft in Tab. 1 wurde [HAG01] entnommen. Die Tab. 1 zeigt die Werte aus diesem Buch. Um den Wert für die Raumtemperatur im Versuchsraum von 22,5 °C zu bekommen, wurde zwischen 20 und 30 Grad Celsius interpoliert, wodurch sich ein Wert von $18,125 \cdot 10^{-6}$ Pa s ergab.

Tab. 1: Dynamische Viskosität der Luft [HAG01]

Temperatur in °C	η in kg/ms [$1 \text{ kg/m s} = 1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ Pa s}$]
-10	$16,5 \cdot 10^{-6}$
0	$17,0 \cdot 10^{-6}$
10	$17,5 \cdot 10^{-6}$
20	$18,0 \cdot 10^{-6}$
30	$18,5 \cdot 10^{-6}$

2.4.3 Strömungswiderstandsmessung nach EN 29053

Folgende Abb. 19 zeigt wie die Messvorrichtung für die Bestimmung der Permeabilität anzuordnen ist. Dieser Versuchsaufbau wird für das Luftgleichstromverfahren (2.4.1.6.1) mit kreisförmigem Querschnitt verwendet.

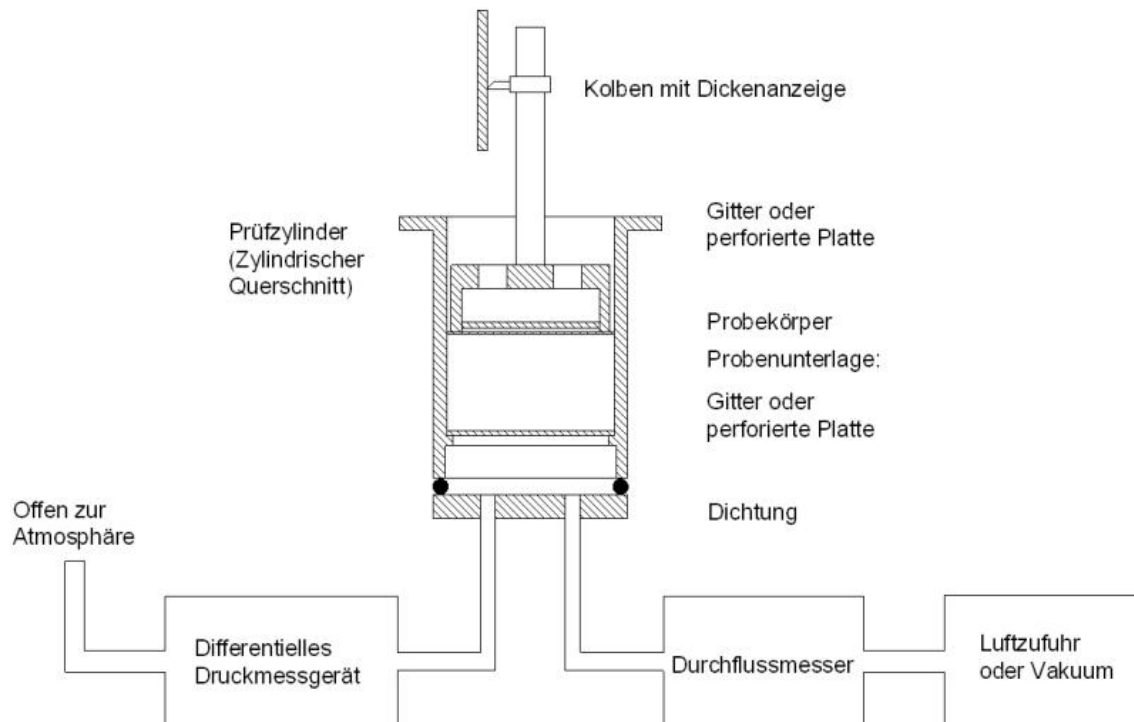


Abb. 18: Schematischer Versuchsaufbau, adaptiert [DIN93]

2.4.4 Typischer Aufbau der Versuchsanlage nach EN 29053

Die Abb. 19 links zeigt den Aufbau nach EN 29053 [DIN93]. Diese Prüfanlage wurde während einer Exkursion ins TGM besichtigt.



Abb. 19: links: Prüfgerät nach EN 29053 [DIN93]; rechts: Prüfgerät der Firmer ETG [ETG12]

Dieses Prüfgerät, Abb. 19: links: Prüfgerät nach EN 29053 [DIN93]; rechts: Prüfgerät der Firmer ETG [ETG12] rechts, wurde von der Firma ETG (Entwicklungs- und Technologie Gesellschaft) in Ilmenau gebaut. Diese Firma entwickelt Laborgeräte und Sonderanfertigungen nach Kundenwünschen. [ETG12]

2.5 Anforderung an Mineralwolle

Auf vielen Produktblättern steht, dass das Dämmmaterial einen längenbezogenen Strömungswiderstand von $\geq 5 \text{ kPa s/m}^2$ aufweist. Diese 5 kPa s/m^2 kommen aus der B 6000 [ONO03a] oder aus der DIN 4108-10 [DIN08].

Tab. 2: Mindestanforderungen an die Produktarten von MW; adaptiert [ONO03a]

Produktart gemäß Tabelle A.1	Produktart (Abkürzung)	ÖNORM	4.2.3 Dicke	4.3.3 Druckspannung oder Druckfestigkeit	4.3.4 Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	4.3.9 Dynamische Steifigkeit	4.3.10.3 Zusammendrückbarkeit	4.3.12 Strömungswiderstand
MW	MW	EN 13162	Ti	CS(10)i	Tri	Sdi	Cpi	AF i
-WL			T1	-	-	-	-	AF 5
-W			T3	-	-	-	-	AF 5
-WF			T3	CS(10) 0,5	TR 1	-	-	-
-WV			T3	CS(10) 5	TR 1	-	-	-
-WD			T3	CS(10) 30	TR 7,5	-	-	-
-T			T6	-	-	SD 50	CP 5	AF 5
-PT			T5	CS(10/Y) 30	TR 10	-	-	-

AF_r Symbol für die angegebene Stufe des Strömungswiderstandes

Tab. 3: Mindestanforderungen an Mineraldämmstoffe; adaptiert [DIN08]

Anwendungsgebiet	Kurzzzeichen	Bezeichnungsschlüssel											
		Grenzabmaße für die Dicke	Dimensionsstabilität bei definierter Temperatur	Dimensionsstabilität unter definierten Temperatur- und Feuchtebedingungen	Druckspannung oder Druckfestigkeit	Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene	Punktlast	Kurzzeitige Wasseraufnahme	Langzeitige Wasseraufnahme	Dynamische Steifigkeit ^f	Zusammen-drückbarkeit	Längenbezogener Strömungs-widerstand	
		Ti	DS(T+)	DS(TH)	CS(10/Y)i	TRi	PL(5)i	WS	WL(P)	SDi	CPi	AFri	
Dach, Decke	DAD	dk ^b	T2	-	-	-	-	-	-	-	-	AFr5	
		dg	T4	-	-	CS(10)20	-	-	-	-	-	-	
		dm	T4	-	-	CS(10)50	TR5	-	-	-	-	-	
	DAA	T4	DS(T+)	DS(TH)	CS(10/Y)60	TR7,5	PL(5)500	WS	-	-	-	-	
	DUK	keine genormte Anwendung											
	DZ ^b	T2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	AFr5
		Dl	T2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	AFr5
	DEO	T4	-	-	-	CS(10)40	TR7,5	-	WS	-	-	-	-
		dg	T4	-	-	CS(10)20	WS	-	-	-	-	-	-
		dm	T4	-	-	CS(10)40	WS	-	-	-	-	-	-
	DES	sh	T6	-	-	-	-	-	-	-	≤SD25	CP5	-
		sm	T6	-	-	-	-	-	-	-	≤SD40	CP3	-
		sg ^c	T7	-	-	-	-	-	-	-	≤SD50 ^d	CP2	-

AFri ist das Symbol für die angegebene Stufe des Strömungswiderstandes

i ist die relevante Klasse oder Niveau [DIN10]

In der EN 13162 mit dem Titel „Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW)“ wird in Abschnitt 4.3.12 auf den Strömungswiderstand eingegangen. [DIN10]

Der Strömungswiderstand (AFr) wird nach EN 29053 [DIN93] gemessen. Die Werte des Strömungswiderstandes sind in Stufen von 1 kPa s/m³ zu messen. Die Prüfungsergebnisse dürfen aber nie geringer als der angegebene Wert sein.

Für den Vergleich verschiedener Dämmmaterialien wird der längenbezogene Strömungswiderstand benötigt [kPa s/m²].

2.6 Messfehler

Messfehler finden ihre Ursachen entweder in der nicht zweckmäßigen Anordnung, im Messgerät oder auch beim Experimentator; aber auch in der Umgebung, in welcher der Versuch gemacht wird, können Fehler auftreten.

Wiederum können fehlerhafte Ergebnisse bei der Produktion und bei der Ausführung entstehen, da jedes Messgerät eine eigene Fertigungstoleranz und Genauigkeitsklasse aufweist.

Der Experimentator ist für folgende Fehler verantwortlich:

- falsches Ablesen (z.B.: des Rollbands, der Waage...);
- Zahlensturz;
- das Messgeräte wird nicht exakt oder falsch gehandhabt (Lineal ungenau aufgelegt etc.);
- das Ablesen geschieht an falschen Messpunkten bzw. Bezugspunkten.

Die Umgebung birgt folgende Fehlerquellen:

- Die Temperatur und ihre Schwankungen werden nicht beachtet;
- Druck- und Druckschwankungen werden nicht berücksichtigt;
- Schwankungen der Netzspannung (für die Drehzahl des Ventilators verantwortlich).

2.6.1 Grobe Fehler

Grobe Fehler entstehen durch Fehlleistungen des Ausführenden, sie liegen meist weit über der Messgenauigkeit. Diese Fehler sind daher auszuschalten. [Egg00]

2.6.2 Regelmäßige (systematische) Fehler

Diese werden nicht willkürlich verursacht, sondern hängen im Vorzeichen und in der Größe von einem angewandten Parameter (z.B. dem Mittelwert) ab. [Egg00]

- Diese Fehler entstehen bei gleichen (nicht veränderten) Messbedingungen, immer mit dem gleichen Wert.
- Bei Messungen mit der gleichen Messanordnung sind sie nicht erkennbar.
- Die Genauigkeit der Messung befindet sich in der angegebenen Toleranz der Messgeräte.

Beispiele [Eur12]:

- Bei den Messgeräten findet man systematische Fehler in ihrer unterschiedlichen Fertigungstoleranz (z.B.: bei Längenmessgeräten, etwa beim Maßband, Lineal oder Messschieber), dadurch wird auch die Güte der Messwerte bestimmt.
- Reibungs- bzw. Leitungswiderstände werden nicht oder zu wenig beachtet.
- Oder das angewendete Modell lässt Fehler entstehen.
- Durch die Korrektur der verwendeten Messmittel und die Verwendung von Korrekturwerten bei der Messgenauigkeit sollen regelmäßige oder systematische Fehler ausgemerzt werden.

2.6.3 Die unregelmäßigen Fehler

Diese entstehen zufällig und variieren im Vorzeichen und in ihrem Betrag in unregelmäßiger Weise. [Egg00]

- Sie treten bei nicht vorhersehbarer, aber auch nicht beeinflussbarer Veränderung der Messbedingung auf, man spricht von unkontrollierbaren Einflüssen; diese können vom Beobachter selbst ausgelöst werden, das sind sogenannte subjektive Fehler.
- Die Messwerte streuen bei der wiederholten Messung mit der gleichen Messanordnung um einen Mittelwert, das wird durch zufällige Fehler hervorgerufen.

Beispiele hierfür sind [Eur12]:

- Temperaturschwankungen, die bei der Messung auftreten, Schwankungen der Netzspannung, Erschütterungen, die Fehler verursachen, usw.;
- Fehler, die beim Ablesen gemacht werden;
- Fehler, die in der Reaktionszeit bzw. in der Geschicklichkeit des Objektleiters liegen.

3 Versuchsaufbau

3.1 Anlage

Folgendes Foto zeigt die Versuchsanlage, mit der die Versuche für die Ermittlung der Permeabilität durchgeführt wurden.



Abb. 20: Versuchsanlage

Die nachfolgenden Skizzen zeigen den Versuchsstand, hier werden die verwendeten Messgeräte dargestellt.

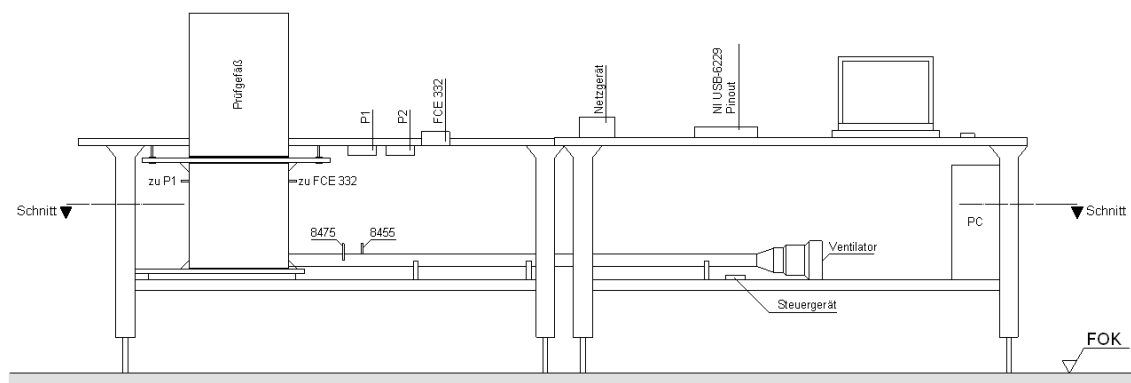


Abb. 21: Messstand: Ansicht von vorne

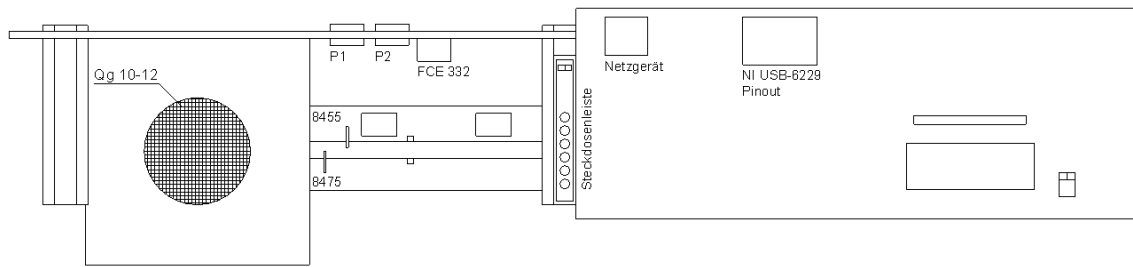


Abb. 22: Messstand: Draufsicht

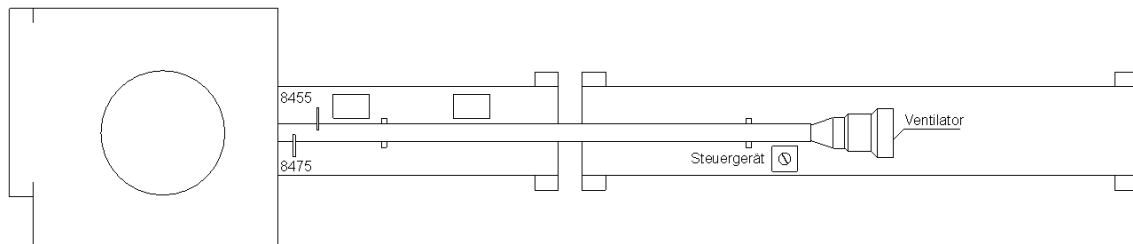


Abb. 23: Messstand: Schnitt in 1 m Höhe

Der Luftstrom wird über ein Plexiglasrohr in das erste Polokalrohr geleitet. Im Plexiglasrohr befinden sich am Ende zwei unabhängige Luftgeschwindigkeitsmessungen. Auf dem ersten vertikalen Polokalrohr ($\varnothing = \text{ca. } 40 \text{ cm}$, Höhe = ca. 50 cm) liegt eine Holzplatte, diese ist notwendig, um die verschiedenen Prüfgefäße mit unterschiedlichen Durchmessern prüfen zu können.

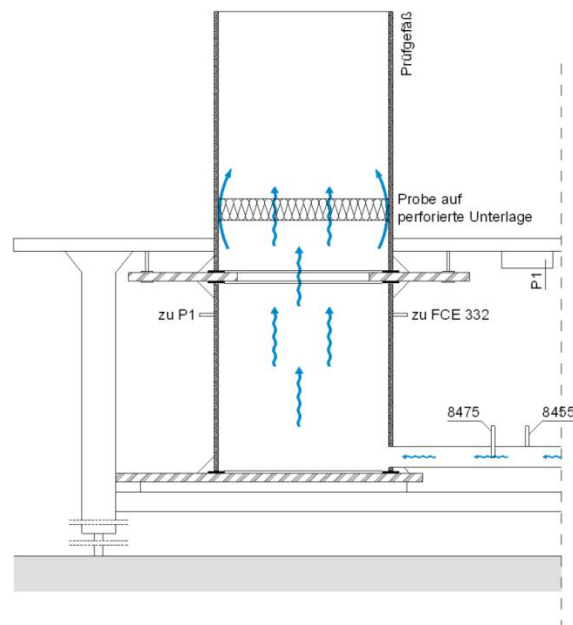


Abb. 24: Luftströmung in und durch die Probe

Abb. 24 zeigt die Luftströmung vom Plexiglasrohr in das erste Polokalrohr, danach durch die Holzplatte, auf welcher das Prüfgefäß aufliegt, weiter durch die Dämmung.

3.2 Verwendete Messgeräte im endgültigen Versuch

3.2.1 Luftgeschwindigkeits-Messwandler

Die Luftgeschwindigkeit im Plexiglasrohr wurde mit einem Luftgeschwindigkeits-Messwandler Modell 8475 der Firmer DEHA DEHA (Haan&Wittmer GmbH, D-71296 Heimsheim, Keltenstraße 8) gemessen. [DEH12] Dieser Luftgeschwindigkeits-Messwandler ist werkskalibriert.

- Omnidirektional
- Richtungsunabhängige Sondenspitze
- Genaue Messergebnisse bei geringen Geschwindigkeiten von 0,05 bis 0,5 m/s

Tab. 4: Kenndaten der Messgeräte 8475 [DEH12]

Typ	8475
Messbereich	$\pm 3,0\%$ vom Messwert ¹ oder $\pm 1,0\%$ vom ausgewählten Messbereich
Ansprechzeit	5 sec ²
Messlängen	7,5cm, 15cm, 22,5cm, 30cm
Wählbarer Bereich	0,05 m/s bis 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 2,0; 2,5 m/s

¹ im Bereich von 20 bis 26°C außerhalb dieses Bereiches mit Temperaturkompensation zzzg. 0,5%/°C

² für 63% des Endwertes, getestet bei 2,5 m/s

3.2.2 Differenzdruck-Messumformer

Verwendet wurde ein Differenzdruckmessumformer vom Typ FCE 332 der Firma Furness Control mit einem Messbereich von ± 5 Pa. In diesem Bereich existiert auch ein Prüfzertifikat.

Tab. 5: Kenndaten des FCE 332 [FUR12]

Messbereich	± 5 Pa
Genauigkeit:	0,25% v. Anzeige
Messbereichsverschiebung	10-100% v. Messb.
Nullpunktverstellung	$\pm 10\%$
Linearität	$< \pm 0,1\%$ v. Anzeige
Hystese	$< 0,1\%$ v. Anzeige
Temperatureffekt Nullp.	$\pm 0,02\%$ / °C
Temperatureffekt Messb.	$\pm 0,02\%$ / °C
Temperaturkompensation	-10 bis 60 °C
Arbeitstemperatur	-10 bis 60 °C
Lagertemperatur	-10 bis 70 °C
max. stat. Druck	0 - 2 bar absolut
Überlastbarkeit	20 x Messbereich
Abmessungen	120 x 80 x 58 mm
Gewicht	0,5 kg

3.2.3 Temperatur- und Feuchtemessung

In der Versuchsanlage kam ein Gerät vom Typ Humichip 17204 vom Hersteller Vaisala zum Einsatz.

