

Luftdichtheit von Klebeverbindungen – eine kritische Betrachtung

Die Herstellung von dauerhaften und luftdichten Verbindungen an Dampfbremsfolien mit Klebebändern stellt immer noch eine Herausforderung dar. Die Anforderungen an die Verbindungen sind hoch, die Ergebnisse aber meist wenig zufriedenstellend. Die in der Normung festgeschriebenen Prüfverfahren zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit beschreiten hierbei von der Baupraxis abweichende Wege. Dies führt dazu, dass eine Eignung zwar auf dem Papier nachgewiesen werden kann, in der Praxis jedoch trotzdem oft Probleme auftreten, was gravierende Folgen sowohl für den Energiebedarf als auch für die Feuchteverhältnisse, vor allem in Leichtbaukonstruktionen, haben kann. Der Beitrag beleuchtet die Unterschiede zwischen Normprüfung und Praxis und identifiziert mögliche Forschungsansätze, um zukünftig eine dauerhaftere Luftdichtheit von Leichtbauteilen zu gewährleisten und Feuchteverhältnisse realitätsnah berechnen zu können.

Stichworte Klebeverbindungen; Luftdichtheit; Infiltration; Feuchte; Leichtbau

1 Einleitung

Zur Erreichung der energiepolitischen Vorgaben zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs im Gebäudebereich ist eine deutliche Verringerung der Transmissionswärmeverluste durch die Gebäudehülle eine wesentliche Voraussetzung. Neben der Umsetzung von entsprechend energieeffizienten Gebäuden im Neubau ist insbesondere auch die Hebung des Energieeinsparpotenzials im Gebäudebestand von herausragender Bedeutung. In beiden Fällen (Neubau und Sanierung) steigen damit aber auch die Anforderungen an die Luftdichtheit der Gebäudehülle. Die Maßnahmen zur Energieeinsparung beeinflussen jedoch direkt das Feuchteverhalten von Baukonstruktionen. Dieses muss, um die Funktionalität zu erhalten und damit einen dauerhaft schadensfreien Gebäudebetrieb zu ermöglichen, stets mitberücksichtigt werden.

Besonderer Beachtung bedürfen in diesem Zusammenhang Leichtbaukonstruktionen, die generell ein etwas niedrigeres Luftdichtheitsniveau als Massivbauteile aufweisen und traditionell aus feuchteempfindlichen Tragkonstruktionen bestehen. Dies sind v. a. Steildächer und Flachdächer mit gedämmten Sparrenfeldern sowie Wandaufbauten in Holzständer- bzw. Holzrahmenbauweise. Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen, die im

Airtightness of adhesive joints – A critical analysis

The creation of durable and airtight connections on vapour barrier films using adhesive tapes remains a challenge. The requirements for the joints are stringent, but the results are usually unsatisfactory. The test procedures specified in the standards to ensure durability deviate from actual construction practice. As a result, whilst suitability can be proven on paper, problems nevertheless often occur in practice. This could have serious consequences for both energy demand and moisture conditions, especially in lightweight constructions. This article highlights the differences between standard testing and practice and identifies possible research approaches to ensure, in future, the long-term airtightness of lightweight building components and to enable realistic calculation of moisture conditions.

Keywords adhesive joints; airtightness; air infiltration; moisture; lightweight construction

Hinblick auf graue Energie und CO₂-Emissionen eine deutlich bessere Bilanz aufweisen als konventionelle Baustoffe, nehmen daher einen immer größeren Stellenwert ein.

Während im ungestörten Regelquerschnitt bei Verwendung geeigneter Folien oder Plattenmaterialien in der Regel keine nennenswerten Luftdurchlässigkeiten auftreten, ist insbesondere der Bereich von Anschlüssen und Fugen zwischen Bauteilen bzw. Baustoffen anfällig für Luftleckagen und damit verbundene Feuchteinträge.

Methoden und Mindestanforderungen zum Nachweis der Dauerhaftigkeit von Klebebändern und Klebemassen waren bis vor Kurzem in der DIN 4108-11:2018-11 [1] beschrieben. Seit Dezember 2025 sind diese Nachweisverfahren in der europäischen Norm DIN EN 17990:2025-12 [2] enthalten. Die DIN 4108-11 [1] wird zukünftig nur noch die Mindestanforderungen an die gemäß DIN EN 17990 [2] ermittelten mechanischen Eigenschaften vor und nach künstlicher Alterung enthalten (EN 4108-11:2026-02 [3]). Hinweise zur Planung und Ausführung der luftdichten Schicht gibt die DIN 4108-7 [4]. Eine Überprüfung der Luftdichtheit des Gebäudes mittels Blower-Door-Test findet i. d. R. nur zur Bauabnahme statt. Eine Überprüfung der Luftdichtheit der Bauteile zur Detektion schadensrelevanter Leckagen ist zu diesem Zeitpunkt aber nur noch eingeschränkt möglich – dies würde eine baubegleitende Messung voraussetzen.

Der Nachweis der Dauerhaftigkeit der Luftdichtheit würde außerdem die Überprüfung der Luftdichtheit nach einigen Jahren der Nutzung erfordern, was ebenfalls nicht erfolgt. Das führt unter anderem dazu, dass es immer wieder zu Feuchteschäden an Leichtbaukonstruktionen kommt, die auf Konvektionsvorgänge zurückzuführen sind.

Das Feuchteverhalten von Konstruktionen und Baustoffen kann mittlerweile durch hygrothermische Simulation gut vorhergesagt werden. Die Simulationsergebnisse sind jedoch immer nur so gut wie das zugrunde gelegte Modell. Die konvektiv eingebrachten Feuchteinträge müssen gemäß DIN 4108-3 [5] bzw. DIN 68800-2 [6] zwar bei der Bemessung berücksichtigt werden, die dafür zur Verfügung stehenden Rechenmodelle sind bisher aber eher einfach gehalten und erfassen nicht alle real relevanten Einflussfaktoren.

Neuere Untersuchungen [7–9] weisen darauf hin, dass die konvektiven Feuchteinträge im Winter u. U. größer sind als bisher angenommen. Da in der Praxis jedoch mit bisherigen Modellen bemessene Konstruktionen meist schadensfrei bleiben, muss auch eine konvektive Rücktrocknung stattfinden, die bisher ebenfalls vernachlässigt wird und noch größtenteils unerforscht ist.

Im Hinblick auf die zukünftig vermehrte Verwendung von feuchteempfindlichen Baustoffen und die Tatsache, dass sich Feuchteschäden meist erst nach mehreren Jahren bemerkbar machen, besteht jedoch Handlungsbedarf, die Einflussfaktoren genauer zu analysieren. Hierbei sind Luftdichtheit und Dauerhaftigkeit zu quantifizieren und die konvektiv bewegte Feuchte zu bilanzieren, um damit den feuchtetechnischen Planungsprozess zu optimieren, sodass nicht heute die Bauschäden von morgen geplant und umgesetzt werden.

2 Problemstellung

Die einschlägigen Normen (DIN EN 17990 [2], DIN 4108-11 [1]) behandeln aktuell nur die Dauerhaftigkeit der Klebkraft der für die Herstellung der luftdichten Schicht unabdingbaren Klebebänder und Klebemassen. Die dort beschriebenen Prüfverfahren wurden entwickelt, um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Aus diesem Grund sind Schälprüfungen auf Referenzsubstraten wie Buchenholz und biaxial orientiertem Polyethylenterephthalat (boPET) mit einer Oberflächenspannung $> 40 \text{ mN/m}$ beschrieben. Die Untersuchungen ermöglichen eine Bewertung der Klebkraft vor und nach einer künstlichen Alterung, können aber intentionsgemäß nicht die realen Verhältnisse am Bau widerspiegeln, welche die Luftdurchlässigkeit der Klebeverbindung beeinflussen.

In der Praxis sind einerseits die Klebefugen i. d. R. auf Scherung beansprucht, andererseits sind die Oberflächenspannungen einer Vielzahl üblicher Dampfbremsen deutlich niedriger. Die Prüfungen vor und nach der Alterung werden außerdem an kleinen Klebeflächen ($25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$) durchgeführt. Unter baupraktischen

Bedingungen liegen jedoch i. d. R. mehrere Meter Verklebungslänge vor. Dabei entstehen insbesondere bei temperatur- und feuchteinduzierten Längenänderungen Probleme durch das ggf. unterschiedliche Ausdehnungs- und Schrumpfverhalten der beteiligten Bauprodukte.

Weiterhin wird vorgegeben, dass beim Verkleben der Anpressdruck mit einer Anpressrolle mit einem Gewicht von 2 kg bei einer definierten Geschwindigkeit von 10 mm/s auf einer festen Unterlage zweimal hintereinander aufgebracht werden muss. Im Rahmen einer Normprüfung sind diese Vorgaben hinsichtlich einer Sicherstellung der Reproduzierbarkeit gerechtfertigt.

In der Praxis werden Dampfbremsfolien bzw. die luftdichte Schicht oft quer zu den Ständern bzw. Sparren verlegt, da sich die Folie so vermeintlich einfacher anbringen lässt. Dies hat jedoch zur Folge, dass die Stöße nicht auf festem Untergrund verklebt sind, da dieser im Bereich der Gefache meist aus flexiblen Dämmstoffen besteht und infolgedessen auch kein ausreichender Anpressdruck auf dem weichen Untergrund sichergestellt werden kann. Dies kann in Abhängigkeit vom verwendeten Klebeband auch zu Überdehnungen des Bandes führen, was dann Rückstellkräfte hervorruft, die zu einer „Tunnelbildung“ und so zu Leckagen führen. Definierte Anpressdrücke, Anpressgeschwindigkeiten und ein doppeltes Anpressen werden auf der Baustelle selten umgesetzt. Auch wird implizit unterstellt, dass eine mechanisch ausreichend stabile Klebefuge luftdicht ist, was ebenfalls lediglich eine theoretische Annahme darstellt. In keiner Norm ist ein konkretes Prüfverfahren enthalten, mit dem tatsächlich die Luftdurchlässigkeit der Produkte bzw. deren Kombination mit handelsüblichen Substraten (Dampfbremsfolien o. Ä.) untersucht wird. Jedoch ist dies genau der Parameter, der die Qualität bestimmt und der die Infiltration und somit das Feuchteverhalten von Bauteilen maßgeblich beeinflusst.

