

Konvektiver Feuchteeintrag in Leichtbaukonstruktionen – Leckagearten, Tauwasserverteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis

Philipp Kölsch
Hartwig Künzle
Daniel Zirkelbach

Konvektiver Feuchteintrag in Leichtbaukonstruktionen

Leckagearten, Tauwasserverteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis

Philipp Kölsch
Hartwig Künzel
Daniel Zirkelbach

Im Vergleich zur Gesamtgebäudedichtheit und den damit verbundenen energetischen Aspekten ist der konvektive Feuchteintrag in Baukonstruktionen durch kleinste verbleibende Luftströmungen immer noch eine Herausforderung. Konvektiver Feuchteintrag in Leichtbaukonstruktionen kann zu erhöhten Bauteilfeuchten und in vielen Fällen auch zu massiven Schäden führen, selbst wenn die ursächlichen Leckagen energetisch vernachlässigbar sind. Um die hier ablaufenden Befeuchtungsvorgänge besser verstehen zu können, wurden Experimente an realen Wänden in einer Doppelklimakammer durchgeführt. Aus den Versuchsergebnissen wurden verschiedenste Einflussfaktoren analysiert und Schlussfolgerungen für die Praxis gezogen. Die Ergebnisse geben hierüber aufschlussreiche Informationen. So ist die Feuchteverteilung zwischen Schalung und Mineralwolle vor allem von der Dämmstoffdichte abhängig. Die Feuchteverteilung über die Höhe einer Wand wird dagegen maßgeblich von der vorherrschenden Druckdifferenz beeinflusst. Zudem konnte ein Grenzströmungseffekt beobachtet werden, der bei Leckagen nahe Pfosten bzw. Sparren zu einer erhöhten Luftströmung in diesem Bereich und damit auch zu erhöhten Holzfeuchten führen kann. Weiterhin konnten Unterschiede im Strömungsverhalten verschiedener Leckagetypen ermittelt werden. Eine ebenfalls wichtige Erkenntnis ist, dass trotz sehr guter Verarbeitung ein maßgeblicher Leckageanteil den Klebeverbindungen selbst zugeordnet werden muss.

Stichworte: konvektiver Feuchteintrag; Luftströmungen; Leichtbaukonstruktionen; Tauwasser; hygrothermisches Verhalten; WUFI; Leckage; Klebebänder; Infiltration

1 Einleitung

Thermischer Auftrieb im Gebäude und Windströmungen führen zu Druckdifferenzen über die Gebäudehülle, infolge derer sich durch vorhandene Leckagen dann entsprechende Luftströmungen einstellen. Unter kalten Außenklimabedingungen führen diese Luftströmungen aus dem Innenraum in Leichtbaukonstruktionen immer auch zu einer Zunahme der relativen Feuchte bzw. bei Taupunktunterschreitung in der Konstruktion zu Tauwasserausfall, da die Temperatur auf dem Weg nach außen abnimmt. Die-

Convective moisture entry in lightweight assemblies – Types of leakage, moisture distribution and conclusions for practice

Compared to the overall building envelope airtightness concerning energetic aspects, the condensation caused by air exfiltration through small remaining leakages is still a challenge today. Convective moisture entry in lightweight assemblies can lead to increased moisture contents and cause massive structural damages even if the leakages are negligible from the energetic point of view. For a better understanding of the processes inside lightweight constructions, hot- and cold-box experiments and air-flow measurements on 14 different full-scale wall assemblies under realistic climatic conditions were performed. The influences of different mineral wool densities and leak configurations, as well as different pressure differences were analyzed to draw conclusions for the practice. The results show some interesting aspects about the influencing factors of the convective moisture entry. The distributions of the water content between sheathing and insulation samples show that the main influencing factor is the mineral wool density. Moreover, the findings indicate that the moisture distribution over the height of the sheathing is more influenced by the pressure difference level than by insulation air permeability or arrangements of the small openings. For the tested configurations, a lateral flow due to openings near the posts shows the highest air flow rates and therefore moisture content inside the assemblies. These boundary flow can lead to increased moisture contents in posts or rafters. In addition differences in the flow behavior associated with the leak arrangements could clearly be detected. However, another important finding of these experiments is that, despite good workmanship, a remarkable amount of air and moisture seems to penetrate the sealing tape joints.

Keywords: convective moisture entry; airflows; lightweight constructions; condensation; hygrothermal behavior; WUFI; leakage; adhesive tapes; infiltration

ser Vorgang wird auch als konvektiver Feuchteintrag in die Konstruktion bezeichnet. Im ungünstigsten Fall kann die konvektiv eingetragene Feuchte nicht mehr ausreichend austrocknen und verursacht Schäden durch Schimmelpilzwachstum und Holzfäule. Im Vergleich zu den umfänglich beschriebenen und berechenbaren Wasserdampfdiffusionsprozessen sind die Einflussfaktoren der Wasserdampfkonnektion sehr vielfältig und noch immer wenig erforscht. Bezüglich der maßgeblichen Luftdichtheit der Gebäudehülle kann jedoch grundsätzlich Folgendes festgehalten werden: „Aus luftdichten Materialien zusammengesetzte

Bauteile sind undichter als die Materialien selbst und aus diesen Bauteilen zusammengesetzte Gebäude sind wiederum undichter als die einzelnen Bauteile.“ [1]

Werden also Materialien zu Bauteilen und diese wiederum zu Gebäuden zusammengesetzt, entstehen immer auch Leckagen. Diese können grob in zwei Kategorien eingegliedert werden: Die ersten sind sichtbare Leckagen, die lokal zu einer Auffeuchtung führen können. Hier gilt jedoch: Alles, was sichtbar ist, ist auch abdichtbar, wodurch diese Art von Leckagen zu den „vermeidbaren“ gehören. Zu der anderen Kategorie gehören die nicht sichtbaren, „unvermeidbaren“ Leckagen im Regelquerschnitt, die sich durch Anschlüsse, Klebeverbindungen, Tackernadeln etc. ergeben. Um feuchtetolerante Bauteile zu erreichen, sollte der Feuchteeintrag, der durch diese „unvermeidbaren“ Leckagen verursacht wird, auch immer bei der hygrothermischen Bemessung [2, 3, 4] mitberücksichtigt werden, wie dies u. a. die DIN 4108-3 [5] und die DIN 68800 [6] fordern. Zurzeit geschieht dies z. B. mit dem IBP-Infiltrationsmodell [7], welches den feuchterelevanten Infiltrationsanteil von der Gesamtgebäudedichtheit ableitet. Dieses einfache Modell berücksichtigt bisher weder Sorptionsvorgänge durch die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit noch Winddruckeinflüsse und deckt ausschließlich die Befeuchtung ab. Die Rücktrocknung muss, auf der sicheren Seite liegend, rein durch Diffusion erfolgen. Ein konvektives Trocknungsmodell existiert zurzeit noch nicht, da die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Durchströmung der Bauteile und die genauen Tauwasserpositionen und -mengen immer noch weitgehend unbekannt sind. Um hierzu tiefere Erkenntnisse zu gewinnen, wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt.

Sämtliche Versuchsrandbedingungen, die Genauigkeit der verwendeten Messinstrumente und eine detaillierte Ergebnisauswertung können dem Konferenzbeitrag „Airflow through lightweight wall assemblies – influence of size and location of leakages“ [8] entnommen werden. Der hier vorliegende Beitrag konzentriert sich v. a. auf die Konsequenzen, die für die Baupraxis aus den Versuchsergebnissen abzuleiten sind.

2 Versuchsaufbau und -ablauf

2.1 Doppelklimakammer

Um Befeuchtungsversuche an Leichtbaukonstruktionen durchführen zu können, wurden die zu untersuchenden Testbauteile in einer Doppelklimakammer exponiert. Beide Kammerseiten waren gedämmt und luftdicht ausgeführt. Auf der warmen Kammerseite wurde die Temperatur auf +22 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % mit einem Klimagerät geregelt. Die Kaltseite wurde auf ca. +2 °C gekühlt, also etwas über dem Gefrierpunkt, um ein Einfrieren des Tauwassers zu verhindern. Die relative Feuchte konnte dort nicht geregelt werden, stellte sich aber während der Versuche bei etwa 90 % r.F. ein.

