



Die Autoren

StR z.A. Jens Schmidt
 Professor Dr. rer. nat. Oliver Kornadt
 Bauhaus-Universität Weimar

Konvektiver Feuchte-transport und daraus resultierende Bau-schäden

Einleitung

Seit der Einführung der ersten Energie-einsparverordnung im Februar 2002 [1] ist man bestrebt Transmissions- und Lüftungswärmeverluste noch weiter zu reduzieren, als in der Wärmeschutzverordnung. Besonders die Lüftungswärmeverluste erfordern die Gestaltung einer sehr dichten Gebäudehülle. Angestrebt ist dabei ein notwendiger Luftwechsel von 0,5 h⁻¹ [2; 3]. Dieser bedeutet das Minimum an Lüftungswärmeverlust und die Grenze

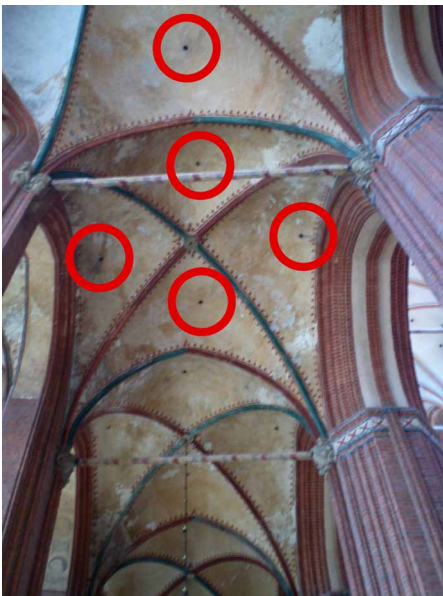


Abb. 1: Entlüftungsöffnungen in der Kreuzgewölbedecke der gotischen Nikolaikirche zu Wismar

der vertretbaren Raumlufthygiene. In der Baupraxis hört man allerdings noch heute all zu oft »Früher haben wir nicht so dicht gebaut und hatten weniger Probleme.« Diese Aussage ist richtig. Es wurde sogar bewusst undichter gebaut. Man wusste, dass Luft bei einem gegebenen Druckgradient in der Lage ist, Energie und Materie zu transportieren. Beispielsweise wurden in der Nikolaikirche zu Wismar (Abb. 1) oder im Marstall zu Altenburg (Abb. 2) bewusst Entlüftungsöffnungen in die Kreuzgewölbedecke eingelassen. Über fest installierte Leitungen (Abb. 2) führten sie feuchtwarme Luft aus dem Innenraum in die Umgebung ab. Erhöhten Feuchtelasten und Viehseuchen konnte so auch im Winter entgegengewirkt werden. Würde man heutige Wohngebäude in dieser Form konzipieren, stünde die Effizienz des Gebäudes in Frage. Die Energiekosten wären genauso unverträglich wie der notwendige Primärenergieaufwand und daraus folgende CO₂-Ausstoß. Die Dämmung der Gebäudehülle von modernen Gebäuden schützt vor Transmissions- und die Luftdichtheitsschicht vor Lüftungswärmeverlusten. Passieren innerhalb der Planung und Erstellung dieser Schichten Fehler, kann es zu Feuchteschäden kommen. Während man mittlerweile effektiv schädlicher Diffusion vorbeugt, treten Feuchteschäden infolge

konvektiven Feuchte-transport durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle häufiger auf [4]. Oftmals entstehen diese Leckagen auch innerhalb der Nutzungsphase des Gebäudes. Als problematisch sind in diesem Zusammenhang die erhöhten Feuchteinträge festzuhalten. Mittels konvektivem Feuchte-transport durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle kann sich um ein Vielfaches mehr Feuchte in der Gebäudehülle anreichern als per Diffusion im gleichen Zeitraum möglich ist [5-8]. Wärmebrücken und Schimmel können entstehen [9-11].

Um herauszufinden wie undicht typisch deutsche Bestandsgebäude sind, wurden Gebäude unterschiedlichen Alters und verschiedener Bauweise auf ihre Luftdichtigkeit geprüft. Es konnten typische Undichtigkeiten lokalisiert werden. Mittels Klassifizierung wurden die Undichtigkeiten auf ihre Häufigkeit des Auftretens hin analysiert. Durch zusätzliche Vermessung konnten deren durchschnittliche Größen bestimmt werden. Innerhalb dieser Untersuchungen wurde ein Schaden festgestellt, welcher die Auswirkungen des konvektiven Feuchteintrags durch Leckagen gut widerspiegelt. In einem um 1860 gebauten und 2002 teil sanierten Gebäude wurde ein Bohrloch durch die Luftdichtheitsschicht zwischen Wohnküche und Kaltdachboden detektiert. Anhand eines Bilanzierungsmodells wurde der maximal mögliche konvektive Feuchteintrag unter stationären Bedingungen abgeschätzt.