Luftfeuchtigkeit: Messbereich: 1 ... 100% RH

Betriebstemperaturbereich: -20 ... +80 °C

3.3 Erzeugung des Luftstroms

Für die Dichtemessung der Versuchsanlage wurde ein Kompressor und für die Durchführung der Versuche wurde ein Ventilator verwendet.

Die Strömungsgeschwindigkeit konnte mit einem Volumenstromregler reguliert werden.

3.4 Prüfgefäß

Der Durchmesser und die Höhe der Prüfgefäße wurden dadurch ermittelt, dass der Durchmesser und die Höhe an mehreren Stellen gemessen, und daraus anschließend ein Mittelwert gebildet wurde. Das mehrmalige Messen des Durchmessers war notwendig, da die Rohre nicht rund sind.

Tab. 6: Abmessungen Prüfgefäße 1, 2, 3, 4 und 5

	Durchmesser		Höhe	
		Mittelwert		Mittelwert
Prüfgefäß 1	37,90 cm	37,90 cm		
Prüfgefäß 2 *)	48,4/48,5/48,3/48,7/48,8/48	48,45 cm	82/81,7/81,8/81,7/81,8	81,80 cm
Prüfgefäß 3	59,00 cm	59,00 cm	97,5/97,2/97,6/97,6/97,4	97,46 cm
Prüfgefäß 4	29,8/29,7/29,8/29,8/29,8	29,78 cm	76,4/76,0/75,8/76,2	76,10 cm
Prüfgefäß 5	37,90 cm	10,20 cm	37,90 cm	10,20 cm

*)Bei der Messung des Durchmessers: Feststellung sehr elliptisch

In den Prüfgefäßen 1, 2, 3 und 4 wurde in einem Abstand von 10 cm eine perforierte Unterlage eingebaut (3.5.1). Diese Unterlage liegt jeweils auf drei Schrauben auf. Von der perforierten Unterlage bis zum oberen Rand wurde die Distanz im Rohr in Zentimetern angeschrieben. Dieses Maß hilft, die Probenhöhe im eingebauten Zustand zu ermitteln.

Auf der Unterseite des Prüfgefäßes befindet sich eine Nut. Zwischen der Unterseite und der Nut befindet sich im eingebauten Zustand eine Abdichtung. Die Nut dient dazu, einen möglichst dichten Anschluss zwischen Holzplatte und Prüfgefäß herzustellen. An der Außenseite des Prüfgefäßes befinden sich vier Schrauben. Auf der Holzplatte, auf welcher sich das Prüfgefäß befindet, werden vier Ösenschrauben befestigt. Die Schrauben und die Ösenschrauben werden mit vier Spannschrauben verbunden. Durch

die Spanschraube kann das Prüfgefäß gleichmäßig auf die Holzplatte befestigt werden, und dadurch wird ein dichter Anschluss zwischen Prüfgefäß und Holzplatte hergestellt.

Folgende Prüfgefäße werden für die Messungen verwendet:

- Rohr- Ø 1: 37,9 cm
- Rohr- Ø 2: 48,45 cm
- Rohr- Ø 3: 59,0 cm
- Rohr- Ø 4: 29,78 cm



Abb. 25: Draufsicht und Ansicht der Prüfgefäße 1 bis 4

Diese Prüfgefäße sind Wasser/Kanalrohre und bestehen aus Kunststoff. Daher ist die Oberfläche sehr glatt. Diese Oberfläche simuliert gut die Oberfläche von Leimbändern. Diese Leimbänder werden verstärkt für Industriehallen verwendet. Auch in der Simulation werden solche Leimbänder eingesetzt. Die glatte Oberfläche eignet sich weniger für die Simulation von Sparrendächern oder von Flachdächern mit sägerauen Balken.

3.5 Verwendete Materialien

3.5.1 Perforierte Unterlage

Für den Messstand im Labor wird ein Qg (Quadratlochung/Geradreihig)10/12 mit einem Lochanteil von 69 % verwendet.

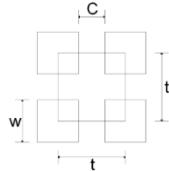


Abb. 26: Seitenabstand der perforierten Unterlage; adaptiert [PRO11]

$$w = 10 \text{ mm}$$

$$t = 12 \text{ mm}$$

„w“ bezeichnet den Seitenabstand des Quadratloches, und „t“ gibt den Abstand zwischen den Mittelpunkten an. Dadurch ergibt sich ein Abstand von c zu 2 mm.

In der Abb. 27 wurde das Prüfgefäß 3 umgedreht und die Dämmung im eingebauten Zustand begutachtet. Sichtbar ist auch die perforierte Unterlage, auf welcher die Dämmung aufliegt.



Abb. 27: Rückseite des Prüfgefäßes 3 mit eingebauter Dämmung

3.5.2 Proben

Produkte der Firma Isover:

- Rollino 10
Das Rollino hat bei der Lieferung eine zylindrische Form. Dadurch verringert sich das Transportvolumen. Die zugeschnittenen Plattenformen, die die Größe 120 x 60 cm aufweisen, sind in der Rolle aufgewickelt. Eine Rolle umfasst 8,64 m², das sind 12 Dämmplatten. Diese Werte gelten für das Rollino 10.
- Rio 10
Das Produkt hat bei der Lieferung ebenfalls wie Rollino eine zylindrische Form.

4 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden im Labor im Zeitraum zwischen Oktober 2011 und Ende Februar 2012 durchgeführt. Zu Beginn wurden Vorversuche durchgeführt, um erstens die Dichtigkeit der Anlage zu kontrollieren und zweitens die geeigneten Messgeräte zu ermitteln.

4.1 Messeinrichtung

Laut DIN EN 29053 [DIN93] sollte die Messung des längenbezogenen Strömungswiderstands bei einer Geschwindigkeit von $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s in der Probe erfolgen. Für die Feinsteuerung der Luftströmung des Ventilators wurde ein Drehschalter eingebaut, mit diesem war es möglich, in der Probe die Geschwindigkeit von $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s zu erreichen. Da die Strömungsgeschwindigkeit nicht direkt unter der Probe gemessen werden konnte, musste die benötigte Geschwindigkeit im Plexiglasrohr ermittelt werden, da hier die Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden konnte. Das Messgerät befand sich 1,7 m vom Anfang entfernt, wo die Luft mittels Ventilator eingebracht wurde. Die Entfernung ergab sich daraus, dass sich im Rohr eine laminare Luftströmung einstellte. Mittels der beiden Querschnittsflächen von Probe und Plexiglasrohr ergibt sich eine benötigte Geschwindigkeit im Plexiglasrohr zum Beispiel von $29,3 \cdot 10^{-3}$ m/s, um eine Luftströmung von $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s in der Probe erreichen zu können. Die Tab. 9 zeigt die verschiedenen Geschwindigkeiten im Plexiglasrohr.

4.2 Messung der Dichtigkeit

Für die Überprüfung der Dichtigkeit wurde der Luftstrom mit einem Kompressor erzeugt, da mit diesem höhere Drücke erzeugt werden konnten. Sämtliche Anschlüsse der Messgeräte an das Plexiglasrohr sowie an das Polokalrohr wurden nach dem Einbau sorgfältig abgedichtet. Die Stoßstellen der verschiedenen Materialien wurden mit einem schwarzen Schaumstoff abgedichtet.

Danach folgte die Überprüfung der Anlage bezüglich ihrer Dichtheit. Dafür wurde das Prüfgefäß Nummer 3 verwendet. Das hierfür verwendete Material besteht aus zwei miteinander zusammengeklebten Weichfaserplatten, die eine Einzeldicke von 2 cm aufweisen. Diese wurde auf dem Innendurchmesser des Prüfgefäßes zugeschnitten und in dieses eingebaut. Die Randeinflüsse wurden mittels Fensterkitt beseitigt. Um auch jeglichen Luftstrom durch die Weichfaserplatten ausschließen zu können, wurde ein Stahlblech auf die Probe gelegt, dann wurde ebenfalls der Rand mit Fensterkitt abgedichtet. Bei dieser Messung ergab sich ein Druck von 116,56 Pascal. Mittels Rauch

wurden die abgedichteten Stoßstellen auf Leckagen untersucht. Es konnten keine Fehlstellen gefunden werden.

4.3 Geschwindigkeit im Plexiglasrohr

Diese Geschwindigkeit gibt an, wie hoch die gemessene Luftgeschwindigkeit im Plexiglasrohr sein muss, damit in der Probe eine Geschwindigkeit von $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s vorhanden ist.

Tab. 7: Die Luftgeschwindigkeiten im Plexiglasrohr

Nummer Prüfgefäß	Durchmesser cm	Fläche cm ²	Geschw. in Probe m/s	Geschw. in Plexiglas. m/s
1	37,90	0,11282	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,029311
2	48,45	0,18436	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,047901
3	59,00	0,27340	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,071034
4	29,78	0,06965	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,018097
5	10,20	0,00817	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,002123

4.4 Einbaulage der Dämmung

Das Probenmaterial wurde in das Prüfgefäß so eingebaut, dass die faserige Struktur horizontal liegt.

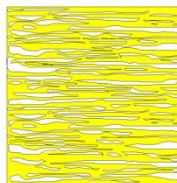


Abb. 28: Faserige Struktur → eine bestimmte Hauptrichtung [DÄM12]

4.5 Probenvorbereitung

Aus dem gelieferten Dämmmaterial (RIO, Rollino) wurden die Proben für die vier verschiedenen Querschnitte ausgeschnitten. Für den Ausschnitt wurde eine Schablone aus Metall zugeschnitten. Diese Schablone bekam ein Übermaß von 1 cm. Der Zuschnitt der Proben erfolgte folgendermaßen: Die Schablone wurde auf das Dämmmaterial gelegt und mit einer Hand leicht zusammengepresst, mit der anderen Hand wurde mit einem Messer die Form der Schablone ausgeschnitten und nachgeschnitten. Beim Schneiden musste darauf geachtet werden, dass das Messer normal zur Schablone geführt wurde, damit ein möglichst gleichmäßiger Anschluss zum Rand gewährleistet werden konnte.

4.6 Messprotokoll

Dieses Messprotokoll wurde für jede gemessene Probe ausgefüllt. Dadurch konnten die Dichte und die Einbauhöhe der verschiedenen Proben ermittelt werden. Die Messungen für die Höhe und für den Durchmesser der verschiedenen Proben wurden an vier verschiedenen Stellen durchgeführt und danach gemittelt.

Messprotokoll

Messtag: _____

Probe:

XPS	Rollino	RIO	FDPL
offsetwert			
p1 [Pa]:			
p2 [Pa]:			

Probennummer:

Prüfgefäß: ① ② ③ ④ ⑤

Bild: ○

Dateiname: _____

PROBE

Masse [g]					
	1	2	3	4	Mittelwert
Durchmesser [cm]					
Höhe [cm]					

PROBENEINBAU

	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	Mittelwert
[cm]					
gemessen [cm]	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	
[cm]					
Differenz* [cm]					

*) Höhe der Probe im eingebautem Zustand

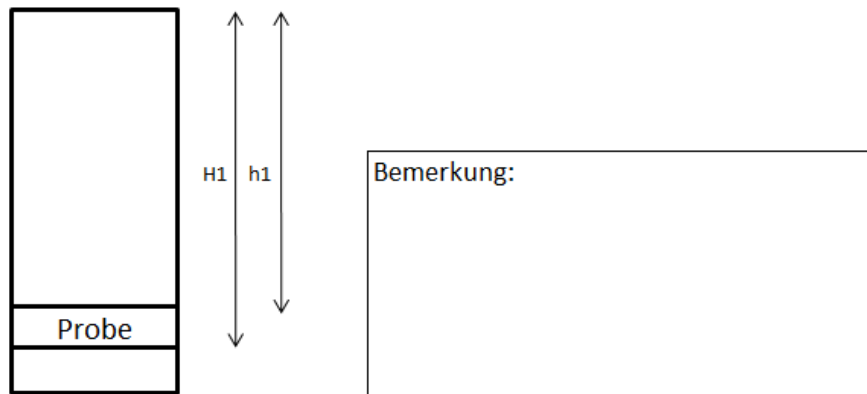


Abb. 29: Messprotokoll

4.7 Messung Rollino 10, Prüfgefäß 3

Diese Beschreibung betrifft den Ablauf der ersten Messung mit dem Querschnitt 3 und dem Probenmaterial Rollino 10.

Aus dem Rollino 10 wurden drei Proben, ROL1, ROL2 und ROL3, herausgeschnitten. Die Messung begann mit ROL1. Zuerst wurden der Durchmesser und die Höhe der Probe auf vier verschiedenen Seiten gemessen und daraus der Mittelwert gebildet.

Das Gewicht und die Mittelwerte der Probe wurden in das Messprotokoll 4.6 eingetragen.

Ebenfalls wurde ein Dateiname definiert, der sich aus dem Prüfquerschnitt und dem Probenmaterial zusammensetzt. Das aktuelle Datum wird vom Programm LabView automatisch angehängt.

Zuerst kam ROL1 in das Prüfgefäß. Die Probe musste langsam in das Gefäß eingebaut werden, damit die Luft aus dem Prüfgefäß entweichen konnte und somit die Luftgeschwindigkeits-Messumformer nicht beschädigt wurden.

Das Probenmaterial durfte durch den Einbau nicht gestaucht werden. Die Messungen konnten nicht bei einer exakten Probendicke von 10 cm durchgeführt werden, da sich das Dämmmaterial ausdehnte. Am Prüfgefäß befanden sich vier Messpunkte, die die Distanz von der perforierten Unterlage bis zur Oberkante des Prüfgefäßes angaben. Nach dem Einbau der Probe wurde die Distanz von der Oberkante derselben bis zur Oberkante des Prüfgefäßes ermittelt und diese Werte in das Messprotokoll 4.6 eingetragen. Die Differenz ergab die Höhe der eingebauten Probe.

Die Messung begann, nachdem der Mittelwert der Probenhöhe im eingebauten Zustand, der Durchmesser des Prüfgefäßes und der Dateinamen in das Computerprogramm eingetragen worden waren.

Um eine Luftgeschwindigkeit von $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s in der Probe zu erreichen, musste bei diesem Prüfgefäß eine Luftgeschwindigkeit von 0,0479 m/s im Plexiglasrohr gemessen werden. Wurde der gewünschte Wert erreicht, hielt man die Luftgeschwindigkeit für ca. 90 Sekunden konstant, danach wurde die Drehgeschwindigkeit des Ventilators erhöht und bei ca. dem doppelten Wert von 0,0479 m/s wurde wieder die Luftgeschwindigkeit für ca. 90 Sekunden konstant gehalten, dann erhöhte man die Luftgeschwindigkeit, nämlich um den dreifachen Wert von 0,0479 m/s. Dadurch ergab sich eine treppenförmige Messung. Die Horizontale wurde für die Auswertung benötigt, und die Werte wurden gemittelt.

Tab. 8: Sämtliche Messungen mit Prüfgefäß 1, 2, 3 und 4

Prüfgefäß	Rollino 10 Dateiname	Mittelwert			Masse g	Dichte kg/m ³	Mittelwert
		Ø cm	Höhe cm	Einbauhöhe cm			Dichte kg/m ³
1	QS_1_ROL1_12042012101006	40,40	10,38	9,88	186,47	14,02	13,82
	QS_1_ROL2_12042012103636	40,48	10,65	9,68	185,71	13,55	
	QS_1_ROL3_12042012110310	40,43	10,53	10,13	187,43	13,87	
2	QS_2_ROL1_12042012123210	50,05	10,30	9,80	306,46	15,12	14,18
	QS_2_ROL2_12042012125143	49,45	10,45	10,18	268,94	13,40	
	QS_2_ROL3_12042012131348	49,68	10,28	9,78	278,93	14,01	
3	QS_3_ROL1_12042012143614	59,25	10,00	9,88	385,62	13,99	14,23
	QS_3_ROL2_12042012145713	59,90	10,00	9,90	375,72	13,33	
	QS_3_ROL3_12042012151601	59,85	9,90	9,55	427,90	15,36	
4	QS_4_ROL1_13042012091110	29,88	11,58	10,03	121,10	14,92	13,68
	QS_4_ROL2_13042012093018	30,25	11,00	9,90	101,26	12,81	
	QS_4_ROL3_13042012094917	29,88	11,03	10,03	102,92	13,32	

4.8 Messungen, Rio 10

Für diese Messung wurden derselbe Messaufbau wie für die Messung 4.7 verwendet.

Tab. 9: Sämtliche Messungen mit Prüfgefäß 1, 2, 3 und 4

Prüfgefäß	RIO 10 Dateiname	Mittelwert			Masse g	Dichte kg/m ³	Mittelwert
		Ø cm	Höhe cm	Einbauhöhe cm			Dichte kg/m ³
1	QS_1_RIO1_16042012111015	38,4	10,35	9,75	113,37	9,46	9,55
	QS_1_RIO2_16042012112938	37,4	10,65	10,15	121,36	10,39	
	QS_1_RIO3_16042012114812	37,2	11,20	9,98	107,20	8,82	
2	QS_2_RIO1_16042012145255	49,6	12,08	10,68	202,92	8,71	9,34
	QS_2_RIO2_16042012151454	49,3	11,20	10,50	198,33	9,30	
	QS_2_RIO3_16042012153526	49,4	10,45	10,33	200,75	10,01	
3	QS_3_RIO1_16042012091047	59,3	11,70	11,05	281,28	8,70	8,86
	QS_3_RIO2_16042012092809	59,5	10,95	9,98	265,15	8,70	
	QS_3_RIO3_16042012094858	59,3	11,48	10,73	290,57	9,18	
4	QS_4_RIO1_13042012131304	30,3	12,20	10,05	73,41	8,34	8,47
	QS_4_RIO2_13042012133006	30,6	10,80	10,00	66,23	8,35	
	QS_4_RIO3_13042012134600	30,3	11,18	9,88	70,16	8,71	

5 Messauswertung

5.1 Allgemein

Die gemessenen Daten wurden ausgewertet. Mit diesen Daten wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des Prüfberichts [PRU10] des TGM und den selbst gemessenen Messwerten zu finden.



Abb. 30: Prüfgefäß TGM

TGM:

Bei den Messungen im TGM-Labor wurde der Randeinfluss ausgeschlossen. Dies geschah in der Weise, dass sich vor und nach der 10 cm starken Probe eine perforierte Unterlage befand, diese perforierte Unterlage hatte eine Stärke von ca. 1 cm und wurde aus Aluminium gefräst. Der Einfluss des Randes wurde durch den geschlossenen Randbereich verhindert.

TU:

Für die Berücksichtigung des Randeinflusses wich man von der EN 29053 [DIN93] ab und verwendete keinen Schutzring. Dadurch konnte der Rand zwischen Prüfgefäß (Polokalrohr) und Probe ungehindert durchströmt werden. Der Gedanke war, durch verschiedene Umfang-Flächen-Verhältnisse auf einem Strömungswiderstand im Kern und am Rand der Dämmung zu kommen.

Bei den selbst durchgeführten Messungen wurde eine dünne perforierte Unterlage im Gegensatz zu der TGM-Unterlage verwendet. Der Einbau der perforierten Unterlage ist in Abb. 27 dargestellt. Diese Unterlage besaß keinen geschlossenen Randabschluss zum Rand hin, deshalb wurde die Randströmung nicht behindert.

5.2 Bestimmung Kernfläche und Randfläche

Für die Auswertung wurden zwei Bereiche definiert, eine Kernfläche mit dem längenbezogenen Strömungswiderstand r_1 und eine Randfläche/Randstreifen mit einem längenbezogenen Strömungswiderstand r_2 . Der Wert für r_1 entsprach dem gemessenen Wert des TGM, dieser Wert wird für die Kernfläche verwendet. Die Kernfläche A_1 hatte einen Durchmesser von weniger als 2 cm vom Gesamtdurchmesser. Für die Ermittlung von r_2 wurde eine Randfläche A_2 definiert. Diese Fläche, ein Kreisring, hatte eine Wanddicke von 1 cm.

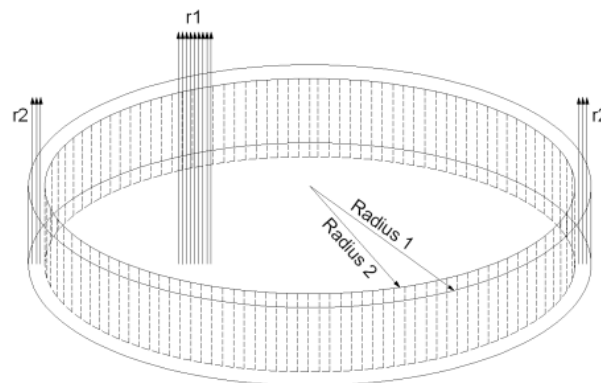


Abb. 31: Darstellung des Randstreifens

In der folgenden Tab. 10 sind sämtliche Werte für die Proben mit verschiedenen Querschnitten berechnet worden. Dabei wurde für den Randstreifen eine Stärke von 1 cm gewählt.