2.2 Versuchs-Leichtbaukonstruktionen und Sensorik

Die Testelemente entsprechen dem Abschnitt einer Leichtbau-Holzständerwand mit den Dimensionen 2,52 m × 1,62 m × 0,2 m. Wie Bild 1 zeigt, befinden sich darin zwei Gefache mit den Maßen 2,24 m × 0,6 m × 0,2 m und drei

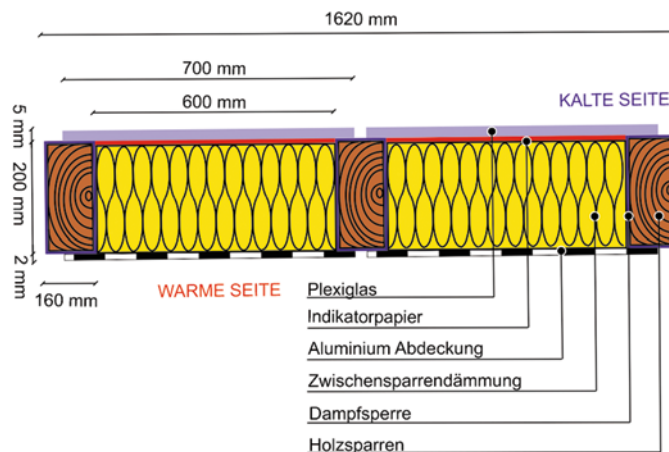


Bild 1. Aufbau der getesteten Holzständer-Leichtbaukonstruktion

Fig. 1. Schematic construction of the lightweight wall

Holzständer (140 × 200 mm). Aus versuchstechnischen Gründen sind die Holzständer mit Folie dampfdicht verpackt, um den Einfluss von Sorptionsvorgängen im Holz auszuschließen. Auf der Warmseite der Konstruktion wurden die beiden Gefache mit 2 mm starken Aluminiumplatten verschlossen, um jedweden Feuchteintritt durch Diffusion zu unterbinden und nur den konvektiven Feuchteeintrag durch die eingebrachten Leckagen zu erfassen. Die Aluminiumplatten konnten abgenommen werden, um den Versuchsaufbau zu verändern. Auf der Kaltseite wurden die Gefache mit 5 mm starken Plexiglasscheiben verschlossen. Die Platten der Kalt- und der Warmseite wurden verschraubt und die Ränder mit Klebeband abdichtet. Auf der Innenseite der Plexiglasabdeckung wurden je sechs Papiertücher als Indikator installiert, da sich diese bei Feuchteeinwirkung deutlich dunkel verfärben. Zudem können die Tücher bei Bedarf abgenommen werden, um eine gravimetrische Bestimmung der Tauwassermenge vorzunehmen. Durch die Plexiglasabdeckung ist es zudem möglich, die Kondensationsvorgänge zu beobachten und zu dokumentieren. Dafür wurde auf der Kaltseite eine Kamera installiert, die alle 30 min eine Aufnahme der transparenten Rückseite der Testelemente machte. Die maßstabgetreue Holzständer-Leichtbaukonstruktion vor dem Einbau in die Doppelklimakammer ist in Bild 2 dargestellt.

Auf der Kaltseite befindet sich ein Auslassloch mit einem Durchmesser von 5 mm. Während der Befeuchtungsphase wurde daran ein nach unten gebogenes Auslassrohr installiert und darin die Temperatur und die relative Feuchte der ausströmenden Luft erfasst.

Auf beiden Kammerseiten wurden neben dem Differenzdruck zudem die klimatischen Bedingungen aufgezeichnet. Die Papiertücher sowie die verwendete Mineralfaserdämmung wurden vor und nach dem Befeuchtungsversuch gewogen, um gravimetrisch den Wassergehalt bestimmen zu können. In den Versuchsfeldern wurden kalt- sowie warmseitig an mehreren Positionen Feuchte- und Temperaturfühler platziert, um die Plausibilität der Messungen überprüfen zu können.

Vor und nach den Befeuchtungsversuchen wurden jeweils die Luftmassenströme durch die untersuchten Konstruktionsvarianten bei verschiedenen Differenzdrücken aufgezeichnet. Das verwendete kalibrierte Messgerät – ein

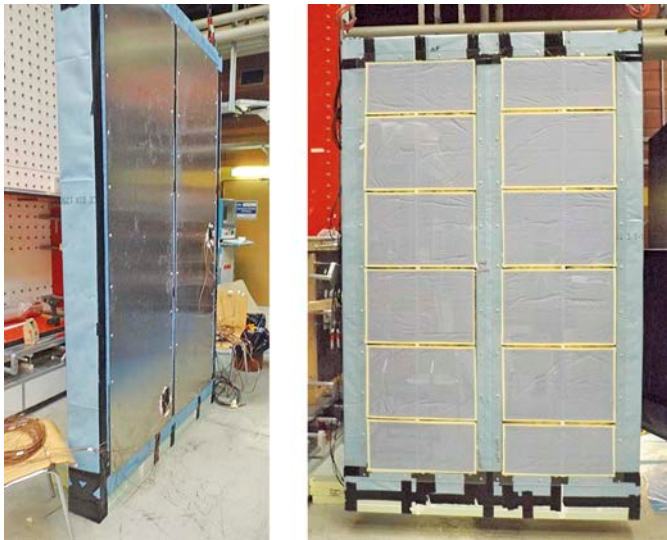


Bild 2. Maßstabsgetreue Holzständer-Leichtbaukonstruktion vor dem Einbau in die Doppelklimakammer; links: warme Seite mit Aluminiumplatte, rechts: kalte Seite mit Plexiglas und Indikatorpapieren

Fig. 2. True-to-scale lightweight wall construction before the assembly into the double climatic chamber; left: warm side of the construction with aluminum plates; right: cold side with perspex and indicator papers

laminar flow element (LFE) – besitzt eine Genauigkeit von $\pm 0,25\%$ vom Messwert.

2.3 Versuchsablauf Luftmassenstrommessung

Zunächst wurden die handelsüblichen Mineralfaserdämmstoffe ausgepackt und mehrere Wochen unter Innenraumklimabedingungen gelagert, so dass sie sich auf ihre normale Dicke „entfalten“ und feuchtetechnisch akklimatisieren konnten. Nach dem Wiegen der Papiertücher und deren Installation an der Plexiglasscheibe wurde auch die Mineralfaserdämmung gewogen und mit leichtem Übermaß in die Gefache eingebaut. Danach wurden beide Versuchsfelder mit den Aluminiumplatten verschlossen und die ersten Luftmassenstrommessungen durchgeführt. Hierzu wurde das LFE am Auslass der Kaltseite installiert, ein Unterdruck am LFE-Auslass erzeugt und ca. 15 Messpunkte wurden zwischen 0,5 und 20 Pa Druckdifferenz aufgezeichnet. An beiden Versuchsfeldern wurden zuerst Referenzmessungen mit den noch verschlossenen Leckageöffnungen durchgeführt, um eine Aussage über die Gesamtdichtheit der Konstruktion treffen zu können. Die zweite Messung wurde jeweils mit den geöffneten Leckagen durchgeführt.

2.4 Versuchsablauf Befeuchtungsversuch

Für die Befeuchtungsversuche wurden die beiden Seiten der Doppelklimakammer, wie oben beschrieben, unterschiedlich klimatisiert und die komplette Kaltseite auf den jeweiligen Unterdruck von 5 bzw. 15 Pa gesetzt. Hierbei ist zu beachten, dass Randleckagen an den Anschlussstellen im Befeuchtungsversuch anders durchströmt werden als im Fall der Luftmassenstrommessung. Die Befeuchtungsversuche liefen zwischen 15 und 21 Tagen, danach wurde

die Kaltseite der Klimakammer auf ca. 20°C leicht erwärmt, um zusätzliches Tauwasser beim Öffnen der Felder zu vermeiden. Anschließend wurden die Papiertücher und die Mineralfaserdämmung entfernt, um so die Tauwassermengen zu bestimmen.