Herangehensweise

Luftdichtheitsuntersuchungen

Das älteste Gebäude stellte das vor 1409 errichtete Renaissance-Schloss Ponitz, das jüngste ein Ziegelhaus von 2011 dar. Ziel sollte es sein, die lokale Häufigkeit

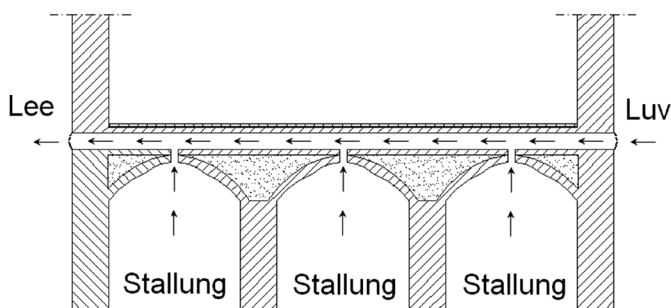


Abb. 2: Systemskizze zur Entlüftung der Pferdestallungen des neogotischen Marstall zu Altenburg

auffretender Leckagen und soweit möglich die innere Größe der Austrittsfläche zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden die Gebäude mit einer Mineapolis Blower-Door 4.0 nach dem Verfahren A der DIN 13829 [12] untersucht. Mittels Über- und Unterdruckverfahren wurde auf die Luftwechselrate n_{50} bei 50 Pa Druckdifferenz geschlossen. Der Volumenstrom unter den eingestellten Druckdifferenzen 5 ... 60 Pa wurde mit einer potenziellen Approximation Gl. (1), entsprechend [13; 12] bestimmt.

$$\dot{V} = C_L \cdot \Delta p^n \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (1)$$

mit:

- C_L → Leckagekoeffizient [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{Pa}^n$]
- Δp → Druckdifferenz [Pa]
- n → Strömungsexponent [-]

Die Luftwechselrate n_{50} bei 50 Pa Druckdifferenz wurde mittels Gl. (2), entsprechend [13; 12] berechnet.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (2)$$

mit:

- \dot{V}_{50} → Volumenstrom bei 50 Pa [m^3/h]
- V → Gebäudevolumen [m^3]

Anschließend wurden bei -50 Pa Druckdifferenz Digital- und Thermografiebilder der per Hitzdrahtanemometrie bzw. Thermografie lokalisierten Leckagen aufgenommen. Angestrebt war eine Leckagebewertung hinsichtlich Form und Größe der innenseitigen Austrittsöffnung. Konnten die Leckagen nicht direkt vermessen werden, wurden die Bilder entzerrt und eine vorgefilterte Farbpixelanalyse durchgeführt. Die Pixelgröße im zu untersuchenden Leckagequerschnitt wurde durch den Vergleich zu einer bekannten, im Bild integrierten rechteckigen Fläche, ermittelt. Das Programm FixFoto mit dem Plugin DigitalPhotoShifter wies dabei eine gegenüber anderen Programmen hohe Genauigkeit auf. Anhand einer Testreihe von Bildern einer 1 cm^2 großen, kreisrunden, scharfkantigen Leckage in einem Prüfkörper konnte die Querschnittsflächen mit einer Genauigkeit von $\pm 8 \%$ bestimmt werden.

Schadensfall

Während der Luftdichtheitsuntersuchungen und Leckageanalysen konnte ein inte-



Abb. 3: Wassertropfen aus Deckenlampenloch für die Kabelführung

ressanter Schaden an einem teilsanierten, um 1860 errichteten Bestandsgebäude, im Vogtland lokalisiert werden. In der Heizperiode tropfte von der Lampe, welche an der Decke zwischen Wohnküche und Kaltdachboden installiert war, Wasser ab (Abb. 3). Die Lampe war an einem Einschraubhaken befestigt und die Kabelführung erfolgte durch ein Bohrloch im Gipskarton mit angrenzender Luftdichtheitschicht. Die Küche grenzte mit den Innenwänden an das eigene Wohnzimmer, Kinderzimmer und das Wohnzimmer des Nachbarn. Die Außenwand war nach Süden ausgerichtet. Der Aufbau der Decke und auch die anschließende Wandinnendämmung wiesen keine Mängel auf. Einer doppelt beplankten Gipskartonschicht folgte eine Dampfsperrefolie. Diese war luftdicht mit der Dampfsperre der angrenzenden Außenwand abgedichtet und wies nur ein Loch im Bereich der Kabelführung auf. Flankendiffusion wurde daher ausgeschlossen. Die nächste Schicht bildete eine 20 cm dicke Mineralfaserdämmschicht mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$. Die Dämmung wurde als Zwischenbalkendämmung verlegt (Abb. 4). Zum Kaltdachboden hin wurde die Dämmung durch in Sparschalung verlegte Holzdielen begrenzt (Abb. 4).

Im Außenwandbereich grenzte die Dämmung an eine 50 cm dicke Ziegel-



Abb. 4: Zwischensparrendämmung über der Küche

demnach durch Diffusion nicht gekommen sein. Konvektiver Feuchteintrag wurde daher vermutet.