All diese Umstände führen dazu, dass die geprüften Klebemittel nach Norm ihre Eignung bestätigen, sich in der Realität aber schon nach kurzer Zeit wieder partielle Ablösungen zeigen können, wie sich in mehreren Freilandversuchen mit diversen Produkten am Fraunhofer IBP gezeigt hat. Meist bleibt dies auch noch unbemerkt, da direkt nach der Verlegung der luftdichten Schicht Plattenwerkstoffe als Innenverkleidung angebracht werden und die Anschlüsse daher nicht mehr sichtbar und zugänglich sind.

Die beispielhaft angeführten Punkte verdeutlichen, dass Normung und Realität verschiedene Wege beschreiten, was zwangsläufig dazu führt, dass reale Baukonstruktionen anderen Belastungen ausgesetzt sind und sich dadurch andere Luftdurchlässigkeiten und Feuchtebelastungen einstellen. Die Baukonstruktionen weisen daher unter Umständen eine geringere Dauerhaftigkeit auf, als sie es sollten und könnten.

Für eine gezielte Analyse der Einflussfaktoren auf Luftdurchlässigkeit, Durchströmung und resultierende konvektive Feuchtebewegung im Bauteil müssen die

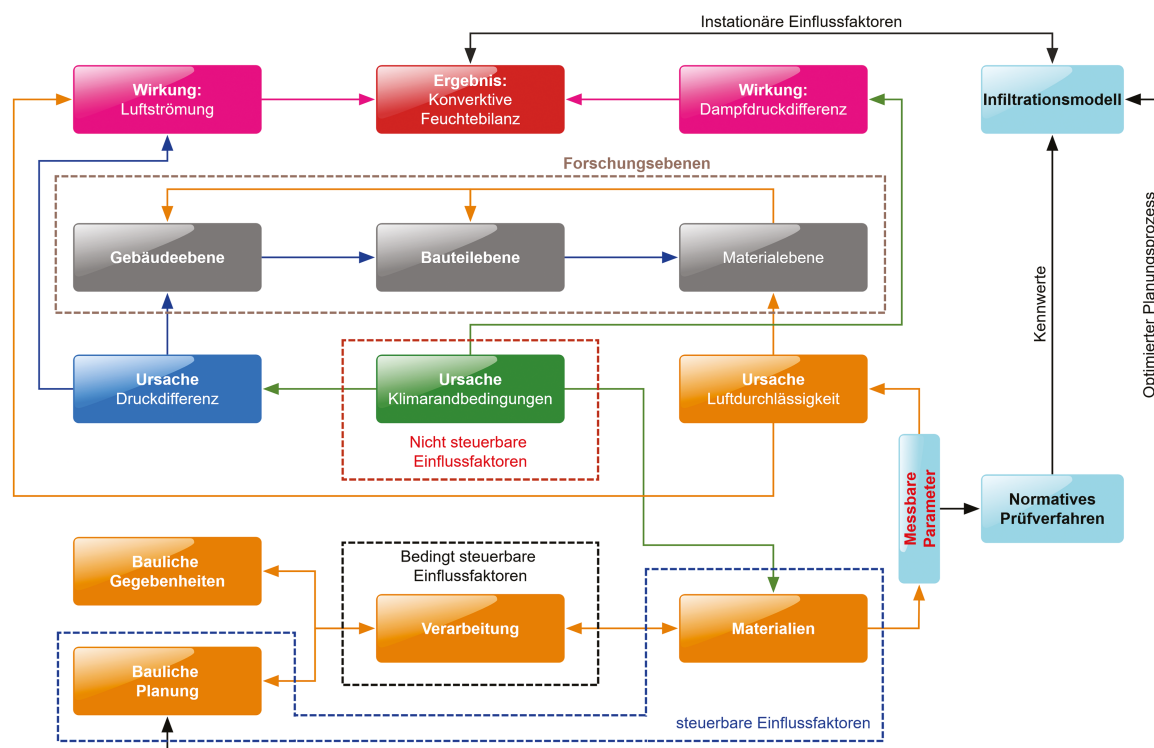


Bild 1 Einflussfaktoren und Zusammenhänge nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip unter Berücksichtigung der verschiedenen Ebenen
 Influencing factors and relationships based on the cause-and-effect principle, taking the various levels into account

Vorgänge daher in einen systematischen Zusammenhang gebracht, potenzielle Angriffspunkte identifiziert und daraus neue Testmethoden entwickelt werden. Nur so ist es möglich, langfristig die Vorgänge in den Planungsprozess zu integrieren und dauerhafte Qualität und Schadensfreiheit zu ermöglichen.

3 Systemische Beschreibung der Luftdurchlässigkeit auf Gebäude-, Bauteil- und Materialebene

Bild 1 zeigt die prinzipiellen Zusammenhänge und Einflussfaktoren, welche die konverktive Feuchtebilanzierung in Leichtbauteilen beeinflussen. Ausgangspunkt bildet die Tatsache, dass sich ein ganzes Gebäude aus einzelnen Bauteilen wie z. B. den Wänden und einem Dach zusammensetzt und diese Bauteile wiederum aus einzelnen Materialien bzw. Baustoffen gefertigt werden. Im Hintergrund steht die belegte Theorie, dass Bauteile immer luftdurchlässiger sind als die Materialien, aus denen sie zusammengesetzt sind, und ganze Gebäude immer luftdurchlässiger als die einzelnen Bauteile [10, 11].

Die Aufteilung in diese drei Ebenen, in der Mitte grau dargestellt, ermöglicht es, die Ursachen und Wirkungen der Durchströmung sowie deren Einflussfaktoren detailliert darzustellen.

Auf Gebäudeebene bestimmen bei Bestandsgebäuden, unter Berücksichtigung der Bauteil- und Materialebene, die baulichen Gegebenheiten und bei Neubauten die bauliche Planung z. B. durch die Erstellung eines Luftdichtheitskonzepts, maßgeblich die Gesamtgebäudedichtheit. Dabei kann die bauliche Planung aktiv beeinflusst werden, wohingegen die baulichen Gegebenheiten nicht

direkt beeinflusst, aber zumeist durch geeignete planerische Maßnahmen ausgeglichen werden können. Dies ist im unteren Bereich von Bild 1 orange dargestellt.

Auf Bauteilebene sind es vor allem die handwerkliche Verarbeitung der Materialien und die auf Verklebungen und Anschlüsse wirkenden Kräfte, die für die Luftdichtheit der Bauteile verantwortlich sind. Die Verarbeitung beeinflusst die Materialien selbst bzw. deren Verbindung untereinander. Als Beispiele seien genannt: Verlust von Klebekraft durch staubige Oberflächen, Überdehnung von Klebebändern beim Verkleben oder unzureichender Anpressdruck. So wirken auch bei einer fachgerechten Installation meist Kräfte auf die Materialien und Verbindungen, durch welche sich Klebeverbindungen partiell lösen und mit der Zeit höhere Luftdurchlässigkeiten einstellen können. Dieser Faktor kann zumindest teilweise durch geeignete Produkte sowie Schulungen und Anleitungen der Ausführenden gesteuert und positiv beeinflusst werden.

Auf Materialebene kommt es vor allem auf die Luftdichtheitseigenschaften der Materialien selbst an. Hierbei bildet meist eine einzige Materialschicht die luftdichte Schicht des Bauteils. So kann z. B. davon ausgegangen werden, dass eine reine Dampfbremsschicht ohne Perforation und ohne Anschlüsse luftdicht ist. Bei OSB-Platten ist die Luftdichtheit hingegen stark von der Dicke und der jeweiligen Produktion abhängig [12, 13]. Im Massivbau wird die luftdichte Schicht i. d. R. durch luftundurchlässige, homogen aufgetragene Putzschichten hergestellt.

Weiterhin wird die Luftdichtheit auf Materialebene – also an Verbindungen und Stößen – von der Kombination geeigneter oder weniger geeigneter Materialien

beeinflusst. So ist nicht jedes Klebeband für jede Dampfbremsfolie geeignet und nicht jeder Dichtstoff für jeden Untergrund. Diese Faktoren sind jedoch durch die verwendeten Materialien selbst und deren Kombinationen beeinflusst und verbesserbar. Trotzdem verbleiben an Verbindungen auch bei geeigneten Materialkombinationen unvermeidbare Restleckagen.

Ansonsten sind es vor allem die nicht steuerbaren Klimarandbedingungen, die die verwendeten Materialien beeinflussen, da die zeitlichen Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte in Kombination mit Krafteinwirkungen über einen längeren Zeitraum hinweg zu einer Alterung der Materialien führen, was deren mechanische und Luftdichtheitseigenschaften beeinflusst.

Als Nächstes werden die Ursachen betrachtet, die überhaupt zu einer Durchströmung mit Luft führen, in deren Folge es zu einem konvektiven Feuchteintrag bzw. einer konvektiven Trocknung im Bauteil kommen kann. Um eine Luftströmung (s. Bild 1 in Magenta oben links) hervorzurufen, müssen immer zwei ursächliche Faktoren in Kombination gegeben sein: Erstens muss eine Leckage vorliegen, durch die Luft strömen kann, und zweitens muss eine Druckdifferenz vorhanden sein, die als treibende Kraft wirkt. Die Menge der durchströmenden Luft ist dabei von der Größe der Leckage, der anliegenden Druckdifferenz und den Strömungseigenschaften abhängig.

Die Druckdifferenz wird hauptsächlich durch die Klimarandbedingungen, also das Innen- und Außenklima (in Bild 1 mittig grün dargestellt), verursacht. Diese Randbedingungen sind in der Praxis kaum steuerbar, da das Außenklima per se nicht beeinflusst werden kann und das Raumklima aufgrund des Behaglichkeitsempfindens der Nutzer i. d. R. nur in engen Grenzen variiert wird. Zum einen ist es der Wind, der auf das Gebäude einwirkt und eine Druckdifferenz zwischen innen und außen verursacht, zum anderen der thermische Auftrieb infolge der Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen. Als dritten Faktor können der Vollständigkeit halber noch die durch Anlagentechnik hervorgerufenen Druckdifferenzen genannt werden. Diese spielen aber meistens eine eher untergeordnete Rolle.