2.5 Materialien und Testbedingungen

Für die Versuche wurden zwei verschiedene Mineralfaserdämmstoffe verwendet, eine mit geringerer Dichte von $15,3 \text{ kg/m}^3$ und eine mit einer höheren Dichte von $32,8 \text{ kg/m}^3$. Durch die unterschiedlichen Dichten variiert auch der Strömungswiderstand des Materials selbst bzw. dessen Luftdurchlässigkeit. So ist die Luftdurchlässigkeit der dichteren Mineralfaserdämmung nur etwa ein Sechstel so groß wie die der leichteren Faserdämmung.

Die aufgetragenen Differenzdrücke von 5 und 15 Pa entsprechen der Bandbreite von Druckunterschieden, die i. d. R. im Gebäudebereich zu erwarten sind. Dabei liegt der Differenzdruck von 5 Pa in etwa in dem Bereich, der im Winter rein durch thermischen Auftrieb im Innenraum eines Einfamilienhauses entsteht, während sich etwa 15 Pa bei höheren Gebäuden, sehr kaltem Außenklima oder auch bei zusätzlichem Winddruckeinfluss einstellen können. Hierbei muss aber erwähnt werden, dass die Tauwassermengen, die unter den hier eingestellten konstanten Druckbedingungen entstehen, im Vergleich zur Situation unter realen Bedingungen jeweils eher auf der sicheren Seite liegen. In der Realität ergeben sich zum einen größere Druckschwankungen über die Gebäudehülle, zum anderen können auch im Winter Zeiten ohne Kondensationsbedingungen auftreten. Beide Effekte können zwischenzeitlich sogar zur Trocknung durch Diffusion und Konvektion führen.

2.6 Versuchsanordnungen

Insgesamt wurden 7 Befeuchtungsversuche durchgeführt, wobei jeweils parallel in beiden Feldern verschiedene Anordnungen unter exakt denselben Druck- und Klimabedingungen getestet wurden. Es konnten also 14 verschiedene Anordnungen untersucht werden, wobei in zwei Fällen ein Feld komplett geschlossen war. Grundsätzlich können die Versuche in zwei Gruppen gegliedert werden: In der ersten Gruppe befand sich auf der Warmseite ein einzelnes Loch mit einem Durchmesser von 5 mm, in der zweiten waren es 25 Löcher mit einem Durchmesser von je 1 mm. Beide Anordnungen führen zu einer identischen Gesamtleckagefläche von $19,63 \text{ mm}^2$.

Bei den Versuchen mit den 5-mm-Löchern wurden die Anordnungen der Ein- und Auslasslöcher auf der Warm- und Kaltseite sowie der Einbau der Mineralfaser variiert. So wurde auch untersucht, welchen Einfluss das Eindringen der Mineralwollkanten hat, wie es entstehen kann, wenn die Zwischensparrenklemmfilze zu weit hineingedrückt werden und dann an den sägerauen Sparren hängen bleiben. Diese Untersuchungen waren jedoch nur an der weniger dichten Mineralfaserdämmung möglich, da die dichtere Faser für diese Anordnung zu steif war.

Weiterhin wurde auch untersucht, welchen Einfluss eine direkte Durchströmung der Dämmung hat. Dies kann in der Praxis z. B. bei direkten Kabeldurchführungen auf-

treten. Diese Untersuchungen wurden vorgenommen, da oft angenommen wird, dass eine direkte Durchströmung zu einer starken Erwärmung des Strömungsweges führt und somit das Tauwasserrisiko verringert. Hierzu wurden zwei Szenarien untersucht, bei denen Ein- und Auslassloch einander direkt gegenüber liegen. Bei der ersten Variante wurde der Strömungskanal ausgestanzt, bei der zweiten nicht.

Bei der Versuchsreihe mit den 25×1 -mm-Löchern wurden die Löcher in einer Reihe im Abstand von 80 mm voneinander in der Mitte des Feldes platziert. Das Auslassloch hat dabei weiterhin einen Durchmesser von 5 mm und befindet sich auf der Kaltseite im seitlichen, unteren Bereich. Diese Versuche sollten die Hypothese stützen, dass viele kleinere Löcher mit derselben Gesamtleckagefläche wie ein einzelnes größeres Loch ab einer bestimmten Druckdifferenz eine stärkere Durchströmung des Bauteils bedingen. Dies ist der Art des Strömungsvorgangs geschuldet, welcher bei größeren Löchern bereits bei niedrigeren Druckdifferenzen von laminar zu turbulent umschlägt. Bei turbulenter Durchströmung ergeben sich größere Druckverluste und die Volumenströme nehmen bei steigendem Druck nicht mehr so stark zu wie im laminaren Bereich.

3 Ergebnisse

Wie bereits erwähnt, enthält dieser Beitrag keine vollständige Darstellung sämtlicher gewonnener Messergebnisse. Diese können bei Bedarf aus [8] entnommen werden. Der aktuelle Beitrag konzentriert sich auf die wesentlichsten und für die Praxis relevantesten Ergebnisse.

3.1 Luftmassenstrommessungen – Strömungsverhalten von Einzelleckagen und Lochreihen

Zuerst wird der Versuch betrachtet, der eine größere Leckage mit 5 mm Durchmesser mit 25 kleineren Lecka-

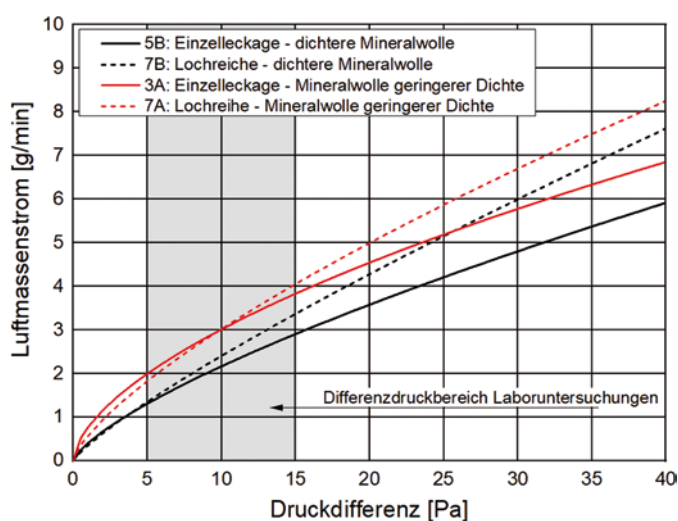


Bild 3. Differenzdruck-Luftmassenstromkurven von Einzelleckage und Lochreihe mit Mineralfaserdämmungen zwei verschiedener Dichten

Fig. 3. Differential pressure air mass flow curves of single leakages and row of holes with mineral fiber insulation of two different densities

gen à 1 mm Durchmesser bei derselben Gesamtleckagefläche vergleicht. In Bild 3 sind die Differenzdruck-Luftmassenstromkurven für die vier untersuchten Fälle aufgetragen. Die Lochreihen zeigen in beiden Fällen sowohl mit der dichteren als auch mit der leichteren Mineralfaser ein laminares Strömungsverhalten, d.h. der Strömungsexponent n der Gleichung (1) liegt nahe 1, wodurch sich ein nahezu linearer Verlauf ergibt und der Luftmassenstrom bei gleicher Druckdifferenz im Vergleich zu der Einzelleckage höher liegt. Bei den beiden Kurven der Einzelleckage liegt der Strömungskoeffizient n eher im turbulenten Bereich mit Werten um die 0,6, wodurch mit steigenden Druck der Luftmassenstrom nicht proportional zunimmt.

$$m = C \cdot \Delta P^n \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

$$m = \text{Luftmassenstrom} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$C = \text{Strömungskoeffizient} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s Pa}} \right]$$

$$\Delta P = \text{Druckdifferenz} [\text{Pa}]$$

$$n = \text{Strömungsexponent} [-]$$

Bei einer Druckdifferenz von 15 Pa konnte bei den 25 kleineren Leckagen in Kombination mit der weniger dichten Mineralfaserdämmung im Vergleich zur Einzelleckage eine um 6% höhere Durchströmung und in Kombination mit der dichteren Mineralfaser eine 16% höhere Durchströmung festgestellt werden. Die Versuche bestätigen also, dass die Strömung bei kleineren Leckagen bis zu deutlich höheren Druckdifferenzen im laminaren Bereich bleibt als bei größeren Einzelleckagen, bevor sich ein Umschlag zur turbulenten Strömung einstellt.