Tab. 10: Kernfläche, Randfläche

Produkt	Ø m	Fläche m ²	Kernfläche m ²	Randstreifen m	Randfläche m ²	Umfang m
RIO/ROLLINO	0,38	0,11	0,10	0,01	0,012	1,19
RIO/ROLLINO	0,48	0,18	0,17	0,01	0,015	1,52
RIO/ROLLINO	0,59	0,27	0,26	0,01	0,018	1,85
RIO/ROLLINO	0,30	0,07	0,06	0,01	0,009	0,94
RIO/ROLLINO	0,10	0,01	0,01	0,01	0,003	0,32

5.3 Ermittlung der Permeabilität

In Abb. 32 ist ersichtlich, wie die Messung einer typischen Probe aussieht.

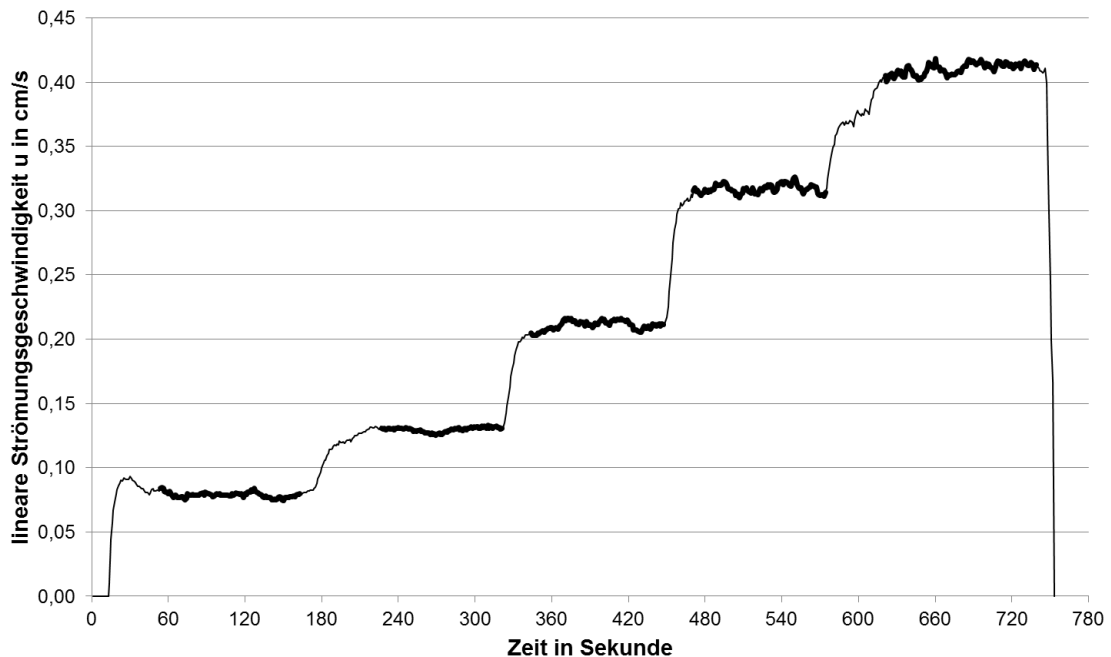


Abb. 32: Typische Darstellung einer Messung und deren Messplateaus

Während der Messung wurden bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten Messplateaus erzeugt. Da die Messinstrumente eine gewisse Trägheit in der Reaktionszeit besitzen, wurden für die Auswertung die Bereiche des Messplateaus verwendet, bei denen diese Trägheit ausgeschlossen werden konnte.

Die Werte, in Abb. 32 stärker gekennzeichnet, der einzelnen „Treppen“ wurden gemittelt. Gemittelt wurden die Druckdifferenz, der längenbezogene Strömungswiderstand, die lineare Strömungsgeschwindigkeit und die Permeabilität. Diese Mittelwerte wurden dann in einem Diagramm aufgetragen, wobei sich auf der Abszisse immer die lineare Strömungsgeschwindigkeit in cm/s befindet, auf der Ordinate befindet sich der längenbezogene Strömungswiderstand in Pa*s/m² oder die in m² oder die Druckdifferenz in Pa Permeabilität (Abb. 33; Abb. 34; Abb. 35; Abb. 36). Durch die Bildung einer Regressionsgeraden bzw. einer Parabel konnte die jeweilige Gerade samt ihrer Geradengleichung eingefügt werden. Mit Hilfe dieser Gleichung konnte für eine lineare Strömungsgeschwindigkeit von $0,5 \cdot 10^{-3}$ m/s die Druckdifferenz berechnet werden.

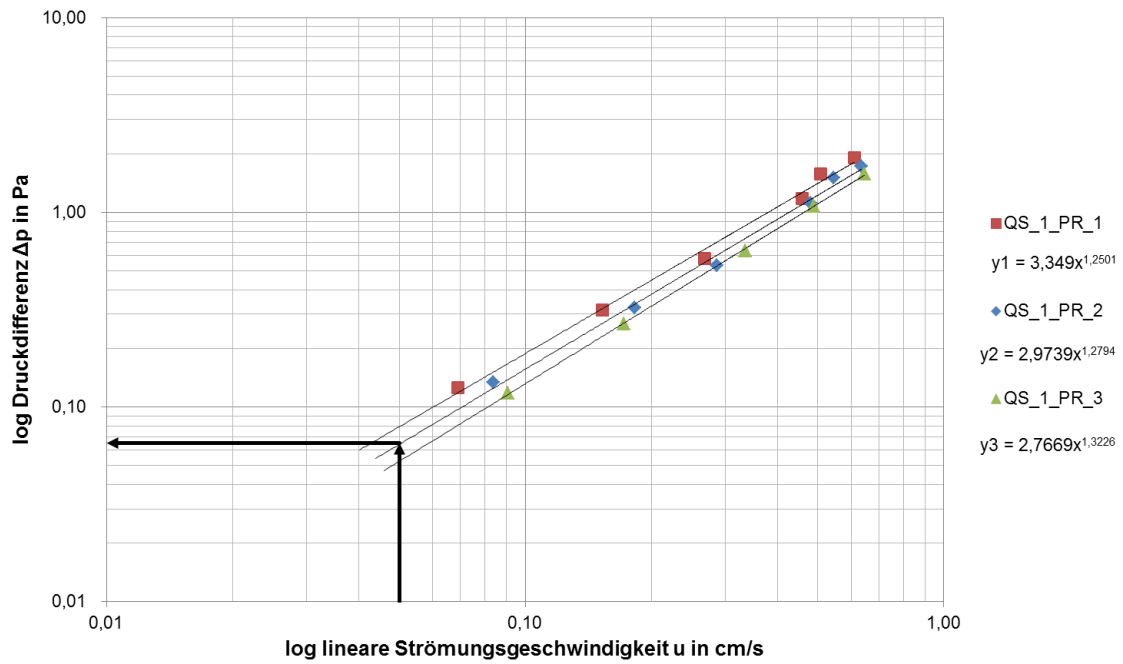


Abb. 33: Prüfgefäß $\varnothing \sim 0,4$ m: Druckdifferenz bezogen auf die lineare Strömungsgeschwindigkeit von Isover RIO

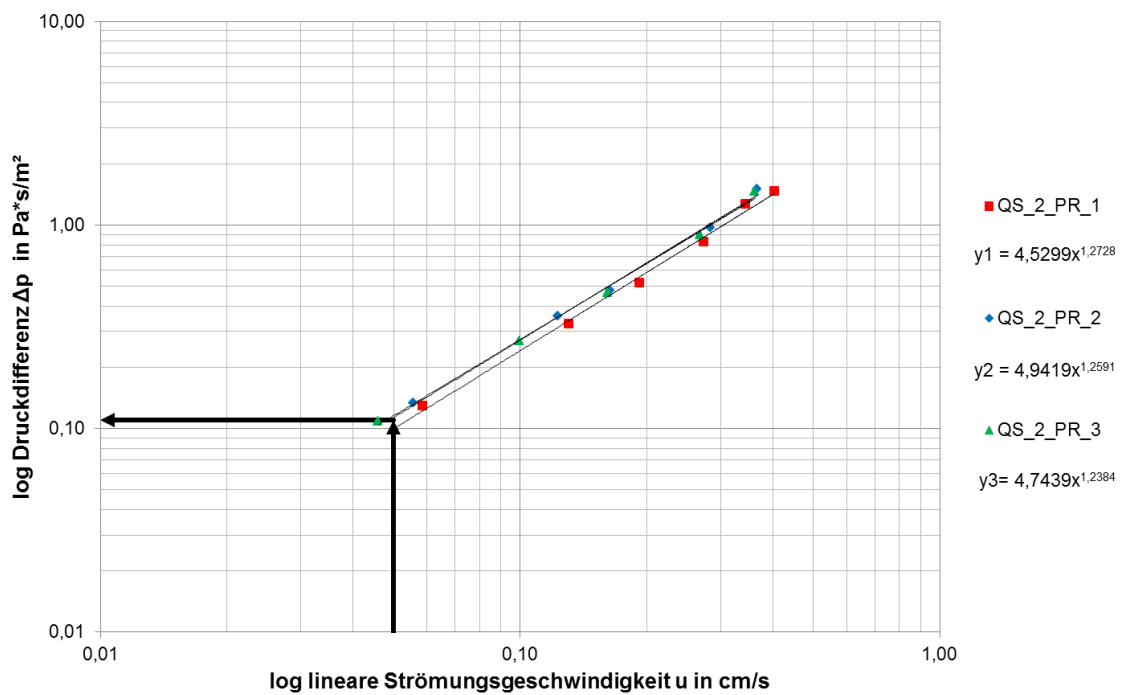


Abb. 34: Prüfgefäß $\varnothing \sim 0,5$ m Druckdifferenz bezogen auf die lineare Strömungsgeschwindigkeit von Isover RIO

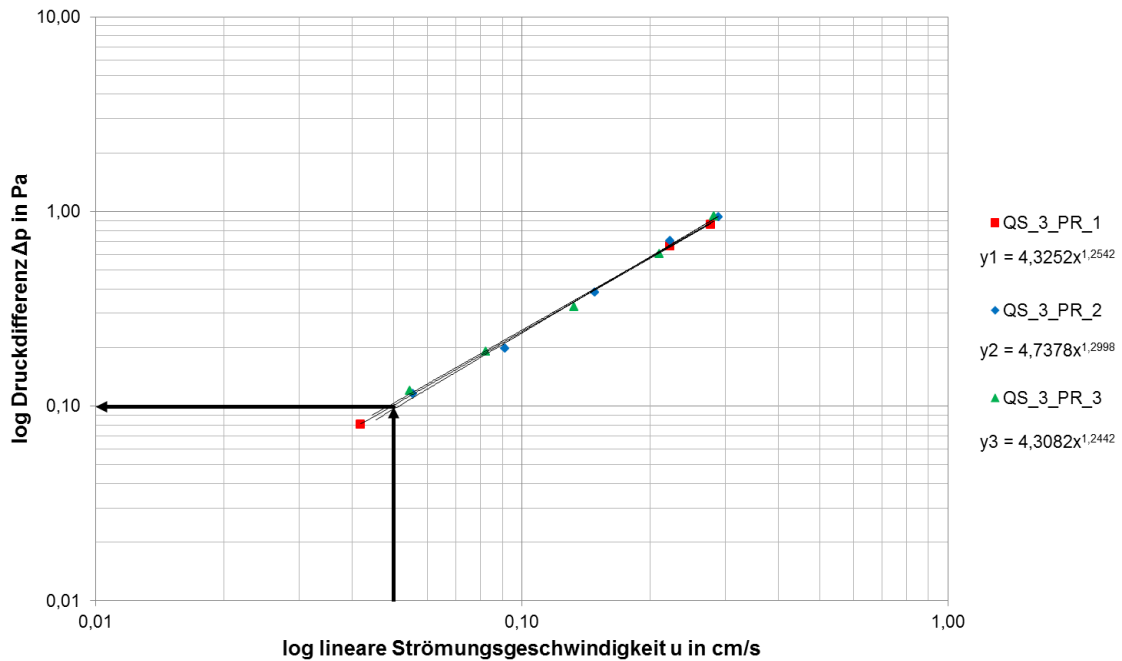


Abb. 35: Prüfgefäß $\varnothing \sim 0,6$ m: Druckdifferenz bezogen auf die lineare Strömungsgeschwindigkeit von Isover RIO

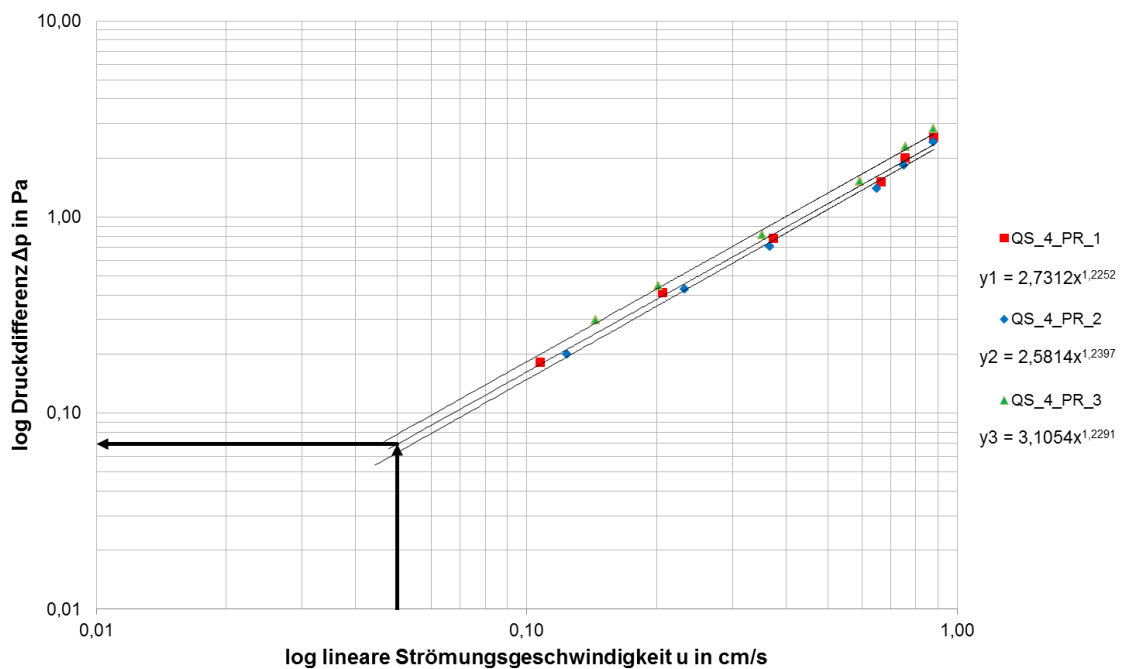


Abb. 36: Prüfgefäß $\varnothing \sim 0,3$ m: Druckdifferenz bezogen auf die lineare Strömungsgeschwindigkeit von Isover RIO

Weiters musste die Permeabilität des Randstreifens ermittelt werden. Für diese Berechnung wurde ein Zusammenhang zwischen den Messergebnissen des TGM und den selbst gemessenen Ergebnissen gesucht. Die Messergebnisse des TGM sind für eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,05 cm/s extrapoliert worden. Für die Auswertung wurden auch die Werte für eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,05 cm/s benötigt. Daher

wurde für das Material RIO der Wert für den längenbezogenen Strömungswiderstand von 7250 Pa s/m² genommen, dieser Wert wurde auch für r₁ verwendet, dies entspricht dem Wert, bei dem der Randeinfluss verhindert wird.

Es musste noch ein formaler Zusammenhang zwischen r₁ und r₂ gefunden werden. Durch r₂ wird der längenbezogene Strömungswiderstand durch den Randstreifen ausgedrückt. Dafür wurden die Formeln aus der EN 29053 [DIN93] umgeformt.

$$q_v = \frac{\Delta p}{R} \quad (7)$$

$$R = \frac{R_s}{A} \quad (8)$$

$$R_s = r \cdot d \quad (9)$$

Aus den Gleichungen (7), (8) und (9) wurde eine Formel gewonnen.

$$q_v = \frac{\Delta p}{R_s / A} = \Delta p \cdot \frac{A}{R_s} = \frac{\Delta p \cdot A}{r \cdot d} \quad (10)$$

Durch die Teilung der Probenfläche in die Bereiche A₁ und A₂ ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$q_v = \frac{\Delta p}{d} \cdot \left(\frac{A_1}{r_1} + \frac{A_2}{r_2} \right) \quad (11)$$

Durch das Gleichsetzen der Gleichungen (10) und (11) kann folgende Gleichung (13) gewonnen werden, in der die einzige Unbekannte r ist, die mit r_{effektiv} bezeichnet wurde.

$$\frac{\Delta p}{d} \cdot \left(\frac{A_1}{r_1} + \frac{A_2}{r_2} \right) = \frac{\Delta p \cdot A}{r \cdot d} \quad (12)$$

$$r_{eff} = \frac{A}{\frac{A_1}{r_1} + \frac{A_2}{r_2}} \quad (13)$$

In dieser Formel (13) wurde r₂ solange variiert, bis die Fehlerquadrate ein Minimum ergaben. Dafür wurde noch ein Diagramm benötigt, indem die schwarze Kurve verschoben werden konnte, und zwar durch die Veränderung des r₂-Wertes, damit sie zu den Punkten ein Minimum ergab (Abb. 37). Auf der Abszisse wurde das Verhältnis von Fläche zum Umfang aufgetragen, auf der Ordinate befindet sich einmal r_{effektiv} und die schwarzen Punkte r_{gemessen}. Die Punkte stellen fixe Werte dar, die schwarze Kurve wird durch r₂ variiert.