Bilanzierungsmodell zum konvektiven Feuchteintrag

Die Ergebnisse des an der Bauhaus-Universität Weimar entwickelten Versuchsstandes zur Untersuchung des konvektiven Feuchteintrags durch Wände und Wandbauteile »MCMT« wurden für die Untersuchungen des Schadensfalls eingebunden [14; 15]. Mit dem MCMT wurden zunächst der Ausflussfaktor ζ durch Luftdichtheitschichten [15], die Permeabilität K mineralischer Dämmstoffe [16] und das Strömungsverhalten von Luft durch das Dämmmaterial erforscht. Die gewonnenen Erkenntnisse trugen zur Entwicklung eines Berechnungsmodells des Volumenstroms durch Leckagen in der Luftdichtheitschicht mit angrenzender Dämmung bei. Darauf aufbauend können Rückschlüsse auf die maximal konvektiv eintragbare Feuchte in eine Holzleichtbaukonstruktion unter verschiedenen Druckdifferenzen, Luftfeuchtigkeiten und -temperaturen abgeschätzt werden. Am Beispiel des dargestellten Schadensfalls wurde die maximal eintragbare Feuchte unter den Temperatur- und Feuchtebedingungen der DIN 4108-3 [17] berechnet.

$$\dot{V} = \zeta \cdot A_L \cdot \frac{\left(x_i \cdot \eta_i \cdot \zeta \cdot A_L - \sqrt{x_i^2 \cdot \eta_i^2 \cdot \zeta^2 \cdot A_L^2 + 2 \cdot A_{i,\text{Theo}}^2 \cdot K^2 \cdot \rho_{fi} \cdot \Delta p \cdot (1 - n^2)} \right)}{A_{i,\text{Theo}} \cdot K \cdot \rho_{fi} \cdot (n^2 - 1)} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3)$$

- x_i → Dicke der Dämmung [m]
- ζ → Ausflussfaktor der Leckage [-]
- K → Permeabilität der Dämmung [m^2]
- ρ_{fi} → Dichte der feuchten Luft innen [kg/m^3]
- A_L → Leckagequerschnitt [m^2]
- $A_{i,\text{Theo}}$ → Theor. durchströmter Dämmquerschnitt [m^2]
- Δp → Differenzdruck [Pa]
- n → Leckage- zu Raumfläche in Strömungsrichtung [-]
- η_i → dynamische Viskosität der Raumluft [Ns/m^2]
- \dot{V} → Volumenstrom [m^3/s]

wand. Nach Aufnahme der Dielen auf dem Kaltdachboden konnte nur im Bereich der Undichtigkeit eine erhöhte Feuchtelast festgestellt werden. Das Dach wurde mit dem Einbringen der Dämmung neu gedeckt, sodass Regenwasser als Ursache nicht in Frage kam. Eine Prüfung nach dem Glaser-Verfahren ergab eine maximale Tauwassermenge von $0,51 \text{ kg}/\text{m}^2$ und eine Verdunstungsmenge von $1,1 \text{ kg}/\text{m}^2$ pro Jahr. Zu einer Feuchteanreicherung in dieser Menge (Abb. 3) dürfte es

Das Modell baut auf grundlegenden Gesetzmäßigkeiten wie dem Darcy-Gesetz und der Kontinuitätsgleichung auf. Gl. (3) beschreibt den entstehenden Volumenstrom unter anliegender Druckdifferenz.

Die entstehende maximal einströmende Feuchtelast kann anhand von Gl. (4) [18] bestimmt werden. Im Bilanzierungsmodell wird davon ausgegangen, dass die im Luftstrom enthaltene überschüssige Feuchte bis zur Konstanz der Feuchte zwischen Luftstrom und Außenluft in der Konstruktion ausfällt. In Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit befindet sich der Wasserdampf-sättigungsdruck in unterschiedlicher Tiefe zur Stromeintrittsöffnung. Der unter realen Druckdifferenzen entstehende Reibungsverlust durch die Mineralfasern führt zu einer Reduzierung der Geschwindigkeit des Luftstroms, wodurch ein erhöhter konvektiver Wärmeübergang zu verzeichnen ist. Der in der Heizperiode anliegende Temperaturgradient im Dämmmaterial trägt dazu bei, dass es unter diesen Umständen zum Tauwasserfall in der Dämmschicht kommen kann.

$$m_F = \dot{V} \cdot (C_i - C_{e,max}) \quad [\text{kg/h}] \quad (4)$$

mit:

m_F → konvektiv eingetragene Feuchtelast $[\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}]$

\dot{V} → Volumenstrom $[\text{m}^3/\text{h}]$

C_i → Wasserdampfkonzentration innen $[\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}_{\text{Luft}}^3]$

$C_{e,max}$ → Wasserdampfkonzentration außen $[\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}_{\text{Luft}}^3]$