In der Praxis sind es jedoch genau diese kleineren Imperfektionen, wie Tackernadeln und kleinere Fehlstellen in Klebeverbindungen, die häufig anzutreffen und nahezu unvermeidbar sind. Und genau diese Undichtigkeiten in an sich luftdichten Materialien führen zu einer befeuchtungsrelevanten Durchströmung der Bauteile. Sind viele von ihnen vorhanden, sind sie also als „riskanter“ einzustufen als einzelne, größere Leckagen, da sie zu einem höheren Infiltrationsstrom und somit zu einem größeren Feuchteintrag ins Bauteil führen.

3.2 Luftmassenstrommessungen – Grenzströmungseffekte

Ein weiteres Phänomen, welches untersucht wurde, ist die Strömung durch die poröse Mineralfaser entlang einer festen Begrenzung wie eines Sparrens oder Pfostens (siehe Bild 4 rechts). Im Vergleich dazu wurde die ansonsten identische Strömungssituation im Regelquerschnitt des Gefachs untersucht (siehe Bild 4 links).

Die Versuche haben in diesem Fall gezeigt, dass im untersuchten Druckbereich zwischen 5 und 15 Pa die Strömungssituation entlang des Sparrens oder Pfostens im Vergleich zur Gefachmitte eine durchschnittlich um 60% höhere Durchströmungsrate ergibt. Hierfür scheint eine sich im Grenzbereich zwischen fester Beplankung und porö-

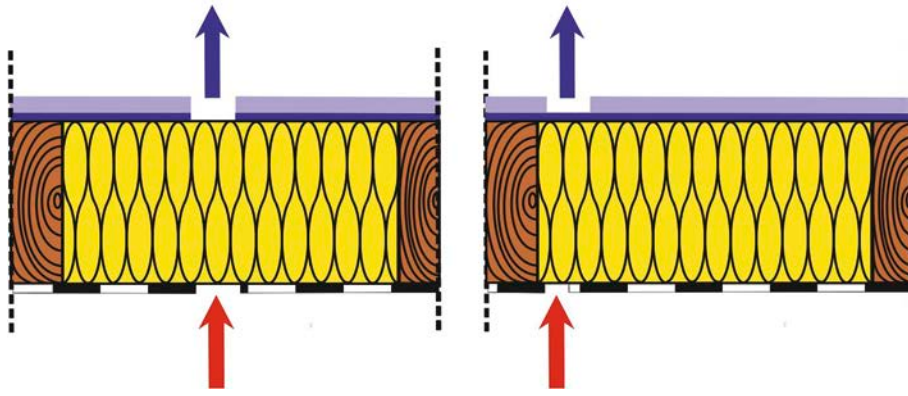


Bild 4. Strömung durch die Mineralfaserdämmung im Gefachbereich (links) und in Grenzströmungssituation (rechts)
 Fig. 4. Flow situation through the mineral fiber insulation in the middle between the rafters (left) and lateral flow situation near the post (right)

sem Material bildende laminare Unterschicht oder laminare Grenzschichtströmung verantwortlich zu sein.

Da in der Baupraxis Überlappungen und Verklebungen vor festem Untergrund wie Sparren oder Pfosten angeordnet werden sollten, befindet sich genau dort die Mehrzahl der Fehlstellen. Diese Durchströmungssituation ist also vermutlich sehr häufig anzutreffen. Aufgrund der größeren Infiltrationsströme sind Leckagen an diesen Stellen daher zwar als besonders riskant, gleichzeitig aber auch als weitgehend unvermeidbar einzustufen.

Versuche, die die Kombination aus mehreren kleinen Leckagen und einer seitlichen Strömungssituation entlang eines Pfostens/Sparrens untersuchen, konnten im Rahmen dieser Versuchsreihe leider nicht durchgeführt werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass sich durch eine Überlagerung beider Effekte noch größere Infiltrationsraten ergeben.

3.3 Luftmassenstrommessungen – Luftdichtheit von Klebeverbindungen

Sowohl bei den durchgeführten Durchströmungsmessungen als auch bei den Befeuchtungsversuchen konnte festgestellt werden, dass die Randverbindungen der Plexiglasscheibe und der Holzständerkonstruktion auf der Kaltseite sowie der Aluminiumplatte und der Holzständerkonstruktion auf der Warmseite mit Klebebändern nicht vollständig luftdicht abdichten waren. Deutlich zeigte sich dies bei den Befeuchtungsversuchen an den geschlossenen Testaufbauten ohne Leckageöffnung. Auch hier befand sich entgegen den Erwartungen nach den Versuchen eine nicht unerhebliche Tauwassermenge in den Konstruktionen.

Um festzustellen, ob die gemessenen Leckageströme tatsächlich aus den Klebeverbindungen resultieren können, wurde ein gesonderter Versuchsaufbau angefertigt, an welchem Messungen zur Luftdurchlässigkeit der Klebeverbindungen selbst durchgeführt wurden. Wie in Bild 5 dargestellt, handelte es sich hierbei um eine luftdichte Kunststoffbox, in die eine Dampfbremsfolie auf einer geschlitzten Unterlage so luftdicht wie möglich eingebaut wurde. Die fast absolute Luftdichtheit des Aufbaus wurde bei 50 Pa gemessen und bestätigt.

Die Folie wurde anschließend entlang der Schlitzes in der Platte aufgeschnitten und mit verschiedenen handelsüblichen Klebebändern für Dampfbremsfolien wiederverklebt.



Bild 5. Luftmassenstrommessung von Klebebändern in einer luftdichten Box

Fig. 5. Air mass flow measurements from adhesive tapes on top of an airtight plastic box

Dabei wurde unter Laborbedingungen auf eine möglichst perfekte Verklebung und einen adäquaten Anpressdruck geachtet. Diese Bedingungen sind auf der Baustelle so sicherlich in den wenigsten Fällen gegeben, weshalb die Werte in Bezug auf die Überprüfung der Messergebnisse an den Labor-Wandaufbauten zwar eine entsprechende Relevanz aufweisen, jedoch keine allgemeingültige Größenordnung für die Dichtheit von Klebeverbindungen repräsentieren, denn in der Praxis dürfte die Dichtheit eher geringer ausfallen.

Die Ergebnisse der verschiedenen Messungen sind vergleichend als Bandbreite in Bild 6 dargestellt. Die Größenordnung der Luftmassenströme beider Versuche ist ähnlich, wobei die Messungen an den sehr gut abgedichteten Labor-Wandaufbauten ein etwas niedrigeres Niveau und eine etwas geringere Bandbreite als die reinen Klebebandmessungen aufweisen. Dies liegt vor allem daran, dass zum einen die Wandaufbauten nachgedichtet wurden und zum anderen es sogar unter Laborbedingungen kaum möglich war, die Klebebänder absolut faltenfrei auf der Messbox zu verkleben. Bereits eine kleine Fehlstelle durch eine Folienfalte auf 5 m Klebeband hat die Durchströmungsmenge um den Faktor 100 erhöht. Die Ergebnisse zeigen also, dass es mit Klebeverbindungen in der Praxis nicht möglich ist, absolut luftdichte Verbindungen herzustellen.