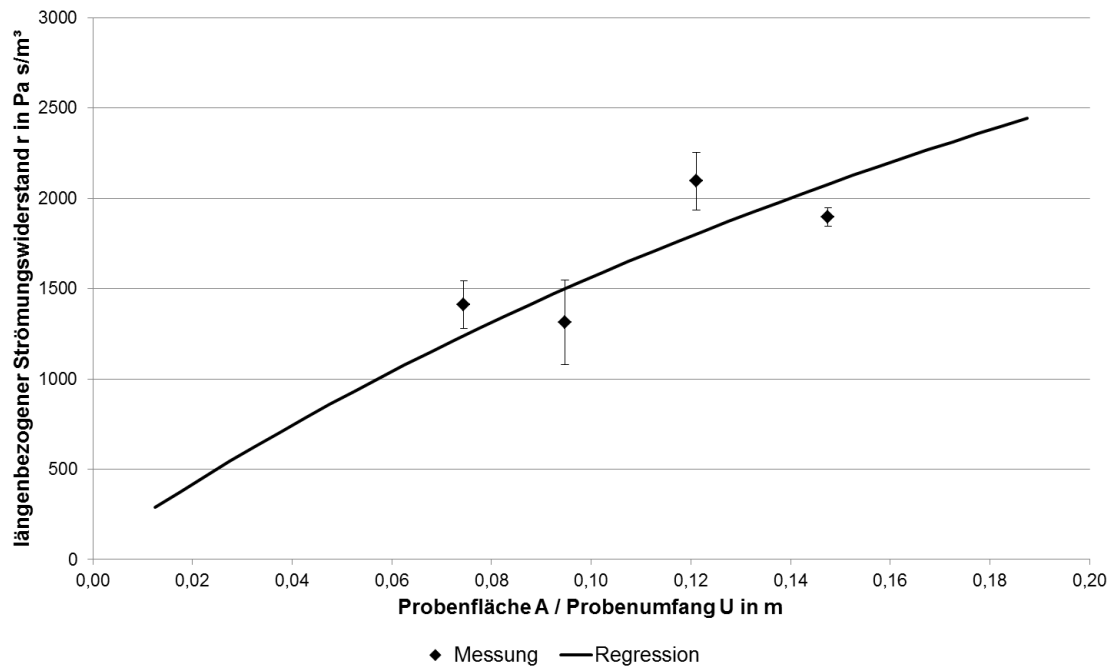


Abb. 37: r_{eff} bzw. r_{gemessen} bezogen auf A/U von Isover RIO

Die Fehlerquadrate wurden in der Spalte 20 berechnet, dafür wurde Spalte 17 weniger Spalte 19 gerechnet und die Summe quadriert. Die Spalte 18 wurde aus den gemessenen Werten des Volumenstroms durch den Probenkörper mal der Dicke durch die Druckdifferenz berechnet. Diese Gleichung (14) wurde durch Umformen der Gleichung (10) gewonnen.

$$\frac{A}{r} = \frac{q_v \cdot d}{\Delta p} \quad \Rightarrow \quad q_v = \frac{A \cdot \Delta p}{r \cdot d} \quad (14)$$

Die Spalte 19 berechnete sich laut Gleichung (15). Diese Gleichung (15) folgt aus der Umformung der Gleichung (11). Die Bezeichnungen $A_{1\text{Probe}}$ und $A_{2\text{Probe}}$ wurden notwendig, damit nicht die Flächen der Spalte 5 und 6 verwendet werden.

$$\frac{q_v \cdot d}{\Delta p} = \frac{A_{1\text{Probe}}}{r_1} + \frac{A_{2\text{Probe}}}{r_2} \quad \Rightarrow$$

$$q_v = \left(\frac{A_{1\text{Probe}}}{r_1} + \frac{A_{2\text{Probe}}}{r_2} \right) \cdot \frac{\Delta p}{d} \quad (15)$$

Tab. 11: Berechnung von K für Isover RIO

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
∅	A	U	A/U	A1	A2	r1	r2	r_eff	A/r_eff	A _{Probe} /U _{Probe}
0,05	0,0020	0,1571	0,0125	0,0007	0,0013	7250	189	291	6,75E-06	0,07
0,07	0,0038	0,2199	0,0175	0,0020	0,0019	7250	189	376	1,02E-05	0,09
0,09	0,0064	0,2827	0,0225	0,0038	0,0025	7250	189	460	1,38E-05	0,12
0,11	0,0095	0,3456	0,0275	0,0064	0,0031	7250	189	543	1,75E-05	0,15
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
r1	r2	A1 _{Probe}	A2 _{Probe}	qv _{Mittel}	qv*d/Δp	(A1 _{Probe} /r1+ A2 _{Probe} /r2)* Δp/d			K1=eta/r1	K2=eta/r2
7250	189	0,061 m ²	0,009 m ²	3,48E-05	4,94E-05	3,963E-05	2,31E-11		2,6E-09	9,8E-08
7250	189	0,101 m ²	0,012 m ²	5,64E-05	8,59E-05	4,944E-05	4,85E-11			
7250	189	0,169 m ²	0,015 m ²	9,22E-05	8,80E-05	1,071E-04	2,22E-10			
7250	189	0,255 m ²	0,018 m ²	1,37E-04	1,44E-04	1,248E-04	1,41E-10			

4344

In der Tab. 12 befinden sich in der linken Spalte die Zahlen 1 bis 22, die sich auf die Tab. 12 beziehen.

Tab. 12: Bezeichnung der Formeln

Spalte	Formel	Beschreibung
1	∅	Durchmesser in Zentimeter Schritten
2	A	Fläche
3	U	Umfang
4	A/U	Verhältnis Fläche zu Umfang
5	A1	Fläche der Gesamfläche weniger dem Randstreifen
6	A2	Fläche des Randstreifen von 1 cm Stärke
7	r1	längenbezogener Strömungswiderstand durch A1
8	r2	längenbezogener Strömungswiderstand durch A2
9	$r_{eff} = \frac{A}{\frac{A_1}{r_1} + \frac{A_2}{r_2}}$	längenbezogener Strömungswiderstand
10	$\frac{A}{r_{eff}}$	für den Vergleich von gerechnet zu gemessen
11	A _{Probe} /U _{Probe}	Verhältnis Fläche zu Umfang der gemessenen Proben
12	$r = \frac{\Delta p * A}{qv * d}$	längenbezogener Strömungswiderstand der gemessenen Proben
13	r1	längenbezogener Strömungswiderstand durch A1
14	r2	längenbezogener Strömungswiderstand durch A2
15	A1 _{Probe}	Fläche des Randstreifens von 1 cm der gemessenen Probe
16	A2 _{Probe}	Fläche der Gesamfläche weniger dem Randstreifen der gemessenen Proben
17	qv _{Mittel}	Mittelwert Volumenstrom durch den Probenkörper in m ³ /s für die Bestimmung der kleinsten Fehlerquadrate
18	$\frac{A}{r} = \frac{qv * d}{\Delta p}$	für den Vergleich von gerechnet zu gemessen
19	$q_v = \left(\frac{A1_{Probe}}{r_1} + \frac{A2_{Probe}}{r_2} \right) * \frac{\Delta p}{d}$	für die Bestimmung der kleinsten Fehlerquadrate
20		Methode der kleinsten Fehlerquadrate
21	$K2 = \frac{\mu}{r_2}$	Permeabilität des Randstreifens
22	$K1 = \frac{\mu}{r_1}$	Permeabilität der Kernfläche

Die Berechnung der Permeabilität erfolgte ebenfalls durch eine Umformung der Formeln aus DIN EN 29053 [DIN93]. Dafür wurden die Formeln (7), (8) und (9) verwendet. Daraus erhielt man folgende Gleichung (16).

$$\frac{r \cdot d}{A} = \frac{\Delta p}{q_v} \quad (16)$$

Weiters wurde noch eine Gleichung benötigt, in der die Permeabilität vorkommt und diese mit der Gleichung (16) verbunden werden konnte. Dafür eignete sich die Gleichung (6) aus 2.4.2. Um die Gleichung (6) mit der Gleichung (16) gleichsetzen zu können, wurde die Gleichung (6) umgeformt.

$$\frac{\Delta p}{q_v} = \frac{\eta}{A} \cdot \frac{\delta}{K} \quad (17)$$

Diese zwei Gleichungen (16), (17) wurden gleichgesetzt. Durch Kürzen von $\delta = d$ und A und Umformen ergab sich die Formel für die Permeabilität K (18).

$$\frac{\eta}{A} \cdot \frac{\delta}{K} = \frac{r \cdot d}{A} \Rightarrow K = \frac{\eta}{r} \quad (18)$$

Spalte 7 und 8 sind mit 14 und 15 verlinkt. Der Wert in der Spalte 14 kam aus dem Prüfzeugnis des TGM. Hierfür wurden die Werte für eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,05 cm/s benötigt. Daraus ergab sich eine Permeabilität für den Kernbereich von $K_1 = 2,55 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ und für den Randbereich von $K_2 = 9,79 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Die Differenz zwischen K_1 und K_2 beträgt fast zwei Zehnerpotenzen.

5.4 Ergebnisse Permeabilität Isover ROLLINO und RIO

Die Differenz zwischen K_1 und K_2 beträgt fast zwei Zehnerpotenzen.

Tab. 13: Auswertung Permeabilität

Material	Permeabilität Kernbereich K in m ²	Permeabilität Randbereich K in m ²
Isover Rollino 10	1,6*10 ⁻⁹	3,8*10 ⁻⁸
Isover RIO 10	2,6*10 ⁻⁹	9,8*10 ⁻⁸

6 Simulation

Für die Berechnung verfolgen die Programme den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, während natürliche Klimabedingungen herrschen. Hierbei werden die Temperatur und die Feuchte, der direkte und diffuse Sonnenlichteinfluss, das Windaufkommen, die Verdunstungskälte sowie die Sorptionen und die Kapillarität der Baustoffe berücksichtigt. Diese Klimadaten eines Jahres werden als Stundenwerte zur Berechnung benötigt. Bei der Simulationsberechnung wird das Bauteil und seine Schichtenfolge im Programm aufgenommen und in einem mehrjährigen Verlauf getestet und analysiert.

6.1 HAM4D_VIE

Um eine Bauteilsimulation durchführen zu können, wurde das Programm HAM4D_VIE verwendet.

Die Geometrie der verschiedenen Bauteile wurde mittels eines Gitterrasters definiert, dadurch ergaben sich Blöcke. Dieses Grobgitter konnte mittels eines Skalierungsfaktors unterteilt werden. Dadurch veränderten sich die Zellengrößen im Bereich des Grobgitters, wobei die Gitterzellen in Bereichen starker Änderungen feiner angeordnet werden konnten. Den definierten Blöcken musste noch das jeweilige Material zugewiesen werden. Hierfür wurde eine Materialdatei in das Inputfile eingelesen. Die Materialdatei enthielt verschiedene Materialkennwerte wie z.B. Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c , Wärmeleitfähigkeit λ etc.: dadurch wurden die verschiedenen Materialien definiert. Mittels HAM4D_VIE ließ sich das Verhalten der Bauteile von ein-, zwei- als auch dreidimensionalen Räumen beurteilen. Für die Beurteilung der Flachdächer lieferte die Berechnung mittels eines zweidimensionalen Modells hinreichend genaue Ergebnisse, deshalb wurde auf die Berechnung mittels eines dreidimensionalen Modells verzichtet.

6.2 Glaser

Die Berechnung von Feuchteströmen in Konstruktionen kann unterschiedlich erfolgen. Unter anderem gibt es das Verfahren nach Glaser und Computermodelle.

Das Verfahren nach Glaser, benannt nach dem Bauphysiker Prof. Dr. Ing. Helmut Glaser, stellt ein Näherungsverfahren dar.

Folgende Annahmen, die dem Verfahren zugrunde liegen, müssen berücksichtigt werden [RIC10]:

- Es findet keine Durchströmung statt, das Bauteil ist luftdicht.
- Es werden keine hygroskopischen Materialien verwendet und es erfolgt kein Kapillarwassertransport.
- Feuchtigkeit, die bei der Errichtung entstand, ist ausgetrocknet, das Material ist daher trocken. Und es erfolgt auch keine weitere Feuchtigkeitszufuhr durch Regen, durch auftretende Bauschäden, durch falsche Installationen usw.
- Mithilfe des Klimaregionalmodells ist das Außenklima für den gesamten Nachweis zu ermitteln. Auch bei der Wohnungsnutzung verwendet man ein normiertes Verfahren, mit dem die relative Luftfeuchte bestimmt werden kann.

Das Glaser-Verfahren stellt ein monatsweises stationäres Berechnungsverfahren dar und kann für alle Dachkonstruktionen außer für Gründachkonstruktionen verwendet werden: in der DIN 4108-3 wird darauf hingewiesen. Das Verfahren nach Glaser kann weder materialspezifische noch konstruktionsbedingte Einflüsse berücksichtigen, ebenso wenig lage- und klimabedingte Bedingungen. Genauere Berechnungen liefern computerunterstützte instationäre Berechnungen.

Grenzen von Glaser:

Beim Glaser-Verfahren kann die Feuchtigkeitsanreicherung durch die Diffusion in Gebäuden bzw. Gebäudeteilen näherungsweise ermittelt werden. In einer bauschadensfreien Konstruktion ist die Tauwassermenge in kapillar nicht wasseraufnahmefähigen Schichten kleiner als $0,5 \text{ kg/m}^2$, und auch im Sommer ist die Verdunstungsmenge nicht größer als die Tauwassermenge im Winter. Befindet sich hingegen am Ende der Verdunstungsperiode ein noch so kleiner Tauwasserrest im Bauteil, so kann sich dieser Wasserrest über Jahre hinweg zu einer beträchtlichen Menge ansammeln, und so entstehen durch die Durchfeuchtungen unweigerlich schwere Bauschäden. Heute werden aufgrund der Einschränkungen des Glaser-Verfahrens häufiger rechengestützte Simulationen verwendet, diese berücksichtigen auch die instationären Bedingungen. Diese rechengestützten Simulationen werden auch gerne verwendet, wenn eine Konstruktion nach dem Glaser-Verfahren im Bezug auf Tauwasser kritisch gesehen werden muss. Denn das Glaser-Verfahren ist ein sogenanntes eindimensionales Verfahren.

6.3 Vergleich Glaser und HAM4D_VIE

Der Dachaufbau, Abb. 38, wurde mittels Glaser-Verfahren nachgerechnet.

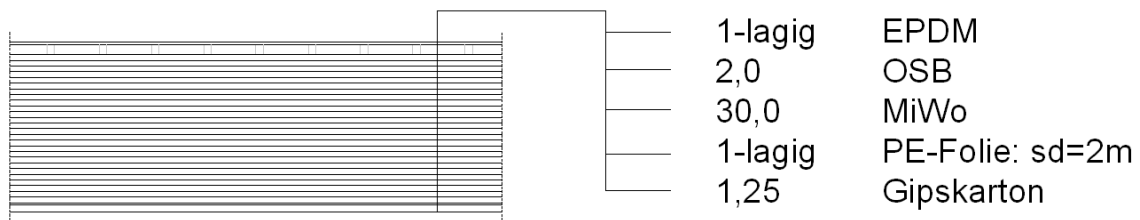


Abb. 38: Darstellung des Aufbaus für HAM4D_VIE

Danach wurde versucht, dieselben Werte mittels einer eindimensionalen HAM4D_VIE-Berechnung für die Temperatur und für das Kondensat zu bekommen. Im Eingabefile wurden die Wärmeleitung und die Diffusion berücksichtigt. Glaser berücksichtigt auch keine Anfangsfeuchte. Die Anfangsfeuchte wird im Eingabefile berücksichtigt und für Gipskarton und OSB-Platte mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 0,1 % angenommen, für die restlichen Materialien wurde eine relative Luftfeuchtigkeit von 10 % angenommen.

Der Wärmeübergangswiderstand innen wurde im Glaser mit 0,25 m²K/W verwendet, daraus ergibt sich ein α_{ci} von 4 W/m²K mit einem α_r von 0 W/m²K. Für den Wärmeübergangswiderstand von 0,04 m²K/W im Glaser ergibt sich ein α_{ce} von 20 W/m²K. Diese Werte wurden in das Klimafile eingetragen.

$$R_{si} = \frac{1}{\alpha_{ci} + \alpha_r} \quad (19)$$

$$R_{se} = \frac{1}{\alpha_{ce} + \alpha_r} \quad (20)$$

R_s Wärmeübergangswiderstand [m²K/W] i ... innen; e ... außen

α_c konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]

α_r Strahlungswärmeübergangskoeffizient [W/m²K]

Der Feuchteübergangskoeffizient ist gleich definiert wie der Wärmeübergangskoeffizient. Dieser Feuchteübergangskoeffizient gibt die Übertragung von Oberflächenfeuchte an den angrenzenden Luftraum wieder. Dieser Koeffizient wird von Glaser nicht berücksichtigt, das heißt, bei Glaser ist der Wert β_{ph} unendlich groß. Dies muss für den Vergleich von Glaser mit HAM4D_VIE auch berücksichtigt werden, das geschieht, indem für β_{ph} eine große Zahl verwendet wird. β_{ph} wird in den beiden Klimadateien verwendet, der Wert wurde auf 100.000 geändert.

$$q_{\text{surf,v}} = \beta \cdot (p_{\text{air}} - p_{\text{surf}}) \quad (21)$$

$q_{\text{surf,v}}$	Massenstrom [kg/s]
β_{Ph}	physikalischer Feuchteübergangskoeffizient [kg/s Pa]
p_{air}	Wasserdampfkonzentration an der Oberfläche [Pa]
p_{surf}	Konzentration in großer Entfernung zur Wand [Pa]

Die Werte für das Außen- bzw. Innenklima und die Werte für die relative Luftfeuchtigkeit wurden für die Stundenwerte für das jeweilige Monat gleich angenommen. In der Tab. 14 befindet sich die jeweilige erste Zeile für das gemittelte Klima im Jänner für innen und außen. Danach wurde ein Jahr simuliert.

Tab. 14: Temperaturfile innen und außen für den Jänner

	zeit	temp	alphaC	tempS	eps	rad	absG	phi	betaV	suc	qL	druck
innen Jänner	1	22,043159	4	22,043159	0,9	0	0,5	0,4021711	100000	0	0	0
außen Jänner	1	-4,700936	20	-4,700936	0,9	0	0,5	0,8771701	100000	0	0	0

Die Stundenwerte für des Kondensat über alle 25 Schichten wurde aufsummiert, und die Differenz der Stunde mit der Summe der Stunde davor gebildet. Dadurch wurde ersichtlich, ob die Werte weiter abnehmen oder konstant bleiben. Diese Werte wurden im folgenden Diagramm aufgetragen. Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, ob sich das Kondensat schon ausgeglichen hat, was an der horizontalen Linie erkennbar ist.

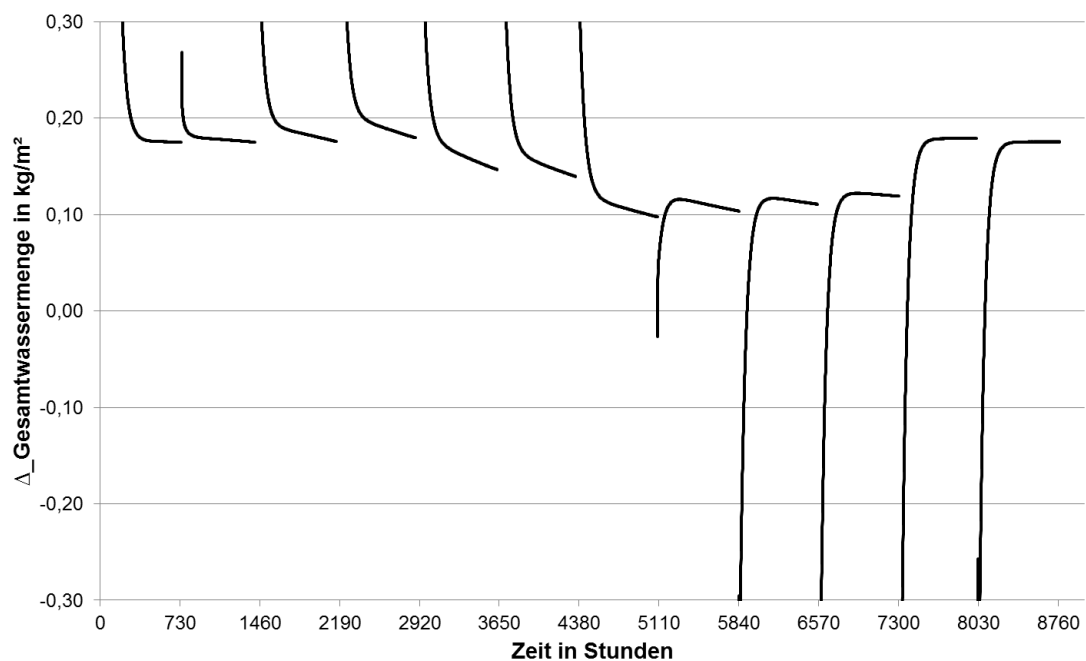


Abb. 39: $\Delta_{\text{Gesamtwassermenge}}$ in kg/m^2 bezogen auf Monate in Tage

Diese Differenzwerte wurden zur besseren Übersicht in die Tab. 15 eingefügt, mit dieser ist ein Vergleich von Glaser und HAM4D_VIE möglich. Die erste Zeile gibt die Stundenwerte an, welche mit Glaser berechnet wurden. In der zweiten Zeile befinden sich die Werte aus der HAM4D_VIE-Berechnung, wobei das gemittelte Klima innen und außen für das jeweilige Monat verwendet wurde. Da bis auf Oktober, November und Dezember keine Werte gleich sind, wurde im Wetterfile die Temperatur für den jeweiligen Monat für das ganze Jahr gleich angenommen. Die Simulation wurde dann für ein Jahr, 8.760 Stunden, durchgeführt, die Werte wurden auch mit Glaser verglichen, dabei wurde festgestellt, dass sich ein Trend in Richtung der Werte von Glaser ergibt.