Die resultierenden Druckdifferenzen entstehen dabei durch eine Überlagerung der genannten Faktoren. Sie stellen eine zeitlich variable Ursache der Durchströmungsvorgänge dar, greifen an der Gebäudeebene an und pflanzen sich von dort ausgehend über die Bauteilebene bis auf die Materialebene fort.

Ob diese Durchströmung nun zu einem konvektiven Feuchteintrag oder zu einer konvektiven Trocknung im Bauteil führt, ist erneut vom nicht steuerbaren Einfluss der jeweils aktuellen Klimarandbedingungen abhängig. Temperatur und relative Feuchte im Bauteil bestimmen die lokale Porenluftfeuchte und den dazugehörigen Feuchtegehalt. Die lokal veränderlichen Werte von Temperatur und relativer Luftfeuchte der das Bauteil durchströmenden Luft (in Bild 1 oben rechts in Magenta

dargestellt) bestimmen die sorptive Feuchtaufnahme oder Feuchteabgabe des durchströmten Baustoffs. Wird der Sättigungsdampfdruck erreicht, fällt zudem flüssiges Tauwasser aus, welches entweder vom Baustoff absorbiert wird oder als freies Wasser im Bauteil verbleibt. Dagegen wird Feuchte ausgetragen, wenn sich die Bedingungen umkehren.

Während nun die Wirkung des Wasserdampfdruckgefälles aufgrund der Klimarandbedingungen gut mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten von hygrothermischen Simulationsprogrammen (z. B. WUFI® [14]) abgebildet werden kann, ist vor allem die Höhe der Durchströmungsmenge ein schwer kalkulierbarer Faktor.

4 Erkenntnisse aus internen Untersuchungen im Vergleich zur Normprüfung

4.1 Mechanische Eigenschaften

Neben den Materialeigenschaften sind es vor allem die mechanischen Eigenschaften von Produktkombinationen, z. B. Dampfbremsfolie und Klebeband, auf Bauteilebene, die die Dauerhaftigkeit und die Luftdurchlässigkeit bestimmen. Wie erwähnt, zeigen sich hier immer wieder Ablöseerscheinungen und Tunnelbildung des Klebebandes, teilweise bereits kurze Zeit nach dem Verkleben.

Neben der Verarbeitung haben diese Ablösungen jedoch auch damit zu tun, dass, obwohl die DIN 4108-7 [4] spannungsfreie Anschlüsse fordert, Klebeverbindungen in der Realität meist nicht völlig spannungsfrei hergestellt werden können. Interne Untersuchungen am Fraunhofer IBP haben ergeben, dass die anfängliche Kraft auf die Klebeverbindung, die rein aus dem Verkleben der Dampfbremsfolie resultiert, in einem Bereich um 6 N/m liegt. Auf eine Verklebungsbreite von 25 mm umgerechnet entspricht dies 0,15 N/25 mm. Der in DIN EN 17990 [2] beschriebene Versuch zur statischen Schälhaftigkeit beschreibt eine Kraft von 0,3 N/25 mm über einen Zeitraum von 24 h bei 30 °C (Klebebänder) bzw. 40 °C (Klebmassen). Während dieser Zeit darf sich das Klebeband bzw. das mit der Klebmasse verklebte Substrat nicht von dem in dieser Prüfung verwendeten Referenzsubstrat (Buchenholz und boPET) lösen. Im Vergleich mit der Praxis erscheint die Größenordnung der Belastung zielführend, zumal die Schälbelastung kritischer ist als die im Praxisfall überwiegende Scherbelastung und durch die Temperaturerhöhung das erwartbare Kriechen der Klebefuge noch einmal beschleunigt wird.

In der Norm [2] wird allerdings eine unbelastete Vorconditionierung von 24 h gefordert, während der sich die Verklebung mit dem Substrat vernetzen kann. In der Praxis liegt meist direkt nach der Verklebung eine Kraft an, die diesen Vorgang beeinflusst. Auch die in Abschnitt 2 bereits erwähnte Oberflächenspannung der verwendeten Referenzsubstrate liegt meist deutlich über der realer Dampfbremsfolien, was die Benetzbarkeit begünstigt.

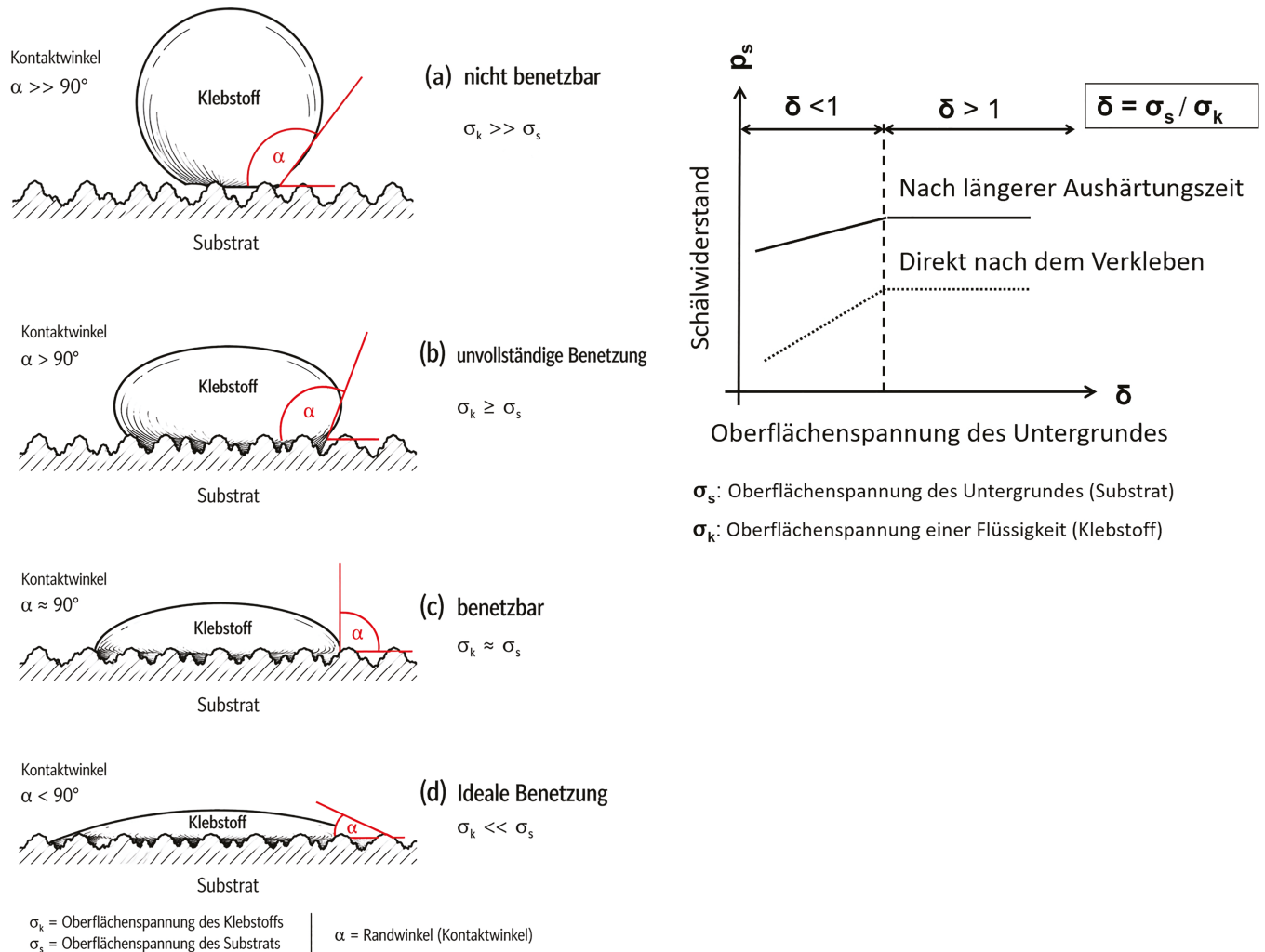


Bild 2 Links: Einfluss der Oberflächenspannung des Substrats und des Klebstoffs auf die Benetzbarkeit des Substrats: a) keine Benetzung mit $\sigma_k \gg \sigma_s$, b) unvollständige Benetzung $\sigma_k > \sigma_s$ mit begrenzter Anpassung an die Oberflächentopografie, c) benetzbar $\sigma_k \approx \sigma_s$, d) ideale Benetzung $\sigma_k \ll \sigma_s$ – Relation zwischen Oberflächenenergie des Klebstoffs (σ_k) und der des Substrats (σ_s) nach [16, 17], (Grafik KI generiert); rechts: schematischer Zusammenhang zwischen Schälwiderstand und Oberflächenspannungsverhältnis $\delta = \sigma_s / \sigma_k$, nach [15, 18]

Left: Effect of substrate and adhesive surface tension on substrate wettability: a) no wetting with $\sigma_k \gg \sigma_s$, b) incomplete wetting $\sigma_k > \sigma_s$ with limited adaptation to the surface topography, c) wettable $\sigma_k \approx \sigma_s$, and d) ideal wetting $\sigma_k \ll \sigma_s$ – relationship between the surface energies of the adhesive (σ_k) and the substrate (σ_s) according to [16] and [17]; (graphic generated by AI); Right: Schematic relationship between peel resistance and the surface tension ratio $\delta = \sigma_s / \sigma_k$, adapted from [15, 18]

Die folgenden Bilder veranschaulichen diesen Zusammenhang zwischen den Oberflächenspannungen von Substrat und Klebstoff. Damit sich eine adhäsive Bindung zwischen Klebstoff und Substrat ausbilden kann, ist eine molekulare Annäherung des Klebstoffs an die Oberfläche notwendig [15]. In Bild 2a–d ist die Benetzung des Substrats mit Klebstoff in Abhängigkeit von den Oberflächenspannungen schematisch dargestellt. Die Oberflächenspannung selbst kann im Labor mit einer Randwinkel- bzw. Kontaktwinkelmessung ermittelt werden. Mit zunehmender Oberflächenspannung des Substrats σ_s verkleinert sich der Kontaktwinkel α zwischen dem Klebstoff und der Oberfläche und die Benetzbarkeit mit Klebstoff nimmt zu. Eine gute Benetzbarkeit ist gegeben, wenn die Oberflächenspannung des Klebstoffs kleiner oder gleich der des Substrates ist.