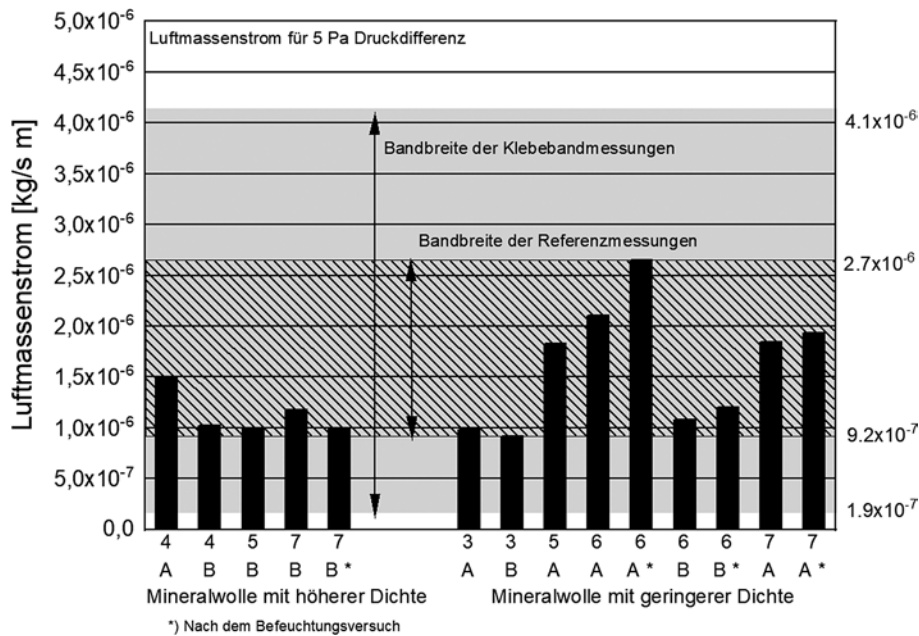


Bild 6. Ermittelte Größenordnung der Luftmassenströme pro Meter Klebeverbindung bei 5 Pa Druckdifferenz. Die Bandbreite der Referenzmessungen mit geschlossenen Leckagen an den Holzständer-Versuchsaufbauten sind als schwarze Balken und schraffierter Bereich dargestellt; die Bandbreite der Messungen an den Klebebändern als grauer Bereich

Fig. 6. Air mass flow of the reference (black bars) and the verification measurements (grey area) per meter adhesive tape for 5 Pa pressure difference; hatched area: range of the reference measurements with closed leakage

Das Niveau der Durchströmungsmenge ist dabei aus energetischer Sicht sicherlich vernachlässigbar, feuchtetechnisch jedoch immer noch sehr relevant. Im Vergleich zu den planmäßig eingebrachten Leckagen in Form der beschriebenen Löcher trugen die Luftströmungen durch die Klebebänder im Mittel etwa dieselbe Feuchtemenge in die Konstruktionen ein.

3.4 Luftmassenstrommessungen – Veränderung des Strömungswiderstandes

Anhand der Druckdifferenz-Luftmassenstrommessungen vor und nach den Befeuchtungsversuchen konnten auch hier Veränderungen festgestellt werden. Die in den Dämmstoffen akkumulierte Feuchte oder der Durchströmungs-

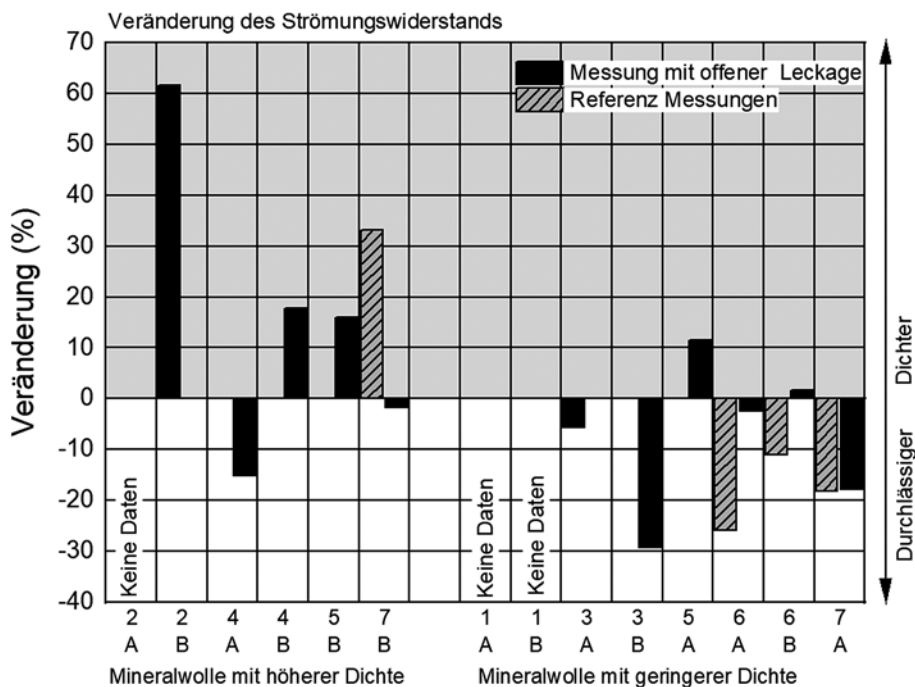


Bild 7. Veränderung des Strömungswiderstandes feuchter Mineralfaserdämmung im Vergleich zum trockenen Einbauzustand. Die Daten beziehen sich jeweils auf die im Befeuchtungsversuch aufgebrachte Druckdifferenz von 5 oder 15 Pa

Fig. 7. Change of the airflow rate after the humidification experiments compared to the initial value. Each value relates to the target pressure conditions of 5 or 15 Pa of the respective humidification experiment

vorgang scheint die Luftdurchlässigkeit des Materials zu beeinflussen. Bild 7 zeigt die prozentuale Veränderung des Strömungswiderstandes im trockenen Zustand und nach den Befeuchtungsversuchen. Dabei scheint die Mineralfaserdämmung mit höherer Dichte im feuchten Zustand dichter zu werden, während die mit geringerer Dichte durchlässiger wird. Dieses Verhalten kann zurzeit jedoch auf Basis der durchgeführten Versuche noch nicht abschließend erklärt werden und müsste aufgrund der geringen Anzahl an verwertbaren Messergebnisse durch weitere Untersuchungen überprüft werden.

3.5 Befeuchtungsversuche – Feuchteverteilung zwischen Dämmstoff und Schalung

Als erstes Ergebnis der Befeuchtungsversuche konnte mittels gravimetrischer Bestimmung der Wassergehalte in den Dämmstoffen und den Papiertüchern an der Plexiglasscheibe festgestellt werden, dass die unterschiedliche Dichte der Dämmstoffe die Feuchteverteilung beeinflusst. Bild 8 zeigt die verwendeten Mineralfaserproben und die prozentuale Feuchteverteilung zwischen Dämmung und Schalung (bzw. im Versuch die Feuchte in den Papiertüchern). Bei der Mineralfaser mit geringerer Dichte hat sich ca. 70 % des Tauwassers in den Papiertüchern akkumuliert, während sich lediglich ca. 30 % der Wassermasse im Dämmstoff befand. Bei der Mineralfaser mit höherer Dichte war das Verhältnis ungefähr 50/50.

Für die Praxis kann hieraus geschlussfolgert werden, dass bei der Verwendung von Mineralfaserdämmung mit einer geringeren Dichte mehr Tauwasser an der Schalung zu erwarten ist. Dadurch können sich hier im Vergleich zu einer dichteren Mineralfaser höhere Schalungsfeuchten einstellen, was ggf. bereits früher zu kritischen Bedingungen in Holz oder Holzwerkstoffen führen kann. Beispielhaft dafür ist in Bild 9 eine feuchte Flachdachschalung mit Schimmelpilzbe- wuchs dargestellt, deren erhöhte Feuchtegehalte vermutlich auf konvektiven Feuchteeintrag zurückzuführen sind.