Tab. 15: Vergleich der Gesamtwassermenge von Glaser mit HAM4D_VIE

wat[g/m²]	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Glaser	0,1659	0,1282	0,0777	0,0891	-0,0272	-0,0115	-0,0846	-0,0174	0,0505	0,1113	0,176	0,1765
HAM4D_VIE Monat	0,1755	0,1751	0,1761	0,18	0,1472	0,1399	0,0981	0,0535	0,1112	0,1198	0,1797	0,1763
HAM4D_VIE 8760h	0,1636	0,1283	0,0828	0,0904	0,0497	0,0549	0,036		0,0759			
HAM4D_VIE 9249h				0,0891								
HAM4D_VIE 10308h			0,0777									
HAM4D_VIE 17520h					0,0231							

6.4 Verwendete Flachdächer

Für die Simulation wurden zwei verschiedene Dachaufbauten verwendet. Die beiden Aufbauten sind gleich, mit Ausnahme, dass der zweite Aufbau zusätzlich über eine Begrünung verfügt. Die zwei Varianten unterscheiden sich weiters hinsichtlich der verwendeten Dampfbremse: Flachdach 1 und 2 bestehen aus einer PE-Folie, und für die Varianten 3 und 4 wurde eine feuchteadaptive Dampfbremse (FADAB) verwendet. Als FADAB wurden Produkte der Firma ProClima verwendet. Zum Einsatz kamen die Hochleistungs-Dampfbremse Intello und die Dampfbremse DB+.

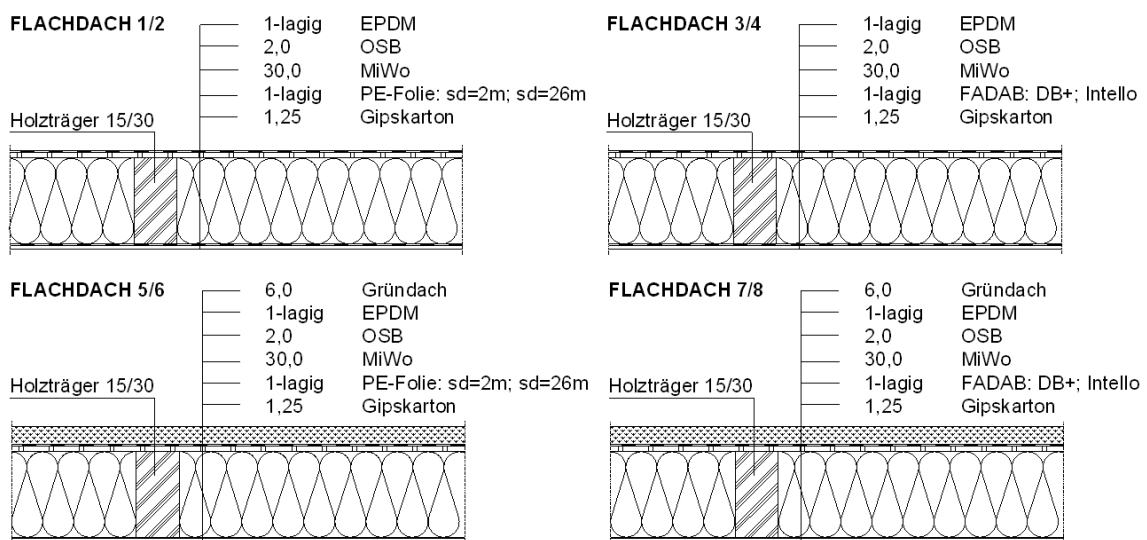


Abb. 40: Flachdachvarianten

6.5 Klima

6.5.1 Innenklima

Das verwendete Innenklima hat eine minimale Lufttemperatur von 22 °C im Jänner und eine maximale Lufttemperatur von 26 °C im Juli; die relative Luftfeuchtigkeit beträgt im Jänner 40 % und im Juli 60 %.

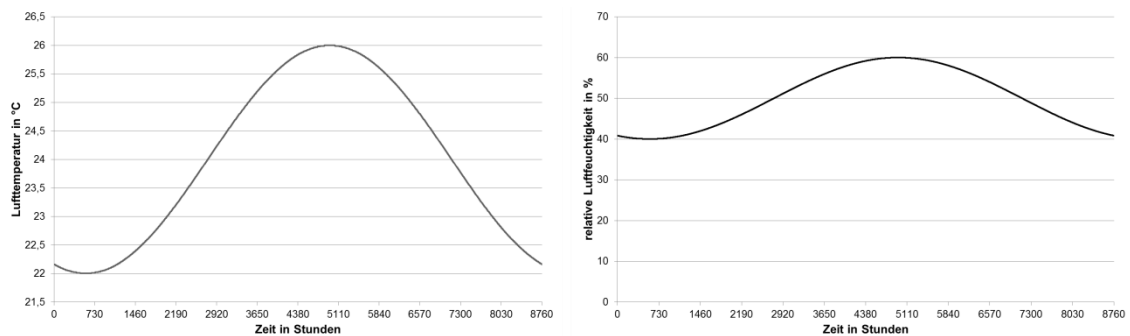


Abb. 41: Innenklima: links die Lufttemperatur und rechts die relative Luftfeuchtigkeit

6.5.2 Außenklima

Im folgenden Diagramm, Abb. 42, zeigt die durchgehende Linie die Lufttemperatur für das Außenklima in Wien Innere Stadt und die strichlierte Linie das Innenklima an. Wien Innere Stadt liegt auf einer Seehöhe von 171 m und zeichnet sich durch geringe Niederschlagsmengen und längere Trockenperioden aus. In Wien ist der Winter verglichen mit den anderen Bundesländern milder.

Es ergibt sich ein Jahresmittelwert für die Lufttemperatur von 12 °C.

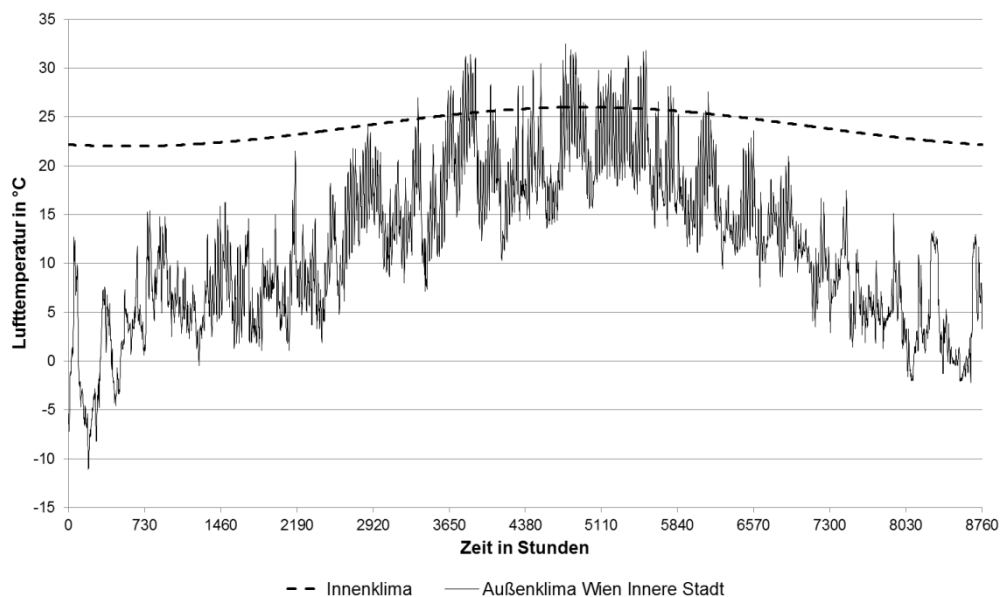


Abb. 42: Außen- und Innenklima

Eine wesentlich höhere Dachoberflächentemperatur ergibt sich durch die Sonnen- und Globalstrahlung im Vergleich zur Lufttemperatur. Bei den feuchtevariablen Dampfbremsen entsteht eine Austrocknung nach innen, wenn die Außentemperatur (durchgehende Linie) die Innentemperatur (strichlierte Linie) übersteigt.

6.6 Verwendete Materialien

6.6.1 Feuchteadaptive Dampfbremse

6.6.1.1 FADAB und DB+

Für dieses Material wurden Klimamembranen, wie schon erwähnt, der Firma ProClima, mit der Bezeichnung DB+ und Intello verwendet. Für diese Materialien wurden die Produktdatenblätter [PRO12b] verwendet, um die materialspezifischen Werte zu bekommen. In dem Paper [NUS10] befindet sich ein Diagramm, in dem der s_d -Wert von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt. Aus diesem konnte der Dampfdiffusionswiderstand für 25 %, 80 % und 100 % berechnet werden.

Mit diesen Werten konnte man die Materialdaten für die Materialdatei definieren. Dabei musste die Dicke der Klimamembran auf 1 cm umgerechnet werden, dadurch ergab sich eine andere Dampfdiffusionswiderstandszahl, die für das HAM4D_VIE notwendig war. Die Werte stammen aus den Produktdatenblätter der Firma ProClima [PRO12b].

6.6.2 PE-Folie

Die materialspezifischen Werte für die „PE_1cm_2m“ wurden dem Bauphysik-Kalender [FOU08] mit einer Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von $\mu=200$ entnommen. Dieselben Werte wurden ebenfalls für die „PE_1cm_26m“ verwendet, bis auf die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, die mit $\mu=2600$ angenommen wurde.

6.6.3 EPDM (Ethylene-Propylene-Diene-Monomer) Dichtungsbahn

Für den s_d -Wert wurden 87 m genommen. [NUS10] Die beiden EPDM in der Materialdatei unterscheiden sich im s_d -Wert, „EPDM_1cm“ mit einem s_d -Wert von 87 m; „EPDM_1cm_2m“ mit einem s_d -Wert von 26 m.

6.6.4 MiWo - Rand

Bei den Berechnungen und Simulationen wurde immer mit RIO10 gearbeitet.

6.6.5 ÖNORM EN ISO 13788

Es wurden vier Aufbauten (Tab. 16) mit dem Programm EN13788 [BED02] berechnet. Dabei wurden die Aufbauten dahingehend kontrolliert, ob sie in einem Jahr austrocknen und die maximale Tauwassermenge unter $0,5 \text{ kg/m}^2\text{K}$ bleibt. Für die Berechnung wurde das Klima Nord verwendet.

Tab. 16: Aufbau A, B, C und D

Aufbau A	d m	λ W/mK	μ -	s_d m	Aufbau C	d	λ	μ	s_d
EPDM	0,01	1,0	8700	87,0	EPDM	0,01	1,0	8700	87,0
OSB Platte	0,02	0,13	165	3,3	OSB Platte	0,02	0,13	165	3,3
Mineralwolle	0,30	0,042	1	0,3	Mineralwolle	0,30	0,042	1	0,3
PE 2m	0,01	2,3	200	2,0	FADAB DB+	0,01	0,13	410	4,1
GKF Platte	0,02	0,1	11	0,22	GKF Platte	0,02	0,1	11	0,22
Aufbau B	d m	λ W/mK	μ -	s_d m	Aufbau D	d	λ	μ	s_d
EPDM	0,01	1,0	2000	20,0	EPDM	0,01	1,0	8700	87,0
OSB Platte	0,02	0,13	165	3,3	OSB Platte	0,02	0,13	165	3,3
Mineralwolle	0,30	0,042	1	0,3	Mineralwolle	0,3	0,042	1	0,3
Folie 26m	0,01	2,3	2600	26,0	FADAB INTELL	0,01	0,13	1000	10,0
GKF Platte	0,02	0,1	11	0,22	GKF Platte	0,02	0,1	11	0,22

Bei den Dachaufbauten A, C und D werden die zwei Kriterien nicht erfüllt. Daher wurde ein weiterer Aufbau berechnet, der diese Kriterien erfüllt, hierbei wurde statt der PE mit einem s_d -Wert von 2 m und einer EPDM mit einem s_d -Wert von 87 m eine Folie mit einem s_d -Wert von 26 m und eine EPDM mit einem s_d -Wert von 20 m verwendet. In der folgenden Abb. 43 werden links der Aufbau A und rechts der Aufbau B dargestellt.

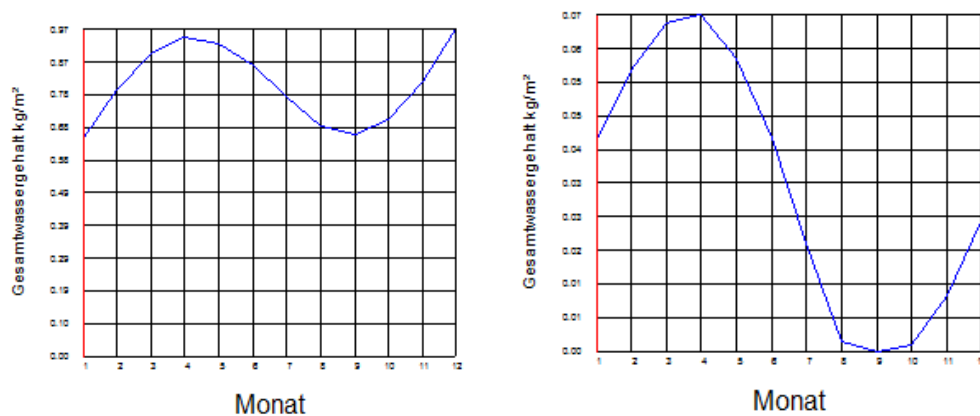


Abb. 43: Darstellung von Aufbau A und B mittels Programm EN13788 [BED02]

6.7 Analyse der Ergebnisse aus der Bauteilsimulation

Untersucht wurde, welche Auswirkung die Berücksichtigung der Luftströmung in HAM4D_VIE auf die Simulation hat. Weiters wurde versucht, die Zelle zu bestimmen, an welcher das Risiko für Schimmelpilz und/oder Kondensat ein Maximum aufweist. Diese Zelle wird als maßgebende Zelle bezeichnet. Mit Hilfe dieser maßgebenden Zelle ist dann bekannt, in welchem Bereich der Dämmung die Feuchtigkeit gemessen werden soll. Um das zu beantworten, wurden für die Simulation die in 6.4 erwähnten Dachaufbauten verwendet.

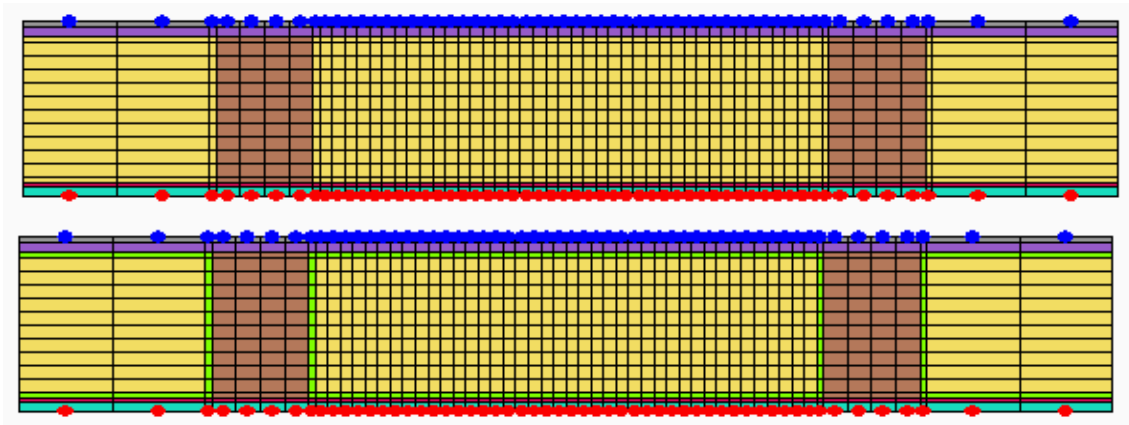


Abb. 44: Materialdarstellung aus HAM4D_VIE

Die Abb. 44 zeigt die Materialdarstellung, wie sie in HAM4D_VIE ersichtlich ist. Bei der oberen Darstellung wird die ermittelte Permeabilität für den Randstreifen nicht berücksichtigt. Hingegen wird bei der unteren Darstellung die ermittelte Permeabilität berücksichtigt, dies ist durch den grünen Randstreifen ersichtlich.

6.7.1 Gesamtwassergehalt

Die zwei folgenden Abbildungen stellen den Gesamtwassergehalt dar. Dieser wurde für fünf Jahre simuliert und für alle Flachdachvarianten dargestellt. Daraus ist ersichtlich, ob sich die Feuchtigkeit im Testbauteil akkumuliert bzw. der Gehalt der Gesamtfuchte im getesteten Zeitraum erhöht oder ob das Objekt austrocknet. Wie hoch die Trocknungsreserve der Konstruktion ist, ist nicht erkennbar. Dadurch kann die Gebrauchstauglichkeit einer Konstruktion festgestellt werden. [PRO12a]

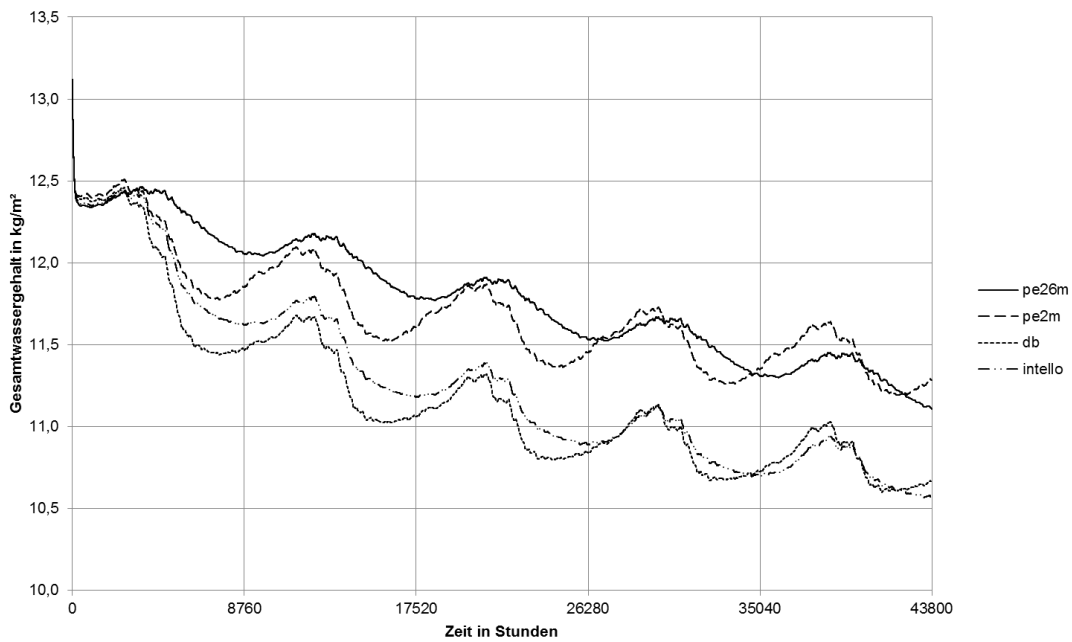


Abb. 45: Gesamtwassergehalt Flachdach 1, 2, 3 und 4

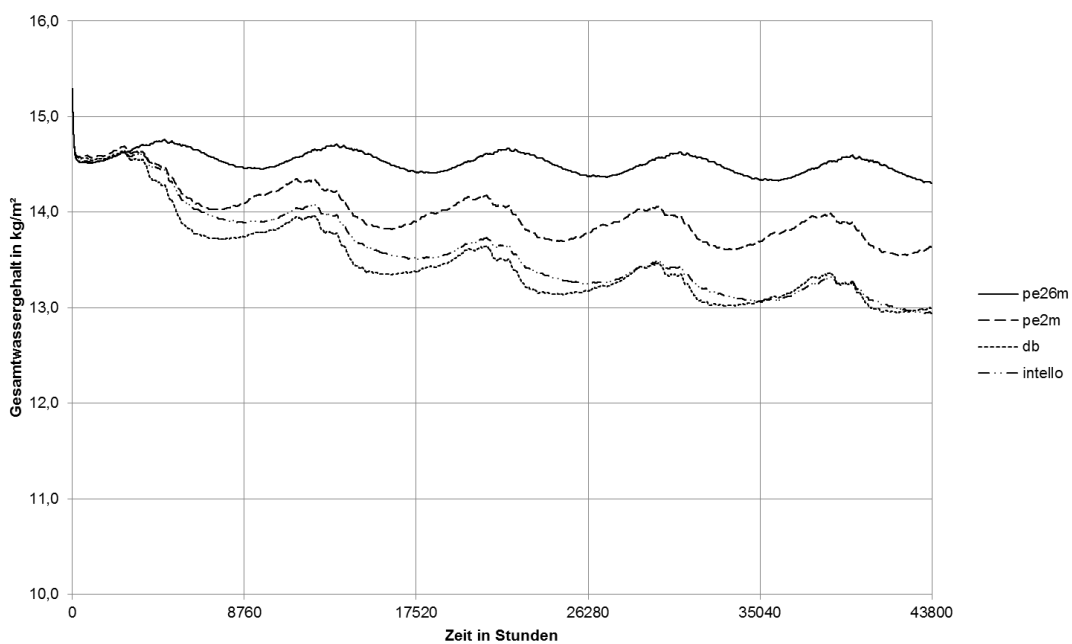


Abb. 46: Gesamtwassergehalt Flachdach 5, 6, 7 und 8

6.7.2 Auswertung für Flachdach 1, 2, 3 und 4

Die folgende Abbildung zeigt die Gittereinteilung für das Flachdach ohne Begrünung.