Ergebnisse

Luftdichtheitsuntersuchungen

Die Differenzdruckuntersuchungen ergaben, dass besonders vor 1952 errichtete Gebäude sehr undicht sind (Abb. 5). Die Luftwechselrate n_{50} dieser Bestandsgebäude lag bei $6,8 \pm 4,1 \text{ h}^{-1}$. Bei Betrachtung aller untersuchten Gebäude war feststellbar, dass mit fallendem Alter der Wohnhäuser die Luftdichtigkeit zunimmt. So liegen die n_{50} Werte zwischen 1982 und 1995 errichteter Gebäude bei $2,5 \pm 1,3 \text{ h}^{-1}$ und nach 2002 gebauter bei $1,8 \pm 0,9 \text{ h}^{-1}$.

Die Ursache für dieses Ergebnis ist dem Gebäudestandart zuzuschreiben. Während es sich bei den ältesten Referenzobjekten um unsanierte, historische Gebäude handelte, waren die nach 2002 errichteten mindestens auf dem Stand der EnEV 2002. Es fällt jedoch auf, dass die Luftdichtigkeit noch nicht den gleichen Stellenwert wie die Diffusionsdichtheit besitzt. Die Anforderung der DIN 13829 [12] mit $3,0 \text{ h}^{-1}$ für natürlich belüftete Gebäude, ist

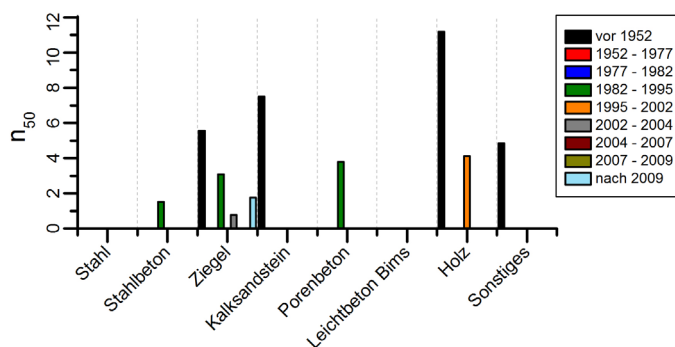


Abb. 5: Luftwechselrate unterschiedlich alter Gebäude bei 50 Pa Druckdifferenz

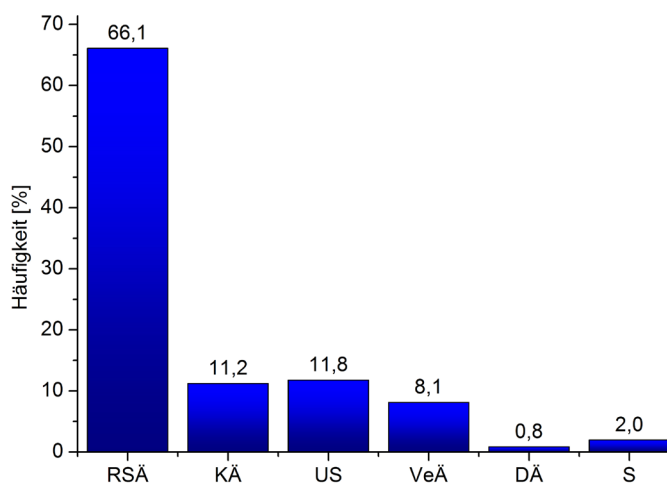


Abb. 6: Häufigkeit innerer Leckageaustrittsöffnungen

zwar für jedes der Untersuchungsobjekte, welche nach 2002 errichtet wurden eingehalten, die Empfehlung des Flib e.V. [13] von $2,0 \text{ h}^{-1}$ wurde jedoch nur von etwa 30 % erreicht.

Zur Leckageanalyse wurden die detektierbaren Leckagen der untersuchten Gebäude aufgenommen. Es konnten 360 Undichtigkeiten für eine Analyse der häufigsten Formen und Querschnitte festgehalten werden. Für eine Formbeschreibung wurden diese in flächenähnliche Gebilde unterteilt. »Kreisähnlich (KÄ)« beschreibt Flächen die näherungsweise als kreisrund eingestuft werden können. Als »Riss/Schlitz-ähnlich (RSÄ)« wurden Undichtigkeiten definiert, welche ein Breiten- zu Längenverhältnis aufwiesen, das gegen 0 verlief. Ein durchgängiger Verlauf zur z.B. Horizontale bzw. Vertikale musste nicht gegeben sein. Der Klasse »Vierecksähnlich (VeÄ)« wurden Leckagen zugeordnet, welche ein Breiten- zu Längenverhältnis $> 0,1$ aufwiesen. Unter »Dreiecksähnlich (DÄ)« wurden Undichtigkeiten eingestuft, welche mit guter Näherung der mathematischen Beschreibung eines Dreiecks (3 Seiten, die durch ihre Verbindung eine Innenwinkelsumme von 180° ergeben) glichen, z.B. Löcher von Zylinderschlössern. Wurden Luftdurchlässigkeiten um eine Durchdringung festgestellt, wurden diese der Rub-