3.6 Befeuchtungsversuche – Feuchteverteilung über die Höhe

Im Folgenden wird die Feuchteverteilung anhand der Wassermengen in den Papiertüchern nach den Befeuchtungsversuchen betrachtet. Es handelt sich hier also nicht um

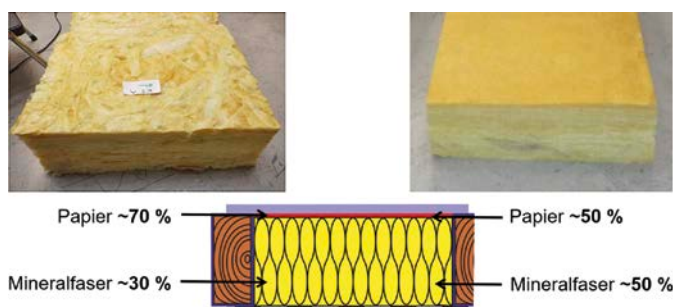


Bild 8. Feuchteverteilung zwischen Schalung (Papiertüchern) und Dämmstoff bei geringerer Dämmstoffdichte (links) und höherer Dämmstoffdichte (rechts)
Fig. 8. Moisture distribution between the sheathing (resp. paper sheets) and the insulation material of low density (left) and higher density (right)



Bild 9. Nach einer Winterperiode geöffnete Schalung eines Flachdachs, welche vermutlich durch konvektiven Feuchteeintrag verursachte erhöhte Feuchtegehalte aufweist
Fig. 9. After a winter period opened flat roof timber sheathing with high water contents potentially caused by convection moisture entry

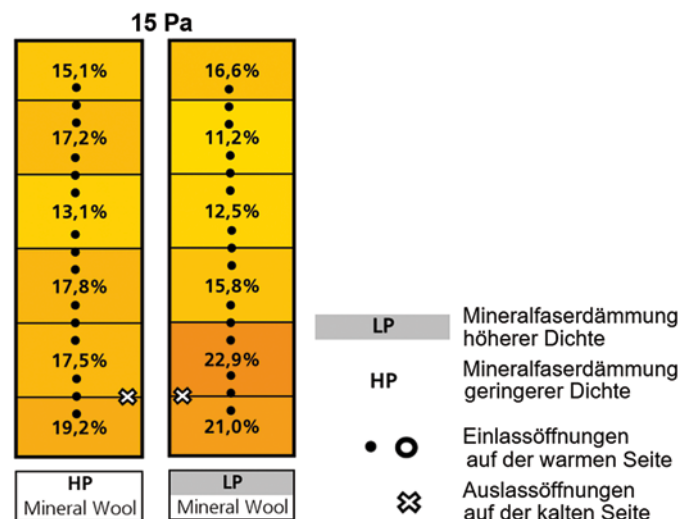


Bild 10. Feuchteverteilung über die Höhe der Versuchswände mit einer Lochreihe (25 x 1 mm) bei einer Druckdifferenz von 15 Pa
Fig. 10. Moisture distribution over the height of the test wall assemblies with a row of holes (25 x 1 mm) at a pressure difference of 15 Pa

die gesamte eingetragene Tauwassermenge, welche sich wie zuvor beschrieben zwischen Schalung und Dämmstoff, abhängig von der Dämmstoffdichte, verteilt.

Bild 10 zeigt die prozentuale Verteilung über die Höhe der beiden Versuchswände mit einer Lochreihe bei 15 Pa und zwei unterschiedlich dichten Mineralfaserdämmungen. Es zeigt sich, dass sich hier eine recht homogene Feuchteverteilung einstellt mit nur geringfügig höheren Werten im unteren Bereich um den Auslass auf der Kaltseite.

In Bild 11 ist die Feuchteverteilung der Versuche mit einer seitlichen Strömungssituation entlang der Pfosten bei einer Druckdifferenz von 5 Pa dargestellt. Im Vergleich ste-

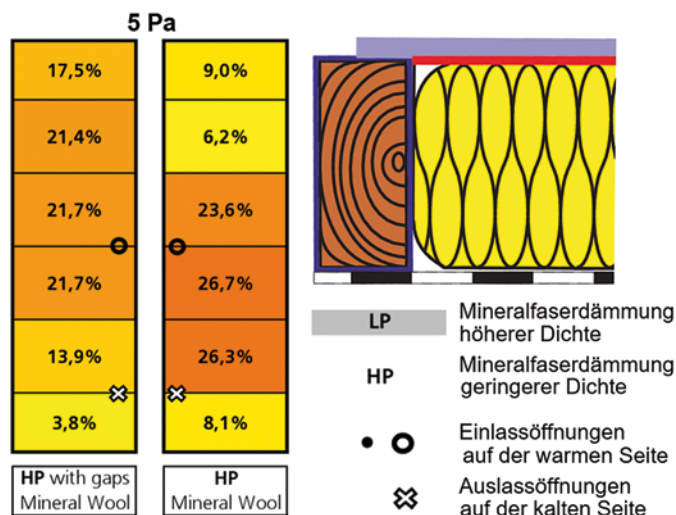


Bild 11. Feuchteverteilung über die Höhe der Versuchswände mit Einzelleckage, seitlicher Strömung entlang des Pfostens und eingedrückten Kanten (linkes Versuchsfeld) bei einer Druckdifferenz von 5 Pa

Fig. 11. Moisture distribution over the height of the test wall assemblies with single leakage and lateral flow along the post at a pressure difference of 5 Pa with edge recess on the left test field

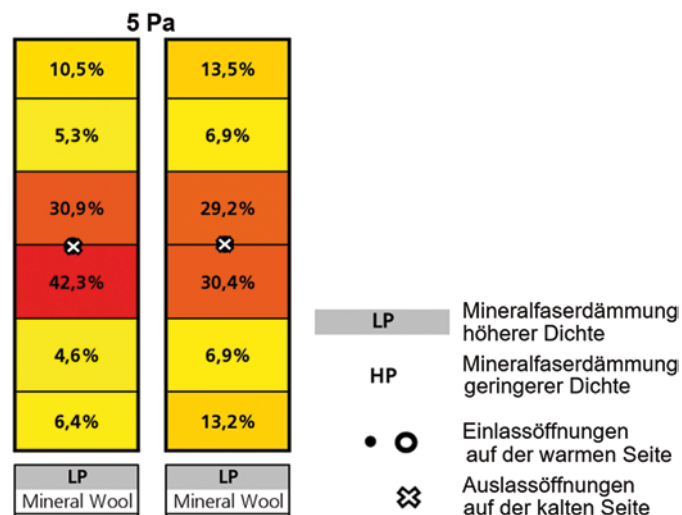


Bild 12. Feuchteverteilung über die Höhe der Versuchswände mit direkter Durchströmung mit ausgestanztem Strömungskanal (linkes Versuchsfeld) und ohne direkten Strömungskanal (rechtes Versuchsfeld) bei einer Druckdifferenz von 5 Pa

Fig. 12. Moisture distribution over the height of the test wall assemblies with direct flow through a punched-out flow channel (left) and without direct flow channel (right) at a pressure difference of 5 Pa

hen auf der linken Seite die Variante mit eingedrückten Kanten der Mineralfaserdämmung und rechts eine passgenaue Installation des Dämmstoffs. Es ist ersichtlich, dass sich im rechten Versuchsfeld die Feuchte hauptsächlich zwischen Ein- und Auslass verteilt, während sich im linken Feld die Feuchte über die entstehenden Spalten auch nach oben in die Konstruktion verteilt. Im Vergleich zu einer Einzelleckage in Gefachmitte ist die Gesamtwassermenge in den Konstruktionen bei diesen beiden Versuchen durch die Grenzströmung an den Pfosten um ca. 1/3 erhöht. Es entstehen durch das Eindringen der Kanten der Mineralfaser an den Sparren zusätzliche Luftkanäle, wodurch sich eine unkontrollierte Feuchteverteilung einstellt. In der Baupraxis sollte diese Situation daher eher vermieden werden.

Vergleicht man weiterhin das rechte Feld in Bild 11 bei 5 Pa Druckdifferenz mit einer seitlichen Strömungssituation mit dem zweiten Feld von links in Bild 13 mit derselben Druckdifferenz und Dämmstoffdichte, jedoch mittlerer Einlassöffnung ist festzustellen, dass sich die Feuchteverteilungen gänzlich unterscheiden. Durch den Grenzströmungseffekt bei der seitlichen Anordnung (Bild 11 rechts) scheint sich der Strömungswiderstand im Randbereich derart zu verringern, dass sich hier ein Hauptströmungspfad ergibt und sich die Feuchte größtenteils auf diesem, zwischen Ein- und Auslassöffnung akkumuliert, während sich die Feuchte bei mittlerer Leckageanordnung (Bild 13, 2. von links) hauptsächlich in den oberen Bereich der Konstruktion verteilt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der direkten Durchströmungssituation betrachtet. Bild 12 zeigt die Feuchteverteilung in den Papiertüchern nach dem Versuch mit einem ausgestanzten Strömungskanal (durch die gesamte Dämmplatte) im linken Versuchsfeld und ohne einen direkten Strömungskanal im rechten Versuchsfeld. Bei beiden Varianten ist eine starke Feuchteakkumulation rund um die Auslassöffnungen zu verzeichnen. Die Durch-