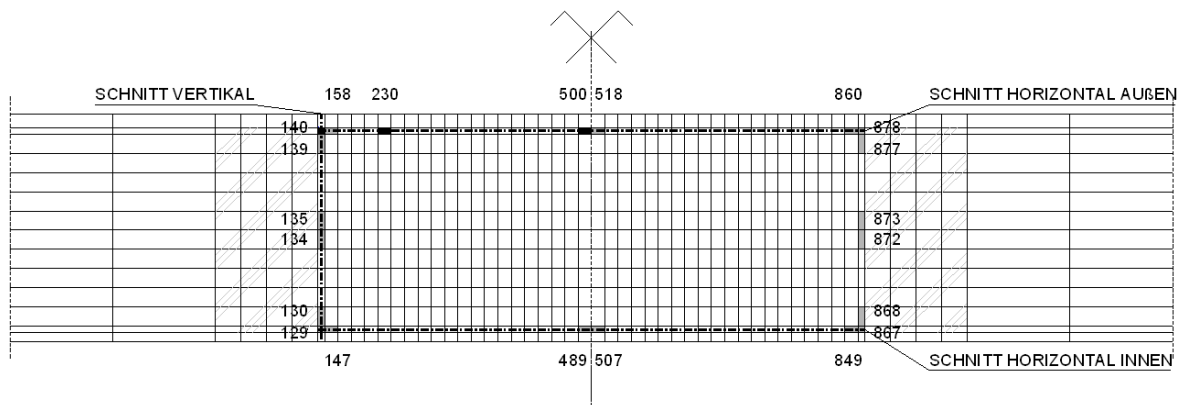


Abb. 47: Gittereinteilung Flachdach 1, 2, 3 und 4

6.7.2.1 Ablauf der Untersuchung:

- Feststellung, ob HAM4D_VIE überhaupt einen Unterschied bei der Berechnung mit eingeschalteter Luftströmung macht.
- Bestimmung der maßgebenden Zelle bzw. des maßgebenden Bereichs.
- Vergleich der einzelnen Zellen untereinander.

Simulation in HAM4D_VIE:

Es ist möglich, die Luftströmung während der Simulation darstellen zu lassen. Diese Einstellung befindet sich im Programm HAM4D_VIE unter Ansicht → Feldgrößen → Luftströmung. Hier wird auch die Richtung der Luftströmung mittels Vektoren dargestellt.

6.7.2.2 Darstellung des Schimmelrisikos

Nach der Simulation der Varianten mussten die einzelnen Zellen der Varianten miteinander verglichen werden. Für die Gegenüberstellung wurden die Zellen in einem Diagramm dargestellt. Für die Darstellung wurde auf der Abszisse die Temperatur in Grad Celsius und auf der Ordinate die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent gewählt. Zusätzlich wurde im Diagramm eine Linie dargestellt, welche die Grenze für das Schimmelrisiko angibt. Diese Linie hat folgende Bedingung [OJA10]:

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100,0; & \text{when } T \leq 20 \\ RH_{min}; & \text{when } T > 20 \end{cases} \quad (22)$$

RH_{crit} kritische relative Luftfeuchtigkeit [°C]

T Temperatur [°C]

Diese Bedingung wird im Diagramm als schwarze Linie dargestellt. Zuerst wurden die Zellen 140, 230 und 500 der Variante mit eingeschalteter Luftströmung gegenübergestellt.

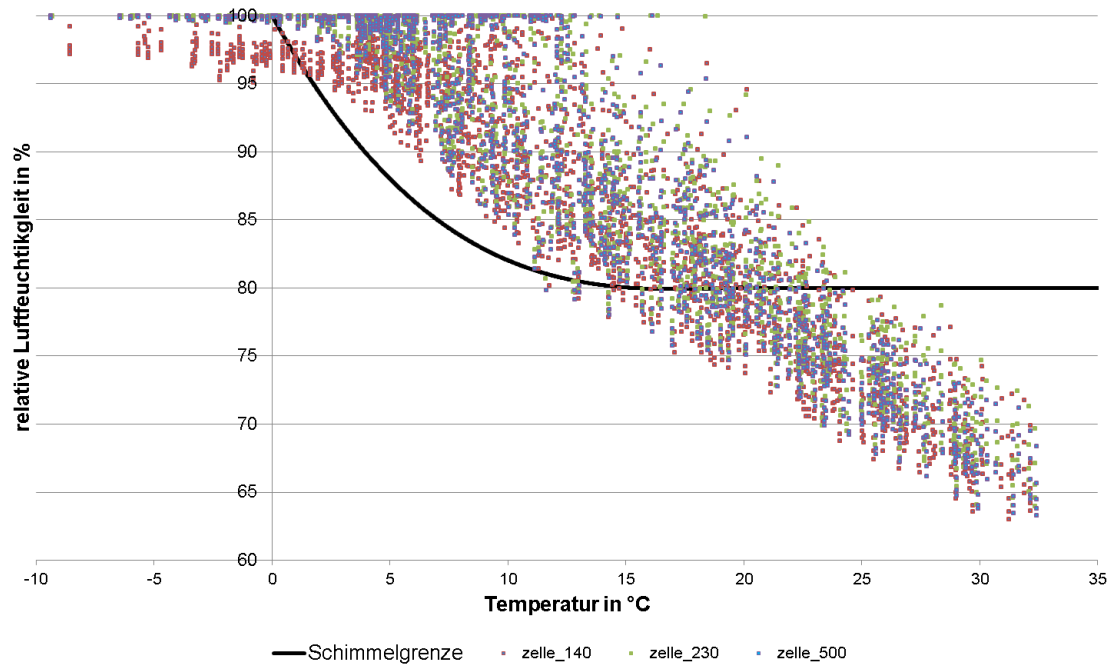


Abb. 48: Tagesmittelwerte der Zellen 140, Zelle 230 und Zelle 500, 5 Jahre Pro Klima DB+; Luftströmung 1

Anhand Abb. 48 konnte festgestellt werden, dass die Feuchtigkeit von Zelle 140 zu Zelle 230 und zu Zelle 500 zunimmt. Die Abb. 48 stellt einen Zeitraum von fünf Jahren dar.

6.7.3 Vergleich Luftströmung ein und aus

Die Simulation wurde für einen Zeitraum von fünf Jahren durchgeführt. Für die weitere Auswertung wurden die Jahre 3, 4 und 5 getrennt betrachtet. Diese Auswertung bezieht sich auf FADAB DB+.

Zuerst wurde eine Simulation durchgeführt, bei welcher die Luftströmung nicht berücksichtigt wurde, danach folgte eine Simulation mit Berücksichtigung der Luftströmung. Bei diesen beiden Varianten wurde für die Wärmedämmung dieselbe Permeabilität verwendet. Danach wurden die zwei Simulationen gegenübergestellt. Für den Vergleich wurden verschiedene Zellen beider Varianten miteinander verglichen. Es konnte ein Unterschied festgestellt werden. Mit dieser Erkenntnis konnte die dritte Simulation mit FADAB DB+ durchgeführt werden. Diese Variante unterscheidet sich von den anderen dadurch, dass der Randstreifen aus einer anderen Permeabilität besteht.

Die drei Varianten werden in Abb. 49 dargestellt. Die Abbildung stellt das erste Jahr der Zelle 140 dar, dies ist ein Ausschnitt aus dem Diagramm der Abb. 48. Es ist ein Unterschied erkennbar. Dies zeigt, dass sich die einzelnen Datenpunkte der drei Varianten unterscheiden.

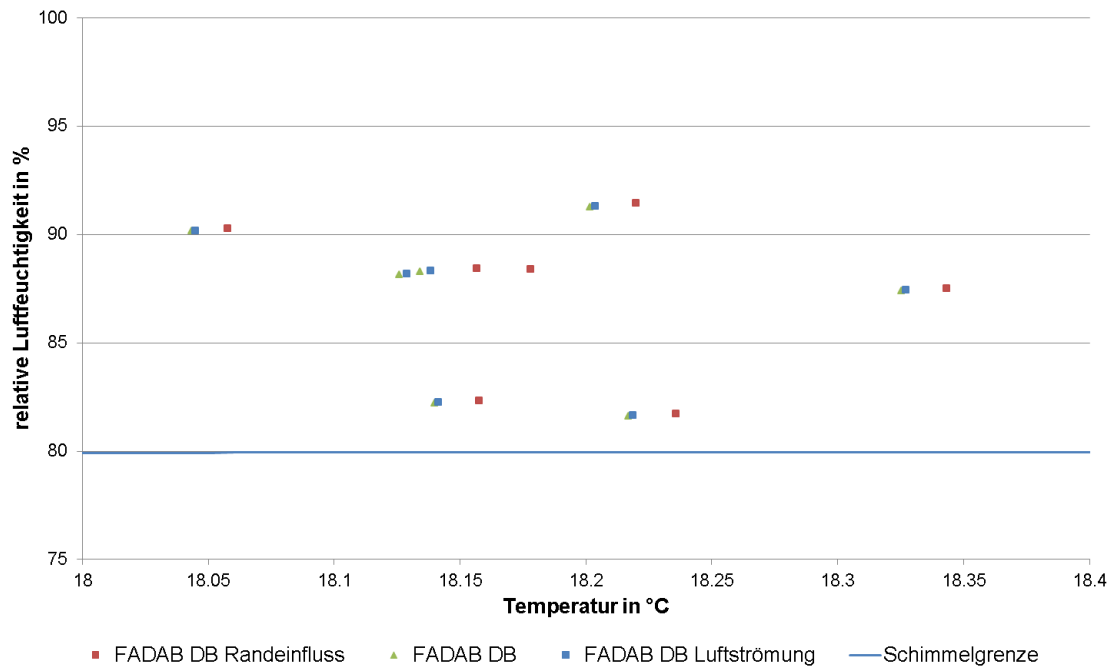


Abb. 49: Erstes Jahr, Zelle 140

Für die nächste Abbildung wurde die Anzahl der Stunden ermittelt, die oberhalb der Schimmelgrenze liegen. Die Schimmelgrenze stellt die Gleichung (26) dar. Diese Abb. 50 lässt erkennen wie sich die Anzahl der Stunden, welche über der Schimmelgrenze liegen erhöht, wenn in HAM4D_VIE die Parameter für die Simulation verfeinert werden.

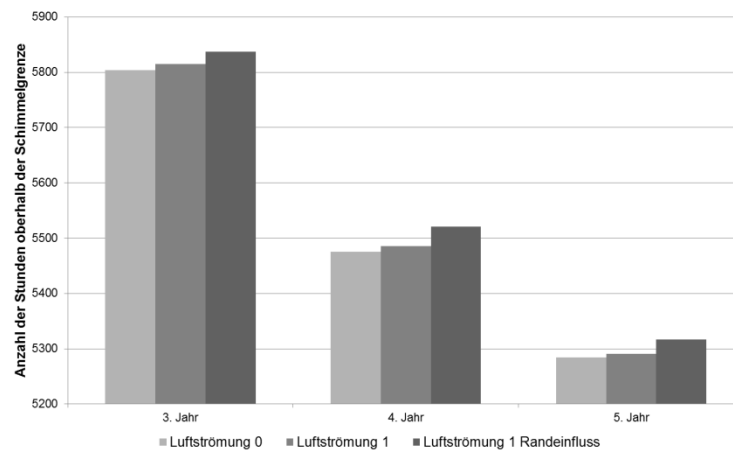


Abb. 50: Vergleich der drei Varianten; Zelle 140

Erklärung:

- Luftströmung 0: In HAM4D_VIE wird keine Luftströmung berücksichtigt.
- Luftströmung 1: In HAM4D_VIE wird die Luftströmung berücksichtigt.
- Luftströmung 1 Randeinfluss: In HAM4D_VIE wird die Luftströmung und die Permeabilität des Randstreifens berücksichtigt.

Auch die Abb. 51 zeigt wie sich die Auswertung ändert, wenn die Parameter verfeinert werden. Konkret wurde diese Abbildung für die Holzart Kiefer mit sägerauer Oberfläche dargestellt. Als Schimmелеmpfindlichkeitsklasse wurde die Klasse „resistent“ verwendet. Die blaue Linie verläuft deutlich oberhalb der anderen Linien, diese Linie stellt die Simulation mit Berücksichtigung der Permeabilität im Randbereich dar.

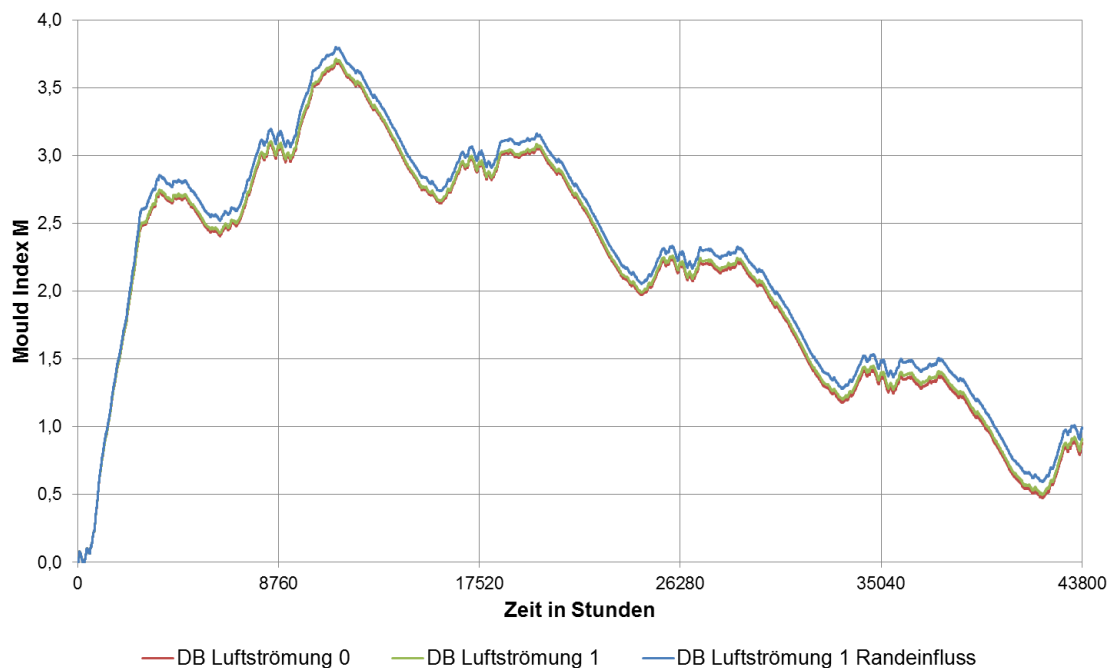


Abb. 51: Darstellung der Varianten in Bezug auf den „Mould Index“

Der Mould Index beschreibt die Wachstumsrate des Schimmels. Die Skalierung reicht von 1 bis 6, wobei 1 eine kleine mikroskopische Menge von Schimmel auf der Oberfläche bedeutet. [OJA11]

6.7.4 Wahl der Zellen

Als Nächstes wurde versucht zu klären, ob die Zellen aus dem Randstreifen auch maßgebend für die Auswertung sind. Dafür wurden verschiedene Schnitte durch den Dachaufbau gelegt. Es wurden drei Schnitte untersucht. Der erste Schnitt geht durch den linken Randbereich, der zweite horizontal durch den oberen Randstreifen und der dritte durch den unteren Randstreifen. Diese Schnitte sind in Abb. 47 eingezeichnet.

A) Schnitt Vertikal:

Es wurde die Simulation von „FADAB DB luftstroemung randeinfluss“ verwendet. Für diesen Aufbau wurde die vertikale Feuchtigkeit im Dachaufbau betrachtet und in der Abb. 52 grafisch dargestellt. Es wurde auch versucht, den Schnitt mit den Maximalwerten zu bekommen. Abb. 52 stellt den Schnitt dar, dabei erkennt man, dass der Randstreifen vor der OSB-Platte die höchste Feuchte besitzt. Die Auswertung zeigt den 23. November.

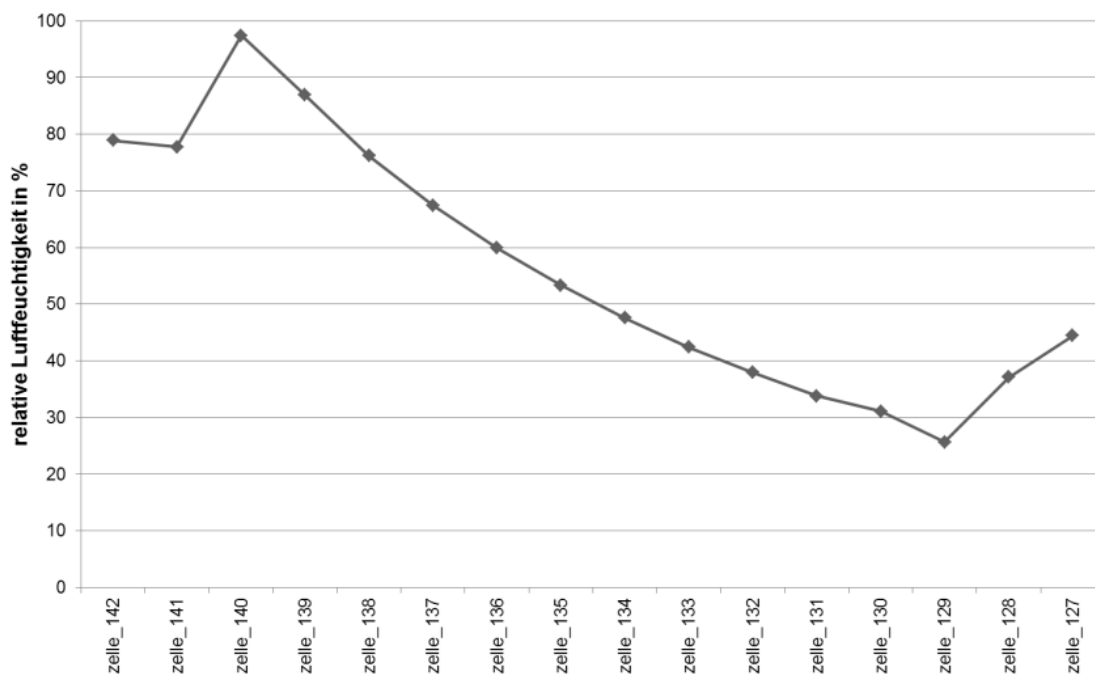


Abb. 52: FADAB Luftströmung DB Randeinfluss 23. November im dritten Jahr Schnitt vertikal

B) Schnitt Horizontal:

Für diese Auswertung wurde dieselbe Simulation wie für den vertikalen Schnitt verwendet. Durch die Auswertung des vertikalen Schnitts konnte schon festgestellt werden, dass sich die maximale Feuchtigkeit im oberen Randstreifen befindet. Trotzdem wurden die Werte für den inneren und den äußeren Randstreifen verglichen.

Für die Auswertung des Schnittes „horizontal außen“ wurden die Daten grafisch dargestellt (Abb. 53; Abb. 54): dargestellt wurde das dritte Jahr. Die maximale Temperatur befindet sich zwischen dem 18. und dem 19. Juli, die minimale Temperatur befindet sich zwischen 8. und 9. Dezember. Die grafische Darstellung reicht von Holzträger zu Holzträger. Die durchgezogene Linie zeigt die maximale und die strichlierte Linie die minimale Temperatur an.