rik »Umlaufender Spalt (US)« zugeordnet. Alle weiteren Leckagen wurden unter dem Begriff »Sonstige (S)« zusammengefasst. Wie Abbildung 6 zu entnehmen ist, waren besonders Risse und Schlitze in den untersuchten Gebäuden anzutreffen. Diese sind sowohl in alten als auch in jüngeren Gebäuden anzutreffen. In beiden Fällen sind sie besonders an Stößen sowie an Fenstern anzutreffen. In historischen, unsanierten Gebäuden stellt zusätzlich der Übergang von Fachwerk zu Gefach eine solche Problemstelle dar. Es ist anzunehmen, dass dreiecksähnliche Leckagen nur deshalb so selten anzutreffen waren, da die Blower-Door zumeist in den Hauseingangstüren eingebaut wurde. Die Schlösser der Eingangstüren konnten daher nicht mit geprüft werden. Während umlaufende Spalte hauptsächlich um die Hauseingangstüren der historischen Gebäude sowie Lichtschalter, Steckdosen und Durchdringungen in allen Untersuchungsgebäuden detektiert wurden, traten kreisähnliche Leckagen in Form von Bohrungen auch innerhalb der Fläche auf. Vierecksähnliche Undichtigkeiten konnten oftmals an Entlüftungen entdeckt werden. Schwer zu definierende Leckagen waren sehr häufig zwischen zwei nah angrenzenden Fensterflügeln vorzufinden. Im Gegensatz zu den anderen Leckageöffnungen konnte

Tabelle 1: Durchschnittliche Größe analysierter Leckagen

Leckageart	Querschnittsfläche [cm ²]		
	Mittel	Median	σ
RSÄ	12,6	3,8	32,7
KÄ	10,9	3,3	19,4
US	27,9	5,2	45,1
VeÄ	130,3	29,8	166,4
DÄ	1,7	1,0	2,1

weder durch direktes Vermessen, während des Unterdrucks -50 Pa, noch durch eine Digital- oder Thermografiebildanalyse eine Querschnittsanalyse durchgeführt werden. Der eintretende Luftstrom verursachte eine Temperaturveränderung an beiden Fensterrahmen, sodass der Ursprung des Luftstroms nicht genügend genau definiert werden konnte. Die optische Lokalisierung wurde zumeist durch die Dicke des gegenüberliegenden Fensterrahmens oder die nicht eindeutige Identifizierbarkeit behindert. In Tabelle 1 ist zu erkennen, dass besonders große Leckageöffnungen einer vierecksähnlichen Form entsprechen. Demnach ist bei dieser Art Undichtigkeit mit den höchsten Energieverlusten zu rechnen. Ausgehend vom Median der analysierten Querschnittsflächen liegen alle weiteren Undichtigkeiten um rund 3,3 cm².

Untersuchung zum Konvektiven Feuchteintrag

Zur Übertragung des in Gl. (3) dargestellten Berechnungsmodells auf einen Schadensfall, musste eine Validierung erfolgen. Diese wurde durch die Volumenstromanalyse verschieden großer kreisrunder, scharfkantiger Leckagen in einer vereinfachten Holzrahmenbaukonstruktion im MCMT durchgeführt. Die Konstruktion wurde in den Probehälter integriert und bestand aus einer perforierten Dampfsperrfolie mit anschließender 20cm dicker Steinwolldämmung zwischen zwei 6/20cm Holzständern. Es wurden mögliche, reale Druckdifferenzen zwischen 2 ... 100 Pa entsprechend [19; 20] zwischen Innenraum und Umgebung angenommen. Die Volumenstrommessungen erfolgten unabhängig, parallel mittels Tracergas- und kalorimetrischer Messung.

Wie man in Abbildung 7 am Beispiel einer 1cm² großen, kreisrunden, scharfkantigen Leckage erkennen kann, liegt eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen vor. Der Fehler zwischen approximierten Mess-

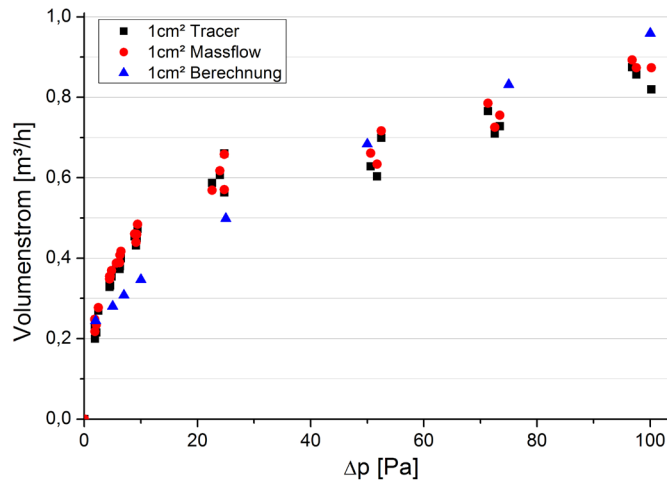


Abb. 7: Volumenstrom durch eine 1 cm² Leckage in der Dampfsperre mit angrenzender 20 cm Mineralwoll-dämmung