Bild 2 zeigt auf der rechten Seite den schematischen Zusammenhang zwischen Schälwiderstand und Oberflächenspannungsverhältnis $\delta = \sigma_s / \sigma_k$ direkt nach dem Verkleben und nach längerer Aushärte- bzw. Benetzungszeit.

Bei $\delta < 1$ (geringe Oberflächenspannung des Substrats im Verhältnis zum Klebstoff) resultieren eine eingeschränkte Benetzung und ein entsprechend niedriger Schälwiderstand. Mit zunehmender Oberflächenspannung des Untergrundes ($\delta \rightarrow 1$) steigt der Schälwiderstand an. Ab $\delta = 1$ stellt sich ein Schälwiderstand ein, der im Wesentlichen vom kohäsiven Versagen der Klebstoffschicht abhängig ist.

Bild 3 veranschaulicht dieses Verhalten anhand von Schälkraftmessungen der Universität Kassel. Hierfür wurde ein Reinacrylat-Klebeband auf zwei PE-Folien mit unterschiedlicher Oberflächenspannung verklebt. Eine Folie hatte mit $34 \text{ mN/m} \pm 2 \text{ mN/m}$ eine niedrige, die andere mit $44 \text{ mN/m} \pm 2 \text{ mN/m}$ eine höhere Oberflächenspannung. Im Schälversuch zeigt sich, dass bei der Verklebung auf der PE-Folie mit der höheren Oberflächenspannung deutlich höhere Schälkräfte gemessen werden. Bei einer hohen Oberflächenspannung des Substrats können eine gute Benetzung und eine adhäsive Bindung zwischen Klebstoff und Substrat entstehen. Daraus resultiert im

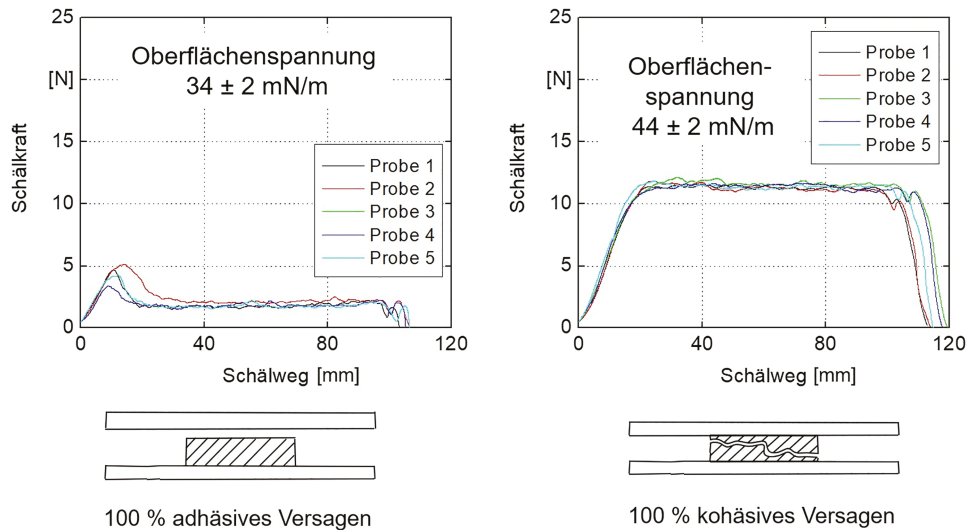


Bild 3 Schälkraft aus einem 180°-Schältest mit jeweils fünf Einzelproben bei Oberflächenspannungen des Substrats von ca. 34 mN/m und ca. 44 mN/m, verklebt mit einem Reinacrylat-Klebeband; adhäsives Versagen bei geringerer und kohäsives Versagen der Klebeverbindung bei höherer Oberflächenspannung des Substrats
Peel strength from a 180° peel test using five individual specimens for each substrate surface tension of approximately 34 mN/m and 44 mN/m, bonded with a pure acrylate adhesive tape; adhesive failure at lower substrate surface tension and cohesive failure of the adhesive bond at higher substrate surface tension

Schälversuch ein kohäsives Bruchbild, also ein Versagen der Klebeschicht selbst.

Neben den verschiedenen Klebstofftechnologien besitzen am Markt verfügbare Klebebänder auch sehr unterschiedliche Trägermaterialien, wie z.B. Papier oder PE-Folie, die teilweise auch perforiert sind und sehr unterschiedliches Dehnverhalten aufweisen. Wie sich dies auf die Dauerhaftigkeit der Klebeverbindung auswirkt und ob sie die mögliche Kraftaufnahme oder Tunnelbildung beeinflussen, bedarf weiterführender Untersuchungen.

Die Bandbreite der Oberflächenspannungen verschiedener Klebstoffe zur Verklebung von Luftdichtheitschichten sowie die Oberflächenspannungen einer Reihe ausgewählter Materialien sind in Bild 4 dargestellt. Unterhalb einer Oberflächenspannung des Substrats von etwa 40 mN/m (rote Linie) ist die Benetzung und damit die Haftungsbildung eingeschränkt. Die normativ vorgegebenen Substrate (boPET und Holz) befinden sich also in einem günstigen Oberflächenspannungsbereich um bzw. oberhalb der Grenze von 40 mN/m und repräsentieren somit nur einen Teil der relevanten Materialien. Ebenso wird deutlich, dass z.B. handelsübliche PE-Folie mit den gängigen Klebstofftechnologien nur erschwert dauerhaft zu verkleben ist. Um eine dauerhafte Verklebung herzustellen, muss der verwendete Klebstoff zur Oberflächenspannung des Substrats passen. Dies hat umso mehr Relevanz, wenn die Verbindung zusätzlich geringe Kräfte aufnehmen muss.

In Bezug auf die bereits angesprochene Verlegung der Bahnen quer zu den Sparren/Ständern, entstehen in der Praxis teilweise zusätzlich zur ermittelten Anfangskraft noch Belastungen der Klebeverbindungen, z. B. durch Setzen des Dämmmaterials in die Dampfbremsfolie. Dies ist vor allem im Steil- und Flachdachbereich zu beobachten, wo die Schwerkraft „ihre Arbeit verrichtet“, wenn das Dämmmaterial nicht ausreichend zwischen den Sparren

klemmt. Auch eine darunter angeordnete Lattung kann dies, je nach Lage der Klebeverbindung, nur teilweise abfangen.

Die Verklebungen werden so auf Scherung belastet, da sich die beiden Folienteile gegeneinander verschieben. Eine kritischere Schälbelastung, wie sie die Normverfahren prüfen [2], tritt in der Praxis eigentlich nur an Wandanschlüssen o. Ä. auf – hier wird dann aber meist auf Kartuschen-Klebstoff zurückgegriffen.

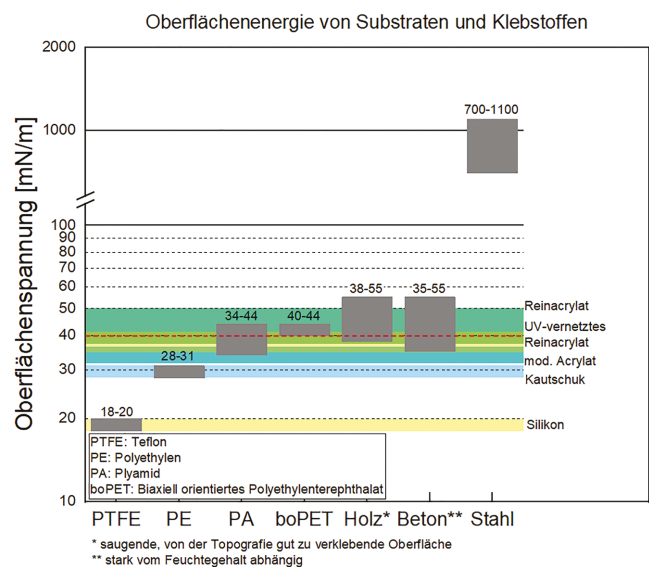


Bild 4 Oberflächenspannungen ausgewählter Substrate und Einordnung typischer Klebstoffsysteme für luftdichte Verklebungen von Dampfbremsfolien in logarithmischer Darstellung zur besseren Lesbarkeit; Mindestbenetzung bei einer Oberflächenspannung des Substrats im Bereich der Oberflächenspannung des Klebstoffs; schematische Einordnung entsprechender Klebstoffsysteme im Feld „UV-vernetztes Reinacrylat“; Angaben mit Ergänzungen nach [15, 19]
Surface tensions of selected substrates and classification of typical adhesive systems for airtight bonding of vapour barrier films, plotted on a logarithmic scale for better readability; minimum wetting at substrate surface tensions within the range of the adhesive surface tension; schematic classification of corresponding adhesive systems in the 'UV-cured pure acrylate' field; data supplemented based on [15, 19]

Die in der Realität auf Scherung belasteten Klebeverbindungen reagieren auf diese Kräfte mit einer Mischung aus Relaxation und Kriechen. Die anfänglich aufgebrachte Kraft, die aus den oben beschriebenen Belastungen resultiert, wird dabei im Laufe der Zeit in der Klebeverbindung abgebaut. Gleichzeitig findet auch eine gewisse Dehnung statt, was zu Ablöseerscheinungen führen kann. Nach Norm wird die statische und dynamische Schälfestigkeit untersucht. Bei der statischen Schälfestigkeit wird ein 90°-Schälversuch aufgebaut und eine konstante Kraft in Form eines angehängten Gewichts aufgebracht. Dies führt nicht zu einer Relaxation, sondern zu einem Kriechen der Verklebung. Die Versuche zur dynamischen Schälfestigkeit (T-Schälprüfung und 180°-Schälprüfung) werden mit einer Zugprüfmaschine durchgeführt. Diese Prüfungen ermöglichen einen reproduzierbaren Vergleich der Klebkräfte untereinander.