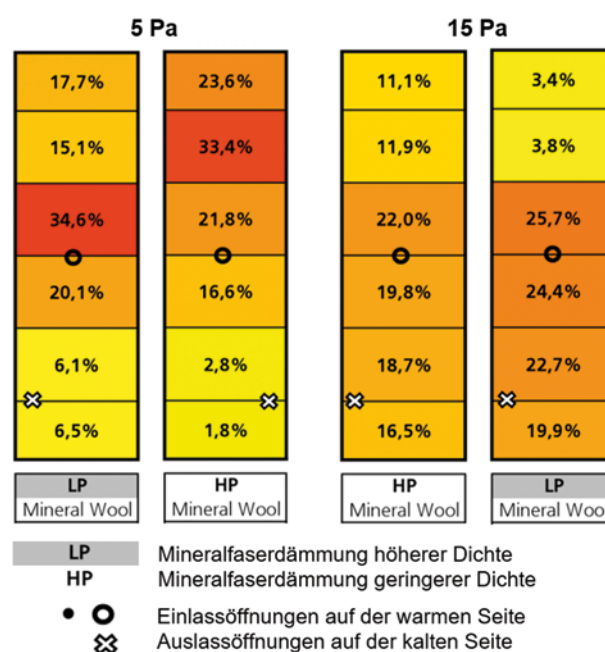


Bild 13. Feuchteverteilung über die Höhe der Versuchswände mit gleicher Leckageanordnung, aber unterschiedlicher Dichte der Mineralfaserdämmung und unterschiedlichen Druckdifferenzen (5 Pa bei den zwei linken und 15 Pa bei den zwei rechten Versuchsfeldern)

Fig. 13. Moisture distribution over the height of the test wall assemblies with the same leakage arrangement but different insulation densities and pressure differences (5 Pa in the two left and 15 Pa in the two right test fields)

strömungsmengen betrugen im linken Feld ca. 53 l/h und im rechten Feld ca. 40 l/h.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die hier untersuchte direkte Durchströmung nicht zu einer feuchte-technisch eher unkritischen „Wärmeleckage“ führt, bei der sich der Strö-

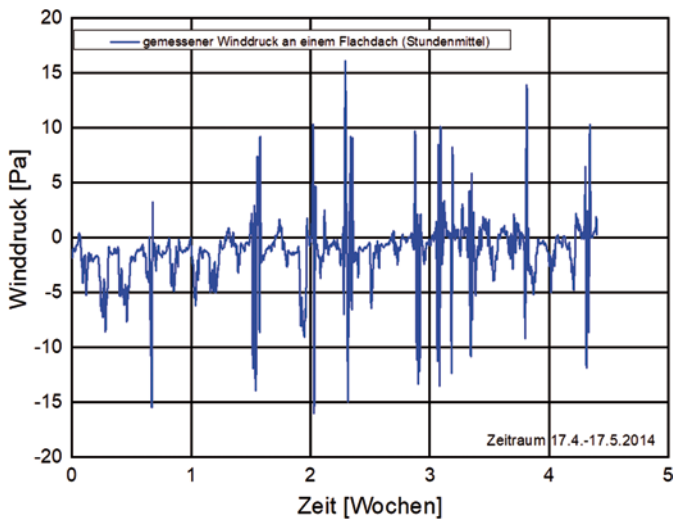


Bild 14. An einem einstöckigen Flachdach gemessener Winddruck über einen Zeitraum von ca. 4 Wochen als Stundenmittelwerte in Pa

Fig. 14. Wind pressure measured on a one-storey flat roof over a period of approx. 4 weeks as hourly mean values in Pa

mungspfad derart erwärmt, dass es zu keinem oder deutlich geringerem Tauwasserausfall kommt. Die Erwärmung aufgrund der Durchströmung ist eher gering, was anhand der geringen Wärmespeicherkapazität von Luft und den hier immer noch eher geringen Durchströmungsmengen auch plausibel erscheint. Die in der Luft enthaltene Feuchtemenge, die entsprechend der Kaltseitentemperatur maximal auskondensieren könnte, fällt auch tatsächlich als Tauwasser aus. „Wärmeleckagen“ scheinen dementsprechend bei der hier untersuchten Größenordnung eines 5-mm-Lochs unter den aufgetragenen Differenzdrücken nicht aufzutreten. Bei größeren Leckagen ist aufgrund der größeren Durchströmungsmenge eine Erwärmung und damit eine Tauwasserreduzierung durchaus vorstellbar. Leckagen dieser Größenordnung sind dann jedoch auch deutlich sichtbar und damit abdichtbar. Bei kleineren Leckagen müssten für einen vergleichbaren Effekt wesentlich höhere Druckdifferenzen vorliegen als in der Realität zu erwarten sind. Für die Praxis bedeuten die Ergebnisse allerdings, dass praktisch jede verbleibende Leckage auch eine „Feuchte“-Leckage ist, die ihren Anteil zum konvektiven Gesamtfeuchteeintrag beiträgt.

In Bild 13 sind die jeweils identischen Leckageanordnungen mit zwei verschiedenen Mineralfaserdichten, jedoch unterschiedlichen Druckdifferenzen von 5 und 15 Pa dargestellt. Die beiden linken Versuchsfelder mit einer Druckdifferenz von 5 Pa zeigen eine Feuchteakkumulation im oberen Bereich der Gefache. Hier dominiert der vertikale Auftrieb der eingeströmten feuchteren Luft (mit einer geringeren Dichte) innerhalb der Gefache über die aufgetragene Druckdifferenz horizontal zum Wandaufbau. Bei den beiden rechten Versuchsfeldern, die mit einer Druckdifferenz von 15 Pa beaufschlagt wurden, ist eine stärkere Feuchteakkumulation zwischen Ein- und Auslassöffnung zu beobachten. Der Auftrieb der feuchten Luft in der Konstruktion scheint hier eine geringere Rolle gegenüber der größeren horizontalen Druckdifferenz einzunehmen.

Wie jedoch Differenzdruckmessungen an Gebäuden gezeigt haben, schwankt der Differenzdruck über die Ge-

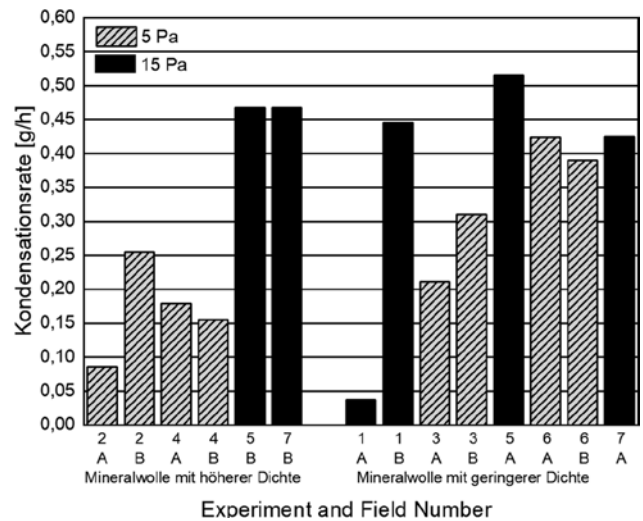


Bild 15. Stündliche Kondensationsraten in [g/h] bei den 14 durchgeführten Versuchen bei 5 Pa (gestrichelte Balken) und 15 Pa Druckdifferenz (schwarze Balken)

Fig. 15. Hourly condensed water based on the complete weighed water content inside the constructions

bäudehülle aufgrund des thermischen Auftriebs und der Windanströmung sehr stark. Eine über einen längeren Zeitraum anhaltende konstante Druckdifferenz ist eher selten vorhanden, wie aus Bild 14 ersichtlich wird. Es kann daher geschlossen werden, dass sich zum einen aufgrund von Druckschwankungen über die Konstruktion und zum anderen aufgrund einer in der Realität vermutlich eher willkürlichen Leckageverteilung in Leichtbaukonstruktionen eine mehr oder weniger gleichmäßige Feuchteverteilung einstellt.