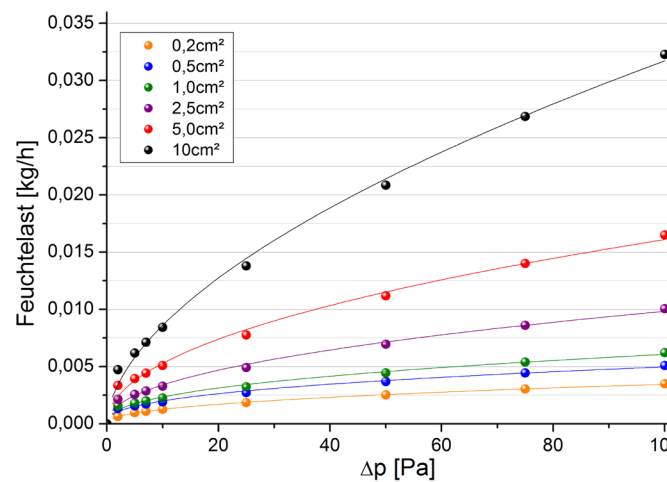


Abb. 8: Maximale, hygrische Hüllflächeninfiltration in Abhängigkeit von Leckagequerschnitt, Druckdifferenz

werten und Berechnungen liegt bei Leckagen von 0,2 cm² im Durchschnitt bei 0,06 ± 0,05 m³/h und steigt bis zu Leckagen von 10 cm² auf 0,13 ± 0,14 m³/h. Anhand der ermittelten Volumenströme können entsprechend Gl. (4) beispielsweise durch eine 10 cm² große, kreisrunde, scharfkantige Leckage unter stationären Temperatur- und Feuchtebedingungen nach DIN 4108-3 [17] und 100 Pa Druckdifferenz, maximal bis zu 32 g/h Feuchte in die gesamte Konstruktion infiltriert werden (Abb. 8).

Schadensanalyse

Um den konvektiven Feuchteintrag des detektierten Schadens zu analysieren, mussten verschiedene Annahmen getroffen werden. Aufgrund der territorialen Lage und der Wandausrichtung des um 1860 errichteten und 2002 teilsanierten Gebäudes, wurden übliche Druckdifferenzen eines in Rostock befindlichen exponierten Gebäudes angenommen [19; 20]. Entsprechend dem Testreferenzjahr 2004 [21] treten für Region 4 (Ostseeküste 4,3 ± 2,0 m/s) und 10 (Vogtland 3,6 ± 2,2 m/s) ähnliche mittlere Windgeschwindigkeiten auf. 80 % der in Rostock von

innen nach außen gemessenen Druckgradienten traten zwischen 0 und 12 Pa auf. Aufgrund der windbeeinflussenden Dachkonstruktion wurden nur diese in die Berechnung eingebunden. 20 % des Betrachtungszeitraums wurde die Trocknung der im gleichen Zeitraum (288 h) infiltrierten Feuchte zugeschrieben. Damit ergaben sich für den Betrachtungszeitraum, 1440 h nach DIN 4108-3 [17], die Häufigkeiten einflussnehmender Druckdifferenzen entsprechend Tabelle 2.

Zur Bestimmung des durchströmten Leckagequerschnitts wurde der Bohrlochquerschnitt (Ø ≈ 0,6 cm) um den Querschnitt der zwei Stromkabel (Ø ≈ 0,2 cm), welche zur Lampe führten, reduziert. Es ergab sich ein Leckagequerschnitt von rund 0,2 cm². Die Lufttemperatur und -feuchte wurde wie beim Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3 [17] festgelegt (-10 °C, 80 % außen, 20 °C, 50 % innen). Die Mengen des Feuchteintrags in den Kaldachboden unter den angenommenen Druckdifferenzen konnten durch eine potenzielle Approximation der Berechnungswerte aus Abbildung 8 mit guter Näherung (Kor. R² = 0,999) bestimmt werden. In Abhängigkeit der angenom-

Δp	2	4	6	8	10	12	Rest
h	144	345,6	288	201,6	100,8	72	288
%	10	25	20	14	7	5	20
10^{-3} kg/h	0,63	0,85	1,0	1,1	1,3	1,4	-

Tabelle 2: Häufigkeit auftretender Druckdifferenzen und die innerhalb dieser Zeiten auftretenden Feuchteinträge durch eine 0,2 cm² große, scharfkantige, kreisrunde Leckage

menen Häufigkeiten ergaben sich für den in der DIN 4108-3 [17] festgelegten Betrachtungszeitraum (Tauwasserperiode) die in der Tabelle 2 für die einzelnen Druckdifferenzen dargestellten Werte. Die Summe der maximal konvektiv in die Konstruktion infiltrierbaren Feuchtemenge ergab 1,13 kg/a. Damit liegt sie um mehr als das Doppelte höher als per Diffusion möglich ist und sich nach dem Glaserverfahren in einem kapillar nicht aktiven Dämmstoff einlagern darf.