4.2 Klimatische Bedingungen an den Verklebungen

An einer 40° nach Süden orientierten Steildachkonstruktion wurden Temperaturmessungen unterhalb der Eindeckung sowie Messungen des Raumklimas des bewohnten Dachraums durchgeführt. Auf dieser Basis wurde das hygrothermische Verhalten der gedämmten Dachkonstruktion, die raumseitig eine feuchtevariable Dampfbremse aufweist, mit WUFI [14] simuliert. Die Simulationen haben gezeigt, dass aufgrund der Umkehrdiffusion zur Raumseite hin die größten klimatischen Belastungen in den Sommermonaten zu erwarten sind. Aufgrund der starken Temperaturschwankungen auf dem Unterdach zwischen Tag und Nacht ergeben sich große Klimaschwankungen an der Außenseite der raumseitigen Dampfbremse. Die hier beobachteten Schwankungsbreiten reichen im Sommer von ca. 22,5 °C bei einer relativen Feuchte von ca. 54 % r. F. in der Nacht bis hin zu ca. 35 °C bei ca. 87 % r. F. am Tag. Im Winter sind an dieser Position Feuchten von ca. 10 % r. F. zu erwarten. Diese starken täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen rufen eine thermische und hygri-sche Wechselbeanspruchung hervor, woraus zyklische Längenänderungen und infolgedessen Spannungen zwischen den Materialien resultieren. Zudem führt die Kombination aus hohen Temperaturen bei gleichzeitig hohen relativen Feuchten im Sommer zu starken Belastungen der Klebeverbindung. Hierbei wäre es interessant zu untersuchen, inwieweit sich die Klimabedingungen an der Dampfbremse auf die Klebeschicht auswirken und welchen Einfluss dabei das Trägermaterial des Klebebandes spielt.

DIN EN 17990 [2] schreibt zur künstlichen Alterung eine Klimalagerung bei 65 °C und 80 % r. F. über einen Zeitraum von 120 Tagen vor. Gegenüber der Lagerung bei 23 °C können sich aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien Spannungen ergeben. Insbesondere PE weist mit einem Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha_{PE} = 200 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ einen gegenüber anderen typischen Kunststoffen ($\alpha_{PA} = 60 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und Holz ($\alpha_{Holz} = 33 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) sehr hohen thermischen Ausdehnungs-

koeffizienten auf. Aufgrund der in der Normprüfung geringen Länge der Verklebung von 25 mm bleiben diese Änderungen jedoch absolut betrachtet gering. Zudem kann sich der Probekörper durch die geringe Länge verformen, wodurch sich die Spannungen abbauen und nicht mehr auf die Klebeverbindung einwirken.

In der Praxis liegen einerseits deutlich längere Verklebungen vor, andererseits sind die Produkte durch die flächige Verlegung in ihrer Lage fixiert, weshalb die Spannungen direkt auf die Klebeverbindung einwirken. Erschwerend kommt hinzu, dass unter realen Bedingungen Feuchte- und Temperaturwechsel im Tag-Nacht-Zyklus stattfinden, während die künstliche Alterung konstante Klimabedingungen abbildet.

4.3 Reale vs. künstliche Alterung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts [20] wurden Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Verklebungen unter Anwendung künstlicher Alterung durchgeführt. Zur Verifizierung des Verfahrens wurden Rückstellmuster hergestellt, die nach fünf bis acht Jahren mittels identischer Prüfmethode wie die künstlich gealterten Proben untersucht wurden.

Die künstliche Alterung erfolgt in Anlehnung an ASTM D3611 [21] bei einer Temperatur von 65 °C und einer relativen Luftfeuchte von 80 %. Angaben zu Korrelationen zwischen künstlicher und natürlicher Alterung variieren in der Literatur erheblich (ASTM: 96 h $\triangleq$ 2 Jahre; SATAS [22]: 15 Tage $\triangleq$ 2 Jahre). Die Bestimmung der Haftfestigkeit erfolgt überwiegend mittels T-Schälprüfung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die künstliche Alterung keine Überbeanspruchung der Verklebungen verursacht und die ermittelten Schälkraftwerte in vergleichbaren Größenordnungen wie bei natürlicher Alterung liegen. Charakteristisch ist ein initialer Anstieg der Schälkraft bei kürzeren Alterungsdauern (bis etwa 60 Tage), gefolgt von einer anschließenden Abnahme.

Ein allgemeingültiges Umrechnungsverhältnis zwischen künstlicher und natürlicher Alterung kann auf Basis der vorliegenden Ergebnisse nicht bestätigt werden. Insbesondere erweist sich das Verhältnis nach ASTM [21] als nicht auf den untersuchten Anwendungsbereich übertragbar, während das SATAS-Verhältnis [22] tendenziell zutreffender erscheint, jedoch, wie auch ASTM [21], nicht für alle Materialkombinationen gilt. Darüber hinaus zeigen unterschiedliche Substrate ein differenziertes Alterungsverhalten: Verklebungen auf Spinnvliesen weisen eine höhere Stabilität auf, während bei PE-Folien ausgeprägtere Festigkeitsverluste zu beobachten sind.

Insgesamt wird das Verfahren der künstlichen Alterung als geeignet zur qualitativen Bewertung der Dauerhaftigkeit der Klebkraft von Verklebungen im Kontext von Luftdichtheitsschichten eingestuft. Eine abschließende

Beurteilung erfordert jedoch weiterführende Langzeituntersuchungen, vor allem hinsichtlich der Luftdichtheit der Verklebungen.

4.4 Luftdurchlässigkeit: Blower-Door-Messungen auf Bauteilebene

Der logische Zusammenhang, dass Bauteile eines Gebäudes immer luftdurchlässiger sind als die einzelnen Materialien, aus denen sie zusammengesetzt sind, und ganze Gebäude immer luftdurchlässiger sind als die einzelnen Bauteile, aus denen sie bestehen [10], ist von größter Bedeutung. Ein Gebäude kann relativ einfach mittels einer Luftdichtheitsprüfung (Blower-Door-Test) auf seine Gesamtluftdurchlässigkeit untersucht werden. Ebenfalls ist es möglich, im Labor Materialien und Materialkombinationen auf ihre Luftdurchlässigkeit zu untersuchen. Unverhältnismäßig schwieriger ist es jedoch, ganze Bauteile ohne die Leckagen, die sich an nicht feuchterelevanten Anschlussstellen ergeben, zu untersuchen. Dies kann entweder an Modellen in Realgröße im Labor oder mittels Blower-Door-Untersuchungen unter Zuhilfenahme von Schutzdruck realisiert werden. Letzteres wurde an drei verschiedenen Konstruktionen vom Fraunhofer IBP untersucht. Um reale Druckdifferenzen, wie sie im Gebäudebetrieb vorliegen, mit erfassen zu können, wurden auch geringe Druckdifferenzen gemessen.

Die Messungen wurden sowohl direkt nach der Verlegung und Verklebung der Dampfbremse als auch nach einem Jahr durchgeführt. Direkt nach der Installation hat sich im Mittel pro Meter Klebebandverbindung ein Luftvolumenstrom von $107,4 \text{ l}/(\text{h} \cdot \text{m})$ bei einer Druckdifferenz von 5 Pa eingestellt.

Nach einem Jahr wurde die Messung wiederholt – an den realen Bauteilen hat sich im Mittel ein Luftvolumenstrom von $132,6 \text{ l}/(\text{h} \cdot \text{m})$ bei 5 Pa Druckdifferenz eingestellt – eine Zunahme von ca. 23,5 %.

In diesem Kontext ist zudem der Anteil der Klebeverbindungen pro Fläche relevant. Bei der gemessenen Konstruktion lagen ca. 1,4 Laufmeter Klebeverbindungen bzw. Anschlussfugen pro Quadratmeter Fläche vor. Bei weiteren Messungen an realen Konstruktionen lag das Verhältnis in einem Bereich von ca. $1,5 \text{ m}/\text{m}^2$ bis $2,5 \text{ m}/\text{m}^2$. Anzumerken ist hierbei, dass sich durch die Verlegung der Dampfbremse quer zu den Sparren, wie sie in der Praxis meistens ausgeführt wird, ein tendenziell ungünstigeres Verhältnis einstellt. Eine Verlegung und Verklebung der Dampfbremsefolie in Sparrenrichtung geht meistens mit einer geringeren Anzahl an Laufmetern einher.

4.5 Differenzdrücke

Die Klimarandbedingungen an einem Bauteil, also das anliegende Innen- und Außenklima, verursachen Druckdifferenzen über den Bauteilquerschnitt. Der temperatur- und feuchtebedingte Luftdichteunterschied

zwischen Innen- und Außenluft führt zu einem thermischen Auftrieb, der eine Druckdifferenz hervorruft. Dieser Effekt ist vor allem unter kalten Außenklimabedingungen prägnant. Weiterhin werden durch Windanströmungen Druckdifferenzen von außen aufgeprägt. Diese Druckdifferenzen, die an Gebäudebauteilen angreifen, rufen zwei Hauptwirkungen hervor. Zum einen führen hohe windinduzierte Differenzdrücke zu einer mechanischen Belastung der Verbindungsstellen der luftdichten Schicht. Zum anderen sind die Differenzdrücke in Kombination mit Undichtigkeiten die treibende Kraft für Durchströmungsvorgänge.

Messungen des Fraunhofer IBP an verschiedenen Steildachkonstruktionen haben gezeigt, dass bei typischen Wohngebäudehöhen im Mittel ein raumseitiger Überdruck von ca. 2 Pa vorliegt. 90 % der Messdaten liegen in einem Bereich zwischen 1 Pa und 3 Pa und fast ganzjährig ist auf der Raumseite ein leichter Überdruck zu erwarten, welcher jedoch von Winddruckschwankungen überlagert wird.

