

Klaus Vogel, Victor Norrefeldt, Ulf Köpcke

Luftleckagen und wie man damit umgehen kann

Zur Einstimmung

Mit der Herstellung luftdichter bzw. wenig luftdurchlässiger Gebäudehüllen sollen übergeordnete Ziele erreicht werden. Hierzu werden beispielsweise die dauerhafte Sicherung der Funktion eines Bauteils und der schonende Umgang mit Energieträgern genannt. Insbesondere in den letzten ca. 25 Jahren haben sich verschiedene Disziplinen dem Thema Luftdichtheit/Luftdurchlässigkeit angenommen. Daraus sind eine große Zahl an systemischen Überlegungen, Bauprodukten und messtechnischen Möglichkeiten zur Überprüfung der Luftdichtheit hervorgegangen, die teilweise auch ihren Weg in die Normung gefunden haben. Sicherlich kommt in diesem Zusammenhang dem Gesetz- bzw. Verordnungsgeber eine treibende Kraft zu, da er das Thema Luftdichtheit in verschiedenen Versionen von Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnung verankert hat. Wer sich einen raschen Überblick zum Thema Luftdichtheit verschaffen will, der sei auf den Beitrag »Luftdichtheit – Luftdurchlässigkeit – Ein Rundumschlag« in der Dezemberausgabe 2015 dieser Zeitschrift verwiesen [1].

Im Laufe der Zeit sind einzelne Fehlstellen in einer ansonsten wenig luftdurchlässigen Gebäudehülle stärker in den Fokus gerückt. Dies liegt neben der gestiegenen Sensibilität für das Thema beispielsweise auch daran, dass durch den Einsatz von Messtechnik einzelne Fehlstellen leichter aufgespürt werden können und trotz aller Bemühungen immer wieder von feuchtetechnisch bedingten Bauschäden berichtet wird (z. B. [2]). Trotz des Engagements der praktischen und wissenschaftlichen Bauphysik (z. B. [3], [4], [5]) hat sich für die Vielfalt der prinzipiellen Bauweisen, Konstruktionen und Blickwinkeln der verschiedenen Disziplinen auf das Thema Luftleckagen noch kein Königsweg, quasi zwischen Panik und Gleichgültigkeit, festlegen lassen. Es verwundert somit nicht, dass durch das Fehlen nachvollziehbarer, allgemein akzeptierter und handhabbarer Kriterien Diskussionen zwischen den am Bau Beteiligten stattfinden, die auch in Rechtsstreitigkeiten enden.

Ein Forschungsprojekt

Diesem zuvor genannten Spannungs- bzw. Problemfeld hat man sich in einem auf zwei Jahre angelegten und mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung geförderten Forschungsprojekt angenommen. Ziel war es, der Baupraxis eine Handlungsempfehlung für den Umgang mit Luftleckagen anzubieten. Um dieses Ziel mit der notwendigen inhaltlichen Bandbreite erreichen zu

können, haben sich drei Institutionen, der Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V., das Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik gGmbH mit Arbeitsschwerpunkt Umfrage unter Sachverständigen und Messdienstleistern sowie das Fraunhofer-Institut für Bauphysik mit Arbeitsschwerpunkt feuchtetechnische simulative Bewertung von Leckagen, zusammengeschlossen. Der daraus entstandene und rund 160 Seiten umfassende Forschungsbericht liegt nun vor [6]. In zwölf Kapiteln werden Luftleckagen und deren Bewertung aus unterschiedlichen Blickrichtungen der Forschergruppe und externer Fachleute beleuchtet (Abb. 1). Diese hier vorgelegte Abhandlung geht auf ein paar Teilaspekte näher ein.



Abb. 1: Luftleckagen und deren Bewertung werden in dem Forschungsbericht aus unterschiedlichen Blickrichtungen beleuchtet.

Einheitliche Sprachregelung

Zum besseren Verständnis dieser Abhandlung werden nachfolgend einige Definitionen vorangestellt, wie sie für eine möglichst einheitliche Sprachregelung im Forschungsbericht aufgeführt werden.

- **Leckagedefinition im weiteren Sinne, zugleich Definition für Leck:** Für Luft passierbare Stellen/passierbare Bereiche in der Gebäudehülle. Hier wird der Blick ausschließlich und ohne weitere Differenzierung auf eine Stelle bzw. einen Bereich gerichtet.
- **Leckagedefinition im engeren Sinne, zugleich Definition für primäre Leckagen:** Fehlstellen in der Luftdichtheitsebene/Luftdichtheitsschicht mit einem Luft-Massenstrom. Bei

dieser Definition wird der Stofftransport herausgestellt und gemäß Otto und Ringeler [7] einer Ebene bzw. Schicht das Thema Luftdichtheit funktional zugeordnet (Abb. 2).

