

Marc Klatecki, Stephan Schlitzberger, Anna Bauer  
Luisa Vogt, Anton Maas, Rolf Gross, Armin Weissmüller

# **Entwicklung von Standardlösungen zur Wärmedämmung und Luftdichtheit von Bestandsgebäuden unter Verwendung von Einblasdämmung und Dichtkleber**

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0522-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/bauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung)

**Abschlussbericht**  
**Entwicklung von Standardlösungen zur Wärmedämmung und**  
**Luftdichtheit von Bestandsgebäuden unter Verwendung von**  
**Einblasdämmung und Dichtkleber**  
**(Az. SWD-10.08.18.7-17.35)**

**Projekt-Nr.: IBH 981-16**

**Antragssteller/Bearbeiter:**

Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH  
Leipziger Straße 184  
34123 Kassel

**Fördermittelgeber:**

Forschungsinitiative „Zukunft Bau“  
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im  
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
Referat II 3  
Deichmanns Aue 31 - 37  
53179 Bonn

**Bearbeiter:**

Universität Kassel  
Fachgebiet Bauphysik  
Gottschalkstraße 28a  
34127 Kassel



Mit freundlicher Unterstützung von



Knauf Insulation GmbH  
Heraklithstraße 8  
84359 Simbach am Inn



Siga Cover GmbH  
Willy-Brandt-Platz 2  
12529 Schönefeld



## Inhalt

1.	Ziel des Forschungsvorhabens .....	6
2.	Problemstellungen.....	6
3.	Bearbeitungsgrundlage .....	8
3.1	Einblasdämmstoffe und deren Applikationstechniken.....	8
3.2	Sprühbare Luftdichtheitsschichten und deren Applikationstechniken.....	17
3.3	Ermittlung der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke .....	19
3.4	Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstandes .....	22
3.5	Luftdurchlässigkeit und Messungen .....	24
3.6	Luftdurchlässigkeit bei Leckagen.....	26
3.6.1	Praktische Behandlung der Strömung durch Bauteilfugen.....	29
3.7	Bewertung des Feuchteschutzes von Bauteilen .....	34
4.	Untersuchungsgrundlage .....	37
4.1	Erprobung von Schüttdämmstoffen .....	37
4.2	Erprobung von unterschiedlichen Applikationstechniken .....	39
4.3	Erprobung Flüssigabdichtungen.....	43
4.4	Applikation der sprühbaren Luftdichtheitsschichten.....	45
4.5	Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke $s_d$ .....	48
4.6	Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstandes .....	50
4.7	Feuchtetechnische Bewertung typischer sanierungsbedürftiger Altbaukonstruktionen ....	53
4.8	Ermittlung zulässiger Leckageraten und feuchtetechnische Bewertung.....	60
4.9	Messtechnische Bestimmung von Volumenströmen.....	66
4.9.1	Regelquerschnitt .....	66
4.9.2	Randbereich von Bauteilanschlüssen.....	68
4.9.3	Typische Leckagen .....	69
4.10	Versuch am Großobjekt in situ .....	72
4.10.1	Bewertung unter Einfluss einer Freibewitterung .....	79
4.10.2	Bewertung unter realen klimatischen Bedingungen .....	81
4.11	Spaltemessungen .....	86
5.	Untersuchungsmethode .....	92
6.	Ergebnisse .....	93
6.1	Erprobung von Schüttdämmstoffen .....	93
6.2	Erprobung unterschiedlicher Applikationstechniken.....	96

6.3	Erprobung von Flüssigabdichtungen .....	99
6.4	Applikation sprühbarer Luftdichtheitsschichten.....	102
6.5	Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke $s_d$ .....	103
6.6	Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstandes .....	106
6.7	Feuchtetechnischer Bewertung typischer sanierungsbedürftiger Altbaukonstruktionen .	110
6.8	Messtechnische Bestimmung von Volumenströmen.....	126
6.8.1	Regelquerschnitt .....	126
6.8.2	Randbereich von Bauteilanschlüssen.....	128
6.8.3	Typische Leckagen .....	129
6.9	Versuch am Großobjekt in situ .....	135
6.9.1	Bewertung unter Einfluss einer Freibewitterung .....	137
6.9.2	Bewertung unter realen klimatischen Bedingungen.....	144
6.10	Spaltmessungen .....	147
7.	Bewertung der Ergebnisse .....	154
8.	Entwicklung von Lösungen zur Wärmedämmung und Luftdichtung.....	162
9.	Zusammenfassung und Ausblick.....	164
10.	Literatur.....	166

Kassel, den 03. Dezember 2019



Dipl.-Ing. Marc Klatecki  
Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH



Dr.-Ing. Stephan Schlitzberger  
Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH



Dipl.-Ing. Anna Bauer  
Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH



Luisa Vogt  
Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anton Maas  
Universität Kassel



Dipl.-Ing. Rolf Gross  
Universität Kassel



Armin Weissmüller  
Knauf Insulation GmbH Zentraleuropa

## 1. Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erprobung unterschiedlicher Einblasdämmstoffe, sprühbare Luftdichtheitsschichten und deren Applikationstechniken für die Anwendung bei der energetischen Sanierung von Gebäuden.

Durch gezielte Injektion von zusätzlichem Dämmstoff in bereits mit Einblasdämmstoff versehene Konstruktionen, kann die Luftdichtheit durch Verdichtung (Erhöhung des Strömungswiderstandes des Dämmstoffes) verbessert werden. Die Injektion erfolgt hierbei durch punktuelle Öffnungen in der thermischen Gebäudehülle mittels Einblasnadel. Zusätzlicher Dämmstoff kann auf diese Weise in kritische Bereiche oder über das gesamte Bauteil eingebracht werden. Die Erprobung erfolgt an Regelprüfständen und realen Wand- und Dachquerschnitten im Labor. Hierfür werden experimentelle Untersuchungen mit unterschiedlichen Schüttdämmstoffen und Applikationstechniken durchgeführt und eine Bewertung der Wirksamkeit und Verarbeitbarkeit vorgenommen.

Zusätzlich werden unterschiedliche Flüssigdichtstoffe, welche eine Alternative zu den im Bestand aufwändig umzusetzenden Dampfbremsbahnen als Luftdichtheitsebene darstellen, und Applikationstechniken, z. B. Airless-Sprühlanzen, ebenfalls auf deren Anwendbarkeit und Wirksamkeit getestet.

Zur Erarbeitung von Einsatzempfehlungen werden umfangreiche hygrothermische Simulationen zur Ableitung von Merkmalen, anhand derer eine Bewertung der Notwendigkeit von zusätzlichen Maßnahmen oder die Nichteignung abgeleitet werden kann, durchgeführt. Zusätzlich werden Empfehlungen für notwendige bauliche Maßnahmen erarbeitet und bewertet, inwiefern sich hierfür die untersuchten Applikationstechniken der Schüttdämm- und Flüssigdichtstoffe bei der energetischen Sanierung eignen.

## 2. Problemstellungen

Eine wesentliche Herausforderung bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden ist die gleichzeitige Sicherstellung der Luftdichtheit und des Feuchteschutzes. Durch die unzureichende Betrachtung von Anschlussdetails kann es zu erhöhten Wärmeverlusten kommen, die in letzter Konsequenz zu einer Tauwasser- oder Schimmelpilzbildung führen. Zusätzlich können aufgrund einer mangelhaft ausgebildeten Luftdichtheit konvektive Feuchteinträge auftreten, die als Folge tauwasserbedingte Schäden in der Konstruktion hervorrufen.

Die Gefahr von Tauwasser- oder Schimmelpilzbildung in Anschlussbereichen kann in der Regel durch lokale Dämmmaßnahmen ohne größere bauliche Eingriffe unterbunden werden. Die Vermeidung eines konvektiven Feuchteintrags erfordert jedoch eine Ertüchtigung der Luftdichtheitsebene. Hier bieten sich vor allem Dampfbremsbahnen und Dichtmanschetten an, die gleichzeitig die Diffusionseigenschaften der Konstruktion verbessern und somit den Feuchtegehalt innerhalb des Bauteils reduzieren. Jedoch ist bei solchen Maßnahmen ein erheblicher baulicher Eingriff erforderlich, den die meisten Hauseigentümer aufgrund des hohen Rückbauaufwands und der entstehenden Kosten scheuen.

Eine Alternative zu dem fallweisen aufwändigen Einsatz von Folien als Luftdichtheitsebene kann die Verwendung von flüssigen Dichtklebern sein. Diese werden z. B. mittels Airless-Sprühlanzen im Nasssprühverfahren durch Bohr- oder Einschnittöffnungen im Bauteil auf die Rückseite der raumseitigen Beplankung aufgebracht und ermöglichen so eine bauliche Ertüchtigung der Luftdichtheitsebene.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass bei Verwendung von faserförmigen Dämmstoffen, beispielsweise aus Zellulose oder Mineralwolle, im Einblasverfahren - eine fachgerechte Verarbeitung und Einbringung des Dämmstoffes vorausgesetzt - häufig auf eine nachträgliche Ertüchtigung der Luftdichtheitsebene verzichtet werden kann.

Da bei den faserförmigen Schüttdämmstoffen Kunstharze zur Faserbindung und -stabilisierung fehlen, muss zur Vermeidung späterer Setzungen des Dämmstoffs bei der Einbringung eine höhere Verdichtung erfolgen. Diese Komprimierung, welche insbesondere durch das Einblasen in geschlossene Hohlräume erzielt wird, führt zu deutlich höheren längenbezogenen Strömungswiderständen und reduziert den konvektiven Eintrag feucht-warmer Raumluft in das Bauteil und verbessert somit die Luftdichtheit des Regelquerschnitts. Auch kritische Einzelleckagen können durch gezieltes Einbringen von Schüttdämmstoffen verbessert werden. Hierbei erfolgt die Injektion durch punktuelle Öffnungen in der thermischen Gebäudehülle mittels Einblasnadeln.

In Bezug auf die Anwendung vorbeschriebener Injektionsverfahren stellt sich für verarbeitende Betriebe die grundsätzliche Frage nach einem Indikator oder der Darstellung von Konstruktionsmerkmalen, anhand dessen die Notwendigkeit zur Durchführung zusätzlicher Maßnahmen abgeleitet werden kann. Gegenwärtig liegen hierzu jedoch keine geeigneten Erkenntnisse vor. Darüber hinaus fehlen Ergebnisse in Bezug auf die Wirksamkeit solcher Injektionsmaßnahmen.

Bei Konstruktionen, die unter Verwendung einer Einblasdämmung und anschließender Injektion keinen ausreichenden Feuchteschutz sicherstellen können, ist die Ertüchtigung der Luftdichtheitsebene oder die partielle Abdichtung von Anschlüssen und Durchdringungen jedoch unumgänglich. Hier besteht, wie oben bereits erwähnt, die Möglichkeit, vor Einbringung eines Schüttdämmstoffes unter Verwendung von am Markt verfügbaren flüssigen Dichtklebern, die erforderliche Funktionsschicht aufzubringen. Die Sicherstellung der Luftdichtheit erfolgt hierbei ausschließlich über den Einsatz des flüssigen Dichtklebers.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Kann der Feuchteschutz von Konstruktionen durch die gezielte Verdichtung von Schüttdämmstoffen verbessert werden?
- Eignen sich sprühbare Luftdichtheitsschichten zur nachträglichen Ertüchtigung von Bauteilen?
- Sind die hierfür auf dem Markt verfügbaren Applikationstechniken zur Einbringung von Schüttdämmstoffen und Aufbringung von sprühbaren Luftdichtheitsschichten geeignet?
- Können Indikatoren oder Konstruktionsmerkmale abgeleitet werden, welche die Notwendigkeit einer Ertüchtigung der Luftdichtheitsebene bzw. der Dampfbremsebene erkennen lassen?
- Können Standardlösungen zur Wärmedämmung und Luftdichtung für die energetische Sanierung von Gebäuden bei Einsatz von Einblasdämmstoffen abgeleitet werden und wie sehen diese aus?

### 3. Bearbeitungsgrundlage

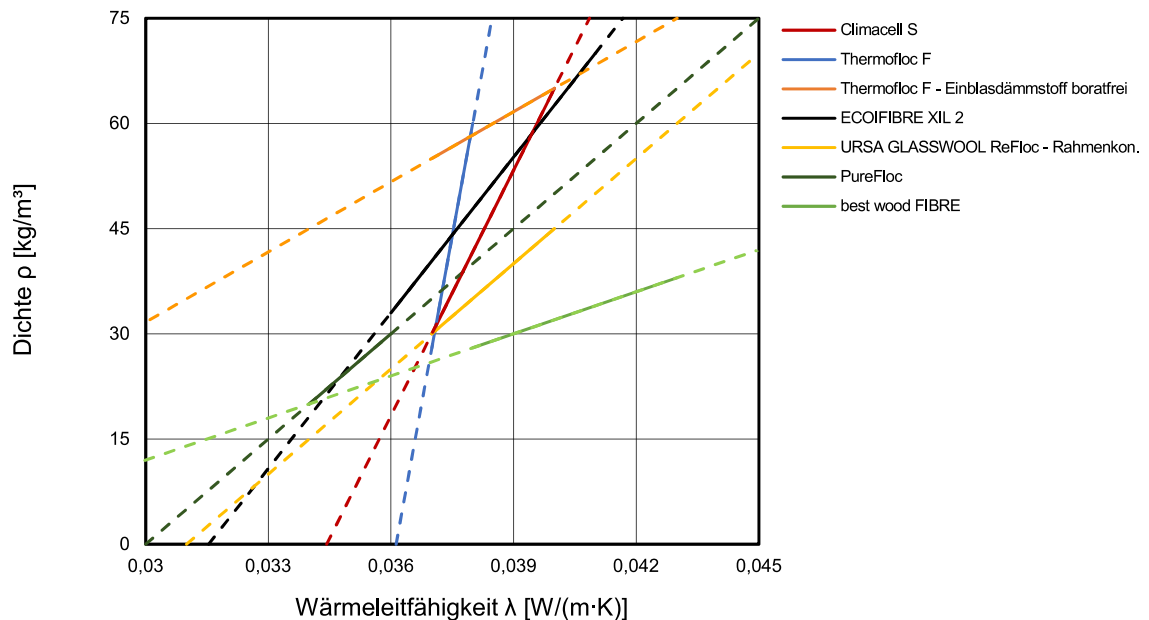
#### 3.1 Einblasdämmstoffe und deren Applikationstechniken

Einblasdämmstoffe können organisch oder anorganisch sein. Zu den anorganischen zählen Glaswolle, Steinwolle, Perlite und Blähglas. Die organischen lassen sich in solche mit natürlicher, wie zum Beispiel Flachs, Hanf, Holz als Wolle oder Späne, Korkschröt und Zellulose, und künstlicher Herkunft, wie zum Beispiel geschäumtes Polystyrol (EPS), einteilen.

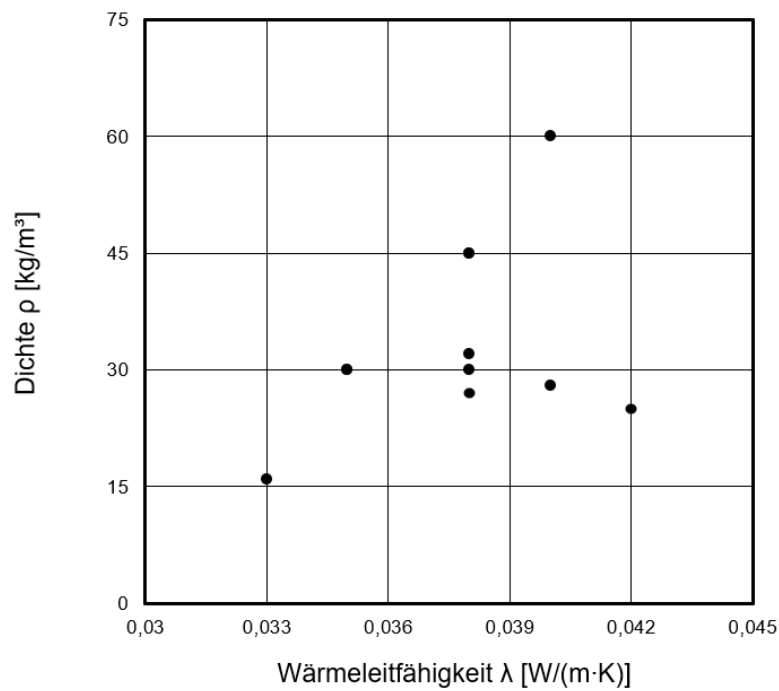
Wichtige Anwendungsbereiche der Dämmstoffe bei der Sanierung sind schwer zugängliche Bereiche und Wände aus zweischaligem Mauerwerk und bei Neubauvorhaben die Holzständerbauweise und Dachkonstruktionen.

Verwendungsmöglichkeit für die Applikation von Schüttdämmstoffen im Sanierungsfall sind obere Geschossdecken oder Kellerdecken zum unbeheizten Keller, Steil- oder Flachdächer sowie zweischalige Außenwände und Außenwände in Holzständerbauweise.

Die von den jeweiligen Herstellern empfohlenen Schüttdichten liegen zwischen  $16 \text{ kg/m}^3$  (beispielsweise beim Produkt „EPS 033“ der Fa. Ecofibre Dämmstoffe GmbH) und  $140 \text{ kg/m}^3$  (beispielsweise beim Produkt „Protect Fill“ der Fa. Knauf KG), siehe Tabelle 3.1. Die Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda$  belaufen sich zwischen  $0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  und  $0,043 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Bei einigen Dämmstoffen ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von der Rohdichte  $\rho$  abhängig, Bild 3.1 zeigt hierfür einer Auswahl von Produkten. Bei anderen Dämmstoffen, beispielsweise aus Mineralfaser, hat die Rohdichte nur geringen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit, ausschlaggebend ist allerdings die Faserqualität und -orientierung [1], siehe Bild 3.2.



**Bild 3.1:** Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Schüttdämmstoffe in Abhängigkeit der Schüttdichte



**Bild 3.2:** Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und Schüttdichte  $\rho$  verschiedener Schüttdämmstoffe

Weitere von den Herstellern angegebene Materialeigenschaften sind die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  und der längenbezogener Strömungswiderstand  $r$ . Diese sind für ausgewählte Einblasdämmstoffe in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

**Tabelle 3.1:** Materialeigenschaften verschiedener Schüttdämmstoffe

Produkt und Hersteller	Material	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/(m·K)]	Rohdichte $\rho$ [kg/m³]	Wasserdiffusionswiderstandszahl $\mu$ [-]	längenbezogener Strömungswiderstand $r$ [kPa·s/m²]
Insulation Supafil® Cavity Wall (Knauf)	Glaswolle	0,035	30	1 - 2	-
Supafil® Loft Plus (Knauf)	Glaswolle	0,038	-	1 - 2	-
Supafil® Timber Frame (Knauf)	Glaswolle	0,035	30	1 - 2	-
Supafil® Max Frame (Knauf)	Glaswolle	0,035	30	1	-
URSA GLASSWOOL ReFloc - Geschossdecke (Ursa)	Glaswolle	0,042	25	-	-
URSA GLASSWOOL ReFloc - Rahmenkonstr. (Ursa)	Glaswolle	0,037 - 0,040	30 - 45	-	-
PureFloc (Ursa)	Glaswolle	0,036 - 0,034	20 - 30	-	-
Protect Fill (Knauf)	Steinwolle	0,040	60 - 140	1	-
ECOIFIBRE XIL 2 (Ecofibre)	Steinwolle	0,036 - 0,041	33 - 70	1	-
PAROC BLT 7 (Ecofibre)	Steinwolle	0,038	65	1	-
BLT 5 (Ecofibre)	Steinwolle	0,038	45 - 55	1	-
Fillrock RG (Rockwool)	Steinwolle	0,038	45 - 95	-	-
Fillrock KD (Rockwool)	Steinwolle	0,038	80 - 120	1	-
STEICOzell (Steico)	Holzfaser	0,038	32 - 45	1 - 2	-
best wood FIBRE (Schneider)	Holzfaser	0,038 - 0,043	28 - 38	1 - 2	≥ 5
Isofloc® L/LM Zellulose (Isofloc)	Zellulose	0,040	28 - 65	1 - 2	-
Thermofloc F (Peter Seppele)	Zellulose	0,037 - 0,038	28 - 60	1,4	≥ 6,1
Thermofloc F- Einblasdämmstoff boratfrei (Peter Seppele)	Zellulose	0,037 - 0,040	55 - 65	1,4	≥ 6,1
Thermocel (Ecofibre)	Zellulose	0,038	30 - 55	2	-
STEICOfloc (Steico)	Zellulose	0,038	27 - 60	1 - 2	-
Climacell S (Climacell)	Zellulose	0,037 - 0,040	30 - 65	1 - 2	-
EPS 033 - nur bei diffusionsoffenen MW (Ecofibre)	Polystyrol-Partikelschaum	0,033	16 - 20	5	-

Einblasdämmstoffe werden mit sogenannten Einblasmaschinen eingebracht. Diese bestehen in der Regel aus einem Beschickungselement, das mit Dämmstoff befüllt wird (Einfüllbereich), und einem Förderelement, welches den zunächst aufgelockerten Dämmstoff über einen Schlauch in das zu dämmende Bauteil bläst. Der zumeist gepresste Dämmstoff wird über ein rotierendes Rühr- oder Häckselwerk aufgelockert. Bei Dämmung aus Perlite werden diese jedoch nicht verwendet, da sie den Dämmstoff beim Auflockerungsvorgang zerstören würden (Kornzerstörung). Diese werden daher pneumatisch eingebracht. Der aufgelockerte Dämmstoff wird anschließend über eine sogenannte Durchblassschleuse (Zellenradschleuse mit Rotor und Rotorblättern) und über einen Luftstrom in den Transportschlauch eingebracht, der zuvor bis in das Bauteil verlegt wurde.



Je nach Bauteil werden unterschiedliche Ausstattungsarten von Einblasmaschinen verwendet. Hierbei wird meist zwischen Maschinen für Dachdämmung, zum losen Einblasen, für zweischaliges Mauerwerk und welche mit Einblaslanze unterschieden.

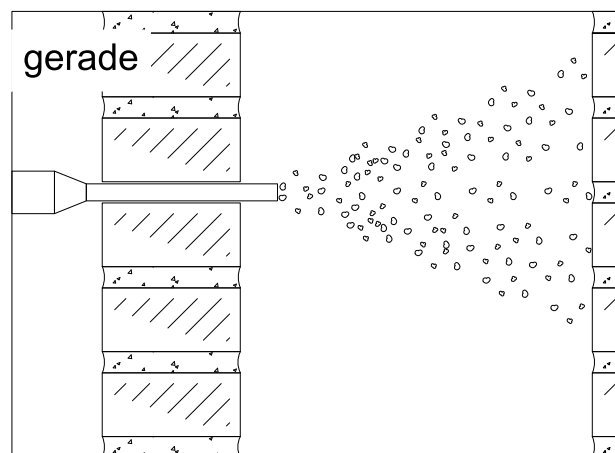
Für die Einbringung von Dachdämmung saugt die Maschine den Dämmstoff an und bläst ihn über den Einblasschlauch in die Öffnung. Die dabei anfallende Förderluft wird beim Verdichten des Dämmstoffs durch den leichten Druck verdrängt und entweicht über Fugen oder Undichtheiten. Bei Einblasmaschinen zum losen Aufblasen bläst die Maschine den Dämmstoff lose ohne weitere Verdichtung auf und bei der nachträglichen Dämmung von zweischaligem Mauerwerk können neben Einblasdüsen auch entlüftende Drehdüsen verwendet werden. Die Förderluft wird hierbei über den zur Düse gehörenden Gitterkorb und Staubsack abgeführt.

Bauteile können auch mit einer sogenannten Einblaslanze befüllt werden. Dabei wird diese am Ende des Förderschlauchs befestigt. Die bei der Einblasdämmung anfallende Förderluft kann über die Entlüftungseinrichtung der Lanze und den zugehörigen Staubsack entweichen.

Bei der Wahl der Düse ist neben dem gewünschten Einsatzgebiet auch auf die Eignung der Düse für das gewählte Dämmmaterial zu achten. Die Einbringung des Dämmmaterials mit einer starren Einblasdüse eignet sich vor allem für zweischalige Wandaufbauten, wie z. B. zweischaliges Mauerwerk mit Kerndämmung und Wände in Ständerbauweise. Eine weitere Anwendung von Einblasdüsen ist die Dämmung von kleinen und schwer zugänglichen Hohlräumen. Mithilfe von Einblasdüsen mit geringem Durchmesser können so, ohne große Eingriffe an der Wand- oder Dachkonstruktion vorzunehmen, schwer zugängliche Hohlräume gedämmt werden. Wird ein abrasiver Dämmstoff eingesetzt, ist die Verwendung einer Wechseleinsatzdüse zu empfehlen, da hier das Düsenrohr einfach ausgetauscht werden kann.

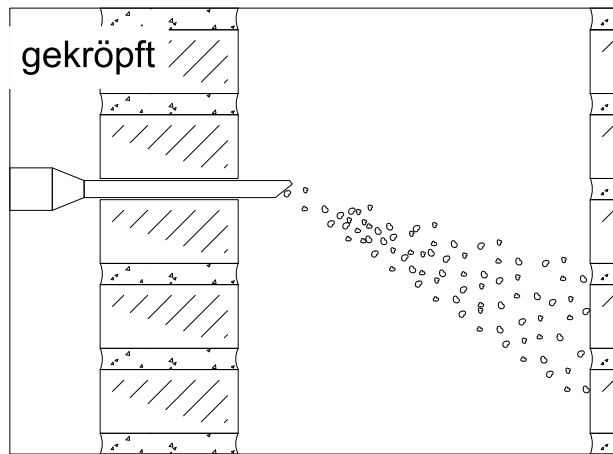
Einblasdüsen gibt es mit geradem, gewinkelt, gekröpft, ovalem sowie einem um 45° geneigten Düsenauslass. Je nach Form des Düsenauslasses, variiert auch die Richtung des einströmenden Dämmstoffs beim Einblasvorgang.

Ein gerader Düsenauslass eignet sich je nach Durchmesser und Ausführung für Schüttgüter, Zellulose, Glas- und Steinwolle sowie für Holzfasern. Die Rohrdurchmesser liegen bei geraden Düsenauslässen zwischen 15 mm und 30 mm. Die Einstechtiefen liegen bei 130 mm bis 250 mm. Eine vereinfachte Darstellung einer Einblasdüse mit geradem Düsenauslass findet sich in Bild 3.3.



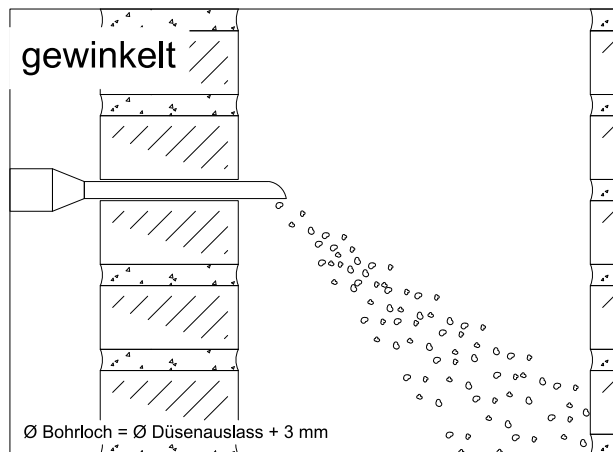
**Bild 3.3:** Einblasdüse mit geradem Düsenauslass

Gekröpfte Düsenauslässe sind ebenfalls, je nach gewähltem Durchmesser, für Schüttgüter, Zellulose, Glas- und Steinwolle und Holzfasern anwendbar. Die Rohrdurchmesser betragen zwischen 30 mm und 50 mm bei einer Einstechtiefe von 200 mm, siehe Bild 3.4.



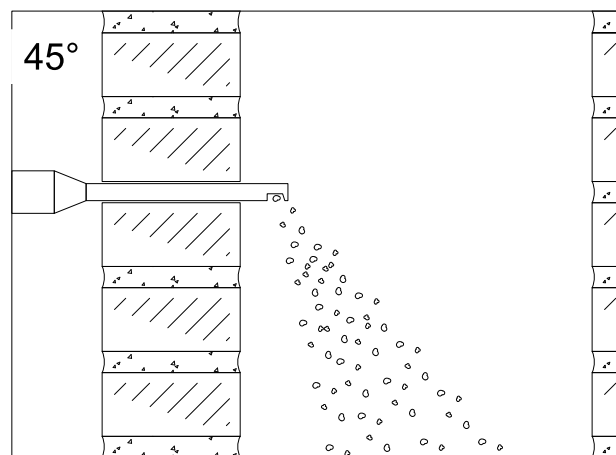
**Bild 3.4:** Einblasdüse mit gekröpftem Düsenauslass

Bei gewinkeltem Düsenauslass beträgt der Rohrdurchmesser zwischen 20 mm und 63 mm bei einer Einstechtiefe von bis zu 186 mm. Gewinkelte Düsenauslässe sind ebenfalls für Schüttgüter, Zellulose, Glas- und Steinwolle und Holzfasern geeignet, siehe Bild 3.5.



**Bild 3.5:** Einblasdüse mit gewinkeltem Düsenauslass

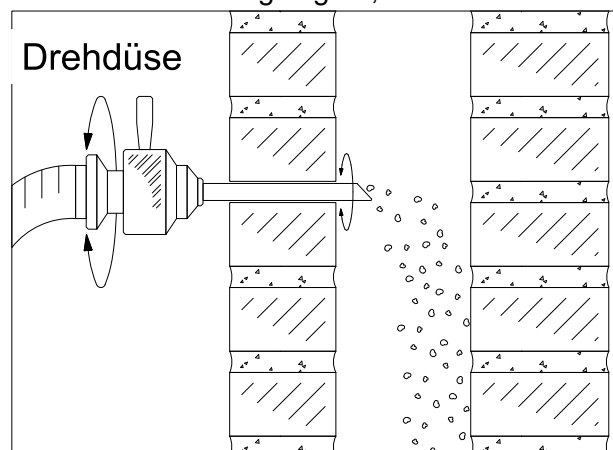
Des Weiteren gibt es um 45° geneigte Düsenauslässe. Diese weisen Rohrdurchmesser zwischen 18 mm und 50 mm auf. Die Einstechtiefen liegen zwischen 200 mm und 240 mm. Je nach Durchmesser und Ausführung ist der Einsatz bei Schüttgütern, Zellulose, Glas- und Steinwolle sowie bei Holzfasern möglich. Eine vereinfachte Darstellung eines um 45° geneigten Durchlasses findet sich in Bild 3.6.



**Bild 3.6:** Einblasdüse mit um 45° geneigtem Düsenauslass

Drehdüsen weisen ein ähnliches Einsatzgebiet wie Einblasdüsen auf. Allerdings ermöglicht hier ein Drehlager auch die Einbringung einer homogenen Dämmschicht in besonders hohen und breiten Hohlräumen. Durch das drehbare Düsenrohr und unterschiedlich geformte Düsenauslässe, kann der Materialstrom des Dämmstoffs je nach Anwendungsbereich exakt gelenkt werden.

Bei Drehdüsen sind die Düsenauslässe gewinkelt, gekröpft, um 45° geneigt oder spitz geformt. Sie sind, je nach Durchmesser und Ausführung, für das Einbringen von Zellulosefasern, Schüttgütern, Mineral- und Glaswolle sowie für Holzfasern geeignet, siehe Bild 3.7.

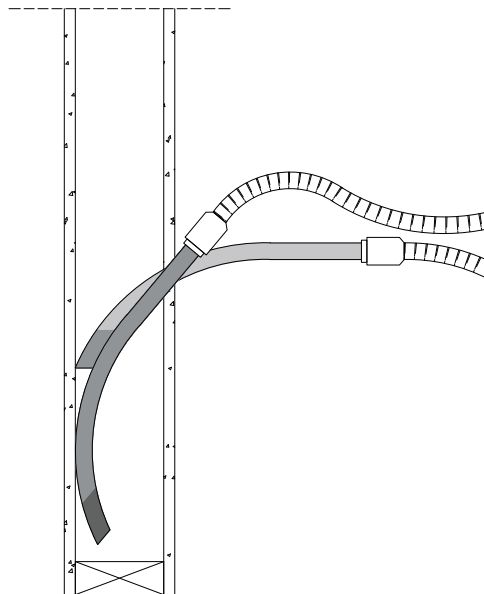


**Bild 3.7:** Drehdüse mit um 45° gekröpftem Auslass

Zur Dämmung von Wänden in Ständerbauweise eignen sich besonders entlüftende Drehdüsen. Die Luft in den zu dämmenden Hohlräumen wird über die Drehdüse kontinuierlich abtransportiert. Entlüftende Drehdüsen besitzen immer einen gewinkelten Düsenauslass und sind besonders für das Einbringen von Zellulosefasern geeignet. Je nach Ausführung ist auch das Einblasen von Holzfaser und Mineral- und Glaswolle möglich. Das Einbringen von Schüttgütern wird mit entlüftenden Drehdüsen nur eingeschränkt empfohlen. Der erforderliche Durchmesser des Bohrlochs liegt zwischen 85 mm und 115 mm.

Für Ständerwände, Dachschrägen und Decken ist die Einbringung des Dämmstoffs mithilfe von Einblasnadeln möglich. In die Bauteiloberfläche wird eine Einblasöffnung gebohrt, in der die Einblasnadel eingeführt wird. Innerhalb des Bauteils kann diese wiederum bewegt werden, um eine homogene Dämmschicht zu erzeugen. Der Vorteil von Einblasnadeln liegt in der guten Beweglichkeit; auch entfernte Ecken können erreicht werden. Eine Nachverdichtung ist mit einer Einblasnadel ebenfalls möglich. Der Durchmesser des Bohrlochs beträgt zwischen 100 bis 150 mm. Eine

beispielhafte Darstellung einer Einblasnadel in einer Wand in Ständerbauweise ist in Bild 3.8 dargestellt.

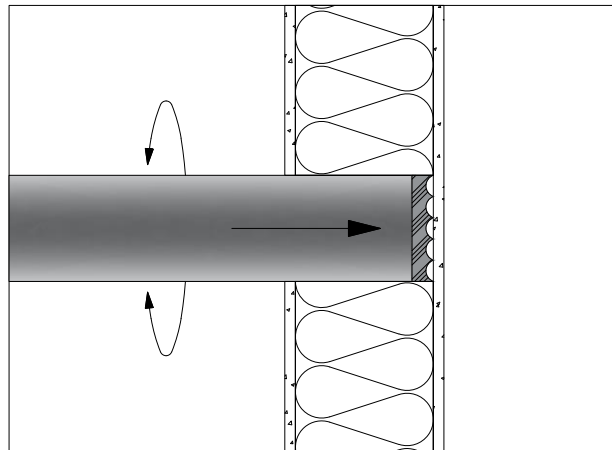


**Bild 3.8:** Einblasnadel in Ständerwand

Eine weitere Möglichkeit der Applikation von Schüttdämmstoffen ist die Verwendung eines Einblasschlauches. Dieser wird am Förderschlauch angebracht und kann aufgrund seiner Flexibilität direkt in die Konstruktion geführt werden. Auch zum offenen Aufblasen des Dämmstoffs wird ein Einblasschlauch verwendet. Hierbei wird das Material direkt auf eine, nach oben offene Fläche, z.B. eine oberen Geschossdecke, aufgebracht.

Die Prüfung der sich ergebenden Dichte des eingeblasenen Dämmstoffs erfolgt anhand von Probenentnahme und Wägung, beispielsweise mit einem Einstechzylinder. Dieser weist eine aufgedruckte Skalierung auf. Mit dem Einstechzylinder kann punktuell an Wänden, Decken, Dachschrägen und Böden eine Probe entnommen werden.

Für die Dichtebestimmung muss das Gewicht des leeren Einstechzylinders bekannt sein. Mit geringem Druck wird der Zylinder in die Dämmung bis auf den Grund des Bauteils eingedreht. Dieser wird gewogen und die Differenz zum leeren Einstechzylinder ermittelt. Zusätzlich kann mit dem Einstechzylinder die eingebrachte Dämmdicke bestimmt werden, was mit Hilfe der aufgedruckten Skalierung auf dem Einstechzylinder erfolgt. Mit den Masseangaben und der Dicke kann die Einbaudichte ermittelt werden [2][3]. Das prinzipielle Vorgehen bei der Dichtebestimmung ist skizzenhaft in Bild 3.9 dargestellt.



**Bild 3.9:** Prinzipielle Darstellung der Dichtebestimmung mit Einstechzylinder

Die Überprüfung der Verteilung des eingebrachten Dämmstoffes innerhalb des Bauteils kann mit Hilfe von Endoskopie erfolgen. Hierbei können ebenfalls Verunreinigungen und Unregelmäßigkeiten bei der Dichteverteilung festgestellt werden. Besonders bei schwer zugänglichen Hohlräumen sowie Wand-, Dach- und Deckenaufbauten findet die Endoskopie Einsatz.

Bei mehrschaligem Mauerwerk kann im Vorfeld festgestellt werden, ob die Hohlschichtbreite variiert, wie der Zustand der Vorsatzschale und der Maueranker ist und wie der Dämmstoff eingeblasen werden muss. Außerdem können Feuchtigkeitsschäden im Sockelbereich oder anderswo ausgeschlossen werden [4].

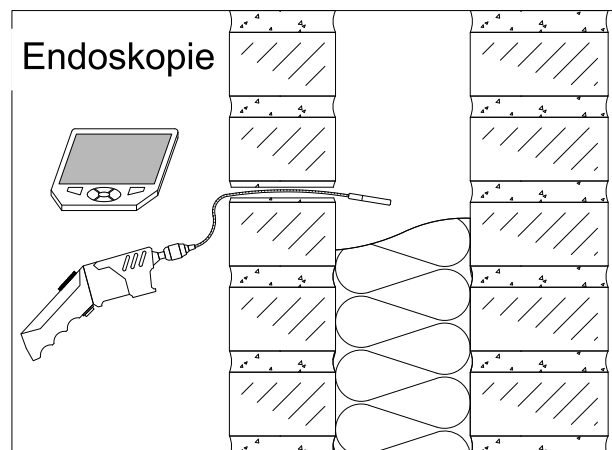
Endoskope bestehen in der Regel aus einem Okular, einem Lichtleiter, einem Endoskopiekopf und einer Sonde. Diese weist einen Durchmesser von ca. 1 cm auf. Durch Drehen ist es möglich, das Bauteilinnere rund um die Öffnung zu betrachten. Dabei können Foto- und Filmaufnahmen des Vorgangs gemacht werden.

Für die Durchführung der Endoskopie ist eine Kernbohrung mit einem Durchmesser von ca. 12 mm erforderlich. Bei der Untersuchung einer zweischaligen Wand eignet sich hierfür besonders eine Mauerwerksfuge [5].

Bild 3.10 zeigt ein beispielhaftes Endoskop. Die Durchführung der Endoskopie bei einem zweischaligen Mauerwerk ist in Bild 3.11 dargestellt.

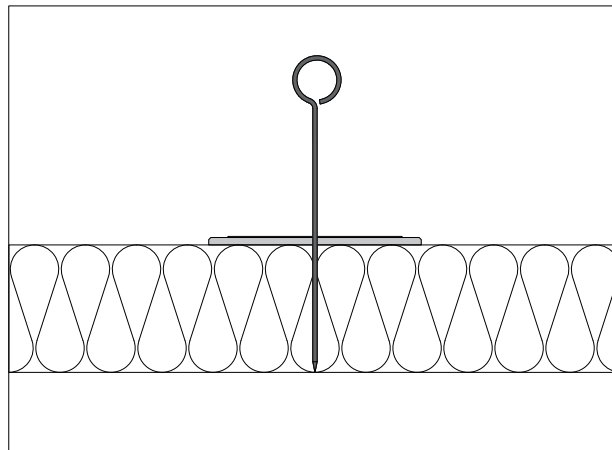


**Bild 3.10:** Darstellung eines Endoskops [6]



**Bild 3.11:** Prinzipielle Darstellung einer Endoskopie an einem Hohl-schichten-mauerwerk

Die sich ergebende Einbaudicke einer offen aufgeblasenen Dämmung wird durch messen mit einem Dickenmesser bestimmt. Der Dickenmesser besteht aus einer Prüfplatte und einem Prüfstab, der durch die Prüfplatte gestoßen wird. Um genaue Messergebnisse zu erzielen sollte darauf geachtet werden, dass Unebenheiten in der Dämmschicht geglättet sind. Der sich maximal einstellende Abstand zwischen Prüfplatte- und stab ergibt die gemessene Dicke der eingebrachten Dämmung. Zur Ermittlung der durchschnittlichen Dämmstoffdicke sind Messungen an mehreren Stellen durchzuführen. Der prinzipielle Aufbau eines Dickenmessers ist in Bild 3.12 dargestellt.



**Bild 3.12:** Prinzipielle Darstellung eines Dickenmessers

### 3.2 Sprühbare Luftdichtheitsschichten und deren Applikationstechniken

Neben der klassischen Luftdichtungsfolie als Bahn gibt es ebenfalls sprüh- und streichbare Luftdichtheitsschichten. Diese können mit Airless-Sprühgeräten oder mit Pinseln aufgetragen werden. Nach dem Trocknungsvorgang wandelt sich die Dispersion in eine strapazierfähige, elastische Schutzschicht. Als Untergründe kommen bauübliche Oberflächen wie unverputztes Mauerwerk, poröse Plattenwerkstoffe oder Bahnen infrage.

Durch das Sprühen werden Verunreinigungen und Staub unter hohem Druck direkt entfernt. Durch die Verarbeitung mit einem Airless-Spritzgerät, welches an der Spitze mit einer Düse ausgestattet ist, kann das Material sehr genau aufgebracht werden [7].

Sprühbare Luftdichtheitsschichten bestehen in der Regel aus Acrylelastomeren (einzelne Produkte werden auf Wasserbasis hergestellt), die auch nach der Trocknung flexibel und elastisch bleiben [7].

Sie werden zur Luft- und Dampfdichtheit eingesetzt und können flächig auf Wände, Decken und Böden, aber auch gezielt zur Abdichtung von Fugen, Bauteilanschlüssen und Stoßüberlappungen aufgetragen werden. Vor allem in der Altbauanierung können sprühbare Luftdichtheitsschichten angewendet werden. Hier erstreckt sich der Anwendungsbereich von Flachdächern über Steildächer zu Wandkonstruktionen in Holzständerbauweise. Die Einbringung erfolgt hierbei entweder über die Raumseite, durch Entfernen des raumseitigen Abschlusses, oder über die Außenseite, beispielsweise durch Entfernen von Ziegeln oder Bohrlöcher. Auch für den Anschluss von Luftdichtheitsbahnen an massive Bauteile können sie verwendet werden. Sie werden mittels Spritzgerät oder Pinsel als Flüssigfolie aufgebracht. Nach der Trocknung entsteht eine nahtlose und elastische Luft- und Dampfbremse, die auch Unebenheiten im Untergrund ausgleicht. Ein weiterer Vorteil der Verarbeitung von Dichtmassen als Luftdichtheitsschicht ist die Elastizität, wodurch sie weniger sensibel gegenüber Bauteilbewegungen und Temperaturexpansion sind, als ein starres Klebeband mit dünner Klebmasse.

Sprühbare Luftdichtheitsschichten werden in der Regel als 1-Komponenten-Dichtstoff im Schlauchbeutel oder Eimer geliefert. Teilweise müssen sie vor der Verarbeitung mit Wasser verdünnt werden.

Eine Zusammenfassung der Herstellerangaben zu wesentlichen Eigenschaften von Produkten für sprühbare Luftdichtheitsschichten findet sich in Tabelle 3.2.

**Tabelle 3.2:** Eigenschaften von Produkten für sprühbare Luftdichtheitsschichten

Beschreibung	Einheit	Eigenschaft
Sprühbarkeit	-	verdünnt / unverdünnt
Dichte	[g/l]	0,00104 - 0,55
VOC-frei	-	ja
s <sub>d</sub> -Wert	[m]	4 - 6,76
Überputz- / streichbarkeit	-	k. A. / ja
Verarbeitungstemperatur	[°C]	-7 - 52
Temperaturbeständigkeit	[°C]	-40 - 100
Trocknung	[h]	wenige - 48
Lieferform	[l]	0,6 - 22

Für das Verarbeiten und Auftragen von sprühbaren Luftdichtheitsschichten werden Airless-Spritzgeräte empfohlen. Bei dieser Applikationstechnik wird das Material durch eine Membran- oder Kolbenpumpe unter hohem Druck gesetzt und anschließend mithilfe eines Schlauchs in die so genannte Pistole geleitet. Dort befindet sich eine Düse, die das Material zerstäubt. Durch seitliche oder Auf- und Abbewegungen der Pistole lässt sich so das Material auf die gewünschte Oberfläche auftragen. Die Pumpe im Spritzgerät kann entweder elektrisch, pneumatisch (Druckluft über Kompressor) oder mithilfe eines Verbrennungsmotors angetrieben werden. Für die Applikation von kleinen Mengen gibt es Geräte, mit direkt am Sprühgerät montierten Behältern. Mittlere Mengen können mithilfe eines Ansaugsystems direkt aus der Verpackung (z. B. Eimer) zugeführt werden, große Mengen über ein Containeransaugsystem, welches das Material direkt aus einem Container einleitet.

Der Vorteil der Spritzgeräte liegt in der hohen Flächenleistung bei geringem Personaleinsatz, bei dem der Materialverbrauch gut kontrollierbar und damit sehr wirtschaftlich ist. Selbst bei rauen Oberflächen ist eine gute Verarbeitung gewährleistet. Außerdem kann bei Verwendung eines Airless-Spritzgeräts ein gleichmäßiges Ergebnis bei einer schnellen und einfachen Handhabung erzielt werden. Auch schwer zugängliche und verwinkelte Ecken und Durchdringungen können einfach abgedichtet werden. Nachteilig ist, dass bei der Applikation ein Sprühnebel entsteht und die umliegenden Bauteile und Oberflächen vorher abgedeckt werden müssen. Auch die Reinigung des Geräts ist zeitaufwändig. Zusätzlich entstehen Kosten durch die Anschaffung.

Das Sprühergebnis hängt von der gewählten Düse und vom Spritzdruck ab. Dieser kann über ein Druckventil und ein Entlastungsventil geregelt und mithilfe eines Manometers gemessen werden. Bei Spritzgeräten beträgt der Spritzdruck in der Regel maximal 250 bar. Er ist von der Viskosität des Materials und der Temperatur abhängig. Am Sprühbild lässt sich erkennen, ob der Druck richtig eingestellt ist. Weist das Sprühbild keine Ränder auf, ist der gewählte Druck ideal. Bei zu hoch eingestelltem Druck werden die Tröpfchen des zu spritzenden Materials zu sehr beschleunigt und es bildet sich ein Farbnebel, auch „Overspray“ genannt, der nicht auf dem vorgesehenen Bauteil, sondern auf benachbarten Oberflächen landet. Ein zu hoher Druck führt daher zu erhöhtem Materialverbrauch und einem Mehraufwand bei Abklebungs- und Reinigungsarbeiten [8]. Bei besonders viskosen Materialien kann auch ein Druck von bis zu 500 bar erforderlich sein. Hierfür wird in der Regel eine Flachstrahldüse verwendet. Diese sind in verschiedenen Ausführungen und Größen erhältlich und sollten je nach Material und Einsatzgebiet gewählt werden.

Es gibt Düsen mit unterschiedlichen Spritzbreiten (bzw. Spritzwinkeln) und -öffnungen [9]. Auch die Wahl der richtigen Düse ist für Verarbeitung des Materials und Qualität des Ergebnisses von Bedeutung. Eine zu große Düse fördert zu viel Material und es kommt zu Nasen- und



Streifenbildung. Das Sprühergebnis ist ungleichmäßig. Auch eine zu kleine Düse ist problematisch, da diese schnell verstopft und die Verarbeitung des Materials unmöglich macht [8].

Die Durchflussrate des Geräts ist von der Größe der Düse und dem Sprühdruk abhängig und liegt zwischen 0,2 und 5,0 l pro Minute. Bei Hochleistungsdüsen sind auch höhere Durchflussraten möglich. Allgemein gilt, je höher der Druck, desto größer die Durchflussmenge [10].

Bild 3.13 zeigt die Applikation der sprühbaren Luftdichtheitsschicht mithilfe eines Spritzgeräts.



**Bild 3.13:** Applikation einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht mithilfe eines Spritzgeräts [11]

Zusätzlich zu den Sprüheräten besteht die Möglichkeit die sprühbaren Luftdichtheitsschichten mit einem Pinsel aufzutragen. Schwierig ist hierbei vor allem die Dosierung des Materials. Dünne und homogene Schichten sind nur schwer aufzubringen. Auch der Zeitaufwand bei großflächiger Anwendung ist erheblich größer als bei Spritzgeräten. Für kleine Flächen bietet der Pinsel allerdings Vorteile. Dadurch, dass kein Sprühnebel entsteht, müssen die umliegenden Bauteile und Oberflächen nur geringfügig abgedeckt werden. Außerdem fällt keine Zeit für die Reinigung des Sprühgeräts an und die Anschaffungskosten sind gering.

### 3.3 Ermittlung der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke

Die Bestimmung der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke erfolgt auf Grundlage von DIN EN ISO 12572 [12]. Hierbei wird eine Probe des zu untersuchenden Materials in ein Prüfgefäß eingebaut, das ein Trockenmittel enthält. Dieses wird in einen Klimaschrank mit Diffusionsstranggefälle zwischen Prüfgefäß und Prüfraum gestellt. Über die Probe stellt sich ein Dampfdiffusionsstrom, welcher über Wägung bestimmt werden kann, ein.

Als Prüfbedingungen werden klimatische Bedingungen von  $23 \pm 1$  °C und  $0 + 5$  % relativer Luftfeuchte im Prüfgefäß und  $50 \pm 5$  % relativer Feuchte in der Umgebung angesetzt.

Die Proben werden mithilfe einer Schablone auf eine kreisförmige Fläche von  $0,0219 \text{ m}^2$  zugeschnitten. Für eine normgerechte Untersuchung, müssen die Probekörperflächen  $A$  kleiner als  $0,05 \text{ m}^2$  sein und es müssen mindestens fünf Probekörper untersucht werden.

Im Prüfgefäß sorgt ein Molekularsieb für ein trockenes Milieu ( $\varphi = 0 \%$ ). Das Sorptionsmittel wird zur Regenerierung einen Tag bei  $250 \text{ °C}$  im Ofen getrocknet. Um den Widerstand der umgebenden Luft zu eliminieren, wird eine Luftumwälzung durch zwei Ventilatoren hergestellt, welche die Luft im Prüfraum verteilen.

Das Wägeintervall  $t_I$  zwischen den Messungen wird nach [12] iterativ nach (1) bestimmt:

$$t_I = \frac{200 \cdot m_r \cdot \mu \cdot d}{\delta_a \cdot \Delta_{pv} \cdot A \cdot x} \quad (1)$$

mit

- $t_I$  [s] Wägeintervall;  
 $m_r$  [kg] Masse des Probekörpers und der Gefäßanordnung;  
 $\mu$  [-] Wasserdampfdiffusionswiderstandzahl;  
 $d$  [m] mittlere Probenkörperdicke;  
 $\delta_a$  [kg/(m·s·Pa)] Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft;  
 $\Delta_{pv}$  [Pa] Dampfdruckdifferenz;  
 $A$  [m<sup>2</sup>] Probekörperfläche;  
 $x$  [-] erzielte Genauigkeit des Ergebnisses.

Die Massenänderung je Zeiteinheit  $\Delta \dot{m}_{12}$  ergibt sich aus den Messungen des Probengewichts nach

$$\Delta \dot{m}_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

mit

- $\Delta \dot{m}_{12}$  [kg/s] Massenänderung;  
 $m$  [kg] Masse des Prüfkörpers und der Gefäßanordnung;  
 $t$  [s] Zeit.

Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionsstromdichte  $g$  erfolgt nach

$$g = \frac{G}{A} \quad (3)$$

mit

- $g$  [kg/(s·m<sup>2</sup>)] Wasserdampfdiffusionsstromdichte;  
 $G$  [kg/s] Wasserdampfdiffusionsstrom;  
 $A$  [m<sup>2</sup>] Probenfläche.

Der Wasserdampfdiffusionsstrom  $G$  wird als Mittelwert aus den letzten fünf aufeinanderfolgenden Berechnungen von  $\Delta \dot{m}_{12}$  für alle Proben und die Wasserdampfdiffusionsstromdichte  $g$  durch Division des Wasserdampfdiffusionsstrom  $G$  mit der Probenfläche  $A$  ermittelt.

Die Differenz der Dampfdrücke im Klimaschrank und im Prüfkörper wird für den Mittelwert von Temperatur und Luftfeuchte bestimmt. Im Klimaschrank herrscht eine relative Luftfeuchte von 50 % und für die klimatischen Bedingungen im Prüfgefäß wird davon ausgegangen, dass durch den Molekularsieb eine konstante Feuchte von 0 % gegeben ist. Dadurch, dass im Klimaschrank ein konstantes Niveau entsteht, werden Sollwerte von 23 °C und 50 % relative Luftfeuchte angenommen. Hystereseschwankungen werden in der Fehlerberechnung berücksichtigt.

Der Druck  $p_i$  ergibt sich wie folgt

$$p_i = \varphi_m \cdot 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta_m}{237,3 + \theta_m}} \quad (4)$$

mit

$p_i$  [Pa] Dampfdruck;

$\varphi_m$  [-] mittlere relative Luftfeuchte;

$\theta_m$  [°C] mittlere Temperatur.

Im Probengefäß ist der Druck  $p_{0\%} = 0$  Pa und im Klimaschrank  $p_{50\%} = 1403,9$  Pa. Die Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen Probengefäß und Klimaschrank beträgt 1403,9 Pa.

Der Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient  $W$  berechnet sich aus der Wasserdampfdiffusionsstromdichte  $g$  und der ermittelten Druckdifferenz  $\Delta p$  gemäß

$$W = \frac{g}{\Delta p} \quad (5)$$

Wird der Kehrwert des Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizienten  $W$  gebildet, ergibt sich der Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand  $Z$  in  $(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})/\text{kg}$ .

$$Z = \frac{1}{W} \quad (6)$$

Die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  der Probe wird wie folgt ermittelt.

$$s_d = \mu \cdot d = \delta_a \cdot Z \quad (7)$$

mit

$s_d$  [m] wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke;

$\mu$  [-] Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl;

$d$  [m] mittlere Probenkörperdicke;

$\delta_a$  [kg/(m·s·Pa)] Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient;

$Z$  [(m²·s·Pa)/kg] Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand.

Da die Dicke der aufgetragenen Luftdichtheitsschicht nicht exakt ermittelt werden kann, wird der  $s_d$ -Wert mithilfe des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten  $\delta_a$  bestimmt. Dieser ergibt sich zu

$$\delta_a = \frac{0,083 \cdot p_0}{3600 \cdot R_d \cdot T_m \cdot p_m} \cdot \left( \frac{T_m}{273} \right)^{1,83} \quad (8)$$

mit

$\delta_a$  [kg/(m·s·Pa)] Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient;

$p_0$  [hPa] normaler Luftdruck  $p_0 = 1013,25$  hPa;

$R_d$  [Nm/(mg·K)] Gaskonstante von Wasserdampf  $R_d = 462 \cdot 10^6$  Nm/(mg·K);

$p_m$  [hPa] mittlerer Luftdruck in der Umgebungsluft;

$T_m$  [°C] mittlere Lufttemperatur im Prüfzeitraum.

Der  $s_d$ -Wert der eingesetzten Unterspannbahn von 0,04 m wird vom Ergebnis abgezogen.

### 3.4 Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstandes

Der längenbezogene Strömungswiderstand wird in Anlehnung an die DIN EN ISO 9053-1 [13] bestimmt. Nach [13] wird der Druckverlust zwischen den beiden Stirnflächen eines Probekörpers gemessen, während dieser einer einseitig gerichteten Strömung ausgesetzt ist. Der zu untersuchende Probekörper wird in ein Messgefäß gegeben, welches einen kreisförmigen oder runden Querschnitt aufweist. Der Querschnitt bzw. die Kantenlängen des Messgefäßes sind nach Vorgaben der DIN EN ISO 9053-1 [13] entsprechend der Abmessungen des Probekörpers zu wählen, müssen jedoch mindestens 29 mm betragen. Die Höhe des Gefäßes ist so zu wählen, dass sich eine laminare Strömung durch die Probe einstellt. Vor dem Probekörper sollte ein freier Bereich bleiben, der mindestens dem Durchmesser bzw. dem Quermaß des Probekörpers entspricht. Die Probe wird im Messgefäß auf ein Gitter aus Draht oder eine perforierte Unterlage gelegt, welche einen Lochanteil  $\geq 50$  % und Löcher  $\geq 3$  mm aufweisen muss. Die Seitenlänge der untersuchten Probe muss mindestens 10 Poren bzw. Fasern oder Körner betragen. Ist die Struktur der Probe nicht bekannt, ist ein Mindestdurchmesser von 95 mm bzw. eine Mindestkantenlänge von 90 mm anzusetzen. Die Dicke des Probekörpers muss einen messbaren Druckverlust hervorrufen, gegebenenfalls dürfen mehrere Probekörper nach [13] aufeinandergeschichtet werden.

Um einen Unterdruck zu erzeugen, kann ein wassergefüllter Behälter, eine Vakuumpumpe oder ein Druckerzeugungssystem verwendet werden. Die von der Strömungsquelle erzeugte Strömung muss steuerbar und im unteren Bereich des Messgefäßes konstant sein. Die lineare Strömungsgeschwindigkeit sollte dabei möglichst gering sein. Für die kleinste angesetzte Strömungsgeschwindigkeit wird  $u = 0,5 \cdot 10^{-3}$  m/s (oder die kleinste mögliche Geschwindigkeit gewählt). Ergibt sich eine nichtlineare Strömungsgeschwindigkeit, wird die Druckdifferenz als Kurve in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit  $u$  bestimmt.

Die Messung des Volumenstroms wird zwischen Quelle und Probekörper vorgenommen. Die sich einstellende Druckdifferenz wird gemessen.

Der Strömungswiderstand  $R$  ermittelt sich hierbei wie folgt:

$$R = \frac{\Delta p}{q_v} \quad (9)$$

Der spezifische Strömungswiderstand  $R_s$  ist wie folgt definiert:

$$R_s = R \cdot A \quad (10)$$

mit

$R$  [(Pa·s)/m<sup>3</sup>] Strömungswiderstand des Probekörpers;

$\Delta p$  [Pa] Druckdifferenz über den Probekörper gegenüber dem Atmosphärendruck;

$q_v$  [m<sup>3</sup>/s] durch den Probekörper hindurchtretender Volumenstrom;

$R_s$  [(Pa·s)/m] spezifischer Strömungswiderstand;

$A$  [m<sup>2</sup>] Querschnittsfläche des Probekörpers.

Der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  ergibt sich aus

$$r = \frac{R_s}{d} \quad (11)$$

mit

$r$  [(Pa·s)/m<sup>2</sup>] längenbezogener Strömungswiderstand;

$R_s$  [(Pa·s)/m] spezifischer Strömungswiderstand;

$d$  [m] Dicke des Probekörpers in Durchströmrichtung.

Der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  für die in dieser Untersuchung betrachteten Schüttdämmstoffe wird in Anlehnung an das Messverfahren der DIN EN ISO 9053-1 [13] bestimmt. Dabei wird eine Druckdifferenz  $\Delta P$  über den Probekörper (Dämmstoff) gegenüber dem Atmosphärendruck mit Hilfe eines geregelten Ventilators von 10 Pa bis 50 Pa gefahren. In Schritten von 5 Pa wird der Volumenstrom  $q_v$  durch den Probekörper mit einem Laminar-Flow-Element bestimmt. Ein Laminar-Flow-Element (LFE) ist ein Messgerät, um einen Luft- oder Gasdurchfluss zu bestimmen. Die Wirkungsweise beruht auf dem Gesetz von Hagen-Poiseuille, welches aussagt, dass eine Strömung in einem dünnen Rohr proportional zum Druckverlust pro Länge ist, wenn es sich um eine laminare Strömung handelt [14]. Als Voraussetzung für die Anwendung dieser Beziehung muss die zu messende Strömung also laminar sein. Sie gilt außerdem nur für Flüssigkeiten (inkompressible Medien) und bei Gasen nur für den Fall der Druckentnahme nach Ende der Beschleunigung in den Kapillaren in den Ein- bzw. Auslaufbereichen [15].

$$\Delta P \sim \dot{V} \cdot \eta \quad (12)$$

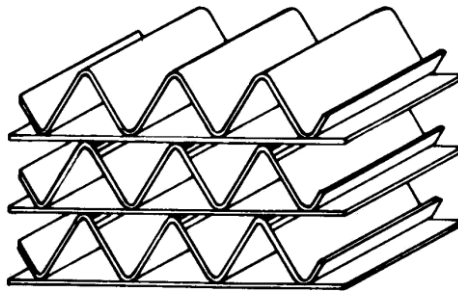
mit

$\Delta P$  [Pa] Druckdifferenz;

$\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] Volumenstrom durch das Rohr;

$\eta$  [Pa·s] dynamische Viskosität des strömenden Mediums.

Laminar Flow Elemente bestehen klassisch aus einer oder mehreren Kapillaren mit sehr kleinem Durchmesser (< 1 mm) und Längen von 80 bis 200 mm oder aus Durchflussskanälen, die durch sehr enge Ringspalte gebildet werden. Um Durchflusselemente für größere Durchflüsse zu erhalten, werden die erforderlichen Kapillaren gebündelt. Bei Durchflüssen > 100 l/min. werden statt Einzelkapillaren oder Spaltkanälen aufgerollte und geknickte Edelstahlbleche verwendet, die eine Edelstahlmatrix paralleler Dreiecks-Kapillaren bilden, siehe Bild 3.14. Diese Edelstahlmatrizen sind als Wickel in ein Edelstahlgehäuse montiert [16].



**Bild 3.14:** Edelmatrix paralleler Dreiecks-Kapillaren [16]

Mit einem Laminar-Flow-Element können kleine Leckagemengen, aber auch große Durchflussmengen bestimmt werden. Im Gerät wird der Differenzdruck, der Absolutdruck und die Temperatur gemessen. Aus diesen Ergebnissen werden die Dichte und die Viskosität des durchfließenden Gases bestimmt. Mithilfe der Kalibrierkennlinie kann der Durchfluss ermittelt werden. Durch die lineare Abhängigkeit von Durchfluss und Wirkdruck, können große Bandbreiten von Durchflussmengen gemessen werden [17].

In Tabelle 3.3 sind die wesentlichen Abweichungen der eigenen Messung zur Messung nach [13] aufgeführt.

**Tabelle 3.3:** Abweichungen des verwendeten Versuchsaufbaus gegenüber der Normmessung

	Messung nach DIN EN ISO 9053 - 1 [13]	Verwendeter Versuchsaufbau
Gerät zur Erzeugung der Druckdifferenz	Vakuumpumpe, Luftkompressor	geregelter Ventilator
kleinste erzeugte Strömungsgeschwindigkeit	$0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
größte erzeugte Strömungsgeschwindigkeit	1,5 m/s	$5,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
kleinste mögliche Druckdifferenz	0,1 Pa	1 Pa
Messung mit kalibrierten Probenkörper	ja	nein
Einbringung des Dämmstoffes in den Versuchsaufbau	gute Dichteverteilung über die Probe	durch die praxisnahe Einbringung des Materials mit der Einblasnadel ist eine gleichmäßige Dichteverteilung nicht gewährleistet

### 3.5 Luftdurchlässigkeit und Messungen

Die Luftdichtheit eines Gebäudes kann quantitativ mit der standardisierten Bower Door-Messung nach DIN EN 13829 [18] bestimmt werden. Anhand der Messung wird ermittelt, wie oft das Luftvolumen des Gebäudes bei einer bestimmten Druckdifferenz zur Außenluft pro Stunde ausgetauscht wird. Um diesen Differenzdruck aufzubauen, wird in eine Öffnung des Gebäudes ein Rahmen mit Ventilator eingebaut, der mit einer Folie bespannt ist. Die Drehzahl des Ventilators wird so geregelt, dass sich ein definierter Druck zwischen Außen- und Innenraum einstellt. Um diesen Druck aufrechtzuerhalten muss der Ventilator einen identisch hohen Volumenstrom fördern.

Dividiert man den Leckagestrom durch das lichte Gebäudevolumen, so erhält man die Luftwechselrate  $n_{50}$  bei 50 Pa. Diese Kenngröße ist sowohl in Deutschland als auch international am gebräuchlichsten. Sie ist vor allem geeignet, wenn es um den Zusammenhang zwischen Luftdicht-

heit und Lüftung geht, z.B. bei der Berechnung der Lüftungswärmeverluste durch wetterbedingte In- und Exfiltration.

Die Luftdurchlässigkeit erhält man, indem man den Leckagestrom durch die Hüllfläche des Gebäudes dividiert. Sie beschreibt die Qualität der Luftdichtheit. Während die Luftwechselrate bei 50 Pa bei großen Gebäuden aufgrund des günstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses fast automatisch klein ausfällt, lässt die Luftdurchlässigkeit auch bei solchen Gebäuden eine Beurteilung der Qualität der luftdichten Hülle zu.