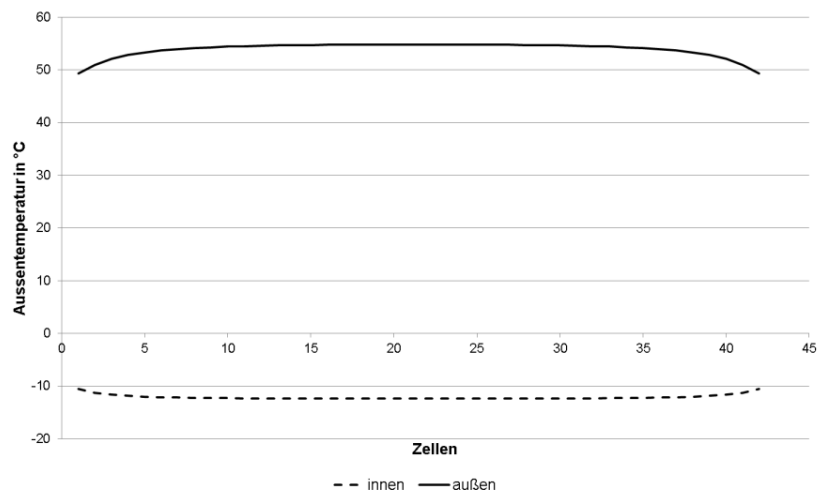


Abb. 53: Maximale und minimale Temperatur im dritten Jahr

Weiters wurde die relative Luftfeuchtigkeit für den 13. Dezember aufgetragen.

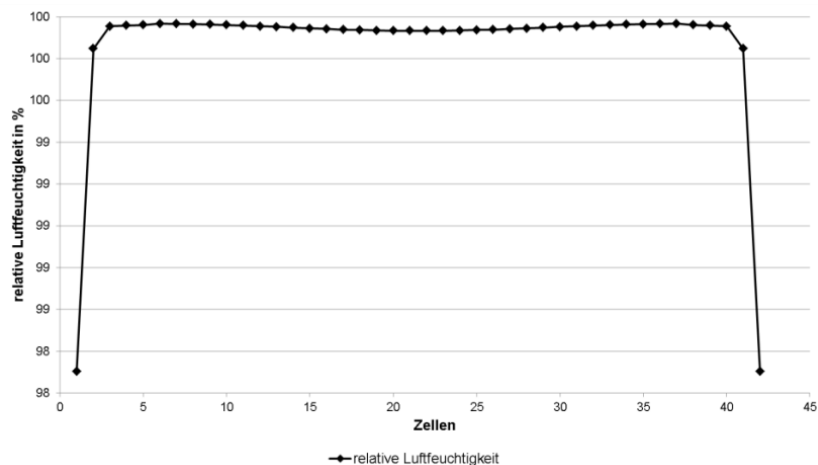


Abb. 54: Relative Luftfeuchtigkeit, im Randstreifen außen

Mit dieser Darstellung wurde versucht, die maßgebende Zelle zu finden, dafür wurde die Kurve verwendet. Diese Kurve ist symmetrisch. Die Kurve steigt von Zelle 140 steil an und besitzt dann bei Zelle 230 ein Maximum. Danach fällt sie bis Zelle 500, 518 (dazwischen befindet sich der Symmetrieschnitt) ab. Die Zelle 230 war für den 13. Dezember im dritten Jahr maßgebend. Die maßgebende Zelle jeder simulierten Stunde verschob sich nach links oder nach rechts von der Zelle 230. Für die Varianten 2, 3 und 4 könnte es möglich sein, dass die maßgebende Zelle links oder rechts von Zelle 230 liegt.

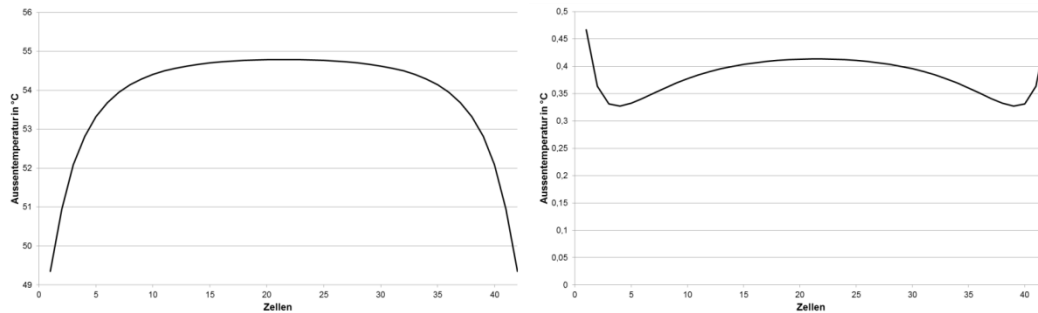


Abb. 55: links: 18. Juli; rechts: 13. Dezember

Auswertung:

Für die weitere Auswertung wurden für die Aufbauten 1 bis 4 folgende Zellen verwendet: die Zelle 500, die sich links von der Symmetrieachse befindet, die Zelle 140, die sich links im Randstreifen befindet, und die Zelle 230, die sich rechts von Zelle 140 befindet. Diese Zellen sind in der Abb. 47 gekennzeichnet.

Die Anzahl der Werte der verschiedenen Zellen, welche oberhalb der Schimmelgrenze liegen, wurden in die Tab. 17 eingetragen. Dadurch lassen sich die Werte vergleichen. Ausgewertet wurden von den simulierten fünf Jahren die Jahre 3, 4 und 5 und das für die Zellen 140, 230 und 500.

Tab. 17 : Vergleich Flachdach 1, 2, 3 und 4

	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr		3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr
DB +	zelle_140	zelle_140	zelle_140		zelle_230	zelle_230	zelle_230	zelle_500	zelle_500	zelle_500
Luftströmung 0	5804	5475	5284	////	6068	5894	5804	6031	5877	5760
A) Luftströmung 1	5815	5486	5291	////	6069	5896	5808	6033	5880	5761
B) Luftströmung 1	5837	5521	5317	////	6083	5910	5835	6042	5893	5782
Differenz A-B	22	35	26	^	14	14	27	9	13	21
Intello										
A) Luftströmung 1	5875	5285	4655	////	6097	5765	5477	6039	5677	5338
B) Luftströmung 1	5908	5335	4719	////	6112	5786	5505	6055	5697	5371
Differenz A-B	33	50	64	^	15	21	28	16	20	33
PE 2m										
A) Luftströmung 1	6664	6570	6506	////	6692	6608	6571	6710	6630	6576
B) Luftströmung 1	6679	6596	6536	////	6709	6627	6581	6714	6647	6590
Differenz A-B	15	26	30	^	17	19	10	4	17	14
PE 26m										
A) Luftströmung 1	6859	6648	6394	////	6788	6590	6389	6796	6606	6373
B) Luftströmung 1	6868	6662	6408	////	6794	6606	6407	6795	6613	6382
Differenz A-B	9	14	14	^	6	16	18	-1	7	9

Die Tab. 17 zeigt die Anzahl der Stunden, welche oberhalb der Schimmelgrenze liegen.

Der grafische Verlauf in der Tab. 17 zeigt, wie sich die Feuchtigkeit vom dritten zum fünften Jahr ändert. Die Anzahl der Stunden, welche oberhalb der Schimmelgrenze liegen, nahmen von Jahr zu Jahr ab. Zusätzlich wurde die Differenz zwischen „Luftströmung ein“ und „Luftströmung ein“ mit Berücksichtigung des Randeinflusses gebildet. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine Differenz zwischen A und B bei Intello in allen drei Zellen stattfindet. Bei DB+ in den Zellen 230 und 500, bei PE2m in Zelle 140. Bei PE26m stieg die Differenz in der Zelle 140 und in der Zelle 230, in der Zelle 500 stieg die Differenz im vierten und fünften Jahr.

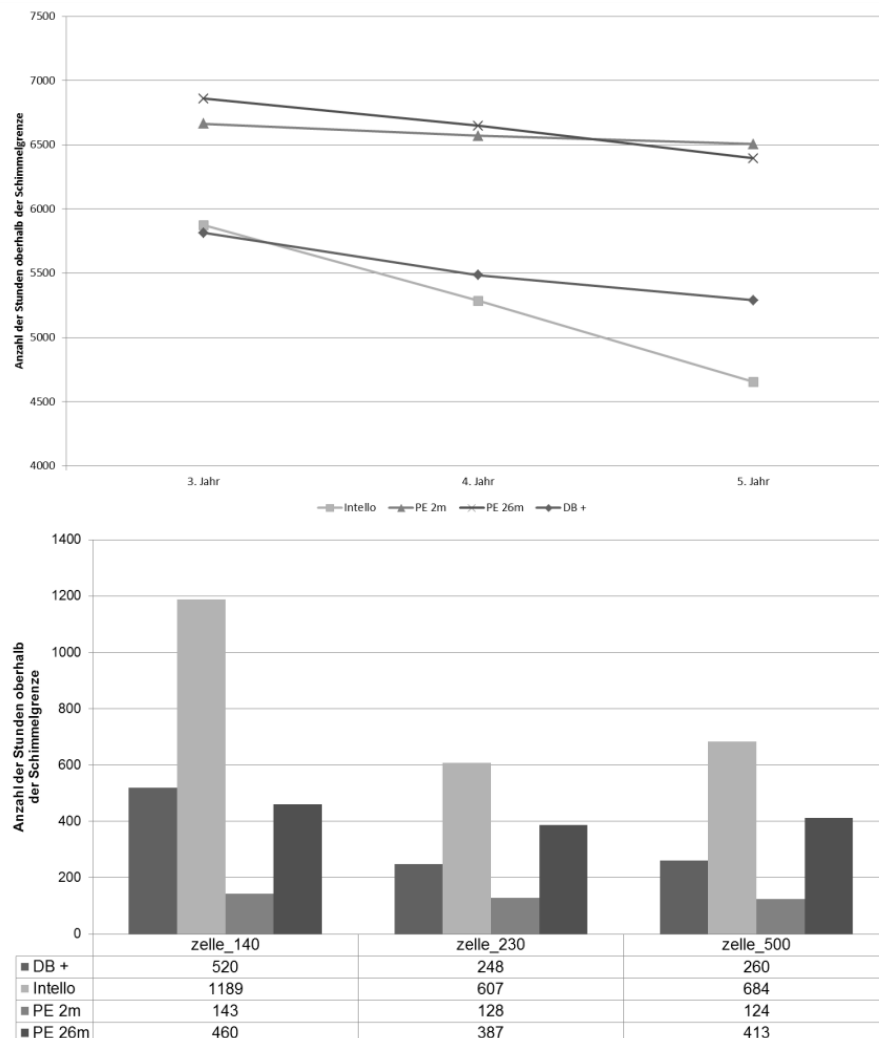


Abb. 56: oben Zelle 140; unten Differenz 3. zum 5. Jahr

Die Abb. 56 oben zeigt die ersten vier Varianten der Zelle 140 bei eingeschalteter Luftströmung. Dabei erkennt man, dass die Abnahme bei ProClima Intello am größten ist. Daraus lässt sich schließen, dass Intello eine größere Rückrocknung besitzt. Die Auswertung bezieht sich auf die Auswertung der Simulation „Luftströmung 1 Randeinfluss“. Diese Abnahme der verschiedenen Varianten findet man in Abb. 56 unten. Dabei wurde die Differenz zwischen dem dritten und fünften Jahr aufgetragen.

6.7.5 Auswertung für Flachdach 5, 6, 7 und 8

Dasselbe wurde auch für die Flachdachvarianten 5 bis 8 durchgeführt. Diese Flachdächer besitzen zusätzlich eine Begrünung. Die Zellenunterteilung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

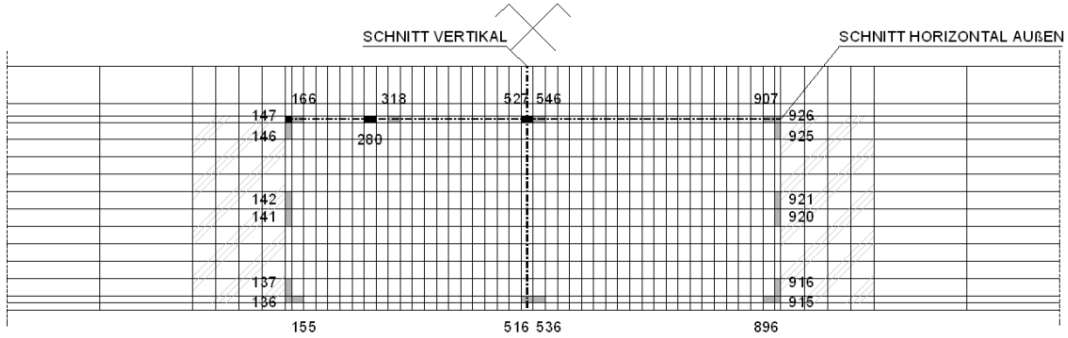


Abb. 57: Gittereinteilung Flachdach 5, 6, 7 und 8

Auch hier wurden verschiedene Schnitte geführt, um eine grafische Darstellung bezüglich des Temperaturverlaufs und der Feuchte zu bekommen. Abb. 58 und Abb. 59 zeigen Auswertungen für die Flachdachvariante 7.

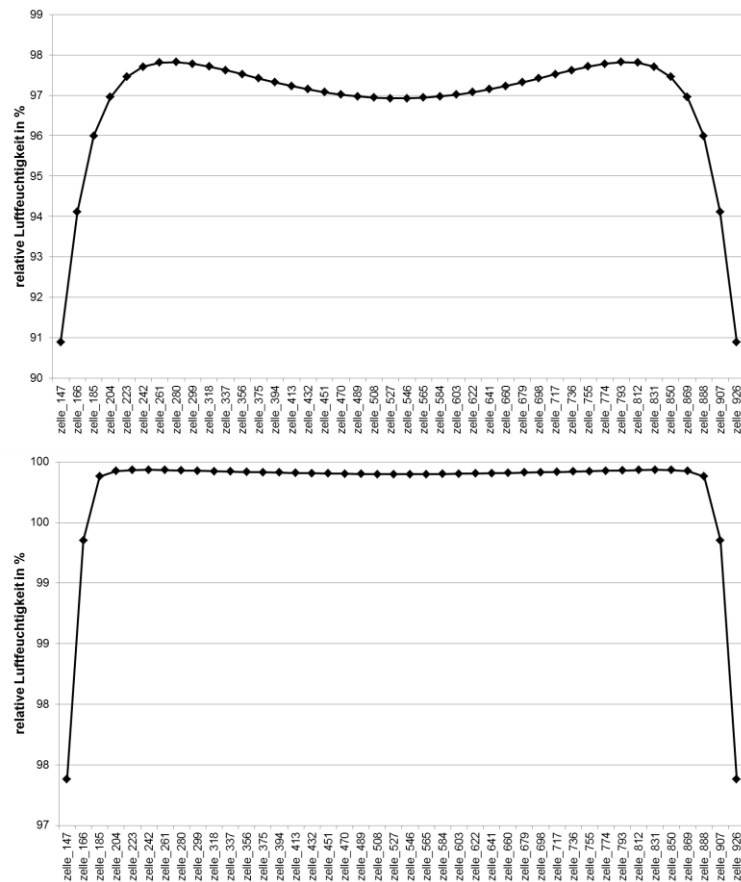


Abb. 58: Schnitt horizontal außen: oben 29. Mai; unten 24. November

In Abb. 58 ist der horizontale äußere Schnitt von Holzträger zu Holzträger dargestellt. Dabei zeigt die obere Abbildung den 29. Mai zwischen 2.00 und 3.00 Uhr und die untere Abbildung den 24. November zwischen 9.00 und 10.00 Uhr. Für die obere Abbildung ist die Zelle 280 und für die untere Abbildung ist die Zelle 242 maßgebend. Daher konnte auch hier nicht die exakte Position der maßgebenden Zelle gefunden werden, aber es kann angegeben werden, dass die maßgebende Zelle zwischen der Zelle 261 und der Zelle 318 wandert. Auch Abb. 58 bezieht sich auf das dritte Jahr.

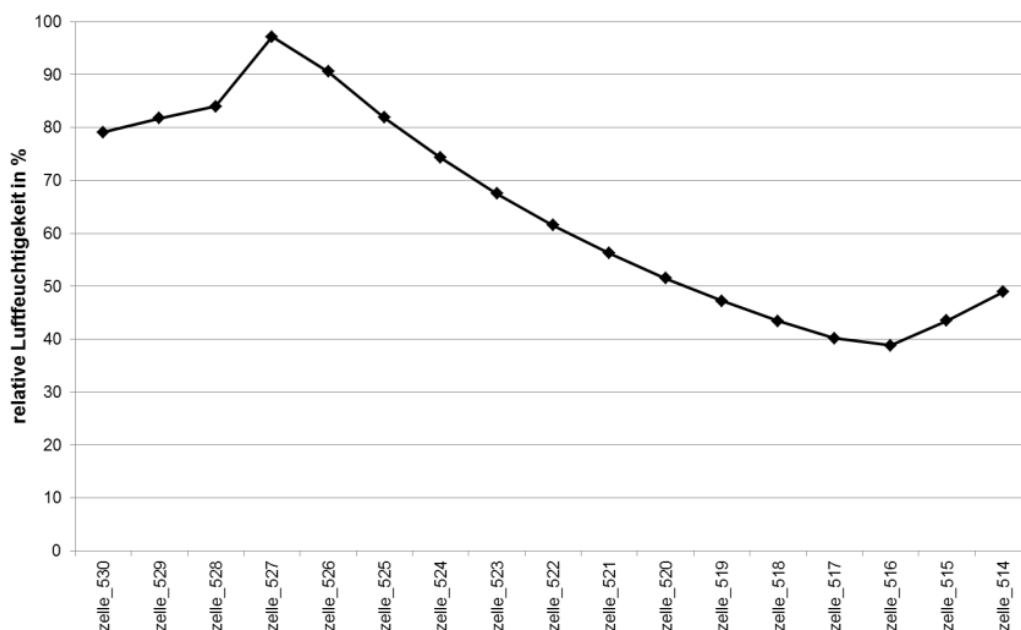


Abb. 59: Schnitt vertikal, zwischen 14. und 15. März

Auswertung:

Für die weitere Auswertung wurden für die Aufbauten 5 bis 8 folgende Zellen verwendet: die Zelle 527, die sich links von der Symmetrieachse befindet, die Zelle 147, die sich links im Randstreifen befindet, und die Zelle 280, die sich rechts von Zelle 147 befindet. Diese Zellen sind in Abb. 57 gekennzeichnet.

Tab. 18 : Vergleich Flachdach 5, 6, 7 und 8

	3. Jahr zelle_147	4. Jahr zelle_147	5. Jahr zelle_147		3. Jahr zelle_280	4. Jahr zelle_280	5. Jahr zelle_280	3. Jahr zelle_527	4. Jahr zelle_527	5. Jahr zelle_527
DB +										
A) Luftströmung 1	5939	5737	5593	///	6181	6032	5939	6159	6011	5922
B) Luftströmung 1	5962	5761	5617	///	6192	6044	5951	6166	6031	5942
Differenz A-B	23	24	24	\\	11	12	12	7	20	20
Intello										
A) Luftströmung 1	6121	5742	5346	///	6233	6004	5799	6216	5984	5722
B) Luftströmung 1	6147	5773	5391	///	6250	6021	5820	6229	6000	5747
Differenz A-B	26	31	45	\\	17	17	21	13	16	25
PE 2m										
A) Luftströmung 1	6738	6648	6593	///	6744	6700	6651	6753	6701	6665
B) Luftströmung 1	6756	6669	6611	///	6751	6711	6669	6756	6709	6678
Differenz A-B	18	21	18	\\	7	11	18	3	8	13
PE 26m										
A) Luftströmung 1	7224	7198	7167	///	7122	7102	7081	7168	7143	7123
B) Luftströmung 1	7231	7209	7182	///	7125	7107	7089	7166	7142	7121
Differenz A-B	7	11	15	\\	3	5	8	-2	-1	-2

Die Tab. 18 zeigt die Anzahl der Stunden, welche oberhalb der Schimmelgrenze liegen. Die Anzahl der Stunden, die oberhalb der Schimmelgrenze liegen, nehmen von Jahr zu Jahr ab. Zusätzlich wurde die Differenz zwischen „Luftströmung ein“ und „Luftströmung ein“ unter Berücksichtigung des Randeinflusses gebildet.

Dabei konnte festgestellt werden, dass die Differenz bei der Variante mit Intello für jede Zelle zunimmt, wie es auch bei dem anderen Dachaufbau geschah. Bei dem Aufbau mit DB+ blieb die Differenz im vierten und fünften Jahr bei allen drei Zellen gleich.