Diskussion

Verschiedene Ursachen können das Abtropfen der Feuchte in der Heizperiode erklären. Einerseits ist damit zu rechnen, dass in einem längeren Zeitraum als den nach DIN 4108-3 festgelegten 60 d aufgrund kalter Außentemperaturen geheizt wird. Nimmt man als Heizperiode den Zeitraum von Mitte Oktober bis Mitte April an, entsteht näherungsweise das dreifach an konvektivem Feuchteeintrag 3,39 kg/a. Hinzu kommt, dass die Annahme von 50 % r.h. und 20 °C für den Innenraum der Wohnküche voraussichtlich zu gering ist. Einer der Hauptgründe liegt in der verbauten, kapillar nicht aktiven Mineralwolle. Die Menge der durch Adsorption aufnehmbaren Feuchte der Mineralfasern wird aufgrund der Mineralfaseroberfläche und der anhaltenden Feuchtezufuhr schnell überschritten. Dies führt zum Abtropfen hinzukommenden Kondenswassers in Richtung Dampfsperre. Die Leckage befand sich etwa in der Mitte zwischen den Sparren. Aufgrund des Eigengewichts der Gipskartonplatten und des abtropfenden Wassers können diese sich minimal durchbiegen, was einen Wasserlauf in Richtung Leckage ermöglicht. Ein Abtropfen der konvektiv eingetragenen Feuchte in den Küchenraum kann demnach begründet werden.

Zusammenfassung

Bei Bestandsgebäuden, welche vor der ersten Wärmeschutzverordnung errichtet und nicht saniert wurden, ist von einer hohen Undichtigkeit der Gebäudehülle

auszugehen. Die Gebäudedichtheit nimmt allerdings mit sinkendem Alter zu. Anhand der durchgeführten Differenzdruckuntersuchungen ist jedoch festzustellen, dass der luftdichten Gebäudehülle noch nicht die gleiche Aufmerksamkeit gewidmet wird, wie der diffusionsdichten Bauweise. So wurden bei allen untersuchten Gebäuden Leckagen detektiert. Mit 66 % traten Riss-/Schlitz-ähnliche Leckagen am häufigsten auf, wobei, aufgrund der ermittelten Querschnittsflächen, viercksähnlicher Undichtigkeiten z.B. bei Entlüftungen mit dem höchsten Energieverlust zu rechnen ist. Während der Untersuchungen wurde in einem um 1860 erbauten und 2002 teilsanierten Gebäude ein Bohrloch in der Luftdichtheitsschicht einer gedämmten Holzbalkendecke detektiert. In der Heizperiode tropfte durch dieses, zur Kabelführung dienende Loch, Wasser vom Kaltdachboden in die darunter liegende Wohnküche. Zur Analyse des Schadens wurde ein in Laborversuchen validiertes Bilanzierungsmodell zum konvektiven Feuchte-transport durch Holzleichtbaukonstruktionen angewendet. Als Randbedingungen der Untersuchungen wurden die Tauwasserperiode und die Temperatur- und Feuchtebedingungen nach DIN 4108-3 betrachtet. Anhand von Voruntersuchungen wurden mögliche, real auftretende Druckdifferenzen zwischen Innenraum und Umgebung zur Häufigkeitseinteilung des Betrachtungszeitraumes hinzugezogen. Gegenüber einer Analyse nach dem Glaser-Verfahren konnte für die Tauwasserperiode mehr als das Doppelte an konvektiv eingetragener Feuchte ermittelt werden. Das Abtropfen der Feuchte in den Innenraum kann mit den Materialeigenschaften der eingebauten kapillar nicht aktiven Dämmung begründet werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung / InnoProfile / Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung. Weiter-

hin möchten sie sich für die Materialunterstützungen durch die Knauf Insulation GmbH und die Dörken AG & Co bedanken. Für die Hilfe bei der Erstellung dieses Artikels gilt ein zusätzlicher Dank Bachelor of Science Marcel Lüttkopf.