Wird der Leckagestrom bei 50 Pa (in m<sup>3</sup>/h) halbiert, so ergibt sich die äquivalente Leckagefläche in cm<sup>2</sup> durch eine scharfkantige Öffnung dieser Größe in einer dünnen Platte. Die reale Öffnungsfläche wird allerdings häufig größer sein, weil die Gebäudehülle keine dünne Platte ist, sondern die Strömungspfade oft einen langen Weg durch die Gebäudehülle nehmen müssen.

Der Leckagestrom  $q_{50}$  bei 50 Pa errechnet sich zu

$$q_{50} = C_L(50Pa)^n \quad (13)$$

mit

$q_{50}$  [m<sup>3</sup>/h] Leckagestrom bei 50 Pa;

$C_L$  [m<sup>3</sup>/(h·Pa<sup>n</sup>)] Leckagekoeffizient;

$n$  [-] Strömungsexponent.

Die Luftwechselrate  $n_{50}$  bei 50 Pa ergibt sich über die Division des Leckagestroms  $q_{50}$  mit dem inneren Volumen des Gebäudes.

$$n_{50} = \frac{q_{50}}{V} \quad (14)$$

mit

$n_{50}$  [h<sup>-1</sup>] Luftwechselrate bei 50 Pa;

$V$  [m<sup>3</sup>] Innenvolumen.

Die Einhaltung der nach Energieeinsparverordnung vorgegebenen Grenzwerte bedeutet nicht, dass keine unzulässig großen Leckagen in der Gebäudehülle vorhanden sind.

In einem beheizten Gebäude können Leckagen bei geringen Außenlufttemperaturen auch mit der Thermografiekamera lokalisiert und dokumentiert werden. Dieses Verfahren ist vor allem dann hilfreich, wenn z.B. wegen großer Raumhöhen Außenbauteile nicht mit der Hand erreicht werden können, wenn große Flächen abgesucht werden müssen oder wenn die Ergebnisse z.B. für ein Gerichtsverfahren anschaulich dargestellt werden müssen.

Typische Leckagen treten überwiegend in folgenden Bereichen auf:

- Verbindungen und Stößen von Bauteilen
- Rohr- und Kabeldurchführungen durch die Luftdichtheitsschicht
- Anschlüssen zum Boden (z. B. Türen und bodentiefe Fenster)
- Stoßstellen verschiedener Baumaterialien (z. B. Massiv-/Leichtbau)
- Anbauten und Erkern, an Fenster- und Außentürleibungen

- Dachflächenfenstern und Gauben sowie Bodenluken

### 3.6 Luftdurchlässigkeit bei Leckagen

Als Leckagen werden Undichtigkeiten in der Luftdichtheitsebene von Gebäuden bezeichnet, durch die Luft in und durch die Gebäudehülle strömen kann. Die Strömungsrichtung ist dabei abhängig von den Druckverhältnissen. Befindet sich die Leckage in als Luftdichtheitsschicht vorgesehenen Bauteilschichten wird diese auch als „primäre Leckage“ bezeichnet. Auch geplante und funktionsbedingte Leckagen werden im Allgemeinen als „primäre Leckage“ definiert. Liegt die Leckage allerdings in einer Bauteilschicht die raumseitig von der Luftdichtheitsebene angebracht ist, wird von einer „sekundären Leckage“ gesprochen. „Tertiäre Leckagen“ befinden sich in Bauteilschichten auf der raumabgewandten Seite der Luftdichtheitsebene [19].

Werden die einzelnen Leckagen zusammenhängend betrachtet, können sie als Fläche ausgedrückt werden. Die einzelnen Leckageflächen sind allerdings schwer zu ermitteln, daher wird von den Ergebnissen der Luftdichtheitsmessung eine Angabe über die äquivalente Leckagefläche abgeleitet.

Der Leckagestrom ist der Volumenstrom durch die Gebäudehülle und umfasst die Strömung durch Fugen, Risse und über poröse Materialien [20].

Die Ermittlung des Leckagestroms bei einer Blower-Door Messung nach [21] erfolgt durch die Erzeugung eines Unter- oder Überdrucks in einem Gebäude bzw. Gebäudeteil. Im Bereich der erzeugten Druckdifferenz wird die Druckdifferenz und der Volumenstrom zwischen Innen und Außen in Schritten kleiner 10 Pa gemessen. Die kleinste Druckdifferenz muss dabei mindestens das fünffache der natürlichen Druckdifferenz  $\Delta p_{0,1}$ , jedoch maximal 10 Pa betragen. Die größte Druckdifferenz soll mindestens 50 Pa betragen. Es ist sinnvoll je eine Messung bei Über- und Unterdruck durchzuführen.

Für die Auswertung der Messergebnisse wird das Innenvolumen und die Hüllfläche des Prüfkörpers anhand der Innenmaße bestimmt. Um die erzeugte Druckdifferenz  $\Delta p$  zu erhalten, ist die gemessene Druckdifferenz  $\Delta p_m$  wie folgt umzurechnen:

$$\Delta p = \Delta p_m - \frac{\Delta p_{0,1} + \Delta p_{0,2}}{2} \quad (15)$$

Dabei entspricht  $\Delta p_{0,2}$  der natürlichen Druckdifferenz vor der Prüfung und  $\Delta p_{0,1}$  der natürlichen Druckdifferenz nach der Prüfung.

Anschließend wird der am Volumenstrommessgerät abgelesene Volumenstrom  $q_r$  in den gemessene Luftvolumenstrom  $q_m$  nach Herstellerangaben umgerechnet.

Der gemessene Luftvolumenstrom wird nun in den Luftvolumenstrom durch die Hüllfläche  $q_{env}$  umgerechnet.

Für Unterdruck gilt:

$$q_{env} = q_m \left( \frac{\rho_{int}}{\rho_e} \right) \approx q_m \left( \frac{T_e}{T_{int}} \right) \quad (16)$$

Für Überdruck gilt:



$$q_{env} = q_m \left( \frac{\rho_e}{\rho_{int}} \right) \approx q_m \left( \frac{T_{int}}{T_e} \right) \quad (17)$$

mit

$\rho_{int}$  [kg/m<sup>3</sup>] Dichte der Innenluft;

$\rho_e$  [kg/m<sup>3</sup>] Dichte der Außenluft;

$T_{int}$  [K] absolute Temperatur der Innenluft;

$T_e$  [K] absolute Temperatur der Außenluft.

Werden die Volumenströme durch die Hüllfläche für Unter- und Überdruck über die entsprechenden Druckdifferenzen in doppeltlogarithmischer Darstellung aufgetragen, erhält man beide Leckagekurven. Mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate kann der Strömungskoeffizient  $C_{env}$  und der Strömungsexponent  $n$  wie folgt bestimmt werden:

$$q_{env} = C_{env}(\Delta p)^n \quad (18)$$

Diese werden jeweils für Unter- und den Überdruck berechnet. Der Strömungsexponent  $n$  muss zwischen 0,5 und 1,0 liegen [21].

Um den Leckagekoeffizienten  $C_L$  zu erhalten, wird der Strömungskoeffizient  $C_{env}$  auf Normbedingungen (20 °C, 1,013 · 10<sup>5</sup> Pa) wie folgt umgerechnet:

Für Überdruck gilt:

$$C_L = C_{env} \left( \frac{\rho_e}{\rho_0} \right)^{1-n} \approx C_{env} \left( \frac{T_0}{T_e} \right)^{1-n} \quad (19)$$

Für Unterdruck gilt:

$$C_L = C_{env} \left( \frac{\rho_{int}}{\rho_0} \right)^{1-n} \approx C_{env} \left( \frac{T_0}{T_{int}} \right)^{1-n} \quad (20)$$

mit

$\rho_0$  [kg/m<sup>3</sup>] Dichte der Luft unter Normbedingungen;

$T_0$  [K] absolute Temperatur der Luft unter Normbedingungen.

Der Strömungsexponent  $n$  beschreibt die Art der Strömung innerhalb der Leckagen. Bei  $n = 0,5$  handelt es sich um eine turbulente Strömung und bei  $n = 1,0$  um eine laminare. Die sich einstellende Strömung hängt von der Größe und Form der Öffnung und von der Rauigkeit der Oberfläche ab.

Eine turbulente Strömung zeichnet sich durch ein zeitlich und räumlich scheinbar zufällig variierendes Strömungsfeld aus, wohingegen eine laminare keine sichtbaren Turbulenzen auftreten. Der Druckverlust ist bei turbulenter Strömung größer als bei laminarer Strömung. Die Verwirbelung entsteht durch den Geschwindigkeitsunterschied der Strömung in Rohrmitte gegenüber der Strömung nahe der Wandung. Mit steigendem Durchfluss nimmt die Intensität der Turbulenz zu und der Druckverlust erhöht sich annähernd quadratisch [22].

Bei großen Öffnungen kann die Strömung in der Regel als turbulent beschrieben werden. Der Strömungsexponent  $n$  liegt dann ungefähr bei 0,5. Bei kleinen Öffnungen wie z.B. Rissen oder Spalten ergeben sich lange Strömungswege, die Strömung ist eher laminar und der Strömungsexponent  $n$  liegt in der Nähe von 1,0. Für die Leckage an der Gebäudehülle ergibt sich eine

Mischung aus turbulenter und laminarer Strömung. Der Strömungsexponent  $n$  liegt also zwischen beiden Extremen [23].

Ausgehend von der allgemeinen Energiegleichung für inkompressible Strömungen (21), welche die Grundlage aller technischen Durchströmungsprozesse bildet, können die Berechnungsansätze für Kanalströmungen abgeleitet werden. Die Kanalströmung kann hierbei als Analogie für die Durchströmung von Bauteilfugen betrachtet werden.

$$\frac{1}{2} \cdot w_2^2 + \frac{p}{\rho} + g \cdot z_2 = \frac{1}{2} \cdot w_1^2 + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 - \varphi_{12} \quad (21)$$

mit

$w$  [m/s] Strömungsgeschwindigkeit;

$p$  [Pa] Druck;

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

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

$z$  [m] Höhe;

$\varphi_{12}$  [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>] spezifische Dissipation (Reibung).

Wegen  $w_1 = w_2$  (gleichbleibender Strömungsquerschnitt) und  $z_1 = z_2$  (kein Einfluss durch geodätischen Höhenunterschied) und unter Berücksichtigung der Definition der spezifischen Dissipation nach (22).

$$\varphi_{12} = \xi \cdot \frac{1}{2} \cdot w^2 \quad (22)$$

mit

$\xi$  [-] Widerstandszahl

kann der Druckverlust einer Rohr- bzw. Kanalströmung wie folgt formuliert werden:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (23)$$

Die Kontinuitätsgleichung

$$\dot{V} = A \cdot w \quad (24)$$

mit

$\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] Volumenstrom;

$A$  [m<sup>2</sup>] durchströmte Fläche.

In Verbindung mit (23) zeigt sich, dass der Volumenstrom proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist und damit proportional zu  $\Delta p^{0.5}$ . Dies gilt für die meisten technischen Strömungsvorgänge (Kanal-, Rohr- oder Gerinneströmung), bei denen üblicherweise eine turbulente Strömung vorliegt [24].

Mit der Einführung der Rohrreibungszahl  $\lambda$  und des hydraulischen Durchmessers  $d_h$  kann die Widerstandszahl in Gleichung 23 wie folgt substituiert werden:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (25)$$

mit

$\lambda$  [-] Rohrreibungszahl;

$l$  [m] Strömungslänge;

$d_h$  [m] hydraulischer Durchmesser.

Im Fall der laminaren Strömung (Hagen-Poiseuille-Strömung) folgt die Rohrreibungszahl in Abhängigkeit von der Reynoldszahl  $Re$  aus dem einfachen Zusammenhang

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64 \cdot \nu}{w \cdot d_h} \quad (26)$$

mit

$\nu$  [m<sup>2</sup>/s] kinematische Viskosität

Im Grenzfall der vollkommen laminaren Strömung ist die Strömungsgeschwindigkeit und somit auch der Volumenstrom proportional zur Druckdifferenz  $\Delta p$ . Diese Strömungsform ist bei kleinen Strömungsquerschnitten und geringen Strömungsgeschwindigkeiten, also niedrigen Reynoldszahlen, zu beobachten (z. B. Strömungen im Blutkreislauf).

### 3.6.1 Praktische Behandlung der Strömung durch Bauteilfugen

Ausgehend von Untersuchungen der Luftdichtheit von Gebäudehülle und Bauelementen wurden bereits in den 1920er Jahren und folgend in [25] und [27] empirische Ansätze zur Beschreibung von Luftvolumenströmen aufgrund von Leckagen abgeleitet. Anwendung findet zumeist die Form

$$\dot{V} = a \cdot l \cdot \Delta p^n \quad (27)$$

mit

$a$  [m<sup>3</sup>/(m·h·(Pa)<sup>n</sup>)] Fugendurchlasskoeffizient;

$l$  [m] Spaltlänge;

$\Delta p$  [Pa] Druckdifferenz;

$n$  [-] Druckexponent.

In der praktischen Anwendung von (27) wird der Druckexponent  $n$  meist mit dem Wert 2/3 angesetzt [26]. Hiermit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass bei im Bauwesen auftretenden Leckagen weder die vollkommen turbulente Strömung mit  $n = 0,5$  noch die reine laminare Strömung mit  $n = 1$  vorliegt.

Der Fugendurchlasskoeffizient  $a$  gibt hierbei an, welcher Volumenstrom bei einer Druckdifferenz von 1 Pa durch die Leckage hindurchtritt. Die Kennzeichnung dieses Proportionalitätsfaktors wird in der Literatur unterschiedlich behandelt. Während in älteren Publikationen [25], [26], [27] und [28] der Fugendurchlasskoeffizient  $a$  verwendet wird, erfolgt nach [18] die Angabe eines Strömungskoeffizienten  $C_{env}$  bzw. eines Leckagekoeffizienten  $C_L$ . Die beiden letztgenannten Größen können über das Verhältnis der Luftdichte bei Außen- bzw. Innenluftbedingungen im Rahmen der Messung und der Luftdichte bei Standardbedingungen ineinander überführt werden. Wird der Fugendurchlasskoeffizienten in m<sup>3</sup>/(m·h·(Pa)<sup>n</sup>) mit der Spaltlänge  $l$  in m multipliziert, ergibt sich der Strömungskoeffizient  $C_{env}$  in m<sup>3</sup>/(h·(Pa)<sup>n</sup>).

Um den Fugendurchlasskoeffizienten  $a$  und den Druckexponenten  $n$  von Bauteilfugen auf Grundlage der Fugengeometrie zu bestimmen sind experimentelle Untersuchungen für jede zu bewertende Fugengeometrie erforderlich, da die vorhandenen Ergebnisse nicht auf Fugen mit anderen Geometrien und Prüfbedingungen übertragen werden können. In einer Untersuchung von Esdorn und Rheinländer [28] ist eine Beziehung zwischen Volumenstrom und Druckdifferenz ermittelt worden, um die experimentell gewonnenen Ergebnisse so zu verallgemeinern, dass die Spaltparameter  $a$  und  $n$  auch für abweichende Fugengeometrien ermittelt werden können. Die Messungen wurden an einem geraden Spalt und an einem Fugenmodell mit Umlenkung durchgeführt. Fugen unterschiedlicher Fugentiefe und -breite wurden mithilfe eines Winkelprofils aus Aluminium erzeugt. Diese wurden in einem Messkanal zwischen zwei Druckkammern positioniert. Das Fugenmodell mit Umlenkung wurde aus einem Rechteckrohr hergestellt.

Für den geraden Spalt sind die Druckverluste beispielhaft für eine Spalttiefe von 100 mm in Bild 3.15 dargestellt. Diese werden in Abhängigkeit vom Volumenstrom  $\dot{V}$  für verschiedene Spalthöhen aufgetragen. Die gemessenen Werte sind dabei als Punkte eingetragen. Die gestrichelten Linien zeigen die theoretisch ermittelten Werte für die Druckdifferenz unter Berücksichtigung des Druckverlustes durch Rohr- bzw. Kanalströmung nach (23) sowie unter Berücksichtigung des Einflusses der Anlaufstrecke nach (25).

Die durchgezogenen Linien zeigen die mittels empirisch Ausgleichsfunktion ermittelten Druckdifferenzen in Abhängigkeit von Volumenstrom und Spalthöhe.

Die ermittelte Ausgleichsfunktion berücksichtigt die Einflüsse von Spaltein- und -austritt, Anlaufstrecke und Umlenkung und ergibt sich wie folgt:

$$\Delta p_{ges} = \left[ \lambda \cdot \left( \frac{t}{2h} \right)^m + \zeta_e + \zeta_o + \zeta_a + z_u \cdot \zeta_u \right] \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (28)$$

mit

- $\Delta p_{ges}$  [Pa] Druckdifferenz;
- $\lambda$  [-] Rohrreibungszahl;
- $t$  [mm] Spalttiefe;
- $h$  [mm] Spalthöhe;
- $m$  [-] Exponent der bezogenen Spalttiefe;
- $\zeta_e$  [-] Druckverlustbeiwert Spalteintritt;
- $\zeta_o$  [-] Druckverlustbeiwert Spaltaustritt;
- $\zeta_a$  [-] Druckverlustbeiwert Anlaufstrecke;
- $\zeta_u$  [-] Druckverlustbeiwert Umlenkung;
- $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] Dichte;
- $w$  [m/s] Strömungsgeschwindigkeit.

In der Auswertung der Messergebnisse für den geraden Spalt in Bild 3.15 zeigt sich, dass allgemein gilt je größer der erzeugte Volumenstrom, desto größer auch der Druckverlust. Auch mit zunehmender Spalthöhe  $h$ , nimmt der Druckverlust zu. Dies gilt ebenso für Spalten mit Umlenkung, wie

$\Delta p_{ges}$  [kp/m<sup>2</sup>]  
 $h = 20$   
 $h = 70$   
 $\dot{V}/l = f(\Delta p_{ges})$   
 $t = 2 \times 50 \text{ mm}$   
 1 Umlenkung um 90°  
 Parameter h in mm  
 $Re_{krit}$   
 $Re$   
 $V/l$  [m<sup>3</sup>/mh]

**Bild 3.16:** Messergebnisse der Druckdifferenz für Spalten mit Umlenkung aus [28]

Aus den Messergebnissen und der, mithilfe der empirischen Ausgleichsfunktion (28), ermittelten Druckdifferenz kann der Fugendurchlasskoeffizienten  $a$ , der Strömungsexponent  $n$  und den Umlenkungsbeiwert  $c_u$  bestimmt werden.

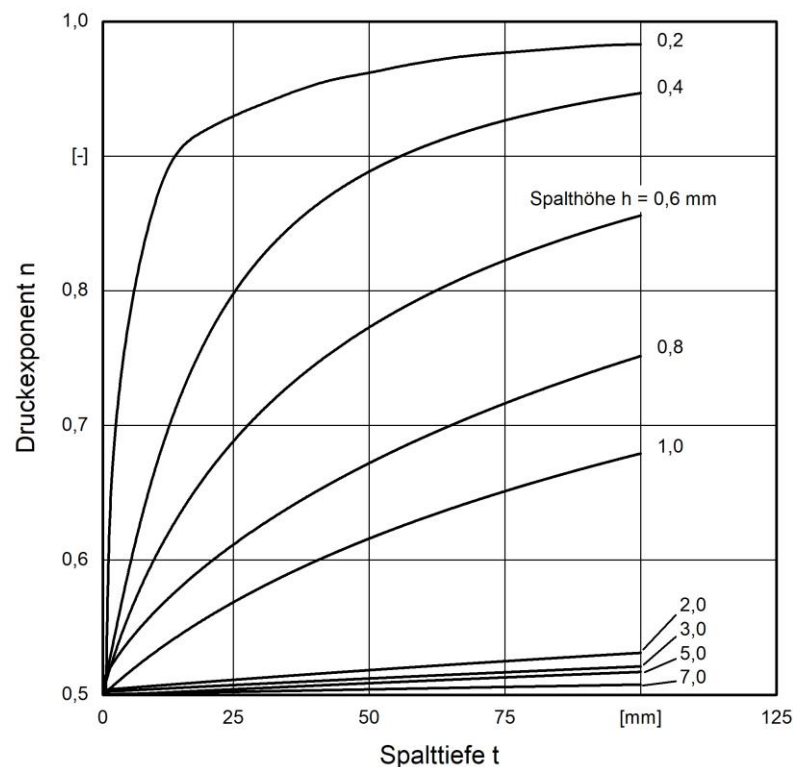
Für Bauteilfugen mit Umlenkung bei einer Spalthöhe  $\geq 1$  mm gilt:

$$\dot{V} = a \cdot l \cdot (1 - z_u \cdot c_u) \cdot \Delta p^n \quad (29)$$

mit

- $\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] Volumenstrom;  
 $a$  [m<sup>3</sup>/(m·h·(Pa)<sup>n</sup>)] Fugendurchlasskoeffizient;  
 $l$  [m] Spaltlänge;  
 $z_u$  [-] Anzahl der Umlenkungen;  
 $c_u$  [-] Beiwert der Umlenkung;  
 $n$  [-] Strömungsexponent.

In Bild 3.17 sind die ermittelten Werte für den Druckexponenten  $n$  für unterschiedliche Spalttiefen  $t$  und Spalthöhen  $h$  dargestellt. Der erwartete Strömungsexponent  $n$  liegt zwischen 0,5 (turbulente Strömung) und 1,0 (laminare Strömung). Bei endlichen Spalten entstehen neben den Reibungsverlusten im Spalt auch Ein- und Austrittsverluste, sodass für den Strömungsexponenten nie ein Wert  $n = 1,0$  erreicht wird. Mit den zuvor wiedergegebenen allgemeinen strömungstechnischen Grundlagen und den daraus gezogenen Schlüssen hinsichtlich der Charakteristika von Spaltströmungen kann abgeleitet werden, dass bei tiefen Spalten und vornehmlich geringen Spalthöhen tendenziell eine laminare Strömung mit einem Druckexponenten nahe 1 resultieren. Bei Fugen mit Spalthöhen  $> 2$  mm liegt eine nahezu ausgeprägte turbulente Strömung vor. Es zeigt sich außerdem, dass die Spalthöhe  $h$  den größten Einfluss auf der Strömungsexponent  $n$  hat.



**Bild 3.17:** Ergebnisse für den Strömungsexponenten  $n$  für unterschiedliche Fugengeometrien nach [28]

Die in der Untersuchung von Esdorn und Rheinländer [28] ermittelten Werte für den Fugendurchlasskoeffizienten  $a$  für Leckagen unterschiedlicher Höhe  $h$  und Tiefe  $t$  sind in Tabelle 3.4 für Fugentiefen von 10 mm, 50 mm, 82 mm und 100 mm zusammengestellt. Es ist erkennbar, dass der Fugendurchlasskoeffizient  $a$  bei zunehmender Spalthöhe  $h$  ansteigt und bei zunehmender Fugentiefe  $t$  kleiner wird.

**Tabelle 3.4:** Fugendurchlasskoeffizient  $a$  für Leckagen unterschiedlicher Abmessungen nach [27]

Spalthöhe $h$ [mm]	Fugendurchlasskoeffizient $a$ [ $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ ]			
	Fugentiefe $t = 10$ mm	Fugentiefe $t = 50$ mm	Fugentiefe $t = 82$ mm	Fugentiefe $t = 100$ mm
0,4	0,474	0,063	0,037	0,028
0,6	1,187	0,302	0,175	0,121
0,8	2,107	0,862	0,514	0,417
1,0	3,342	1,779	1,167	0,847
2,0	7,802	6,499	6,344	5,903
3,0	11,859	11,172	10,218	9,944
5,0	21,072	18,818	18,911	17,691
7,0	29,693	27,150	28,256	26,840

DIN EN 12207 [29] definiert Klassen hinsichtlich der Luftdurchlässigkeit von Fenstern und Türen. Für jede der insgesamt vier Klassen werden Grenzwerte für die Referenzluftdurchlässigkeit bei 100 Pa formuliert, woraus sich der entsprechende Fugendurchlasskoeffizienten  $a$  ermitteln lässt. Je höher die Klasse, desto geringere Grenzwerte für die Luftdurchlässigkeit müssen nach [29] eingehalten werden. Für Gebäude bis zu zwei Vollgeschossen ist in der EnEV [30] mindestens Klasse 2 bzw. für Gebäude mit mehr als zwei Vollgeschossen mindestens Klasse 3 vorgeschrieben.

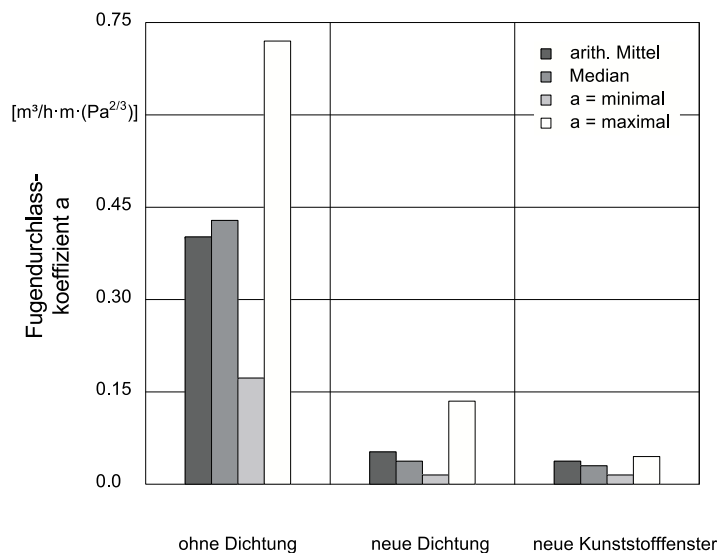
Grenzwerte für die Referenzluftdurchlässigkeit und den Fugendurchlasskoeffizienten  $a$  von Fenstern und Türen sind in Tabelle 3.5 zusammengestellt. Für Bauteilfugen ist in DIN 4108 Teil 2 [31]

ein maximaler Fugendurchlasskoeffizient  $a < 0,1 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot (10 \text{ Pa})^{2/3})$  vorgegeben; dies gilt als praktisch luftdicht.

**Tabelle 3.5:** Grenzwerte für die Referenzluftdurchlässigkeit und den Fugendurchlasskoeffizienten  $a$  nach [29]

Klassifizierung nach DIN EN 12207	Referenzluftdurchlässigkeit bei 100 Pa	Fugendurchlasskoeffizient $a$ bei 10 Pa
	$[\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}]$	$[\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot (10 \text{ Pa})^{2/3})]$
Klasse 1	12,5	2,69
Klasse 2	6,75	1,45
Klasse 3	2,25	0,48
Klasse 4	0,75	0,16

In einer Untersuchung von Reichel [32] zur Luftdichtheit der Gebäudehülle wurde der Fugendurchlasskoeffizient  $a$  verschiedener Fenster bestimmt. Diese wurden dabei in drei Kategorien zusammengefasst: ältere Fenster vorrangig Holzverbundfenster ohne oder mit verschlissener Dichtung, ältere Fenster mit nachgerüsteter umlaufender Dichtung und neue Fenster mit Isolierverglasung und zwei umlaufenden Dichtungen. In Bild 3.18 sind die Ergebnisse der durchschnittlichen Fugendurchlasskoeffizienten  $a$  für alte Fenster ohne Dichtung, alte Fenster mit Dichtung und neue Kunststoffenster dargestellt.



**Bild 3.18:** Fugendurchlasskoeffizient  $a$  für Fenster unterschiedlicher Standards nach [32]

### 3.7 Bewertung des Feuchteschutzes von Bauteilen

Grundlage für den Nachweis des Feuchteschutzes von beheizten Gebäuden ist DIN 4108-3 [33]. Jedoch ist aufgrund der Einbeziehung des Einflusses von Infiltration über Leckagen die Bewertung mit den vereinfachten Methoden nach [33] nicht möglich. Nur durch Einsatz umfassender Rechenmethoden und Bewertung der komplexen Zusammenhänge beim Feuchtetransport können derartige Effekte bewertet werden. Anhand hygrothermischer Simulationsrechnungen können unter Ansatz natürlicher Klimabedingungen diese Effekte berücksichtigt werden.

Ein hygrothermisches Modell ist in [34] beschrieben und ermöglicht die Untersuchung des feuchte-technischen Verhaltens von Bauteilen und somit eine realitätsnahe Bewertung des sich unter natürlichen Randbedingungen einstellenden Feuchteverhaltens von Bauteilen. Hierbei werden nicht nur Diffusionsvorgänge, sondern auch die Kapillarleitung in die Berechnungen mit einbezogen. Anhand von stoffbezogenen Sorptionsisothermen wird das Speicherverhalten von Baustoffen



berücksichtigt. Unter Verwendung von Klimadaten wird zusätzlich das gekoppelte Speicher- und Transportverhalten von Wärme und Feuchte einbezogen.

Bei der Bewertung des Wärmetransports finden die Wärmeleitung, Enthalpieströme durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel, die kurzwellige Einstrahlung und die langwellige nächtliche Abstrahlung Berücksichtigung. Bei der Bewertung des Feuchtetransports wird zusätzlich die Dampf- und Lösungsdiffusion (Dampftransport), die Kapillarleitung und die Oberflächendiffusion berücksichtigt.

Folgende Transportvorgänge finden in [34] jedoch keine Berücksichtigung:

- Sickerströmung durch Schwerkraft
- Hydraulische Strömungen aufgrund von Gesamtdruckunterschieden
- Wechselwirkende Einflüsse von Salz- und Wassertransport
- Enthalpieströme durch den Transport von flüssigem Wasser im Temperaturgefälle
- Eisbildung

Zur Bewertung des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen werden die Außenlufttemperatur und -feuchte, die solare Einstrahlung, die langwellige Abstrahlung, Niederschlag, Wind unter Berücksichtigung der Richtung und Geschwindigkeit und die Raumlufftfeuchte und -temperatur mit in die Untersuchung einbezogenen.

Die Berechnungsansätze berücksichtigen wie oben beschrieben den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in ein- und zweidimensionalen mehrschichtigen Bauteilen. Dabei wird die beiderseitige Abhängigkeit von Wärmeleitung und Feuchtestrom auf iterativem Wege innerhalb eines numerischen Verfahrens berücksichtigt. Das dem Programm zugrunde liegende Berechnungsmodell berücksichtigt den Wassertransport infolge Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung sowie die Feuchtespeicherung.

Als Bilanzgleichung für Wärme und Feuchte liegen folgende Gleichungen zugrunde:

Wärmetransport:

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (30)$$

Feuchtetransport:

$$\rho_w \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \rho_w \cdot D_w \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (31)$$

mit

- $D_w$  [m<sup>2</sup>/s] Flüssigtransportkoeffizient;
- $H$  [J/m<sup>3</sup>] Enthalpie des feuchten Baustoffs;
- $h_v$  [J/kg] Verdunstungsenthalpie des Wassers;
- $p$  [Pa] Wasserdampfpartialdruck;
- $u$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] Wassergehalt;
- $\delta$  [kg/(m·s·Pa)] Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft;
- $\vartheta$  [°C] Temperatur;
- $\lambda$  [W/(m·K)] Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs;
- $\mu$  [-] Dampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs;

$\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] Dichte des Wassers;

$\varphi$  [-] Relative Feuchte.

Die Bewertung der Infiltration erfolgt über den Ansatz eines konvektiven Eintrags von feucht-warmer Raumluft in die Dämmebene. Dieser wird jedoch nur berücksichtigt, wenn am Durchströmungsbereich die Taupunkttemperatur des Innenraumklimas unterschritten wird.

Die Berücksichtigung dieser Erhöhung der Sorptionsfeuchte infolge eines konvektiven Eintrags feuchter Raumluft wird beim Programm Wufi über ein „Infiltrationsmodell“, welches in [35] beschrieben ist, berücksichtigt. Hierbei wird eine Erhöhung der Sorptionsfeuchte unterhalb von Taupunktbedingungen aufgrund der geringeren Mengen und der aufwändigen Berechnung vernachlässigt. Kommt es in dem betrachteten kritischen Bereich zu einer Unterschreitung der Tautemperatur, wird der aus der Temperaturdifferenz resultierende Überdruck im Innenraum ermittelt, anhand derer sich eine dichtheitsabhängige Durchströmung einstellt, die sich aus der Gesamtdichtheit des Gebäudes ableiten lässt. Die Berechnung der Druckdifferenzen erfolgt wie folgt:

$$\Delta P = \rho \cdot \frac{T_a - T_i}{T_i} \cdot g \cdot \frac{h}{2} \quad (32)$$

mit

$\Delta P$  [Pa] Druckdifferenz innen - außen;

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] Dichte der Außenluft  $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ ;

$T_a$  [K] Lufttemperatur außen;

$T_i$  [K] Lufttemperatur innen;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] Fallbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ;

$h$  [m] Höhe des zusammenhängenden Innenlufttraums.

Befeuchtungsrelevante Leckagen werden langsam und laminar durchströmt. Daher erfolgt eine lineare Umrechnung zwischen den Messdruckdifferenzen auf die niedrigeren Druckdifferenzen bei normaler Nutzung. Der Luftstrom durch das Bauteil ergibt sich wie folgt:

$$q_{\Delta p} = |\Delta P| \cdot \frac{q_{50, \text{Bauteil}}}{50 \text{ Pa}} \quad (33)$$

mit

$q_{\Delta p}$  [m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>] resultierender Luftstrom durch das Bauteil;

$\Delta P$  [Pa] Druckdifferenz innen zu außen;

$q_{50, \text{Bauteil}}$  [m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>] Luftstrom durch das Bauteil bei 50 Pa Druckdifferenz.

Die Gesamtdichtheit des Gebäudes wird auf in Europa übliche Messdruckdifferenzen bei 50 Pa bezogen. Die Einteilung erfolgt über Luftdichtheitsklassen die dem Leckagevolumenstrom  $V_{50}$  im Verhältnis zur gesamten Hüllfläche des Gebäudes ( $q_{50}$ -Wert) gegenübergestellt werden. Die berücksichtigten Luftdichtheitsklassen sind in Tabelle 3.6 dargestellt.

**Tabelle 3.6:** Luftdichtheitsklassen abhängig vom Leckagevolumenstrom bezogen auf die Gebäudehülle

Luftdichtheitsklasse	Durchströmung Hülle $q_{50}$ [m³/hm²]	Durchströmung Bauteil $q_{50, \text{Bauteil}}$ [m³/hm²]
A	1,0	0,07
B	3,0	0,20
C	5,0	0,33

Die konvektive Tauwassermenge wird wiederum aus der Differenz der in der Innenraumluft vorhandenen Wasserdampfkonzentration und der Sättigungskonzentration bei der Temperatur in der Tauwasserebene gemäß nachfolgender Formel ermittelt und dem Bauteil als Feuchtequelle zugeführt.

$$m = q_{\Delta p} \cdot (c_{Di} - c_{sT}) \quad (34)$$

mit

$m$  [kg/hm²] ausfallende Tauwassermenge;

$q_{\Delta p}$  [m³/hm²] resultierender Luftstrom durch das Bauteil;

$c_{Di}$  [kg/m³] Wasserdampfkonzentration innen;

$c_{sT}$  [kg/m³] Wasserdampfsättigungskonzentration bei der Temperatur in der Tauwasserebene.

Im Gegensatz zum aus [33] bekannten Glaserverfahren gibt es beispielsweise bei den in [34] erzielten Ergebnissen [35] kaum allgemeingültige Versagenskriterien. Die Ergebnisse bestehen in der Regel aus zeitlichen Verläufen der Temperatur und Feuchte bzw. die Wassergehalts- und Temperaturverläufe in den Materialschichten. Alle Ergebnisse müssen ausgewertet und in Abhängigkeit des gewählten Materials bewertet werden. Als Bewertungskriterien dienen hierbei vor allem das hygrothermische Verhalten der gesamten Konstruktion (kommt es zu einem Anstieg des Gesamtwassergehalts im Betrachtungszeitraum), Frostgefahr, Bildung von holzerstörenden Pilzen, Schimmelpilzbildung, Tauwasserbildung oder Korrosion.

## 4. Untersuchungsgrundlage

### 4.1 Erprobung von Schüttdämmstoffen

Es werden zwei Schüttdämmstoffe in der praktischen Anwendung untersucht. Als Zellulosematerial wird der Dämmstoff Isofloc® L/LM gewählt und als Glaswolleprodukte Supafil® Timber Frame der Firma Knauf Insulation. Bei Isofloc® L/LM handelt es sich um einen Zellosedämmstoff, der zur maschinellen Verarbeitung im Trocken- und Nassverfahren in Wärme- und Schallschutzkonstruktionen geeignet ist. Isofloc® L/LM besteht zu über 90 % aus Fasern aus Zeitungspapier, dem ein Flammschutz aus maximal 5 % Bohrsäure zugesetzt wird. Das Material wird mit Einblasmaschinen aufgelockert und in Hohlräume verdichtet eingeblasen. Die vom Hersteller angegebene optimale Rohdichte ist abhängig von der Einbauart und schwankt je nach Einbauart zwischen 30 kg/m³ bei freiliegendem und 60 kg/m³ bei raumfüllendem Einbau [36]. In Tabelle 4.1 sind weitere Rohdichten in Abhängigkeit der Einbauart aufgeführt.

**Tabelle 4.1:** Rohdichte von Isofloc® L/LM in Abhängigkeit der Einbauart

Einbauart	Rohdichte [kg/m³]
freiliegend < 10	30 - 40
raumfüllend (Decke und Dach)	40 - 60
Wand	45 - 60
Compact-Spray-on-Verfahren	30 - 50

Beim Produkt Supafil® handelt es sich um ein Mineralwolleprodukt ohne Bindemittel. Es ist wasserabweisend und kunstharzfrei und kann zum Dämmen von Hohlräumen in Decken, Dächern und Wänden verwendet werden. Die Schüttdichte liegt zwischen 30 kg/m³ und 40 kg/m³ [37].

Die wichtigsten Materialeigenschaften der Dämmstoffe Isofloc® L/LM und Supafil® sind nachfolgend in Tabelle 4.2 zusammengestellt.

**Tabelle 4.2:** Materialeigenschaften der untersuchten Schüttdämmstoffe Isofloc® L/LM [36] und Supafil® [37]

Materialeigenschaften	Einheit	Isofloc® L/LM	Supafil®
Material	-	Zellulosefasern	Glaswolle
Rohdichte $\rho$	[kg/m³]	30 - 60	30 - 40
Strömungswiderstand $r$	[kPa·s/m²]	$\geq 5$ bei $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$	k. A.
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$	[-]	1 - 2	1 - 2
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	[W/(m·K)]	0,039	0,035
spezifische Wärmekapazität $c_p$	[J/(kg·K)]	2150	1030

Hinsichtlich der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Zellulosedämmstoff- bzw. Glaswollgedämmstoff-Produkte ist zu beachten, dass die Eigenschaften von Zellulosedämmstoffen abhängig vom Ausgangsmaterial und der Herstellung sind. Die Art des Herstellungsverfahrens beeinflusst die Größe der Einzelpartikel. So sind die Fasern bei Verwendung einer Wirbelstrommühle, im Vergleich zu einer Hammermühle, kleiner. Auch das Ausgangsmaterial für die Zellulosefasern ist für die Qualität des Dämmstoffs von entscheidender Bedeutung. Als Ausgangsstoff sollte nur Zeitungspapier verwendet werden. Bei kostengünstigeren Zellulosedämmstoffen sind oftmals Partikel von Hochglanzmaterial zu finden, diese sollten in Dämmstoffen nicht enthalten sein. Bei Verwendung von qualitativ hochwertigem Zellulosedämmstoff, bestehend aus kleinen Partikeln und ohne Beimischung von Hochglanzpapier als Füllstoff, sind die Ergebnisse grundsätzlich übertragbar.

Glaswollgedämmstoffe unterscheiden sich in Faserlänge und -dicke, was sich vor allem in der Rohdichte des Materials widerspiegelt. Bei Einsatz von Einblasdämmstoffen auf Basis von Glaswolle, die hinsichtlich der Stoffeigenschaften, Rohdichte und Faserstruktur dem bei den Messungen verwendeten Materialien entsprechen, sind vergleichbare Ergebnisse zu erwarten.

Für die baupraktische Anwendbarkeit von Einblasdämmstoffen ist die Verarbeitbarkeit, die Wirksamkeit und vor allem die wärmeschutztechnische Qualität des Dämmstoffs relevant. Zusätzlich kann bei der Verarbeitung die Arbeitssicherheit und die Optimierung der Schüttdichte von Bedeutung sein. Feuchteschutztechnische Materialeigenschaften wie der  $\mu$ -Wert richten sich vor allem nach der Konstruktion, in die der Dämmstoff eingebracht wird, wobei  $\mu$  bei derartigen Dämmstoffen in der Regel 2 nicht übersteigt. Auch die brandschutztechnische Eigenschaft der Dämmstoffe ist von Bedeutung und ergibt sich aus dem Brandverhalten und der sich daraus ergebenden Klassifizierung nach DIN 4102-1 [38].

Die untersuchten Dämmstoffe werden in Hinblick auf die Verarbeitbarkeit, Wirksamkeit, Brandschutz und Arbeitssicherheit bewertet. Bei der Verarbeitbarkeit der Dämmstoffe werden allgemeine

Eigenschaften und die Verpackung des Schüttdämmstoffs bewertet. Dies schließt die Art, Größe und das Material der Verpackung, die Transportierbarkeit, die Haltbarkeit der Dämmstoffe, die möglichen anwendbaren Applikationstechniken sowie die allgemeine Handhabung beim Einbringen in das Bauteil ein. Außerdem wird bewertet, ob durch die Verwendung bestimmter Dämmstoffe Umbauten am Prüfkörper oder zusätzliche Gerätschaften erforderlich sind. Die Bewertung erfolgt teilweise auf Grundlage von subjektiven Eindrücken bei der Verwendung des jeweiligen Dämmstoffs.

Für die Wirksamkeit des Dämmstoffs spielen vor allem die wärmeschutztechnischen Eigenschaften des Dämmstoffes eine wichtige Rolle. Außerdem wird beurteilt, wie gut sich die Dämmstoffe nachträglich verdichten lassen und wie gut diese Verdichtung steuer- bzw. kontrollierbar ist. Weiterhin wird untersucht, ob durch gezielte Verdichtung des Dämmstoffs eine Verbesserung des Feuchteschutzes erreicht werden kann. Je mehr Verdichtungspotenzial ein Dämmstoff aufweist und je besser dieser kontrollier- und steuerbar ist, umso besser ist die baupraktische Anwendbarkeit.

Baustoffe werden im Allgemeinen in nicht brennbare (Baustoffklasse A) und brennbare Stoffe (Baustoffklasse B) unterschieden. Brennbare Stoffe werden außerdem in schwerentflammbar (Baustoffklasse B1) und normalentflammbar (Baustoffklasse B2) Stoffe unterteilt. Das Brandverhalten hängt u.a. vom Material des Dämmstoffs und der Dicke der Dämmschicht ab. Grundsätzlich gelten mineralische Dämmstoffe als nicht brennbar. Dämmstoffe aus Kunststoff und Zellulosefasern gelten als brennbar.

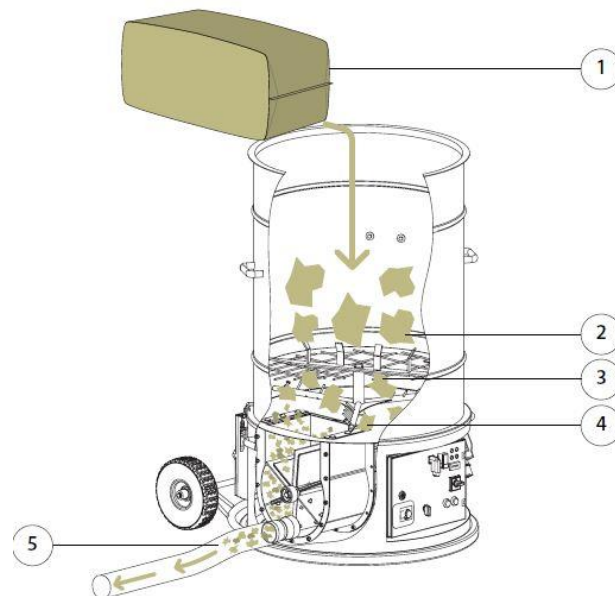
Bei der Arbeitssicherheit werden die Dämmstoffe hinsichtlich der Sicherheit und Gesundheit der verarbeitenden Personen bewertet. Dabei ist wichtig, ob das Material Giftstoffe oder flüchtige organische Verbindungen, kurz VOC, enthält, die in die Umgebung abgegeben werden können. Außerdem dürfen bei der Verarbeitung kein Staub oder Fasern freigesetzt werden, die in die Atemwege oder in die Augen gelangen und diese schädigen können. Hieraus kann sich die Notwendigkeit von Schutzbekleidung, wie z.B. Handschuhe, Schutzbrille, Helm oder Atemmaske, ergeben, die bei der Verarbeitung als störend empfunden wird.

## **4.2 Erprobung von unterschiedlichen Applikationstechniken**

Die Dämmstoffe werden mit der Maschine Zellofant M95, siehe Bild 4.1, eingebracht. Diese besteht aus einem rotierenden Zerkleinerungsarm, einem Wechselgitter, einer rotierenden Zellradschleuse und einem Ausblasstutzen über welchen der Dämmstoff in die Förderleitung geblasen wird. In Bild 4.2 ist die Funktionsweise des Einblasgeräts dargestellt, wobei (1) der zugeführte Dämmstoff ist, der durch den rotierenden Zerkleinerungsarm (2) grob aufgebrochen wird und in kleinen Stücken durch das Wechselgitter (3) in den Bereich des Rechenrades fällt. Das rotierende Rechenrad lockert das Dämmmaterial verblasfertig auf, bevor es daraufhin in die rotierende Zellradschleuse fällt (4). Am unteren Schleusenpunkt wird das Dämmmaterial durch den Luftstrom der Zuluftseinheit aus der Schleusenkammer über den Ausblasstutzen in die Förderleitung geblasen [39].

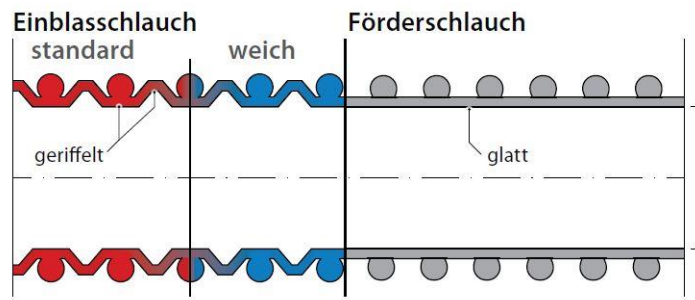


**Bild 4.1:** Einblasmaschine Zellofant M95 mit angeschlossenem Förderschlauch



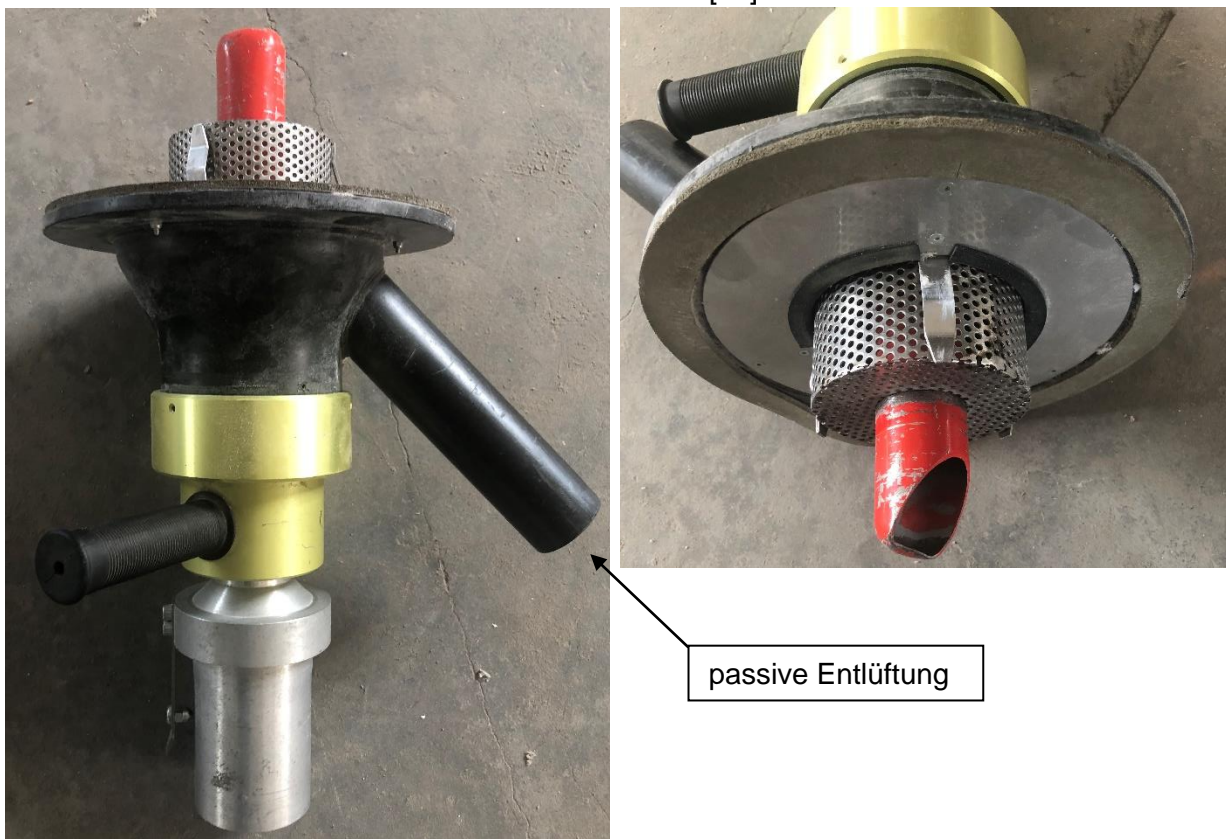
**Bild 4.2:** Funktionsweise der Einblasmaschine Zellofant M95 [39]

Der lose Dämmstoff wird von der Einblasmaschine mittels Förderschlauch zum Einsatzort transportiert. Förderschläuche werden zum Überbrücken von Distanzen zwischen Einblasmaschine und Einblasschlauch eingesetzt [40]. Sie sind an der Innenwand glattwandig und vergleichsweise weich. An den Förderschlauch kann ein Einblasschlauch angeschlossen werden. Diese gibt es in zwei Steifigkeitsklassen. Blaue Einblasschläuche sind weicher als die roten, siehe Bild 4.3 und eignen dadurch für die Anwendung bei geringeren Temperaturen.



**Bild 4.3:** Klassifizierung von Einblas- und Förderschlauch [40]

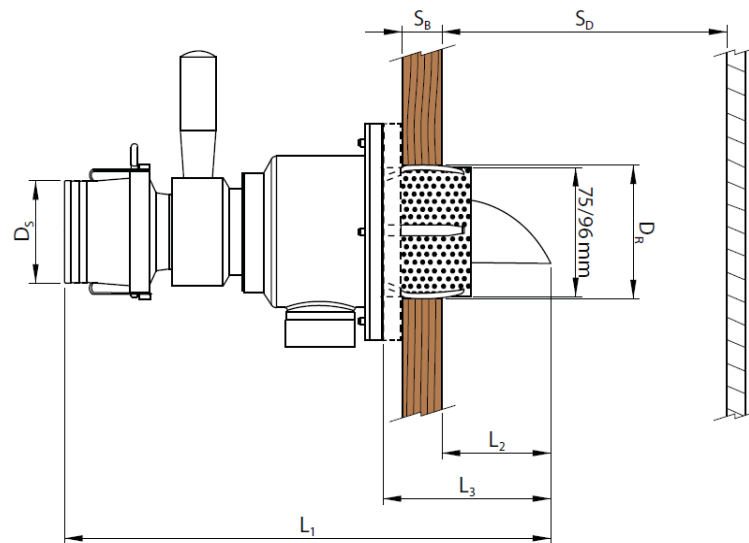
An den Förderschlauch kann auch eine Drehdüse angebracht werden. In der Drehdüse wird die Luft, welche den Dämmstoff transportiert, verteilt und verdichtet und anschließend kontrolliert aus dem Bauteil herausgeführt. Die Entlüftung ist in der Drehdüse integriert, so dass die Einblasöffnung gleichzeitig für das Einströmen des Wärmedämmstoffs und der Abfuhr der überschüssigen Luft dient [41]. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde die entlüftete Drehdüse X-Jet 75 der Firma X-Floc verwendet, siehe Bild 4.4. Diese eignet sich besonders für Zellulosefasern, kann aber auch für Mineral- und Glaswolle verwendet werden [42].



**Bild 4.4:** Drehdüse mit Entlüftung

In Bild 4.5 ist eine Detailskizze der verwendeten Drehdüse dargestellt.





**Bild 4.5:** Prinzipielle Darstellung der Drehdüse X-Jet 75 [42]

Die Abmessungen und Kenngrößen der verwendeten Drehdüse können Tabelle 4.3 entnommen werden.

**Tabelle 4.3:** Kenngrößen der Drehdüse X-Jet 75 der Firma X-Floc [42]

Bezeichnung		Abmessung [mm]
Düsenrohrdurchmesser		50
Dämmstärke	$S_D$	85 - 400
Beplankungsstärke	$S_B$	< 40
Gesamtlänge	$L_1$	371
Einstehtiefe	$L_2 = L_3 - S_B$	$\geq 86$

Eine weitere Möglichkeit zur Applikation von losen Dämmstoffen ist die Verwendung einer Einblasnadel. Diese wird zum Einbringen des Dämmstoffs in Dächer eingesetzt. Die Einblasnadel weist einen geringeren Durchmesser gegenüber dem Förderschlauch auf. Es entsteht so eine Verjüngung des Querschnitts. Die verwendete Einblasnadel ist in Bild 4.6 dargestellt.



**Bild 4.6:** Verwendete Einblasnadel



Für die Bewertung der verschiedenen Applikationstechniken ist vor allem die Verteilung und Steuerbarkeit der Dichte von Bedeutung. Dabei wird betrachtet, inwieweit die am Einblasgerät eingestellte und die tatsächliche Dichte im Bauteil übereinstimmen und ob die Dichteverteilung im Bauteil gleichmäßig ist oder schwankt. Es wird gegenübergestellt, welche Verdichtungsgrade mit den einzelnen Applikationstechniken erzielt werden können und ob die Möglichkeit einer Nachverdichtung des Dämmstoffs gegeben ist. Außerdem wird bewertet, ob für die Qualitätssicherung und die Sicherheit und Sauberkeit auf der Baustelle zusätzliche Gerätschaften oder Maßnahmen erforderlich sind.

Um die Wirksamkeit und Anwendbarkeit der verwendeten Applikationstechniken zu bewerten, wird auch die allgemeine Handhabung beim Einblasen und die verschiedenen Möglichkeiten bei der Verwendung betrachtet. Darunter fällt die Anzahl der notwendigen Personen zur Bedienung des Einblasgeräts und zur Applikation mit den unterschiedlichen Aufsätzen. Auch die Vielseitigkeit der Applikationstechnik für unterschiedliche Dämmstoffdicken, Bauteilkonstruktionen (Wand, Decke, Dach) und unterschiedliche Dämmmaterialien (Zellulose- und Glaswollgedämmstoffe) ist für die Bewertung der Applikationstechniken von Bedeutung. Des Weiteren wird betrachtet, wie groß die Anzahl und der Durchmesser der erforderlichen Bohrungen im Bauteil ist und ob der Dämmstoff in alle Bereiche der Konstruktion mithilfe der verschiedenen Applikationstechniken eingebracht werden kann. Um die Anwendbarkeit der Applikationstechnik zu beschreiben, wird berücksichtigt ob diese zu Verstopfungen im Schlauch, der Düse oder der Einblasnadel neigt und wie groß der Aufwand für die Vorbereitung und die Reinigung des Geräts ist.

Zusätzlich wird auf die Arbeitssicherheit eingegangen und berücksichtigt ob es bei der Anwendung der Applikation Fasern oder Staub freigesetzt werden und spezielle Schutzausrüstung erforderlich ist.

### 4.3 Erprobung Flüssigabdichtungen

Untersucht werden die sprüh- und streichbaren Luftdichtheitsschichten EcoSeal und Solimur der Firma Knauf.

EcoSeal ist ein Produkt, welches bereits seit mehreren Jahren in den USA erhältlich ist. In Deutschland gibt es lediglich das Produkt Solimur, welches aus den gleichen Inhaltsstoffen besteht und verdünnt als Luftdichtheitsschicht verwendet werden kann. Weiterhin werden die Produkte Primur der Firma Siga als verdünnte Variante und Aerosana Visconn der Firma pro clima betrachtet. Alle Produkte bestehen aus Polymerverbindungen. Die genauen Zusammensetzungen der betrachteten Produkte nach Herstellerangaben können Tabelle 4.4 entnommen werden.

**Tabelle 4.4:** Materialzusammensetzung der untersuchten Flüssigabdichtungen

Produkt	Hersteller	Materialzusammensetzung
Aerosana Visconn	pro clima	modifizierte wässrige Acrylat-Polymerdispersion
EcoSeal	Knauf Insulation	MS-Polymer / Gasket-Forming Water-Borne Latex Sealant
Solimur	Knauf Insulation	Polymerdispersion
Primur	Siga	Modifizierte wässrige Polyacrylat - Copolymer- Dispersion mit mineralischen Füllstoffen

Die sprühbare Luftdichtheitsschicht EcoSeal kann ohne Verdünnung mit üblichen Spritzgeräten aufgebracht werden. Solimur ist ursprünglich als Spezialhaftklebstoff zum Kleben von Dampfbremsen und Luftdichtheitsschichten an die Baukonstruktion vorgesehen und kann auf Holz, Beton, Putz, Kunststofffolien und andere Material aufgebracht werden. Verdünnt kann sie auch als sprühbare Luftdichtheitsschicht verwendet werden.

Das Produkt Primur ist eigentlich ein Kleber, der verdünnt auch als Luftdichtheitsschicht verwendet werden kann.

Aerosana Visconn der Firma pro clima wird eigentlich zum Abdichten von Kanten und Durchdringungen und nicht zur flächigen Besprühung verwendet. Es kann unverdünnt auf unterschiedliche Arten von Oberflächen aufgetragen werden und ist sehr dehnfähig und dauerhaft. Es handelt sich um ein feuchtevariables Material und ist daher innen- und außenseitig anwendbar. Während des Trocknens ändert sich die Farbe von blau zu schwarz.

Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

**Tabelle 4.5:** Materialeigenschaften der verschiedenen Luftdichtheitsschichten nach Herstellerangaben

Eigenschaft	Einheit	Produkt			
		EcoSeal	Solimur	Aeronsana Visconn	Primur
Dichte	[g/l]	0,0085 - 0,55	0,001099	k. A.	0,00104
s <sub>d</sub> -Wert (feuchtevariabel)	[m]	k. A.	k. A.	6,11 ± 0,6 bei 0,3 mm Dicke (0,13 - 10,00)	4 bei 4 mm Dicke
Sprühbarkeit	-	unverdünnt	verdünnt	unverdünnt	verdünnt
Verarbeitungstemperatur	[°C]	-7 bis 52	5 bis 50	5 bis 35	≥ 5
Temperaturbeständigkeit	[°C]	k. A.	-20 bis 85	-25 bis 90	-40 bis 100
Trocknungszeit	[h]	wenige Stunden	1 mm pro Tag	12 - 24	k. A.
Überputz- / -streichbar	-	k. A.	k. A.	ja	ja
Haltbarkeit	[Monate]	18 (bei 10 °C - 50 °C)	24 (bei kühler und trockener Lagerung)	12 (bei 5 °C - 25 °C und trockener Lagerung)	unbegrenzt (bei frostfreier Lagerung)
Lieferform	[l] / [kg]	22 / 12,3 Eimer	0,6 / - Schlauchbeutel	10 / 12 Eimer	0,6 / - Schlauchbeutel

Bei der Bewertung wird untersucht, inwieweit sich die Materialien für eine nachträgliche Ertüchtigung bzw. Herstellung der Luftdichtheitsschicht eignen. Hierfür sind neben der Verarbeitbarkeit auch die feuchteschutztechnischen Eigenschaften von Bedeutung. Außerdem wird betrachtet, wie viel Material bzw. wie viele Schichten aufzubringen sind, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Wie bei den Schüttdämmstoffen soll auch die Arbeitssicherheit beim Auftragen der sprühbaren Luftdichtheitsschichten und der Brandschutz in die Bewertung einfließen.

Für die Verarbeitbarkeit werden die Lieferform (Art der Verpackung, Verpackungsgröße), die Haltbarkeit, die allgemeine Handhabung, die Trocknungszeit sowie die Erkennbarkeit der Trocknungszeit, beispielsweise durch Farbwechsel, bewertet. Außerdem ist entscheidend auf wie vielen verschiedenen Oberflächen das Material angewendet werden kann und ob eine Vorbereitung des Untergrundes vor dem Aufbringen erforderlich ist.

Die Anwendung und Wirksamkeit werden für Leckagen  $\leq 3$  mm und Leckagen  $> 3$  mm bewertet. Dabei werden die unterschiedlichen Applikationstechniken Aufsprühen und Aufpinseln unterschieden und der Materialeinsatz und die notwendige Anzahl von Schichten bewertet, um Leckagen unterschiedlicher Größe zu verschließen.

Um die Arbeitssicherheit bei Verwendung sprühbarer Luftdichtheitsschichten sicherzustellen, dürfen diese keine Eigenschaften oder Bestandteile aufweisen, welche die Sicherheit oder Gesundheit der verarbeitenden Personen gefährden. Bewertet wird hierbei, ob das verarbeitete Material Giftstoffe oder flüchtige organische Verbindungen (VOC) enthält, die bei der Verarbeitung freigesetzt werden. Weiterhin wird betrachtet ob beim Aufsprühen Staub bzw. Sprühnebel entsteht, der Schäden in Augen oder Atemwegen verursacht und somit persönliche Schutzausrüstung erforderlich wäre.

#### **4.4 Applikation der sprühbaren Luftdichtheitsschichten**

Die untersuchten sprühbaren Luftdichtheitsschichten werden mit einem Airless-Spritzgerät aufgesprüht. Das Material wird mittels Pumpe angesaugt, komprimiert und mit hohem Druck über eine Düse aufgesprüht. Das verwendete Spritzgerät ist in Bild 4.7 dargestellt.



**Bild 4.7:** Verwendetes Airless-Spritzgerät

Die verwendete Düse, siehe Bild 4.8, trägt die Nummer 517 und weist einen Sprühwinkel von  $50^\circ$  und einen Durchmesser der Spritzdüsenöffnung von 0,017 Zoll auf, was 0,43 mm entspricht.



**Bild 4.8:** Verwendete Düse Nr. 517

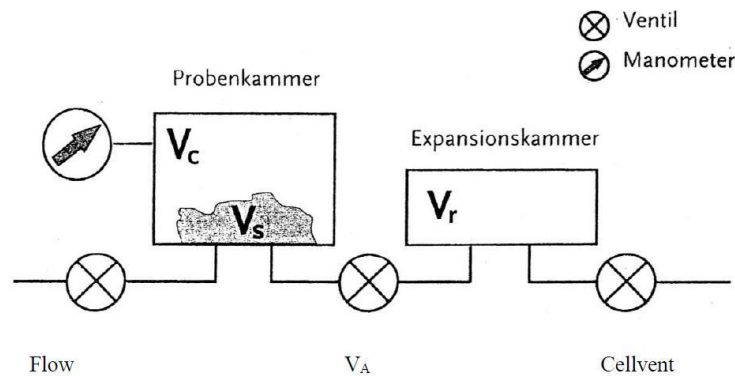
Die Applikation des Materials erfolgt bei einem Druck zwischen 120 und 160 bar und einem Abstand von 25 bis 30 cm. Die Auftragsbreite der verwendeten Düse beträgt 20 - 25 cm. Zeigen sich keine Ränder mit erhöhtem Materialauftrag im Sprühbild, ist der richtige Druck gewählt. Beim Besprühen wird das Material mit einem Winkel von 45° zur Oberfläche aufgetragen. Um eine gleichmäßige Verteilung des Materials sicherzustellen, wird die Düse dabei hin- und hergeschwenkt. Das Material wird hierbei 50 % überlappend aufgetragen. Durch den hohen Druck wird Staub auf der Oberfläche weggeblasen, eine Reinigung des Untergrundes vor der Applikation ist daher nicht erforderlich.

Anhand eines Gas-Pyknometers, siehe Bild 4.9, kann die aufgetragene Dichte bestimmt werden.



**Bild 4.9:** Darstellung Gas-Pyknometers zur Dichtebestimmung [43]

Das verwendete Gas-Pyknometer eignet sich zur Bestimmung der Rohdichte von Feststoffen mittels Verdrängung von Helium. In Bild 4.10 ist der prinzipielle Aufbau eines Gas-Pyknometers dargestellt. In die Probenkammer mit dem zu untersuchenden Feststoff wird Helium eingeleitet. Es entsteht ein Überdruck. Durch ein Ventil kann das Gas in eine weitere Kammer expandieren, bis sich ein Druckausgleich einstellt.



**Bild 4.10:** Prinzip eines Gas-Pycnometers [44]

Das Volumen und die Dichte des untersuchten Feststoffes werden durch das Gerät wie folgt bestimmt:

$$V_s = V_c - \frac{V_r}{\frac{P_G}{P_E} - 1} \quad (35)$$

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} \quad (36)$$

mit

$V_s$  [m<sup>3</sup>] Volumen des untersuchten Feststoffes;

$V_c$  [m<sup>3</sup>] Volumen der Probenkammer;

$V_r$  [m<sup>3</sup>] Volumen der Expansionskammer;

$P_G$  [Pa] entstehender Überdruck;

$P_E$  [Pa] Gleichgewichtsdruck;

$m_s$  [g] Masse des untersuchten Feststoffs.