Die maximalen und minimalen gemessenen Druckspitzen lagen in einem Bereich zwischen -30 Pa und $+70 \text{ Pa}$. Diese Druckdifferenzen kommen jedoch so selten vor, dass sie prozentual einen vernachlässigbaren Einfluss darstellen.

Abgesehen von diesen Starkwind- bzw. Sturmweatherlagen liegen an Gebäudebauteilen nur sehr geringe Differenzdrücke im einstelligen Pascalbereich an. Diese Druckdifferenzen verursachen kleine, aber nahezu permanente Luftströmungen durch die Bauteile, die maßgeblich für die konvektive Feuchtebilanz verantwortlich sind. Während Sturmweatherlagen können die Differenzdrücke jedoch enorm ansteigen. Diese Spitzendrücke führen zum einen zu Durchströmungsvorgängen, durch die in kurzen Zeiträumen hohe Luftmassenströme durch die Bauteile transportiert werden können, wodurch ein großes konvektives Befeuchtungs- bzw. Trocknungspotenzial entsteht. Zum anderen sind sie maßgeblich für die mechanische Belastung der Verbindungsstellen verantwortlich. So entspricht eine Druckdifferenz von 70 Pa einer Kraft von $70 \text{ N}/\text{m}^2$, was ca. $7 \text{ kg}/\text{m}^2$ entspricht. Wird davon ausgegangen, dass die Dampfbremse die einzige luftdichte Schicht darstellt, liegt hier die Kraft an.

4.6 Durchströmungsformen

Auch der Zusammenhang zwischen der Durchströmungsmenge, der Größe der vorhandenen Leckagen und der anliegenden Druckdifferenz ist von Bedeutung. Bei Undichtigkeiten an Verbindungen in der Fläche handelt es sich eher um kleine Leckagen, an denen erst höhere Druckdifferenzen zu einem Umschlag der Strömungsform von laminar zu turbulent führen. Laminare Strömungen haben dabei die Eigenschaft, dass sich die Durchströmungsmenge direkt proportional zur anliegenden Druckdifferenz verhält. Bei turbulenten Strömungen nimmt hingegen bei steigender

Druckdifferenz die Durchströmungsmenge nicht im gleichen Maße zu [7]. Die Kombination aus kleinen Leckagen und kleinen Differenzdrücken führt somit in den meisten Fällen zu einer laminaren Strömung mit einem linearen Verhalten zwischen Differenzdruck und Durchströmungsmenge.

Werden nun Materialien und Materialkombinationen bei höheren Differenzdrücken im Labor untersucht, ist dieser Zusammenhang nicht mehr gegeben, da sich die Strömung hier entweder bereits im turbulenten oder im Übergangsbereich von laminar zu turbulent befindet. Die so ermittelten Durchströmungsmengen können nicht linear und auch nur bedingt mithilfe einer Potenzfunktion über den Strömungskoeffizienten auf kleine Differenzdrücke umgerechnet werden.

Als Beispiel dient eine Vergleichsmessung: An einem Versuchsaufbau wurden die Durchströmungsmengen einmal in einem niedrigen Druckbereich zwischen 3 Pa und 10 Pa und einmal in einem hohen Druckbereich zwischen 12 Pa und 60 Pa gemessen. Für beide Messungen wurde die entsprechende Potenzfunktion abgeleitet und die Durchströmungsmenge bei einem Differenzdruck von 2 Pa bestimmt. Die Messung im niedrigen Druckbereich liefert eine um ca. 38 % geringere Durchströmungsmenge. Dies verdeutlicht, dass es bei der Prüfung von druckabhängigen Luftdurchlässigkeiten notwendig ist, kleine Differenzdrücke zu untersuchen, wie sie im realen Gebäudebetrieb anliegen.

4.7 Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Klebeverbindungen

Die DIN EN 12114:2000-04 [23] mit dem Titel „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Luftdurchlässigkeit von Bauteilen Laborprüfverfahren“ stellt aktuell, nach Kenntnis der Autoren, weltweit die nahezu einzige Norm dar, welche ein Verfahren beschreibt, mit dem es möglich wäre, Klebeverbindungen auf ihre Luftdurchlässigkeit zu untersuchen. Explizit dafür gedacht ist sie jedoch auch nicht, da die Norm einen eher allgemeinen Charakter besitzt. So bezieht sie sich auf Prüfdruckbereiche, die die realen Bedingungen im Gebäude nicht adäquat widerspiegeln, und besitzt auch keine konkreten Angaben zur Probenherstellung. Die DIN EN 17990 [2], die ja laut Titel ein „Verfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Verklebungen mit Klebebändern und Klebemassen zur Herstellung von luftdichten Schichten [...]“ beschreibt, enthält hingegen gar kein Prüfverfahren, das die Luftdurchlässigkeit von Klebeverbindungen bewertet.

Bei Prüfungen der Luftdichtheit an verschiedenen Verklebungen (nur Klebeband und Folie), die am Fraunhofer IBP [7, 8] und am FIW [24] durchgeführt wurden, hat sich gezeigt, dass es mit Klebebändern nicht möglich ist, vollständig luftdichte Verbindungen herzustellen. Außerdem zeigen die Ergebnisse der beiden Untersuchungen Unterschiede zwischen den ermittelten Durch-

strömungsmengen bei sehr ähnlichen Versuchsaufbauten. So wurden bei den Messungen nach [24] Durchströmungsmengen von 0,06 l/(h·m) bis 23 l/(h·m) bei einer Druckdifferenz von 50 Pa ermittelt. Legt man einen Strömungskoeffizienten n von 0,65 zugrunde, ergibt sich daraus bei 5 Pa ein Bereich von ca. 0,013 l/(h·m) bis 5,2 l/(h·m). In [7] werden an einem ähnlichen Versuchsaufbau ebenfalls Klebeverbindungen auf ihre Luftdichtheit untersucht. Die Durchströmungsmengen für einen Meter Klebeverbindung bei einer Druckdifferenz von 5 Pa lagen in einem Bereich zwischen ca. 0,6 l/(h·m) und ca. 12,4 l/(h·m) [7].

Werden die ebenfalls in [7] angegebenen 14 Einzelmessungen an unterschiedlichen Verklebungen von Versuchs-Wandelementen betrachtet und auf einen Meter Fugenlänge bezogen, so ergeben sich bei einer Druckdifferenz von 5 Pa Durchströmungsmengen von ca. 2,8 l/(h·m) bis ca. 8,1 l/(h·m). Der Mittelwert aus diesen 14 Einzelmessungen beläuft sich auf ca. 4,2 l/(h·m).

Die Unterschiede ergeben sich wahrscheinlich durch die Untersuchung unterschiedlicher Klebebänder auf unterschiedlichen Substraten und auch dadurch, dass die Versuchsaufbauten nicht völlig identisch waren. Dies verdeutlicht die Relevanz eines vereinheitlichten Prüfverfahrens, das vergleichbare Ergebnisse erzeugt.

4.8 Vergleich der Messungen auf Material- und Bauteilebene

Wird der im vorherigen Absatz genannte Mittelwert von ca. 4,2 l/(h·m) [7] bei einer Druckdifferenz von 5 Pa auf Materialebene mit den Bauteilmessungen an einem realen Gebäude verglichen, ergibt sich im ersten Jahr ein Faktor von ca. 26 und im zweiten Jahr ein Faktor von ca. 32 zwischen den Messungen auf Material- und Bauteilebene. Dies bestätigt die Theorie, dass Bauteile deutlich luftdurchlässiger sind als Materialien. Die ermittelten Faktoren liegen jedoch deutlich über dem Faktor von 10, welcher z. B. von Lstiburek in [25] oder vom US „International Energy Conservation Code“ 2012 [11] genannt wird. Eine statistische Aussagekraft besitzt dieser Vergleich jedoch nicht, hierfür wären weitere Messungen notwendig.

Hier stellt sich aber die Frage, wodurch sich diese Unterschiede ergeben. Bei Materialmessungen handelt es sich um kleinere Proben, die zeitnah nach der Verklebung gemessen wurden, wodurch die realen Einflüsse nicht adäquat abgebildet werden können. Als Beispiele seien hier die thermische Ausdehnung, die Wechselbeanspruchung durch Hygrothermik und einwirkende Kräfte sowie die Alterung genannt. Weiterhin finden sich an einer realen Baukonstruktion zwangsläufig weitere relevante Leckagen, wie z. B. Fehlstellen durch Tackernadeln, und auch die handwerkliche Ausführung der Verklebung unterscheidet sich meist deutlich von der im Labor. All dies führt dazu, dass reale Konstruktionen eine höhere Luftdurchlässigkeit aufweisen, als Luftdichtheitsprüfungen vermuten lassen. Auch ist davon auszugehen,

dass zwischen Material- und Bauteilebene kein konstanter Faktor vorliegt, sondern es sich vielmehr um einen situationsabhängigen Bereich handelt.

Die am Bauteil gemessenen Durchströmungswerte führen jedoch zu einem erheblichen konvektiven Feuchteeintrag in der Winterperiode, was ebenfalls durch Feuchtemessungen des Fraunhofer IBP bestätigt wurde. Die erwähnte Erhöhung der Luftdurchlässigkeit über die Zeit verstärkt dies zudem. Die beobachteten Durchströmungen und Feuchteinträge können in Abhängigkeit von Bauteilaufbau, Standort usw. zu einer Schädigung der Konstruktion führen, wenn die Feuchte nicht wieder austrocknen kann. Dies kann z. B. an verschatteten Dachflächen oder unterhalb von PV-Modulen der Fall sein [26].