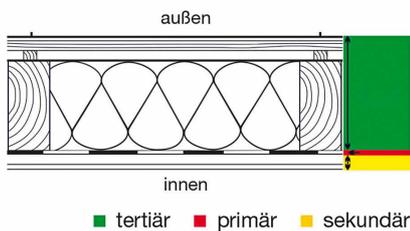


Abb. 2: Differenzierung primärer, sekundärer und tertiärer Leckagen in Bezug auf die Lage der planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitsschicht (hier: Folie/Plattenwerkstoff unterhalb der Sparren/Dämmung als Luftdichtheitsschicht).

- Sekundäre und tertiäre Leckagen:** Das Leck liegt in einer anderen, nicht planmäßig die Funktion der Luftdichtheit übernehmenden Schicht bzw. Ebene und ist damit als nicht ursächlich für wahrnehmbare Luftströmungen anzusehen. Sekundäre und tertiäre Leckagen unterscheiden sich durch ihre Lage gegenüber der planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitsschicht (Abb. 2). Eine Leckage wird als sekundär bezeichnet, wenn sie sich in einer raumseitig vor der Luftdichtheitsebene liegenden Schicht befindet. Demgegenüber handelt es sich um eine tertiäre Leckage, wenn sie hinter der planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitsschicht vorliegt. Wird eine auch in der Nutzungsphase vom Innenraum aus sichtbare Schicht (z.B. Plattenwerkstoff) planmäßig als Luftdichtheitsebene vorgesehen, können definitionsgemäß nur primäre und tertiäre Leckagen vorliegen.
- Leckagefeststellung (Leckagesuche, Leckageortung):** Tätigkeit, die ausschließlich der Wahrnehmung von mit Lecks in Verbindung zu bringenden Luftströmungen dient und deren räumliche Lage in einem Objekt beschreibt.
- Leckagebewertung:** Tätigkeit, die über die Leckagefeststellung hinaus weitere Parameter (vgl. Abb. 6) im Kontext einer bestimmten Aufgaben- bzw. Fragestellung in der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

Risikoeinschätzung als Motivation einer Bewertung

Die Existenz von Luftleckagen in der Gebäudehülle ist zunächst wertfrei. Das ändert sich, wenn die von ihnen ausgehenden po-

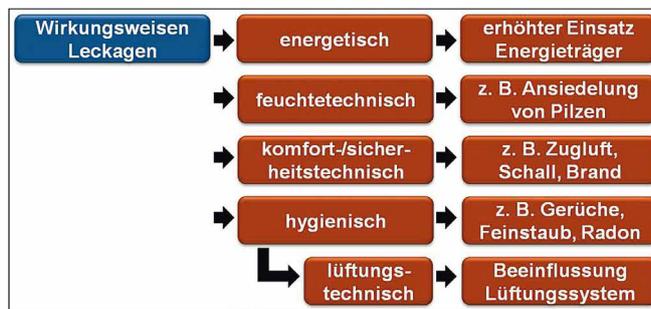


Abb. 3: Wirkungsweisen von Leckagen

tenziellen Wirkungsweisen (Abb. 3) und Risiken einzuschätzen sind. Gibt es in einem konkreten Fall verschiedene Vertragspartner, dann können technisch-naturwissenschaftliche und juristische Beurteilungs- und Bewertungskriterien gefragt und miteinander verknüpft sein (Abb. 4). Sowohl im rein technisch-naturwissenschaftlichen als auch im juristischen Kontext dienen die verschiedenen Beurteilungs- und Bewertungskriterien der Risikoeinschätzung. In Abb. 5 wird ein entsprechendes Diagramm gezeigt. Es besteht aus vier Feldern. Dem roten »Risikofeld«, dem gelben »Informationsfeld«, dem orangenen »Handlungsoptionsfeld« und dem grünen Feld »Anforderungen an die Umsetzung«.

Jedes Feld wird von links nach rechts entweder größer oder kleiner. Am Beispiel des roten Risikofeldes beutet das, dass in den Extremen das Risiko links gering und



Abb. 4: Je nach Fall, können technisch-naturwissenschaftliche und juristische Beurteilungs- und Bewertungskriterien gefragt und miteinander verknüpft sein.