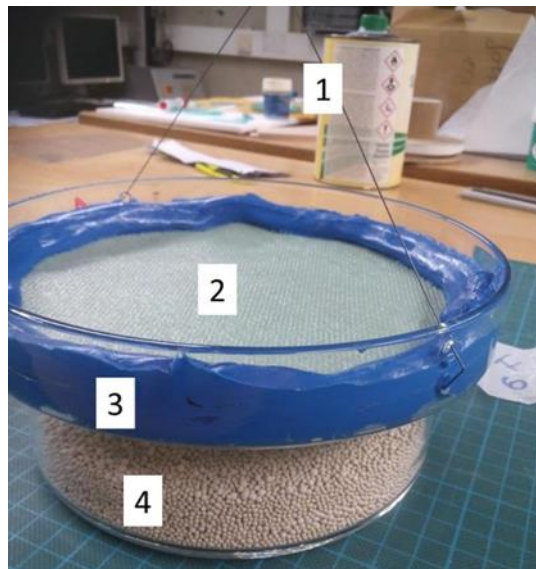
Zur Herstellung einer funktionsfähigen Luftdichtheitsschicht ist ein ebenmäßiger Auftrag der Flüssigabdichtung auf den gewählten Untergrund wichtig. Für die Applikation der sprühbaren Luftdichtheitsschichten ist daher die gleichmäßige Aufbringung des Materials und die Steuerbarkeit des Materialflusses von besonderer Bedeutung. Daneben wird bei der Bewertung der Applikationstechniken für sprühbare Luftdichtheitsschichten betrachtet, inwieweit die Schichtdicken und die Sprühbilder variier- und steuerbar sind. Um die allgemeine Anwendbarkeit der Applikationstechniken zu bewerten, wird zwischen Leckagen mit einer Größe  $\leq 3$  mm und Leckagen  $> 3$  mm unterschieden. Auch der Aufwand der mit der Anwendung der Applikationstechniken verbunden ist wird berücksichtigt. Dabei fließt ein, ob der gewählte Untergrund vor der Applikation bearbeitet werden muss, ob umliegende Oberflächen vorher abgeklebt werden müssen, wie aufwändig die Reinigung des Applikationsgeräts ist und wie viele Personen für den Transport, den Aufbau und die Anwendung erforderlich sind.

Ein weiteres Kriterium für die Bewertung der Applikationstechniken ist die Flächenleistung bzw. die Geschwindigkeit beim Aufbringen des Materials auf große Flächen und die Erreichbarkeit schwer zugänglicher Leckagen der Konstruktion. Auch die Arbeitssicherheit fließt in die Bewertung mit ein. Es wird berücksichtigt, ob bei der Anwendung gesundheitsgefährdender Sprühnebel entsteht und Schutzbekleidung notwendig ist.

#### 4.5 Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke $s_d$

Die Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  wird nach DIN EN ISO 12572 [12] durchgeführt. Mithilfe einer kreisförmigen Schablone werden insgesamt sechs Proben auf eine Fläche von 0,0219 m<sup>2</sup> zugeschnitten und geprüft.

In ein rundes Glasgefäß wird ein perlförmiges Molekularsieb eingebracht, um dort ein trockenes Milieu ( $\varphi = 0\%$ ) sicherzustellen. Das Sorptionsmittel (Porenweite 4 Å) wird zur Regenerierung einen Tag bei 250 °C im Ofen getrocknet. Der Abstand zur Probenfläche beträgt ca. 20 mm. Die Abdichtung der Probefläche am Rand erfolgt mit einer wasserdampfundurchlässigen Dichtungsmasse aus Butylkautschuk. Daher muss zusätzlich die freie Oberfläche der Probe ermittelt werden. Hierfür werden die Proben fotografiert und anschließend mithilfe eines CAD-Programms vermessen. Die freie Fläche beträgt bei den untersuchten Proben im Mittel 0,017 m<sup>2</sup>. Bild 4.11 zeigt einen fertig hergestellten Prüfkörper mit Aufhängung der Wägung (1), der besprühten Unterspannbahn als Prüfkörper (2), der Abdichtungsmasse (3) und dem Trocknungsmittel (4).



**Bild 4.11:** Prüfkörper

Die Prüfkörper werden in dem in Bild 4.12 dargestellten Klimaschrank untersucht. Durch eine integrierte Hebebühne ist es möglich die Proben mittels Aufhängung ohne Öffnen des Prüfraumes zu wiegen, siehe Bild 4.13. Die Luftwälzung wird durch zwei Ventilatoren sichergestellt.





**Bild 4.12:** Klimaschrank



**Bild 4.13:** Prüfkörper auf der Hebebühne im Klimaschrank

Für die Bestimmung des  $s_d$ -Wertes werden die sprühbaren Luftdichtheitsschichten auf eine Unterspannbahn, mit bekanntem  $s_d$ -Wert, aufgetragen. Anschließend wird das Flächengewicht des aufgetragenen Materials bestimmt. Die Proben werden hierfür direkt nach dem Besprühen und im getrockneten Zustand gewogen. Die verwendete Waage „Sartorius excellence E1200S weist eine Messgenauigkeit von 0,001 g auf. Das empfohlene Flächengewicht von 200 g/m<sup>2</sup> im trockenen Zustand wird bei einem 2- bis 4-lagigen, kreuzweisen Auftragen und einer Sprühgeschwindigkeit von 0,01 m/s erreicht.

Es werden insgesamt je eine Probe mit zwei, vier und acht Lagen sprühbarer Luftdichtheitsschicht untersucht. Die Verarbeitungsbedingungen liegen bei 23°C und 50 % relative Feuchte. Aus den Proben werden insgesamt elf Referenzstücke ausgeschnitten, die je eine Fläche von 219 cm<sup>2</sup> und ein Gewicht der Unterspannbahn von 3,458 g aufweisen.

Die ermittelten Flächen und die trockenen Massen und die Schichtdicke der aufgesprühten Luftdichtheitsschicht sowie die dazugehörigen Randbedingungen sind in Tabelle 4.6 dargestellt.

**Tabelle 4.6:** Freie Oberfläche und Masse der Prüfgefäße bei der ersten Wägung

Proben Nr.		freie Oberfläche [mm <sup>2</sup> ]	trockene Masse der aufgespritzten Beschichtung [g]	Schichtdicke [mm]	Start der Messung	Ende der Messung	mittlerer Luftdruck während der Messung [hPa]
2-lagig	1	17.508	4,476	0,187	26.10.18	30.11.18	998,3
	2	17.414	4,963	0,208			
	3	17.044	4,432	0,186			
4-lagig	4	17.817	7,586	0,318		21.03.19	1000,3
	5	16.345	7,880	0,330			
	6	16.794	7,796	0,327			
8-lagig	7	17.672	8,779	0,368	12.12.18	09.05.19	1000,4
	8	17.463	9,901	0,415			
	9	16.890	9,386	0,393			

#### 4.6 Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstandes

Die längenbezogenen Strömungswiderstände werden für den Glaswolle-Schüttdämmstoff Supafil® und den Zellulosedämmstoff Isofloc® L/LM ermittelt. Die Bestimmung der längenbezogenen Strömungswiderstände wird bei unterschiedlichen Dichten der Dämmstoffe durchgeführt.

Laut technischem Datenblatt beträgt der längenbezogene Strömungswiderstand des Dämmstoffes Isofloc® L/LM bei einer Dichte von 30 kg/m<sup>3</sup>  $\sigma \geq 5$  kPa·s/m<sup>2</sup> [36]. Für Supafil® werden vom Hersteller keine Angaben gemacht.

Es wird untersucht, wie sich der längenbezogene Strömungswiderstand bei zunehmender Dichte der Dämmstoffe und bei Nachverdichtung im Regelquerschnitt verhält. Hierfür wird der längenbezogene Strömungswiderstand in Anlehnung an DIN EN ISO 9053-1 [13] bestimmt. In Tabelle 4.7 sind die wesentlichen Abweichungen zwischen Messung nach Norm und der durchgeführten Messung aufgeführt.

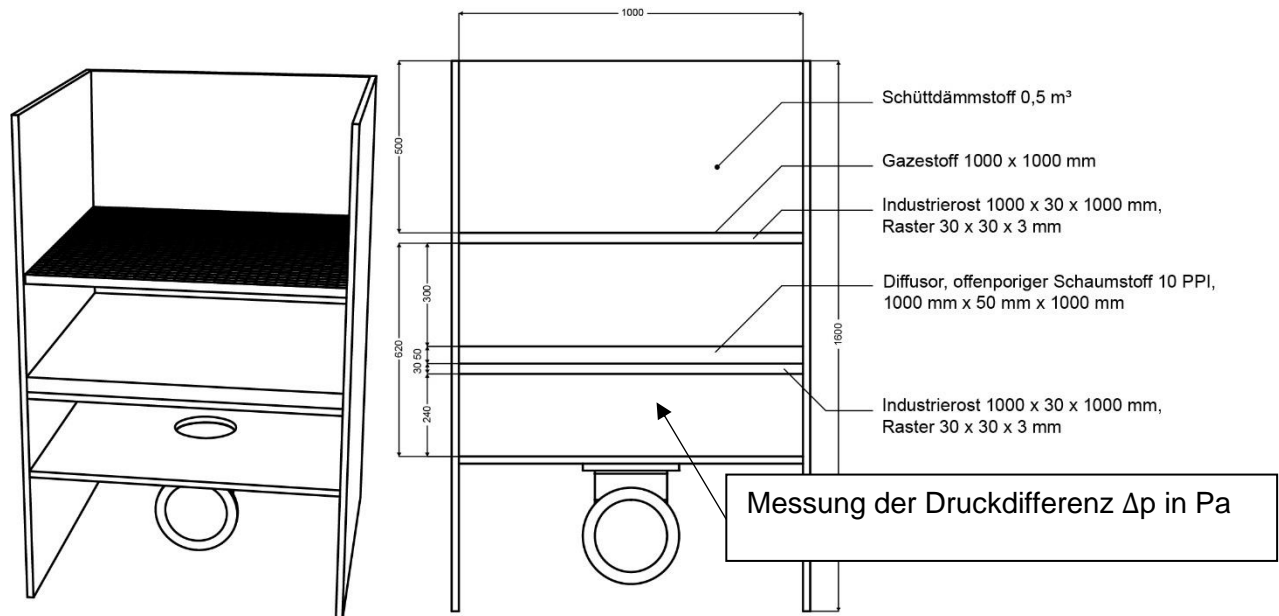
**Tabelle 4.7:** Abweichungen zwischen Messungen nach [13] und eigenen Messungen

Beschreibung	DIN EN ISO 9053-1	Versuchsaufbau
Gerät zur Erzeugung der Druckdifferenz	Vakuumpumpe, Luftkompressor	geregelter Ventilator
kleinste erzeugte Strömungsgeschwindigkeit	0,5·10 <sup>-3</sup> m/s	1,5·10 <sup>-3</sup> m/s
größte erzeugte Strömungsgeschwindigkeit	1,5 m/s	5,7·10 <sup>-3</sup> m/s
kleinste mögliche Druckdifferenz	0,1 Pa	1 Pa
Messung mit kalibrierten Probenkörper	ja	nein
Probenkörper	min. Kantenlänge 90 mm	Kantenlänge 1000 mm

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Probeaufnahmeelement, einer Einrichtung zur Messung der Druckdifferenz über den Probekörper, einer Einrichtung zur Erzeugung eines gleichmäßigen Luftstroms und einer Einrichtung zur Messung des Volumenstroms.



Das Probenaufnahmeelement ist in Bild 4.14 dargestellt. Es weist einen quadratischen Querschnitt mit 1 m Kantenlänge auf. Die Höhe beträgt 1,12 m und die Probe kann bis zu einer Höhe von 0,5 m auf einen Probenhalter (Industrierost) aufgebracht werden.



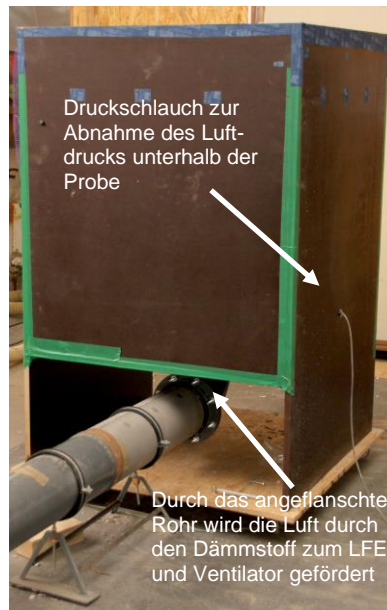
**Bild 4.14:** Versuchsaufbau zur Bestimmung des längenbezogenen Strömungswiderstandes

In Bild 4.15 ist der mit Isofloc® L/LM befüllte Prüfstand dargestellt.



**Bild 4.15:** Messstand befüllt mit Isofloc® L/LM

Um das Durchfallen durch den Rost zu vermeiden, wird oberhalb der Probe eine Gaze eingelegt. Unterhalb befindet sich eine Beruhigungstrecke mit einem als Diffusor angeordneten offenporigen Schaumstoff. In der seitlichen Wand unter dem Diffusor ist eine Bohrung angebracht, an der die Druckdifferenz gemessen wird. Nach unten ist der Messaufbau mit einer Spanplatte abgeschlossen. Darin befindet sich eine runde Öffnung, woran ein Rohrbogen befestigt wird, um die Einrichtung zur Messung des Volumenstroms anzuschließen. Bild 4.16 zeigt den Versuchsaufbau mit Rohr zum Ansaugen der Luft durch die Probe.

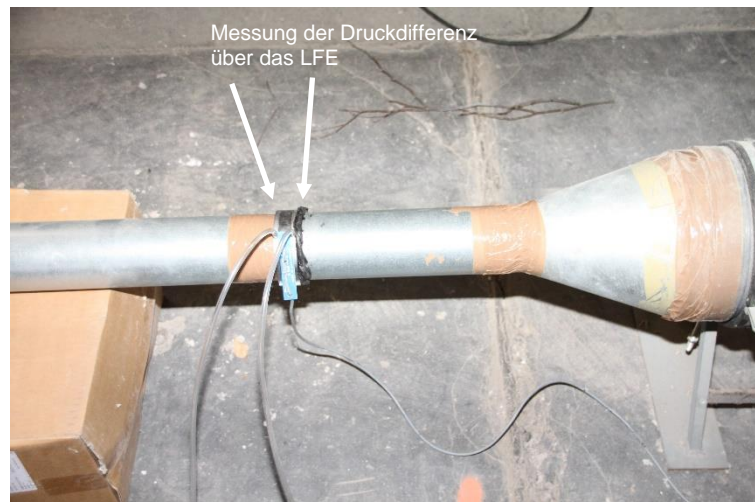


**Bild 4.16:** Versuchsaufbau zur Messung der Druckdifferenz und des Luftvolumenstroms durch den Dämmstoff

Mit einem geregelten Ventilator wird im Versuchstand ein Unterdruck erzeugt, siehe Bild 4.17. Der durch den Dämmstoff geförderte Luftvolumenstrom wird durch das Laminar Flow Element (Bild 4.18) geführt und die dabei entstehende Druckdifferenz vor und nach dem LFE wird gemessen. Für das LFE gilt, dass der Druckabfall bei laminaren Strömungen durch gerade Rohre proportional zum aktuellen Volumenstrom und zur dynamischen Viskosität des strömenden Mediums ist. Mit der Kenntnis der Druckdifferenz am LFE wird der Volumenstrom berechnet. Aus dem Quotienten aus Druckverlust und Volumenstrom ergibt sich der Strömungswiderstand. Dieser wird schließlich mit der Fläche des Probenaufnahmeelements multipliziert und, um den längenbezogenen Strömungswiderstand  $r$  zu erhalten, durch seine Höhe von 0,5 m geteilt.



**Bild 4.17:** Geregelter Ventilator zur Erzeugung der Druckdifferenzen



**Bild 4.18:** Laminar Flow Element (LFE) zur Bestimmung des Luftvolumenstroms

Für die untersuchten Dämmstoffe wird der längenbezogene Strömungswiderstand bei verschiedenen Druckdifferenzen und unterschiedlichen Dichten des Dämmstoffs beginnend bei 10 Pa Druckdifferenz, in Schritten von in 5 Pa, bis 50 Pa gemäß den Angaben in Tabelle 4.8 bestimmt.

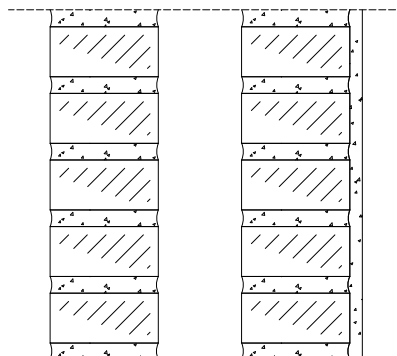
**Tabelle 4.8:** Versuchsumfang zur Messung des längenbezogenen Strömungswiderstandes

Druckdifferenz	Dämmstoff	Dichte des Materials
10 Pa bis 50 Pa in Schrittweiten von 5 Pa	Supafil®	35 kg/m³ bis 60 kg/m³ in Schrittweiten von 5 kg/m³
	Isofloc® L/LM	30 kg/m³ bis 60 kg/m³ in Schrittweiten von 5 kg/m³

#### 4.7 Feuchtetechnische Bewertung typischer sanierungsbedürftiger Altbaukonstruktionen

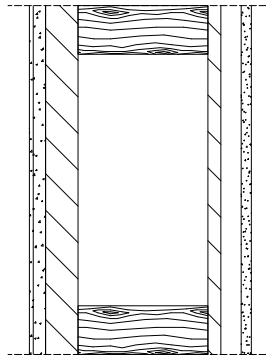
Bei Außenwänden, Dächern und Geschossdecken können Einblasdämmstoffe bei der energetischen Sanierung eingesetzt werden. Die zu sanierenden Bauteile müssen Hohlräume aufweisen, die nachträglich durch Injektion gedämmt werden können. Bei Außenwänden eignen sich daher nur Holzkonstruktionen und Wände mit Vorsatzschale. Dach- und Deckenkonstruktionen aus Holz bzw. Flachdachkonstruktionen mit einer aufgesetzten Vorsatzschale können ebenfalls mit Einblasdämmstoffen versehen werden.

In Bild 4.19 bis Bild 4.24 sind typische Konstruktionsprinzipien von Bauteilen, die mit Einblasdämmstoffen energetisch saniert werden können dargestellt. Bild 4.19 zeigt eine zweischalige Außenwand mit Klinkervorsatzschale und einem ungedämmten Hohlraum. Die Applikation erfolgt hierbei mittels Einblasdüse.

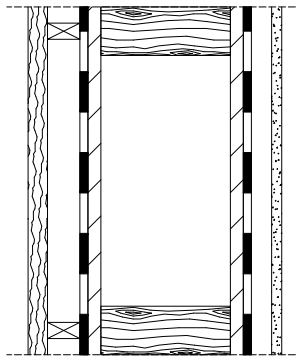


**Bild 4.19:** Typische Konstruktionen in der Altbausanierung: Zweischalige Außenwand

Außenwände in Holzständerbauweise sind für die Verwendung von Schüttdämmstoffen ebenfalls geeignet. Bild 4.20 zeigt eine direkt bewitterte Holzständerwand, d. h. es ist ein Außenputz vorhanden. Den raumseitigen Abschluss bildet eine Gipskartonplatte. Die in Bild 4.21 dargestellte Holzständerwand ist mit außenseitiger Wetterschale versehen. Eine direkte Bewitterung findet nicht statt.

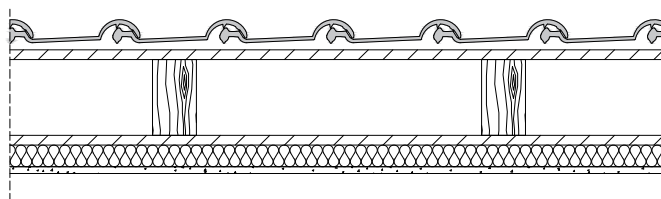


**Bild 4.20:** Typische Konstruktionen in der Altbausanierung: Holzständerwand direkt bewittert



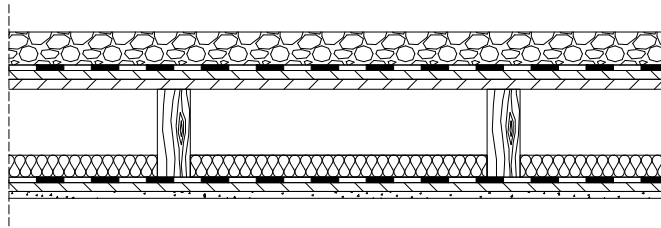
**Bild 4.21:** Typische Konstruktionen in der Altbausanierung: Holzständerwand mit Witterungsschutz

Steildächer, wie in Bild 4.22 dargestellt, weisen unterhalb der Ziegeleindeckung eine Holzschalung oder eine Unterspannbahn auf. Die Sparrenzwischenräume liegen frei oder sind teilgedämmt. Darunter findet sich der raumseitige Abschluss.



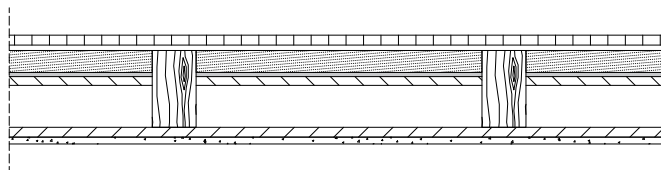
**Bild 4.22:** Typische Konstruktionen in der Altbausanierung: Steildach

Flachdachaufbauten mit einer tragenden Holzkonstruktion werden außenseitig oft mit Holzschalung und Abdichtung vorgefunden. Bild 4.23 zeigt einen derartigen Aufbau. Den äußeren Abschluss bilden eine Abdichtung unterhalb eines Oberflächenschutzes z. B. aus Kies, Begrünung oder Plattenbelägen. Zwischen den Sparren kann oft bereits eine Dämmschicht vorhanden sein. Diese ist jedoch nur wenige Zentimeter dick.



**Bild 4.23:** Typische Konstruktionen in der Altbausanierung: Flachdach

In Bild 4.24 ist ein möglicher Aufbau einer oberen Geschossdecke bzw. Kellerdecke im Altbau dargestellt. Die Decke besteht aus einer Tragebene aus Holzbalken, zwischen denen sich eine Starkung befindet. Darauf ist eine Füllung aufgebracht z. B. aus Torf, Sand, Lehm oder Schlacke. Als oberer Abschluss dient ein Blindboden oder ein Bodenbelag. Den unteren Raumabschluss bildet eine Holzschalung und eine Putzschicht. Der Hohlraum unterhalb der Starkung ist hierbei unge-  
dämmt.



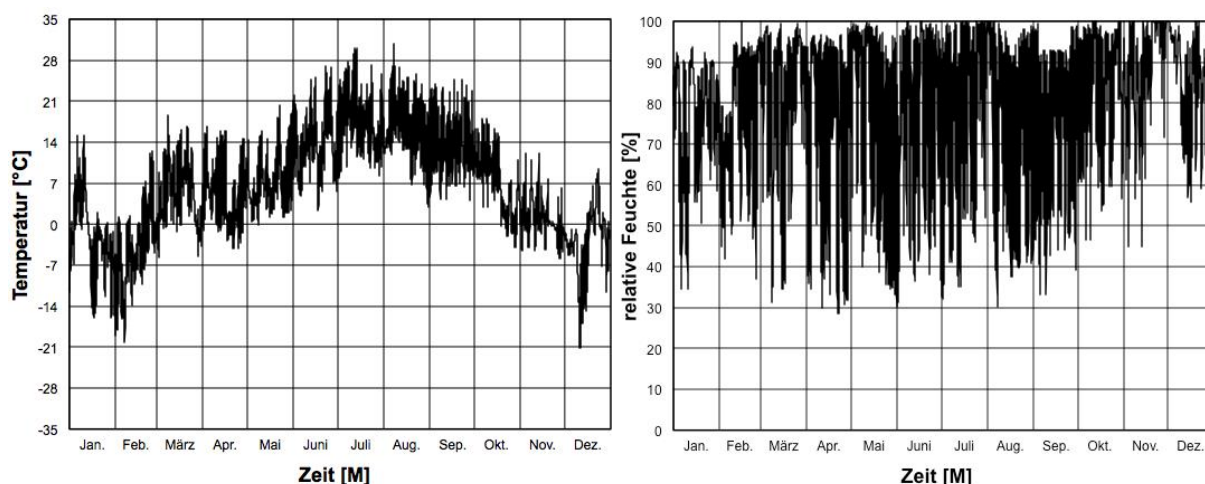
**Bild 4.24:** Typische Konstruktionen in der Altbausanierung: Obere Geschossdecke / Kellerdecke

Ausgehend von den o. g. Bauteilen erfolgt die Ermittlung der Tauglichkeit nach erfolgter energetischer Sanierung. Zusätzlich werden bei Konstruktionen die keine Tauglichkeit aufweisen die notwendigen baulichen Maßnahmen ermittelt, die umgesetzt werden müssen, damit kein feuchteschutztechnisches Versagen auftritt bzw. unter welchen baulichen Randbedingungen sie eine Eignung aufweisen.

Anhand der Ergebnisse können Konstruktionsmerkmale abgeleitet werden, die eine Bewertung von Bestandskonstruktionen zulassen bzw. wie bei der energetischen Sanierung mit Schüttdämmstoffen mit ihnen umgegangen werden muss.

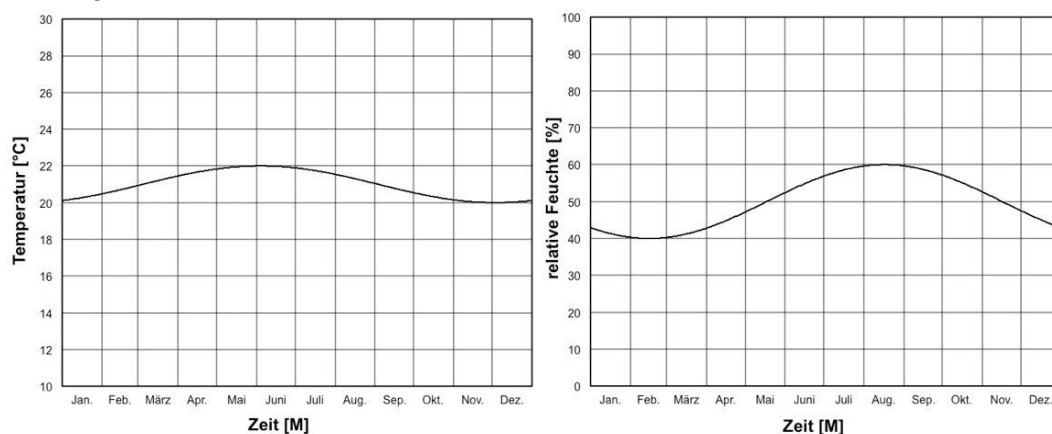
Die Untersuchungen erfolgen anhand von hygrothermischen Simulationsrechnungen mit dem Programm Wufi [34]. Hierfür stellt das Institut für Bauphysik der Fraunhofergesellschaft den Klimadatensatz „ibp1991“ [45] und [46] zur Verfügung. Der Jahresverlauf der Außenlufttemperatur und Außenluftfeuchte ist in Bild 4.25 dargestellt.





**Bild 4.25:** Jahreszeitlicher Verlauf der Außenlufttemperatur (links) und der relativen Außenluftfeuchte (rechts) des synthetischen Klimadatensatzes „ibp1991“

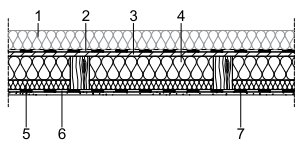
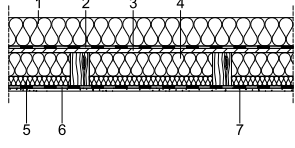
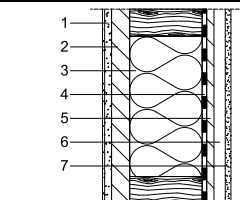
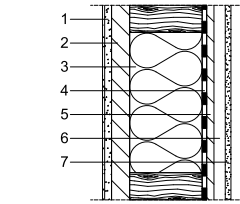
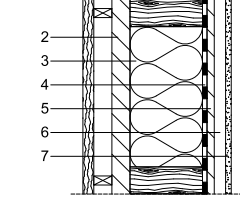
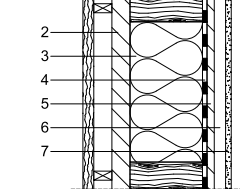
Das Innenklima ist stark vom Nutzer abhängig. Durch die Wasserdampfsorptionsfähigkeit der Innenbauteile und der Einrichtungsgegenstände sorgen jedoch im Jahresverlauf für einen relativ gleichmäßigen Verlauf der Temperatur und der relativen Luftfeuchte. Daher wird in [34] ein feuchtelastabhängiger sinusförmiger Verlauf als zweckmäßig erachtet. Die jahreszeitlichen Verläufe sind in Bild 4.26 dargestellt.



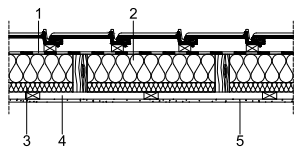
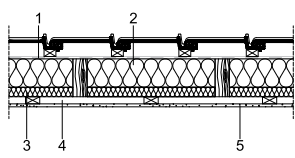
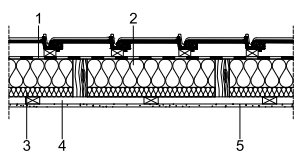
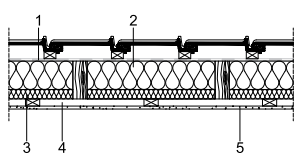
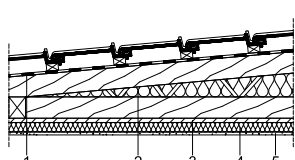
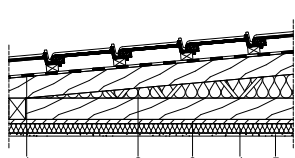
**Bild 4.26:** Jahreszeitlicher Verlauf der Raumlufttemperatur (links) und der relativen Innenluftfeuchte (rechts) für normale Feuchtelast

Angelehnt an die in diesem Kapitel beschriebenen typischen Altbaukonstruktionen, die durch die Injektion von Schüttdämmstoffen saniert werden können, werden die feuchtetechnischen Eigenschaften von Dach-, Decken- und Wandkonstruktionen in Holzbauweise sowie massiven Außenwänden mit Klinkervorsatzschale mithilfe von hygrothermischen Simulationsrechnungen mit Wufi [34] untersucht. Dabei wird die Schichtdicke des eingebrachten Dämmstoffs (Supafil® oder Isofloc® L/LM) sowie bei Konstruktion 1 bis 3 die Dicke der Überdämmung variiert. Außerdem wird für Steildachkonstruktionen eine diffusionsoffene Variante (Konstruktion 8 und 10) sowie eine Variante mit nicht mehr funktionstüchtiger Unterspannbahn (Konstruktion 9 und 11) betrachtet. Für die Außenwand in Holzständerbauweise wird eine direkt bewitterte Wandkonstruktion mit einem Außenputzsystem und eine Wandkonstruktion mit hinterlüftetem Witterungsschutz untersucht. Die Aufbauten der Konstruktionen und die Materialeigenschaften der einzelnen Schichten können Tabelle 4.9 entnommen werden. Dort sind auch die in Ansatz gebrachten  $q_{50}$ -Werte dargestellt.

**Tabelle 4.9:** Zusätzlich untersuchte Konstruktionen angelehnt an typische sanierungsbedürftige Altbaukonstruktionen

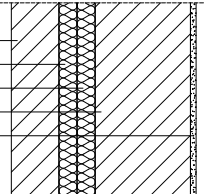
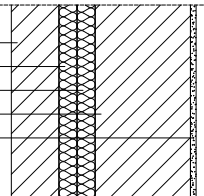
Untersuchte Konstruktionen angelehnt an sanierungsbedürftige Altbaukonstruktionen								
Nr	Skizze	Konstruktionsaufbau						q <sub>50</sub> -Wert [h <sup>-1</sup> ]
		Nr	Aufbau	d [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/m·K]	μ [-]	
Flachdachkonstruktion mit Abdichtung bei Verwendung von Supafil®								
1		1	Überdämmung	0 - 80	30	0,04	-	1,5 - 5,0
		2	Abdichtung	-	-	-	1,0·10 <sup>6</sup>	
		3	Profilholz	18	455	0,09	-	
		4	Supafil®	100	36	0,035	-	
		5	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		6	Dampfsperre	-	-	-	1,5·10 <sup>6</sup>	
		7	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Flachdachkonstruktion ohne Abdichtung bei Verwendung von Isofloc® L/LM								
2		1	Überdämmung	40	30	0,04	-	5,0
		2	Profilholz	18	455	0,09	-	
		3	Isofloc® L/LM	100	50	0,039	-	
		4	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		5	Dampfsperre	-	-	-	1,5·10 <sup>6</sup>	
		6	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Flachdachkonstruktion mit Abdichtung bei Verwendung von Isofloc® L/LM								
3		1	Überdämmung	120	30	0,04	-	5,0
		2	Abdichtung	-	-	-	1,0·10 <sup>6</sup>	
		3	Profilholz	18	455	0,09	-	
		4	Isofloc® L/LM	100	50	0,039	-	
		5	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		6	Dampfsperre	-	-	-	1,5·10 <sup>6</sup>	
		7	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Wandkonstruktion mit Außenputzsystem bei Verwendung von Supafil®								
4		1	Außenputz	20	1263,5	0,56	-	5,0
		2	MDF-Platte	40	528	0,1	-	
		3	Supafil®	150	36	0,035	-	
		4	LDE	s <sub>d</sub> = 5,0 m			-	
		5	MDF-Platte	16	528	0,1	-	
		6	Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		7	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Wandkonstruktion mit Außenputzsystem bei Verwendung von Isofloc® L/LM								
5		1	Außenputz	20	1263,5	0,56	-	3,0
		2	MDF-Platte	40	528	0,1	-	
		3	Isofloc® L/LM	150	50	0,039	-	
		4	LDE	s <sub>d</sub> = 5,0 m			-	
		5	MDF-Platte	16	528	0,1	-	
		6	Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		7	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Wandkonstruktion mit hinterlüftetem Witterungsschutz bei Verwendung von Supafil®								
6		1	Witterungsschutz	-	-	-	-	5,0
		2	MDF-Platte	40	528	0,1	-	
		3	Supafil®	150	36	0,035	-	
		4	LDE	s <sub>d</sub> = 5,0 m			-	
		5	MDF-Platte	16	528	0,1	-	
		6	Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		7	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Wandkonstruktion mit hinterlüftetem Witterungsschutz bei Verwendung von Isofloc® L/LM								
7		1	Witterungsschutz	-	-	-	-	5,0
		2	MDF-Platte	40	528	0,1	-	
		3	Isofloc® L/LM	150	50	0,039	-	
		4	LDE	s <sub>d</sub> = 5,0 m			-	
		5	MDF-Platte	16	528	0,1	-	
		6	Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		7	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	

Fortsetzung Tabelle 4.9

Untersuchte Konstruktionen angelehnt an sanierungsbedürftige Altbaukonstruktionen								
Nr	Skizze	Konstruktionsaufbau						q <sub>50</sub> -Wert [h <sup>-1</sup> ]
		Nr	Aufbau	d [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/m·K]	μ [-]	
Steildachkonstruktion diffusionsoffen bei Verwendung von Supafil®								
8		1	Witterungsschutz	-	-	-	200	5,0
		2	Supafil®	120	36	0,035	-	
		3	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		4	Luftschicht	30	1,3	0,18	-	
		5	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Steildachkonstruktion mit defekter Unterspannbahn bei Verwendung von Supafil®								
9		1	Witterungsschutz	-	-	-	200	5,0
		2	Supafil®	140 - 220	36	0,035	-	
		3	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		4	Luftschicht	30	1,3	0,18	-	
		5	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Steildachkonstruktion diffusionsoffen bei Verwendung von Isofloc® L/LM								
10		1	Witterungsschutz	-	-	-	200	5,0
		2	Isofloc® L/LM	120	50	0,039	-	
		3	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		4	Luftschicht	30	1,3	0,18	-	
		5	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Steildachkonstruktion mit defekter Unterspannbahn bei Verwendung von Isofloc® L/LM								
11		1	Witterungsschutz	-	-	-	200	5,0
		2	Isofloc® L/LM	160 - 220	50	0,039	-	
		3	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		4	Luftschicht	30	1,3	0,18	-	
		5	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Obere Geschossdecke bei Verwendung von Supafil®								
12		1	Witterungsschutz	-	130	2,3	200	0,1 - 1,0
		2	Supafil®	100	36	0,035	-	
		3	Profilholz	18	455	0,09	-	
		4	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		5	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Obere Geschossdecke bei Verwendung von Isofloc® L/LM								
13		1	Witterungsschutz	-	130	2,3	200	0,1 - 1,0
		2	Isofloc® L/LM	100	50	0,039	-	
		3	Profilholz	18	455	0,09	-	
		4	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		5	Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	



Fortsetzung Tabelle 4.9

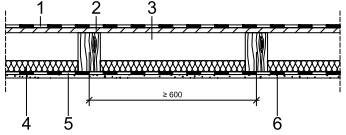
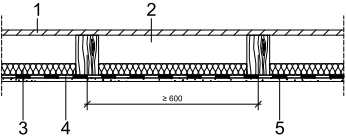
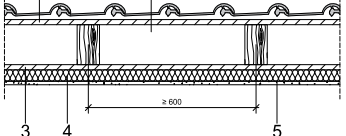
Fortsetzung Tabelle 4.10								
Untersuchte Konstruktionen angelehnt an sanierungsbedürftige Altbaukonstruktionen								
Nr	Skizze	Konstruktionsaufbau						Q <sub>50</sub> -Wert [h <sup>-1</sup> ]
		Nr	Aufbau	d [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/m·K]	μ [-]	
Außenwand mit Vorsatzschale bei Verwendung von Supafil®								
14		1	Vollziegel	115	1800	0,6	-	
		2	Supafil®	40	36	0,035	-	
		3	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		4	Vollziegel	240	1800	0,6	-	
		5	Innenputz	15	850	0,2	-	
Außenwand mit Vorsatzschale bei Verwendung von Isofloc® L/LM								
15		1	Vollziegel	115	1800	0,6	-	
		2	Isofloc® L/LM	40	36	0,035	-	
		3	Mineralfaser	40	60	0,04	-	
		4	Vollziegel	240	1800	0,6	-	
		5	Innenputz	15	850	0,2	-	

#### 4.8 Ermittlung zulässiger Leckageraten und feuchtetechnische Bewertung

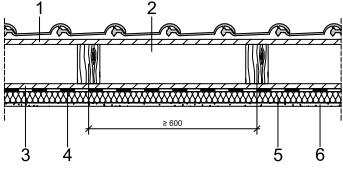
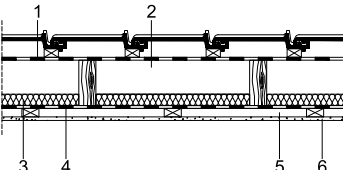
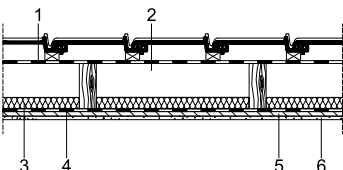
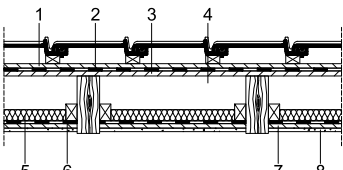
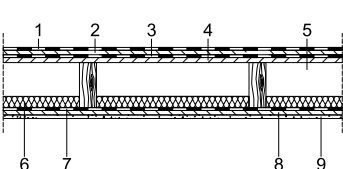
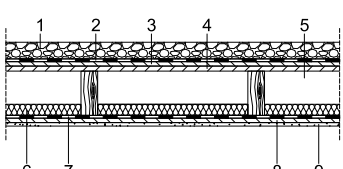
Die zulässigen Leckageraten werden in Abhängigkeit der Strömungswiderstände mit Hilfe des in Wufi implementierten Infiltrationsmodells [35] ermittelt. Die zu bewertenden Bauteile werden mit unterschiedlichen  $q_{50}$ -Werten bewertet. Die messtechnisch untersuchten Aufbauten werden hierbei auf vergleichbare Außenbauteile übertragen und mit den ermittelten  $q_{50}$ -Werten untersucht. Die abgeleiteten Vergleichsaufbauten sind in Tabelle 4.10 dargestellt. Diese werden sowohl mit dem Dämmstoff Isofloc® L/LM als auch mit Supafil® mit  $q_{50}$ -Werten zwischen  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$  bis  $1,0 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$  auf ihre feuchtetechnischen Eigenschaften hin untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist die Ableitung von Konstruktionsmerkmalen, anhand derer die Notwendigkeit und Eignung von Sanierungsmaßnahmen bestimmt werden können.

Für die Untersuchung werden nachfolgend aufgeführte Konstruktionen herangezogen und wie dargestellt variiert. Als Bewertungsgrundlage dienen hierbei die Tauwassermenge innerhalb der Konstruktion, die mögliche Bildung von holzerstörenden Pilzen und der Wassergehalt im Holz und den Holzwerkstoffen.

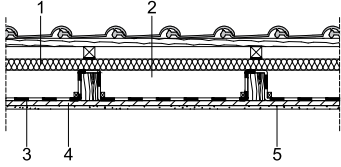
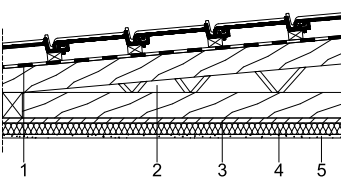
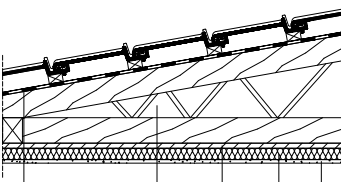
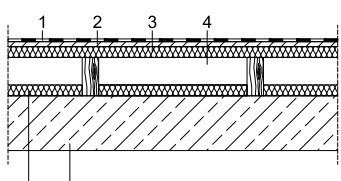
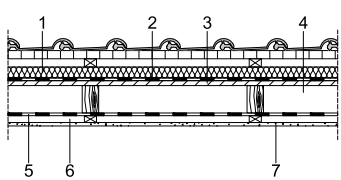
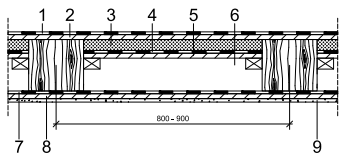
**Tabelle 4.10:** Darstellung der untersuchten Wand- und Dachkonstruktionen

Nr.	Skizze	Aufbau	d [mm]	$\rho$ [kg/m³]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\mu$ [ - ]
1		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 Luftschicht 4 Mineralfaser 5 Dampfsperre 6 Gipskartonplatte	- 18 100 40 - 12,5	- 455 1,3 60 130 850	- 0,09 0,864 0,04 2,3 0,2	1000000 - - - 1500000 -
1.1		1 Profilholz 2 Luftschicht 3 Mineralfaser 4 Dampfsperre 5 Gipskartonplatte	18 100 40 - 12,5	455 1,3 60 130 850	0,09 0,864 0,04 2,3 0,2	- - - 1500000 -
2		1 Profilholz 2 Luftschicht 3 Profilholz 4 Mineralfaser 5 Gipskartonplatte	18 140 18 40 12,5	455 1,3 455 60 850	0,09 0,864 0,09 0,04 0,2	- - - - -

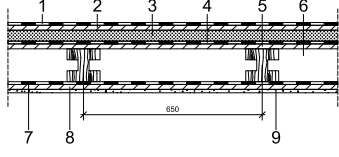
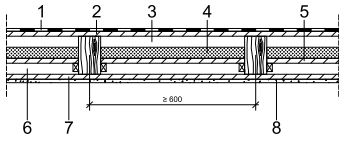
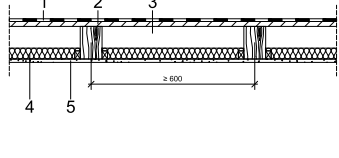
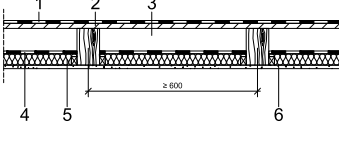
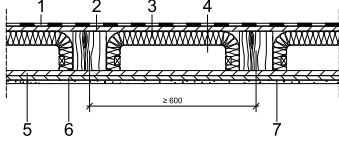
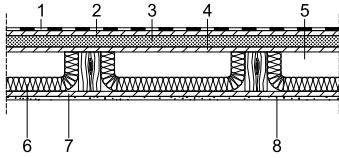
**Fortsetzung Tabelle 4.10**

Nr.	Skizze	Aufbau	d [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/(m·K)]	μ [ - ]
2.1		1 Profilholz 2 Luftschicht 3 Profilholz 4 Dampfsperre 5 Mineralfaser 6 Gipskartonplatte	18 140 18 - 40 12,5	455 1,3 455 130 60 850	0,09 0,864 0,09 2,3 0,04 0,2	- - - 1500000 - -
3		1 Witterungsschutz 2 Luftschicht 3 Mineralfaser 4 Dampfsperre 5 Luftschicht 6 Gipskartonplatte	- 120 40 - 30 12,5	130 1,3 60 130 1,3 850	2,3 0,864 0,04 2,3 0,18 0,2	200 - - 1500000 - -
3.3		1 Witterungsschutz 2 Luftschicht 3 Mineralfaser 4 Dampfsperre 5 MDF - Platte 6 Gipskartonplatte	- 120 40 - 16 12,5	130 1,3 60 130 528 850	2,3 0,864 0,04 2,3 0,1 0,2	200 - - 1500000 - -
4		1 MDF - Platte 2 Witterungsschutz 3 Profilholz 4 Luftschicht 5 Mineralfaser 6 Dampfsperre 7 MDF - Platte 8 Gipskartonplatte	16 - 18 120 40 - 16 12,5	528 130 455 1,3 60 130 528 850	0,1 2,3 0,09 0,864 0,04 2,3 0,1 0,2	- 200 - - - 1500000 - -
5		1 Abdichtung 2 MDF - Platte 3 Witterungsschutz 4 Profilholz 5 Luftschicht 6 Mineralfaser 7 Dampfsperre 8 MDF - Platte 9 Gipskartonplatte	- 16 - 18 120 40 - 16 12,5	- 528 130 455 1,3 60 130 528 850	- 0,1 2,3 0,09 0,864 0,04 2,3 0,1 0,2	1000000 - 200 - - - 1500000 - -
6		1 Gründachaufbau 2 Dachbahn 3 MDF - Platte 4 Profilholz 5 Luftschicht 6 Mineralfaser 7 Dampfsperre 8 MDF - Platte 9 Gipskartonplatte	60 - 16 18 120 40 - 16 12,5	1500 2400 528 455 1,3 60 130 528 850	0,9 0,5 0,1 0,09 0,864 0,04 2,3 0,1 0,2	- 100000 - - - - 1500000 - -

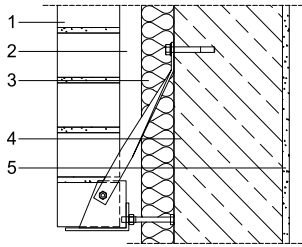
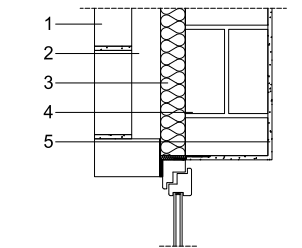
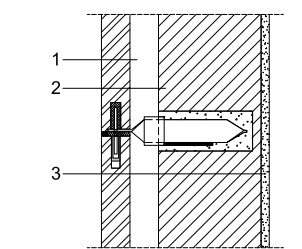
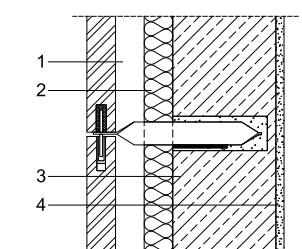
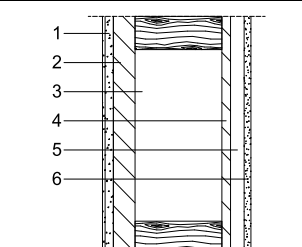
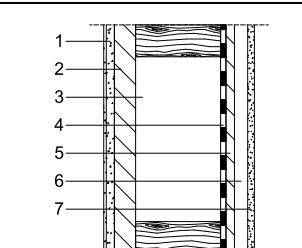
**Fortsetzung Tabelle 4.10**

Nr.	Skizze	Aufbau	d [mm]	$\rho$ [kg/m³]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\mu$ [ - ]
7		1 Mineralfaser 2 Luftschicht 3 Dampfsperre 4 Profilholz 5 Gipskartonplatte	40 100 - 18 12,5	60 1,3 130 455 850	0,04 0,864 2,3 0,09 0,2	- - 1500000 - -
8.10		1 Witterungsschutz 2 Luftschicht 3 Profilholz 4 Mineralfaser 5 Gipskartonplatte	- 100 18 40 12,5	130 1,3 455 60 850	2,3 0,864 0,09 0,04 0,2	200 - - - -
8.20		1 Witterungsschutz 2 Luftschicht 3 Profilholz 4 Mineralfaser 5 Gipskartonplatte	- 100 18 40 12,5	130 1,3 455 60 850	2,3 0,864 0,09 0,04 0,2	200 - - - -
9		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 Mineralfaser 4 Luftschicht 5 Mineralfaser 6 Beton	- 18 40 100 40 200	- 455 60 1,3 60 2300	- 0,09 0,04 0,864 0,04 1,6	1000000 - - - - -
10		1 Mineralfaser 2 Witterungsschutz 3 Profilholz 4 Luftschicht 5 Dampfsperre 6 Luftschicht 7 Gipskartonplatte	40 - 18 100 - 25 12,5	60 130 455 1,3 130 1,3 850	0,04 2,3 0,09 0,864 2,3 0,155 0,2	- 200 - - 1500000 - -
12		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 EPS 4 Dampfbremse 5 Profilholz 6 Luftschicht 7 Dampfsperre 8 Profilholz 9 Gipskartonplatte	- 18 40 - 18 120 - 18 12,5	- 455 30 130 455 1,3 130 455 850	- 0,09 0,04 2,3 0,09 0,864 2,3 0,09 0,2	1000000 - - 100000 - - 1500000 - -

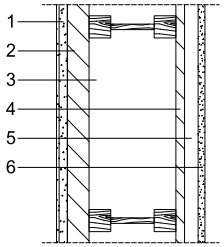
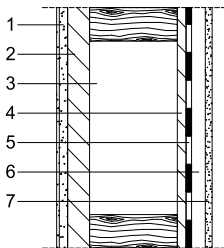
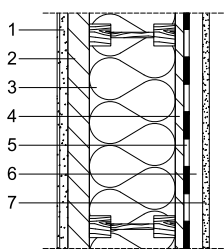
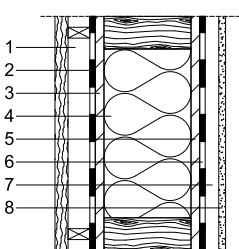
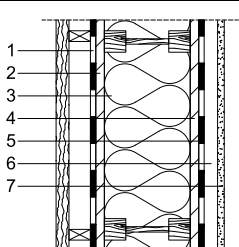
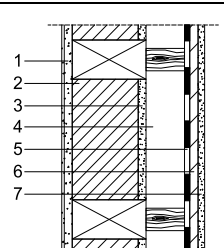
**Fortsetzung Tabelle 4.10**

Nr.	Skizze	Aufbau	d [mm]	$\rho$ [kg/m³]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\mu$ [ - ]
13		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 EPS 4 Dampfbremse 5 Profilholz 6 Luftschicht 7 Dampfsperre 8 Profilholz 9 Gipskartonplatte	- 18 40 - 18 120 - 18 12,5	- 455 30 130 455 1,3 130 455 850	- 0,09 0,04 2,3 0,09 0,864 2,3 0,09 0,2	1000000 - - 100000 - - 1500000 - -
15		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 Luftschicht 4 EPS 5 Profilholz 6 Luftschicht 7 Profilholz 8 Gipskartonplatte	- 18 40 40 18 40 18 12,5	- 455 1,3 30 455 1,3 455 850	- 0,09 0,864 0,04 0,09 0,864 0,09 0,2	1000000 - - - - - - -
16		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 Luftschicht 4 Mineralfaser 5 Gipskartonplatte	- 18 80 40 12,5	- 455 1,3 60 850	- 0,09 0,864 0,04 0,2	1000000 - - - -
16.1		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 Luftschicht 4 Dampfsperre 5 Mineralfaser 6 Gipskartonplatte	- 18 80 - 40 12,5	- 455 1,3 130 60 850	- 0,09 0,864 2,3 0,04 0,2	1000000 - - 1500000 - -
17		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 Mineralfaser 4 Luftschicht 5 Profilholz 6 MDF - Platte 7 Gipskartonplatte	- 18 40 80 18 16 12,5	- 455 60 1,3 455 528 850	- 0,09 0,04 0,723 0,09 0,1 0,2	1000000 - - - - - -
18		1 Abdichtung 2 Profilholz 3 EPS 4 Profilholz 5 Luftschicht 6 Mineralfaser 7 Profilholz 8 Gipskartonplatte	- 18 40 18 80 40 18 12,5	- 455 30 455 1,3 60 455 850	- 0,09 0,04 0,09 0,723 0,04 0,09 0,2	1000000 - - - - - - -

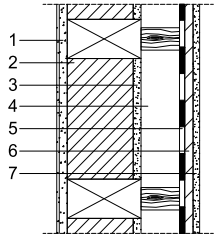
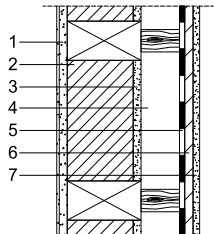
**Fortsetzung Tabelle 4.10**

Nr.	Skizze	Aufbau	d [mm]	$\rho$ [kg/m³]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\mu$ [ - ]
20		1 Vollziegel 2 Luftschicht 3 Mineralfaser 4 Beton 5 Innenputz	115 40 40 200 15	1800 1,3 60 2300 850	0,6 0,23 0,04 1,6 0,2	-
21		1 Vollziegel 2 Luftschicht 3 Mineralfaser 4 Vollziegel 5 Innenputz	115 40 40 240 15	1800 1,3 60 1800 850	0,6 0,23 0,04 0,6 0,2	-
23		1 Luftschicht 2 Beton 3 Innenputz	150 200 15	1,3 2300 850	0,94 1,6 0,2	-
24		1 Luftschicht 2 Mineralfaser 3 Beton 4 Innenputz	150 40 200 15	1,3 60 2300 850	0,94 0,04 1,6 0,2	-
26		1 Außenputzsystem 2 MDF - Platte 3 Luftschicht 4 MDF - Platte 5 Luftschicht 6 Gipskartonplatte	20 40 150 16 25 12,5	1263,5 528 1,3 528 1,3 850	0,56 0,1 0,94 0,1 0,155 0,2	-
26.1		1 Außenputzsystem 2 MDF - Platte 3 Luftschicht 4 Dampfsperre 5 MDF - Platte 6 Luftschicht 7 Gipskartonplatte	20 40 150 - 16 25 12,5	1263,5 528 1,3 130 528 1,3 850	0,56 0,1 0,94 2,3 0,1 0,155 0,2	- - - 1500000 - - -

**Fortsetzung Tabelle 4.10**

Nr.	Skizze	Aufbau	d [mm]	$\rho$ [kg/m³]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\mu$ [ - ]
27		1 Außenputzsystem 2 MDF - Platte 3 Luftschicht 4 MDF - Platte 5 Luftschicht 6 Gipskartonplatte	20 40 150 16 25 12,5	1263,5 528 1,3 528 1,3 850	0,56 0,1 0,94 0,1 0,155 0,2	- - - - - -
28		1 Außenputzsystem 2 MDF - Platte 3 Luftschicht 4 MDF - Platte 5 Dampfbremse 6 Luftschicht 7 Gipskartonplatte	20 40 150 16 - 25 12,5	1263,5 528 1,3 528 130 1,3 850	0,56 0,1 0,94 0,1 2,3 0,155 0,2	- - - - 100000 - -
29		1 Außenputzsystem 2 MDF - Platte 3 Mineralfaser 4 MDF - Platte 5 Dampfbremse 6 Luftschicht 7 Gipskartonplatte	20 40 150 16 - 25 12,5	1263,5 528 60 528 130 1,3 850	0,56 0,1 0,04 0,1 2,3 0,155 0,2	- - - - 100000 - -
30		1 Luftschicht 2 Witterungsschutz 3 Profilholz 4 Mineralfaser 5 Profilholz 6 Dampfbremse 7 Luftschicht 8 Gipskartonplatte	40 - 16 160 16 - 25 12,5	1,3 - 455 60 455 130 1,3 850	- - 0,09 0,04 0,09 2,3 0,155 0,2	- 200 - - - 100000 - -
31		1 Witterungsschutz 2 Profilholz 3 Mineralfaser 4 Profilholz 5 Dampfbremse 6 Luftschicht 7 Gipskartonplatte	- 16 160 16 - 25 12,5	- 455 60 455 130 1,3 850	- 0,09 0,04 0,09 2,3 0,155 0,2	200 - - - 100000 - -
32		1 Außenputzsystem 2 Vollziegel 3 Innenputz 4 Luftschicht 5 Dampfbremse 6 Profilholz 7 Gipskartonplatte	20 240 15 140 - 16 12,5	1263,5 1800 850 1,3 130 455 850	0,56 0,6 0,2 0,864 2,3 0,09 0,2	- - - - 100000 - -

**Fortsetzung Tabelle 4.10**

Nr.	Skizze	Aufbau	d [mm]	$\rho$ [kg/m³]	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\mu$ [ - ]
32.2		1 Außenputzsystem 2 Vollziegel 3 Innenputz 4 Luftschicht 5 Dampfbremse 6 Profilholz 7 Gipskartonplatte	20 240 15 140 - 16 12,5	1263,5 1800 850 1,3 130 455 850	0,56 0,6 0,2 0,864 2,3 0,09 0,2	- - - - 2000 - -
32.3		1 Außenputzsystem 2 Vollziegel 3 Innenputz 4 Luftschicht 5 Dampfbremse 6 Profilholz 7 Gipskartonplatte	20 240 15 140 - 16 12,5	1263,5 1800 850 1,3 130 455 850	0,56 0,6 0,2 0,864 2,3 0,09 0,2	- - - - variabel - -

## 4.9 Messtechnische Bestimmung von Volumenströmen

### 4.9.1 Regelquerschnitt

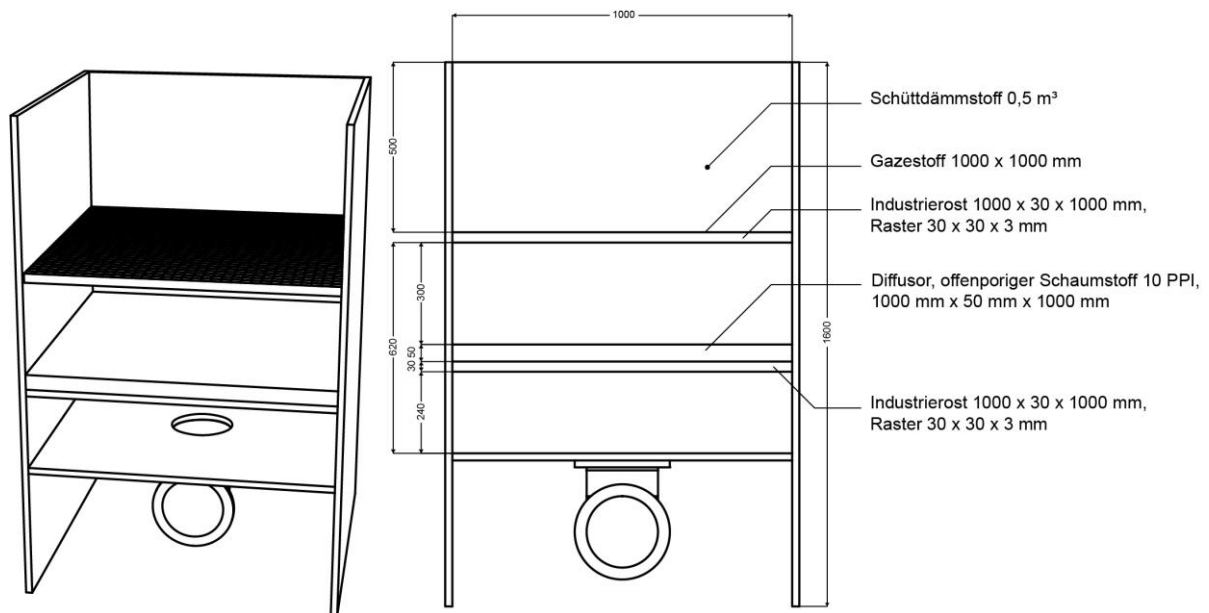
Anhand unterschiedlicher Verdichtungsgrade soll der Einfluss der Einbaudichte auf den Leckagevolumenstrom bestimmt werden. Untersucht wird der Zellsedämmstoff Isofloc® L/LM und der Mineralwollsedämmstoff Supafil®. Die Ermittlung des Leckagevolumenstroms wird in Anlehnung an DIN EN 13829 [18] und DIN EN 12114 [47] am in Bild 4.27 dargestellten Regelprüfstand durchgeführt. Die Bestimmung der Volumenströme erfolgt mit unterschiedlichen Verdichtungsstufen der eingesetzten Dämmstoffe.

Der eingebrachte Dämmstoff wird durch ein Industriegitter mit aufliegender Gaze begrenzt. Das Raster des Gitters beträgt 30 mm x 30 mm x 3 mm, was trotz aufliegender Gaze eine annähernd freie Durchströmung des Dämmstoffs gewährleistet. Der Innenquerschnitt des Prüfstands beträgt 1 m x 1 m bei einer Höhe von 50 cm.

Unter dem Industrierost befindet sich ein Diffusor aus offenporigem Schaumstoff (PPI 10) mit einer Dicke von 50 mm, der auf einem weiteren Industrierost aufliegt. Der Abstand zwischen den beiden Industrierosten beträgt 35 cm.

Für die Bestimmung der Volumenströme wird der zu untersuchende Dämmstoff auf den oberen Industrierost mit Gaze aufgebracht und je nach Bedarf und Untersuchungsziel verdichtet.





**Bild 4.27:** Darstellung des Regelprüfstandes ohne Umbauten

Die Druckdifferenz wird mit Differenzdrucksensoren der Fa. Ashcroft, Messbereiche 0 Pa bis 100 Pa und 0 Pa bis 500 Pa, jeweils mit einer Messgenauigkeit von 0,25 % d. M. E., bestimmt. Der sich einstellende Volumenstrom wird mit einem Laminar Flow Element (LFE) der Fa. Special Instruments ermittelt. Die Linearität des eingesetzten Typs liegt bei ca.  $\pm 0,5$  % des Messwertes. Der Messbereich beläuft sich zwischen 0 m<sup>3</sup>/h und 70 m<sup>3</sup>/h. Die Regelung des Volumenstromes und die Messwerterfassung erfolgt über PC mit Messwerterfassungskarte der Fa. National Instruments und eigener Software auf der Basis von LabVIEW® (National Instruments).

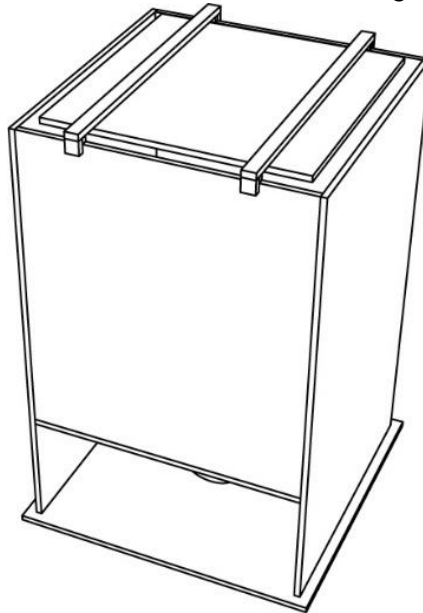
Tabelle 4.11 zeigt eine Übersicht der messtechnisch untersuchten Varianten des oben beschriebenen Versuchsaufbaus. Für den Dämmstoff Isofloc® L/LM werden Verdichtungsgrade von 25 kg/m<sup>3</sup> bis 70 kg/m<sup>3</sup> und bei Supafil® 25 kg/m<sup>3</sup> bis 62 kg/m<sup>3</sup> untersucht. Die Dichte des eingebrachten Dämmstoffs wird dabei in Schritten von 5 kg/m<sup>3</sup> erhöht.

**Tabelle 4.11:** Darstellung der messtechnisch untersuchten Varianten am Regelquerschnitt

Material des eingebrachten Dämmstoffs	Aufbau Nr.	Dichte des eingebrachten Dämmstoffs [kg/m <sup>3</sup> ]
Isofloc® L/LM	1	25
	2	30
	3	35
	4	40
	5	45
	6	50
	7	55
	8	60
	9	65
	10	70
Supafil®	1	25
	2	30
	3	35
	4	40
	5	45
	6	50
	7	55
	8	60
	9	62

#### 4.9.2 Randbereich von Bauteilanschlüssen

Anhand der Untersuchung soll der Einfluss bei gezielter Nachverdichtung von Bauteilanschlüssen über die Flanken untersucht werden. Da sich in der Regel die größten Leakageströme im Bereich von Anschlusssituationen einstellen, erfolgt lediglich eine Nachverdichtung im Bereich nachgestellter Anschlusssituationen. Der Prüfstand wird daher so umgebaut, dass Luft nur im Bereich der Seitenwände, aber nicht über den Regelquerschnitt des Prüfstandes einströmen kann. Hierfür wird eine Siebdruckplatte mit einer Stärke von 21 mm im mittleren Bereich flächig und luftdicht auf der Dämmstoffoberfläche aufgelegt. Umlaufend verbleibt ein frei durchströmbarer Spalt von 50 mm, siehe Bild 4.28. Das Abdecken des Dämmstoffes bis auf einen 50 mm breiten umlaufenden Rand verstärkt die Flankenströmung und Effekte der Nachverdichtung sollen erfasst werden.