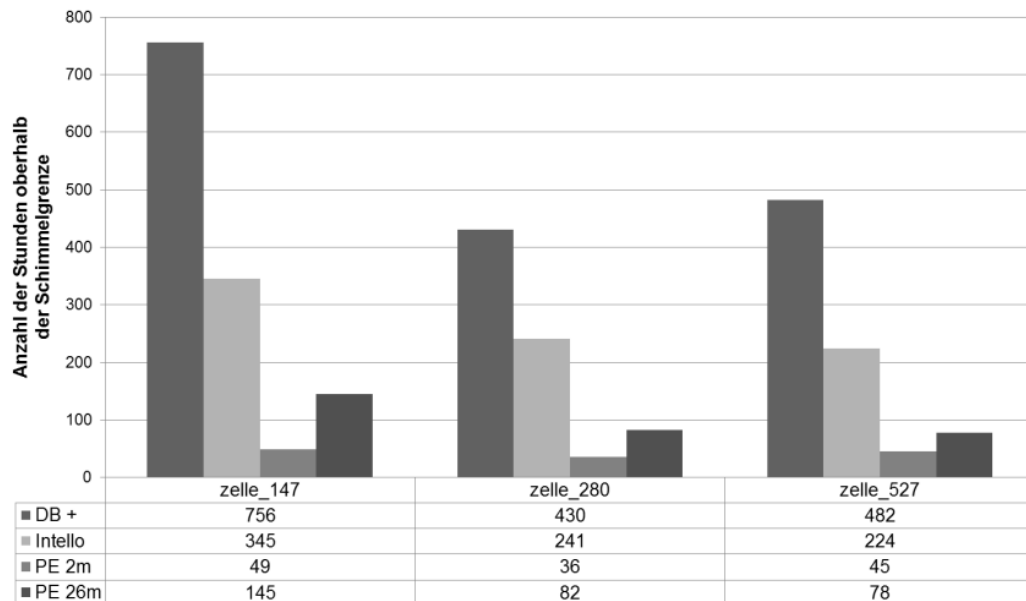


Abb. 60: Differenz drittes zum fünften. Jahr

Die Abnahme der verschiedenen Varianten wurde in Abb. 60 dargestellt. Dabei konnte man erkennen, dass die Abnahme bei diesem Dachaufbau bei ProClima DB+ am größten ist. Daraus lässt sich schließen, dass DB+ eine größere Rücktrocknung besitzt. Dabei wurde die Differenz zwischen dem dritten und fünften Jahr aufgetragen. Die Auswertung bezieht sich auf die Auswertung der Simulation „Luftströmung 1 Randeinfluss“.

6.7.6 Vergleich der acht Varianten

Für diesen Vergleich werden Zellen verwendet, welche sich auf derselben Stelle im Gefach befinden. Dabei werden die Aufbauten aus 6.4 genommen. Hierfür eignet sich die Zelle links oben im Gefach, diese Zelle hat die Nummer 140, bei den Flachdachvarianten 1 bis 4 und die Nummer 147 bei den Varianten 5 bis 8. Für diesen Vergleich werden die Tab. 17 und die Tab. 18 angewendet. So erkennt man, dass die Flachdachvarianten 5 bis 8 eine höhere Anzahl an Stunden oberhalb der Schimmelgrenze aufweisen. Dasselbe ist auch durch den Vergleich der Zelle 500 (Zelle links der Symmetrieachse) der Flachdachvariante 1 bis 4 mit der Zelle 527 und der Flachdachvariante 5 bis 8 erkennbar.

Flachdächer ohne Begrünung bzw. ohne eine Kiesschüttung weisen eine höhere Sicherheit bei der Rücktrocknung der vorhandenen Feuchte auf als das begrünte/bekieste Flachdächer. Der Grund liegt darin, dass sich durch die zusätzliche Schicht aus Kies oder Begrünung die Wärmedämmung darunter weniger schnell durchwärmen kann. Die Substratschicht der Begrünung kann auch noch zusätzlich Wasser speichern, daher wirkt das Flachdach mit Begrünung noch träger als die Bauart mit Kies.

Die Temperatur an der Außenseite der Wärmedämmung ist für die Höhe der Austrocknung verantwortlich. Die Dach- sowie die Wandoberfläche haben durch die direkte Sonneneinstrahlung eine höhere Temperatur als die umgebende Luft. Hierfür ist entscheidend, wie viel Zeit vergeht, bis die Wärme von außen an der Wärmedämmung ankommt. [PRO12a]

7 Zusammenfassung

Auswertung Permeabilität:

Die Auswertung der Materialien RIO und Rollino lieferte folgende Werte:

Für das Material RIO besitzt die Kernfläche eine Permeabilität von $2,55 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$, der Randstreifen weist eine Permeabilität von $9,79 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ auf. Für Rollino wurde für die Kernfläche eine Permeabilität von $1,59 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ und für den Randstreifen eine Permeabilität von $3,81 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ ermittelt.

Vergleicht man die Werte, so zeigt sich, dass die Permeabilität für den Randstreifen um mindestens eine Zehnerpotenz größer ist als jener des Kernbereichs.

Um eine exakte Aussage bezüglich der Luftströmung in einem Gefach machen zu können, muss die höhere Permeabilität im Randbereich berücksichtigt werden, da sich aufgrund der höheren Permeabilität im Randbereich eine andere Konvektion bildet.

Simulation:

Mit Hilfe der hygrothermischen Bauteilsimulation in HAM4D_VIE konnte eine Prognose bezüglich des Schimmelpilzwachstums gemacht werden. Festgestellt wurde, wie sich die Auswirkung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Permeabilität auf das Schimmelwachstum auswirkt. Hier konnte festgestellt werden, dass sich die Anzahl der Stunden, welche über der Schimmelwachstumsgrenze liegen, erhöht, wenn die neuen Werte verwendet werden.

Ausblick:

Die Simulationen mittels HAM4D_VIE wurden mit einem vollkommen dichten Dachaufbau simuliert. Dies ist für eine luftdichte Konstruktion geeignet. Es wurden keine Lackagen berücksichtigt. Daher sollten noch Simulationen berücksichtigt werden, bei denen Lacken vorhanden sind. Die vorhandene Dämmung füllt den gesamten Sparrenzwischenraum aus. Es wären auch Simulationen notwendig, bei denen die Dämmung nicht den gesamten Zwischenraum ausfüllt. Dabei sollte auch unterschieden werden, ob die Dämmung an der Innen- oder an der Außenseite anliegt. Die beiden Varianten sind bauphysikalisch ident, jedoch bilden sich unterschiedliche Konvektionsströme aus.

Wie in 4.4 beschrieben wurde die Dämmung mittels Schablone und Messer zugeschnitten. Da dieser Zuschnitt keine gleichmäßigen Proben liefert, sollten die Proben aus dem Dämmmaterial herausgestampft werden. Dies gilt auch für die Baustelle.

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einwirkung auf Flachdachkonstruktionen; [TEI10] und [SPE08].....	5
Abb. 2: Funktionsprinzip feuchtevariabler Bahnen; adaptiert [PRO12a]	6
Abb. 3: links: keine Luftbewegung in der Porenstruktur möglich, volle Dämmwirkung; rechts: Die Luftbewegung in der Porenstruktur reduziert die Dämmwirkung; adaptiert [NAT12]	8
Abb. 4: links: luftdichte Schicht; rechts: winddichte Schicht [SCH96]	8
Abb. 5: links: trockener Dämmstoff; rechts feuchter Dämmstoff [DÄM12]	9
Abb. 6: links: zu klein ausgeschnitten; rechts: zu groß ausgeschnitten [BEC04]	10
Abb. 7: Auswirkung des Luftspaltes auf die Dämmwirkung [BEC04].....	10
Abb. 8: links: offene Fuge in der Dämmschicht; Mitte: offene Fuge Anschluss Balken; rechts: zu dichtes Anpressen; adaptiert [SCH96].....	11
Abb. 9: In allen drei Fällen kann sich eine Konvektionsströmung bilden. [RAU12]	11
Abb. 10: Hartschaumplatten, Verwendung von randprofilierten Platten[SCH96]	12
Abb. 11: links: Konvektion gegeben; rechts: Konvektion verhindert; adaptiert [SCH96]	12
Abb. 12: unterschiedliche Druckverhältnisse → Wasserdampfdiffusion → Abhilfe Dampfbremse; adaptiert [ALT12]	13
Abb. 13: Tauwasser durch Wasserdampfdiffusion; adaptiert [DÄM12]	13
Abb. 14: Leckage in der Luftdichtung → Wasserdampfkonvektion; adaptiert [ALT12].....	14
Abb. 15: Tauwasser durch Wasserdampfkonvektion; adaptiert [DÄM12]	14
Abb. 16: Konvektive Wärmebrücke; adaptiert [DÄM12].....	14
Abb. 17: Schallausbreitung; adaptiert [DÄM12].....	15
Abb. 18: Schematischer Versuchsaufbau, adaptiert [DIN93].....	20
Abb. 19: links: Prüfgerät nach EN 29053 [DIN93]; rechts: Prüfgerät der Firmer ETG [ETG12]	21
Abb. 20: Versuchsanlage	25
Abb. 21: Messstand: Ansicht von vorne	25
Abb. 22: Messstand: Draufsicht	26
Abb. 23: Messstand: Schnitt in 1 m Höhe	26
Abb. 24: Luftströmung in und durch die Probe	26
Abb. 25: Draufsicht und Ansicht der Prüfgefäße 1 bis 4	29
Abb. 26: Seitenabstand der perforierten Unterlage; adaptiert [PRO11]	30
Abb. 27: Rückseite des Prüfgefäßes 3 mit eingebauter Dämmung	30
Abb. 28: Faserige Struktur → eine bestimmte Hauptrichtung [DÄM12]	32
Abb. 29: Messprotokoll	33
Abb. 30: Prüfgefäß TGM.....	36
Abb. 31: Darstellung des Randstreifens	37
Abb. 32: Typische Darstellung einer Messung und deren Messplateaus.....	38

Abb. 33: Prüfgefäß $\varnothing \sim 0,4$ m: Druckdifferenz bezogen auf die lineare Strömungsgeschwindigkeit von Isover RIO	39
Abb. 34: Prüfgefäß $\varnothing \sim 0,5$ m Druckdifferenz bezogen auf die lineare Strömungsgeschwindigkeit von Isover RIO	39
Abb. 35: Prüfgefäß $\varnothing \sim 0,6$ m: Druckdifferenz bezogen auf die lineare Strömungsgeschwindigkeit von Isover RIO	40
Abb. 36: Prüfgefäß $\varnothing \sim 0,3$ m: Druckdifferenz bezogen auf die lineare Strömungsgeschwindigkeit von Isover RIO	40
Abb. 37: r_{eff} bzw. r_{gemessen} bezogen auf A/U von Isover RIO	42
Abb. 38: Darstellung des Aufbaus für HAM4D_VIE	47
Abb. 39: $\Delta_{\text{Gesamtwassermenge}}$ in kg/m^2 bezogen auf Monate in Tage	48
Abb. 40: Flachdachvarianten	49
Abb. 41: Innenklima: links die Lufttemperatur und rechts die relative Luftfeuchtigkeit	50
Abb. 42: Außen- und Innenklima	50
Abb. 43: Darstellung von Aufbau A und B mittels Programm EN13788 [BED02]	52
Abb. 44: Materialdarstellung aus HAM4D_VIE	53
Abb. 45: Gesamtwassergehalt Flachdach 1, 2, 3 und 4	54
Abb. 46: Gesamtwassergehalt Flachdach 5, 6, 7 und 8	54
Abb. 47: Gittereinteilung Flachdach 1, 2, 3 und 4	55
Abb. 48: Tagesmittelwerte der Zellen 140, Zelle 230 und Zelle 500, 5 Jahre Pro Clima DB+; Luftströmung 1	56
Abb. 49: Erstes Jahr, Zelle 140	57
Abb. 50: Vergleich der drei Varianten; Zelle 140	57
Abb. 51: Darstellung der Varianten in Bezug auf den „Mould Index“	58
Abb. 52: FADAB Luftströmung DB Randeinfluss 23. November im dritten Jahr Schnitt vertikal	59
Abb. 53: Maximale und minimale Temperatur im dritten Jahr	60
Abb. 54: Relative Luftfeuchtigkeit, im Randstreifen außen	60
Abb. 55: links: 18. Juli; rechts: 13. Dezember	61
Abb. 56: oben Zelle 140; unten Differenz 3. zum 5. Jahr	62
Abb. 57: Gittereinteilung Flachdach 5, 6, 7 und 8	63
Abb. 58: Schnitt horizontal außen: oben 29. Mai; unten 24. November	63
Abb. 59: Schnitt vertikal, zwischen 14. und 15. März	64
Abb. 60: Differenz drittes zum fünften. Jahr	65

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Dynamische Viskosität der Luft [HAG01]	20
Tab. 2: Mindestanforderungen an die Produktarten von MW; adaptiert [ONO03a].....	22
Tab. 3: Mindestanforderungen an Mineraldämmstoffe; adaptiert [DIN08].....	22
Tab. 4: Kenndaten der Messgeräte 8475 [DEH12].....	27
Tab. 5: Kenndaten des FCE 332 [FUR12].....	27
Tab. 6: Abmessungen Prüfgefäße 1, 2, 3, 4 und 5	28
Tab. 7: Die Luftgeschwindigkeiten im Plexiglasrohr	32
Tab. 8: Sämtliche Messungen mit Prüfgefäß 1, 2, 3 und 4	35
Tab. 9: Sämtliche Messungen mit Prüfgefäß 1, 2, 3 und 4	35
Tab. 10: Kernfläche, Randfläche	37
Tab. 11: Berechnung von K für Isover RIO	43
Tab. 12: Bezeichnung der Formeln	43
Tab. 13: Auswertung Permeabilität	44
Tab. 14: Temperaturfile innen und außen für den Jänner	48
Tab. 15: Vergleich der Gesamtwassermenge von Glaser mit HAM4D_VIE.....	49
Tab. 16: Aufbau A, B, C und D.....	52
Tab. 17 : Vergleich Flachdach 1, 2, 3 und 4	61
Tab. 18 : Vergleich Flachdach 5, 6, 7 und 8.....	64

10 Literaturverweis

- [ALT12] Hanns Altvater GmbH
Link: http://www.altvater-dachdeckerbetrieb.de/Aktuelle_Info/Aktuell_1/aktuell_1.html
09.02.2012
- [BEC04] Becker, Klausjürgen; Pfau Jochen; Tichelmann Karsten: Trockenbau Atlas – Grundlagen – Einsatzbereiche – Konstruktionen – Details; 2004
- [BED02] Ao.Univ.Prof.Dipl.Ing.Dr. Bednar, Thomas ; Programm EN 13788 Version 01; 2002
- [DÄM12] Die DÄMMSTATT Wertstoff- Erfassungs-Recycling- und Fertigungsgesellschaft mbH
Link: <http://www.daemmstatt.de> 02.02.2012
- [DEH12] DEHA Haan & Wittmer GmbH
Link: http://www.deha-gmbh.de/bilder/produkte/pdf/D_Transmitter.pdf 12.2.2012
- [DIN93] DIN EN 29053: Mai 1993: Akustik, Materialien für akustische Anwendung, Bestimmung des Strömungswiderstandes. Berlin: Deutsches Institut für Normen
- [DIN93b] DIN ISO 4638: Juli 1993: Weichelastische Schaumstoffe; Bestimmung der Luftstromdurchlässigkeit. Berlin: Deutsches Institut für Normen
- [DIN93c] DIN ISO 4638: Juli 1993: Weichelastische Schaumstoffe; Bestimmung der Luftstromdurchlässigkeit
- [DIN06] DIN16086: Jänner 2006: Elektrische Druckmessgeräte – Druckaufnehmer, Druckmessumformer, Druckmessgeräte – Begriffe und Angaben in Datenblättern. Berlin: Deutsches Institut für Normen
- [DIN08] DIN 4108-10: Juni 2008: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe – Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe. Berlin: Deutsches Institut für Normen
- [DIN10] DIN EN 13162: Mai 2010: Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation. Berlin: Deutsches Institut für Normen
- [DIN11] DIN 4108-7: Jänner 2011: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie-beispiele. Berlin: Deutsches Institut für Normen
- [DIN12] DIN 4108-3: Jänner 2012: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderung, Berechnungsverfahren und Hinweis für Planung und Ausführung. Berlin: Deutsches Institut für Normen
- [DIN08] DIN 4102-8: Oktober 2011: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (Entwurf). Berlin: Deutsches Institut für Normen

- [Egg00] Egger, Herbert; Ettl, Helmut; Guggenberger, Walter; Lexe, Ernst: Vermessungskunde, Veritas Verlag, 2. Auflage 2000
- [Eur12] Europagymnasium Walther Rathenau
Link: <http://www.gym-rathenau.bildung-lsa.de/Physik/Prakti/Fehler.pdf> September 2012
- [ETG12] ETG (Entwicklungs- und Technologie Gesellschaft) in Ilmenau
Link: <http://www.etg-ilmenau.de/> 26.04.12
- [FOU08] Univ.-Prof.Dr.-Ing. Found, Nabil A.: Bauphysik Kalender; 2007
- [FUR12] Furness Controls-Entwicklung
Link: <http://www.furness-controls.de/content.php?session=8e1a7cf74f19f4ff40897412d13e78bc&seite=seiten/downloads.php&session=8e1a7cf74f19f4ff40897412d13e78bc> 12.04.2012
- [HAG01] Hagentoft, Carl-Eric: Introduction to Building Physics, Published by Studienlitteratur AB, Lund, Schweden, 2001
- [HOL12] Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Link: http://www.bauphysik.de/lehre/fh-rosenheim/2003-Nov-19_Feuchteschutz-6.pdf
06.07.2012
- [ISO12] Isover
Link: <http://www.bauteilrechner.cc/eecotech/Catalogues/AUSTRIA/ISOVER-A/PREISLISTE2004.PDF> 10.02.2012
- [NAT12] Naturalie-Bau
Link: <http://www.naturalia-bau.it/de/luft-winddichtheit/die-perfekte-daemmung.html> 07.05.2012
- [NUS10] Nusser, Bernd; Teibinger, Martin; Bednar, Thomas: Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung1 – Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung; Bauphysik 32, Heft 3; 2010
- [ONO01] ÖNORM EN ISO 13788: November 2001: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren Berechnungsverfahren. Wien: Österreichisches Normungsinstitut
- [ONO03a] ÖNORM B 6000: 02-2003: Werkmäßig hergestellte Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau – Arten und Anwendung. Wien: Österreichisches Normungsinstitut
- [ONO03b] ÖNORM B 8110-2: Juli 2003: Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz. Wien: Österreichisches Normungsinstitut
- [OJA10] Ojanen; Viitanen; Peuhkuri; Lähdesmäki; Vinha; Salminen: Mold Growth Modeling of Building Structures. Vortrag: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference. Clearwater Beach, Florida, December 5-9, 2010

- [OJA11] Ojanen, Tuomo; Peuhkuri, Ruut; Viitanen, Hannu; Lähdesmäki, Kimmo; Associate, Juha Vinha; Salminen, Kati: Classification of material sensitivity – New approach for mould growth modeling; 9th Nordic Symposium on Building Physics; 2011
- [POL12] Polybau/Polybat
Link: http://www.polybau.ch/files/cms/tiny/fachbuch_fassadenbau_lesevorschau.pdf 01.02.2012
- [PRO11] ProMetall
Link: <http://www.prometall.at/> 13.12.2011
- [PRO12a] ProClima
Link: http://download.proclima.com/de/de_w_Bauphysik-Studie.pdf 06.07.2012
- [PRO12b] ProClima
Link: <http://de.proclima.com/produkte/dichtung-innen> 01.05.2012
- [PRU10] Prüfbericht TGM, über den Strömungswiderstand von Wärmedämmfilz: Isover RIO; April 2010
- [PRU12] Prüfbericht: TGM – VAAB 11812: über den Strömungswiderstand von Wärmedämmfilz Isover RIO; 27. April 2010
- [RAU12] Rauch, Peter: Ingenieurbüro
Link: <http://www.ib-rauch.de/bauphysik/waermeisolierung.html> 09.Dezember.2011
- [RIC10] Riccabona, Christoff; Bednar, Thomas: Baukonstruktionslehre 4, Bauphysik, MANZ Verlag, Wien 2010
- [SCH96] Schulze, Horst: Holzbau Wände-Decken-Dächer; 1996
- [SPE08] spezial, Flachdächer in Holzbauweise
Link: ftp://ftp.fh-biberach.de/pub/www/lfH/13_Informationdienst-Holz/2%20Allgemeine%20Schriften/2%20Holzbau%20Spezial/08-10_Spezial_Flachdach.pdf
Oktober 2008
- [TEI10] Teibinger, Martin: Flachgeneigte Dächer aus Holz, Planungsbroschüre, Wien, Dezember 2010