3.7 Befeuchtungsversuche – Stündliche Tauwasserraten

Die stündlichen Tauwasserraten auf Basis der gravimetrisch bestimmten Wassermenge in den Versuchsaufbauten sind für 14 Varianten in Bild 15 dargestellt. Dabei wurden bei den Versuchen 1A und 2A komplett geschlossene Konstruktionen verwendet, bei denen die Feuchte nur über die Undichtigkeiten der Verklebungen eingedrungen ist. Die Lochreihe, Versuch 5A, zeigt mit mehr als 0,5 g/h die höchste Tauwasserrate. Generell sind jedoch bei den Versuchen mit einer Druckdifferenz von 15 Pa, unabhängig von der Dichte der Mineralfaserdämmung, keine nennenswerten Unterschiede festzustellen. Bei einer Druckdifferenz von 5 Pa zeigt sich, dass eine seitliche Strömungssituation entlang der Pfosten (Versuche 6A und 6B) ähnlich hohe Tauwasserraten hervorruft wie die anderen Leckageanordnungen bei 15 Pa Druckdifferenz. Abgesehen davon ist jedoch festzuhalten, dass eine dreifache Druckdifferenz nicht zu einer dreifachen Tauwassermenge führt.

4 Fazit

Die durchgeführten Strömungsmessungen und Befeuchtungsversuche führen zu einigen neuen Erkenntnissen bezüglich der Luftströmung, der Strömungswege und des Tauwasserverhaltens bei Infiltration in Leichtbaukonstruktionen. So konnte gezeigt werden, dass mehrere kleinere Leckagen bei gleicher Druckdifferenz zu höheren Durch-

strömungsmengen führen als eine größere Leckage mit derselben Leckagefläche. Auch Randströmungen entlang von Pfosten oder Sparren verursachen einen Grenzströmungseffekt, der zu höheren Strömungsmengen aufgrund reduzierten Strömungswiderstands und dadurch zu höheren Tauwassermengen führt als gleiche Leckagen in Gefachmitte. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass sogar unter optimalen Laborbedingungen mit Klebeverbindungen keine vollständige Luftdichtheit herstellbar ist. Die Durchlässigkeitsraten liegen zwar in einer Größenordnung, die aus energetischer Sicht keine Relevanz besitzt, leisten jedoch immer noch einen nicht unerheblichen Anteil zum konvektiven Feuchteeintrag. Im Mittel waren 10 m Klebeverbindung ebenso durchlässig wie eine Einzelleckage mit einem Durchmesser von 5 mm. Vergleichsmessungen ergaben, dass sich die Durchströmbarkeit der Dämmstoffe mit unterschiedlicher Dichte im Verlauf des Befeuchtungsversuchs ändert. Mineralfaserdämmung mit höherer Dichte scheint im feuchten Zustand luftdichter zu werden, wohingegen Dämmung mit geringerer Dichte überraschenderweise luftdurchlässiger wurde. Bezüglich dieses Effekts waren die durchgeführten Untersuchungen allerdings für weitergehende Aussagen nicht umfassend genug.

Die Befeuchtungsversuche in der Doppelklimakammer belegen, dass sich die Feuchteverteilung zwischen Dämmstoff und Schalung mit der Dichte der verwendeten Mineralfaser verändert. Bei höherer Dichte wurde ein Verhältnis von ca. 50/50 zwischen Dämmung und Schalung ermittelt, bei geringerer Dichte dagegen blieben nur etwa 30 % der Feuchte in der Mineralwolle, was in der Praxis zu höheren Schalungsfeuchten führen kann.

Weiterhin zeigen die Befeuchtungsversuche, dass auch eine direkte Durchströmung nicht zu einer Wärmeleckage mit Erwärmung des Strömungspfads und dadurch vermindertem Tauwasserausfall führt. Vielmehr führen auch solche Situationen zu den maximal möglichen Tauwassermengen. Bei dem hier betrachteten Dichtheitsniveau scheinen die sog. Wärmelecks also kaum noch eine Rolle zu spielen. Darüber hinaus konnte bestätigt werden, dass die Befeuchtungsrate erwartungsgemäß nicht linear mit der Druckdifferenz steigt. Der mittlere Strömungsexponent, der sich bei den Versuchen einstellte, lag bei ca. 0,8. Daher führt eine Verdreifachung des Differenzdrucks auch nicht zu einer dreifachen Tauwassermenge, sondern im Mittel etwa zu einer Verdoppelung. Obwohl bei unterschiedlichen Leckageanordnungen und Druckdifferenzen verschiedene Feuchteverteilungen in den Konstruktionen erkennbar waren, kann in der Praxis wohl von einer weitgehend gleichmäßigen Verteilung der eingetragenen Feuchte ausgegangen werden. Zum einen ist aufgrund der starken Fluktuationen des Differenzdrucks unter realen Bedingungen eine noch homogenere Feuchteverteilung in den Konstruktionen als bei den Laborversuchen zu erwarten. Zum anderen kann von einer eher willkürlichen Leckageverteilung durch Anschlussstellen, Klebeverbindungen, Tackernadeln usw. an realen Leichtbaukonstruktionen ausgegangen werden, wodurch sich z. B. in einem Gefach mehrere Strömungssituationen überlagern. Dies rechtfertigt die Annahme, dass die Entwicklung eines eindimensionalen Modells für die Bemessung mit hygrothermischen Simulationen (z. B. WUFI) ausreichend ist. Hier besteht jedoch weiterhin Forschungsbedarf, da zwar viele

Hinweise gewonnen wurden, aber noch nicht alle Einflussfaktoren hinreichend untersucht werden konnten. Der konvektive bedingte Feuchteeintrag scheint einerseits tendenziell größer zu sein als bisher angenommen und sich durch eine Verbesserung der Gesamtluftdichtheit der Gebäudehülle nicht in gleichem Maße zu reduzieren. Dies belegen auch immer wiederkehrende Schadensfälle, die auf konvektiven Feuchteeintrag zurückzuführen sind. Viele Leichtbaukonstruktionen bleiben andererseits in der Realität schadenfrei und weisen meist geringere Feuchtegehalte auf als die hier dargestellten Versuche implizieren würden. Hier ist davon auszugehen, dass auch konvektive Trocknung in nennenswertem Umfang auftritt. Dieser Effekt wird durch die bisherigen Modelle jedoch nicht berücksichtigt und ist auch weitgehend unerforscht. Eine adäquate Berücksichtigung der Infiltrationsfeuchtebilanz in der hygrothermischen Bauteilbemessung erfordert daher eine zuverlässige Modellierung sowohl des Feuchteeintrags als auch der konvektiven Trocknung. Aufgrund des immer besseren Dämmniveaus und des zunehmenden Einsatzes von Baumaterialien aus meist feuchteempfindlichen nachwachsenden Rohstoffen belegen die Ergebnisse einen dringenden Forschungs- und Handlungsbedarf.

Literatur

- [1] Wagdy, A. F.: Airtight Buildings: Past, Present and Future. ASHRAE Journal 57 (2015), S. 40–50.
- [2] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart 1994.
- [3] DIN EN 15026 (2007): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Berlin: Beuth Verlag.
- [4] WTA-Merkblatt 6-2-01/D (2002): Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse.
- [5] DIN 4108-3 (2018): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Berlin: Beuth Verlag.
- [6] DIN 68800-2 (2012): Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Berlin: Beuth Verlag.
- [7] Zirkelbach, D.; Schafaczek, B.; Borsch-Laaks, R.: Dampfkongvektion wird berechenbar; Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. 4th Intern. BUILDAIR Symposium on Building and Ductwork Air Tightness – 30th AIVC Conference, 2009, October 1–2, Berlin.
- [8] Kölsch, P.; Zirkelbach, D.; Nusser, B.; Wagner, R.; Zegowitz, A.; Künzel, H.: Airflow through lightweight wall assemblies – influence of size and location of leakages. Conference proceedings: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings. XIII International Conference Clearwater Beach, Florida 2016, p. 459–484.

Autoren dieses Beitrages:

Philipp Kölsch M. Eng., philipp.koelsch@ibp.fraunhofer.de
 Prof. Dr.-Ing. Hartwig Künzel, hartwig.kuenzel@ibp.fraunhofer.de
 Dr.-Ing. Daniel Zirkelbach, daniel.zirkelbach@ibp.fraunhofer.de

Alle:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
 Fraunhoferstr. 10
 83626 Valley



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de