**Bild 4.28:** Prüfstand mit Abdeckung zur Messung der Flankenströmung.

Aufgrund von Herstellerangaben und den Erfahrungen aus vorherigen Untersuchungen, werden die Dämmstoffe im Ausgangsfall mit einer möglichst niedrigen Dichte eingeblasen.

Für die Untersuchungen werden daher folgende Dichten festgelegt:

- Supafil®  $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$
- Isofloc® L/LM  $\rho = 45 \text{ kg/m}^3$

Ausgehend von der im Vorfeld beschriebenen Dichte in der Gesamtkonstruktion wird der Dämmstoff Supafil® in den Bereichen, die zur Nachverdichtung vorgesehen sind, von  $35 \text{ kg/m}^3$  auf  $55 \text{ kg/m}^3$  nachverdichtet. Der Zellulosedämmstoff Isofloc® L/LM von  $45 \text{ kg/m}^3$  auf  $60 \text{ kg/m}^3$ .

Die untersuchten Varianten sind nachfolgend mit den jeweiligen Dichten des eingebrachten Dämmstoffs in Tabelle 4.12 dargestellt.

**Tabelle 4.12:** Darstellung der messtechnisch untersuchten Varianten zur Ermittlung von Leckagevolumenströme im Randbereich von Bauteilen

Material des eingebrachten Dämmstoffs	Aufbau Nr.	Dichte des eingebrachten Dämmstoffs [kg/m³]
Isofloc® L/LM	1	45
	2	45 / 60 (im Randbereich)
Supafil®	1	35
	2	35 / 55 (im Randbereich)

Die Messung des Volumenstroms erfolgt nach dem in Kapitel 4.9.1 beschriebenen Messverfahren.

### 4.9.3 Typische Leckagen

Für die Bewertung typischer Leckagen im Bereich eines Streichsparrens wird ein Dachausschnitt (Streichsparrenanschluss) im Regelprüfstand nachgebaut und gezielt nachverdichtet. Zusätzlich werden die Hohlräume mit Dämmstoffen in den zuvor bestimmten regulären Verdichtungsgraden eingebracht und der Leckagevolumenstrom ermittelt. Anschließend wird der Bereich am Streichsparren nachverdichtet und eine erneute Volumenstrommessung durchgeführt.

Der Dachkonstruktionsausschnitt setzt sich wie folgt zusammen (Aufbau von unten nach oben):

- Profilholz Nut- und Feder oder Gipskartonplatte 995 x 12,5 x 1000 mm
- Lattung 2 Stück je 24 x 48 x ca. 900 mm
- Sparren 2 Stück je 80 x 160 x 1000 mm
- 50 mm dicke alukaschierte Mineralwolle zwischen die Sparren bzw. zwischen Sparren und seitlichem Anschluss geklemmt.

Im Bereich des nachgestellten Wandanschlusses (Streichsparren) wird die raumseitige Verkleidung mit einer 5 mm breiten Leckage ausgebildet. Die übrigen seitlichen Anschlüsse werden luftdicht verklebt. Die Volumenströme wurden analog zum in Kapitel 4.9.1 beschriebenen Messverfahren bestimmt.

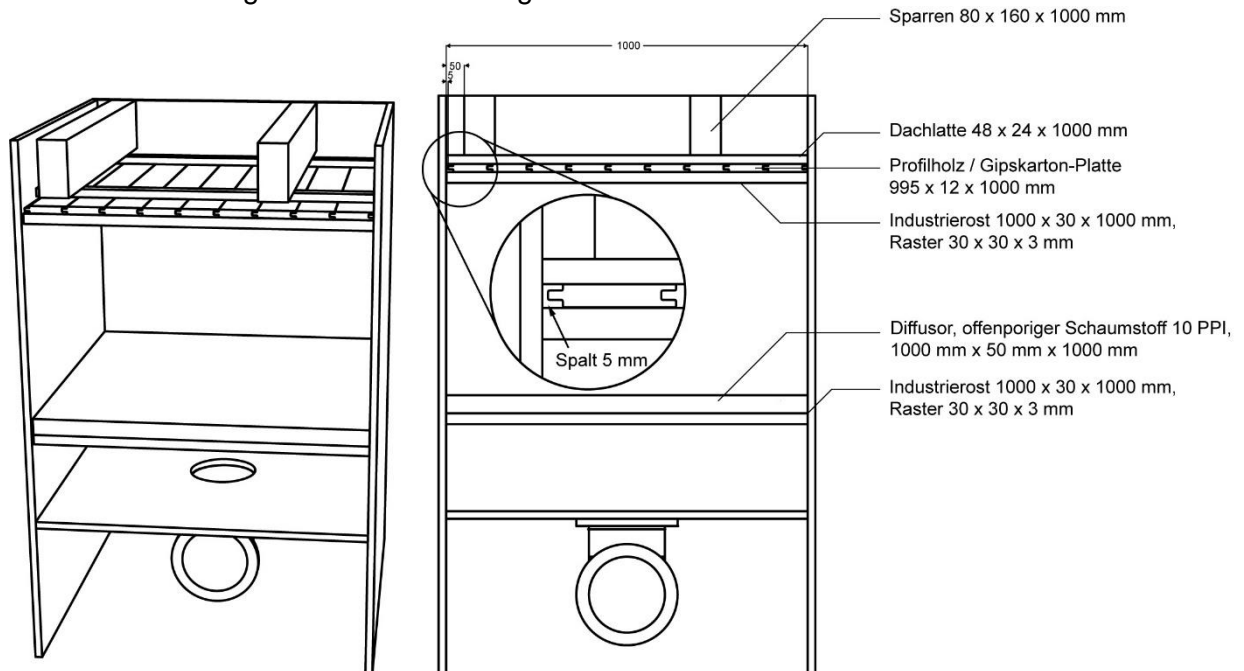
Für die unterschiedlichen Untersuchungen wird zunächst eine Eingangsmessung mit Mineralwolle als auch mit unterschiedlichen äußeren Abdeckungen durchgeführt. Anschließend werden die Hohlräume zwischen den Sparren und zwischen Sparren und Seitenwand mit Schüttdämmung mit definiertem Verdichtungsgrad versehen und der Volumenstrom bestimmt und in weiteren Messungen nachverdichtet.

Außenseitig werden folgende Varianten untersucht:

1. Referenzprüfstand offen
2. Dachunterspannbahn auf Sparren getackert, seitliche Ränder liegen lose auf dem Rand des Referenzprüfstands auf
3. Platte mit 5 cm umlaufendem Spalt
4. Dachunterspannbahn auf 3 Seiten luftdicht verklebt, 5 mm Spalt auf der Seite über dem Streichsparrenanschluss offen

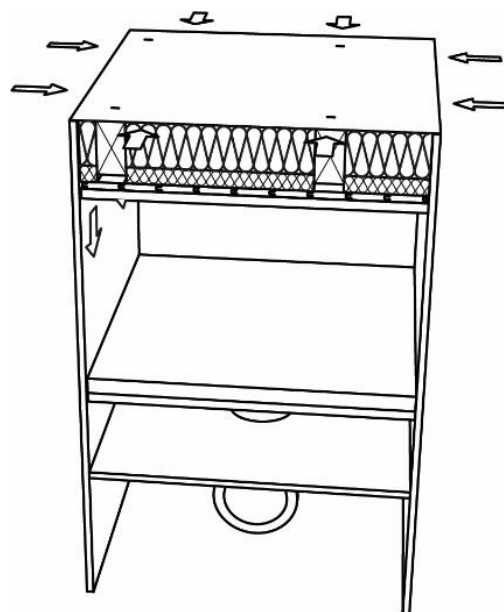
Der Versuchsaufbau „Referenzprüfstand offen“ soll die Situation abbilden, dass entweder keine Unterspannbahn vorhanden ist, oder die Unterspannbahn im Laufe der Zeit durch Witterungseinflüsse insbesondere die Temperatur so stark beschädigt ist, dass sie als nicht mehr

funktionstüchtig eingestuft werden kann (Alterung des Materials). In Bild 4.29 ist der Versuchsaufbau ohne Abdeckung und Dämmstoff dargestellt.



**Bild 4.29:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ohne Abdeckung und ohne Dämmstoffe

Weiterhin wird der Versuchsaufbau mit einer Dachunterspannbahn abgedeckt. Auf den Seiten liegt die Unterspannbahn lose auf dem Prüfstand auf. Der Versuchsaufbau soll die Situation nachbilden, dass die Unterspannbahn in der Fläche vorhanden ist, die Überlappungen der Bahn untereinander nicht luftdicht verklebt sind und der Anschluss an die Wand nicht luftdicht ausgeführt wurde. Die Bahn wird mit Tackerklammern auf den Sparren gesichert. Eine seitliche Unterströmung der Unterspannbahn sowie eine Durchströmung Wandanschlusses und der darunterliegenden Leckage sind erwünscht. Bild 4.30 zeigt eine schematische Darstellung des beschriebenen Versuchsaufbaus.



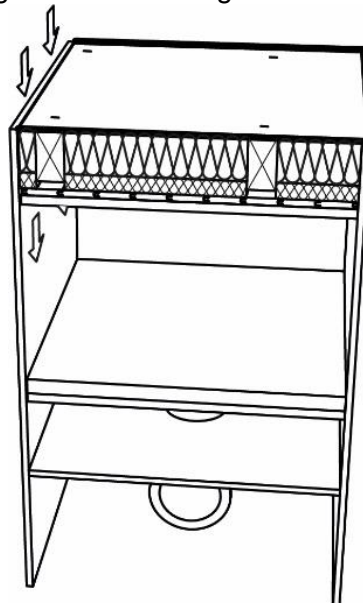
**Bild 4.30:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Dachunterspannbahn abgedeckt, die Unterspannbahn ist auf die Sparren getackert und liegt auf den Seiten des Prüfstands lose auf

Der Versuchsaufbau „Platte mit 5 cm umlaufenden Spalt“, ist in Bild 4.31 dargestellt und soll die Luftströmungen in den Flanken erhöhen. Nachgestellt wird die Situation, dass die Unterspannbahn zwar vorhanden ist aber der Anschluss untereinander nicht überlappend gelegt und luftdicht verklebt ist. Im Bereich des nachgestellten Wandanschlusses über der Leckage endet die Unterspannbahn auf dem Sparren, sodass die Fuge und die darunterliegende Leckage offen ist und durchströmt werden kann.



**Bild 4.31:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Abdeckung durch Platte mit 50 mm umlaufendem Spalt

In Bild 4.32 ist der Versuchsaufbau mit dreiseitig verklebter Unterspannbahn dargestellt. Auf der Seite über dem Streichsparren bildet sich ein 5 mm breiter Spalt. In diesem Aufbau wird von einer untereinander luftdicht verklebten Unterspannbahn ausgegangen. Die Unterspannbahn wird über den Sparren bis zu dem nachgestellten Wandanschluss geführt. Sie ist dort nicht luftdicht abgeschlossen (lose aufgelegt). Die Fuge und die Leckage können durchströmt werden.



**Bild 4.32:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Abdeckung durch Dachunterspannbahn, auf drei Seiten luftdicht verklebt, 5 mm Spalt auf der Seite über dem Streichsparren offen

Wie zuvor wird eine Eingangsmessung ohne zusätzlichen Schüttdämmstoff durchgeführt. Anschließend wird Dämmstoff eingebracht. Isofloc® L/LM wird mit einer Dichte von 45 kg/m³ und Supafil® mit einer Dichte von 35 kg/m³ eingeblasen. Der Leakagevolumenstrom wird ermittelt. Nachfolgend wird der Dämmstoff im Bereich des Streichsparrens nachverdichtet, Isofloc® L/LM auf 60 kg/m³ und Supafil® auf 55 kg/m³.

Eine Zusammenstellung der untersuchten Aufbauten mit Angaben zur Dichte des eingebrachten Dämmstoffs findet sich in Tabelle 4.13.

**Tabelle 4.13:** Darstellung der messtechnisch untersuchten Varianten zur Ermittlung von Leakagevolumenströmen typischer Leckagen und Bauteilaufbauten

Material des eingebrachten Dämmstoffs	Aufbau Nr.	Dichte des eingebrachten Dämmstoffs [kg/m³]
Isofloc® L/LM	1	-
	2	45
	3	45 / 60 (im Randbereich)
Supafil®	1	-
	2	35
	3	35 / 55 (im Randbereich)

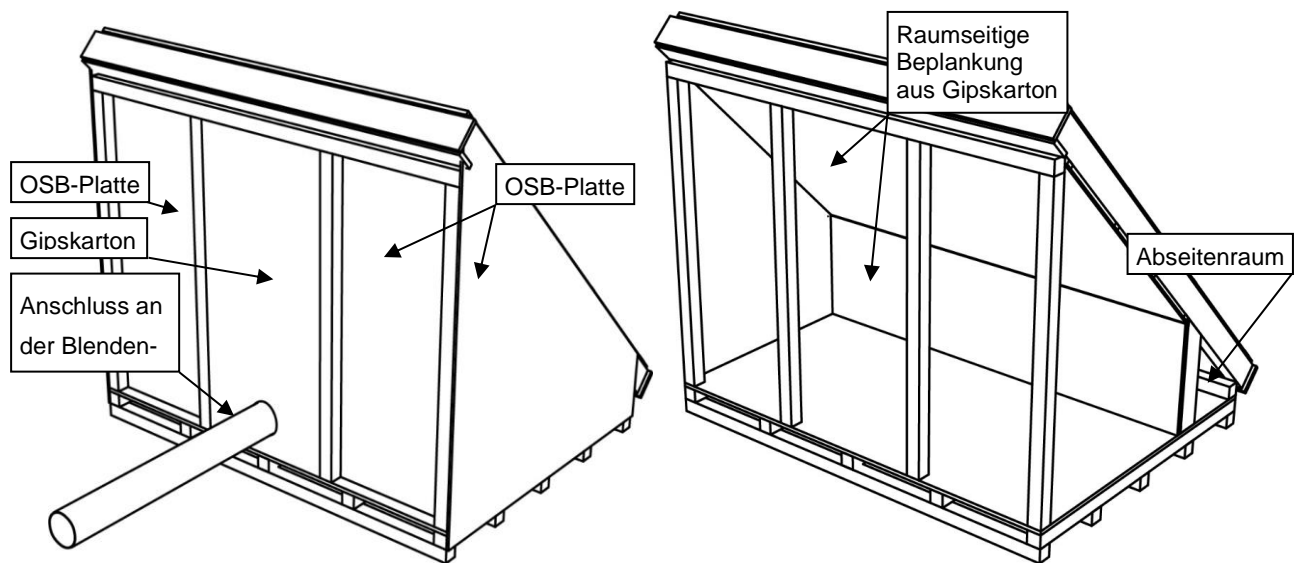
#### 4.10 Versuch am Großobjekt in situ

Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung von Leakagevolumenströmen an realen Konstruktionen. Die Volumenstrommessungen werden an zwei unterschiedlichen Dachaufbauten (mit und ohne Kniestock) durchgeführt. Der Prüfstand mit Kniestock weist eine Breite von 2,81 m, eine Höhe von 2,55 m und eine Tiefe von 2,30 m auf. Die Dachneigung beträgt 45° (Dachabmessungen von 3,10 m x 2,81 m). Beim Dachmodell mit Kniestock weist die Abseite eine Höhe von 75 cm auf. Das Volumen des Abseitenraums beträgt 0,71 m³.

Raumseitig ist eine 12,5 mm dicke Gipskartonplatte mit verspachtelten Fugen auf Lattung angebracht. In Sparrenlage befindet sich eine Mineralwolldämmung mit einer Dicke von 50 mm. Die seitliche und rückwärtige Beplankung besteht aus OSB-Platten mit einer Dicke von 18 mm. Der mittlere Teil der rückwärtigen Beplankung (mit der Rohrdurchführung zur Blendenmesstrecke) besteht aus einer 12,5 mm dicke Gipskartonplatte. Außenseitig wird auf eine diffusionsoffene Unterspannbahn eingebaut. Zwischen Unterspannbahn und Mineralwolle ergibt sich ein Hohlraum mit einer Dicke von 110 mm. Dieser sowie der Abseitenraum werden mit Schüttdämmstoff ausgeblasen. Der Schichtenaufbau des Regelquerschnitts des Dachmodells ist in Tabelle 4.14 zusammengestellt. Bild 4.33 zeigt eine perspektivische Darstellung des Dachaufbaus mit Kniestock.

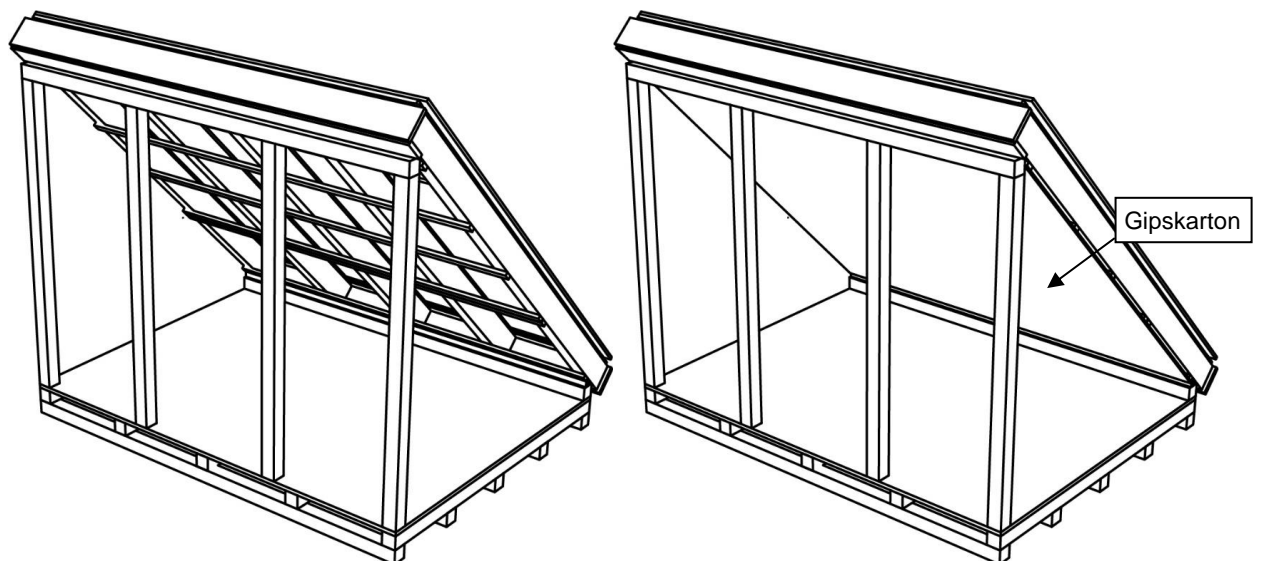
**Tabelle 4.14:** Schichtenaufbau im Regelquerschnitt des Dachmodells von innen nach außen

Nr.	Bezeichnung	Dicke in mm
1	Gipskartonplatte	12,5
2	Lattung	23
3	Mineralwolle	50
4	Hohlraum	110
5	Unterspannbahn	1
6	Lattung	23



**Bild 4.33:** Perspektivische Darstellung des Dachaufbaus mit Kniestock mit Anschluss an die Blendmessstrecke (links); mit Darstellung des Abseitenraums (rechts)

Der Aufbau des Dachmodells ohne Kniestock ist analog dem des Modells mit Kniestock und ist in Bild 4.34 dargestellt.

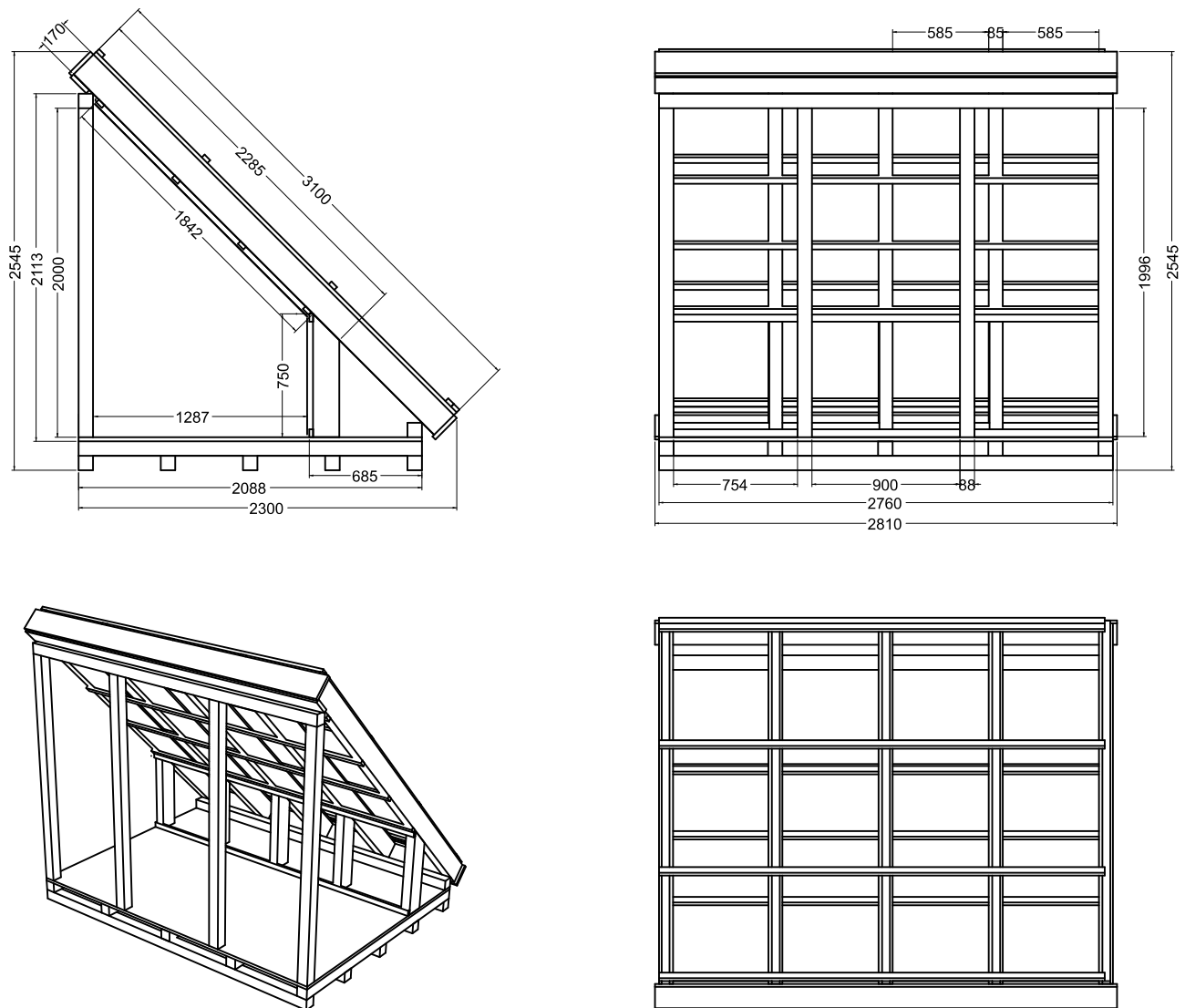


**Bild 4.34:** Dachaufbau ohne Kniestock ohne Beplankung (links), Darstellung mit bis zum Boden durchgezogenen Gipskartonplatten (rechts)

Die Abmessung der Dachmodelle mit und ohne Kniestock können Bild 4.35 entnommen werden.







**Bild 4.36:** Darstellung des Prüfstands; oben links: Seitliche Ansicht mit Abmessungen; oben rechts: Innenseitige Ansicht; unten links: Dreidimensionale Ansicht und unten rechts: Dachaufsicht

Zunächst wird eine Eingangsmessung durchgeführt. Hierfür ist die Unterspannbahn überlappend verlegt und mit Tackerklammern auf den Sparren gesichert. Im Ausgangszustand sind keine Schüttdämmstoffe verbaut.

Anschließend wird der Schüttdämmstoff zwischen die verlegte Mineralwolle und die Unterspannbahn injiziert. Der Dämmstoff Supafil® wird mit einer Dichte von  $35 \text{ kg/m}^3$  und der Dämmstoff Isofloc® L/LM mit  $45 \text{ kg/m}^3$  eingeblasen. Die Luftdichtheitsmessung wird wiederholt und der Leckagevolumenstrom bestimmt.

Der Einfluss der Nachverdichtung wird ebenfalls am Dachmodell untersucht. Daher wird der Schüttdämmstoff in den Anschlussbereichen Dach - Wand und Dach - Boden auf die im Vorfeld definierte Dichte,  $55 \text{ kg/m}^3$  bei Supafil® und  $60 \text{ kg/m}^3$  bei Isofloc® L/LM, nachverdichtet.

Abschließend erfolgt zur Qualitätssicherung die Bestimmung der Dichteverteilung. Hierfür wird die Unterspannbahn entfernt und geprüft, wie der Dämmstoff verteilt ist. Die Dichteverteilung innerhalb

des Dachs wird mittels eines Einstechmesszylinder bestimmt und die durchschnittliche Dichte im gesamten Dachaufbau durch Wägung ermittelt.

Eine Übersicht der durchgeführten Untersuchungen am Dachmodelle sowie der angewendeten Applikationstechniken ist in Tabelle 4.15 dargestellt.

**Tabelle 4.15:** Übersicht der Versuche am Dachmodell mit verschiedenen Applikationstechniken

Messreihe	Dachmodell		Applikationstechnik		Nachverdichtet	Dichte Dämmstoff [kg/m³]	
	mit Kniestock	ohne Kniestock	Lanze	Schlauch		Supafil®	Isofloc® L/LM
1	x	-	x	-	-	-	45
1	x	-	x	-	x	-	60
2	x	-	x	-	-	35	-
2	x	-	x	-	x	55	-
3	-	x	-	x	-	35	-
4	-	x	x	-	-	-	45
5	-	x	-	x	-	35	-
6	-	x	-	x	-	-	45

Neben dem Dachmodell werden auch Untersuchungen an einem Wandmodell durchgeführt. Die Vorgehensweise bei der Volumenstrombestimmung und der Qualitätssicherung am Wandmodell ist analog zum Dachmodell, mit dem Unterschied, dass beim Dachmodell keine Nachverdichtung des Dämmstoffs untersucht wird.

Der Prüfstand des Wandmodells weist eine Breite von 2,8 m und eine Höhe von 3,1 m auf. Die Wandabmessungen betragen 2,91 m x 2,81 m. Raumseitig weist der Prüfstand eine 12,5 mm dicke Gipskartonplatte mit verspachtelten Fugen auf Lattung auf. Die seitliche Beplankung besteht aus OSB-Platten mit einer Stärke von 18 mm. Der mittlere Teil der rückwärtigen Beplankung (mit der Rohrdurchführung zur Blendenmessstrecke) ist eine 12,5 mm dicke Gipskartonplatte. Den äußeren Abschluss bildet eine Pavatherm Holzfaserdämmplatte mit einer Putzschicht. Der Hohlraum von 170 mm zwischen der Gipskartonplatte und der Holzfaserdämmplatte wird zur Verbesserung der Luftdichtheit mit Schüttdämmstoff ausgeblasen.

Der Schichtenaufbau im Regelquerschnitts des Wandmodells (von innen nach außen) ist in Tabelle 4.16 zusammengestellt.

**Tabelle 4.16:** Schichtenaufbau im Regelquerschnitt des Wandmodells

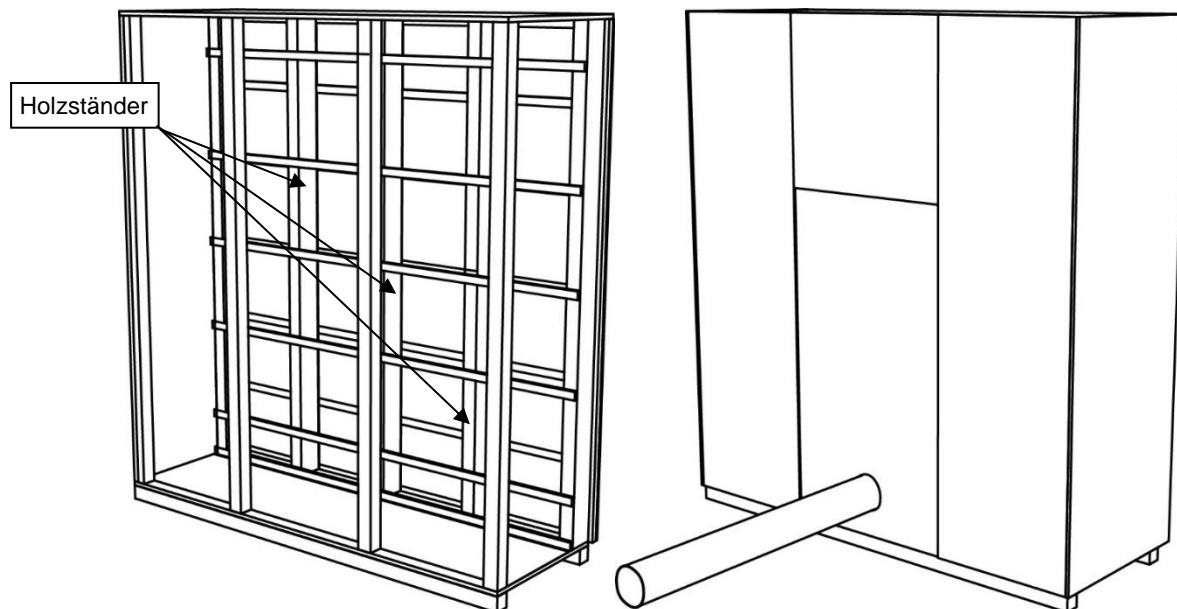
Nr.	Bezeichnung	Dicke [mm]
1	Gipskartonplatte	12,5
2	Lattung	23
3	Hohlraum	170
4	Pavatherm Holzfaserdämmplatte	40
5	Außenputz	2 - 5

Die Materialeigenschaften und technischen Daten der Pavatherm Holzfaserdämmplatte sind in Tabelle 4.17 aufgeführt.

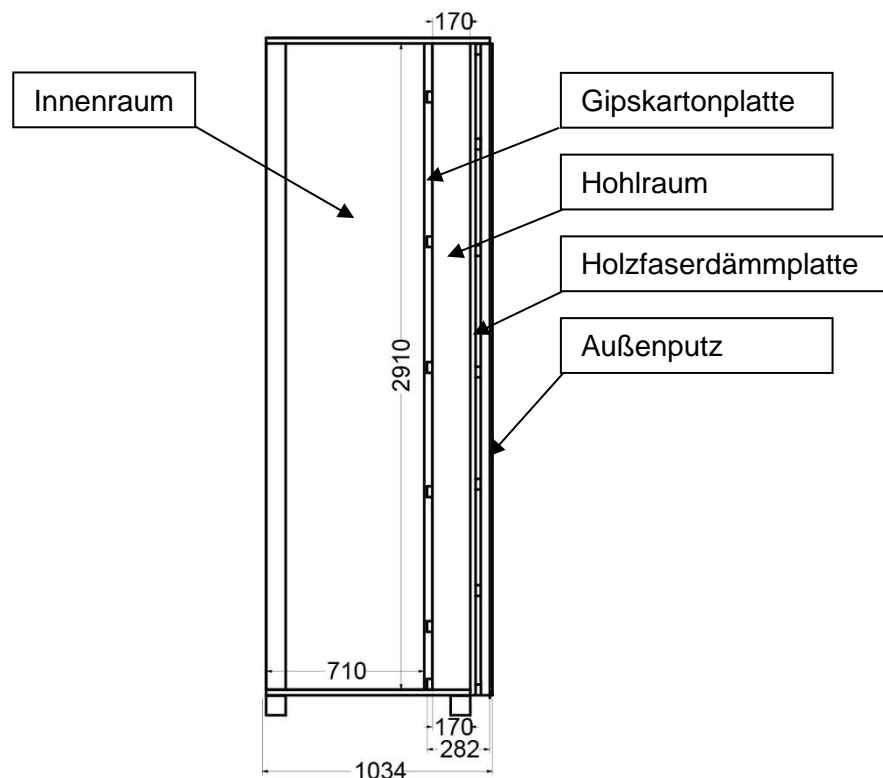
**Tabelle 4.17:** Technische Daten der Pavatex Holzfaserdämmplatte

Pavatex Holzfaserdämmplatte	Einheit	
Rohdichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	175
Wärmeleitfähigkeit (EN 13171) $\lambda_D$	[W/m·K]	0,043
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	[W/m·K]	0,045
spezifische Wärmekapazität $c$	[J/(kg·K)]	2100
Dampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$	[-]	5

Der Aufbau des Wandmodells mit und ohne Beplankung ist in Bild 4.37 dargestellt. Die Schichtaufbauten und Abmessungen können Bild 4.38 entnommen werden.



**Bild 4.37:** Perspektivische Darstellung des Wandmodells ohne raumseitige Gipskartonbekleidung und ohne Beplankung (links); mit Anschluss an die Blendemesstrecke (rechts)



**Bild 4.38:** Wandmodell in der Seitenansicht mit Bemaßung

Für die Volumenstrommessung wird der Dämmstoff Supafil® mit einer Dichte von  $35 \text{ kg/m}^3$  und der Dämmstoff Isofloc® L/LM mit einer Dichte von  $45 \text{ kg/m}^3$  eingeblasen. Tabelle 4.18 zeigt die untersuchten Dichten und die verwendeten Applikationstechniken am Wandmodell.

**Tabelle 4.18:** Übersicht der Versuche am Wandmodell mit verschiedenen Applikationstechniken

Messreihe	Applikationstechnik		Dichte Dämmstoff [ $\text{kg/m}^3$ ]		sprühbare Luftdichtheits-schichten
	Schlauch	Drehdüse	Supafil®	Isofloc® L/LM	
7	-	x	35	-	-
8	x	-	35	-	-
9	-	x	-	45	-
10	x	-	35	-	-
11	-	-	-	-	x

Zusätzlich werden am Wandmodell Untersuchungen mit sprühbaren Luftdichtheitsschichten durchgeführt. Ziel ist die Bestimmung ihres Einflusses auf den Leakagevolumenstrom. Außerdem wird die Kombination von sprühbaren Luftdichtheitsschichten mit Einblasdämmstoff untersucht. Hierfür wird das Produkt Aerosana Visconn der Firma pro clima verwendet.

Die sprühbare Luftdichtheitsschicht wird an den seitlichen Wandabschlüssen und am oberen und unteren Wandabschluss vierlagig mit dem Airless-Sprühgerät appliziert. In der Wandfläche kommt die sprühbare Luftdichtheitsschicht nicht zum Einsatz.

Anschließend wird der Schüttdämmstoff in den mit der sprühbaren Luftdichtheitsschicht vorbereiteten Wandaufbau eingeblasen und gemessen. Durch die Differenzbildung der Volumenströme aus den beschriebenen Messungen kann der Einfluss der Applikation einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht sowie der Einfluss der Applikation einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht und zusätzlich Einblasdämmstoff auf den Leakagevolumenstrom durch die Konstruktion quantifiziert werden.

Nach der Luftdichtheitsmessung wird zur Qualitätssicherung die Konstruktion geöffnet und geprüft.

Die Volumenstrombestimmung erfolgt nach dem Wirkdruckverfahren in einem Prüfstand mit regelbarer Zu- bzw. Abluft. Die Messung erfolgt nach DIN EN ISO 5167-1 [48]. Aus der gemessenen Druckdifferenz, den geometrischen Abmessungen und den Stoffwerten der Luft kann der Durchfluss bestimmt werden. Während der Messung muss der Massenfluss konstant sein. Vor und hinter der Messblende muss eine ausreichend lange und gerade Rohrstrecke vorhanden sein, damit die Luft möglichst gleichmäßig und drallfrei das Rohr nahe der Messblende durchströmt. Strömungsgleichrichter erleichtern diese Aufgabe und können den Drall der Strömung im Rohr wesentlich reduzieren, so dass kürzere Beruhigungsstrecken möglich sind. Im Versuchsstand sind zwei Strömungsgleichrichter des Typs VORTAB der Fa. Binder Engineering eingebaut. Zur Berechnung des Volumendurchflusses werden die Dichte und die Temperatur der Luft ermittelt.

Die Bereitstellung des benötigten Volumenstroms für diese Blendenmessstrecke erfolgt durch einen regelbaren Ventilator. Die Strömungsumkehrung für die Zu- und Abluftmessung wird durch Drehen des Ventilators bewerkstelligt.

Die gemessenen Volumenströme werden als Funktion der Druckdifferenz zwischen dem statischen Innen- und Außendruck des Versuchsstandes ermittelt. Im Rahmen dieser Untersuchung werden in Anlehnung an DIN EN 13829 [18] und DIN EN 12114 [47] Differenzdruck-Messreihen aufgenommen. Druckdifferenzen von 5 Pa bis 50 Pa, mit einer Schrittweite von 5 Pa, werden sowohl bei Über- als auch bei Unterdruck vorgegeben.

Die Druckdifferenzen an der Blende und am Dach- bzw. Wandmodell werden mit Differenzdrucksensoren der Firma Ashcroft gemessen. Sie besitzen eine Genauigkeit von 0,25 % vom Messbereichsendwert. Die Regelung des Volumenstroms und die Messwerterfassung erfolgt über einen PC mit Messerfassungskarte der Fa. National Instruments.

Die Messung erfolgt automatisiert mit Hilfe eines speziell erstellten Messprogramms auf Basis der Software LabVIEW der Fa. National Instruments. Jede Messung besteht aus einer Sequenz von Druckdifferenzen. Der Druck am Versuchsstand wird i.d.R. in Schritten von 5 Pa bis 50 Pa erhöht. Bei jeder Druckstufe wird die Druckdifferenz an der Blende über einen Zeitraum von mindestens 30 Sekunden gemessen und gemittelt sowie der geförderte Volumenstrom berechnet. Anschließend wird die Druckrichtung umgekehrt und eine entsprechende Messung durchgeführt (Über- und Unterdruckmessung). Aus diesen Daten können die Kennwerte  $n_{50}$  und  $q_{50}$  ermittelt werden.

#### **4.10.1 Bewertung unter Einfluss einer Freibewitterung**

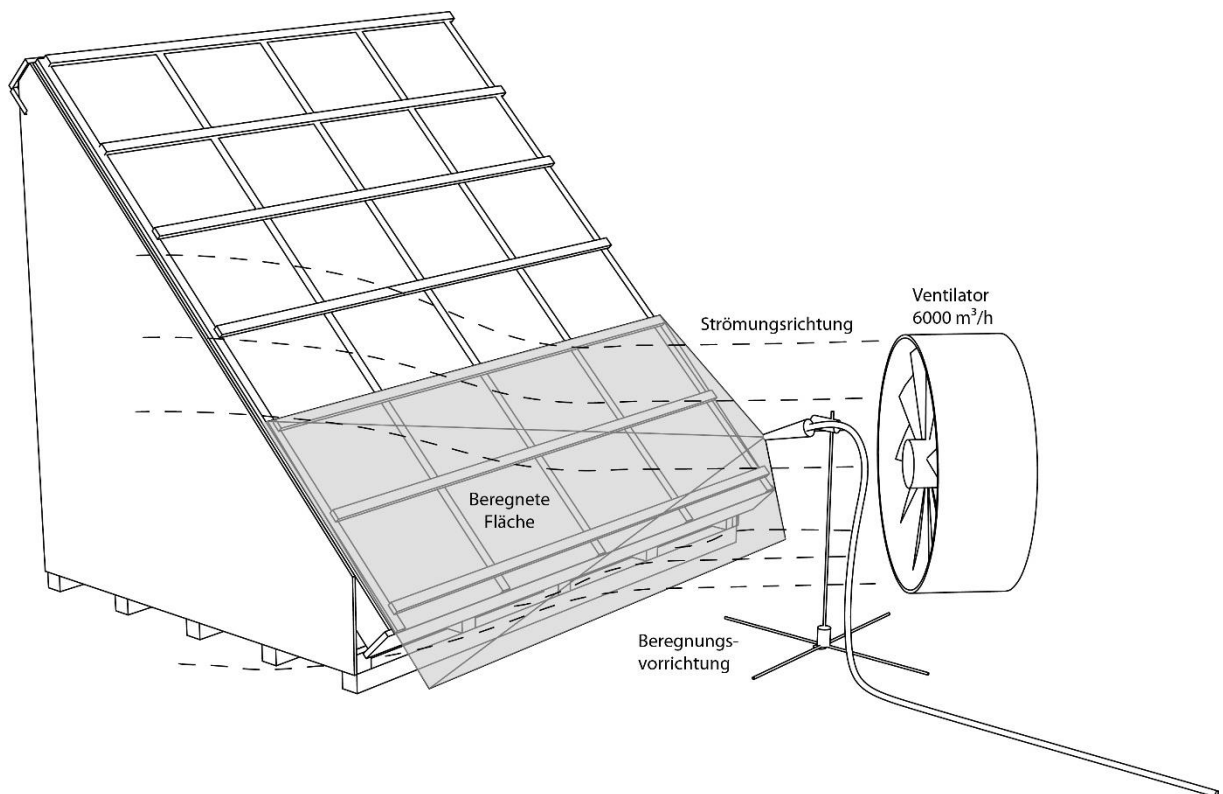
Unter Ansatz einer künstlichen Bewitterung durch Windanströmung und Feuchtebelastung durch Regen, soll das Setzungsverhalten und die Feuchteaufnahme der untersuchten Schüttdämmstoffe Supafil® und Isofloc® L/LM untersucht und an einem Dachversuchsstand bewertet werden. Mit Hilfe eines starken Ventilators und einer künstlichen Beregnung des Versuchstandes, wird die Freibewitterung beschleunigt nachgestellt.

In Tabelle 4.19 sind die geplanten Versuchskombinationen hinsichtlich der Konstruktion, der Art der Dämmstoffapplikation sowie die Dämmstoffart und die geplante Dichte des eingeblasenen Dämmstoffs aufgeführt.

**Tabelle 4.19:** Übersicht der Versuchsaufbauten bzgl. Konstruktion, Applikation des Dämmstoffs sowie Dämmstoffart und -dichte

Konstruktion	Applikationstechnik		Dichte Dämmstoff	
	Einblas- nadel	Schlauch	Supafil® 35 kg/m <sup>3</sup>	Isofloc® L/LM 45 kg/m <sup>3</sup>
Dachmodell ohne Kniestock				
x		x	x	
x	x			x
x		x		x

Zu Beginn wird eine Messung des Leckagevolumenstroms des Dachversuchsstandes ohne Einblasdämmstoff durchgeführt. Anschließend wird der untersuchte Dämmstoff mit der jeweiligen Applikationstechnik nach Tabelle 4.19 eingebracht und gemessen. Die Dachkonstruktion wird geöffnet, um die Dichte des eingeblasenen Dämmstoffs zu bestimmen und die Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchte im Dämmstoff und in der Umgebung gemessen. Nach Verschließung wird ein Luftvolumenstrom von ca. 6000 m<sup>3</sup>/h mithilfe eines Ventilators erzeugt. Der Ventilator wird seitlich so positioniert, dass ein gerichteter Luftstrom über das Dachmodell hinweg, aber auch unterhalb der Traufe über das dort angeordnete Lüftungsquerschnitt entlangströmt. Durch das Anströmen des Lüftungsprofils wird eine Druck- und Sogwirkung aus Windkraft auf den dahinterliegenden Schüttdämmstoff nachgestellt. Das Dachmodell wird nun für 24 Stunden angeströmt, in den letzten 6 Stunden der Anströmung erfolgt zusätzlich eine Beregnung des unteren Dachabschnitts. Über die Beregnungsvorrichtung wird ca. 10 l Wasser pro m<sup>2</sup> und Stunde auf das Dach aufgebracht. Die Beregnung des Daches und der Luftstrom des Ventilators sind so zueinander angeordnet, dass der gerichtete Luftvolumenstrom des Ventilators das Wasser zum Teil unter die Traufe gegen das Lüftungsprofil bläst, sodass der dahinter verbaute Dämmstoff vom Wasser benetzt wird. Die Freibewitterung mit Ventilator und Beregnung ist schematisch in Bild 4.39 dargestellt. Nach Beendigung der Beregnung wird die Dachkonstruktion erneut geöffnet und die relative Luftfeuchte sowie die Dichte des Dämmstoffs bestimmt. Abschließend erfolgt ein direktes Befeuchten des Dämmstoffs mit Wasser, um das Materialverhalten bei direktem Wasserkontakt zu beobachten.



**Bild 4.39:** Vereinfachte Darstellung der Freibewitterung mit zusätzlichem Einsatz eines Ventilators und einer Beregnungsvorrichtung

Der Leakagevolumenstrom wird nach dem im Vorfeld beschriebenen Wirkdruckverfahren ermittelt [48]. Die Messung der Lufttemperatur und der Luftfeuchte erfolgt mit einem mikroprozessor-gestützten Messwertgeber vom Typ HMP230 der Firma Vaisala. Die Feuchte kann im gesamten Bereich von 0 bis 100 % gemessen werden. Die Messung der Dichte des eingebrachten Dämmstoffes erfolgt mit Einstechzylinder (NW100 der Firma X-Floc).

#### 4.10.2 Bewertung unter realen klimatischen Bedingungen

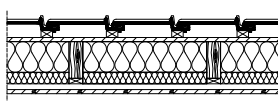
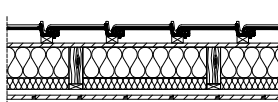
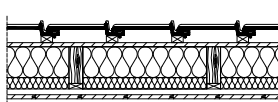
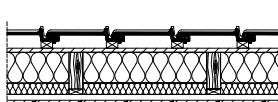
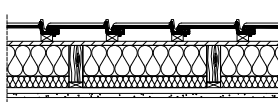
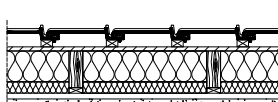
Die im Rahmen der Leakagestrommessung untersuchten Aufbauten am Regelquerschnitt, Kapitel 4.9, und am Großobjekt, Kapitel 4.10, werden zusätzlich anhand von hygrothermischen Simulationsrechnungen mit dem Programm Wufi [34] untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist die Überprüfung der betrachteten Konstruktionen hinsichtlich der Tauglichkeit unter realen klimatischen Bedingungen. Hierfür werden die Konstruktionen zunächst im unsanierten Zustand betrachtet, um die Notwendigkeit zusätzlicher baulicher Maßnahmen zu ermitteln. Ist diese gegeben, werden die Konstruktionen anschließend nach Applikation einer Dämmschicht aus Schüttdämmstoffen und/oder einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht untersucht, um deren Eignung nach erfolgter Sanierung zu überprüfen. Dabei werden die durch die Messung ermittelten Luftdurchlässigkeiten bei 50 Pa  $q_{50}$  bei den Simulationsrechnungen in Ansatz gebracht.

Für die Berechnungen werden die klimatischen Bedingungen und die Übergangsparameter aus Kapitel 4.7 angesetzt.

Ein Überblick über die untersuchten Aufbauten und die jeweiligen Materialeigenschaften ist in Tabelle 4.20 zusammengestellt. Außerdem sind dort auch die an den realen Prüfständen gemessenen  $q_{50}$ -Werte angegeben, die in Ansatz gebracht werden. Die am Regelquerschnitt und den

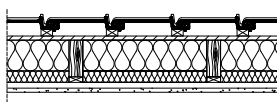
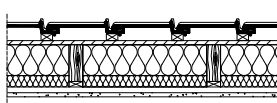
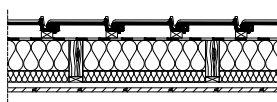
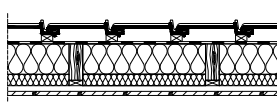
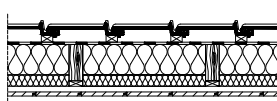
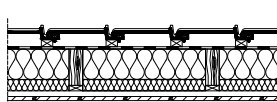
Großobjekten ermittelten  $q_{50}$ -Werte beziehen sich auf die gesamte Bauteilfläche und sind daher größer als die  $q_{50}$ -Werte der einzelnen Leckagen. Die hygrothermischen Simulationen werden daher mit kritischeren, auf der sicheren Seite liegenden,  $q_{50}$ -Werten durchgeführt.

**Tabelle 4.20:** Darstellung der untersuchten Bauteilaufbauten in Anlehnung an die Regelquerschnitte

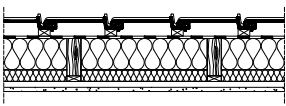
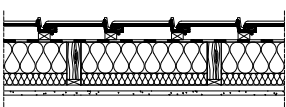
Untersuchte Konstruktionen in der Nachsimulation							
Nr.	Skizze	Aufbau	Konstruktionsaufbau				q <sub>50</sub> -Wert [h <sup>-1</sup> ]
			d [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/m·K]	μ [-]	
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitigem Profilholz							
1		Supafil® Mineralfaser Luftschicht Profilholz	160 50 25 18	- 60 1,3 455	0,035 0,04 0,155 0,09	- - - -	29,792
		Supafil® Mineralfaser Luftschicht Profilholz	160 50 25 18	- 60 1,3 455	0,035 0,04 0,155 0,09	- - - -	28,264
2		Isofloc® L/LM Mineralfaser Luftschicht Profilholz	160 50 25 18	- 60 1,3 455	0,039 0,04 0,155 0,09	- - - -	27,359
		Isofloc® L/LM Mineralfaser Luftschicht Profilholz	160 50 25 18	- 60 1,3 455	0,039 0,04 0,155 0,09	- - - -	26,951
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitiger Gipskartonplatte							
3		Supafil® Mineralfaser Luftschicht Gipskarton	160 50 25 12,5	- 60 1,3 850	0,035 0,04 0,155 0,2	- - - -	25,422
		Supafil® Mineralfaser Luftschicht Gipskarton	160 50 25 12,5	- 60 1,3 850	0,035 0,04 0,155 0,2	- - - -	22,115



**Fortsetzung Tabelle 4.20**

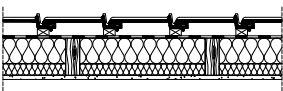
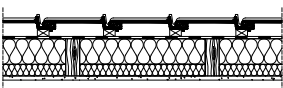
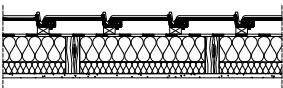
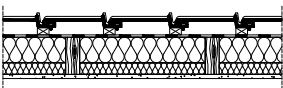
Untersuchte Konstruktionen in der Nachsimulation							
Nr.	Skizze	Aufbau	Konstruktionsaufbau				q <sub>50</sub> -Wert [h <sup>-1</sup> ]
			d [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/m·K]	μ [-]	
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitiger Gipskartonplatte							
4		Isofloc® L/LM Mineralfaser Luftschicht Gipskarton	160 50 25 12,5	- 60 1,3 850	0,039 0,04 0,155 0,2	- - - -	22,178
		Isofloc® L/LM Mineralfaser Luftschicht Gipskarton	160 50 25 12,5	- 60 1,3 850	0,039 0,04 0,155 0,2	- - - -	19,889
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitigem Profilholz (Unterspannbahn dreiseitig verklebt)							
5		Witterungsschutz Supafil® Mineralfaser Luftschicht Profilholz	- 160 50 25 18	- - 60 1,3 455	- 0,035 0,04 0,155 0,09	200 - - - -	7,516
		Witterungsschutz Supafil® Mineralfaser Luftschicht Profilholz	- 160 50 25 18	- - 60 1,3 455	- 0,035 0,04 0,155 0,09	200 - - - -	4,902
6		Witterungsschutz Isofloc® L/LM Mineralfaser Luftschicht Profilholz	- 160 50 25 18	- - 60 1,3 455	- 0,039 0,04 0,155 0,09	200 - - - -	6,926
		Witterungsschutz Isofloc® L/LM Mineralfaser Luftschicht Profilholz	- 160 50 25 18	- - 60 1,3 455	- 0,039 0,04 0,155 0,09	200 - - - -	4,759

**Fortsetzung Tabelle 4.20**

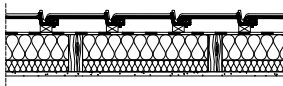
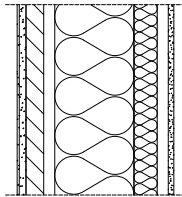
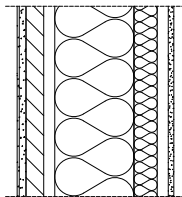
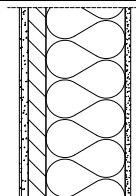
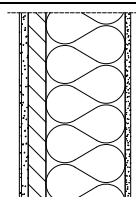
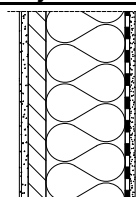
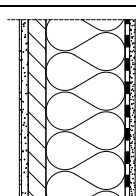
Untersuchte Konstruktionen in der Nachsimulation							
Nr.	Skizze	Aufbau	Konstruktionsaufbau				q <sub>50</sub> -Wert [h <sup>-1</sup> ]
			d [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/m·K]	μ [-]	
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitiger Gipskartonplatte (Unterspannbahn dreiseitig verklebt)							
7		Witterungsschutz	-	-	-	200	14,223
		Supafil®	160	-	0,035	-	
		Mineralfaser	50	60	0,04	-	
		Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		Gipskarton	12,5	850	0,2	-	
		Witterungsschutz	-	-	-	200	12,554
		Supafil®	160	-	0,035	-	
		Mineralfaser	50	60	0,04	-	
		Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		Gipskarton	12,5	850	0,2	-	

In Tabelle 4.21 sind die Aufbauten und Materialeigenschaften der untersuchten Konstruktionen in Anlehnung an das Dach- und Wandmodell sowie die dazugehörigen q<sub>50</sub>-Werte dargestellt.

**Tabelle 4.21:** Darstellung der untersuchten Bauteilaufbauten in Anlehnung an die Großobjekte

Untersuchte Konstruktionen in der Nachsimulation							
Nr.	Skizze	Aufbau	Konstruktionsaufbau				q <sub>50</sub> -Wert [h <sup>-1</sup> ]
			d [mm]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	λ [W/m·K]	μ [-]	
Dachaufbau Großobjekt							
8		Witterungsschutz Isofloc® L/LM Mineralfaser Gipskarton	- 110 50 12,5	- - 60 850	- 0,039 0,04 0,2	200 - - -	1,761
		Witterungsschutz Isofloc® L/LM Mineralfaser Gipskarton	- 110 50 12,5	- - 60 850	- 0,039 0,04 0,2	200 - - -	
9		Witterungsschutz Supafil® Mineralfaser Gipskarton	- 110 50 12,5	- - 60 850	- 0,035 0,04 0,2	200 - - -	3,062
		Witterungsschutz Supafil® Mineralfaser Gipskarton	- 110 50 12,5	- - 60 850	- 0,035 0,04 0,2	200 - - -	

**Fortsetzung Tabelle 4.21**

Untersuchte Konstruktionen in der Nachsimulation							
Nr.	Skizze	Aufbau	Konstruktionsaufbau				q <sub>50</sub> -Wert [h <sup>-1</sup> ]
			d [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/m·K]	μ [-]	
9		Witterungsschutz	-	-	-	200	1,711
		Supafil®	110	-	0,035	-	
		Mineralfaser	50	60	0,04	-	
		Gipskarton	12,5	850	0,2	-	
Wandaufbau Großobjekt mit Hinterlüftung							
10		Außenputz	20	1219	0,25	-	3,207
		MDF-Platte	40	140	0,039	-	
		Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		Supafil®	170	-	0,035	-	
		Mineralfaser	50	60	0,04	-	
		Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
11		Außenputz	20	1219	0,25	-	2,758
		MDF-Platte	40	140	0,039	-	
		Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		Isofloc® L/LM	170	-	0,039	-	
		Mineralfaser	50	60	0,04	-	
		Luftschicht	25	1,3	0,155	-	
		Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Wandaufbau Großobjekt ohne Hinterlüftung							
12		Außenputz	20	1219	0,25	-	2,626
		MDF-Platte	80	140	0,039	-	
		Supafil®	170	-	0,035	-	
		Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
13		Außenputz	20	1219	0,25	-	2,484
		MDF-Platte	80	140	0,039	-	
		Isofloc® L/LM	170	-	0,039	-	
		Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
Wandaufbau Großobjekt mit Dampfsperre							
14		Außenputz	20	1219	0,25	-	2,356
		MDF-Platte	80	140	0,039	-	
		Supafil®	170	-	0,035	-	
		Dampfsperre	-	-	-	3300	
		Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	
15		Außenputz	20	1219	0,25	-	2,199
		MDF-Platte	80	140	0,039	-	
		Isofloc® L/LM	170	-	0,039	-	
		Dampfsperre	-	-	-	3300	
		Gipskartonplatte	12,5	850	0,2	-	

#### 4.11 Spaltmessungen

Die aus der Luftdichtheitsmessung ermittelten Leckagekoeffizienten  $C_L$  und Strömungsexponenten  $n$ , können Aufschluss über die vorhandenen Leckagen in der Gebäudehülle geben.

Der Fokus liegt hierbei auf dem Strömungsexponenten  $n$ , der Aussagen dahingehend erlaubt, ob turbulente bzw. laminare Strömungsverhältnisse vorliegen. Turbulente Strömungen deuten tendenziell auf große Leckagen hin, z.B. nicht abgeklebte Durchdringungen oder größere Fehlstellen bei der Verklebung der Luftdichtheitsschicht. Laminare Strömungen weisen hingegen auf kleine Leckagen, beispielsweise eine Perforation der Luftdichtheitsschicht, hin.

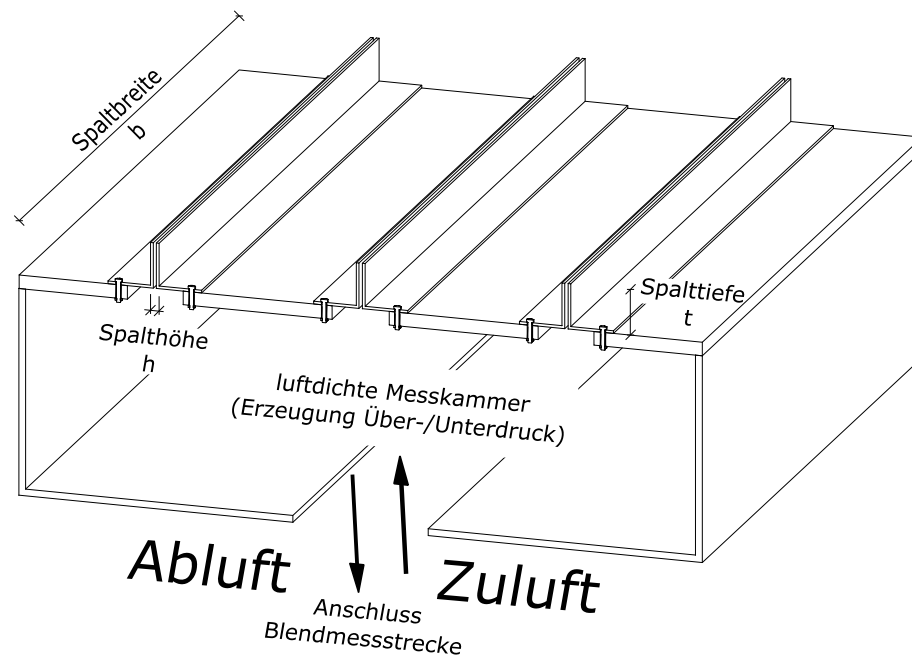
Die Beziehung zwischen Leckagegeometrie und Leckagekoeffizient  $C_L$  sowie Strömungsexponent  $n$  soll daher in einem Laborprüfstand untersucht werden. Hierfür werden Reihenmessungen bei verschiedenen Spaltgeometrien durchgeführt und die Volumenströme werden bei unterschiedlichen Druckdifferenzen gemessen. Aus den Messungen lassen sich weiterhin der Leckagekoeffizient  $C_L$  und der Strömungsexponent  $n$  ermitteln.

Auf eine, aus Holzwerkstoff bestehende, luftdichte Messkammer wird eine 18 mm starke Multiplexplatte aufgebracht, worauf jeweils sechs Winkelbleche montiert werden. Die hierdurch entstehenden Spalte werden in Hinblick auf die Höhe  $h$ , die Tiefe  $t$  und die Ausführungen der Spalte variiert, um den Einfluss auf den sich einstellenden Leckagestrom und die Strömungsparameter zu bestimmen. Es werden insgesamt drei verschiedene Spaltenausführungen offen, offen mit Mineralwolle gedämmt sowie geschlossen untersucht. Im ersten Teil der Untersuchung soll der Einfluss der Spalthöhe und -tiefe ermittelt werden. Hierzu werden Spalttiefen von 10 mm und 50 mm ausgeführt und die Spalthöhe  $h$  in 1-mm-Schritten (von 1 mm auf 25 mm) erhöht. Die Spaltenbreite  $b$  beträgt immer 1000 mm.

Anschließend werden Kombinationen unterschiedlicher Spaltenausführungen bei einer Spalthöhe von 5mm und einer Spalttiefe von 50 mm untersucht. Die Reihenfolge der Anordnung der unterschiedlichen Spaltenausführungen hat dabei keinen Einfluss auf das Messergebnis. Es werden Messungen mit Dämmstoff raumseitig in der Messkammer und außenseitig, um den Spalt herum, durchführt. Außerdem wird bei manchen Versuchsanordnungen eine drei- oder fünflagige sprühbare Luftdichtheitsschicht auf den Spalt bzw. auf die Mineralwolle im Spalt aufgebracht.

Der luftdichten Messkammer wird über einen regelbaren Ventilator Luft zugeführt bzw. entzogen (Unter- / Überdruck-Messung). Die Volumenstrombestimmung erfolgt gemäß Kapitel 4.10 durch eine Blendenmessstrecke.

Der prinzipielle Versuchsaufbau für die Spaltmessungen kann Bild 4.40 entnommen werden.



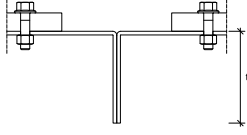
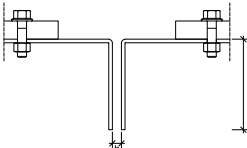
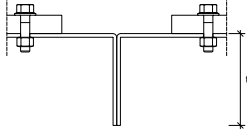
**Bild 4.40:** Prinzipskizze Versuchsaufbau Spaltmessungen

Um Undichtheiten des Messaufbaus zu bestimmen und bei der Ermittlung der Volumenströme zu berücksichtigen, wird bei verschlossenem Spalt der Leakage-Offset sowohl bei Unter- als auch bei Überdruck ermittelt. Dieser wird von den anschließend gemessenen Volumenströmen bei Unter- und Überdruck abgezogen, um den tatsächlich durch die Öffnung strömenden Luftstrom zu erhalten. Für die Messung niedriger Volumenströme wird bei der Volumenstrombestimmung am Regelquerschnitt statt der Messblende ein Laminar-Flow-Element eingesetzt.

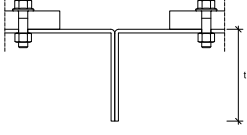
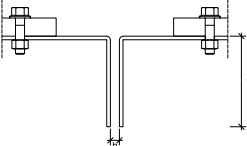
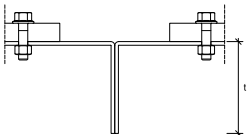
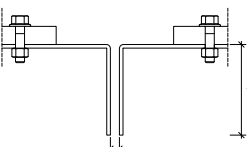
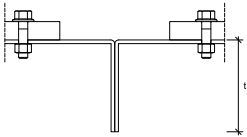
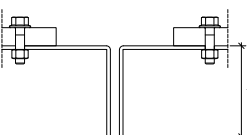
Die Datenerfassung erfolgt auch hier über einen PC mit Messkarte und einem speziellen Messprogramm.

Zusätzlich werden zwei weitere Messungen durchgeführt, in der die Spalttiefe  $t$  und die Spalthöhe  $h$  variieren. Der Versuchsaufbau und die untersuchten Varianten  $r$  sind in Tabelle 4.22 dargestellt.