4.9 Schlussfolgerungen aus den Vergleichen

Fasst man alle bisherigen Erkenntnisse aus verschiedensten Untersuchungen zusammen, so kann festgestellt werden, dass aktuell kein geeignetes Prüfverfahren für die Ermittlung der Luftdurchlässigkeit von Klebeverbindungen unter realistischen Randbedingungen, wie sie sich im Einbauzustand einstellen, existiert. Um eine Mindestqualität von Verklebungen am Bau sicherzustellen und geeignete Kennwerte zur Luftdurchlässigkeit zu generieren, wird es als notwendig erachtet, ein Prüfverfahren zu entwickeln, welches die diskutierten mechanischen und klimatischen Einflussfaktoren einbezieht. Dadurch wird es möglich, die Qualität der Verbindungen realistisch zu beurteilen und geeignete Kennwerte für eine adäquate Berücksichtigung im Planungsprozess abzuleiten.

5 Ausblick und Forschungsbedarf

Die dargestellten Erkenntnisse und internen Untersuchungsergebnisse liefern Hinweise darauf, wie sich Klebeverbindungen in der Realität verhalten. Dennoch besteht bei vielen Punkten weiterer Forschungsbedarf, um die Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die Verbindungen genauer zu analysieren. Im Fokus stehen hier vor allem die Kräfte, die auf die Verbindungen einwirken, und die mechanischen Eigenschaften der Materialien und Materialkombinationen sowie die Dauerhaftigkeit unter realen Bedingungen. Dies betrifft insbesondere den verwendeten Klebstoff, das Trägermaterial sowie das Substrat, deren Zusammenspiel in Kombination mit der Verarbeitung maßgeblich die Luftdurchlässigkeit der Verbindungen beeinflussen.

5.1 Zusammenhang zwischen Bauteil-, Material- und Gebäudeebene

Um den für die konvektive Feuchtebilanzierung relevanten flächenbezogenen Infiltrationsluftvolumenstrom ermitteln zu können, ist eine belastbare, typische Bandbreite der Faktoren für das Verhältnis zwischen der im Labor gemessenen Durchströmungsrate pro Meter

Klebeverbindung und der real stattfindenden Bauteildurchströmung notwendig. Einen wesentlichen Faktor und eine weitere Variable stellen dabei die benötigten Laufmeter Klebeverbindung pro Quadratmeter Bauteilfläche dar. Es liegt nahe, dass sich zwischen Materialmessungen im Labor und Bauteilmessungen keine festen, allgemeingültigen Faktoren einstellen, sondern dass situationsspezifisch eher typische Dichtheitsbereiche ermittelt werden können.

Das in WUFI [14] enthaltene Infiltrationsmodell des Fraunhofer IBP [27] nähert sich der Bauteildurchströmung vereinfacht auf Basis der Gebäudedichtheit q_{50} bzw. des n_{50} -Werts an, da dieser oft als einziger Wert zur Verfügung steht. Das Modell legt hierzu auf empirischer Basis den Faktor 1/15 zugrunde, um aus der gesamten Durchströmung der Gebäudehülle die befeuchtungsrelevante Bauteildurchströmung abzuleiten. Dies bietet den Vorteil, dass die Dichtheit des Gebäudes eine relativ einfach zu ermittelnde Größe ist. Als nachteilig kann jedoch angesehen werden, dass sich erhöhte Werte, die ggf. auf nicht feuchterelevante Leckagen (z. B. an Fenstern und Türen) zurückzuführen sind, im Modell auch auf die Feuchteverhältnisse im Bauteil auswirken. Dies unterstellt, dass bei insgesamt dichteren Gebäuden auch die einzelnen Bauteile entsprechend luftdichter ausgeführt sind. Eine Ableitung der Bauteildurchlässigkeit auf Basis von Untersuchungen an Materialkombinationen wird daher als belastbarer erachtet.

Um sich der Fragestellung von dieser Seite anzunähern, ist jedoch die Entwicklung eines geeigneten Laborverfahrens zur Prüfung von Materialkombinationen notwendig. Die damit ermittelten Werte müssen dann mit den Ergebnissen geeigneter Bauteiluntersuchungen unter Verwendung der geprüften Materialien verglichen werden.

5.2 Winddruck und Druckdifferenzen

Der Winddruck, der auf Gebäude und deren Bauteile einwirkt, war bereits Gegenstand vieler Untersuchungen z. B. [28–30] und ist auch in der Normung wie z. B. im Eurocode 1 [31] verankert. Die meisten der bisherigen Winddruckmodelle wurden jedoch für statische Anforderungen (Extremereignisse) entwickelt und liefern bzgl. der hier behandelten Thematik viel zu hohe Differenzdrücke. Eine weitere Problematik ergibt sich dadurch, dass die Modelle den Differenzdruck zwischen der Raum- und der Bauteilaußenseite prognostizieren. Zur Analyse der einwirkenden Kräfte auf die Verklebungen und zur konvektiven Feuchtebilanzierung im Bauteil bedarf es aber der Ermittlung des effektiv wirksamen Differenzdrucks an der luftdichten Schicht bzw. Dampfbremse, da dieser die treibende Kraft für die Durchströmung darstellt. Untersuchungen am Fraunhofer IBP haben auch hier gezeigt, dass der Differenzdruck über die luftdichte Schicht tendenziell geringer ist als der Differenzdruck über das gesamte Bauteil.

Da die durch Windanströmung hervorgerufenen Differenzdrücke einen erheblichen Einfluss auf das konvektive

Feuchteverhalten von Bauteilen besitzen, wird ein geeignetes Modell zur Beschreibung benötigt. Um den Aufwand für die Entwicklung solcher Modelle überschaubar zu halten, bietet es sich an, auf bestehende Modelle zurückzugreifen. Diese müssen so modifiziert werden, dass sie die effektiven Differenzdrücke an luftdichten Schichten von Bauteilen in Abhängigkeit von ihrer Orientierung, ihrer Neigung und dem spezifischen Bauteilaufbau realistisch abbilden können. Für diesen Zweck sowie für die Validierung eines potenziellen Winddruck-Modells ist es notwendig, verschiedene Konstruktionen an ggf. unterschiedlichen Standorten mit variierenden Windverhältnissen zu untersuchen.

Die meisten Wind-Modelle prognostizieren im Fall von Steildächern einen Sog auf der Außenseite, was zu einem raumseitigen Unterdruck führt. Dieses Verhalten konnte durch die o.g. internen Messungen bestätigt werden. Allerdings hat sich hierbei auch gezeigt, dass eine Belegung der Dachfläche z. B. durch Aufdach-PV-Module zu einem abweichenden Verhalten führen kann. Auch diese Umstände sollten daher betrachtet werden. Weiterhin sind Winddaten meist von Wetterstationen verfügbar, welche die Windrichtung und -geschwindigkeit i. d. R. in einer Höhe von 10 m erfassen. Die Windgeschwindigkeiten an niedrigeren Gebäuden sind aber ebenfalls geringer.

6 Ein Vorschlag zur Bestimmung der Langzeitstabilität der Luftdichtheit

Die bisherige Normung in Deutschland [1, 2] bezieht sich auf die mechanischen Eigenschaften von Verklebungen zur Herstellung der luftdichten Schicht in Gebäuden. Darin sind Verfahren beschrieben, die die Verbindungen einer künstlichen Alterung unterziehen und anschließend die Einhaltung definierter Grenzwerte zu den mechanischen Eigenschaften prüfen. Die Normen enthalten bislang kein Verfahren zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit und zum Nachweis der Langzeitstabilität dieser Eigenschaft. Die im vorliegenden Beitrag diskutierten Erkenntnisse legen jedoch nahe, dass sich die beiden Größen u. U. deutlich unterscheiden können und daher ein Verfahren zur Ermittlung der Luftdichtheit selbst die entscheidende Basis zur Beurteilung der hygrothermischen Gebrauchstauglichkeit von Leichtbaukonstruktionen darstellen würde. Im Folgenden soll ein Vorschlag zur Lösung dieser Fragestellung skizziert werden, der durch weitere Untersuchungen konkretisiert werden muss. Dabei muss der Fokus neben der Reproduzierbarkeit darauf liegen, dass die Proben unter baupraktisch relevanten Bedingungen hergestellt werden.

Um eine bessere Übereinstimmung mit der Realität zu erreichen, muss zum einen eine gewisse Klebebandlänge am Stück untersucht werden, sodass Effekte wie z. B. Überdehnungen und Tunnelbildungen zum Tragen kommen, die mit kleinen Proben nicht abgebildet werden können. Zum anderen muss eine bestimmte Mindestanzahl an Laufmetern Klebeverbindung in einem Prüfstand untersucht werden, damit die Durchströmungsmengen

bei kleinen Druckdifferenzen ohne nennenswerte Fehler überhaupt erfasst werden können.

Die Oberflächenspannung des Substrats sollte im unteren Bereich der Bandbreite marktüblicher Dampfbremsen bei ca. 35 mN/m angesetzt werden, sodass zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit eher ungünstige Kombinationen repräsentiert werden. Unter diesen Bedingungen kann die eigentliche Leistungsfähigkeit des Klebebands realistischer beurteilt werden.

Auch die Unterlage zur Verklebung sollte den kritischen Fall darstellen, d. h., es sollte keine feste, sondern realitätsnah eine flexible Unterlage verwendet werden, die in ihrer Härte, Kompressibilität und Rückstellkraft der üblichen Bandbreite von Zwischensparren-Dämmmaterialien entspricht. Denkbar wäre hier ein definierter Schaumstoff oder auch eine Silikonauflage mit definierter Shore-Härte. Der Anpressvorgang sollte den baupraktischen Bedingungen entsprechen. Realistischer als die Applikation mit einer Anpressrolle ist hier sicher die Verwendung eines Anpressrakels, bzw. das Andrücken per Hand. Dabei wirken durch die Überstreichung des Klebebandes in Längsrichtung Kräfte, die zu einer Überdehnung der Verklebung führen können. Anpresswerkzeug, Anpressdruck und Anpressgeschwindigkeit sollten deshalb einen baupraktischen Fall abbilden.

Weiterhin sollte die Verklebung vor der eigentlichen Prüfung für eine bestimmte Zeit einer zu erwartenden Scherbelastung, wie z. B. den ermittelten 6 N/m (s. Abschnitt 4.1) ausgesetzt werden, um eine reale Verklebung nachzubilden. Denn für eine gute adhäsive Bindung sind eine Benetzung und molekulare Annäherung des Klebstoffs an das Substrat notwendig. Diese können jedoch durch das Kriechen und Relaxieren der Klebeverbindung unter realen Lastverhältnissen beeinflusst werden.