Referenzen

- [1] EnEV: Energie-Einsparverordnung, Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Bonn, 01/2005, <http://www.enev.de>
- [2] DIN 1946-6: Raumlufttechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen - Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 05/2009
- [3] DIN EN 832: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs - Wohngebäude, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 06/2006
- [4] Schulze H.: Feuchtebedingte Schäden an Wänden, Decken und Dächern in Holzbauart, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2. Aufl. 2011, ISBN / EAN 978 3 8167 8466 1
- [5] Smith R. C.: Framed Wall Systems Insulated with Spray Polyurethane Foam, Masterarbeit, Ontario, University of Waterloo, 2009
- [6] Borsch-Laaks R.: Tauwasserrisiko durch Dampf-Konvektion im Steildach, In: Holzschutz im Hochbau, Stuttgart, 2005, pp. 132–142, ISBN / EAN 3 8167 6647 1
- [7] Fischer H. M.: Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008, ISBN / EAN 978 3 5195 5014 3
- [8] Hauser G. and Maas A.: Aufsatzsammlung der Aachener Bausachverständigentage. Auswirkung von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmschichten, DBZ Deutsche Bau Zeitschrift, 24th ed., vol. 1, (1991), pp. 97-100
- [9] Hagentoft C.-E., Kalagasidis A. S., Adl-Zarabi B., Roels S., Carmeliet J., Hens H., Grunewald J., Funk M., Becker R., Shamir D., Adan O., Brocken H., Kumaran K. und Djebbar R., Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components. Benchmarks for One-dimensional Cases, Journal of Thermal Envelope and Building Science, 27th ed., vol. 4, pp. 326-352, April 2004
- [10] Borsch-Laaks R.: Tauwasserschäden durch Luftströmung. Auf die richtige Verklebung kommt es an, Holzbau die neue quadriga, vol. 3, (2009), pp. 32-35
- [11] Köhnke E.U., Kondensat = Schimmelpilz

- = Ärger. Wie Kommt die Feuchte in den Spitzboden?, In: Holzbau, Die neue quadriga, H. 4, S. 25-28, 2010
- [12] EN 13829: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden, Differenzdruckverfahren, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 02/2001
- [13] Bischof W.: Gebäude-Luftdichtheit. Gründe für eine Luftdichtheit der Gebäudehülle, Fachverb. Luftdichtheit im Bauwesen, Kassel, 2008, ISBN / EAN 9783000248696
- [14] Bauhaus-Universität Weimar, Erfinder: Schmidt J. und Kornadt O.: Verfahren und Untersuchungsvorrichtung zur Untersuchung eines konvektiven Feuchtetransports in einem Bauwerkelement, Patent: DE102010031141, Germany, 09.07.2010
- [15] Schmidt J. und Kornadt O.: Konvektiver Feuchtetransport durch die Gebäudehülle – neuartiges Messsystem zur Klärung relevanter Fragen, Der Bausachverständige, Heft 4, 2012, S. 29-33
- [16] Schmidt J. und Kornadt O.: Convection through light weight timber constructions with mineral wool, In: World Academy of Science, Engineering and Technology, Stockholm, 67th ed., 07/2012, pp. 731-738, ISSN 2010376X
- [17] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 07/2001
- [18] Künzel H.M., Trocknungsreserven schaffen. Einfluss des Feuchteintrags aus Dampfkongvektion, in: Holzbau, Die neue quadriga, H. 1, S. 28–32, 2010
- [19] Schmidt J. und Kornadt O.: Konvektiver Feuchtetransport durch Bauteilleckagen in Bestandsgebäuden, Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Weimar, 09/2010, <http://www.nuBau.de>
- [20] Schmidt J. und Kornadt O.: Konvektiver Feuchtetransport in Bauteilen, 1. Workshop Nutzerorientierte Bausanierung, Bauhaus-Universität Weimar, 11/2008, <http://www.nuBau.de>
- [21] Christoffer J., et al.: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY, Selbstverl. des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach a. Main, 2004, ISBN / EAN 3881483985

Kontakt/Information

StR z.A. Jens Schmidt

Seit 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsprojekt »Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung (nuBau)« an der Professur Bauphysik, der Bauhaus-Universität Weimar. Der Schwerpunkt seiner Arbeit liegt auf der Untersuchung des konvektiven Feuchtetransports durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle.

Bauhaus Universität Weimar

Tel. 03643 584716, Fax 03643 584702

E-Mail: jens.schmidt@uni-weimar.de

ab 1.1.2013 TU Kaiserslautern

Tel. 0631/205 2937, Fax 0631/205 4131

jens.schmidt@bauing.uni-kl.de

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt

Seit 01.10.2012 ist er Leiter des Fachgebiets Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung an der TU Kaiserslautern. Bis dahin war er Leiter der Professur Bauphysik an der Bauhaus-Universität Weimar und Leiter des Forschungsprojektes »Methoden und Baustoffe zur nutzerorientierten Bausanierung (nuBau)«. Er ist Mitglied in zahlreichen nationalen, europäischen und internationalen Gremien, z.B. Obmann des Ausschusses zur DIN 4109 »Schallschutz im Hochbau« sowie Chairman des ISO TC43/SC2 »Building Acoustics«.

TU Kaiserslautern

Fachgebiet Bauphysik/Energetische

Gebäudeoptimierung

Prof. Dr. Oliver Kornadt

Gebäude 29, Paul-Ehrlich-Straße

67663 Kaiserslautern

Tel. 0631 2055461, Fax 0631 2054131

E-Mail: oliver.kornadt@bauing.uni-kl.de