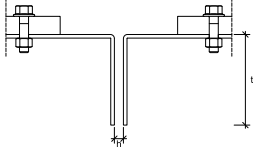
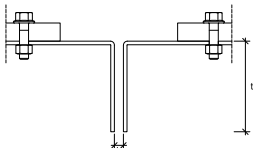
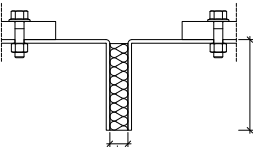
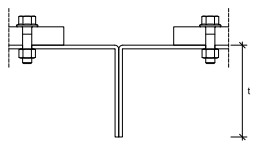
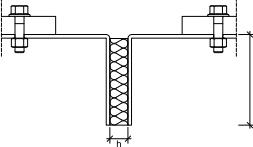
**Tabelle 4.22:** Darstellung der untersuchten Versuchsanordnungen

Tabelle 122: Beschreibung der untersuchten Versuchsanordnungen					
Nr.	Versuchsanordnung	Beschreibung			
		Systembeschreibung	Spalttiefe t	Spalthöhe h	
			[mm]	[mm]	
1	<div>Spalt 1: geschlossen</div>  <div>Spalt 2: offen</div>  <div>Spalt 3: geschlossen</div> 	<b>Aufbau 1</b>	10	1	
		1. geschlossener Spalt		2	
		2. offener Spalt		3	
		3. geschlossener Spalt		4	
				5	
				6	
				7	
				8	
				9	
				10	
				11	
				12	
				13	
				14	
				15	
				16	
				17	
				18	
				19	
				20	
				21	
				22	
				23	
				24	
				25	
		<b>Aufbau 2</b>		50	1
		1. offener Spalt	2		
		2. geschlossener Spalt	3		
		3. offener Spalt	4		
			5		
			6		
			7		
			8		
			9		
			10		
			11		
			12		
			13		
			14		
			15		
			16		
			17		
			18		
			19		
			20		
			21		
			22		
			23		
			24		
			25		

**Fortsetzung Tabelle 4.22**

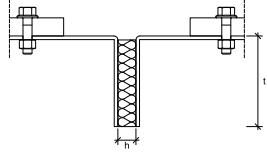
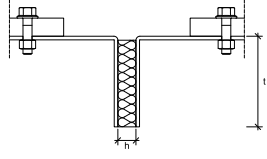
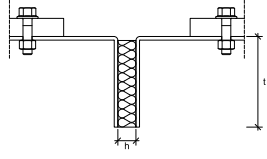
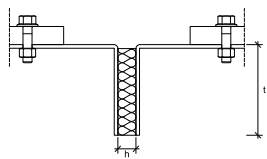
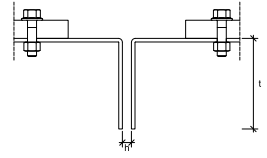
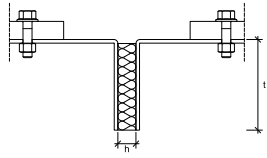
Nr.	Versuchsanordnung	Beschreibung		
		Systembeschreibung	Spalttiefe t	Spalthöhe h
			[mm]	[mm]
2	<p>Spalt 1: geschlossen</p>  <p>Spalt 2: offen</p>  <p>Spalt 3: geschlossen</p> 	<b>Aufbau 1</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt offen, 3 x besprüht 3. Spalt geschlossen	50	5
		<b>Aufbau 2</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt offen, 5 x besprüht 3. Spalt geschlossen	50	5
		<b>Aufbau 3</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt offen, 3 x besprüht + MW außenseitig 3. Spalt geschlossen	50	5
		<b>Aufbau 4</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt offen, 3 x besprüht 3. Spalt geschlossen	50	5
		<b>Aufbau 5</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt offen, 5 x besprüht 3. Spalt geschlossen	50	5
		<b>Aufbau 6</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt offen, 3 x besprüht + MW außenseitig 3. Spalt geschlossen	50	5
3	<p>Spalt 1: offen</p>  <p>Spalt 2: geschlossen</p>  <p>Spalt 3: offen</p> 	<b>Aufbau 1</b>		
		1. Spalt offen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen	50	5
		<b>Aufbau 2</b>		
		1. Spalt offen, MW raumseitig 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen; MW raumseitig	50	5

**Fortsetzung Tabelle 4.22**

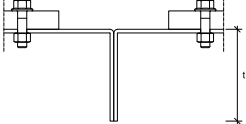
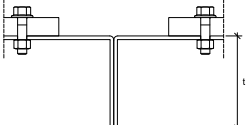
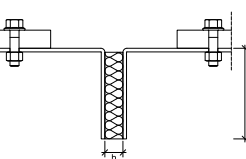
Nr.	Versuchsanordnung	Beschreibung		
		Systembeschreibung	Spalttiefe t	Spalthöhe h
			[mm]	[mm]
4	Spalt 1: offen	<b>Aufbau 1</b>		
		1. Spalt offen 2. Spalt offen 3. Spalt offen	50	5
	Spalt 2: offen	<b>Aufbau 2</b>		
		1. Spalt offen, MW raumseitig 2. Spalt offen, MW raumseitig 3. Spalt offen, MW raumseitig	50	5
5	Spalt 1: offen und gedämmt	<b>Aufbau 1</b>		
		1. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig	50	5
	Spalt 2: geschlossen	<b>Aufbau 2</b>		
		1. Spalt offen und gedämmt 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt	50	5
	Spalt 3: offen und gedämmt			
				



**Fortsetzung Tabelle 4.22**

Nr.	Versuchsanordnung	Beschreibung		
		Systembeschreibung	Spalttiefe t	Spalthöhe h
			[mm]	[mm]
6	<p>Spalt 1: offen und gedämmt</p>  <p>Spalt 2: offen und gedämmt</p>  <p>Spalt 3: offen und gedämmt</p> 	<b>Aufbau 1</b>		
		1. Spalt offen und gedämmt 2. Spalt offen und gedämmt 3. Spalt offen und gedämmt	50	5
		<b>Aufbau 2</b>		
		1. Spalt offen und gedämmt 2. Spalt offen und gedämmt 3. Spalt offen und gedämmt	50	5
7	<p>Spalt 1: offen und gedämmt</p>  <p>Spalt 2: offen</p>  <p>Spalt 3: offen und gedämmt</p> 	<b>Aufbau 1</b>		
		1. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig 2. Spalt offen 3. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig	50	50

**Fortsetzung Tabelle 4.22**

Nr.	Versuchsanordnung	Beschreibung		
		Systembeschreibung	Spalttiefe t [mm]	Spalthöhe h [mm]
8	<p>Spalt 1: geschlossen</p>  <p>Spalt 2: geschlossen</p>  <p>Spalt 3: offen und gedämmt</p> 	<b>Aufbau 1</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, 3 x besprüht	50	5
		<b>Aufbau 2</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, 5 x besprüht	50	5
		<b>Aufbau 3</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, 3 x besprüht + MW außenseitig	50	5
		<b>Aufbau 4</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt	50	5
		<b>Aufbau 5</b>		
		1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, MW außenseitig	50	5

## 5. Untersuchungsmethode

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird die baupraktische Anwendbarkeit von Schüttdämmstoffen und sprühbare Luftdichtheitsschichten anhand von Versuchen untersucht. Die Schüttdämmstoffe sowie die sprühbaren Luftdichtheitsschichten werden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Handhabung in der praktischen Anwendung sowie in Bezug auf ihre Verarbeitbarkeit und wärme- sowie feuchteschutztechnischen Eigenschaften beurteilt. Auch die Applikationstechniken für die Einbringung von Schüttdämmstoffen und das Auftragen von sprühbaren Luftdichtheitsschichten wird untersucht.

Um die Eignung der untersuchten Produkte zur energetischen Ertüchtigung von Gebäuden zu beurteilen wird der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  der Schüttdämmstoffe für unterschiedliche Einbaudichten nach DIN 9053 [13] und die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  der sprühbaren Luftdichtheitsschicht für verschiedene Schichtdicken nach DIN 12572 [12] bestimmt.

Zusätzlich werden typische sanierungsbedürftige Altbaukonstruktionen, die sich für eine Sanierung mittels Schüttdämmstoffen und/oder sprühbaren Luftdichtheitsschichten eignen mithilfe von hygrothermischen Simulationsrechnungen untersucht. Ziel ist die Ableitung von Konstruktionsprinzipien, die Aufschluss über die Notwendigkeit der Ertüchtigung der Luftdichtheitsebene geben oder notwendige bauliche Maßnahmen angeben, bei denen der Einsatz von Schüttdämmstoffen bei der energetischen Ertüchtigung möglich ist.

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Erprobung von Schüttdämmstoffen

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Schüttdämmstoffe Supafil® aus Glaswolle und Isofloc® L/LM aus Zellulosefasern an einem Regelprüfstand sowie an einem realen Dach- und Wandmodell erprobt. Die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Arbeitssicherheit, Brandschutz und Wirksamkeit basieren auf den Erfahrungen bei der baupraktischen Anwendung und auf Herstellerangaben.

Supafil® ist ein Glaswolleprodukt, ohne Zusatz von Bindemitteln oder Flammschutz, welches keine gesundheitsbedenklichen Giftstoffe enthält [49]. Zur Freisetzung von VOC-Verbindungen (flüchtige organische Verbindungen) bei der Verarbeitung werden vom Hersteller keine Angaben gemacht. Da VOC-Verbindungen z. B. entstehen, wenn Lösemittel oder Flüssigbrennstoffe verdunsten oder flüssige Produkte trocknen und Supafil® keinerlei Zusatzstoffe enthält, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass keine Gefahr durch VOC-Freisetzung bei der Verarbeitung besteht.

Isofloc® L/LM besteht aus zerfasertem Zeitungspapier und Boraten, die aus Gründen des Schimmel- und Brandschutzes zugegeben werden. Borate sind Salze, die eine ausreichende Löslichkeit aufweisen. Vom Körper aufgenommene Borate werden innerhalb kurzer Zeit wieder ausgeschieden und sammeln sich nicht im Körper an. Eine Aufnahme über die Haut ist nicht möglich. Gesundheitliche Schäden durch Borate wurden bisher nicht nachgewiesen [50]. Nach [51] können keine VOC-Verbindungen bei der Verwendung von Isofloc® L/LM nachgewiesen werden. Die Verarbeitung von Isofloc® L/LM ist daher gesundheitlich unbedenklich.

Ein relevantes Kriterium bei der Beurteilung der Arbeitssicherheit von Einblasdämmstoffen ist die Freisetzung von Staub oder Fasern bei der Verarbeitung. Beim Einbringen der Schüttdämmstoffe hat sich gezeigt, dass die Staubentwicklung bei Isofloc® L/LM wesentlich höher ist als bei Supafil®. Beim Einfüllen des Dämmstoffs und durch das Auflockern im Einblasgerät lösen sich Fasern bzw. Staub in die Umgebungsluft. Diese sind bei Supafil® jedoch deutlich geringere als bei Isofloc® L/LM. Das Tragen einer Staubmaske ist daher bei der Verarbeitung von Isofloc® L/LM absolut notwendig. Da bei der Verwendung von Supafil® ohne Staubmaske bei den Verarbeitern teilweise ein unangenehmes Gefühl in den Atemwegen eingestellt hat, ist auch bei Supafil® das Tragen einer partikelfiltrierenden Halbmaske zu empfehlen. Im Allgemeinen sollten bei der Verarbeitung beider Dämmstoffe locker sitzende, geschlossene Arbeitskleidung sowie geeignete Handschuhe getragen werden. Bei Arbeiten überkopf ist außerdem eine Schutzbrille sinnvoll.

Isofloc® L/LM zählt aufgrund des hohen organischen Anteils zu den brennbaren Baustoffen. Es ist normalentflammbar und das Brandverhalten wird der Klasse E nach DIN 13501-1 [52] zugeordnet. Der Zellulosedämmstoff kann somit - wie Massivholz und andere Holzwerkstoffe - nach den Landesbauordnungen in den meisten Gebäuden eingesetzt werden, mit Ausnahmen von Gebäude mit der Forderung „unbrennbare Dämmstoffe“ wie z.B. höheren Gebäuden, Gebäuden besonderer Nutzung und im Industriebau. Durch die Verkohlung und die Borsalzimprägnierung kommt es bei Beflammung von Isofloc® L/LM auf der Oberfläche zu Kohlebildung, wie vom Holzbrand bekannt [53]. Supafil® ist ein mineralischer Dämmstoff und wird daher der Baustoffklasse A1 (nicht brennbar) zugewiesen.

Zur Applikation der Dämmstoffe in die Konstruktion sind vier Applikationstechniken möglich: Die Applikation mit Schlauch, Drehdüse, Einblasnadel oder offenes Aufblasen. Für Isofloc® L/LM besteht zusätzlich die Möglichkeit den Dämmstoff mittels CSO-Verfahren aufzubringen. In Rahmen

dieser Untersuchung kamen die Applikation mit Schlauch, Drehdüse und Einblasnadel zur Anwendung. Allgemein hat sich gezeigt, dass der Dämmstoff Supafil® mehr zum Verschluss des Förder-schlauches bei Querschnittsverjüngungen im Schlauch durch Verwendung einer Drehdüse oder Einblasnadel neigt.

Für Isofloc® L/LM ergibt sich bei sachgemäßer Lagerung keine Beschränkungen der Lagerfähigkeit. Supafil® ist wegen seiner mineralischen Beschaffenheit resistent gegen Schimmelbefall und verrottet oder zersetzt sich nicht. Daher gibt es auch für Supafil® keine Begrenzung der Haltbarkeit.

Die Beurteilung der Verarbeitbarkeit der Dämmstoffe erfolgt auf Grundlage subjektiver Erfahrung bei der Durchführung der Versuche.

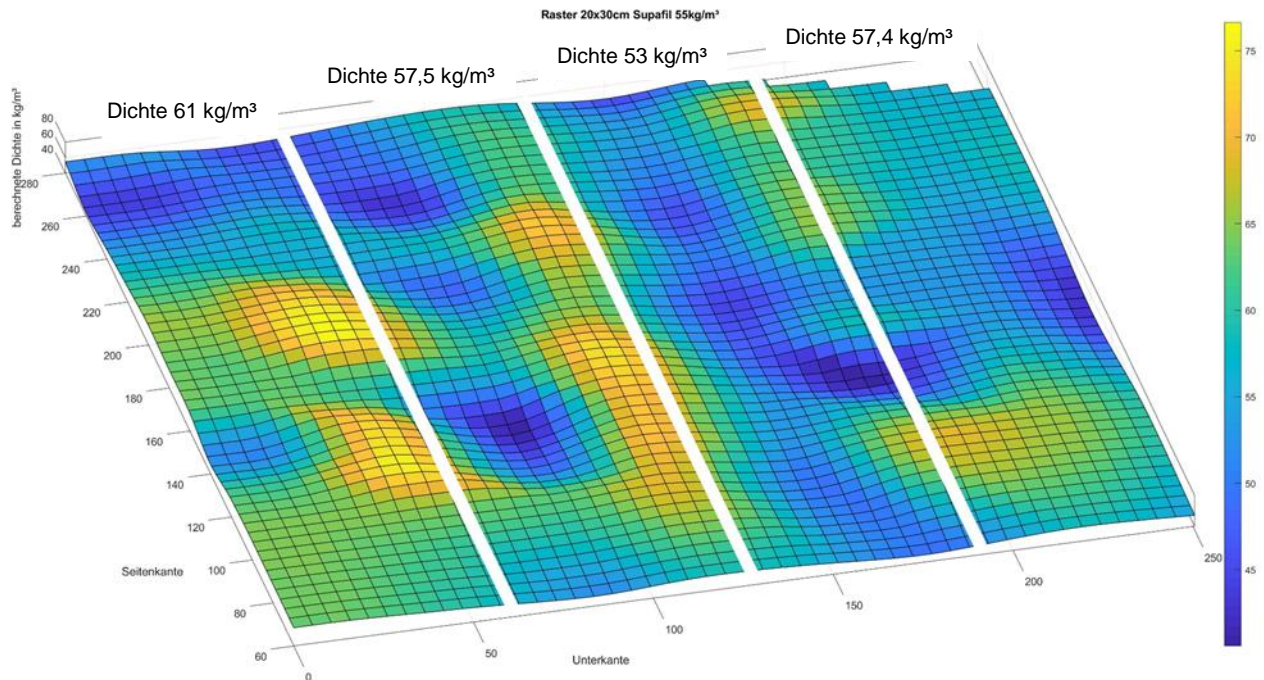
Supafil® wird in 16,6 kg schweren Säcken geliefert. Der enthaltene Dämmstoff ist, anders als bei Isofloc® L/LM, hoch komprimiert, was zur Folge hat, dass Supafil® sich beim vollständigen Öffnen der Verpackung ausdehnt und unkontrolliert im Arbeitsbereich verteilt. Aus diesem Grund wurden die Dämmstoffsäcke von Supafil® quer in drei Teile geschnitten, die einzelnen Teile über das Einblasgerät gelegt und dort mithilfe eines Cutters längs aufgeschnitten.

Die Säcke von Isofloc® L/LM wiegen 12,5 kg. Der Dämmstoff ist darin unkomprimiert enthalten, daher lässt sich das Einblasgerät einfach befüllen. Der ganze Sack wurde über den Zellofanten gelegt und mit einem Cutter aufgeschnitten. Der Dämmstoff fällt in das Fördergerät und kann nach dem Auflockern eingeblasen werden. Sowohl bei Supafil® als auch bei Isofloc® L/LM sind die Dämmstoffsäcke von einer Person gut transportierbar. Für das Einblasen der Schüttdämmstoffe ist allerdings eine zweite Person von Vorteil. Dabei hat sich bewährt, dass eine Person den Einblasvorgang in die Konstruktion steuert und eine andere Person für eine kontinuierliche Befüllung des Einblasgeräts sorgt. Dies ist für die Gleichmäßigkeit der Dichteverteilung in der Konstruktion von besonderer Bedeutung. Es hat sich gezeigt, dass sich durch Unterbrechungen im Einblasvorgang Fehlstellen mit geringerer Dichte in der Konstruktion ergeben, wenn im Förderschlauch kurzfristig kein Dämmstoff vorhanden ist. Diese Fehlstellen sind auf der Baustelle nachträglich kaum zu erkennen bzw. zu überprüfen.

Für die Luftdichtheit von Dach- und Wandkonstruktionen ist es besonders von Bedeutung, dass die Dichteverteilung im Bauteil homogen ist, die eingebaute Dichte wenig von der eingestellten Dichte abweicht und eine Nachverdichtung des Dämmstoffs möglich ist.

Als Beispiel für die Dichteverteilung im Dachmodell wird die sich einstellende Dichte des Dämmstoffs Supafil® betrachtet, siehe Bild 6.1. Der Dämmstoff wurde nun rasterweise (20 x 30 cm) aus dem Dachmodell herausgenommen und gewogen. Mit dem bekannten Volumen konnte dann die Dichte für die einzelnen Bereiche bestimmt werden. Die Dichten für alle Bereiche des Rasters wurden anschließend zu einer 3D - Dichteverteilung über das gesamte Dachmodell interpoliert. Außerdem sind die durchschnittlichen Dichten der einzelnen Dachfelder dargestellt. Der Dämmstoff wurde mit einer Schüttdichte von 55 kg/m<sup>3</sup> eingeblasen. Es ist erkennbar, dass die Dichte des Dämmstoffs nicht homogen über den gesamten Dachaufbau verteilt ist. In den Randbereichen der einzelnen Dachfelder, in der Nähe der Sparren, weist das Dachmodell eine hohe Schüttdichte von bis zu 75 kg/m<sup>3</sup> auf. Dies kann daran liegen, dass sich die Einblasöffnungen an diesen Stellen befinden und es daher zu erhöhten Dichten in diesen Bereichen kommt und dass sich durch Richtungsänderungen beim Einblasen aufgrund der Sparren erhöhte Dichten einstellen. Im Allgemeinen ist eine Tendenz zu erkennen, dass die Schüttdichte des Dämmstoffs in den oberen Bereichen der Dachfelder geringer als die durchschnittliche Dichte ist. Dies kann darin begründet sein, dass die Einblasöffnungen im oberen Drittel der Konstruktion angeordnet wurden und für die

Bereiche oberhalb der Schlauch bzw. die Drehdüse gedreht werden muss. Der verbleibende Restquerschnitt ist sehr eng und es kommt daher oft zu Verschluss des Förderschlauches, wodurch sich für die oberen Bereiche der Dachfelder teilweise geringere Dichten ergeben.



**Bild 6.1:** Verteilung der Dichte am untersuchten Dachmodell

Grundsätzlich gilt, dass die Gleichmäßigkeit der Dichteverteilung stark von Anzahl und Verteilung der Einblasöffnungen sowie der Erfahrung des Verarbeiters abhängig ist. Sie ist unabhängig vom eingebrachten Dämmstoff.

Die Dichte von Supafil® liegt laut Herstellerangaben [37] bei 30 - 40 kg/m³, die von Isofloc® L/LM bei 30 - 60 kg/m³ je nach Einbauart [36]. In den durchgeführten Untersuchungen betrug die gewählte Dichte für Supafil® 35 kg/m³ und für Isofloc® L/LM 45 kg/m³. Im Zuge der Nachverdichtung konnte Supafil® auf 55 kg/m³ und Isofloc® L/LM auf 60 kg/m³ verdichtet werden. Diese Dichten ergeben sich aus den Grenzen der Applikationstechniken, da sich bei höheren Dichten Verstopfungen im Schlauch einstellen. Das Verdichtungspotenzial der Dämmstoffe im Rahmen der Herstellerangaben ergab sich für Supafil® zu 20 kg/m³ und für Isofloc® L/LM zu 15 kg/m³.

Die Einbaudichten am Dachmodell wurden mittels Einstechzylinder überprüft. Neben dem Einstechzylinder ist für die Verwendung der Schüttdämmstoffe ein Absauggerät sowie ein Prüfkorb als Zusatzgerät notwendig. Der gewählte Prüfkorb mit Hängewaage besitzt ein Volumen von 0,1 m³ und wurde verwendet, um den für die gewünschte Dichte am Einblasgerät einzustellenden Luft- und Massestrom zu ermitteln. In der Regel mussten 2 - 3 Dichtebestimmungen am Prüfkorb durchgeführt werden, um die erforderlichen Einstellungen am Zellofant zu bestimmen. Dabei ergaben sich keine Unterschiede zwischen Supafil® und Isofloc® L/LM. Die Absaugstation wurde verwendet, um den Prüfstand aber auch die Umgebung zu vom Dämmstoff zu säubern. In Hinblick auf eine raumseitige Applikation des Dämmstoffs im Sanierungsfall, lässt sich sagen, dass der Aufwand für die Endreinigung der umliegenden Oberflächen für Isofloc® L/LM aufgrund der höheren Staubbildung mit mehr Aufwand verbunden ist als für Supafil®.

Die Wärmeleitfähigkeit von Supafil® beträgt  $0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  und ist damit etwas geringer als die von Isofloc® L/LM mit  $0,038 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Im Rahmen dieser Bearbeitung wurden allerdings keine Untersuchungen zur Dämmwirkung der einzelnen Dämmstoffe durchgeführt. Die Wärmeleitfähigkeit ist laut Hersteller im Bereich der betrachteten Dichten unabhängig von der Dichte des Dämmstoffs.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  für Isofloc® L/LM also auch für Supafil® liegt bei 1 - 2 [36][37]. Der  $\mu$ -Wert ist abhängig von der betrachteten Konstruktion und wird mithilfe hygrothermischer Simulationen genauer untersucht. Die Ergebnisse der in Kapitel 4.8 beschriebenen Bauteilaufbauten finden sich in Kapitel 6.7.

Der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  ist abhängig von der Dichte, der Dichteverteilung, der Applikationstechnik und der Erfahrung des Verarbeiters. Er ergibt sich für Supafil® bei einer Dichte von  $35 \text{ kg/m}^3$  zu  $17,6 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}$  und im Falle der Nachverdichtung ( $\rho = 55 \text{ kg/m}^3$ ) zu  $38,3 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}$ . Bei Isofloc® L/LM liegt der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  für die gewählte Dichte von  $45 \text{ kg/m}^3$  bei  $13,9 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}$  und für eine Dichte von  $60 \text{ kg/m}^3$  bei  $25,5 \text{ kPa}\cdot\text{s/m}$ . Stellt man die Werte von Supafil® und Isofloc® L/LM gegenüber, zeigt sich, dass der längenbezogene Strömungswiderstand von Supafil® trotz geringerer Einbaudichte im Versuchsstand höher ist als der von Isofloc® L/LM. Eine genauere Betrachtung der Ergebnisse des längenbezogenen Strömungswiderstandes findet sich Kapitel 6.6.

## 6.2 Erprobung unterschiedlicher Applikationstechniken

Die Schüttdämmstoffe wurden mit der Einblasmaschine „Zellofant M95“ der Firma X-Floc aufgelockert und eingeblasen. Im Rahmen der Untersuchung wurden drei Applikationstechniken verwendet:

- Einblasen mit Drehdüse,
- Einblasen mit Einblasnadel
- Einblasen mit Einblasschlauch

Die Applikation des Dämmstoffs mit Einblasschlauch weist einen großen Anwendungsbereich auf. Sie ist bei Sanierungs- und Neubauvorhaben anwendbar und kann sowohl bei Dächern als auch in Böden, Decken und Wänden zum Einsatz kommen. Das Einblasen mit dem Einblasschlauch ist für Zellulose- und Glaswollämmstoffe gleichgut geeignet und kam in den durchgeführten Versuchen am Dach- und am Wandmodell zur Anwendung. Für die Einblassschläuche wurden zwei Varianten erprobt:

- weicher Einblasschlauch (blau)
- steiferer Einblasschlauch (rot).

Sowohl weiche als auch steife Einblassschläuche eignen sich gut, um in Gefache eingeführt zu werden, erlauben durch Ihre Biegeeigenschaften eine gute Führung in der Konstruktion und lassen sich dadurch über Hindernisse hinwegbewegen. Der weiche Einblasschlauch ist bei winterlichen Temperaturen besser zu handhaben. Die geriffelte Ausführung des Schlauchs an der Innenwand lockert den Dämmstoff beim Transport weiter auf und erhöht damit die Ergiebigkeit des Dämmstoffs.

Die flexible Ausführung ermöglicht das Erreichen aller Bereiche der Konstruktion. Dadurch müssen weniger Löcher in die Konstruktion gebohrt werden, um eine vollständige Befüllung der Hohlräume (auch mit erhöhten Dämmstoffdichten) zu erreichen. Bei Verwendung des Einblassschlauches war

in der Regel ein Bohrloch pro Dach- bzw. Wandfeld erforderlich. Der Einblassschlauch wurde dabei direkt in die Bohröffnung zum unteren Teil der Konstruktion geführt und schrittweise noch oben gezogen, wohingegen die Drehdüse direkt an der Bohröffnung angesetzt wurde und der Dämmstoff von dort in die Konstruktion fiel.

Drehdüsen eignen sich besonders zum Einblasen in luftdichte Konstruktionen, wie z.B. Holzständerwände, werden aber auch beim Dämmen von zweischaligem Mauerwerk verwendet. Laut Hersteller [42] ist die verwendete Drehdüse sehr gut für die Applikation von Zellulose geeignet, kann aber auch für Glaswolle verwendet werden. Dies hat sich in den durchgeführten Versuchen bestätigt, das Einblasen von Isofloc® L/LM mit der Drehdüse funktionierte besser als das Einblasen von Supafil®.

Der Anwendungsbereich der Einblasnadel liegt in der punktuellen Dämmstoffeinbringung sowie in der Nachverdichtung von Dämmschichten. Auch zum Einblasen von Schlitz- und schmalen, schwer zugänglichen Zwischenräumen kann sie verwendet werden. Bei den Versuchen wurde die Einblasnadel zum Nachverdichten am Dachmodell eingesetzt. Durch die speziell geformte Spitze der Einblasnadel, kann Pappe oder Folie direkt durchstoßen werden. Um die Einblasnadel in der Konstruktion bewegen zu können, wurden Schlitz- in die Unterspannbahn geschnitten. Wird die Einblasnadel durch ein Bohrloch, z.B. in einer Holzwerkstoffplatte, in die Konstruktion eingeführt, bietet sich eine ovale Öffnung an, um ausreichend Bewegungsspielraum zu gewährleisten. Die verwendete Einblasnadel verfügt über einen Bewegungsradius innerhalb der Konstruktion von ca. 1 m. Für flächiges Einblasen von Dämmstoffen ist die Einblasnadel eher ungeeignet, da so sehr viele Bohrlöcher erforderlich sein würden und sie durch die Querschnittsverjüngung gegenüber dem Schlauch zu Verschluss des Förderschlauches neigt. Auch bei der Drehdüse kommt es vor allem beim Einblasen von Supafil® häufig zu Verschluss im Schlauch. Besonders in engen Restbereichen einer Konstruktion am Ende des Einblasvorgangs kommt dies vor. Die Gefahr einer Verstopfung lässt sich meist schon am Geräusch im Förderschlauch während des Einblasvorgangs erkennen. Ändert es sich, kann dies einerseits darauf hindeuten, dass zu wenig Dämmstoff eingeblasen wird, was eine geringere Dichte in der Konstruktion zur Folge hat, oder auf eine bevorstehende Verstopfung im Auslass, weil zu viel Dämmstoff an eine Stelle der Konstruktion eingeblasen wurde. Der Einblassschlauch hat im Vergleich zur Drehdüse und Einblasnadel keine Verjüngung wodurch die Gefahr eines Verschlusses im Förderschlauch bei höherem Materialfluss und eine dadurch resultierende Unterbrechung des Einblasvorgangs geringer als bei den anderen Applikationstechniken ist.

Ein gezieltes Nachverdichten einzelner Stellen ist nicht möglich, weil sich der flexible Schlauch nicht durch Schüttdämmstoff schieben lässt. Es können nur ganze Bereiche z.B. am Streichsparrenanschluss mit einer höheren Dichte als im Regelquerschnitt befüllt werden.

Mit dem Schlauch lassen sich allerdings höhere Einbaudichten in der gesamten Konstruktion erreichen. Bei den Versuchen wurden und im Vergleich zu anderen Techniken die höchsten Dämmstoffdichten von bis zu 60 kg/m<sup>3</sup> eingebracht. Hier hat sich allerdings gezeigt, dass es mit der Drehdüse allgemein schwieriger ist, höhere Dichten zu erzielen.

Die Abhängigkeit der sich einstellenden Dichte von der gewählten Applikationstechnik zeigte sich auch bei der Messung der sich einstellenden Rohdichte. Die sich bei den unterschiedlichen Techniken ergebenden Dichten sind in Tabelle 6.1 dargestellt.



**Tabelle 6.1:** Ergebnisse der Dichtemessung am Dachmodell

Applikationstechnik	Mittlere Dichte der Proben [kg/m³]	
	Supafil®	Isofloc® L/LM
Schlauch	34,3	41,0
Einblasnadel	-	28,5

Die Applikation mittels Einblasnadel war für Supafil® nicht möglich, da es beim Einbringen des Dämmstoffs immer wieder zu Verschluss des Förderschlauchs kam. In den durchgeführten Untersuchungen betrug die gewählte Dichte für Supafil® 35 kg/m³ und für Isofloc® L/LM 45 kg/m³. Für den Dämmstoff Supafil® liegen die Ergebnisse nahe dem eingestellten Wert von 35 kg/m³. Die sich einstellende Dichte von Isofloc® L/LM liegt unterhalb der geplanten Dichte von 45 kg/m³, wobei bei der Applikation mit dem Schlauch eine deutlich höhere Dichte gegenüber der Einblasnadel erzielt wurde.

Auch am Wandmodell wurde die Dichte mit dem Einstechzylinder untersucht. Es zeigt sich, dass die sich einstellende Dichte für Supafil® und Isofloc® L/LM bei Applikation mit dem Schlauch über der geplanten Dichte liegt. Bei Applikation mittels Drehdüse liegt sie jedoch unter der anvisierten Dichte, dies gilt vor allem bei der Verwendung von Supafil®, siehe Tabelle 6.2.

**Tabelle 6.2:** Ergebnisse der Dichtemessung am Wandmodell

Applikationstechnik	Mittlere Dichte der Proben [kg/m³]	
	Supafil®	Isofloc® L/LM
Schlauch	38,4	51,0
Drehdüse	20,7	41,3

Bei der Dichtebestimmung mittels Einstechzylinder, ergibt sich das Problem, dass nicht immer die gleiche Stelle am Dach- bzw. Wandmodell überprüft werden kann, da sich Schwankungen in der Dichteverteilung ergeben. Bei Applikation mit der Düse, fällt der eingeblasene Dämmstoff teilweise selbstständig aus dem Gefache heraus, siehe Bild 6.2.

Die Drehdüse eignet sich bei sehr luftdichten Konstruktionen. Im Fall des undichten Wandmodells, ist teilweise nur eine unzureichende Dichte des eingeblasenen Dämmstoffes festzustellen.



**Bild 6.2:** Gefach mit Dämmstoff, der mithilfe einer Drehdüse eingebracht wurde

Mit Drehdüse sind nach Herstellerangaben Dämmdicken von 8,5 cm bis 40 cm erreichbar. Für den Schlauch gibt es prinzipiell keine Angaben des Herstellers zu den möglichen Dämmstoffdicken,



der zu dämmende Hohlraum in der Konstruktion muss allerdings breiter sein, als der Durchmesser des Schlauches.

Der Einblasschlauch kann ohne Probleme von einer Person auf Dach oder Leiter gehandhabt werden. Für einen kontinuierlichen Einblasvorgang ist jedoch eine weitere Person zum Befüllen der Einblasmaschine erforderlich. Dies gilt auch für die Einblasdüsen. Da die Einblasnadel vor allem punktuell zum Nachverdichten eingesetzt wurde und nicht zum flächigen Dämmen, ist die benötigte Dämmstoffmenge hierfür geringer und eine Unterbrechung des Einblasvorgangs unproblematisch. Daher kann die Injektion des Dämmstoffs mit der Einblasnadel grundsätzlich auch von einer Person durchgeführt werden.

Die Reinigung des Einblasgeräts, der Schläuche und der Drehdüse bzw. Einblasnadel ist unaufwändig. Der enthaltene Restdämmstoff kann aus Gerät und Schlauch herausgeblasen werden.

Hinsichtlich der Arbeitssicherheit ergeben sich keine Unterschiede bei Anwendung der verschiedenen Applikationstechniken. Wie schon im Kapitel 6.1 beschrieben, ist das Tragen von Handschuhen, einer Schutzbrille und einer Atemmaske zu empfehlen. Es ist lediglich darauf zu achten, dass während dem Betrieb nicht in das Gerät gefasst wird, da es durch das rotierende Gitter im Inneren zu Verletzungen kommen könnte.

### 6.3 Erprobung von Flüssigabdichtungen

Solimur ist eine Elastomerdichtung aus Wasserbasis, welche ursprünglich als Spezialhaftklebstoff zum Kleben von Dampfbremsen und Luftdichtheitsschichten an die Baukonstruktion vorgesehen ist. Verdünnt kann Solimur® auch als sprühbare Luftdichtheitsschicht verwendet werden. Vom Hersteller wird Solimur® bereits mit 20 % Wasser verdünnt geliefert. Eine weitere Verdünnung ist erfahrungsgemäß nicht notwendig. Es enthält keine Lösungsmittel und die enthaltenen Bindemittel sind auf ökologischer Basis. Es finden nahezu keine Freisetzung von flüchtigen organischen Verbindungen statt ( $< 0,3 \%$ ).

Aerosana Visconn ist eine modifizierte wässrige Acrylat-Polymerdispersion. Es wird hauptsächlich zum Abdichten von Kanten und Durchdringungen und nicht zur flächigen Besprühung verwendet. Es wird vom Hersteller proclima als nicht gesundheitsgefährdend eingestuft. Zur Freisetzung von VOC-Verbindungen werden jedoch keine Angaben gemacht [54].

Die Verarbeitung der sprühbaren Luftdichtheitsschichten benötigt keinen Ganzkörperschutz; geschlossene Arbeitskleidung sowie Handschuhe sind ausreichend. Bei Überkopfarbeiten ist jedoch eine Schutzbrille empfehlenswert. Aus Sicherheitsgründen sollte der Raum, in dem die Verarbeitung stattfindet, gut belüftet sein und Reste des Produkts sollten nicht in das Abwassersystem oder Flüsse gelangen. Der Kontakt mit Haut, Augen und Kleidung ist zu vermeiden. Dies gilt sowohl für Solimur als auch für Aerosana Visconn.

Zum Brandschutz bzw. zur Baustoffklasse werden von beiden Herstellern keine Angaben gemacht. Allerdings ergeben sich keine Anforderungen an das Material, da die auf das Bauteil aufgetragene Menge verhältnismäßig gering ist. Laut den Sicherheitsdatenblättern sind die sprühbaren Luftdichtheitsschichten weder brandfördernd noch explosionsgefährlich [54] [55].

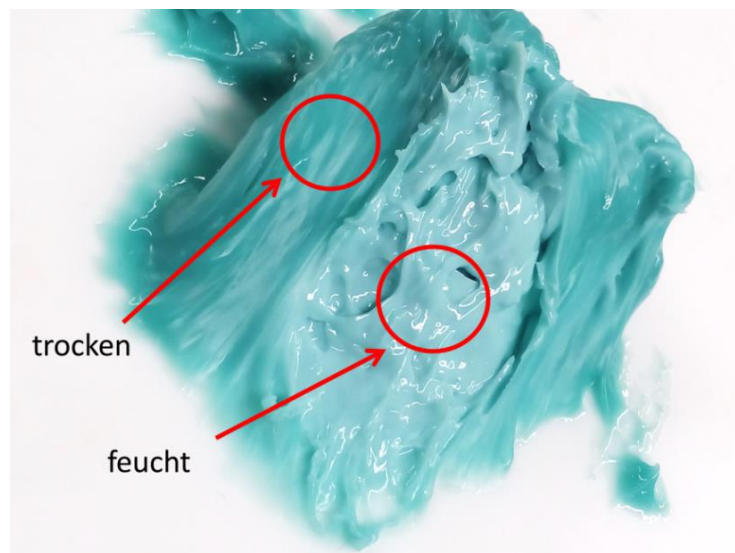
Die Flüssigabdichtungen können als thixotrop beschrieben werden. Dies bedeutet, dass das Material zunächst eine pastöse Konsistenz aufweist, was eine Applikation mit dem Pinsel erleichtert und durch Bewegung fließfähiger wird. Daher lassen sie sich auch gut mit einem Sprühgerät

auftragen. Obwohl Solimur etwas zähflüssiger als Aerosana Visconn ist, ergeben sich bei der Verarbeitung und im Sprühergebnis keine gravierenden Unterschiede.

Beide Flüssigabdichtungen werden in 10 l Eimern geliefert und sind dadurch gut transportier- und handhabbar. Die Lagerfähigkeit von Solimur beträgt laut Hersteller 24 Monate ab Produktionsdatum bei kühler und trockener Lagerung. Nach der Verarbeitung ist Solimur dauerhaft und alterungsbeständig [56]. Für Aerosana Visconn wird vom Hersteller keine Begrenzung der Haltbarkeit angegeben. Das Material sollte luftdicht verschlossen, bei einer Temperatur von 5 °C bis 25 °C aufbewahrt werden [57]. Die Trocknungszeit beträgt nach [57] 12 h bis 48 h (bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 %) je nach Schichtdicke. In den Versuchen konnte dies bestätigt werden.

Die Trocknungszeit für Solimur beträgt laut Hersteller ca. 1 mm pro Tag. In den Versuchen hat sich allerdings gezeigt, dass die Trocknungszeit weit über den Herstellerangaben liegt. Sie beträgt für 1 mm ca. 5 - 6 Tage. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Trocknung sehr von den Umgebungsbedingungen, vor allem der Temperatur, anhängig ist und die sich ergebenden Differenzen zwischen Herstellerangaben und den in den Versuchen gemachten Beobachtungen auch darin begründet sein können.

Der Trocknungsfortschritt lässt sich bei der Verwendung von Aerosana Visconn sehr gut erkennen. Das Material änderte im Laufe des Trocknungsvorgangs seine Farbe (von dunkelblau zu schwarz). Auch Solimur dunkelte nach und färbt sich von hell- zu dunkelblau, siehe Bild 6.3. Als Anhaltspunkt kann der Geruch während des Trocknens dienen. Im feuchten Zustand ist bei Solimur ein typischer Acrylgeruch wahrnehmbar, der im trockenen Zustand vollständig abgeklungen ist. Im abgebundenen Zustand bleibt Solimur klebrig.



**Bild 6.3:** Solimur, teilweise im feuchten und trockenen Zustand

Beide Flüssigabdichtungen können auf alle auf der Baustelle gängigen Materialien, wie z.B. Putz, Holz, Beton, Gipskarton, Holzwerkstoffplatten, Kunststoff- und Aluminiumfolien usw. verwendet werden. Vor der Applikation der sprühbaren Luftdichtheitsschicht sollte der Untergrund auf seine Eignung geprüft werden. Fette, Staub und lose Partikel sind zu entfernen. Bei Solimur wird für Gipskarton- oder Gipsfaserplatten, sägeraues Holz sowie Holzweichfaser- und Spanplatten eine

Vorbehandlung mit Primer empfohlen, sodass die Haftflächen sauber, trocken und tragfähig sind [56].

Der Materialverbrauch von Solimur beträgt ca. 345 g/m<sup>2</sup> bei einem 2-lagigen Auftrag, ca. 580 g/m<sup>2</sup> bei 4-lagigem und ca. 700 g/m<sup>2</sup> bei 8-lagigem. Sprühversuche an einer OSB-Platte mit definierten Spalten (Spalllänge 1 m, Spalthöhe 1,5 mm, Spalttiefe 18 mm) haben gezeigt, dass eine 2-lagige Ausführung nicht ausreicht, um eine Luftdichtheit zu erreichen. Selbst nach einem 4-lagigen Aufsprühen, lässt sich mit bloßem Auge erkennen, dass keine vollständige Dichtheit erzielt werden kann. Für eine 4-lagige Schicht aus Solimur ergibt sich eine Reduktion des Volumenstroms bei 50 Pa um ca. 11 % gegenüber der Ausgangsmessung ohne sprühbare Luftdichtheitsschicht. Bei einer 8-lagigen Beschichtung konnte eine Verringerung des Leckagevolumenstroms bei 50 Pa von 78 % erreicht werden.

Durchgängige Leckagen > 3 mm können mit dem Sprühgerät nicht vollständig verschlossen werden. Befindet sich Dämmstoff hinter oder innerhalb der Leckage, ist das Verschließen von Leckagen > 3 mm bzw. eine Reduktion des Volumenstroms möglich. Eine 3-lagige Beschichtung mit Solimur reicht aus, um den Leckagevolumenstrom um 85 % zu verringern.

Für Aerosana Visconn wird vom Hersteller ein Materialverbrauch von 400 - 900 g/m<sup>2</sup> je nach Schichtdicke und Applikationstechnik angegeben, was auch den Erfahrungen in den Versuchen entspricht und dem Materialverbrauch von Solimur ähnelt.

Bei den Versuchen am Wandmodell wurde Aerosana Visconn verwendet. Das Material wurde nur an den seitlichen Wandanschlüssen und am oberen und unteren Wandabschluss aufgebracht. Ein 2-facher Auftrag war dabei nicht ausreichen, die Leckagen waren noch sichtbar. Das Material wurde schließlich 4-lagig aufgesprüht. An den Wandflächen kam die sprühbare Luftdichtheitsschicht nicht zum Einsatz. Nach 24-Stündiger Trocknungszeit wurde ein Leckagevolumenstrom bei 50 Pa von 308,78 m<sup>3</sup>/h gemessen. Gegenüber dem Volumenstrom des Wandmodells ohne sprühbare Luftdichtheitsschicht von 334,13 m<sup>3</sup>/hm, entspricht dies einer Reduktion von 7,6 %. Es lässt sich außerdem beobachten, dass im Bereich natürlicher Druckdifferenzen von 5 - 8 Pa die sprühbare Luftdichtheitsschicht nicht wirksam ist. Erst ab ca. 20 Pa Druckdifferenz zwischen Versuchsstand und Umgebung zeigt der Einsatz von Aerosana Visconn eine Verminderung des Leckagevolumenstroms, siehe Kapitel 6.9. Der Einsatz von sprühbaren Luftdichtheitsschichten bei der Sanierung im Gebäudebestand ist daher für Leckagen ≤ 3 mm, vor allem beim Auftrag von mehr als vier Schichten, sinnvoll. Um mithilfe von sprühbaren Luftdichtheitsschichten Leckagen > 3 mm zu verschließen, muss Dämmstoff vor oder in der Leckage vorhanden sein oder eingebracht werden.

Für Aerosana Visconn wird vom Hersteller ein  $s_d$ -Wert von  $6,11 \pm 0,6$  m bei einer Schichtdicke von 0,3 mm angegeben. Die sprüh- und streichbare Luftdichtheitsschicht ist feuchtevariabel nach DIN EN ISO 12572 [12]. Durch den feuchteadaptiven  $s_d$ -Wert (0,13 - 10,00 m) ist sie in Außen- und Innenbereichen einsetzbar. Aerosana Visconn ändert ihren Dampfdiffusionswiderstand in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit.

Für Solimur werden vom Hersteller keine Angaben bezüglich der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke gemacht. Der  $s_d$ -Wert von Solimur wurde daher nach dem in Kapitel 4.5 beschriebenen Verfahren bestimmt. Für einen zweilagigen Auftrag von Solimur ergab sich bei einer Schichtdicke von ca. 0,20 mm ein  $s_d$ -Wert von 0,36 m. Für eine Schichtdicke von ca. 0,33 mm (vierlagiger Auftrag) beträgt der  $s_d$ -Wert 1,744 m und bei einer Schichtdicke von ca. 0,39 mm (achtlagiger Auftrag) 2,063 m.

Der sich einstellende  $s_d$ -Wert von Aerosana Visconn ist somit deutlich höher als der von Solimur.

## 6.4 Applikation sprühbarer Luftdichtheitsschichten

Sprühbare Luftdichtheitsschichten können mit Airless-Spritzgerät oder Pinsel aufgetragen werden. Beide Applikationstechniken wurden im Rahmen durchgeführter Versuche angewendet und erprobt.

Das verwendete Sprühgerät kann für sprühbare Luftdichtheitsschichten, aber auch für Farben, Lacke oder andere Materialien verwendet werden. Es zeigt sich, dass zur Bedienung des Geräts eine gewissen Routine notwendig ist, um eine schnelle Arbeitsweise und ein gleichmäßiges Ergebnis zu erreichen. Das Lesen der Bedienungsanleitung und der Verarbeitungshinweise des Herstellers proclima [58] hat sich als sehr hilfreich herausgestellt und die Bedienung und Reinigung des Spritzgeräts erleichtert. Nach einigen Sprühversuchen stellte sich ebenso die gewünschte Routine in der Handhabung des Geräts ein. Die Anwendung des Geräts ist von Jedermann erlernbar; die Applikation der sprühbaren Luftdichtheitsschichten durch geschultes Personal ist nicht zwangsläufig erforderlich.

Um Verstopfungen im Sprühgerät zu vermeiden, wurde vor der Anwendung der Filter aus der Sprühpistole sowie der Hauptfilter der Maschine entfernt. Das Gitter im Ansaugrohr ist ausreichend, um große Partikel oder Schmutz zurückzuhalten [58].

Der am Gerät eingestellte Druck betrug zwischen 120 und 160 bar und das Material wurde mit einem Abstand von 25 - 30 cm in einem Winkel von 45° zur Oberfläche auf den Untergrund aufgetragen. Der Materialauftrag erfolgte dabei je zu 50 % überlappend, um eine gleichmäßige Beschichtung zu erhalten. Allgemein gilt, je mehr Schichten aufgetragen werden, desto gleichmäßiger ist das Sprühergebnis.

Der Druck des Airless-Spritzgeräts lässt sich leicht anpassen. Das Materialverhalten der sprühbaren Luftdichtungen hängt stark von den Umgebungsbedingungen, vor allem der Temperatur ab. Diese Varianz lässt sich durch individuelle Anpassung des Drucks beim Auftragen ausgleichen. Über den Druck kann außerdem die aufgetragene Materialmenge und die Schichtdicke gesteuert werden, was die Verwendung des Airless-Spritzgeräts vor allem bei großen Flächen zu einer wirtschaftlichen Applikationstechnik macht. Bei Erhöhung des Drucks wird das Material gleichmäßiger, aber dünner aufgetragen. Um einen erhöhten Materialauftrag zu erreichen, muss der Druck reduziert werden. Hierdurch veränderte sich das Sprühbild, es wird ungleichmäßiger. Der Druck ist richtig gewählt, wenn keine Ränder mit erhöhtem Materialauftrag oder Streifen im Sprühbild mehr auftreten. Kommt kein Material mehr aus der Düse, ist entweder zu wenig Material im Eimer, die Pumpe läuft leer oder die Düse ist verstopft und muss gespült werden. Das Gerät ist gut von einer Person bedienbar; zum Transport sind jedoch mindestens zwei Personen erforderlich, da es relativ schwer ist.

Eine Vorbehandlung oder Reinigung des Untergrundes von Staub war in der Regel nicht notwendig, da durch den hohen Druck Staub und Fasern weggeblasen werden. Ein Abkleben der umliegenden Flächen war ebenfalls nicht notwendig, da beim Auftragen nahezu kein Sprühnebel entsteht. Nach der Applikation ist eine Qualitätskontrolle erforderlich. Teilweise war mit bloßem Auge zu erkennen, ob Leckagen nach dem Besprühen geschlossen waren. War dies nicht der Fall, ist mit Pinsel nachgebessert worden. Dabei wurde ein normaler Malerpinsel verwendet, da keine speziellen Pinsel erforderlich sind. Die Vorteile des Pinselns liegen im punktgenauen und einfachen Auftrag der Flüssigabdichtung. Außerdem lassen sich durch den erhöhten Materialauftrag größere Leckagen von bis zu 5 mm abdichten. Auch in den Spaltversuchen hat sich gezeigt, dass Leckagen < 3 mm ohne zusätzliche Dämmschicht im oder hinter dem Spalt problemlos geschlossen

werden können. Dünne und homogene Schichten sind mit dem Pinsel schlecht aufzutragen. Für größere Flächen ist der Pinsel ungeeignet, da der flächige Auftrag der sprühbaren Luftdichtheitschichten gegenüber dem Sprühgerät wesentlich zeitaufwändiger ist. Der Reinigungsaufwand des Pinsels ist deutlich geringer als der des Airless-Spritzgeräts. Hierfür wurde zwischen 30 und 45 Minuten benötigt, wobei auch die Reinigung mit einer gewissen Routine schneller ablief. Es ist besonders wichtig bei der Säuberung des Geräts, der Düse und der Schläuche sorgfältig vorzugehen und diese zeitnah nach der Benutzung durchzuführen, da übriges Material sonst trocknet und zu Verschluss der Schläuche usw. führt. Durch das Zurückbleiben von Material im Gerät und in den Schläuchen, welches im Zuge der Reinigung entfernt wird, kommt es zu erhöhtem Materialverbrauch, der bei kleinen Anwendungsflächen unverhältnismäßig ist. Außerdem entsteht durch die Verwendung des Spritzgeräts ein hoher zeitlicher Aufwand durch den Auf- und Abbau sowie durch die Reinigung. Zusätzlich war vor jeder Anwendung eine Probesprühung erforderlich, um den idealen Druck zu ermitteln. Für kleinere Anwendungen ist die Verwendung eines Pinsels daher wirtschaftlicher und schneller. Der Gebrauch des Sprühgerätes ist auf großen Flächen wiederum schneller als die Applikation mit dem Pinsel sowie die konventionelle Montage von Folien und Klebändern.

Hinsichtlich der Arbeitssicherheit gibt es bei der Applikation mit dem Pinsel nichts zu beachten. Bei Verwendung des Airless-Spritzgeräts sollte die Bedienungsanleitung vorher studiert werden, aber auch hier besteht keine Gesundheitsgefahr. Bei der Verarbeitung der sprühbaren Luftdichtheitschichten kam es kaum zu Sprühnebelbildung, durch den hohen Druck wurde jedoch teilweise Staub und Fasern der Schüttdämmstoffe aufgewirbelt. Aus diesem Grund und vor allem bei Überkopparbeiten wird eine Schutzbrille empfohlen. Von den Herstellern der sprühbaren Luftdichtheitschichten wird die Verwendung einer Atemschutzmaske empfohlen. Das Tragen von Handschuhen und Arbeitskleidung bei der Applikation ist sinnvoll, da es während der Verarbeitung zu Verschmutzung der Hände und Kleidung kommen kann.

## **6.5 Bestimmung der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke $s_d$**

In Kapitel 4.5 wurde die Dichtebestimmung der sprühbaren Luftdichtheitsschicht Solimur mithilfe des Gas-Pyknometers beschrieben. Die ermittelte Dichte beträgt  $1,09 \text{ g/cm}^3$ .

Aus allen untersuchten Proben wurden je drei Ergebnisse der Flächengewichte, die am nächsten beieinander liegen, ausgewählt und die Schichtdicke des aufgetragenen Materials aus der bestimmten Dichte und der Masse der trockenen Probe  $m_{A, \text{tr}}$  ermittelt. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Tabelle 6.3 zusammengestellt.

**Tabelle 6.3:** Flächengewichte und Schichtdicken der untersuchten Proben

	Probennummer	$m_{A,f}$ [g/m <sup>2</sup> ]	$m_{A,tr}$ [g/m <sup>2</sup> ]	d [mm]
2-lagig	1	335,03	204,37	0,187
	2	371,49	226,61	0,208
	3	331,74	202,36	0,186
4-lagig	4	567,84	346,38	0,318
	5	589,84	359,80	0,330
	6	583,56	355,97	0,327
8-lagig	7	657,01	400,78	0,368
	8	741,00	452,01	0,415
	9	702,45	428,49	0,393
Mittelwert 2 - lagig		346,09	211,11	0,194
Mittelwert 4 - lagig		580,41	354,05	0,325
Mittelwert 8 - lagig		700,15	427,09	0,392

Die Ausführung der Flüssigabdichtung mit Solimur für die Diffusionsstrommessung erfolgte im Aufbau mit einer zwei-, vier- und achtlagigen Beschichtung. Hierbei wurden jeweils für die zwei-, vier- und achtlagigen Beschichtung drei Probekörper erstellt und anhand der Diffusionsstrommessung ausgewertet. Die Werte von den  $s_d$ -Werten der verwendeten Beschichtungen liegen über 0,2 m, der Widerstand der Luftschicht kann somit nach Anhang G der DIN 12572 [12] vernachlässigt werden.

Die zweilagige Beschichtung der Probekörper mit Solimur ergab eine Materialdicke im Mittel von 0,197 mm. Die sich ergebenden mittlere Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  beträgt 1,833. Multipliziert mit der Schichtdicke ergibt sich ein  $s_d$ -Wert von 0,360 m. Die Ergebnisse der Diffusionsstrommessung sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

**Tabelle 6.4:** Ergebnisse der Diffusionsstrommessung für zweilagige Beschichtung

Untersuchungsergebnisse 2-lagige Beschichtung			Probekörper		
	Zeichen	Einheit	1	2	3
Fläche	A	[mm <sup>2</sup> ]	17,508	17,414	17,044
Dichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,09		
Dicke	d	[mm]	0,19	0,21	0,19
Wasserdampfdiffusionsstrom	G	[kg/s]	1,27E-08	1,15E-08	1,24E-08
Wasserdampfdiffusionsstromdichte	g	[kg/(m <sup>2</sup> s)]	7,27E-07	6,60E-07	7,25E-07
Dampfdruckdifferenz	$\Delta p$	[Pa]	1403,90		
Wasserdampf-Diffusionsdurchlasskoeffizient	W	[kg/(m <sup>2</sup> sPa)]	5,18E-10	4,70E-10	5,17E-10
Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand	Z	[m <sup>2</sup> sPa/kg]	1,93E+09	2,13E+09	1,94E+09
Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft	$\delta_a$	[kg/(msPa)]	1,98E-10		
$s_d$ (gesamt)	$s_{d,gesamt}$	[m]	0,382	0,420	0,383
$s_d$ (Solimur)	$s_{d,Solimur}$	[m]	0,342	0,380	0,343
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	$\mu$	[-]	1.824	1.830	1.846
Mittelwert $s_d$	$s_{d,mittel}$	[m]	0,360		
Mittelwert $\mu$	$\mu_{mittel}$	[-]	1.833		

Die mittlere Dicke des Materials Solimur bei einer vierlagigen Beschichtung beträgt 0,326 mm. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl hat sich im Vergleich zur zweilagigen Beschichtung um

ca. das 3-fache erhöht und ergibt sich zu 5,340. Der resultierende  $s_d$ -Wert beträgt im Mittel 1,744. Die detaillierten Ergebnisse können Tabelle 6.5 entnommen werden.

**Tabelle 6.5:** Ergebnisse der Diffusionsstrommessung für vierlagige Beschichtung

Untersuchungsergebnisse 4-lagige Beschichtung			Probekörper		
	Zeichen	Einheit	1	2	3
Fläche	A	[mm <sup>2</sup> ]	17,817	16,345	16,794
Dichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,09		
Dicke	d	[mm]	0,32	0,33	0,33
Wasserdampfdiffusionsstrom	G	[kg/s]	2,77E-09	2,87E-09	2,38E-09
Wasserdampfdiffusionsstromdichte	g	[kg/(m <sup>2</sup> s)]	1,56E-07	1,76E-07	1,42E-07
Dampfdruckdifferenz	$\Delta p$	[Pa]			
Wasserdampf-Diffusionsdurchlasskoeffizient	W	[kg/(m <sup>2</sup> sPa)]	1,11E-10	1,25E-10	1,01E-10
Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand	Z	[m <sup>2</sup> sPa/kg]	9,01E+09	8,00E+09	9,91E+09
Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft	$\delta_a$	[kg/(msPa)]	1,98E-10		
$s_d$ (gesamt)	$S_{d,gesamt}$	[m]	1,782	1,581	1,959
$s_d$ (Solimur)	$S_{d,Solimur}$	[m]	1,742	1,541	1,919
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	$\mu$	[-]	5.484	4.669	5.878
Mittelwert $s_d$	$S_{d, mittel}$	[m]	1,744		
Mittelwert $\mu$	$\mu_{mittel}$	[-]	5.340		

Bei einer achtlagigen Beschichtung ergab sich eine mittlere Materialdicke von 0,39 mm. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  hat sich gegenüber der vierlagigen Beschichtung aufgrund nicht gleichmäßiger Verarbeitung (geringer Druck) verringert und beträgt 5,289. Damit ergibt sich ein mittlerer  $s_d$ -Wert von 5,289 m. Die ausführlichen Ergebnisse können der Tabelle 6.6 entnommen werden.

**Tabelle 6.6:** Ergebnisse der Diffusionsstrommessung für achtlagige Beschichtung

Untersuchungsergebnisse 8-lagige Beschichtung			Probekörper		
	Zeichen	Einheit	1	2	3
Fläche	A	[mm <sup>2</sup> ]	17,672	17,463	16,89
Dichte	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,09		
Dicke	d	[mm]	0,37	0,41	0,39
Wasserdampfdiffusionsstrom	G	[kg/s]	2,62E-09	2,22E-09	2,06E-09
Wasserdampfdiffusionsstromdichte	g	[kg/(m <sup>2</sup> s)]	1,48E-07	1,27E-07	1,22E-07
Dampfdruckdifferenz	$\Delta p$	[Pa]	1403,90		
Wasserdampf-Diffusionsdurchlasskoeffizient	W	[kg/(m <sup>2</sup> sPa)]	1,06E-10	9,05E-11	8,67E-11
Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand	Z	[m <sup>2</sup> sPa/kg]	9,47E+09	1,11E+10	1,15E+10
Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft	$\delta_a$	[kg/(msPa)]	1,98E-10		
$s_d$ (gesamt)	$S_{d,gesamt}$	[m]	1,873	2,185	2,279
$s_d$ (Solimur)	$S_{d,Solimur}$	[m]	1,833	2,145	2,239
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	$\mu$	[-]	4.985	5.174	5.696
Mittelwert $s_d$	$S_{d, mittel}$	[m]	2,063		
Mittelwert $\mu$	$\mu_{mittel}$	[-]	5.289		

Aus feuchteschutztechnischer Sicht ist eine Bewertung bzw. eine Einordnung der erzielten Messergebnisse der sprühbaren Luftdichtheitsschichten nur schwer möglich. Hierbei ist vor allem der Einsatzort, in diesem Fall die Anordnung ob außen- oder innenseitig, ausschlaggebend.

Bei einem außenseitigen Einsatz ist eine diffusionsoffene und bei raumseitigem Einsatz eine diffusionshemmende Dampfbremse vorzusehen. Hier kann wiederum eine Eingruppierung nach DIN 4108-3 [33] erfolgen, woraus sich beim zweilagigen Aufbringen eine diffusionsoffene und bei darüberhinausgehender Aufbringung diffusionshemmende Schicht ergibt.

## 6.6 Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstandes

Die längenbezogenen Strömungswiderstände der untersuchten Dämmstoffe wurden angelehnt an das Messverfahren der DIN 9053-1 [13] ermittelt. Der Dämmstoff wurde hierfür auf einen Probehalter gegeben und mithilfe eines geregelten Ventilators wurden unterschiedliche Druckdifferenz über die Dämmstoffprobe gegenüber dem Atmosphärendruck erzeugt. Der sich einstellende Volumenstrom wurde mithilfe eines Laminar Flow Elements (LFE) bestimmt. Anschließend konnte der sich ergebende längenbezogene Strömungswiderstand nach Kapitel 3.4 ermittelt werden. Es wurde untersucht, wie sich der längenbezogene Strömungswiderstand bei zunehmender Verdichtung des Dämmstoffs verhält.

In Tabelle 6.7 sind die längenbezogenen Strömungswiderstände für den Dämmstoff Supafil® in Abhängigkeit der Dämmstoffdichte und der aufgetragenen Druckdifferenz, zwischen Versuchsstand und Umgebung, eingetragen. Die Werte liegen zwischen 17,4 kPa·s/m bei einer Dichte von 35 kg/m³ und 41,9 kPa·s/m bei einer Dichte von 60 kg/m³.

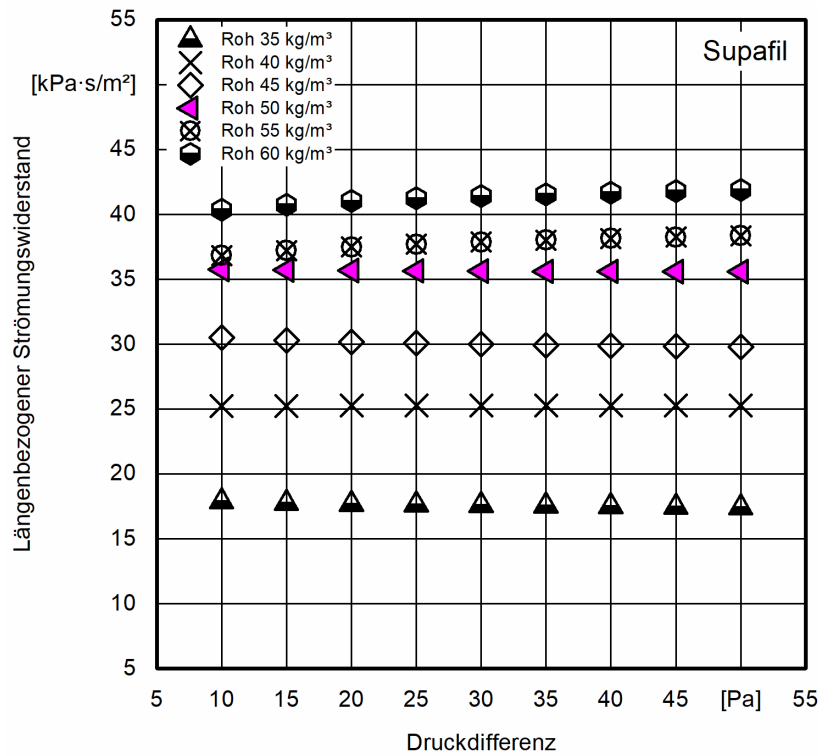
**Tabelle 6.7:** Längenbezogener Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Dämmstoffdichte und der Druckdifferenz für den Dämmstoff Supafil®

Längenbezogener Strömungswiderstand von Supafil® [kPa·s/m]						
Druckdifferenz [Pa]	Eingebrachte Dämmstoffdichte $\rho$ für den Dämmstoff Supafil® [kg/m³]					
	35	40	45	50	55	60
10	17,9	25,2	30,5	35,8	36,8	40,4
15	17,8	25,2	30,3	35,7	37,2	40,8
20	17,7	25,3	30,2	35,7	37,5	41,0
25	17,6	25,3	30,1	35,7	37,7	41,2
30	17,6	25,3	30,0	35,6	37,9	41,4
35	17,5	25,3	29,9	35,6	38,0	41,6
40	17,5	25,3	29,9	35,6	38,1	41,7
45	17,5	25,3	29,8	35,6	38,3	41,8
50	17,4	25,3	29,8	35,6	38,4	41,9

In Bild 6.4 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte nahezu unabhängig von der Druckdifferenz sind. Im Bereich größerer Druckdifferenz ist lediglich ein leichter Anstieg und bei kleineren Druckdifferenz eine kleine Reduzierung des längenbezogenen Strömungswiderstandes zu erkennen. Weiterhin ist zu beobachten, dass keine Linearität zwischen eingebrachter Dichte des Dämmstoffs und dem Anstieg des Strömungswiderstandes vorherrscht. So ist der Anstieg von 35 – 40 – 45 kg/m³ deutlich größer als von 50 - 55 - 60 kg/m³.

Angaben vom Hersteller zum Vergleich der Messwerte sind nicht verfügbar.