Im Anschluss sollte die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit in einem Druckdifferenzbereich zwischen ± 5 Pa und ± 30 Pa in Intervallen von 5 (± 1) Pa stattfinden. Dieser Druckbereich ist repräsentativ für reale Gebäudesituationen und ermöglicht reproduzierbare Messungen mit vertretbarer Messunsicherheit.

Die Verbindungen sollten dann einem real zu erwartenden Klima mit hohen relativen Feuchten in Kombination mit erhöhten Temperaturen ausgesetzt und anschließend erneut untersucht werden, um das Langzeitverhalten der Luftdurchlässigkeit zu prüfen.

Erst wenn es gelingt, die vielfältigen Einflussfaktoren in einem normativen, reproduzierbaren Laborprüfverfahren abzubilden, können auf der Seite der Luftdurchlässigkeit verlässliche Kennwerte generiert werden, die es ermöglichen, Materialien und Kombinationen zu bewerten und zu vergleichen.

Weiterhin fehlen bisher Ansätze, die die windinduzierten Druckdifferenzen an einem Gebäude bzw. Gebäudebauteil derart berücksichtigen können, dass die

Durchströmungsmenge im richtigen Verhältnis zur anliegenden Druckdifferenz abgebildet wird. Beide Größen können dann als Eingangsparameter für ein erweitertes Infiltrationsmodell auf Bauteilebene dienen.

Eine Implementierung eines solchen Modells in die hygrothermische Simulationssoftware (z. B. WUFI [14]) kann folglich das hygrothermische Verhalten von Baukonstruktionen genauer als bisher prognostizieren und

somit die Berücksichtigung dieses wichtigen Aspekts in der baulichen Planung weiter optimieren.

Dadurch kann eine resilientere Bauweise auch im Hinblick auf Klimaveränderungen und den vermehrten Einsatz feuchteempfindlicher nachwachsender Rohstoffe erreicht werden, die zu dauerhaften Konstruktionen und reduzierten CO₂-Emissionen beiträgt.

Literatur

- [1] DIN 4108-11:2018-11 (2018) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 11: Mindestanforderungen an die Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen mit Klebebändern und Klebemassen zur Herstellung von luftdichten Schichten*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/2868600>
- [2] DIN EN 17990:2025-12 (2025) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Verfahren zur Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Verklebungen mit Klebebändern und Klebemassen zur Herstellung von luftdichten Schichten unter klimatischen Bedingungen von Innenräumen*. Berlin: DIN Media. <https://dx.doi.org/10.31030/3621875>
- [3] DIN 4108-11:2026-02 – Entwurf (2026) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 11: Mindestanforderungen an die Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen mit Klebebändern und Klebemassen zur Herstellung von luftdichten Schichten*. Berlin: DIN Media. <https://dx.doi.org/10.31030/3669370>
- [4] DIN 4108-7:2011-01 (2011) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/1736947>
- [5] DIN 4108-3:2024-03 (2024) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/3498131>
- [6] DIN 68800-2:2022-02 (2022) *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/3312109>
- [7] Kölsch, P.; Zirkelbach, D.; Nusser, B.; Wagner, R.; Zegowitz, A.; Künzel, H. (2016) *Airflow through Lightweight Wall Assemblies – Influence of Size and Location of Leakages in: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII International Conference*. Clearwater Beach, 4.–8. Dez. 2016. Atlanta: ASHRAE, S. 459–484.
- [8] Künzel, H. M.; Kölsch, P.; Zirkelbach, D. (2019) *Luftströme und Feuchtequellen in Leichtbaukonstruktionen in: Tagungsband zum 11. Internationalen BUILDAIR-Symposium – Luftdichtheit von Gebäuden, Thermografie und Lüftungssysteme in der Praxis*. Hannover, 24./25. Mai 2019. Springe-Eldagsen: Energie- und Umweltzentrum am Deister GmbH.
- [9] Kölsch, P.; Künzel, H.; Zirkelbach, D. (2019) *Konvektiver Feuchteintrag in Leichtbaukonstruktionen – Leakagearten, Tauwasserverteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis*. Bauphysik 41, H. 5, S. 269–278. <https://doi.org/10.1002/bapi.201900022>
- [10] Anis, W. (2015) *Airtight Buildings: Past, Present and Future*. ASHRAE Journal 57, H. 11, S. 40–50.
- [11] International Code Council (2011) *2012 International Energy Conservation Code*. Country Club Hills: International Code Council.
- [12] Lange, J. (2019) *Luftdurchlässigkeit von Grobspanplatten*. Der Bauschaden, Juni/Juli 2019, S. 46–49.
- [13] Peper, S.; Bangert, A.; Bastian, Z. (2014) *Einbindung von Holzbalken in die luftdichte Ebene*. Bericht im Rahmen des EU-Forschungsprojekts 3EnCult. Darmstadt: Passivhaus Institut.
- [14] Künzel, H. M. (1994) *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [15] Hauser, G.; Maas, A.; Gross, R. (2004) *Qualitätssicherung klebebasierter Verbindungstechnik für Luftdichtheitsschichten*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben E 2002/5. Kassel: Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik.
- [16] Wenzel, R. N. (1936) *Resistance of solid surfaces to wetting by water*. Industrial & Engineering Chemistry 28, H. 8, S. 988–994. <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>
- [17] Cassie, A. B. D.; Baxter, S. (1944) *Wettability of porous surfaces*. Transactions of the Faraday Society 40, S. 546–551. <https://doi.org/10.1039/tf9444000546>
- [18] Geiß, P. L. (1998) *Verarbeitungskonzepte und Belastungskriterien für Haftklebstoffe* [Dissertation]. Universität Kaiserslautern. München: Hinterwaldner-Verlag.
- [19] 3M Deutschland GmbH (2026) *Oberflächenenergie kategorisieren* [online]. Neuss: 3M Deutschland GmbH, 2026. https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/kleben-und-verbinden/schulung-weiterbildung/die-wissenschaft-des-klebens/oberflaechenenergie-kategorisieren/ [Zugriff am: 16. Juni 2026]
- [20] Maas, A.; Gross, R. (2011) *Vergleich der natürlichen und beschleunigten Alterung von Verklebungen für Luftdichtheitsschichten*. Bauphysik 33, H. 3, S. 138–141. <https://doi.org/10.1002/bapi.201110016>
- [21] ASTM D3611-06 (2006) *Standard Practice for Accelerated Aging of Pressure-Sensitive Tapes*. West Conshohocken: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D3611-06>
- [22] Satas, D. [ed.] (1989) *Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology*. 2. Aufl. New York: Van Nostrand Reinhold.
- [23] DIN EN 12114:2000-04 (2000) *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Luftdurchlässigkeit von Bauteilen – Laborprüfverfahren*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/8144723>
- [24] Boberach, C. (2022) *Development of a Test Procedure for Determining Air Permeability of Adhesive Tapes for Air Barriers in Lightweight Construction* [Masterarbeit]. TU München.
- [25] Lstiburek, J. (2026) *BSD-104: Understanding Air Barriers* [online]. Westford: Building Science Corporation, 24. Okt. 2006. <https://buildingscience.com/documents/digests/bsd-104-understanding-air-barriers> [Zugriff am: 7. Aug. 2026]
- [26] Kölsch, P. (2026) *Hygrothermische Simulation von Steildächern mit Solaranlagen*. Bauphysik 48, H. 2, S. 143–157. <https://doi.org/10.1002/bapi.70041>
- [27] Zirkelbach, D.; Künzel, H. M.; Schafaczek, B.; Borsch-Laaks, R. (2009) *Dampfkongvektion wird berechenbar – Stationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen in: Rosenthal, B.; Hollmann, M. [eds.] Reader to the 4th International Symposium on Building and Ductwork Air Tightness, BUILDAIR & 30th AIVC Conference „Trends in High Performance Buildings and the Role of Ventilation“*. Berlin, 1./2. Okt. 2009. Springe: Energie- und Umweltzentrum am Deister GmbH, S. 1–8.

- [28] Swami, M. V.; Chandra, S. (1987) *Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflow Rates in Buildings*. Final Report of ASHRAE Research Project 448-RP. FSEC-CR-163-86. Cape Canaveral: Florida Solar Energy Center.
- [29] Swami, M. V.; Chandra, S. (1988) *Correlations for Pressure Distribution on Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Airflow*. ASHRAE Transactions 94, Teil 1, S. 243–266.
- [30] Costola, D.; Blocken, B. J. E.; Hensen, J. L. M. (2009) *A comparison of generic pressure coefficient data for indoor air flow studies* in: Bayazit, N. T.; Manioglou, G.; Oral, G. K.; Yilmaz, Z. [eds.] *4th International Building Physics Conference*. Istanbul, 15.–18. Juni 2009. Istanbul: Beysanmatbaa, S. 843–849.
- [31] DIN EN 1991-1-4:2005-07 (2005) *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen, Windlasten*. Berlin: Beuth.

Autor:innen

Philipp Kölsch, M.Eng. (Korrespondenzautor:in)
philipp.koelsch@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Abteilung Hygrothermik
Fraunhoferstr. 10
83626 Valley

Dr.-Ing. Sebastian Tremml
tremml@fiw-muenchen.de
Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München
Abteilung Forschung und Entwicklung
Lochhamer Schlag 4
82166 Gräfelfing

Dipl.Ing. Rolf Gross
rolf.gross@uni-kassel.de
Universität Kassel
Fachbereich 06 Architektur – Stadtplanung – Landschaftsplanung
Gottschalkstraße 28a
34127 Kassel

Zitieren Sie diesen Beitrag

Kölsch, P.; Tremml, S.; Gross, R. (2026) *Luftdichtheit von Klebeverbindungen – eine kritische Betrachtung*. Bauphysik 48, H. 5, S. 394–406.
<https://doi.org/10.1002/bapi.70078>