**Bild 6.4:** Längenbezogener Strömungswiderstand des Schüttdämmstoffes Supafil® mit einer Dichte von 35 kg/m³ bis 60 kg/m³

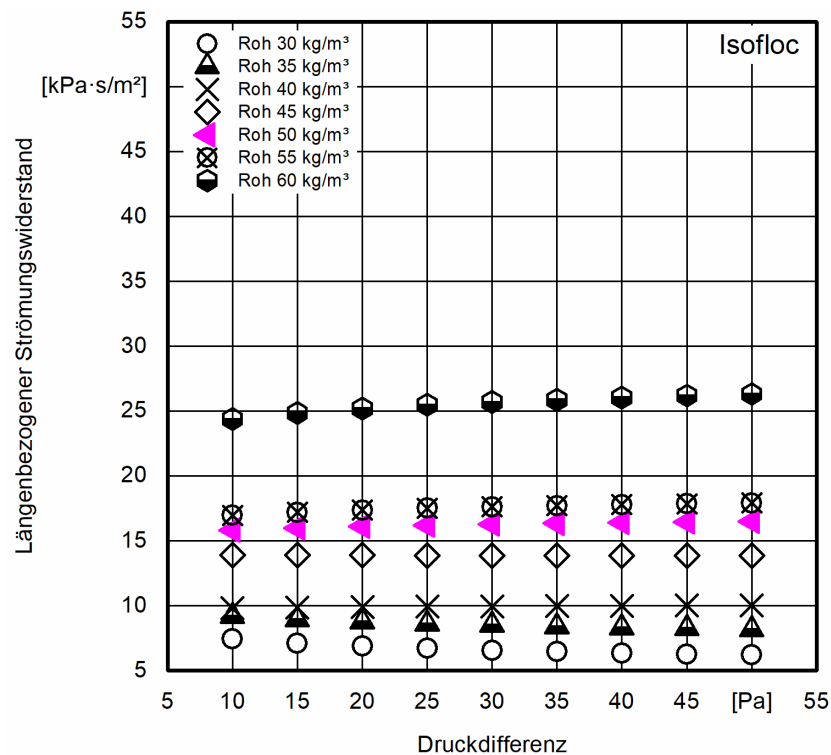
Tabelle 6.8 zeigt Ergebnisse des Dämmstoffes Isofloc® L/LM. Die Ergebnisse für den längenbezogenen Strömungswiderstand liegen unter denen vom Dämmstoff Supafil®. Sie betragen im Minimum 6,2 kPa·s/m bei einer Dichte von 30 kg/m³ und im Maximum 26,3 kPa·s/m bei einer Dichte von 60 kg/m³.

**Tabelle 6.8:** Längenbezogener Strömungswiderstand in Abhängigkeit von der Dämmstoffdichte und der Druckdifferenz für den Dämmstoff Isofloc® L/LM

Längenbezogener Strömungswiderstand von Isofloc® L/LM [kPa·s/m]							
Druckdifferenz in [Pa]	Eingebrachte Dämmstoffdichte $\rho$ für den Dämmstoff Isofloc® L/LM in [kg/m³]						
	30	35	40	45	50	55	60
10	7,5	9,2	9,8	13,9	15,8	17,0	24,4
15	7,1	9,0	9,9	13,9	16,0	17,2	24,8
20	6,9	8,8	9,9	13,9	16,1	17,4	25,2
25	6,7	8,6	9,9	13,9	16,2	17,5	25,5
30	6,6	8,5	10,0	13,9	16,3	17,6	25,7
35	6,5	8,4	10,0	13,9	16,4	17,7	25,9
40	6,4	8,3	10,0	13,9	16,4	17,8	26,0
45	6,3	8,3	10,0	13,8	16,5	17,9	26,2
50	6,2	8,2	10,0	13,8	16,5	17,9	26,3

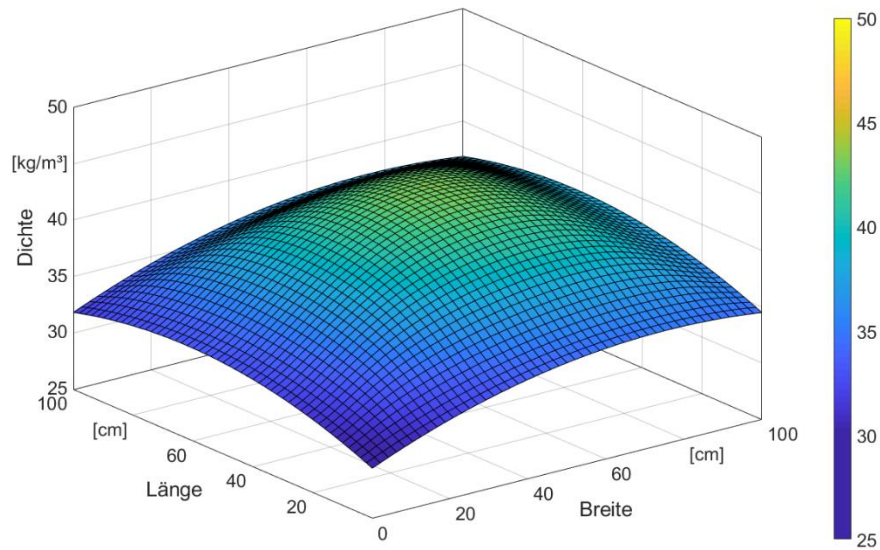
In Bild 6.5 sind die Werte aus Tabelle 6.8 grafisch aufbereitet. Wie bei Supafil® ist der längenbezogene Strömungswiderstand unabhängig von der Druckdifferenz. Bei Isofloc® L/LM findet der größte Anstieg zwischen 55 kg/m³ und 60 kg/m³ statt.

Vom Hersteller wird für den Zellulosedämmstoff Isofloc® L/LM ein Strömungswiderstand  $r \geq 5$  kPa·s/m bei einer Dichte von 30 kg/m³ angegeben, was mit den gemessenen Ergebnissen von 6,2 kPa·s/m bis 7,5 kPa·s/m näherungsweise übereinstimmt.

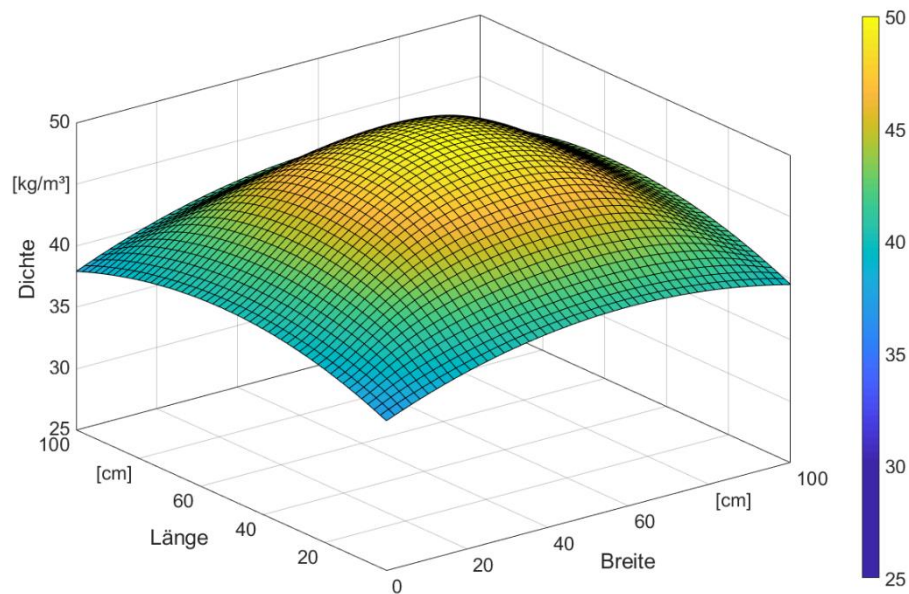


**Bild 6.5:** Längenbezogener Strömungswiderstand des Schüttdämmstoffes Isofloc® L/LM mit einer Dichte von 30 kg/m³ bis 60 kg/m³

Allgemein ist erkennbar, dass der längenbezogene Strömungswiderstand für den Zellulosedämmstoff Isofloc® L/LM bei geringen Rohdichten von 30 kg/m³ und 35 kg/m³ mit zunehmender Druckdifferenz sinkt. Dies ist darin begründet, dass die Dichteverteilung über die Probe nicht gleichmäßig verteilt ist. Beim Einbringen des Dämmstoffes in den Versuchsaufbau wurde die Applikationstechnik Einblasnadel verwendet. Die Einblasstelle befindet sich in der Mitte des Aufbaus. Während des Einblasens wird die Nadel gedreht, so dass der Dämmstoff alle Bereiche ausfüllt. Mit dieser Methode kommt es in der Mitte der Konstruktion zu einer höheren Dichte als in den Randbereichen, siehe Bild 6.6 und Bild 6.7. Dadurch kann es mit zunehmender Druckdifferenz zu einer erhöhten Flankenströmung kommen, was eine Erhöhung des Luftvolumenstroms und damit eine Verringerung des längenbezogenen Strömungswiderstandes herbeiführt.



**Bild 6.6:** Dichtverteilung des Dämmstoffes über den Dämmstoffquerschnitt bei der Messung des längenbezogenen Strömungswiderstandes. Dämmstoff Supafil® mit einer vorgesehenen Dichte von  $35 \text{ kg/m}^3$



**Bild 6.7:** Dichtverteilung des Dämmstoffes über den Dämmstoffquerschnitt bei der Messung des längenbezogenen Strömungswiderstandes. Dämmstoff Isofloc® L/LM mit einer vorgesehenen Dichte von  $45 \text{ kg/m}^3$

## 6.7 Feuchtetechnischer Bewertung typischer sanierungsbedürftiger Altbaukonstruktionen

Die in Kapitel 4.7 dargestellten typischen Altbaukonstruktionen, die für eine Sanierung mithilfe von Schüttdämmstoffen und/oder sprühbaren Luftdichtheitsschichten in Frage kommen, sind auf ihre Eignung hin untersucht worden.

In Anlehnung an diese Wand-, Dach- und Deckenaufbauten wurden Flach- und Steildachkonstruktionen, eine obere Geschossdecke, eine massive Außenwand aus zweischaligem Mauerwerk sowie eine Außenwand in Holzständerbauweise mit und ohne Witterungsschutz hinsichtlich ihrer feuchteschutztechnischen Eignung nach der Sanierung untersucht.

Für Flachdächer (Konstruktion 1 - 3) ergeben sich maximale Wassergehalte in der Holzschalung von ca. 20 % bis 27 %. Mit zunehmender Luftdurchlässigkeit der Konstruktion, steigt auch der Wassergehalt in der Konstruktion, vor allem der äußeren Schalung, an. Eine energetische Ertüchtigung von Flachdächern ist prinzipiell schwierig, da sie vom Grunde her feuchteschutztechnisch problematisch sind. Im unsanierten Zustand funktionieren Flachdächer meistens nur, weil sie ein geringes Wärmedämmniveau aufweisen und die Konstruktion ausreichend warm ist. Nach energetischer Sanierung sind sie nur funktionstüchtig, wenn es zu keiner Verschattung kommt und die Infiltration auf ein Minimum reduziert wird. Kann eine erhöhte Anforderung an die Luftdichtheit nicht sichergestellt werden, muss die Konstruktion außenseitig überdämmt werden, wobei sich der Dämmstoff Supafil® hierfür feuchteschutztechnisch besser bewährt.

Die Steildächer werden diffusionsoffen und mit nicht mehr funktionstüchtiger Unterspannbahn untersucht. Auch nach erfolgter energetischer Sanierung, weisen sie einen ausreichenden Feuchteschutz auf. Hierbei ist lediglich sicherzustellen, dass die Hinterlüftung funktionstüchtig bleibt. Bei Füllung der Hinterlüftung mit Dämmstoff, ggf. durch eine defekte Unterspannbahn, ist vorzugsweise eine Dampfsperre aufzubringen (flüssig oder konventionell). Auch hier hat sich gezeigt, dass sich bei Verwendung von Supafil® geringere Wassergehalte in der Holzschalung einstellen.

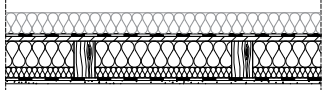
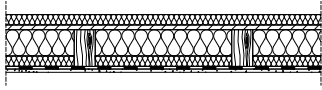
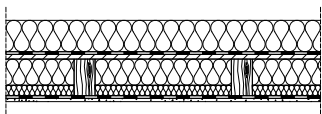
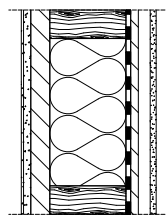
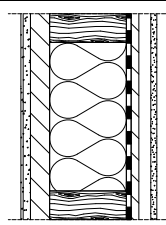
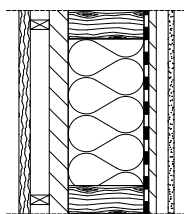
Außenmauerwerk mit Vorsatzschale aus Klinker sind uneingeschränkt funktionsfähig, auch nach energetischer Ertüchtigung. Die maximalen Wassergehalte im Ziegelmauerwerk liegt für die betrachtete Konstruktion bei 0,74 %. Der Unterschied zwischen der Verwendung von Supafil® und Isofloc® L/LM ist, hinsichtlich des Feuchteschutzes, gering.

Außenwände in Holzständerbauweise sind bei vorhandener Vorsatzschale (Witterungsschutz) in feuchtetechnischer Hinsicht unproblematisch, solange die Hinterlüftung in Form von Abführung der Feuchte gegeben ist. Direkt bewitterte Holzaußenwände benötigen eine Dampfbremsbahn. Diese kann entweder konventionell oder als sprühbare Variante aufgebracht werden.

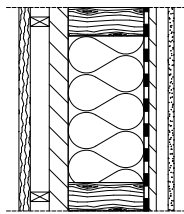
Bei oberen Geschossdecken ergeben sich keinerlei Einschränkungen der Funktionstüchtigkeit in Hinblick auf den Feuchteschutz nach erfolgter Sanierung. Sowohl die Applikation des Dämmstoffs Isofloc® L/LM als auch Supafil® sind unproblematisch.

Die Ergebnisse und die angesetzten  $q_{50}$ -Werte sind in Tabelle 6.9 und Tabelle 6.10 dargestellt.

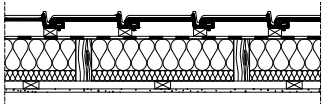
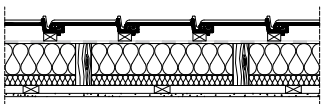
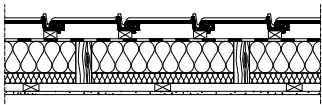
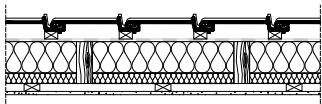
**Tabelle 6.9:** Ergebnisse der feuchtetechnischen Bewertung von Flachdach- und Holzständerwandkonstruktionen

Nr.	Skizze	Ergebnisse		
		Beschreibung	U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]
Flachdachkonstruktion mit Abdichtung bei Verwendung von Supafil®				
1		Supafil®; q <sub>50</sub> = 1,50 h <sup>-1</sup>	21,01	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 2,00 h <sup>-1</sup>	21,83	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 3,00 h <sup>-1</sup>	23,50	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 4,00 h <sup>-1</sup>	25,27	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	26,91	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup> ; Überdämmt 80 mm	20,21	0,00
Flachdachkonstruktion ohne Abdichtung bei Verwendung von Isofloc® L/LM				
2		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup> ; Überdämmt 40 mm	22,09	0,00
Flachdachkonstruktion mit Abdichtung bei Verwendung von Isofloc® L/LM				
3		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup> ; Überdämmt 120 mm	20,92	0,00
Wandkonstruktion mit Außenputzsystem bei Verwendung von Supafil®				
4		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	17,86	0,00
Wandkonstruktion mit Außenputzsystem bei Verwendung von Isofloc® L/LM				
5		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 3,00 h <sup>-1</sup>	18,60	0,00
Wandkonstruktion mit hinterlüftetem Witterungsschutz bei Verwendung von Supafil®				
6		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	17,32	0,00

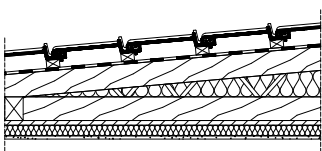
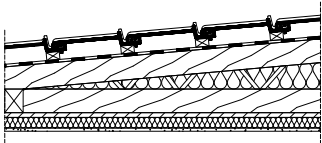
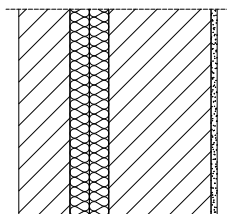
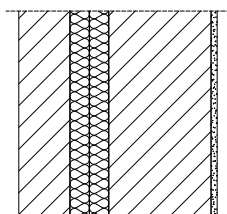
**Fortsetzung Tabelle 6.9**

Fortsetzung Tabelle 6.10				
Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
Wandkonstruktion mit hinterlüftetem Witterungsschutz bei Verwendung von Isofloc® L/LM				
7		Isofloc® L/LM; $q_{50} = 5,00 \text{ h}^{-1}$	17,93	0,00

**Tabelle 6.10:** Ergebnisse der feuchtetechnischen Bewertung von Steildach-, Geschossdecken und zweischaligen Massivwandkonstruktionen

Sivwandkonstruktionen				
Nr.	Skizze	Ergebnisse Beschreibung	U <sub>ges</sub>	M <sub>c,max</sub>
			[kg/m²]	[kg/m²]
Steildachkonstruktion diffusionsoffen bei Verwendung von Supafil®				
8		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	2,80	0,00
Steildachkonstruktion mit defekter Unterspannbahn bei Verwendung von Supafil®				
9		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	0,65	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	0,67	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	0,71	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	0,76	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	0,77	0,00
Steildachkonstruktion diffusionsoffen bei Verwendung von Isofloc® L/LM				
10		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	3,16	0,00
Steildachkonstruktion mit defekter Unterspannbahn bei Verwendung von Isofloc® L/LM				
11		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	2,33	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	2,67	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 5,00 h <sup>-1</sup>	2,83	0,00

**Fortsetzung Tabelle 6.10**

Fortsetzung Tabelle 6.10				
Nr.	Skizze	Ergebnisse Beschreibung	U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]
Obere Geschossdecke bei Verwendung von Supafil®				
12		Supafil®; q <sub>50</sub> = 1,00 h <sup>-1</sup>	0,00	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 0,50 h <sup>-1</sup>	0,00	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 0,25 h <sup>-1</sup>	0,00	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 0,10 h <sup>-1</sup>	0,00	0,00
Obere Geschossdecke bei Verwendung von Isofloc® L/LM				
13		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 1,00 h <sup>-1</sup>	0,00	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 0,50 h <sup>-1</sup>	0,00	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 0,25 h <sup>-1</sup>	0,00	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 0,10 h <sup>-1</sup>	0,00	0,00
Außenwand mit Vorsatzschale bei Verwendung von Supafil®				
14		Supafil®	0,74	0,00
Außenwand mit Vorsatzschale bei Verwendung von Isofloc® L/LM				
15		Isofloc® L/LM	0,73	0,00

Die Bewertungen von gängigen Altbaukonstruktionen mit verminderten  $q_{50}$ -Werten zeigen, dass es trotz reduzierter Infiltration von feuchtwarmer Raumluft innerhalb des Bauteils zu Überschreitungen der zulässigen Wassergehalte bzw. der zulässigen Tauwassermenge kommen kann. Jedoch ist erkennbar, dass sich bei Verwendung von Supafil® geringere Wassergehalte in der Konstruktion einstellen als bei Isofloc® L/LM. Bei den betrachteten Konstruktionen kommt es nur in den seltensten Fällen zu einer Tauwasserbildung innerhalb des neu eingebrachten Dämmstoffes. Einzig bei Verwendung von Supafil® in der Steildachkonstruktion Nr. 7 ergibt sich im sanierten Zustand eine Tauwassermenge von 0,2 kg/m<sup>2</sup>. Dieser Wert ist nach DIN 13788 [59] gerade noch zulässig und liegt unterhalb des Grenzwerts der DIN 4108-3 [33] von 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Sollte es zu einem Versagen der Konstruktion kommen, liegt dies vor allem an unzulässigen Wassergehalten in der Holzkonstruktion.

Durch Reduzierung des eingebrachten Dämmstoffs kann eine Reduzierung des Wassergehaltes in der äußeren Schalung herbeigeführt werden. Hier wären jedoch im Vorfeld der energetischen

Ertüchtigung umfangreiche Simulationsrechnungen zur Bestimmung des zulässigen Wärmedurchlasswiderstandes erforderlich.

Vor allem bei Flachdächern, die keine Überdämmung der äußeren Abdichtungsebene aufweisen, kommt es zu einer Überschreitung des zulässigen Wassergehaltes in der äußeren Holzkonstruktion. So ergeben sich Wassergehalte von bis zu 30,47 M-%. Unverschattete Konstruktionen mit dunkler Abdichtung und raumseitiger funktionstüchtiger Luftdichtheitsebene sind jedoch unbedenklich, wobei bei den meisten in der Praxis vorhandenen Dächer eine Verschattung, beispielsweise durch Attiken, gegeben ist.

Diffusionsoffene Steildachkonstruktion mit Ziegeleindeckung weisen hingegen keine erhöhten Feuchten auf. Befindet sich auf der Außenseite derartiger Dachkonstruktionen jedoch eine Holzwerkstoffplatte oder eine Schalung, kann es zu Überschreitung der zulässigen Wassergehalte kommen und schlussendlich zum Versagen der Konstruktion. So beläuft sich der maximale Wassergehalt in der Holzschalung einer sanierten Steildachkonstruktionen auf bis zu 28,27 M-%, was oberhalb des zulässigen Grenzwerts für Konstruktionsholz von 20 % liegt. Die Konstruktion Nr. 4 weist beispielsweise eine außenseitige MDF-Platte auf. Der Grenzwert für Holzwerkstoffplatten liegt bei 18 M-%. Auch hier wird der Grenzwert bei einem Wassergehalt in der Holzwerkstoffplatte von 18,17 M-% im sanierten Zustand überschritten.

Kehlbalkenlagen, oberste Geschossdecken oder ähnliche Konstruktion sind uneingeschränkt mit Schüttdämmstoffen energetisch zu ertüchtigen, siehe Konstruktion Nr. 8. Ebenso kann bei zweischaligem Mauerwerk bedenkenlos ein Schüttdämmstoff eingebracht werden. Es kommt nicht zu Tauwasserbildung und der maximale Wassergehalt in der Vorsatzschale beträgt 0,74 M-%.

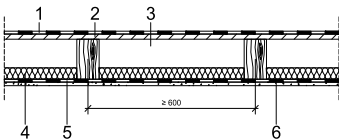
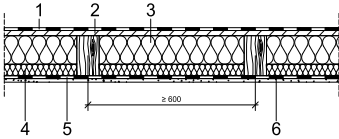
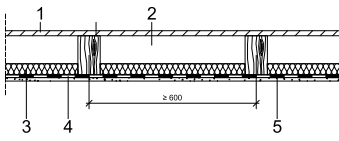
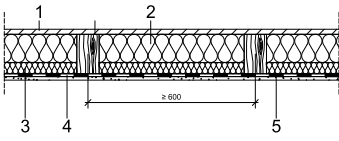
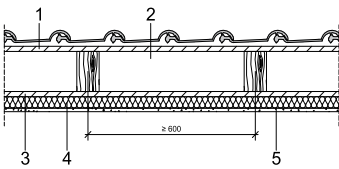
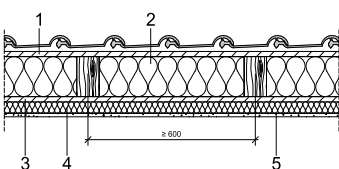
Bei direktverputzten Wandkonstruktionen aus Holzständerwerk ist hingegen auf eine funktionstüchtige Dampfbremsbahn zu achten. Bei der energetischen Sanierung ist diese ggfs. über eine sprühbare Dampfbremsbahn herzustellen. Lediglich hinterlüftete Wandkonstruktionen, weisen auch bei diffusionsoffener Bauweise eine Funktionstüchtigkeit auf.

Raumseitige Vorsatzschalen sind mit funktionstüchtiger Dampfbremsbahn umsetzbar. Hierbei muss lediglich darauf geachtet werden, dass es auf der Außenseite der Konstruktion nicht zu einer Wasseranreicherung infolge von Schlagregen kommt, die in den Wintermonaten zu Schäden auf der Außenseite führen kann.

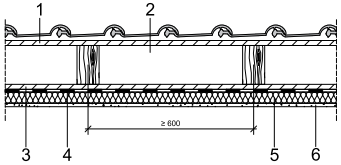
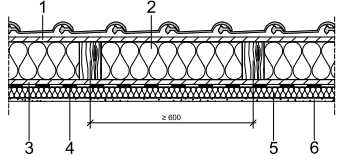
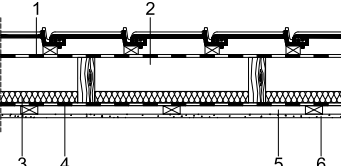
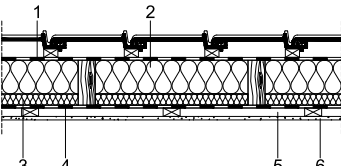
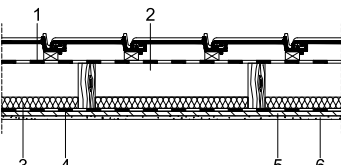
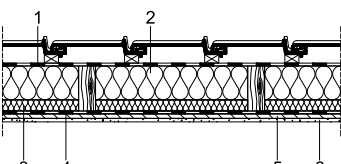
Die Ergebnisse der Simulationen sind zusammenfassend in der nachfolgenden Tabelle 6.11 dargestellt. Die detaillierten Untersuchungsergebnisse mit den jahreszeitlichen Verläufen der Wassergehalte finden sich im Anhang.



**Tabelle 6.11:** Ergebnisse der zulässigen Leckageraten für Supafil® und Isofloc® L/LM

Nr.	Skizze	Ergebnisse				
		Beschreibung	Supafil®		Isofloc® L/LM	
			U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]	U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]
1		unsaniert	19,45	0,00	22,43	0,00
		saniert, q <sub>50</sub> = 1,00 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,50 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,25 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,10 h <sup>-1</sup>	20,12 19,34 18,87 18,61	0,00 0,00 0,00 0,00	22,43 21,96 21,73 21,60	0,00 0,00 0,00 0,00
1.1		unsaniert	21,56	0,00	21,56	0,00
		saniert, q <sub>50</sub> = 1,00 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,50 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,25 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,10 h <sup>-1</sup>	24,84 24,26 24,29 24,38	0,00 0,00 0,00 0,00	25,29 25,22 25,19 25,13	0,00 0,00 0,00 0,00
2		unsaniert	23,32	0,00	23,32	0,00
		saniert, q <sub>50</sub> = 1,00 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,50 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,25 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,10 h <sup>-1</sup>	28,20 28,17 28,16 28,15	0,00 0,00 0,00 0,00	28,27 28,23 28,21 28,21	0,00 0,00 0,00 0,00

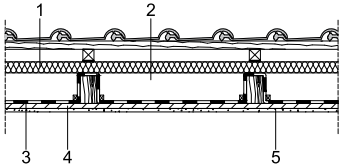
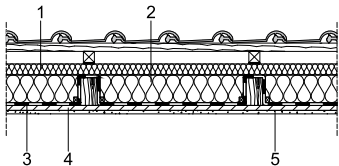
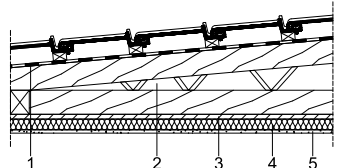
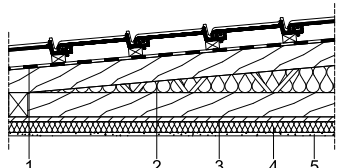
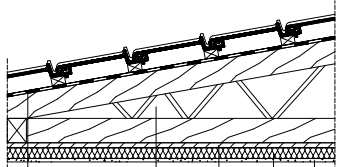
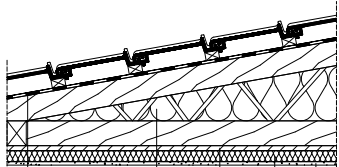
Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]	U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]
2.1		unsaniert	23,32	0,00	23,32	0,00
		saniert, q <sub>50</sub> = 1,00 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,50 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,25 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,10 h <sup>-1</sup>	27,26 27,17 27,20 27,14	0,00 0,00 0,00 0,00	27,68 27,63 27,60 27,58	0,00 0,00 0,00 0,00
3		unsaniert	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, q <sub>50</sub> = 1,00 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,50 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,25 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,10 h <sup>-1</sup>	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00
3.3		unsaniert	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, q <sub>50</sub> = 1,00 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,50 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,25 h <sup>-1</sup> saniert, q <sub>50</sub> = 0,10 h <sup>-1</sup>	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00

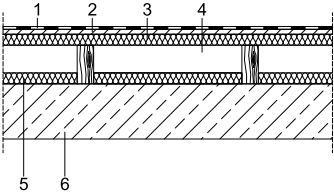
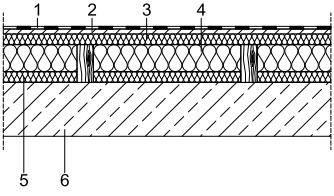
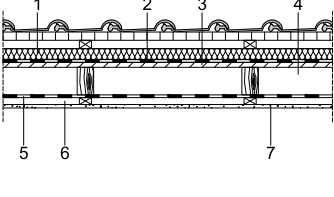
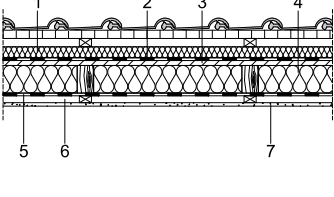
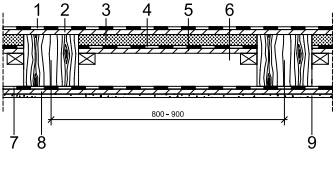
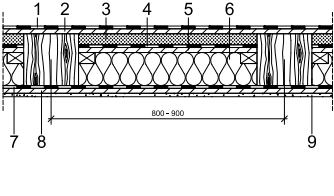
Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
4		unsaniert	14,25	0,00	14,25	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	16,21 16,00 15,89 15,83	0,00 0,00 0,00 0,00	18,17 18,00 17,92 17,86	0,00 0,00 0,00 0,00
5		unsaniert	18,56	0,00	18,56	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	19,89 19,29 18,99 18,83	0,00 0,00 0,00 0,00	22,50 22,13 21,95 21,84	0,00 0,00 0,00 0,00
6		unsaniert	18,37	0,00	18,37	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	19,34 18,89 18,69 18,56	0,00 0,00 0,00 0,00	22,05 21,76 21,62 21,53	0,00 0,00 0,00 0,00

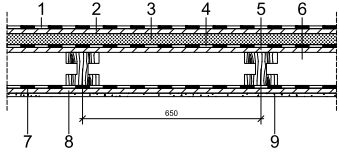
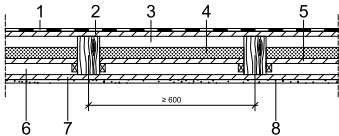
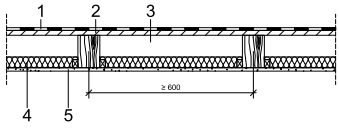
Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
7		unsaniert	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	0,00 0,00 0,00 0,00	0,20 0,20 0,20 0,20	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00
8.10		unsaniert	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00
8.20		unsaniert	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00

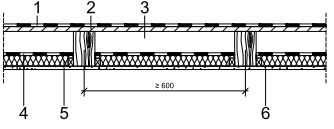
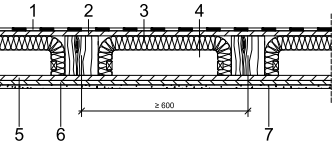
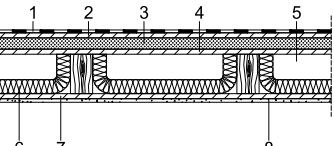
Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
9		unsaniert	31,38	0,00	31,38	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,0 \text{ h}^{-1}$	29,98	0,00	30,47	0,00
10		unsaniert	11,52	0,00	11,52	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	13,59 13,58 13,57 13,57	0,00 0,00 0,00 0,00	13,62 13,60 13,59 13,59	0,00 0,00 0,00 0,00
12		unsaniert	18,05	0,00	18,05	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	18,57 18,28 18,11 18,03	0,00 0,00 0,00 0,00	22,14 22,02 21,96 21,93	0,00 0,00 0,00 0,00

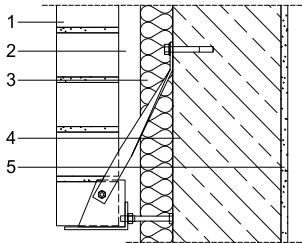
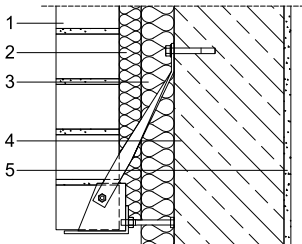
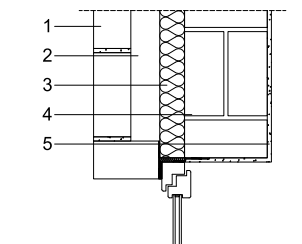
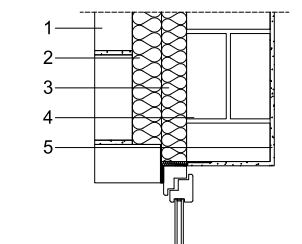
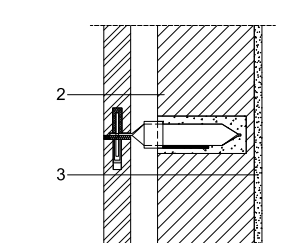
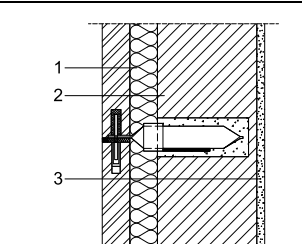
Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
13		unsaniert	18,05	0,00	18,05	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	18,57 18,28 18,11 18,03	0,00 0,00 0,00 0,00	22,14 22,02 21,96 21,93	0,00 0,00 0,00 0,00
15		unsaniert	19,18	0,00	19,18	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	19,60 19,22 19,01 18,87	0,00 0,00 0,00 0,00	20,09 19,80 19,65 19,56	0,00 0,00 0,00 0,00
16		unsaniert	49,12	1,88	49,12	1,88
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	30,16 30,21 30,24 30,11	0,00 0,00 0,00 0,00	29,29 29,25 29,24 29,23	0,00 0,00 0,00 0,00

Fortsetzung Tabelle 6.11

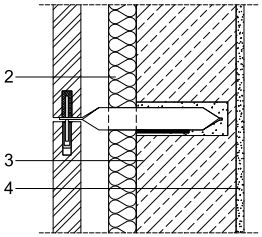
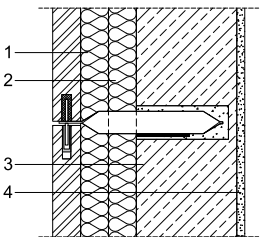
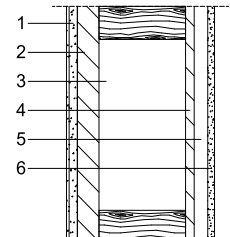
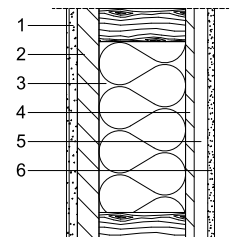
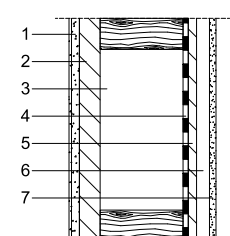
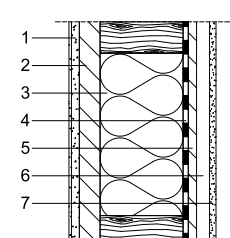
Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
16.1		unsaniert	49,12	1,88	49,12	1,88
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	17,07	0,00	18,78	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	16,68	0,00	18,47	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	16,50	0,00	18,31	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	16,39	0,00	18,22	0,00
17		unsaniert	20,18	0,00	20,18	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	19,76	0,00	21,92	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	19,53	0,00	21,76	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	19,41	0,00	21,67	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	19,35	0,00	21,62	0,00
18		unsaniert	17,76	0,00	17,76	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	16,72	0,00	16,90	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	16,69	0,00	16,88	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	16,68	0,00	16,87	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	16,67	0,00	16,86	0,00

Fortsetzung Tabelle 6.11

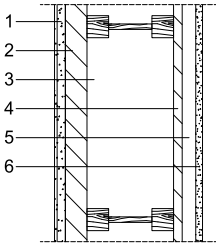
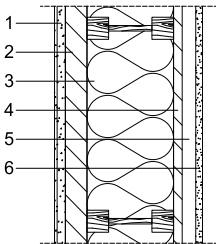
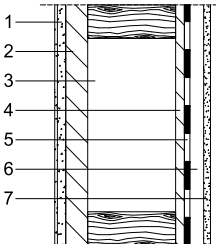
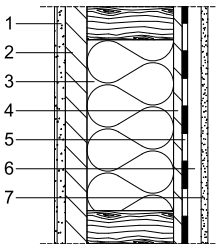
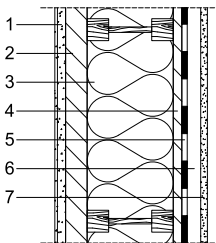
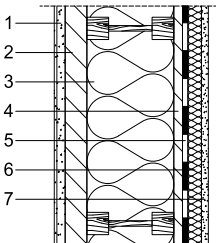
Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]	U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]
20		unsaniert	0,76	0,00	0,76	0,00
		saniert	0,83	0,00	0,82	0,00
21		unsaniert	0,71	0,00	0,71	0,00
		saniert	0,74	0,00	0,73	0,00
23		unsaniert	0,00	0,38	0,00	0,00
		saniert	0,00	0,00	0,00	0,00



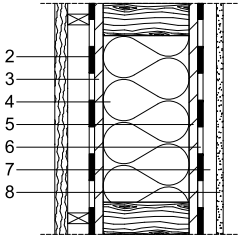
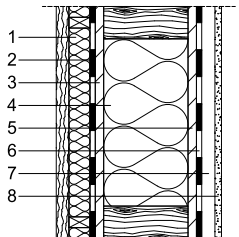
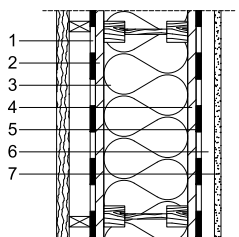
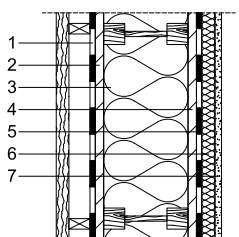
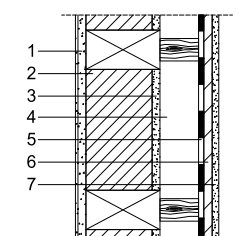
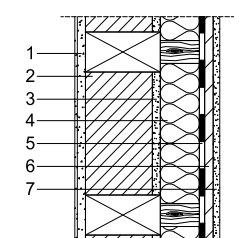
Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
24		unsaniert	0,00	0,38	0,00	0,00
		saniert	0,00	0,00	0,00	0,00
26		unsaniert	19,17	0,00	19,17	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	27,48 27,39 27,34 27,31	0,00 0,00 0,00 0,00	22,28 22,25 22,24 22,24	0,00 0,00 0,00 0,00
26.1		unsaniert	19,17	0,00	19,17	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	17,05 16,95 16,91 16,88	0,00 0,00 0,00 0,00	18,33 18,26 18,23 18,21	0,00 0,00 0,00 0,00

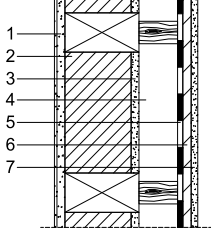
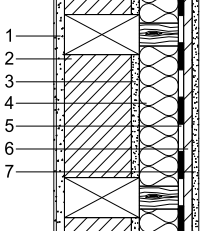
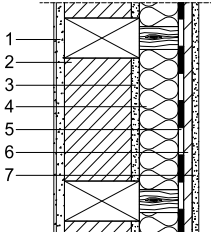
Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
27		unsaniert	19,17	0,00	19,17	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	27,48	0,00	22,28	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	27,39	0,00	22,25	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	27,34	0,00	22,24	0,00
28		unsaniert	14,30	0,00	14,30	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	17,05	0,00	18,38	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	16,96	0,00	18,30	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	16,92	0,00	18,26	0,00
29		unsaniert	17,29	0,00	17,29	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	17,44	0,00	17,43	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	17,35	0,00	17,34	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	17,30	0,00	17,30	0,00
30		unsaniert	17,29	0,00	17,29	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	17,44	0,00	17,43	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	17,35	0,00	17,34	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	17,30	0,00	17,30	0,00
31		unsaniert	17,29	0,00	17,29	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	17,44	0,00	17,43	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	17,35	0,00	17,34	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	17,30	0,00	17,30	0,00
32		unsaniert	17,29	0,00	17,29	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	17,44	0,00	17,43	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	17,35	0,00	17,34	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	17,30	0,00	17,30	0,00

Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
30		unsaniert	21,39	0,00	21,39	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	15,46	0,00	16,07	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	15,39	0,00	16,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	15,36	0,00	15,96	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	15,34	0,00	15,94	0,00
31		unsaniert	21,39	0,00	21,39	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	21,36	0,00	21,38	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	21,16	0,00	21,18	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	21,06	0,00	21,07	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	21,00	0,00	21,01	0,00
32		unsaniert	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00

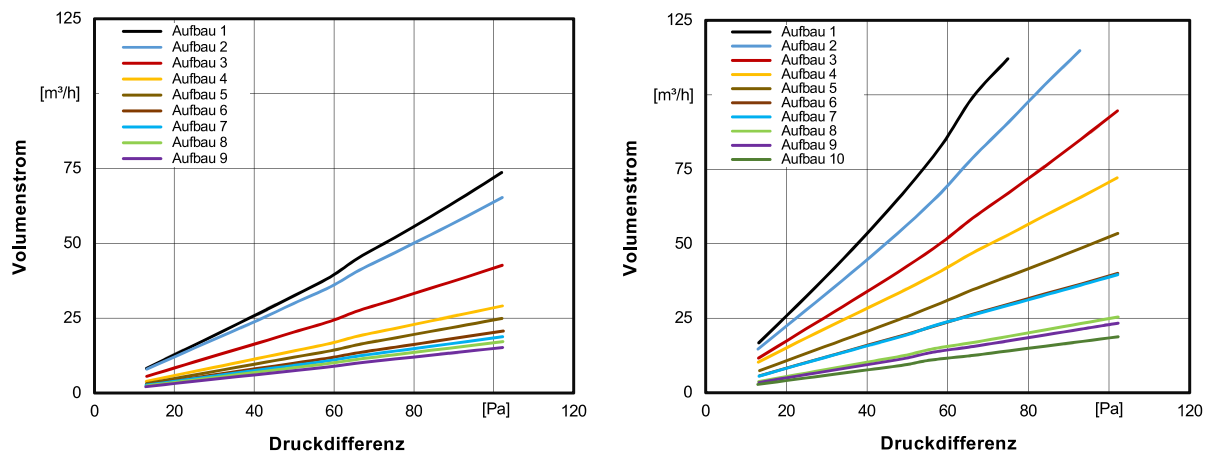
Fortsetzung Tabelle 6.11

Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse			
			Supafil®		Isofloc® L/LM	
			$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]	$U_{\max}$ [M-%]	$M_{c,\max}$ [kg/m²]
32.2		unsaniert	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
32.3		unsaniert	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,50 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00
		saniert, $q_{50} = 0,10 \text{ h}^{-1}$	0,00	0,00	0,00	0,00

## 6.8 Messtechnische Bestimmung von Volumenströmen

### 6.8.1 Regelquerschnitt

Die Messungen zur Bestimmung des Einflusses der Dämmstoffdichte auf die Luftdichtheit wurde mit den Dämmstoffen Supafil® und Isofloc® L/LM durchgeführt. Beginnend bei einer Dichte von 25 kg/m³ wurde die Dichte schrittweise um 5 kg/m³ bis zum Endwert von 70 kg/m³ erhöht und der Leckagevolumenstrom gemessen (siehe Kapitel 4.9). Die Ergebnisse sind in Bild 6.8 und Tabelle 6.12 dargestellt.



**Bild 6.8:** Gemessener Leckagevolumenstrom durch den Dämmstoff Supafil® bei verschiedenen Verdichtungsstufen des Dämmstoffes, beginnend mit einer Dichte von 25 kg/m³ in 8 Schritten bis 62 kg/m³ (links); Leckagestrom durch den Dämmstoff Isofloc® L/LM für Verdichtungsstufen von 25 kg/m³ bis 70 kg/m³ in 9 Schritten (rechts)

**Tabelle 6.12:** Darstellung der Ergebnisse der messtechnisch untersuchten Varianten am Regelquerschnitt

Bestimmung des Volumenstroms am Regelquerschnitt					
Material des eingebrachten Dämmstoffs	Aufbau Nr.	Dichte des eingebrachten Dämmstoffs [kg/m³]	Luftwechselrate bei 50 Pa $n_{50}$ [-]	Ergebnisse Leckagekoeffizient $C_L$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	Strömungsexponent $n$ [-]
Isofloc® L/LM	1	25	75,388	0,729	1,169
	2	30	61,892	0,743	1,114
	3	35	46,865	0,660	1,073
	4	40	38,242	0,758	0,985
	5	45	27,723	0,514	1,003
	6	50	21,432	0,459	0,966
	7	55	21,063	0,438	0,974
	8	60	13,702	0,310	0,952
	9	65	12,622	0,287	0,951
	10	70	10,245	0,245	0,938
Supafil®	1	25	35,269	0,426	1,112
	2	30	32,424	0,474	1,064
	3	35	21,995	0,388	1,016
	4	40	15,186	0,286	0,999
	5	45	12,901	0,228	1,015
	6	50	10,779	0,200	1,003
	7	55	9,990	0,207	0,975
	8	60	9,153	0,188	0,977
	9	62	8,100	0,168	0,974

Die Ergebnisse zeigen bei beiden verwendeten Dämmstoffen, dass mit zunehmender Verdichtung die Luftdurchlässigkeit sinkt. Jedoch ist auffällig, dass zwischen den beiden Dämmstoffen unterschiedlich viel Material verwendet werden muss, um die identischen Luftdurchlässigkeiten zu erreichen. So ist bei Isofloc® L/LM durchschnittlich ca. 10 bis 15 kg/m³ mehr Material erforderlich, um einen annähernd identischen Leckagevolumenstroms zu erzielen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Isofloc® L/LM bei einer Dichte von 35 kg/m³ einen doppelt so hohen Leckagevolumenstrom aufweist wie Supafil®. Wird hingegen die durchschnittliche Reduzierung des Volumenstroms im Bereich von 30 kg/m³ - 60 kg/m³ bei einer Erhöhung der Dichte verglichen, so ergibt sich für Isofloc® L/LM pro Schrittweite eine durchschnittliche Reduzierung des Volumenstroms von 7,5 m³/h und für Supafil® von lediglich 3,6 m³/h.

Weiterhin ist auffällig, dass sich im mittleren Bereich der betrachteten Dichte große Differenzen beim Strömungswiderstand bei vergleichsweise geringfügiger Änderung des Materialeinsatzes ergeben. Dieser Effekt ist bei niedrigen und hohen Verdichtungsgraden nicht zu beobachten.

Bei Supafil® konnte im Bereich von 30 bis 40 kg/m<sup>3</sup> eine Reduktion des Leckagevolumenstroms bei 50 Pa von ca. 10 m<sup>3</sup>/h<sup>-1</sup> erreicht werden, während sowohl oberhalb, als auch unterhalb dieses Dichtebereichs eine geringere Reduzierung des Leckagevolumenstroms auftritt. Bei Isofloc® L/LM wird ein ähnliches Phänomen beobachtet, jedoch tritt dies erst bei höheren Verdichtungsgraden auf.

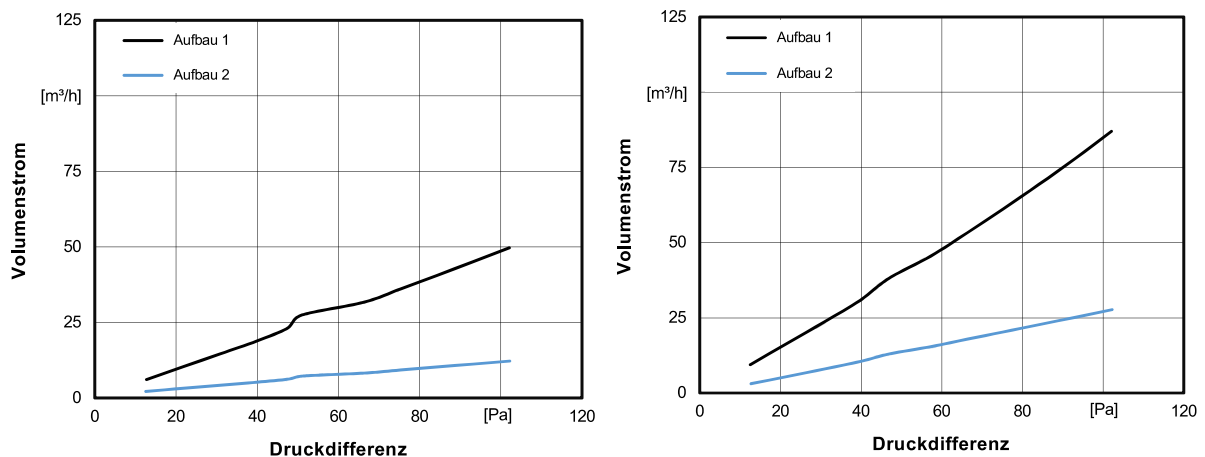
Die angesetzte Druckdifferenz weist ebenfalls einen großen Einfluss auf den gemessenen Volumenstrom auf. Im Allgemeinen lässt sich jedoch erkennen, dass der Einfluss der Druckdifferenz auf den Volumenstrom bei Erhöhung der Verdichtung abnimmt.

Beim Dämmstoff Supafil® lässt sich erkennen, dass sich eine deutliche Reduktion des Volumenstroms bei einer Verdichtung auf 35 - 40 kg/m<sup>3</sup> einstellt. Für die weiteren Untersuchungen wird daher beim Dämmstoff Supafil® eine Eingangsdichte von 35 kg/m<sup>3</sup> festgelegt und als erhöhter Verdichtungsgrad 55 kg/m<sup>3</sup>. Der Volumenstrom bei der Verwendung von Isofloc® L/LM verringert sich kontinuierlich mit Erhöhung des Verdichtungsgrades. Ab einer Dichte von 60 kg/m<sup>3</sup> stellt sich keine deutliche Reduktion des Volumenstroms mehr ein. Daher erfolgt der Ansatz einer Eingangsdichte von 45 kg/m<sup>3</sup> und ein erhöhten von 60 kg/m<sup>3</sup>.

### **6.8.2 Randbereich von Bauteilanschlüssen**

Die Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessungen im Randbereich von Bauteilanschlüssen sind in Bild 6.9 dargestellt und die Werte für die Leckagerate  $n_{50}$ , den Leckagekoeffizienten  $C_L$  und den Strömungsexponenten  $n$  in Tabelle 6.13.

Dämmstoffunabhängig zeigt sich, dass sich bei gerichteter Durchströmung ein höherer Leckagevolumenstrom einstellt, als bei Messungen im geöffneten Prüfstand. Wie in Kapitel 6.6 beschrieben, kommt es beim Einblasen des Dämmstoffs zu ungleichförmigen Dichteverteilungen über den gesamten Querschnitt. An den Seiten weist der Dämmstoff eine geringere Dichte als in der Mitte (an der Einblasstelle) auf. Dadurch kann es mit zunehmender Druckdifferenz zu einer erhöhten Flankenströmung kommen, was zu einer Erhöhung des Luftvolumenstroms in diesen Bereichen führt. Durch die Nachverdichtung des Dämmstoffs im Randbereich kehrt sich dieser Effekt um und es stellen sich niedrigere Leckagevolumenströme im Vergleich zu identischer Verdichtung ein. Auch hier zeigt sich, dass der sich einstellende Volumenstrom von Isofloc® L/LM, obwohl die eingebrachte Dichte von 45 kg/m<sup>3</sup> um 15 kg/m<sup>3</sup> erhöht wird, über dem Volumenstrom bei Verwendung von Supafil® liegt. Im Allgemeinen lässt sich jedoch für beide Dämmstoffe durch eine nachträgliche Verdichtung im Randbereich eine deutliche Verringerung des Volumenstroms erzielen.



**Bild 6.9:** Supafil® im Regelquerschnittsprüfstand (Prüfstand mit einer Platte mit umlaufendem Spalt von 50 mm abgedeckt) (links) und Leckagevolumenstrom bei einer Dichte von 35 kg/m³ und Nachverdichtung im Randbereich auf 55 kg/m³; Isofloc® L/LM bei einer Dichte von 45 kg/m³ sowie Nachverdichtung auf 60 kg/m³ (rechts)

**Tabelle 6.13:** Darstellung der Ergebnisse der messtechnisch untersuchten Varianten zur Ermittlung von Leckagevolumenströme im Randbereich von Bauteilen

Bestimmung des Leckagevolumenstroms im Randbereich von Bauteilanschlüssen (50 mm umlaufender Spalt)					
Material des eingebrachten Dämmstoffs	Aufbau Nr.	Dichte des eingebrachten Dämmstoffs [kg/m³]	Luftwechselrate bei 50 Pa $n_{50}$ [-]	Ergebnisse Leckagekoeffizient $C_L$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	Strömungsexponent $n$ [-]
Isofloc® L/LM	1	45	42,379	0,575	1,083
	2	45 / 60	14,227	0,242	1,025
Supafil®	1	35	26,051	0,509	0,989
	2	35 / 55	7,058	0,235	0,853

### 6.8.3 Typische Leckagen

In Bild 6.10 und Bild 6.11 sind die Messergebnisse für den Dämmstoff Supafil® für unterschiedliche Ausführungen von Leckagen dargestellt. Hierbei ist ein Einfluss unterschiedlicher dachseitiger Abdeckungen auf die gemessenen Volumenströme erkennbar. Je besser die Ausgangssituation, desto größer ist der Einfluss des Dämmstoffs auf die Luftdichtheit. Der Effekt der Nachverdichtung des Dämmstoffs zwischen Wandanschluss und Streichsparren trägt hierbei nicht wesentlich zu einer Verbesserung der Durchströmung bei.

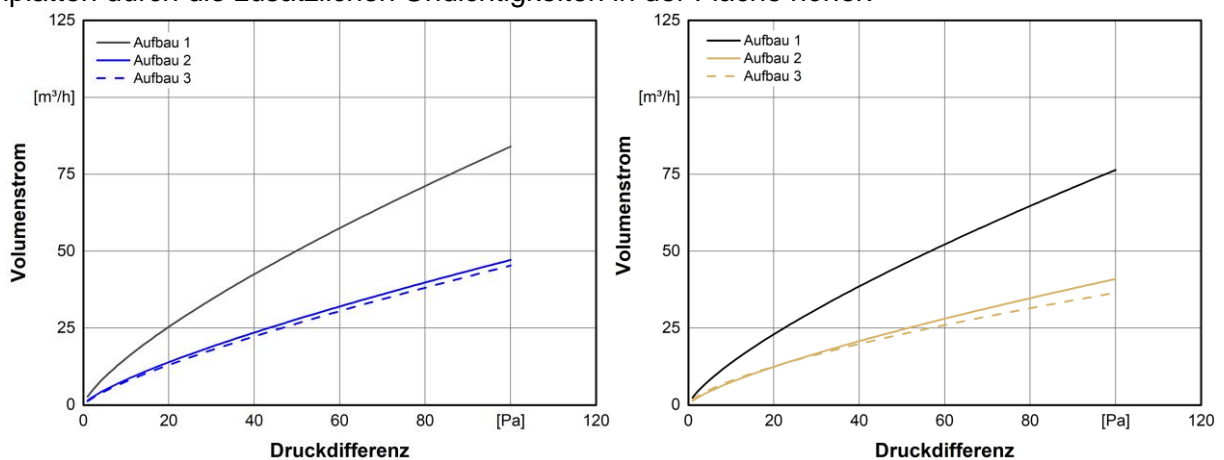
Durch ein gleichmäßiges, flächiges Einbringen von Schüttdämmstoff mit den festgelegten Verdichtungsgraden (Supafil®: 35 kg/m³ und Isofloc® L/LM: 45 kg/m³) kann bereits eine signifikante Reduktion des Leckagevolumenstroms im Bereich der Leckage erzielt werden. Eine gezielte Nachverdichtung im Bereich der Leckage führt zwar zu einer weiteren Reduktion des Leckagevolumenstroms, allerdings in einem deutlich geringeren Verhältnis als bei den vorangegangenen Messungen. Der Vergleich zeigt, dass bei der offenen Konstruktion und einer Druckdifferenz von 50 Pa das Einbringen des Dämmstoffs Supafil® den Luftvolumenstrom um ca. 53 % reduziert. Mit Isofloc® L/LM wird hingegen eine Reduktion von ca. 41% erreicht. Eine Nachverdichtung mit Supafil® im Bereich des Streichsparrens bewirkt eine weitere Reduktion von 5 %. Wohingegen bei Isofloc® L/LM kein Einfluss der Nachverdichtung erkennbar ist.

Beim offenen Prüfstand sind erwartungsgemäß die höchsten Volumenströme feststellbar. Durch eine aufliegende Unterspannbahn lässt sich eine Reduktion des Volumenstroms erzielen, durch Abdecken des Prüfstandes durch eine Platte mit umlaufendem Spalt kann der Volumenstrom

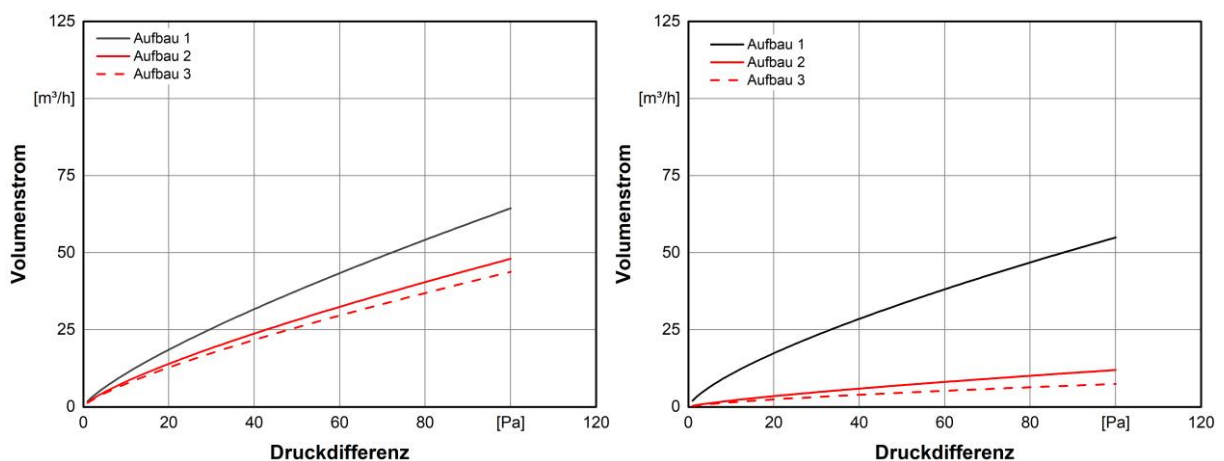
weiter reduziert werden. Beim Versuchstand mit verklebter Unterspannbahn ergeben sich die geringsten Volumenströme. Wird zusätzlich noch Dämmstoff eingebracht lässt sich bei der Verwendung und Nachverdichtung von Supafil® ein Leakagevolumenstrom von maximal 8 m³/h erreichen, siehe Bild 6.11. Die Verringerung des Volumenstroms durch Aufbringen der Schüttdämmung ist in diesem Fall besonders groß.

Die Ergebnisse bei Verwendung von Isofloc® L/LM sind ähnlich. Die Gegenüberstellung der Messergebnisse am Prüfstand mit dreiseitig verklebter Unterspannbahn, zeigt eine Verringerung des Volumenstroms um ca. 79 %.

Bei allen Messungen wurde eine Innenbeplankung aus Profilholz verwendet. Eine Auswirkung der Innenbeplankung auf den Leakagevolumenstrom ist nicht eindeutig zu erkennen. Lediglich der Gesamtvolumenstrom über das gesamte Bauteil ist bei Profilholzpaneelen im Vergleich zu Gipskartonplatten durch die zusätzlichen Undichtigkeiten in der Fläche höher.



**Bild 6.10:** Gemessener Leakagevolumenstrom ohne Schüttdämmstoff, mit Supafil® bei einer Dichte von 35 kg/m³ sowie einer Nachverdichtung im Bereich des Streichsparrens von 35 kg/m³ auf 55 kg/m³; der Prüfstand ist nach oben offen (links); der Prüfstand ist nach oben mit einer Unterspannbahn abgedeckt; die Unterspannbahn ist auf den Sparren getackert und auf den Seiten des Versuchstands lose aufliegend (rechts)



**Bild 6.11:** Gemessener Leakagevolumenstrom ohne Schüttdämmstoff, mit Supafil® bei einer Dichte von 35 kg/m³ sowie einer Nachverdichtung im Bereich des Streichsparrens von 35 kg/m³ auf 55 kg/m³; der Prüfstand ist mit einer Platte mit umlaufendem Spalt von 50 mm abgedeckt (links); der Prüfstand ist mit einer Unterspannbahn abgedeckt, ein Spalt von 5 mm über dem Streichsparren bleibt offen, die übrigen Seiten der Unterspannbahn sind luftdicht verklebt (rechts)

In Tabelle 6.14 sind die Mittelwerte der Volumenstrommessung am offenen Prüfstand bei Verwendung des Dämmstoffs Supafil® zusammengestellt. Aufgeführt sind die Ergebnisse ohne Schüttdämmstoff (Aufbau 1), mit Schüttdämmstoff bei einer Dichte von 35 kg/m³ (Aufbau 2) und



die Messwerte bei einer Nachverdichtung des Dämmstoffs auf 55 kg/m<sup>3</sup>. Weiterhin sind die abgeleiteten Faktoren der Regressionskurve  $C_L$  und  $n$  sowie der  $n_{50}$ -Wert angegeben.

**Tabelle 6.14:** Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am nach oben offenem Prüfstand bei Verwendung von Supafil®

Mittelwerte der Volumenströme [m³/h]						
Dichte [kg/m³]	ohne Schüttdämmstoff		35		35/55	
$C_L$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	2,75		1,43		1,28	
$n$ [-]	0,74		0,76		0,77	
$n_{50}$ [-]	53,52		29,79		28,26	
	$\Delta p$	V	$\Delta p$	V	$\Delta p$	V
	10	15,192	10	8,244	10	7,631
	20	25,420	20	13,936	20	13,047
	30	34,352	30	18,946	30	17,856
	40	42,533	40	23,558	40	22,308
	50	50,199	50	27,896	50	26,512
	60	57,478	60	32,027	60	30,528
	70	64,449	70	35,993	70	34,396
	80	71,167	80	39,824	80	38,140
	90	77,672	90	43,540	90	41,779
	100	83,994	100	47,157	100	45,328

Die Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am oben offenen Prüfstand, der mit einer Unterspännbahn abgedeckt wurde, können Tabelle 6.15 entnommen werden. Die Werte für den Leckagekoeffizienten  $C_L$ , den Strömungsexponenten  $n$  und die Luftwechselrate bei 50 Pa  $n_{50}$  sind ebenfalls dargestellt.

**Tabelle 6.15:** Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am mit einer Unterspännbahn abgedeckten Prüfstand bei Verwendung von Supafil®

Mittelwerte der Volumenströme [m³/h]						
Dichte [kg/m³]	ohne Schüttdämmstoff		35		35/55	
$C_L$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	2,46		1,35		1,71	
$n$ [-]	0,75		0,74		0,66	
$n_{50}$ [-]	48,58		25,08		24,55	
	$\Delta p$	V	$\Delta p$	V	$\Delta p$	V
	10	13,839	10	7,419	10	7,816
	20	23,275	20	12,391	20	12,350
	30	31,547	30	16,726	30	16,140
	40	39,143	40	20,695	40	19,514
	50	46,274	50	24,410	50	22,611
	60	53,055	60	27,936	60	25,502
	70	59,557	70	31,312	70	28,233
	80	65,831	80	34,564	80	30,834
	90	71,911	90	37,711	90	33,327
	100	77,824	100	40,769	100	35,727

In Tabelle 6.16 sind Messergebnisse bei Einsatz von Supafil® dargestellt. Der Versuchsstand ist dabei mit einer Platte abgedeckt und es ergibt sich umlaufend ein Spalt von 50 mm.

**Tabelle 6.16:** Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am Prüfstand mit umlaufendem Spalt von 50 mm bei Verwendung von Supafil®

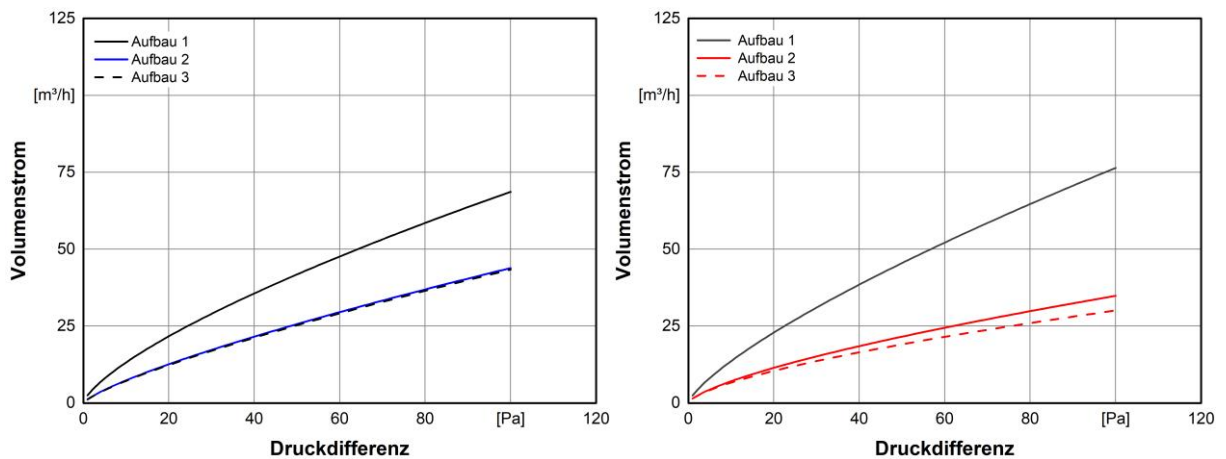
Mittelwerte der Volumenströme [m³/h]						
Dichte [kg/m³]	ohne Schüttdämmstoff		35		35/55	
$C_L$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	1,83		1,41		1,29	
$n$ [-]	0,77		0,77		0,77	
$n_{50}$ [-]	40,18		30,09		27,49	
	$\Delta p$	$V$	$\Delta p$	$V$	$\Delta p$	$V$
	10	10,776	10	8,303	10	7,596
	20	18,376	20	14,158	20	12,953
	30	25,109	30	19,347	30	17,700
	40	31,336	40	24,144	40	22,089
	50	37,210	50	28,670	50	26,230
	60	42,818	60	32,991	60	30,183
	70	48,214	70	37,149	70	33,987
	80	53,436	80	41,172	80	37,668
	90	58,508	90	45,080	90	41,244
	100	63,453	100	48,890	100	44,729

Tabelle 6.17 zeigt die Mittelwerte der Volumenströme sowie die ermittelten Werte für den Leckagekoeffizienten  $C_L$ , den Strömungsexponenten  $n$  und der Leckagerate bei 50 Pa  $n_{50}$  bei Verwendung von Supafil®. Der Prüfstand wurde mit einer Unterspannbahn abgedeckt. Ein Spalt von 5 mm über dem Streichsparren bleibt offen, die übrigen Seiten wurden luftdicht verklebt.

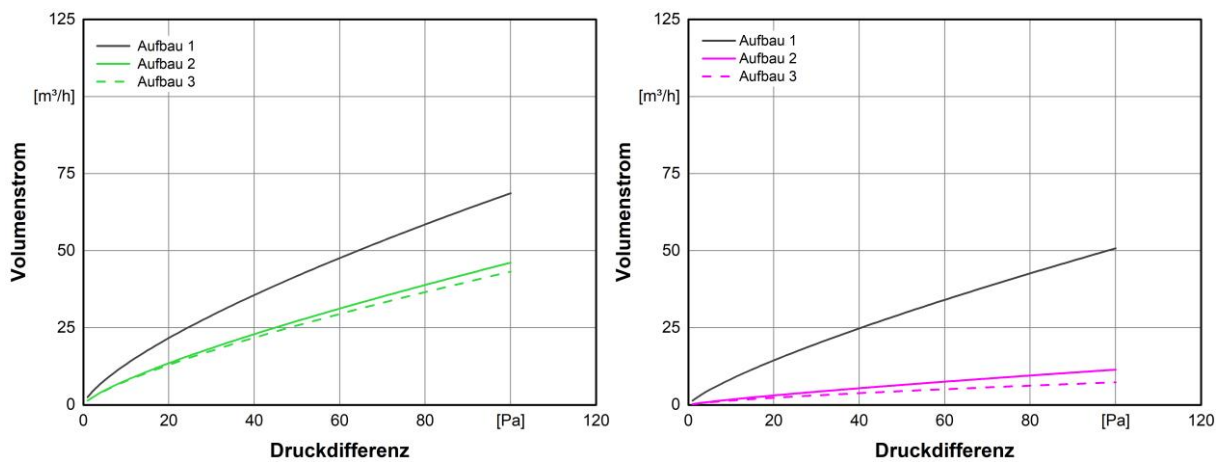
**Tabelle 6.17:** Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am mit einer Unterspannbahn abgedeckten Prüfstand und umlaufendem Spalt von 5 mm bei Verwendung von Supafil®

Mittelwerte der Volumenströme [m³/h]						
Dichte [kg/m³]	ohne Schüttdämmstoff		35		35/55	
$C_L$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	2,05		0,35		0,30	
$n$ [-]	0,71		0,76		0,69	
$n_{50}$ [-]	35,14		7,51		4,90	
	$\Delta p$	$V$	$\Delta p$	$V$	$\Delta p$	$V$
	10	10,514	10	2,014	10	1,469
	20	17,198	20	3,411	20	2,370
	30	22,936	30	4,642	30	3,136
	40	28,133	40	5,776	40	3,824
	50	32,963	50	6,844	50	4,461
	60	37,518	60	7,861	60	5,059
	70	41,858	70	8,838	70	5,627
	80	46,020	80	9,782	80	6,170
	90	50,034	90	10,698	90	6,692
	100	53,920	100	11,590	100	7,196

Die Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung für unterschiedliche Ausführungen von Leckagen bei Verwendung von Isofloc® L/LM sind in Bild 6.12 und Bild 6.13 dargestellt.



**Bild 6.12:** Gemessener Leckagevolumenstrom ohne Schüttdämmstoff, mit Isofloc® L/LM bei einer Dichte von  $45 \text{ kg/m}^3$  sowie einer Nachverdichtung im Bereich des Streichsparrens von  $45 \text{ kg/m}^3$  auf  $60 \text{ kg/m}^3$ ; der Prüfstand ist nach oben offen (links); der Prüfstand ist nach oben mit einer Unterspannbahn abgedeckt. Die Unterspannbahn ist auf den Sparren getackert und auf den Seiten des Versuchsstandes lose aufliegend (rechts)



**Bild 6.13:** Gemessener Leckagevolumenstrom ohne Schüttdämmstoff, mit Isofloc® L/LM bei einer Dichte von  $45 \text{ kg/m}^3$  sowie einer Nachverdichtung im Bereich des Streichsparrens von  $45 \text{ kg/m}^3$  auf  $60 \text{ kg/m}^3$ ; der Prüfstand ist mit einer Platte mit umlaufendem Spalt von 50 mm abgedeckt (links); der Prüfstand ist mit einer Unterspannbahn abgedeckt, ein Spalt von 5 mm über dem Streichsparren bleibt offen, die übrigen Seiten der Unterspannbahn sind luftdicht verklebt (rechts)

Die Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am oben offenen Prüfstand bei Verwendung von Isofloc® L/LM sind in Tabelle 6.18 zusammengestellt. Es sind Messwerte für den Prüfstand ohne Schüttdämmstoffe, für eine Dichte von  $45 \text{ kg/m}^3$  und bei einer Nachverdichtung auf  $60 \text{ kg/m}^3$  aufgeführt. Auch die abgeleiteten Faktoren der Regressionskurve sind angegeben.

**Tabelle 6.18:** Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am nach oben offenem Prüfstand bei Verwendung von Isofloc® L/LM

Mittelwerte der Volumenströme [m³/h]						
Dichte [kg/m³]	ohne Schüttdämmstoff		45		45/60	
$C_L$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	2,54		1,24		1,20	
$n$ [-]	0,72		0,77		0,78	
$n_{50}$ [-]	44,57		27,36		26,95	
	$\Delta p$	$V$	$\Delta p$	$V$	$\Delta p$	$V$
	10	13,330	10	7,302	10	7,213
	20	21,957	20	12,451	20	12,385
	30	29,401	30	17,014	30	16,992
	40	36,167	40	21,233	40	21,267
	50	42,471	50	25,213	50	25,310
	60	48,429	60	29,013	60	29,178
	70	54,113	70	32,670	70	32,906
	80	59,574	80	36,208	80	36,518
	90	64,847	90	39,645	90	40,032
	100	69,957	100	42,995	100	43,460

Die ermittelten Volumenströme am Prüfstand, der mit einer Unterspannbahn abgedeckt wurde sind finden sich in Tabelle 6.19. Die Werte für den Leckagekoeffizienten, den Strömungsexponenten und der Leckagerate bei 50 Pa sind ebenfalls für die Offset- Messung, für eine Dichte von 45 kg/m³ sowie für eine Nachverdichtung auf 60 kg/m³ angegeben.

**Tabelle 6.19:** Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am mit einer Unterspannbahn abgedeckten Prüfstand bei Verwendung von Isofloc® L/LM

Mittelwerte der Volumenströme [m³/h]						
Dichte [kg/m³]	ohne Schüttdämmstoff		45		45/60	
$C_L$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	2,45		1,44		1,46	
$n$ [-]	0,75		0,69		0,66	
$n_{50}$ [-]	48,49		22,37		20,58	
	$\Delta p$	$V$	$\Delta p$	$V$	$\Delta p$	$V$
	10	13,777	10	7,053	10	6,673
	20	23,171	20	11,378	20	10,545
	30	31,406	30	15,051	30	13,780
	40	38,968	40	18,356	40	16,661
	50	46,067	50	21,412	50	19,305
	60	52,818	60	24,282	60	21,774
	70	59,291	70	27,007	70	24,106
	80	65,537	80	29,614	80	26,326
	90	71,589	90	32,121	90	28,455
	100	77,476	100	34,543	100	30,504

Die in Tabelle 6.20 und Tabelle 6.21 aufgeführten Ergebnisse ergeben sich aus den Volumenstrommessungen an einem Prüfstand mit einem umlaufenden Spalt von 50 mm sowie bei Abdeckung des Prüfstandes mit einer Unterspannbahn. Im Bereich des Streichsparrens bleibt ein offener Spalt von 5 mm. Die übrigen Seiten der Unterspannbahn wurden luftdicht verklebt. Auch hier wurden Messungen ohne Dämmstoff, bei einer Dichte von 45 kg/m³ und bei einer Nachverdichtung auf 60 kg/m³ durchgeführt.

**Tabelle 6.20:** Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am Prüfstand mit umlaufendem Spalt von 50 mm bei Verwendung von Isofloc® L/LM

Mittelwerte der Volumenströme [m³/h]						
Dichte [kg/m³]	ohne Schüttdämmstoff		45		45/60	
C <sub>L</sub> [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	2,54		1,38		1,38	
n [-]	0,72		0,76		0,75	
n <sub>50</sub> [-]	44,57		28,99		27,44	
	Δp	V	Δp	V	Δp	V
	10	13,330	10	7,941	10	7,760
	20	21,957	20	13,448	20	13,051
	30	29,401	30	18,302	30	17,690
	40	36,167	40	22,774	40	21,949
	50	42,471	50	26,983	50	25,948
	60	48,429	60	30,994	60	29,750
	70	54,113	70	34,846	70	33,397
	80	59,574	80	38,568	80	36,914
	90	64,847	90	42,180	90	40,324
	100	69,957	100	45,696	100	43,639

**Tabelle 6.21:** Ergebnisse der Leckagevolumenstrommessung am mit einer Unterspannbahn abgedeckten Prüfstand und umlaufendem Spalt von 5 mm bei Verwendung von Isofloc® L/LM

Mittelwerte der Volumenströme [m³/h]						
Dichte [kg/m³]	ohne Schüttdämmstoff		45		45/60	
C <sub>L</sub> [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	1,39		0,27		0,27	
n [-]	0,78		0,82		0,71	
n <sub>50</sub> [-]	31,50		6,92		4,76	
	Δp	V	Δp	V	Δp	V
	10	8,376	10	1,784	10	1,385
	20	14,382	20	3,149	20	2,265
	30	19,732	30	4,391	30	3,021
	40	24,696	40	5,560	40	3,705
	50	29,391	50	6,676	50	4,341
	60	33,882	60	7,753	60	4,941
	70	38,211	70	8,797	70	5,513
	80	42,406	80	9,815	80	6,061
	90	46,486	90	10,810	90	6,590
	100	50,468	100	11,786	100	7,102

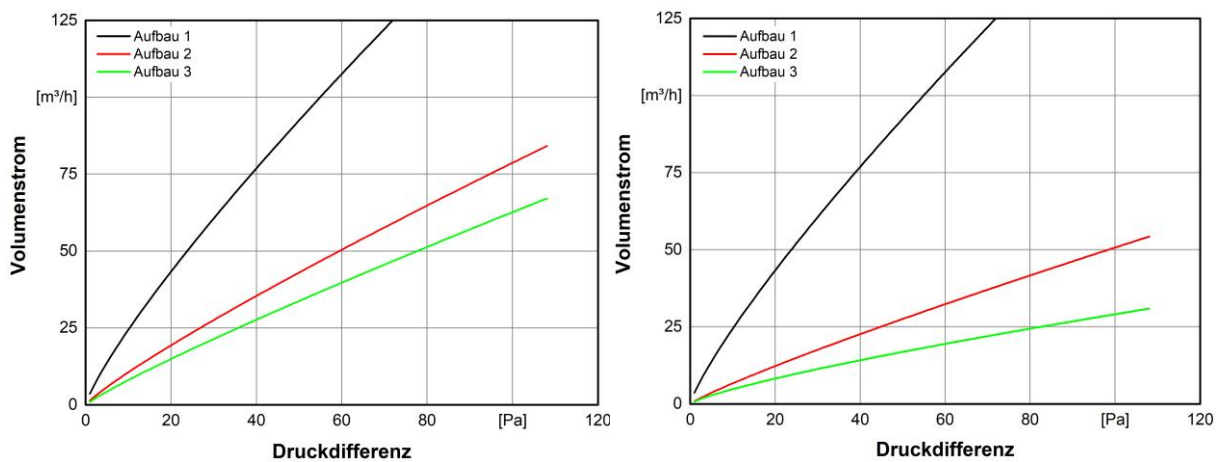
## 6.9 Versuch am Großobjekt in situ

Bei den Untersuchungen am Dachquerschnitt zeigt sich eine ähnliche Beziehung zwischen Leckagevolumenstrom und Druckdifferenz wie bei den Messungen im Regelprüfstand.

Auch hier ist ersichtlich, dass durch die Applikation von Schüttdämmstoffen eine deutliche Verringerung des Leckagevolumenstroms erreicht wird. Durch Nachverdichtung lässt sich der Volumenstroms weiter reduzieren.

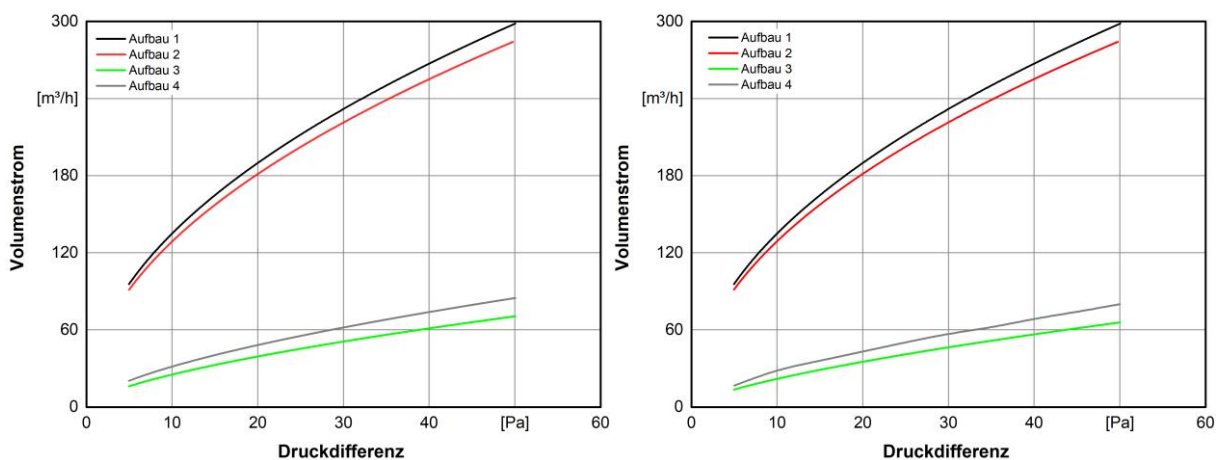
Bei Verwendung von Supafil® wurde flächig ein erhöhter Verdichtungsgrad eingebracht, wohingegen bei Messung mit Isofloc® L/LM lediglich im Wand- und Bodenanschlussbereich und damit im Bereich der vorliegenden Leckagen nachverdichtet wurde. Somit ist eine Nachverdichtung im Bereich von vorhandenen oder vermuteten Leckagen und im Bereich von Bauteilanschlüssen sinnvoll.

Die Ergebnisse sind in Bild 6.14 dargestellt.



**Bild 6.14:** Gemessener Leckagevolumenstrom (Unterdruck) am Dachquerschnitt ohne Schüttdämmstoff (Aufbau 1), links mit Supafil® bei einer mittleren Dichte von ca. 35 kg/m<sup>3</sup> (Aufbau 2) sowie bei einer erhöhten Verdichtung von ca. 55 kg/m<sup>3</sup> (Aufbau 3); rechts mit Isofloc® L/LM bei einer mittleren Dichte von 45 kg/m<sup>3</sup> (Aufbau 2) sowie einer anschließenden Nachverdichtung im Wandanschlussbereich auf 60 kg/m<sup>3</sup> (Aufbau 3)

Am Wandmodell wurden neben dem Einsatz von Schüttdämmstoffen auch der Einfluss einer zusätzlichen sprühbaren Luftdichtheitsschicht untersucht. Hierzu wurde die Flüssigabdichtung „Aerosana Visconn“ vierlagig auf den oberen und unteren sowie die seitlichen Wandabschlüsse aufgesprüht und dann der Schüttdämmstoff injiziert. Anschließend wurde der Leckagevolumenstrom ermittelt. In Bild 6.15 sind die Volumenströme bei der Offset-Messung (Aufbau 1), bei Applikation der sprühbaren Luftdichtheitsschicht (Aufbau 2) und bei Kombination von Schüttdämmstoffen und sprühbarer Luftdichtheitsschicht dargestellt (Aufbau 4). Durch Differenzenbildung der Volumenströme aus den beschriebenen Messungen, wurde der Leckagevolumenstrom bei Verwendung der Schüttdämmstoffe ohne Luftdichtheitsschicht ermittelt (Aufbau 3). Es ist erkennbar, dass unabhängig vom verwendeten Dämmstoff, bereits durch das Einbringen von Schüttdämmstoffen in das Wandmodell eine deutliche Reduktion des Leckagevolumenstroms erzielt werden kann. Durch das zusätzliche Aufsprühen einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht, kann der Leckagevolumenstrom zwar weiter reduziert werden, der Effekt ist jedoch im Vergleich zur Applikation der Einblasdämmstoffe geringer.



**Bild 6.15:** Gemessener Leckagevolumenstrom am Wandmodell ohne Schüttdämmstoff, ohne sprühbare LDS (Aufbau 1), mit vierlagiger, sprühbarer LDS (Aufbau 2) links: mit Supafil® bei einer mittleren Dichte von 35 kg/m<sup>3</sup> (Aufbau 3) sowie mit Supafil® bei einer mittleren Dichte von 35 kg/m<sup>3</sup> und sprühbarer LDS (Aufbau 4); rechts: mit Isofloc® L/LM bei einer mittleren Dichte von 45 kg/m<sup>3</sup> (Aufbau 3) sowie mit Isofloc® L/LM bei einer mittleren Dichte von 45 kg/m<sup>3</sup> und sprühbarer LDS (Aufbau 4)

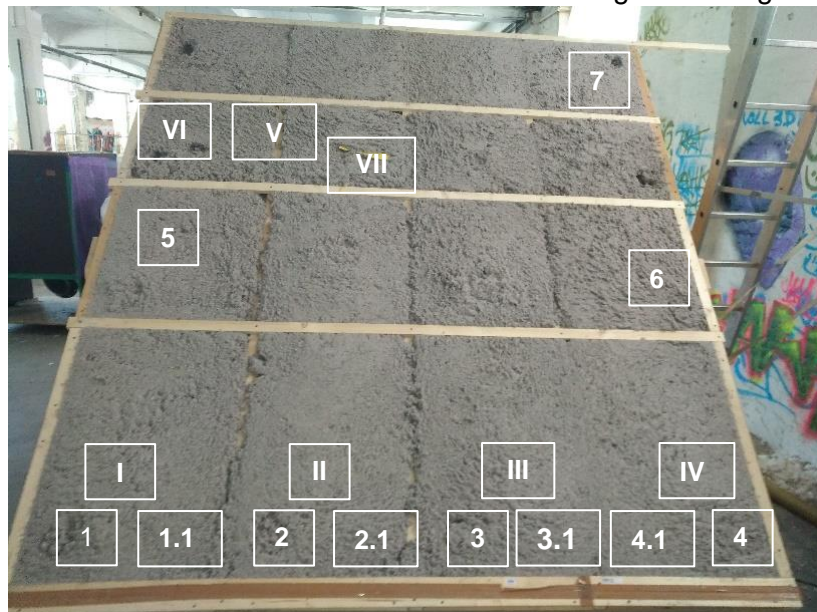
### 6.9.1 Bewertung unter Einfluss einer Freibewitterung

Wie in Kapitel 4.10.1 beschrieben, wurde nach dem Öffnen der Dachkonstruktion an verschiedenen Stellen die Dichte und die relative Luftfeuchte des Dämmstoffs gemessen. In Tabelle 6.22 ist die Zuordnung der Messergebnisse zu der jeweiligen Versuchsanordnung aufgeführt.

**Tabelle 6.22:** Übersicht der Versuche und Zuordnung der Messergebnisse

Applikations- technik		Dämmstoffdichte		Mess- stellen	Dichte [kg/m³]		Luftfeuchte [%]
		Supafil®	Isofloc® L/LM		vor der Windan- strömung	nach der Windan- strömung	nach der Beregnung
Einblas- nadel	Schlauch	35 kg/m³	45 kg/m³				
	x	x		Bild 6.21	Tabelle 6.29	-	Tabelle 6.30
x			x	Bild 6.17	Tabelle 6.26	Tabelle 6.27	Tabelle 6.28
	x		x	Bild 6.16	Tabelle 6.23	Tabelle 6.24	Tabelle 6.25
	x	x		Bild 6.21	direktes Besprühen des Dämmstoffes mit Wasser		Tabelle 6.31
	x		x	-			-

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Versuche im Dachmodell ohne Kniestock, mit Isofloc® L/LM (geplante Dichte 45 kg/m³) bei Applikation mit dem Schlauch aufgeführt. Bild 6.16 zeigt den offenen Versuchsaufbau mit den gekennzeichneten Messstellen zur Bestimmung der Dichte und der relativen Feuchte vor und nach der zusätzlichen Windanströmung und Beregnung.



**Bild 6.16:** Gewählte Messstellen am geöffnetem Dachmodell mit dem Dämmstoff Isofloc® L/LM nach dem Beregnungsversuch (Applikationstechnik Schlauch)

In Tabelle 6.23 und Tabelle 6.24 sind die Ergebnisse der Dichtbestimmung vor und nach der Beregnung und Windanströmung zusammengestellt. Weiterhin sind Durchschnittswert, Standardabweichung sowie Minimum, Median und Maximum der Dichte des Dämmstoffs aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Dichteverteilung über das Dachmodell inhomogen ist. Die Dichten schwankten zwischen 25 kg/m³ und 47 kg/m³ bei einer Standardabweichung 7,4 kg/m³. Nach der Freibewitterung zeigen sich ähnliche Varianzen bei der Dichteverteilung. Ein Einfluss der Windanströmung auf die Dichteverteilung ist somit nicht erkennbar.

**Tabelle 6.23:** Ergebnisse des Dämmstoffs Isofloc® L/LM (Applikation mit dem Schlauch) vor dem Anström- und Beregnungsversuchs

Isofloc® L/LM (geplante Dichte 45 kg/m³) bei Applikation mit dem Schlauch		
Nr.	Gewicht der Probe [g]	Dichte der Probe [kg/m³]
1	90,0	47,0
2	28,0	25,0
3	69,0	35,0
4	52,0	29,0
5	85,0	39,0
6	55,0	36,0
7	52,0	29,0
durchschnittliche Dichte		34,3
Standardabweichung		7,4
Minimum		25,0
Median		35,0
Maximum		47,0

**Tabelle 6.24:** Ergebnisse des Dämmstoffs Isofloc® L/LM (Applikation mit dem Schlauch) nach dem Anström- und Beregnungsversuchs

Isofloc® L/LM (geplante Dichte 45 kg/m³) bei Applikation mit dem Schlauch		
Nr.	Gewicht der Probe [g]	Dichte der Probe [kg/m³]
1.1	44,0	34,0
2.1	63,0	38,0
3.1	82,0	51,0
4.1	66,0	41,0
durchschnittliche Dichte		41,0
Standardabweichung		7,2
Minimum		34,0
Median		39,5
Maximum		51,0

In Tabelle 6.25 sind die Ergebnisse der Messung der relativen Luftfeuchte im Dämmstoff nach der Beregnung und die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte der Umgebung aufgeführt. Bei Umgebungsbedingungen von 10 °C und 65 % relativer Luftfeuchte, beträgt die durchschnittliche relative Luftfeuchte im Dämmstoff Isofloc® L/LM bei Applikation mit dem Schlauch nach der Beregnung 48,6 % bei gleicher Temperatur und ist damit deutlich geringer als die der Umgebungsluft.

**Tabelle 6.25:** Ergebnisse der Feuchtemessung im Dämmstoff nach der Beregnung

Isofloc® L/LM (geplante Dichte 45 kg/m³) bei Applikation mit dem Schlauch		
Nr.	Umgebungsbedingungen: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	relative Luftfeuchte im Dämmstoff nach der Beregnung [%]
I	10 °C und 65 % r. F.	51,0
II		50,0
III		49,0
IV		48,0
V		48,0
VI		47,0
VII		47,0

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Versuche im Dachmodell ohne Kniestock, mit Isofloc® L/LM (geplante Dichte 45 kg/m³) und der Applikationstechnik Einblasnadel aufgeführt. Der Versuchsaufbau mit den eingetragenen Messstellen zur Bestimmung der Dichte und der relativen Luftfeuchte vor und nach der zusätzlichen Beregnung ist in Bild 6.17 dargestellt.





**Bild 6.17:** Gewählte Messstellen am geöffnetem Dachmodell mit dem Dämmstoff Isofloc® L/LM nach dem Beregnungsversuch (Applikationstechnik Einblasnadel)

Die Ergebnisse der Dichtebestimmung vor und nach der Freibewitterung sind in Tabelle 6.26 und Tabelle 6.27 aufgeführt. Wie in Kapitel 6.2 beschrieben, ist die Einblasnadel für flächige Anwendungen weniger geeignet. Daher ergeben sich hierfür deutlich geringere Dichten im Vergleich zu der Applikation mit dem Schlauch und der geplanten Dichte. Bei Gegenüberstellung der Messergebnisse, lassen sich nur geringfügige Unterschiede bei den sich einstellenden Dichten erkennen. Ein Einfluss der Windanströmung und der Beregnung auf die Dichteverteilung im Dachmodell konnte nicht festgestellt werden.

**Tabelle 6.26:** Ergebnisse der Dichtemessung von Isofloc® L/LM vor dem Anström- und Beregnungsversuch

Isofloc® L/LM (geplante Dichte 45 kg/m³) bei Applikation mit der Einblasnadel		
Nr.	Gewicht Probe [g]	Dichte Probe [kg/m³]
1	41,0	30,0
2	36,0	25,0
3	43,0	28,0
4	38,0	25,0
5	44,0	29,0
6	54,0	34,0
durchschnittliche Dichte		28,5
Standardabweichung		3,4
Minimum		25
Median		28,5
Maximum		34

**Tabelle 6.27:** Ergebnisse der Dichtemessung von Isofloc® L/LM nach dem Anström- und Beregnungsversuch

Isofloc® L/LM (geplante Dichte 45 kg/m³) bei Applikation mit der Einblasnadel		
Nr.	Gewicht Probe [g]	Dichte Probe [kg/m³]
1.1	35,0	< 25,0
2.1	40,0	25,0
3.1	45,0	28,0
4.1	65,0	41,0
5.1	45,0	28,0
6.1	34,0	< 25,0
durchschnittliche Dichte		28,7
Standardabweichung		6,2
Minimum		25,0
Median		26,5
Maximum		41,0

In Tabelle 6.28 sind die Ergebnisse der Messung der relativen Luftfeuchte im Dämmstoff nach der Beregnung sowie die Temperatur und relative Luftfeuchte der Umgebung angegeben. Die durchschnittliche relative Luftfeuchte im Dämmstoff Isofloc® L/LM bei 10 °C und 70 % relative Feuchte der Umgebungsluft beträgt 67 %. Es ist kein Anstieg der relativen Feuchte im Dämmstoff durch Beregnung des Bauteils erkennbar.

**Tabelle 6.28:** Ergebnisse der Feuchtemessung im Dämmstoff nach der Beregnung

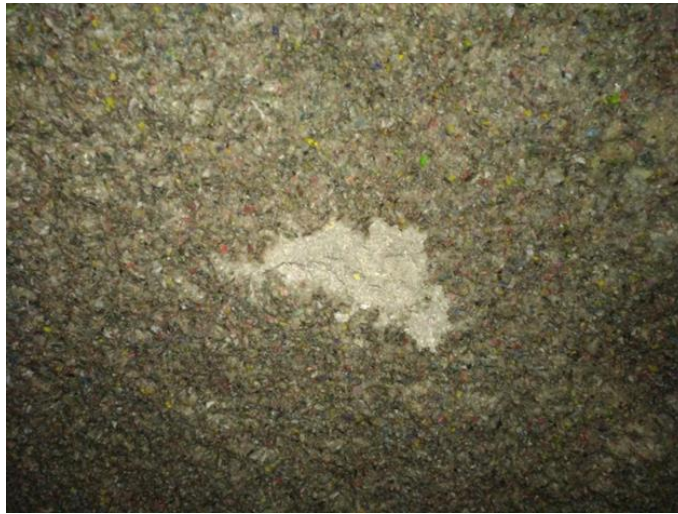
Isofloc® L/LM (geplante Dichte 45 kg/m³) bei Applikation mit der Einblasnadel		
Nr.	Umgebungsbedingungen: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	relative Luftfeuchte im Dämmstoff nach der Beregnung [%]
I	10 °C und 70 % r. F.	76,0
II		71,0
III		54,0

Im Anschluss an die Messung der relativen Luftfeuchte im Dämmstoff wurde, um die Feuchteaufnahme des Material zu beurteilen, der Dämmstoff in einem Bereich von ca. 2 m² direkt mit Wasser (ca. 5 l/m²) besprüht siehe Bild 6.18.



**Bild 6.18:** Direkte Besprühung des Dämmstoffs mit Wasser

Es zeigt sich, dass der Zellulosedämmstoff Isofloc® L/LM eine 2-3 mm Dicke verkrustete Schicht bildet. Wird diese Schicht entfernt, sieht man trockenen Dämmstoff (Bild 6.19 und Bild 6.20)

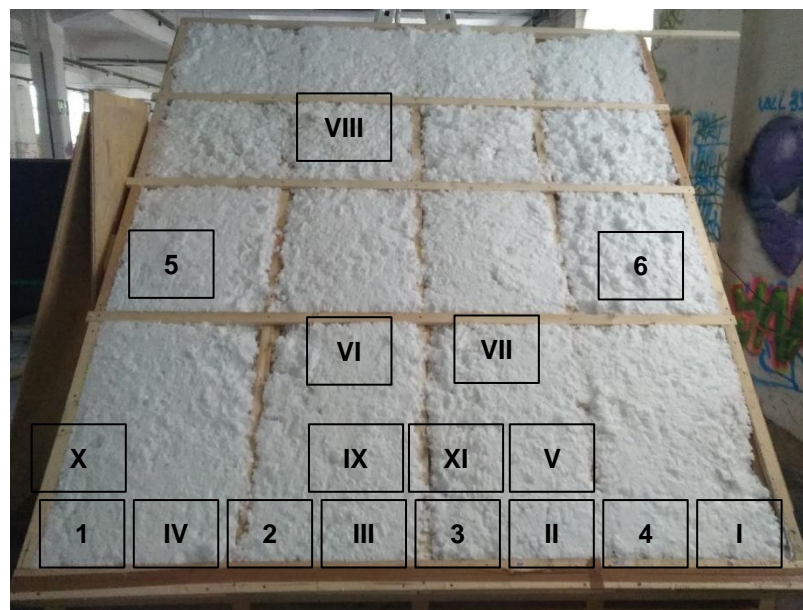


**Bild 6.19:** Dämmstoff Isofloc® L/LM nach Beregnungsversuch (1)



**Bild 6.20:** Dämmstoff Isofloc® L/LM nach Beregnungsversuch (2)

Anschließend wurden die Versuche im Dachmodell ohne Kniestock, mit dem Glaswolldämmstoff Supafil® (geplante Dichte 35 kg/m<sup>3</sup>) und der Applikationstechnik Schlauch wiederholt. Bild 6.21 zeigt den offenen Versuchsaufbau mit den gekennzeichneten Messstellen zur Bestimmung der Dichte vor der zusätzlichen Belastung durch Windanströmung und Beregnung sowie die relative Luftfeuchte im Dämmstoff nach der Beregnung.



**Bild 6.21:** Gewählte Messstellen am geöffnetem Dachmodell mit dem Dämmstoff Supafil® nach dem Beregnungsversuch (Applikationstechnik Schlauch)

Tabelle 6.29 zeigt die Ergebnisse der Dichtebestimmung vor der Freibewitterung bei Applikation von Supafil® mit dem Schlauch. Die Dichte nach der Windanströmung und Beregnung wurde nicht bestimmt, da nach Öffnen der Konstruktion keine sichtbaren Änderungen feststellbar waren.

**Tabelle 6.29:** Ergebnisse der Dichtemessung von Supafil® vor dem Anström- und Beregnungsversuch

Supafil® (geplante Dichte 35 kg/m³) bei Applikation mit dem Schlauch		
Nr.	Gewicht Probe [g]	Dichte Probe [kg/m³]
1	75,0	46,8
2	46,0	31,2
3	44,0	30,0
4	47,0	32,0
5	52,0	33,0
6	34,0	< 25
durchschnittliche Dichte		33,0
Standardabweichung		7,3
Minimum		25
Median		31,6
Maximum		46,8

In Tabelle 6.30 sind die Ergebnisse der Messung der relativen Luftfeuchte im Dämmstoff nach der Beregnung und die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte der Umgebung aufgeführt. Bei Umgebungsrandbedingungen von 10 °C und 66 % relative Feuchte beträgt die relative Feuchte im Dämmstoff Supafil® durchschnittlich 57,9 % und liegt damit unter der Umgebungsfeuchte.



**Tabelle 6.30:** Ergebnisse der Feuchtmessung im Dämmstoff nach der Beregnung

Supafil® (geplante Dichte 35 kg/m³) bei Applikation mit dem Schlauch		
Nr.	Umgebungsbedingungen: Lufttemperatur und relative Luftfeuchte	relative Luftfeuchte im Dämmstoff nach der Beregnung [%]
I	10 °C und 66 % r. F.	60,3
II		58,4
III		58,4
IV		58,0
V		60,0
VI		55,0
VII		55,0

Im Rahmen der Versuchsdurchführung erfolgt im Anschluss an die Messung der relativen Luftfeuchte im Dämmstoff ein direktes Besprühen des Materials analog zu dem Versuch mit Isofloc® L/LM. Zusätzlich wird noch die relative Luftfeuchte im Dämmstoff nach direktem Besprühen mit Wasser gemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 6.31 aufgeführt. Die relative Feuchte im Dämmstoff Supafil® liegt im Mittel bei 64 %, was eine Zunahme von ca. 10 % gegenüber der relativen Feuchte nach der Freibewitterung bedeutet.

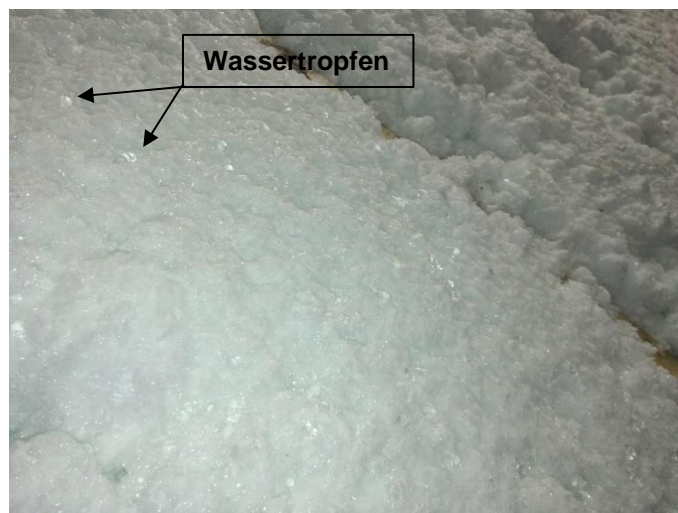
**Tabelle 6.31:** Ergebnisse der Luftfeuchtemessung im Dämmstoff nach einem direkten Ansprühen des Materials mit Wasser

Supafil® (geplante Dichte 35 kg/m³) bei Applikation mit dem Schlauch		
Nr.	direktes ansprühen des Dämmstoffes mit Wasser ca. 5 [l/m²]	relative Luftfeuchte im Dämmstoff [%]
VIII		65,0
IX		65,0
X		63,0
XI		63,0

Beim Dämmstoffe Supafil® zeigt sich eine Tropfenbildung auf der Oberfläche, siehe Bild 6.22 und Bild 6.23.



**Bild 6.22:** Dämmstoff Supafil® nach Beregnungsversuch im Traufbereich der Konstruktion



**Bild 6.23:** Dämmstoff Supafil® nach Beregnungsversuch im Traufbereich (Detailfoto)

Die Ergebnisse der Dichtemessungen zeigen bei der Applikation mit dem Schlauch eine Schwankung der Messwerte von über  $7 \text{ kg/m}^3$ . Bei der Einbringung des Dämmstoffes mit der Lanze liegen die Schwankungen der Messwerte zwischen  $3,4 \text{ kg/m}^3$  und  $6,2 \text{ kg/m}^3$ . Dies deckt sich mit den Erfahrungen aus den vorhergehenden Versuchen und zeigt, dass eine konstante Dämmstoffdichte über die Konstruktion schwer realisierbar ist. Da es mit dem Eichstechzylinder nicht möglich ist die Dämmstoffdichte für die gleiche Stelle zweimal zu bestimmen, können die Messwerte aufgrund der Schwankungen keinen Rückschluss auf das Setzungsverhalten durch eine Windbelastung geben. Die augenscheinliche Beurteilung des Dämmstoffes zeigt aber keine Auffälligkeiten was auf eine Setzung des Dämmstoffes hinweist. Dies gilt sowohl für Isofloc® L/LM als auch für Supafil®.

Die Beregnung des Versuchsstandes mit anschließender Messung der relativen Luftfeuchte im Dämmstoff zeigt für Isofloc® L/LM eine geringe Zunahme der relativen Luftfeuchte gegenüber der relativen Luftfeuchte der Umgebung.

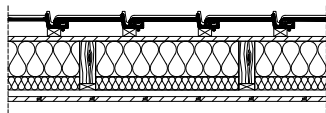
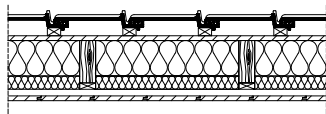
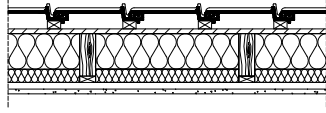
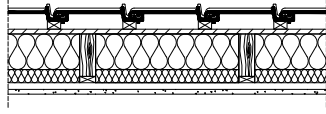
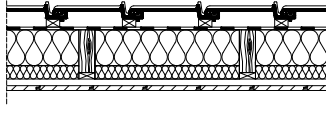
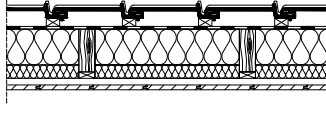
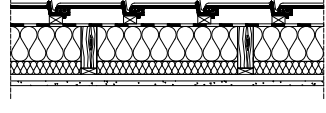
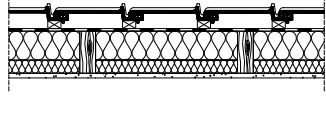
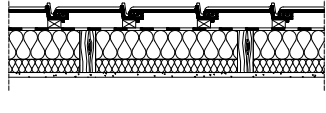
Ein direktes Besprühen des Dämmstoffes mit Wasser führt bei Isofloc® L/LM zu einem Verkrusten der Zellulose bis zu einer Tiefe von ca. 2 - 3 mm. Unter dieser Schicht ist der Dämmstoff trocken und intakt. Bei dem Glasdämmstoff Supafil® bilden sich Wassertropfen auf der Oberfläche. Die Messung der relativen Luftfeuchten im Dämmstoff zeigt auch nach einem direkten Besprühen mit Wasser nur einen geringen Anstieg gegenüber der relativen Feuchte im Dämmstoff nach der Freibewitterung.

Im Allgemeinen konnte kein Einfluss der Windanströmung des Versuchsstandes auf das Setzungsverhalten der untersuchten Dämmstoffe nachgewiesen werden. Bei den untersuchten Dämmstoffen führte die mehrstündige Beregnung des Versuchsstandes zu keiner erhöhten Feuchte im Material.

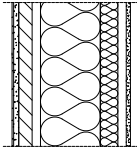
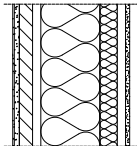
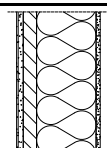
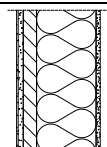
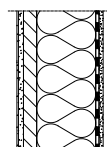
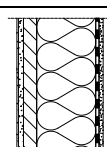
### **6.9.2 Bewertung unter realen klimatischen Bedingungen**

Die am Regelquerschnitt und am Großobjekt untersuchten Konstruktionen wurden zusätzlich mithilfe hygrothermischer Simulation untersucht, um ihre Funktionsfähigkeit unter realen klimatischen Bedingungen zu prüfen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 6.32 zusammengestellt.

**Tabelle 6.32:** Ergebnisse der Bewertung der Konstruktionen am Regelquerschnitt unter realen klimatischen Bedingungen

Nr.	Skizze	Ergebnisse		
		Beschreibung	U <sub>ges</sub> [kg/m²]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitigem Profilholz				
1		Supafil®; q <sub>50</sub> = 29,792 h <sup>-1</sup>	1,57	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 28,264 h <sup>-1</sup>	1,56	0,00
2		Supafil®; q <sub>50</sub> = 27,359 h <sup>-1</sup>	4,54	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 26,951 h <sup>-1</sup>	4,48	0,00
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitiger Gipskartonplatte				
3		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 25,422 h <sup>-1</sup>	2,88	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 22,115 h <sup>-1</sup>	2,89	0,00
4		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 22,178 h <sup>-1</sup>	4,41	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 19,889 h <sup>-1</sup>	4,32	0,00
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitigem Profilholz (Unterspannbahn dreiseitig verklebt)				
5		Supafil®; q <sub>50</sub> = 7,516 h <sup>-1</sup>	1,37	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 4,902 h <sup>-1</sup>	1,35	0,00
6		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 6,926 h <sup>-1</sup>	2,72	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 4,759 h <sup>-1</sup>	2,56	0,00
Nachbildung Dachaufbau mit raumseitiger Gipskartonplatte (Unterspannbahn dreiseitig verklebt)				
7		Supafil®; q <sub>50</sub> = 14,223 h <sup>-1</sup>	2,86	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 12,554 h <sup>-1</sup>	2,84	0,00
Dachaufbau Großobjekt				
8		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 1,761 h <sup>-1</sup>	4,19	0,00
		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 1,394 h <sup>-1</sup>	4,18	0,00
9		Supafil®; q <sub>50</sub> = 3,062 h <sup>-1</sup>	4,54	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 2,912 h <sup>-1</sup>	4,54	0,00
		Supafil®; q <sub>50</sub> = 1,711 h <sup>-1</sup>	4,53	0,00

**Fortsetzung Tabelle 6.32**

Fortsetzung Tabelle 6.32				
Nr.	Skizze	Beschreibung	Ergebnisse	
			U <sub>max</sub> [M-%]	M <sub>c,max</sub> [kg/m²]
Wandaufbau Großobjekt mit Hinterlüftung				
10		Supafil®; q <sub>50</sub> = 3,207 h <sup>-1</sup>	41,61	0,00
11		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 2,758 h <sup>-1</sup>	39,83	0,00
Wandaufbau Großobjekt ohne Hinterlüftung				
12		Supafil®; q <sub>50</sub> = 2,626 h <sup>-1</sup>	39,61	0,00
13		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 2,484 h <sup>-1</sup>	39,76	0,00
Wandaufbau Großobjekt mit Dampfsperre				
14		Supafil®; q <sub>50</sub> = 2,356 h <sup>-1</sup>	19,32	0,00
15		Isofloc® L/LM; q <sub>50</sub> = 2,199 h <sup>-1</sup>	23,92	0,00

Bei Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich, dass diffusionsoffene Dachaufbauten mit raumseitigem Profilholz (Konstruktion 1 und 2) sowie diffusionsoffenen Dachaufbauten mit raumseitiger Gipskartonplatte (Konstruktion 3 und 4) uneingeschränkt funktionsfähig sind, es kommt zu keiner Tauwasserbildung. Der Gesamtwassergehalt beträgt im Maximum 4,54 kg/m<sup>2</sup>, wobei sich nahezu keine Unterschiede bei der Verwendung von Supafil® und Isofloc® L/LM ergeben. Auch bei den Dachaufbauten mit einer dreiseitig verklebten Unterspannbahn kommt es zu keiner Tauwasserbildung, bei raumseitiger Verkleidung aus Profilholz (Konstruktion 5 und 6) sowie Gipskarton (Konstruktion 7). Konstruktion 8 und 9 sind die Dachaufbauten, die dem untersuchten Dachmodell nachempfunden sind. Sie sind uneingeschränkt funktionstüchtig.

Bei den untersuchten Außenwänden in Holzständerbauweise mit Hinterlüftung (Konstruktion 10 und 11), ergibt sich keine Tauwasserbildung in der Dämmebene, allerdings kommt es zu einer deutlichen Wasseranreicherung von bis zu 41,61 M-% innerhalb der Holzwerkstoffplatte. Das gleiche gilt für die Konstruktionen 12 und 13 ohne Hinterlüftung und ohne Dampfsperre. Bei Holzaußenwänden mit Dampfsperre wird der Grenzwert in Holzwerkstoffplatten von 18 M-% ebenfalls



überschritten. Der maximale Wassergehalt in der Holzschalung beträgt bei Verwendung von Supafil® 19,32 M-% und bei Isofloc® L/LM 23,92 M-%.

## 6.10 Spaltmessungen

An einer luftdichten Messkammer mit drei Spalten wurde der Einfluss nachfolgend beschriebene Spaltausführungen auf den Leckagevolumenstrom  $V$ , den Leckagekoeffizienten  $C_L$  und Strömungsexponenten  $n$  untersucht:

- offener Spalt mit einer Spalthöhe von 5 mm (Ausgangsfall)
- Dämmung des Spalts mit Mineralwolle
- außenseitige Abdeckung des Spaltes mit Mineralwolle
- Kombination aus Spaltdämmung und Abdeckung
- 3-maliges Besprühen des Spalts mit sprühbarer Luftdichtheitsschicht
- 5-maliges Besprühen des Spalts mit sprühbarer Luftdichtheitsschicht
- Kombination aus Spaltdämmung und 3-maligem Besprühen des Spalts
- Kombination aus Spaltdämmung und 5-maliges Besprühen des Spalts
- Kombination aus außenseitiger Abdeckung und 3-maligem Besprühen
- Kombination aus außenseitiger Abdeckung und 5-maligem Besprühen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.33 aufgeführt sowie auszugsweise grafisch in Bild 6.26 bis Bild 6.29 dargestellt.

**Tabelle 6.33:** Darstellung der Ergebnisse der differenzierten Betrachtung von Leckagevolumenströme bei variabler Ausführung von Leckagearten

Nr.	Beschreibung Systembeschreibung	Aufbau Nr.	Spalttiefe $t$ [mm]	Spalthöhe $h$ [mm]	Ergebnisse Volumenstrom $V_{50}$ [m³/h]	Koeffizient $C$ [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	Exponent $n$ [-]
1	<b>Aufbau 1</b>						
	1. geschlossener Spalt	1		1	23,5	1,772	0,661
	2. offener Spalt	2		2	56,4	6,700	0,544
	3. geschlossener Spalt	3		3	85,1	10,915	0,525
		4		4	106,7	13,783	0,523
		5		5	125,4	17,819	0,499
		6		6	157,6	21,990	0,503
		7		7	179,5	24,986	0,504
		8		8	208,0	28,835	0,505
		9		9	232,9	32,404	0,504
		10		10	254,0	36,116	0,499
		11	10	11	273,7	38,996	0,498
		12		12	303,0	43,311	0,497
		13		13	316,8	45,173	0,498
		14		14	332,0	46,111	0,505
		15		15	351,8	48,233	0,508
		16		16	372,2	51,752	0,504
		17		17	393,3	54,462	0,505
		18		18	422,3	57,285	0,511
		19		19	437,3	59,843	0,508
		20		20	463,8	63,572	0,508
		21		23	520,9	71,041	0,509
		22		25	567,2	78,145	0,507

Nr.	Beschreibung Systembeschreibung	Aufbau Nr.	Spalttiefe t [mm]	Spalthöhe h [mm]	Ergebnisse Volumenstrom V <sub>50</sub> [m³/h]	Koeffizient C [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	Exponent n [-]
1	<b>Aufbau 2</b>						
	1. geschlossener Spalt	1		1	13,9	0,265	1,011
	2. offener Spalt	2		2	51,2	4,188	0,640
	3. geschlossener Spalt	3		3	82,8	8,583	0,579
		4		4	106,9	11,822	0,563
		5		5	148,3	17,425	0,547
		6		6	173,5	21,143	0,538
		7		7	207,5	26,629	0,525
		8		8	237,8	31,091	0,520
		9		9	262,7	35,074	0,515
		10		10	281,9	37,962	0,513
		11		11	312,3	42,233	0,511
		12	50	12	342,9	46,560	0,510
		13		13	377,4	50,445	0,514
		14		14	388,4	51,923	0,514
		15		15	419,9	56,485	0,513
		16		16	429,2	57,975	0,512
		17		17	458,6	61,972	0,512
		18		18	493,3	65,700	0,515
		19		19	499,4	67,369	0,512
		20		20	546,1	73,048	0,514
		21		23	627,1	85,288	0,510
		22		25	688,0	93,645	0,510
2	<b>Aufbau 1</b>						
	1. Spalt geschlossen						
	2. Spalt offen, 3 x besprüht		50	5	139,7	16,776	0,542
	3. Spalt geschlossen						
	<b>Aufbau 2</b>						
	1. Spalt geschlossen						
	2. Spalt offen, 5 x besprüht		50	5	89,8	11,088	0,535
	3. Spalt geschlossen						
	<b>Aufbau 3</b>						
	1. Spalt geschlossen						
	2. Spalt offen, 3 x besprüht + MW außenseitig		50	5	13,6	0,214	1,062
	3. Spalt geschlossen						
	<b>Aufbau 4</b>						
	1. Spalt geschlossen						
	2. Spalt offen, 3 x besprüht		50	5	112,6	13,312	0,546
	3. Spalt geschlossen						
	<b>Aufbau 5</b>						
	1. Spalt geschlossen						
	2. Spalt offen, 5 x besprüht		50	5	103,0	13,948	0,511
	3. Spalt geschlossen						
	<b>Aufbau 6</b>						
	1. Spalt geschlossen						
	2. Spalt offen, 3 x besprüht + MW außenseitig		50	5	7,4	0,294	0,825
	3. Spalt geschlossen						
3	<b>Aufbau 1</b>						
	1. Spalt offen						
	2. Spalt geschlossen		50	5	283,0	31,861	0,558
	3. Spalt offen						
	<b>Aufbau 2</b>						
	1. Spalt offen, MW raumseitig						
	2. Spalt geschlossen, MW raumseitig		50	5	98,9	2,310	0,960
	3. Spalt offen, MW raumseitig						

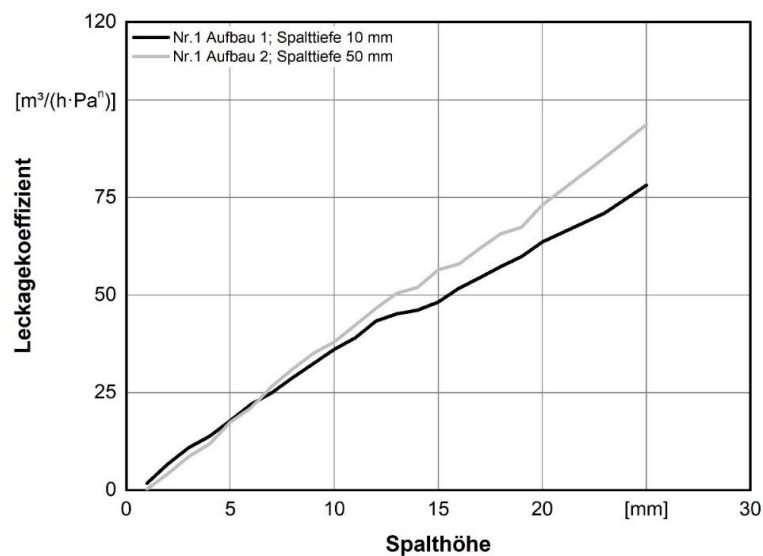
**Fortsetzung Tabelle 6.33**

Nr.	Beschreibung Systembeschreibung	Aufbau Nr.	Spalttiefe t [mm]	Spalthöhe h [mm]	Ergebnisse Volumenstrom V <sub>50</sub> [m³/h]	Koeffizient C [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	Exponent n [-]
4	<b>Aufbau 1</b>						
	1. Spalt offen 2. Spalt offen 3. Spalt offen		50	5	425,1	49,005	0,552
	<b>Aufbau 2</b>						
	1. Spalt offen, MW raumseitig 2. Spalt offen, MW raumseitig 3. Spalt offen, MW raumseitig		50	5	181,7	3,734	0,993
5	<b>Aufbau 1</b>						
	1. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig 2. Spalt geschlossen, MW raumseitig 3. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig		50	5	4,9	0,112	0,966
	<b>Aufbau 2</b>						
	1. Spalt offen und gedämmt 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt		50	5	5,0	0,114	0,966
6	<b>Aufbau 1</b>						
	1. Spalt offen und gedämmt 2. Spalt offen und gedämmt 3. Spalt offen und gedämmt		50	5	6,9	0,157	0,967
	<b>Aufbau 2</b>						
	1. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig 2. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig 3. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig		50	5	6,8	0,155	0,966
7	<b>Aufbau 1</b>						
	1. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig 2. Spalt offen 3. Spalt offen und gedämmt, MW raumseitig		50	5	138,2	15,777	0,555
8	<b>Aufbau 1</b>						
	1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, 3 x besprüht		50	5	2,1	0,048	0,971
	<b>Aufbau 2</b>						
	1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, 5 x besprüht		50	5	2,0	0,065	0,880
	<b>Aufbau 3</b>						
	1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, 3 x besprüht + MW außenseitig		50	5	0,8	0,003	1,413
	<b>Aufbau 4</b>						
	1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt		50	5	3,5	0,112	0,882

**Fortsetzung Tabelle 6.33**

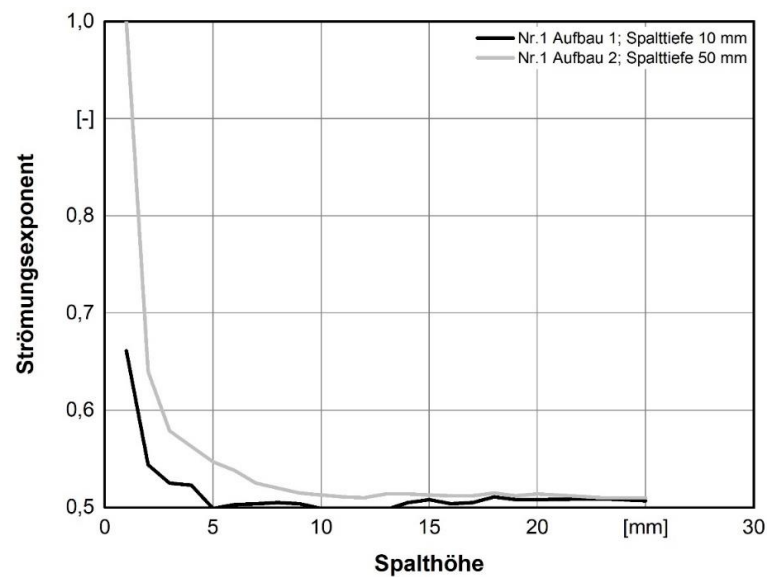
Nr.	Beschreibung Systembeschreibung	Aufbau Nr.	Spalttiefe t [mm]	Spalthöhe h [mm]	Ergebnisse Volumenstrom $V_{50}$ [m³/h]	Koeffizient C [m³/h/Pa <sup>n</sup> ]	Exponent n [-]
8	<b>Aufbau 5</b>						
	1. Spalt geschlossen 2. Spalt geschlossen 3. Spalt offen und gedämmt, MW außenseitig		50	5	1,3	0,007	1,352

Für Spalttiefen von 10 mm und 50 mm wurde der Volumenstrom für Spalthöhen h von 1 bis 25 mm in Abhängigkeit der Druckdifferenz bestimmt. Die Ergebnisse für den Leckagekoeffizienten CL und den Strömungsexponenten n bei einer Druckdifferenz von 50 Pa sind in Bild 6.24 und Bild 6.25 dargestellt.



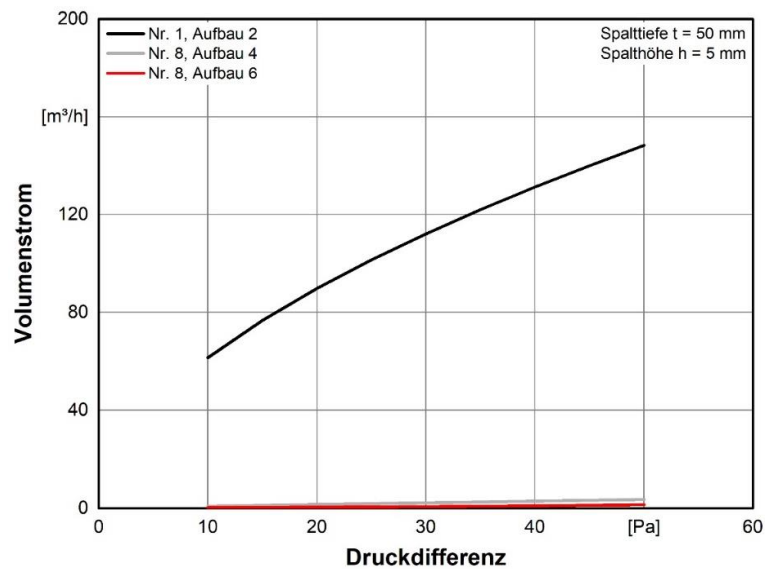
**Bild 6.24:** Vergleichende Darstellung des mittleren Leckagekoeffizienten in Abhängigkeit von der Spalthöhe h und Spalttiefe t für eine Druckdifferenz von 50 Pa

Die Betrachtung der Strömungsexponenten verdeutlicht, dass sich mit zunehmender Spalthöhe schnell turbulente Strömungsverhältnisse einstellen und diese für Spalthöhen ab 3 - 4 mm nahezu 0,5 betragen, siehe Bild 6.25. Die Spalttiefe hat bis zu einer Spalthöhe von ca. 5 mm einen Einfluss auf die sich einstellenden Strömungsverhältnisse. Im Fall der Spalttiefe 10 mm sind die Strömungsverhältnisse schon ab einer Höhe von 2 mm turbulent. Bei einer Spalttiefe von 50 mm und Spalthöhe von 1 mm ist der Strömungsexponent gleich 1. Je kürzer der Spalt ist, desto schneller ist die Strömung bei zunehmender Spalthöhe als turbulent anzusehen.



**Bild 6.25:** Vergleichende Darstellung des mittleren Strömungsexponenten in Abhängigkeit von der Spalthöhe und Spalttiefe bei einer Druckdifferenz von 50 Pa

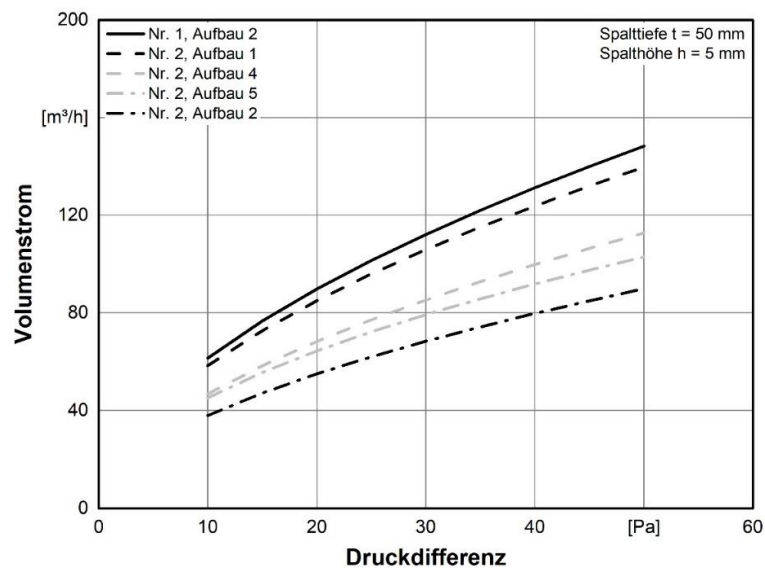
Bild 6.26 zeigt den Volumenstrom durch einen offenen Spalt (Versuchsanordnung Nr. 1, Aufbau 2), einen mit Mineralwolle gedämmten Spalt (Versuchsanordnung Nr. 8, Aufbau 4) sowie einen gedämmten Spalt mit außenseitig angebrachter Mineralwolle (Versuchsanordnung Nr. 8, Aufbau 6). Hierbei ist ersichtlich, dass die größte Reduktion des Volumenstroms durch die Dämmung des Spaltes erreicht wurde. Die zusätzliche Abdeckung des Spaltes mit Mineralwolle hat, im Vergleich zur Spaltdämmung, nur einen geringen Anteil an der Reduzierung des Leckagevolumenstroms. Die Auswertung des Strömungsexponenten  $n$  zeigt, dass die Luftströmung durch den offenen Spalt turbulent ist. Eine Dämmung des Spaltes hat eine Reduzierung des Leckagekoeffizienten  $C_L$  von  $17,425 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Pa}^n$  auf  $0,117 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Pa}^n$ , sowie eine Erhöhung des Strömungsexponenten  $n$  von  $0,547$  auf  $0,882$  bewirkt. Hiermit stellen sich gleichförmigere Strömungsverhältnisse ein. Die Kombination aus Abdeckung und Dämmung des Spaltes hat den Volumenstrom nochmals reduziert, doch die Ausfüllung der Leckage mit Dämmstoff hatte den größten Einfluss auf den Volumenstrom und die sich einstellenden Strömungsverhältnisse.



**Bild 6.26:** Ergebnisse der Volumenstrommessung in Abhängigkeit von der Druckdifferenz. Aufgetragen sind die Ergebnisse für die Varianten Versuchsanordnung Nr. 1, Aufbau 2, Versuchsanordnung Nr. 8, Aufbau 4 und Versuchsanordnung Nr. 8, Aufbau 6 aus Tabelle 6.33

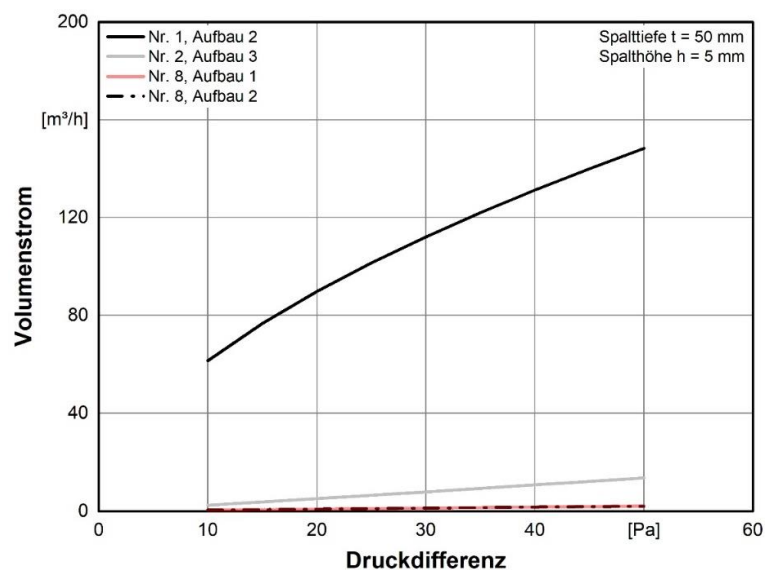
Auch der Einfluss einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht auf den Leckagevolumenstrom durch den Spalt wurde untersucht. Hierfür wurde die Luftdichtheitsschicht Aerosana Visconn 3-mal bzw. 5-mal auf den offenen Spalt gesprüht. Um den Einfluss des Verarbeiters in Bezug auf die Reproduzierbarkeit des Sprühvorgangs zu berücksichtigen, wurden die Messungen wiederholt. Die Ergebnisse sind in Bild 6.27 aufgeführt. Bei dreimaligem Besprühen der Versuchsanordnung Nr. 2 Aufbau 1 mit zwei geschlossenen und einem offenen Spalt, stellte sich, in Vergleich zum offenen Spalt, eine Reduzierung des Leckagevolumenstroms von 8,6 m³/h ein. Der Leckagekoeffizient  $C_L$  sank geringfügig von 17,42 m³/h/Pa<sup>n</sup> auf 16,77 m³/h/Pa<sup>n</sup> und der Strömungsexponent  $n$  blieb annähernd gleich. Die sprühbare Luftdichtheitsschicht verteilt sich über die Spalttiefe, die Spalthöhe verkleinerte sich nur in geringem Maße. Durch fünffaches Sprühen (Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 2) wird eine Reduzierung des Volumenstroms von 58,5 m³/h gegenüber dem offenen Spalt erreicht. Auch in diesem Fall wird nur eine geringe Verkleinerung der Spalthöhe erzielt und der Strömungsexponent änderte sich nur geringfügig. Es herrschen turbulente Strömungsverhältnisse.

Eine Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durch die Wiederholung der Versuche ist nur schwer möglich ist. Die Handhabung des Sprühgeräts, der Sprühwinkel, die Sprühdauer sowie letztendlich die Qualität der Reinigung der Düse haben einen Einfluss auf die Menge des aufgesprühten Materials. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse des 3 x besprühten Spaltes (Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 1 und Aufbau 4) weisen darauf hin, dass es im zweiten Sprühversuch zu einem höherem Materialauftrag kam und sich dadurch eine größere Reduzierung des Leckagevolumenstroms einstellt. Der Vergleich der Messungen des 5 x besprühten Spaltes (Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 2 und Aufbau 5) zeigt den umgekehrten Fall. Im zweiten Durchgang war der Materialauftrag geringer und der Leckagevolumenstrom im Vergleich zu Durchgang 1 größer. Die Werte des Strömungsexponenten  $n$  der einzelnen Versuche liegen dicht beieinander und betragen zwischen 0,511 und 0,546. Dies bedeutet, dass die Luftströmungen bei allen untersuchten Maßnahmen am Spalt (offen oder besprüht) turbulent sind.



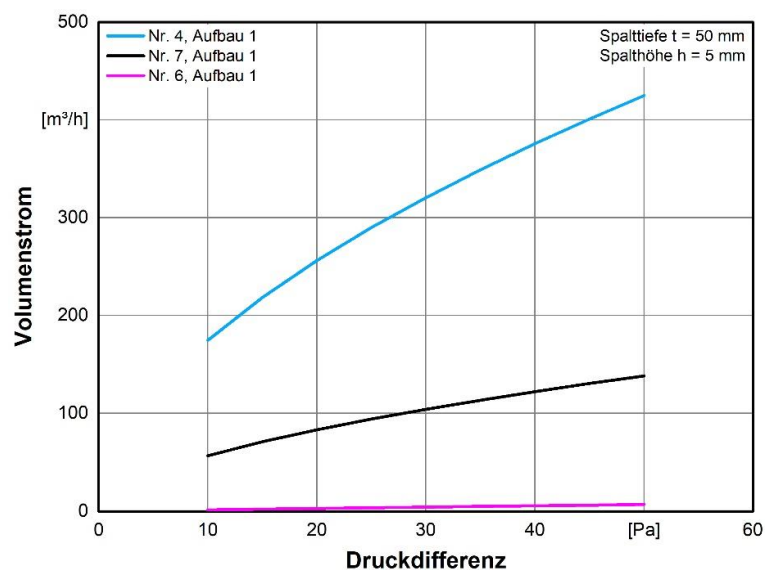
**Bild 6.27:** Ergebnisse der Volumenstrommessungen in Abhängigkeit von der Druckdifferenz. Aufgetragen sind die Ergebnisse für Versuchsanordnung Nr. 1, Aufbau 2, Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 1, Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 4, Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 2 und Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 5 aus Tabelle 6.33

Die Untersuchungsergebnisse der Kombination vom Spaltdämmung und zusätzlichem Einsatz der sprühbaren Luftdichtheitsschicht sind in Bild 6.28 dargestellt. Ausgangsfall ist der offene Spalt (Versuchsanordnung Nr.1, Aufbau 2). Die erste betrachtete Kombination ist Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 3. Hier wurde außenseitig eine Mineralwolldämmung in einer Stärke von 40 mm um den Spalt befestigt. Anschließend wurde der Spalt 3 x besprüht. Das Ergebnis dieser Maßnahme ergibt eine Reduzierung des Leakagevolumenstroms von 134,7 m³/h und einen Strömungsexponenten nahe 1. Bei dem gedämmten Spalt mit 3-facher Besprühung (Versuchsanordnung Nr. 8, Aufbau 1) beträgt der Leakagevolumenstrom durch den Spalt 2,1 m³/h, was eine Reduzierung von 98,6 % in Bezug zum offenen Spalt ergibt. Der Strömungsexponent erhöhte sich von 0,547 (turbulent) im Ausgangsfall auf 0,971 (laminar). Das 5-malige Besprühen des gedämmten Spaltes (Versuchsanordnung Nr. 8 Aufbau 2) erzielte keine weitere signifikante Änderung des Leakagevolumenstroms.



**Bild 6.28:** Ergebnisse der Volumenstrommessungen in Abhängigkeit von der Druckdifferenz. Aufgetragen sind die Ergebnisse für Versuchsanordnung Nr. 1, Aufbau 2, Versuchsanordnung Nr. 2, Aufbau 3, Versuchsanordnung Nr. 8, Aufbau 1, und Versuchsanordnung Nr. 8, Aufbau 2 aus Tabelle 6.33

In Bild 6.29 sind die Volumenströme für gedämmte Spalte (Versuchsanordnung Nr. 6 Aufbau 1), drei offene Spalten (Versuchsanordnung Nr. 4, Aufbau 1) und zwei gedämmte und ein offener Spalte (Versuchsanordnung Nr. 7 Aufbau 1) gegenübergestellt. Die Strömungsexponenten zwischen dem Aufbau „drei offene Spalte“ und dem Aufbau „zwei gedämmte und ein offener Spalt“, liegen dicht zusammen und nahe 0,5 (0,552 und 0,555), was auf eine turbulente Strömung hindeutet. Erst mit dem Abdichten aller Leckagen ändern sich die Strömungsverhältnisse durch die Spalte. Für die Versuchsanordnung mit drei offenen und gedämmten Spalten ergibt sich ein Strömungsexponent  $n$  von 0,967 und ein Leckagekoeffizient  $C_L$  von  $6,9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Pa}^n$ . Die Strömung kann also als laminar beschrieben werden.



**Bild 6.29:** Ergebnisse der Volumenstrommessungen in Abhängigkeit von der Druckdifferenz. Aufgetragen sind die Ergebnisse für die Varianten Versuchsanordnung Nr. 4, Aufbau 1, Versuchsanordnung Nr. 7, Aufbau 1 und Versuchsanordnung Nr. 6, Aufbau 1 aus Tabelle 6.33

## 7. Bewertung der Ergebnisse

Die betrachteten Schüttdämmstoffe sowie deren, zur Einbringung der Dämmstoffe, verwendeten Applikationstechniken wurden auf ihre Anwendbarkeit und Wirksamkeit bei einer energetischen Sanierung von Gebäuden untersucht. Zusätzlich wurden Flüssigabdichtungen zur Herstellung einer Luftdichtheitsebene auf deren Wirksamkeit und Anwendbarkeit untersucht. Als Applikationstechniken kamen das Sprühen mit einem Airless-Spritzgerät und das Pinseln zum Einsatz.

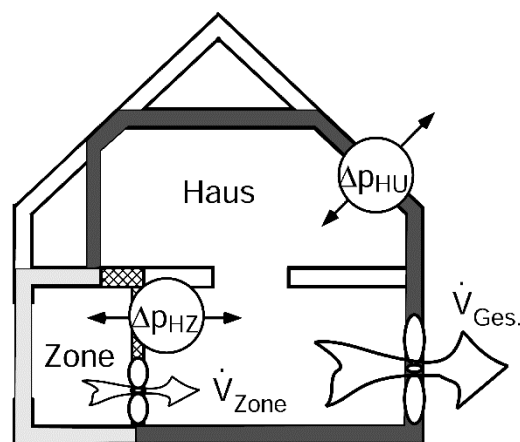
Durch Injektion von Schüttdämmstoffen mit höheren Dichten und Herstellung einer Luftdichtheitsebene, beispielsweise durch Applikation einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht, kann die Luftdichtheit von Altbaukonstruktionen verbessert werden. Die qualitative Verbesserung kann anhand von Blower Door-Messung, Änderung des Leckagevolumenstroms vor und nach dem Einblasen des Dämmstoffs, bestimmen werden. Zusätzlich können anhand der Messergebnisse Aussagen über die Geometrien der vorhandenen Leckagen getroffen werden.

Um die Luftdichtheit eines einzelnen Bauteils bzw. eines Bauteilbereichs zu bestimmen, muss dieser messtechnisch separat erfasst werden. Dies ist z. B. der Fall, wenn ein Bereich in einem Dachgeschoss räumlich vom restlichen Gebäude abgetrennt vorliegt und die Undichtheiten ausschließlich in der Dachkonstruktion vorliegen. Liegen Verbindungen über Leckagen zu anderen



Gebäudeteilen vor, so können verschiedene Messmethoden zum Einsatz kommen [60]. Dies sind meistens die „Schutzzonen-Methode“, die „Reductive Sealing“ oder die „Deduktionsmethode“.

Bei Anwendung der Schutzzonenmethode können einzelne Räume bzw. Gebäudeteile auf ihre Luftdichtheit hin untersucht werden. Messtechnische Voraussetzung ist, dass zwei Ventilatoren vorhanden sind. Die Ventilatoren werden so eingebaut und eingestellt, dass über die Gebäudeteile, die nicht untersucht werden sollen keine Druckdifferenz vorliegt. Die beispielhafte Anordnung einer solchen Messsituation ist in Bild 7.1 dargestellt. Die Druckdifferenz zwischen dem Bereich „Haus“ und dem Raum links unten (Zone) wird regeltechnisch auf null gehalten. Somit muss der andere Ventilator nur die Luftmenge fördern, die durch die Undichtheiten in der grau hinterlegten Hüllfläche (Bereich Haus) auftreten. Die messtechnische Auswertung des Verfahrens ist in [60] beschrieben.



**Bild 7.1:** Messprinzip der Schutzzonenmethode

Beim „Reductive Sealing“-Verfahren werden schrittweise einzelne Leckagen abgedichtet und die nach einem jeweiligen Abdichten durchzuführenden Volumenstrommessungen führen schrittweise zu den Leakageströmen einzelner Undichtheiten. Das Verfahren ist prinzipiell gut geeignet, um den Einfluss relativ großer Leckagen zu quantifizieren.

Die Deduktionsmethode setzt ebenso wie die Schutzzonenmethode den Einsatz von zwei Messsystemen voraus. Die Messergebnisse der Volumenstrombestimmung mit den verschiedenen Messsystemen werden miteinander verrechnet, wodurch einzelne Leckagen quantifiziert werden können.

Anhand der oben beschriebenen Messverfahren können der Leckagekoeffizienten  $C_L$  und des Strömungsexponenten  $n$  abgeleitet werden und Rückschlüsse auf die Art und Größe der vorhandenen Leckagen gezogen werden, woraus wiederum erforderliche Maßnahmen für die Sanierung festgelegt werden können.

Für die Auswertung der Ergebnisse des Differenzdruckverfahren können nachfolgende Grundsätze berücksichtigt werden:

- Bei einem messtechnisch ermittelten Druckexponenten nahe 1 kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass eine Undichtheit mit geringen Spaltabstand vorliegt und somit eine Dichtungsmaßnahme mittels sprühbarer Luftdichtheitsschicht ohne Hinterfüllung prinzipiell möglich ist.

- Liegt ein Druckexponent nahe 0,5, ist von einem höheren Spalthöhe auszugehen, die eine Hinterfütterung der Fuge (z. B. durch eingestopften Dämmstoff) erforderlich macht.
- Große resultierende Strömungskoeffizienten und somit hohe  $q_{50}$ -Werte, führen zur gleichen Aussage wie im Fall von Druckexponenten nahe 0,5.

Um die feuchtechtechnische Eignung typischer Altbaukonstruktionen für eine energetische Ertüchtigung zu prüfen, wurden hygrothermische Simulationen durchgeführt. Dabei wurden die Bauteile im sanierten Zustand hinsichtlich Tauwasserbildung in der Dämmebene und Wassergehalt in der außenseitigen Holzkonstruktion bzw. der Vorsatzschale untersucht. Es wurden verschiedene Ausführungen von Flach- und Steildächern, oberen Geschossdecken, Außenwänden mit Klinker-Vorsatzschale sowie Außenwände in Holzbauweise mit und ohne Witterungsschutz betrachtet. Alle Konstruktionen wurden bei Verwendung eines Glaswollgedämmstoffs und bei Einsatz eines Zellulosedämmstoffs geprüft. Die Ergebnisse der Simulationen haben gezeigt, dass die Tauwasserbildung innerhalb der Dämmebene weniger problematisch ist. Die Grenzwerte der DIN 4108-3 von 0,5 kg/m<sup>2</sup> [33] bzw. der DIN 13788 von 0,2 kg/m<sup>2</sup> [59] werden in den seltensten Fällen überschritten. Wenn es zu Versagen der Konstruktion kommt, dann durch eine Überschreitung der zulässigen Wassergehalte in der vorhandenen Holzkonstruktion. Trotz Reduktion der Infiltration kommt es in vielen Fällen zu Überschreitungen der zulässigen Wassergehalte. In den Untersuchungen konnte außerdem festgestellt werden, dass der angesetzte  $q_{50}$ -Wert relativ wenig Einfluss auf die sich einstellenden Wassergehalte hat. Zwar ergibt sich eine Verringerung durch Reduktion der Infiltration, diese sind jedoch in den meisten Fällen gering.

Steildächer sind in der Regel feuchteschutztechnisch unproblematisch. Diffusionsoffene Steildachkonstruktionen oder solche mit Unterspannbahn sind auch nach einer Sanierung funktionstüchtig. Dabei sollte jedoch sichergestellt werden, dass die Hinterlüftung unter der Ziegeleindeckung wirksam bleibt. Gelangt Dämmstoff in diesen Bereich, z.B. durch eine defekte Unterspannbahn, sollte eine Dampfsperre auf- bzw. eingebracht werden (gesprüht oder konventionell).

Bei Steildächern mit außenseitiger Vollholzschalung oder Holzwerkstoffplatte kann es zu Überschreitung des zulässigen Wassergehaltes kommen. Daher ist eine hohe Luftdichtheit und eine Reduzierung des Diffusionsstroms sicherzustellen (z.B. durch eine raumseitige Dampfbremse mit einer wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke  $s_d > 2$  m). Für den Einsatz der untersuchten Dämmstoffe, ergeben sich nahezu keine Unterschiede bei den Berechnungen in Bezug auf Tauwasserbildung oder den maximalen Wassergehalt. Für das Einbringen des gewählten Schüttdämmstoffs funktionieren die Applikationstechniken Einblasschlauch und Einstechnadel gleichermaßen gut.

Bei Flach- und Gründächern hat sich gezeigt, dass diese nur dann funktionstüchtig sind, wenn eine raumseitige Luftdichtheitsebene vorhanden ist und es nicht zu einer Verschattung des Daches kommt, beispielsweise durch eine Attika oder eine Nachbarbebauung. Außerdem muss die Infiltration feucht-warmer Raumluft auf ein Minimum reduziert werden, was durch eine erhöhte Einbaudichte der Schüttdichte realisierbar ist. Jedoch handelt es sich weiterhin um ein feuchtekritisches Bauteil, da in den meisten Fällen ein Versagen der außenseitigen Holzkonstruktion (Schalung) auftritt.

Zur Sicherstellung des Feuchteschutzes wäre das Dach mit einer Überdämmung zu versehen. Hierdurch kommt es zu einem Anstieg der Temperaturen innerhalb der Konstruktion, wodurch die Wassergehalte sinken. Die Dämmschicht sollte hierbei, je nach Konstruktion und klimatischen

Bedingungen, 80 - 120 mm betragen. Wird das Flachdach überdämmt, ist eine erhöhte Dichte nicht erforderlich.

Die Injektion der Schüttdämmstoffe mittels Einblasschlauch und -nadel eignet sich hierfür gleichermaßen gut. Auch hinsichtlich der Anwendbarkeit der verschiedenen Dämmstoffe ergeben sich keine Unterschiede. Soll die Infiltration durch Erhöhung der Dichte der Einblasdämmstoffe reduziert werden, ist die Wahl des Dämmstoffs bei Applikation mit dem Schlauch nicht relevant. Ist eine Nachverdichtung mit der Einblasnadel vorgesehen, kann dies bei Verwendung von Glaswolledämmstoffen etwas mehr Aufwand bedeuten, da diese bei hohen Dichten zu Verschluss des Förderschlauchs am Übergang zur Einblasnadel neigen. Bei Gegenüberstellung der Ergebnisse der hygrothermischen Simulation, zeigt sich jedoch, dass sich bei Verwendung des Glaswolledämmstoffs etwas geringere Wassergehalte ergeben.

Bei oberen Geschossdecken hat sich gezeigt, dass die Bauteilaufbauten unabhängig vom verwendeten Dämmstoff und vom angesetzten  $q_{50}$ -Wert unproblematisch sind. Es kommt weder zu Tauwasserbildung noch zu Wasseransammlungen in der Holzschalung. Hinsichtlich der Anwendbarkeit und Wirksamkeit ergeben sich keine Unterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Dämmstoffe. Bei oberen Geschossdecken ist ein Aufschütten der Dämmstoffe oder ein offenes Aufblasen möglich. Hierfür ist vorzugsweise der Einblasschlauch zu verwenden, da sich der Dämmstoff durch eine hohe Durchflussrate schnell aufbringen lässt. Die sich einstellende Dichte ist beim offenen Aufblasen wenig von Bedeutung, da eine mögliche Setzung des Dämmstoffs unproblematisch wäre. Empfohlen wird hierbei die Verarbeitung nach Herstellerangaben.

Massive Wandkonstruktionen mit Klinkervorsatzschale sind ebenfalls uneingeschränkt funktionsfähig. Es kommt zu keiner Tauwasserbildung und die sich einstellenden Wassergehalte in der Vorsatzschale sind gering, sodass keine Frostgefahr besteht. Hierbei ergeben sich keine Unterschiede bei Verwendung der untersuchten Dämmstoffe. Für die Injektion der Schüttdämmstoffe in den Hohlraum der zweischaligen Wand, sind spezielle Einblas- und Drehdüsen mit kleinen Öffnungen erhältlich, die in die Fugen der Vorsatzschale geführt werden können. Auf diese Weise ist eine zerstörungssarme Ertüchtigung zweischaliger Wandkonstruktionen möglich. Vor der Applikation der Schüttdämmstoffe ist darauf zu achten, dass die Hinterlüftung der Wand verschlossen wird.

Direkt bewitterte Außenwände in Holzständerbauweise sind nur mit einer raumseitigen Dampfbremsbahn funktionsfähig. Diese kann aufgesprüht oder auf herkömmliche Weise mit Folien und Klebeband erzeugt werden. Ist außenseitig eine Holzwerkstoffplatte als Putzträgerplatte aufgebracht, ist von den untersuchten Dämmstoffen nur die Verwendung des Glaswolledämmstoffs möglich, um die zulässigen Wassergehalte nicht zu überschreiten. Zellulosedämmstoffe können nur dann problemlos eingesetzt werden, wenn außenseitig eine Vollholzschalung aufgebracht ist. Dies ist jedoch selten der Fall, da Vollholz ein schlechter Putzträger ist. Alle untersuchten Applikationstechniken sind zur Sanierung direkt bewitterter Holzaußenwänden einsetzbar. Bei Anwendung einer entlüftenden Drehdüse ist jedoch zu beachten, dass sich erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit der Konstruktion ergeben.

Holzaußenwände mit Witterungsschutz sind feuchteschutztechnisch unproblematisch, solange eine Hinterlüftung gegeben ist und die Feuchte abtransportiert werden kann. Hierfür darf außenseitig keine Dampfbremse oder -sperre aufgebracht sein, eine raumseitige Luftdichtheitsebene ist jedoch erforderlich. Für den Fall, dass außen eine Abdichtung vorhanden ist, deren  $s_d$ -Wert über dem der innenseitigen Abdichtung liegt, ist das System nur dann funktionstüchtig, wenn die außenseitige Vorsatzschale übergedämmt wird. Beide untersuchten Dämmstoffe sind für Sanierung

witterungsgeschützter Holzaußenwände geeignet, wobei sich für den untersuchten Glaswolle-dämmstoff etwas geringere Wassergehalte ergeben. Alle im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erprobten Applikationstechniken sind für das Einbringen von Dämmstoff geeignet. Beim Einsatz von entlüftenden Drehdüse ergeben sich auch hier erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit der Konstruktion.

Um die Luftdichtheit feuchteschutztechnisch kritischer Anschlussdetails zu erhöhen, eignet sich vor allem die Nachverdichtung mit der Einblasnadel. Aufgrund des kleinen Querschnitts und der Form der Nadelspitze, kann die Einblasnadel in bereits vorhandenen Dämmstoff eingestochen und die Dichte des Dämmstoffs an diesen Stellen gezielt erhöht werden. Der Einblasschlauch sowie die Drehdüse sind zum Nachverdichten dieser Bereiche weniger geeignet, da sich der Schlauch nicht in bereits vorhandene Dämmung hineinschieben lässt und auch die Drehdüse nicht in die Konstruktion geführt werden kann. Da Zellulosedämmstoffe weniger zu Verschluss des Schlauchs vor dem Übergang zur Einblasnadel neigen als Glaswolledämmstoffe, ist der Einsatz dieser weniger aufwändig, weil der Einblasvorgang nicht zum Entfernen des Materials im Schlauch unterbrochen werden muss.

Um Leckagen im Bereich feuchteschutztechnisch kritischer Anschlussdetails mittels sprühbarer Luftdichtheitsschichten zu verschließen, kann bei gut erreichbaren Fugen ein Pinsel verwendet werden. Für einen flächigen Auftrag und zur Abdichtung schwerer zugänglicher Spalten bietet sich als Applikation der sprühbaren Luftdichtheitsschichten ein Airless-Spritzgerät an.

Bei Verwendung von Flüssigabdichtungen, ist es hilfreich, wenn dass das Material im Laufe des Trocknungsvorgangs seine Farbe ändert. So ist, gerade beim Arbeiten durch eine Öffnung in der Konstruktion, der Trocknungsfortschritt gut erkennbar.

Besteht bei einer Sanierungsmaßnahme keine Anforderung an die Luftdichtheit des Bauteils und keine Notwendigkeit der Ertüchtigung einer Luftdichtheitsebene, ergeben sich nahezu keine Unterschiede bei der Wahl des Dämmstoffs.

Hinsichtlich der Applikationstechniken ergeben sich keine Einschränkungen für die Verwendung des Einblasschlauches und der Einblasnadel. Lediglich bei der Drehdüse gibt es Voraussetzungen in Bezug auf die Luftdichtheit der Konstruktion. Um die benötigte Dichte des Dämmstoffs einzubringen, muss der Druck im Bauteil konstant sein. In den durchgeführten Versuchen war es daher fast nie möglich, die vom Hersteller empfohlene Dichte mit der Drehdüse zu erreichen. Die Gefahr die sich hierbei ergibt ist, dass es im Laufe der Zeit zu Setzungen und Fehlstellenbildung kommt. Jedoch war eine Setzung infolge Windanströmung bzw. Beregnung des Bauteils im Rahmen der Freibewitterung des Dachmodells nicht ersichtlich.

Soll die Ertüchtigung der Luftdichtheitsebene durch die Erhöhung der Einbaudichte des Dämmstoffs erzielt werden, eignet sich die Applikation mit dem Einblasschlauch am besten. In den durchgeführten Untersuchungen konnten mit dem Schlauch die höchsten Dichten gut erreicht werden. Eine nachträgliche Verdichtung ist mit Schlauch jedoch nicht möglich. Ist die Konstruktion im Bereich feuchteschutztechnisch kritischer Anschlussdetails nachzuverdichten, eignet sich hierfür die Einblasnadel. Jedoch kam es, ebenso wie bei der Drehdüse, bei der Verwendung der Einblasnadel bei hohen gewünschten Dichten zum Verschluss des Schlauches an der Querschnittsverjüngung. Dies trat vor allem beim Einblasen des untersuchten Glaswolledämmstoffs auf. Teilweise ließ sich der Verschluss durch Schütteln lösen, teilweise musste die Einblasnadel vom Schlauch demontiert und das verdichtete Material entfernt werden.

Zur Anwendung der Einblasnadel ist eine ovale Öffnung im Bauteil sinnvoll, wodurch die Einblasnadel längs in Bewegungsrichtung hin- und herbewegt werden kann. Je erfahrener der Verarbeiter beim Einblasen ist, desto weniger Bohrlöcher sind erforderlich. Bei der Drehdüse ergab sich, wie beschrieben, die Schwierigkeit die Mindestdichten des Herstellers zu erreichen. Aus diesem Grund eignen sich Einblasschlauch und -nadel bei Ertüchtigung der Luftdichtheit mittels höherer Einbaudichten besser.

In Hinblick auf die Wahl der Dämmstoffe, hat sich bei der Volumenstrommessung am Regelprüfstand sowie am realen Wand- und Dachmodell gezeigt, dass bei Einsatz des Zellulosedämmstoffs ca.  $10 - 15 \text{ kg/m}^3$  mehr Material erforderlich ist, um die gleiche Luftdichtheit zu erzielen. zeigt sich allerdings eine deutlich höhere Reduzierung des Volumenstroms bei der stufenweisen Erhöhung der Dichte. Dies hat sich auch bei der Bestimmung der längenbezogenen Strömungswiderstände bestätigt.

Die Strömungswiderstände wurden angelehnt an das Verfahren der DIN 9053-1 [13] ermittelt. Hierfür wurde der zu untersuchende Dämmstoff auf ein Probeaufnahmeelement aufgebracht und mithilfe eines geregelten Ventilators ein Unterdruck im Versuchsstand erzeugt. Die sich einstellenden Druckdifferenzen wurden an einer seitlichen Bohrung im Versuchsstand gemessen. Der durch den Dämmstoff gelangende Luftvolumenstrom wurde durch ein Laminar Flow Element (LFE) geleitet und die Druckdifferenz im LFE ermittelt. Mit Kenntnis der dynamischen Viskosität des strömenden Mediums konnte hieraus der sich ergebende Volumenstrom berechnet werden. Aus der Druckdifferenz, dem gemessenen Volumenstrom und den Abmessungen der Probe bzw. des Versuchsstandes, konnte der längenbezogene Strömungswiderstand ermittelt werden.

Für den untersuchten Glaswollgedämmstoff ergaben sich mehr als doppelt so hohe Strömungswiderstände wie für den Zellulosedämmstoff. Um den gleichen längenbezogenen Strömungswiderstand zu erzielen, ist beim Zellulosedämmstoff eine um  $20 \text{ kg/m}^3$  höhere Einbaudichte erforderlich.

Die Einbringung von Einblasdämmstoffen in Bestandskonstruktionen führt zu einem erhöhten Strömungswiderstand und damit einer erhöhten Luftdichtheit der Konstruktion. Dadurch werden die Lüftungswärmeverluste reduziert und die Behaglichkeit (infolge von verringerten Zugerscheinungen) verbessert. In den Volumenstrommessungen am Wandmodell konnte festgestellt werden, dass durch Applikation der Schüttdämmstoffe bereits eine hohe Reduktion der Luftdurchlässigkeit erzielt werden kann. Es ist jedoch nicht grundsätzlich davonauszugehen, dass Luftdichtheitswerte wie im Neubau eingehalten werden können. Hierzu müssen in der Regel vor Einbringung des Einblasdämmstoffs Abdichtungsmaßnahmen (z.B. Abdichtung mit sprühbarer LD, Klebebändern oder Massen) erfolgen. Auch in den Versuchen am Wandmodell hat sich gezeigt, dass bei zusätzlicher Applikation einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht, eine weitere Erhöhung der Luftdichtheit erzielt werden kann, wenn dieser Effekt auch wesentlich kleiner im Vergleich zur Injektion von Schüttdämmstoffen ist.

In den hygrothermischen Simulationen des untersuchten Wandmodells unter Ansatz der gemessenen  $q_{50}$ -Werte hat sich gezeigt, dass durch eine zusätzliche Luftdichtheitsschicht eine deutliche Reduktion der Wasseranreicherung in der Holzwerkstoffplatte erzielt werden kann. Bei Verwendung des Glaswollgedämmstoffs konnte der Wassergehalt in der Holzkonstruktion durch eine zusätzliche Luftdichtheitsschicht halbiert werden. Mit dem Zellulosedämmstoff reduzierte der Wassergehalt sich von 39,76 % auf 23,92 %. Im Allgemeinen konnte in den hygrothermischen Simulationen unterschiedlicher Außenwandkonstruktionen festgestellt werden, dass direkt verputzte Holzständerbauwände und solche mit raumseitiger Vorsatzschale, nur mit einer raumseitigen

Dampfbremsbahn funktionstüchtig sind. Auch für Steildächer sowie Grün- und Flachdächer ergab sich, dass diese nur mit raumseitiger Luftdichtheitsschicht funktionieren.

Auffällig war, dass bei den Einblasversuchen am Regelquerschnitt sowie am Dach- und Wandmodell die Dichteverteilung des Dämmstoffes über die Konstruktion schwankt. Die Wiederholung einzelner Versuche durch einen erfahrenen Verarbeiter zeigte keine grundsätzliche Verbesserung der Dichteverteilung. Daher ist in der Praxis eine Qualitätssicherung im Anschluss der Dämmmaßnahme zwingend erforderlich. Diese kann beispielsweise mittels Endoskopie, Thermografie und einer Blower Door-Messung erfolgen. Bei der Endoskopie können Fehlstellen erkannt und Bereiche aufgezeigt werden, in die kein Dämmstoff eingeblasen wurde. Aussagen über die eingebrachte Dichte können allerdings nicht getroffen werden. Ein Nachteil der Endoskopie ist außerdem die lokale Anwendung. Es lassen sich kaum Aussagen über das Ergebnis der Sanierungsmaßnahme im gesamten Bauteil treffen.

Mit einer thermografischen Untersuchung lassen sich Fehlstellen in der Dämmschicht gut erkennen. Da die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der untersuchten Dämmstoffe allerdings nahezu unabhängig von der Dichte ist, lassen sich nur schwer Unregelmäßigkeiten in der Dichteverteilung bzw. nahezu keine Verdichtungsgrade bestimmen.

Mit der Blower Door-Messung lassen sich anhand der Änderung des Leckagevolumenstroms durch das Bauteil, vor und nach dem Einblasen des Dämmstoffes, Aussagen zur Verbesserung der Dichtheit der Gesamtkonstruktion treffen.

Eine Beurteilung der Dichteverteilung des Dämmstoffes ist nur durch das Öffnen der Konstruktion und die Probenentnahme mit dem Einstechzylinder möglich. Daher sollte in der Praxis, dem Einblasvorgang ein hohes Maß an Aufmerksamkeit gewidmet werden. Beispielsweise deutet die hörbare Veränderung des Massenstroms im Förderschlauch auf zu viel oder zu wenig Dämmstoffeintrag hin. Ein ungleichmäßiges, zu schnelles Herausziehen des Einblasschlauches führt zwangsläufig zu einer ungleichmäßigen Dichteverteilung.

Eine zusätzliche Möglichkeit der Qualitätssicherung ist die Kombination der beiden Methoden „Thermografie“ und „Blower Door“. Damit können sogenannte Temperaturdifferenzbilder erstellt werden, auf denen die Änderungen der Oberflächentemperaturen infolge von erzwungenen Strömungen durch das Bauteil dargestellt sind. Auf diese Weise ist es möglich, den Luftaustritt am Bauteil auch an sehr unzugänglichen Stellen zu kennzeichnen [60]. Um die Luftdichtheit einer Konstruktion zusätzlich zur Erhöhung der Einbaudichte zu verbessern, kann eine Luftdichtheitsschicht aufgebracht werden.

Bei der Verarbeitung der sprühbaren Luftdichtheitsschicht zeigt sich, dass für unterschiedliche Anwendungen unterschiedliche Applikationstechniken sinnvoll sind. So hat der Pinsel einen höheren Materialauftrag und ist aufgrund des geringen Reinigungsaufwands für kleinere Flächen geeignet. Das Sprühgerät weist eine hohe Flächenleistung auf und der Materialauftrag ist dünner und gleichmäßiger. Durch den verhältnismäßig hohen Reinigungsaufwand eignet es sich besonders für große Anwendungsbereiche. Die Bedienung des Geräts ist mit nur einer Hand möglich. Um Kontrolle über den Materialauftrag und die Schichtdicke des Materials zu haben, ist Sichtkontakt zur besprühten Oberfläche wichtig. Ist dies nicht gegeben, weil durch eine Öffnung in der Konstruktion gesprüht wird, ist viel Erfahrung des Verarbeiters nötig, um einen gleichmäßigen Materialauftrag zu erzielen und alle abzudichtenden Bereiche zu verschließen. Sollen nur einzelne, gerade Leckagen verschlossen werden, z.B. im Bereich eines Streichsparrens, ist das Handling verhältnismäßig einfach. Eine flächige, gleichmäßige Anwendung der sprühbaren Luftdichtheitsschichten, ist sehr

schwierig zu realisieren. Daher wird empfohlen den Sprühvorgang nach einer kurzen Antrocknungszeit zu wiederholen. Ein zu hoher Materialauftrag ist dabei unproblematisch, es sei denn das Material läuft durch eine Undichtigkeit des Aufbaus nach innen in das Gebäude. Ein erhöhter  $s_d$ -Wert aufgrund einer höheren Schichtdicke ist feuchteschutztechnisch unbedenklich.

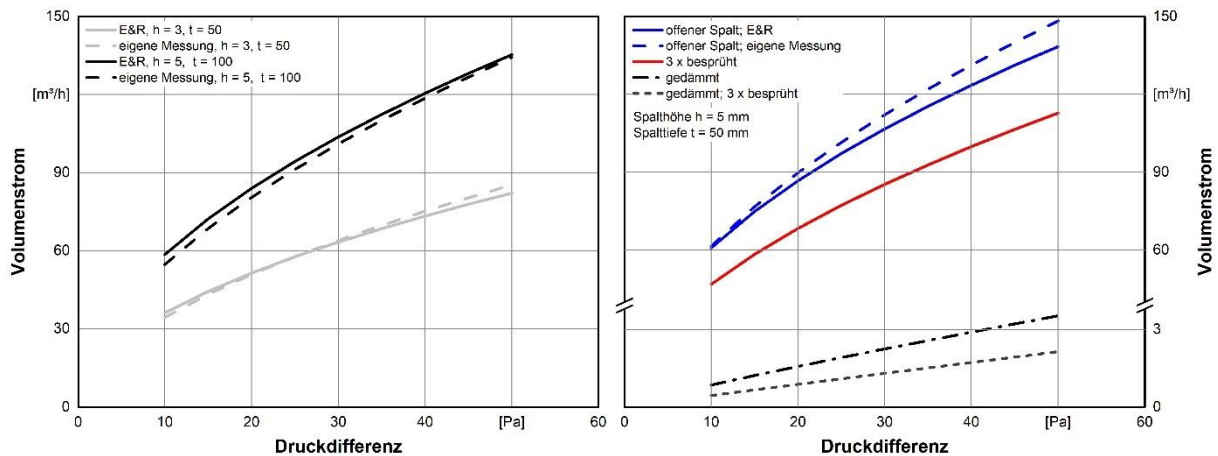
Die wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke  $s_d$  von Solimur liegt bei einem zweilagigen Auftrag bei 0,36 m für eine Dicke von 0,197 m, bei einem vierlagigen Auftrag bei 1,71 m für eine Dicke von ca. 0,33 mm und bei einem achtlagigen Auftrag bei 2,06 m für eine Dicke von 0,39 mm. Für Aerosana Visconn wird vom Hersteller ein  $s_d$ -Wert von  $6 \pm 0,6$  m für eine Dicke von 0,3 mm angegeben. Für andere Flüssigabdichtungen werden von den Herstellern Werte zwischen 4,0 und 6,76 m angegeben.

Zur Qualitätssicherung ist bei „blindem Sprühen“ eine Endoskopie zwingend erforderlich, um zu überprüfen, ob alle Bereiche mit dem Sprühgerät erreicht wurden und der Materialauftrag gleichmäßig ist.

Bei der Applikation mit dem Airless-Spritzgerät und dem Pinsel ergeben sich keine Unterschiede zwischen der Anwendbarkeit der erprobten Flüssigabdichtungen. Einzig im Trocknungsvorgang unterscheiden sich die sprühbaren Luftdichtheitsschichten. Aerosana Visconn trocknete in den durchgeführten Versuchen wesentlich schneller als Solimur und färbt sich dabei von blau zu schwarz, wodurch sich der Trocknungsfortschritt sehr gut erkennen lässt, was gerade beim Besprühen ohne Sichtkontakt sehr hilfreich ist.

Im Hinblick auf das Verschließen von Leckagen zeigen beide sprühbaren Luftdichtheitsschichten ähnliche Eigenschaften. Es waren mindestens vier Aufsprühvorgänge notwendig, um eine Verringerung des Leckagevolumenstroms zu erzielen. Die Leckagen waren mit bloßem Auge allerdings noch zu erkennen. Um eine ausreichende Abdichtung der Leckagen zu erzielen sind daher mehr als vier Materialschichten erforderlich. Je mehr Material aufgetragen wird, desto besser für die Sicherstellung der Luftdichtheit, da das Sprühergebnis bei Auftrag mit dem Airless-Spritzgerät sehr stark vom Verarbeiter abhängt und selbst unter Laborbedingungen die Ergebnisse nicht reproduzierbar sind. Leckagen  $\leq 3$  mm ließen sich mit den sprühbaren Luftdichtheitsschichten bei Auftrag von mehr als vier Schichten relativ gut verschließen, was auch mit den Herstellerangaben von proclima [61] übereinstimmt. Leckagen  $> 3$  mm waren mit den sprühbaren Luftdichtheitsschichten nicht verschließbar. Die Flüssigabdichtungen belegen zwar die Spaltinnenseiten, reduzierten aber kaum die Spalthöhe. Für Spalten  $> 3$  mm konnten in den Spaltmessungen allerdings sehr gute Ergebnisse erzielt werden, wenn diese mit einem Füllstoff z.B. Mineralwolle ausgefüllt und die Flüssigabdichtung gegen den Füllstoff gesprüht wird. Allein durch das Vorhandensein von Mineralwolle kann eine sehr hohe Reduktion des Leckagevolumenstroms hervorrufen. Mit der Kombination aus Mineralwolle im Spalt und das Aufsprühen einer Luftdichtheitsschicht können Spalte mit Spalthöhen von 5 mm geschlossen werden. Dabei war die aufgetragene Menge der Flüssigabdichtung wenig relevant. Daher ist bei der Abdichtung von Leckagen zu prüfen, ob Dämmstoff vorhanden ist. Nur so können Leckagen  $> 3$  mm abgedichtet werden. In Bild 7.2 sind im rechten Diagramm die Ergebnisse der Spaltmessungen am offenen, am dreifach besprühten, am gedämmten und am gedämmten und besprühten Spalt gegenübergestellt. Zusätzlich ist dort auch der nach Esdorn und Rheinländer ermittelte Volumenstrom am offenen Spalt eingetragen. Es zeigt sich, dass durch das Besprühen des Spaltes eine Reduzierung des Volumenstroms um ca. 24 % gegenüber dem offenen Spalt erzielt werden kann. Wird der Spalt mit Mineralwolle gedämmt, lässt sich eine sehr große Verringerung des Volumenstroms erreichen. Bei zusätzlicher dreifacher Besprühung des

gedämmten Spaltes, ergeben sich nur noch minimale Leckagevolumenströme. Der Spalt kann als verschlossen jedoch nicht als „praktisch luftdicht“ betrachtet werden.



**Bild 7.2:** Vergleichende Darstellung der gemessenen und nach Esdorn und Rheinländer ermittelten Volumenströme; rechts: Gegenüberstellung der Volumenströme unterschiedlicher Spaltausführungen

Im linken Diagramm werden die gemessenen Volumenströme für Spalten mit einer Spalthöhe von 3 mm und einer Spalttiefe von 50 mm und einer Spalthöhe von 5 mm bei einer Spalttiefe von 100 mm mit den von Esdorn und Rheinländer ermittelten Werte für die gleichen Spaltgeometrien verglichen. Die Abweichungen zwischen den dargestellten Verläufen sind gering (max. rd. 7 %) liegen im Rahmen der Messgenauigkeit. Es zeigt sich, dass die in den Spaltemessungen bestimmten Volumenströme nahezu identisch sind zu denen, die in der Untersuchung von Esdorn und Rheinländer ermittelten wurden. Dies kann als Bestätigung der eigenen Messergebnisse in den Spaltversuchen betrachtet werden.

Die Bestimmung des Strömungsexponenten an unterschiedlich ausgeführten Spalten hat gezeigt, dass bei einem Strömungsexponenten  $n > 0,85$  davon ausgegangen werden kann, dass alle Leckagen im Bereich von Dämmstoff liegen bzw. mit Dämmstoff bedeckt sind, der strömungsberuhigend wirkt. Geringere Exponenten deuten darauf hin, dass Spalthöhen  $> 2$  mm ohne Strömungsberuhigung (offene Leckage) vorhanden sind. Diese wären visuell vor Ort zu ermitteln.

In der Kombination von drei Spalten mit unterschiedlicher Ausführung war außerdem zu erkennen, dass sich auch bei nur einem offenen Spalt turbulente Strömungsverhältnisse und ein hoher Leckagevolumenstrom ergeben. Die Abdichtung der anderen beiden Spalten reduziert den Volumenstrom zwar, aber ein offener Spalt dominiert das Strömungsverhalten im Versuchsaufbau bereits so stark, dass die Abdichtung von zwei der drei Leckagen nahezu keinen Einfluss auf den Strömungsexponenten hat. Es stellt sich direkt eine turbulente Strömung ein. Die Einstufung der Leckagen aufgrund der in einer Blower Door-Messung ermittelten Leckagekoeffizienten  $C_L$  und Strömungsexponenten  $n$ , kann somit nur dann erfolgen, wenn die Leckagen bezüglich ihrer Lage eingegrenzt werden können. Dies kann mithilfe der zuvor beschriebenen erweiterten Blower Door-Messmethoden erreicht werden.

## 8. Entwicklung von Lösungen zur Wärmedämmung und Luftdichtung

Auf Grundlage der hygrothermischen Simulationen typischer sanierungsbedürftiger Altbaukonstruktionen werden nachfolgenden in Tabelle 8.1 Standardlösungen für unterschiedliche Aufbauten von Flach- und Steildächern sowie Außenwänden in Holzständerbauweise aufgeführt. Alle Bauteile wurden bei Verwendung eines Glaswollgedämmstoffs und eines Zellulosefaserdämmstoffs



hinsichtlich Tauwasserbildung und Wassergehalt in der äußeren Holzkonstruktion untersucht. Aus den Ergebnissen wurden Konstruktionen abgeleitet, die ohne zusätzliche bauliche Veränderungen funktionstüchtig sind. Kommt es bei Bauteilaufbauten zu Überschreitungen der zulässigen Tauwassermenge oder des maximalen Wassergehalts, werden Maßnahmen angegeben, mit denen die Ausführung der Bauteile ohne Gefahr der Tauwasserbildung oder Versagen der außenseitigen Holzkonstruktion möglich ist. Gibt es Einschränkungen bei der Anwendung einzelner Dämmstoffe oder Applikationstechniken, sind diese ebenfalls vermerkt.

Flachdächer sind von ihrem Grundprinzip feuchteschutztechnisch problematisch. Eine energetische Ertüchtigung kann nur dann erfolgen, wenn eine raumseitige Luftdichtheitsebene vorhanden ist und die Infiltration durch die Konstruktion auf ein Minimum reduziert wird. Die Verbesserung der Luftdichtheit kann beispielsweise durch eine erhöhte Dichte des einzubringenden Schüttdämmstoffs erfolgen. Mithilfe des Einblassschlauches oder durch Nachverdichtung mit der Einblasnadel kann dies erreicht werden. Die Drehdüse eignet sich nicht für die Anwendung am Flachdach. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass es zu keiner Verschattung des Daches kommt. Sind diese Kriterien nicht erfüllbar, ist das Flachdach mit einer Überdämmung von 80 - 120 mm Dicke auszuführen.

Diffusionsoffene Steildächer oder solche mit Unterspannbahn sind uneingeschränkt funktionsfähig. Ist die Unterspannbahn defekt, kann es jedoch dazu kommen, dass Dämmstoff in die Hinterlüftung eindringt und diese die funktionstüchtig einschränkt. Dann ist eine Dampfbremse vorzusehen, die z.B. durch Applikation einer sprühbaren Luftdichtheitsschicht eingebracht werden kann.

Ist außenseitig eine Holzwerkstoffplatte vorhanden, kann es zu Überschreitung des zulässigen Wassergehaltes in dieser kommen. Daher ist in diesem Fall eine hohe Luftdichtheit und eine raumseitige diffusionshemmende Ausführung der Konstruktion sicherzustellen, hierbei bieten sich sprühbare oder herkömmliche Dampfbremsen mit einem  $s_d$ -Wert  $> 2$  m an. Hinsichtlich der verwendbaren Dämmstoffe oder Applikationstechniken gibt es beim Steildach keine Einschränkungen.

Außenwände in Holzständerbauweise, die außen ein Putzsystem aufweisen und daher direkt bewittert werden, sind nur mit einer raumseitigen Dampfbremse funktionsfähig. Wurde die Holzständerwand mit einer außenseitigen Holzwerkstoffplatte ausgeführt, ist die Verwendung von Supafil® bzw. eines vergleichbaren Glaswollgedämmstoffs möglich. Bei einer außenseitigen Vollholzschalung kann auch ein Zellulosedämmstoff eingesetzt werden. Wird zum Einblasen des Dämmstoffs eine entlüftende Drehdüse verwendet, ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit der Konstruktion. Die Einblasnadel und der Einblasschlauch können uneingeschränkt eingesetzt werden.

Ist die Holzständerwand mit Witterungsschutz ausgeführt, ist die Sanierung, solange die Hinterlüftung funktionsfähig ist, unproblematisch. Die Feuchte kann abtransportiert werden.

Bei einer vorhandenen außenseitigen Abdichtung mit  $s_{d,außen} > s_{d,innen}$ , muss die äußere Vorsatzschale zusätzlich gedämmt werden. Die Wahl des Dämmstoffs ist dabei nicht von Bedeutung. Wie für die direkt bewitterte Holzaußenwand ergeben sich bei Verwendung einer entlüftenden Drehdüse erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit des Bauteils.

Im Rahmen der hygrothermischen Simulationen hat sich gezeigt, dass es für obere Geschossdecken und massive Außenwände mit Vorsatzschale keine Beschränkungen in Bezug auf die Ausführung gibt. Sie sind für den Einsatz der untersuchten Dämmstoffe uneingeschränkt funktionsfähig.

**Tabelle 8.1:** Standardlösungen für die Sanierung typischer Altbaukonstruktionen

Konstruktionsbeschreibung		notw. bauliche Maßnahmen	Einschränkungen Dämmstoff	Einschränkungen Applikationstechnik
Flachdach	mit Überdämmung (80 - 120 mm)	-	-	-
	ohne Überdämmung	raumseitige Dampfbremse, luftdichte Ausführung, keine Verschattung	-	nur Schlauch oder Einblasnadel
Steildach	außenseitig diffusionsoffen	-	-	-
	außenseitig mit Unterspannbahn	Applikation einer sprühbaren LDS bei defekter Unterspannbahn mit Verschluss aller Leckagen	-	-
	außenseitige Holzwerkstoffplatte	raumseitige Dampfbremse ( $S_d > 2 \text{ m}$ )	-	-
Außenwand Holzständerbauweise - direkt bewittert	ohne Dampfbremse	funktioniert nur bei Aufbringen einer luftdicht ausgeführten Dampfbremse	-	bei Verwendung einer entlüftenden Drehdüse ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit
	mit Dampfbremse; außenseitige Holzwerkstoffplatte	-	funktioniert nur bei Verwendung von Supafil <sup>®1)</sup>	
	mit Dampfbremse; außenseitige Vollholzschalung	-	-	
Außenwand Holzständerbauweise mit Witterungsschutz	funktionsfähige Hinterlüftung	-	-	bei Verwendung einer entlüftenden Drehdüse ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit
	außenseitige Abdichtung ( $S_{d,außen} > S_{d,innen}$ )	funktioniert nur bei gedämmter Vorsatzschale	-	

1) bzw. bei Verwendung eines Glaswollgedämmstoffs mit gleichen Materialeigenschaften

Um die Luftdichtheit von Altbaukonstruktionen zu bestimmen und die Luftdurchlässigkeit einzelner Leckagen zu bestimmen können die in Kapitel 7 beschriebenen Messmethoden „Schutzzonen-Methode“, „Reductive Sealing“ und „Deduktionsmethode“ nach [60] angewandt werden. Hiermit kann die Luftdichtheit einzelner Bauteile bzw. der Leakagevolumenstrom einzelner Undichtigkeiten bestimmt werden. Als Indiz, wie mit vorhandenen Leckagen umzugehen ist, kann der Strömungsexponent  $n$  herangezogen werden. Bei Strömungsexponenten nahe 0,5 liegen offene Leckagen mit Spalthöhen  $h > 2 \text{ mm}$  vor. Hier ist eine Hinterfütterung der Leckage mit Dämmstoff erforderlich. Liegt ein Strömungsexponent größer 0,85 vor, handelt es sich entweder um Leckagen  $\leq 2 \text{ mm}$  oder es liegt eine Strömungsberuhigung in Form von Dämmstoff an. Eine Erhöhung der Luftdichtheit der Leckage kann in diesem Fall mithilfe von sprühbaren Luftdichtheitsschichten erfolgen.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erprobung von Schüttdämmstoffen und sprühbaren Luftdichtheitsschichten sowie deren Applikationstechniken hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Anwendbarkeit bei der energetischen Ertüchtigung von Altbaukonstruktionen.

Hierbei zeigte sich bei der Verarbeitung der untersuchten Dämmstoffe wenige Unterschiede in deren Anwendbarkeit. Einzig die Staubentwicklung ist bei Zellulosedämmstoffen höher als bei

Glaswollgedämmstoffen, was zur Folge hat, dass bei der Verarbeitung eine Staubmaske absolut notwendig ist und der Reinigungsaufwand bei raumseitiger Applikation höher ist.

Die Erprobung der Dämmstoffe erfolgte an Regelprüfständen und an realen Dach- und Wandmodellen mit Einblasschlauch, Drehdüse und Einblasnadel. Hierbei neigte der untersuchte Glaswollgedämmstoff bei Applikation mit Drehdüse und Einblasnadel an der Querschnittsverjüngung zum Verschluss des Schlauches, besonders bei hohen Dichten. Es hat sich gezeigt, dass die Applikation mit dem Schlauch daher am besten zum Einbringen der Schüttdämmstoffe geeignet ist. Hiermit waren alle Bereiche der Konstruktion gut erreichbar und wenige Bohrlöcher erforderlich.

Die Luftdichtheit der Dämmstoffe wurde mithilfe von Volumenstrommessungen an unterschiedlichen Aufbauten eines Regelquerschnittsprüfstandes sowie am realen Wand- und Dachmodell untersucht. Die untersuchten Schüttdämmstoffe weisen keine Unterschiede hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Dichteverteilung im Prüfstand bzw. den Großobjekten auf. Allerdings war bei Einsatz des Zellulosedämmstoffs immer eine um  $10 \text{ kg/m}^3$  -  $15 \text{ kg/m}^3$  höhere Dichte erforderlich, um die gleiche Luftdichtheit wie bei Glaswollgedämmstoff zu erreichen. Dies zeigte sich auch bei der Ermittlung der längenbezogenen Strömungswiderstände der beiden Dämmstoffe. Um den gleichen Strömungszustand zu erhalten, ist beim Zellulosedämmstoff ca.  $20 \text{ kg/m}^3$  mehr Material erforderlich als bei Glaswollgedämmstoff.

Bei der nachträglichen Verdichtung der Dämmstoffe hat sich bei beiden Dämmstoffen gezeigt, dass durch eine Erhöhung der Dichte über den gesamten Querschnitt eine deutliche Reduktion des Volumenstroms erzielt werden kann. Auch der Einfluss einer lokalen Nachverdichtung typischer Leckagen beispielsweise im Bereich eines Streichsparrens, wurde am Regelprüfstand ermittelt. Hierbei hat sich ergeben, dass eine höhere Dichte im Bereich der Leckage zwar zu einer Verringerung des Leckagevolumenstroms führt, diese aber relativ gering und eine Nachverdichtung des gesamten Querschnitts im Verhältnis zum Aufwand deutlich effektiver ist. Jedoch verringert sich die Infiltration in diesen Bereichen, was eine Verbesserung des Feuchteschutzes bewirkt.

Neben der Erprobung von Schüttdämmstoffen wurde auch der Einsatz von sprühbaren Luftdichtheitsschichten als Alternative zu konventionellen Dampfbremsschichten und Klebeband untersucht. Dabei wurden die Flüssigabdichtungen Solimur und Aerosana Visconn betrachtet. Die beiden Materialien unterscheiden sich in ihrem Trocknungsverhalten. So lag die Trocknungszeit von Solimur in den Versuchen deutlich über der Herstellerangabe und über der von Aerosana Visconn. Außerdem ließ sich die Trocknungszeit von Aerosana Visconn durch einen Farbwechsel gut erkennen. Für die sprühbaren Luftdichtheitsschichten wurden die Applikation mit dem Airless-Spritzgerät und mit dem Pinsel erprobt. Dabei hat sich ergeben, dass sich die Applikationstechniken für unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten eignen. Für große Flächen ist das Airless-Spritzgerät aufgrund seiner höheren Flächenleistung und dem gleichmäßigeren Materialauftrag sinnvoller. Außerdem ist hier der Reinigungsaufwand gegenüber dem Pinsel wesentlich höher, was bei kleinen Anwendungsbereichen unverhältnismäßig wäre. Hierfür ist der Pinsel gut geeignet. Aufgrund des höheren Materialauftrags kann der Pinsel gut zum Abdichten einzelner Spalten angewandt werden, soweit diese zugänglich sind. Im Hinblick auf das Verschließen von Leckagen zeigen beide sprühbaren Luftdichtheitsschichten ähnliche Eigenschaften. Es waren mindestens vier Aufsprühvorgänge notwendig, um eine Verringerung des Leckagevolumenstroms zu erzielen. Leckagen  $< 3 \text{ mm}$  ließen sich mit Auftrag mehrerer Schichten relativ gut verschließen. In den Spaltemessungen zeigte sich, dass Leckagen  $> 3 \text{ mm}$  nur bei Vorhandensein einer Hinterfüllung z.B. aus Dämmstoff abgedichtet werden können.

Um die feuchteschutztechnische Eignung typischer Altbaukonstruktionen für eine Sanierung mittels Schüttdämmstoffen und sprühbaren Luftdichtheitsschichten zu überprüfen, wurden hygrothermische Simulationen verschiedener Bauteilausführungen durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Simulationen wurden Standardlösungen für Konstruktionen, die uneingeschränkt funktionsfähig sind sowie für Bauteilaufbauten, für die zusätzliche bauliche Maßnahmen notwendig sind, abgeleitet. Darüber hinaus wurde ermittelt, welche Dämmstoffe und Applikationstechniken sich für die Anwendung bei der Sanierung verschiedener Bauteile eignen. So hat sich gezeigt, dass sich der Einblasschlauch bei allen Arten von Dach- und Deckenkonstruktionen eignet. Auch erhöhte Einbaudichten lassen sich mit dem Schlauch erzielen. Eine nachträgliche Verdichtung ist hiermit allerdings nicht möglich. Mit der Einblasnadel lassen sich kleine Dichten in Dach- oder Holzständerwandkonstruktionen erzielen. Die Anwendung ist vor allem bei nachträglicher Verdichtung bereits vorhandenen Dämmstoffs sinnvoll. Kommen Drehdüsen bei Wänden in Holzständerbauweise zur Anwendung, ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Luftdichtheit. Auch hiermit lassen sich vor allem kleinere Einbaudichten erzielen. Für die Wahl des Dämmstoffes ergeben sich wenig Einschränkungen. Lediglich bei direkt bewitterten Außenwänden in Holzständerbauweise mit Dampfbremse und außenseitiger Holzwerkstoffplatte ist nur Glaswollgedämmstoff verwendbar.

## 10. Literatur

- [1] <https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/eigenschaften/waermeleitfaehigkeit-152162>, Stand 01.10.2019.
- [2] Einblasdämmung: Verarbeitungsrichtlinie zur Holzfasereinblasdämmung best wood FIBRE von best wood SCHNEIDER®, best wood SCHNEIDER® GmbH, Broschüre [www.schneider-holz.com](http://www.schneider-holz.com).
- [3] Mess- und Prüfgeräte, X-Floc Dämmtechnik- Maschinen GmbH, Broschüre [www.x-floc.com](http://www.x-floc.com).
- [4] Paschko, K. und Drewer, A.: Luftschicht ade, Kerndämmung: Voraussetzungen, Verfahren und Kosten in db deutsche bauzeitung (2018), <https://www.db-bauzeitung.de/db-metamorphose/kerndaemmung-energetisch-sanieren/>.
- [5] <https://www.baunetzwissen.de/altbau/fachwissen/bestandsanalyse/endoskopie-3202667>, Stand 01.10.2019.
- [6] <https://www.messmittelonline.de/endoskop2.html>, Stand 01.10.19.
- [7] Traud, L.: Untersuchung zur Bestimmung des Sperrwerts von sprühbaren Luftdichtheitsschichten bei unterschiedlichem Flächenauftragsgewicht - Erprobung der Dichtheit des Materials an praxisorientierten Modellen (2018), Bachelorarbeit Universität Kassel.
- [8] <https://www.airless-discounter.de/aktuelles/die-5-groessten-fehler-beim-spritzen-mit-einem-airless-farbspritzgeraet/>, Stand 01.10.19.
- [9] <https://airless-experts.de/shopware/Duesen/>, Stand 01.10.19.
- [10] Airless-Düsen, Ein kleines, aber wichtiges Detail, Graco Distribution BVBA, Broschüre <https://www.graco.com>.
- [11] Air Infiltration & the Knauf Insulation EcoSeal® System, Knauf Insulation GmbH, Broschüre <http://ecosealplus.knaufinsulation.us/wp-content/uploads/2015/01/ecoseal-wp-air-infiltration.pdf>.

- [12] DIN EN ISO 12572:2017-05, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß.
- [13] DIN EN ISO 9053-1:2019-03, Akustik - Bestimmung des Strömungswiderstandes - Teil 1: Verfahren mit statischer Luftströmung.
- [14] <https://www.specialinstruments.com/infodb/wirkungsweise-von-laminar-flow-elementen--lfe-.7.html>, Stand 01.10.2019.
- [15] Stuchlik, W.: Messtechnik 6 - Durchflussmessungen - DLR-Kolloquium (2014).
- [16] Ilg, K.: Gas-Durchflussmessung mit Laminar Flow Elementen, TetraTec Instruments GmbH.
- [17] <https://www.tetratec.de/messtechnik/durchfluss-elemente/laminar-flow-elemente/lfe-auswertung/>, Stand 01.10.2019.
- [18] DIN EN 13829:2001-02, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren.
- [19] Solcher, O.: Erste Hilfe für die Qualitätskontrolle - Checkliste für Mauerwerksbau ergänzt den „Leitfaden Luftdichtheitskonzept“ des Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (2015).
- [20] [www.luftdicht.de/abisz.htm](http://www.luftdicht.de/abisz.htm), Stand 01.10.2019.
- [21] DIN EN ISO 9972:2018-12, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren.
- [22] [https://de.wikipedia.org/wiki/Turbulente\\_Str%C3%B6mung](https://de.wikipedia.org/wiki/Turbulente_Str%C3%B6mung), Stand 01.10.2019.
- [23] [https://www.blowerdoor.de/fileadmin/BlowerDoorDE/\\_Dokumente/Vergleich\\_ISO\\_9972\\_mit\\_EN\\_13829\\_DE.pdf](https://www.blowerdoor.de/fileadmin/BlowerDoorDE/_Dokumente/Vergleich_ISO_9972_mit_EN_13829_DE.pdf), Stand 01.10.2019.
- [24] Gersten, K.: Einführung in die Strömungsmechanik. 3. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden (1984).
- [25] Eberle, Ch.: Versuche über die Luftdurchlässigkeit und den Wärmeverlust von Fenstern, Ges.-Ing. 51 (1928), S. 566/570, zitiert in [27].
- [26] Feustel, H. E. und Nowotny, S.: Lüftungs- und klimatechnische Gebäudeausrüstung, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1996).
- [27] Caemmerer, J.S. und Hirschbold, F.X.: Der Einfluss der Fensterbauart auf den Luftdurchgang, Ges.-Ing. 61 (1938), S. 393/399.
- [28] Esdorn, H. und Rheinländer, J.: Zur rechnerischen Ermittlung der Fugendurchlasskoeffizienten und Druckexponenten von Bauteilfugen, Heizung Lüftung Haustechnik, Vol. 29 (1978), S.101-108.
- [29] DIN EN 12207:2017-03, Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit - Klassifizierung.
- [30] Energieeinsparverordnung 2009, Anlage 4 zu § 6 Absatz 1 Satz 2.
- [31] DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.

- [32] Reichel, D.: Zur Luftsicherung von nahezu fugendichten Gebäuden mittels dezentraler Lüftungseinrichtungen (1999), S. 30.
- [33] DIN 4108-3:2018-10, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- [34] Künzle, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart (1994).
- [35] Zirkelbach, D.; Künzle, H.M.; Schafaczek, B.; Borsch-Laaks, R.: Dampfkongvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von kongvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. Proceedings 30. AIVC Conference, Berlin, 2009.
- [36] isofloc LM® - Übersicht technische Daten, isofloc Dämmstatt GmbH, Broschüre [www.isofloc.de](http://www.isofloc.de).
- [37] Supafil Timber Frame - Mineralwolle-Schüttdämmstoff nach DIN EN 14064-1, Knauf Insulation GmbH, Broschüre [www.knaufinsulation.de](http://www.knaufinsulation.de).
- [38] DIN 4102-1:1998-05, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1 Baustoffe - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- [39] Zellofant M95 Einblasmaschine, X-Floc Dämmtechnik-Maschinen GmbH, Broschüre [www.x-floc.com](http://www.x-floc.com).
- [40] Einblasschläuche und Förderschläuche, X-Floc Dämmtechnik Maschinen GmbH, Broschüre [www.x-floc.de](http://www.x-floc.de).
- [41] <https://www.x-floc.com/de/einblasttechnologie/einblasverfahren/verdichtetes-einblasen-mit-entlueftung/>, Stand 01.10.2019.
- [42] Düsen und Einblaszubehör, X-Floc Dämmtechnik Maschinen GmbH, Broschüre [www.x-floc.de](http://www.x-floc.de).
- [43] Wohler, M.: Pyknometer, Fotografie, Uni Kassel (2018).
- [44] Universität Hamburg, Department Chemie, Abteilung Pharmazeutische Technologie, Praktikumsskript - Pharmazeutische Technologie einschließlich Medizinprodukte (2015), S. 13.
- [45] Künzle, H.M.: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen, Untersuchungsbericht IBP-Bericht RKB-24/1997, Holzkirchen (1997).
- [46] Künzle, H.M.: Raumluftverhältnisse in Wohnräumen. IBP-Mitteilung 24 Nr.314 (1997).
- [47] DIN EN 12114:2000-04, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Luftdurchlässigkeit von Bauteilen - Laborprüfverfahren.
- [48] DIN EN ISO 5167-1:2004-01, Durchflusssmessung von Fluiden mit Drosselgerät in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Anforderungen.
- [49] Verbraucherzentrale Energieberatung: Dämmstoffkoffer, Inhaltsstoffe - Wirkungen - Nebenwirkungen - Preise (2014).

- [50] [www.powerflocke.de/faq/faq10](http://www.powerflocke.de/faq/faq10), Stand 01.10.2019.
- [51] <https://www.baubook.at/m/PHP/Info.php?SI=2142706267&SW=32&win=y>, Stand 01.10.2019.
- [52] DIN EN 13501-1:2010-01, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten.
- [53] [www.powerflocke.de/faq/faq2](http://www.powerflocke.de/faq/faq2), Stand 01.10.2019.
- [54] Sicherheitsdatenblatt Aerosana Visconn, proclima - MOLL bauökologische Produkte GmbH (2019).
- [55] Sicherheitsdatenblatt Homeseal LDS Solimur 310, Knauf Insulation GmbH (2018).
- [56] Produktdatenblatt Knauf Insulation LDS Solimur, Knauf Insulation GmbH (2019).
- [57] Aerosana Visconn - Technische Daten, proclima - MOLL bauökologische Produkte GmbH (2019).
- [58] Aerosana Visconn - Hinweise, Einstellungen, Maschinen und Zubehör, proclima - MOLL bauökologische Produkte GmbH (2019).
- [59] DIN EN ISO 13788:2013-05, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren.
- [60] Geißler, A. und Hall, M.: Luftdichtheitsmessungen in Bauphysik-Kalender 2003. Hrsg. E. Cziesielski. Ernst & Sohn Verlag Berlin (2003), S. 245-274.
- [61] <https://de.proclima.com/produkte/verbindungsmitel/fluessigdichtung/aerosana-visconn>, Stand 01.10.2019.