Abb. 5: Diagramm »Risikoeinschätzung« als Ausgangspunkt für die Entscheidungsfindung im Umgang mit Leckagen

rechts hoch eingeschätzt wird. Die Risikoeinschätzung ist nur so gut wie die Informationsgrundlage. Dazu können bei der technisch ausgerichteten Leckagebewertung zahlreiche Parameter berücksichtigt werden. Dies reicht von der Betrachtung ganzer Gebäude bzw. Gebäudeteile (Makrobetrachtung) bis hin zur Einzelsprache von Leckagen (Mikrobetrachtung). Dazwischen richtet sich der Blick auf Bauteile bzw. Bauteilschichten sowie auf die Aspekte, welcher Zugang zur planmäßigen Luftdichtheitsschicht besteht und welche Wirkungsweisen von Leckagen zu berücksichtigen sind (Abb. 6). Auf jeder dieser Betrachtungsstufen kommt es dann zu einer weiteren Differenzierung. Beispielsweise wird unter Bauteile und Bauteilschichten auf deren Lage im Gebäude eingegangen. Der Grund hierfür ist, dass allein Dichteunterschiede zwischen der Luft im Gebäude und der Umgebung dazu führen, dass Lecks je nach ihrer Höhenlage im Gebäude überwiegend in eine Richtung durchströmt werden, sofern die Strömungsrichtung nicht durch Lüftungssysteme bestimmt wird. Ferner wird auf dieser Stufe der Frage nachgegangen, aus welchen Schichten die Konstruktion besteht, welche Schicht planmäßig die Funktion der Luftdichtheit übernehmen soll und wie diese in der Fläche sowie an Anschlüssen und Durchdringungen ausgebildet ist.

Dem Feld Informationsgrundlage (Abb. 5) können auch die Werkzeuge »Hohwacher Leckagepegel« und die numerische Simulation zugeordnet werden, auf die später noch eingegangen wird. Eine möglichst hohe Informationsgrundlage, und sei sie nur qualitativ, geht häufig mit einer Erhöhung der Handlungsoptionen einher. Das hat den Charme Maßnahmen auszuwählen und zu ergreifen, die nicht zu hohe Anforderungen an die Umsetzung stellen, denn hohe Anforderungen an die Umsetzung werden eher mit einem höheren Risiko in Verbindung zu bringen sein.

Die bisherigen Ausführungen haben überwiegend auf der Metaebene stattgefunden. Nachfolgend wird auf drei in der

Praxis bedeutsame Bewertungsprobleme bei der einzelnen, konkret auf der Baustelle vorhandenen Leckage eingegangen:

- Bewertungsprobleme im Rahmen der Messpraxis,
- Bewertungsprobleme im Rahmen feuchtebedingter Bauschäden,
- Bewertungsprobleme im Sinne der Leistungserfüllung.

Bewertungsprobleme im Rahmen der Messpraxis

Am Ende des Bauprozesses werden für den Nachweis der Dichtigkeit im Rahmen der Energieeinsparverordnung oder im Rahmen von Förderprogrammen der Kreditanstalt für Wiederaufbau vermehrt sogenannte Schlussmessungen («Blower-Door-Messungen») durchgeführt. Bei diesen Messungen besteht kein Verhandlungsspielraum in der Art und Weise ihrer Durchführung, sondern sie werden durch DIN EN 13829 [8] (in Deutschland zurückgezogen, aber im Rahmen der Energieeinsparverordnung noch im Einsatz) bzw. durch DIN EN ISO 9972 [9] geregelt. Vor der eigentlichen Messung hat eine »vorausgehende Prüfung« stattzufinden. Hierzu enthält DIN EN ISO 9972 folgenden Hinweis, der in DIN EN 13829 sehr ähnlich formuliert ist:

»Die gesamte Gebäudehülle ist immer nahe der höchsten Druckdifferenz, die bei der Prüfung verwendet wird, auf große Lecks und auf das Versagen provisorisch abgedichteter Öffnungen zu prüfen. Werden solche Lecks entdeckt, sind sie ausführlich zu beschreiben.« Daraus ergeben sich folgende Problemstellungen:

- Es wird nicht definiert, ab wann ein Leck bzw. eine Leckage als groß anzusehen ist. Somit kann je nach Messdienstleister der Umfang der dokumentierten Leckagen sehr unterschiedlich sein.
- Bei diesen Messungen am Ende des Bauprozesses, die als Standardmessungen anzusehen sind, werden auch immer wieder Fragen an den Messdienstleister gerichtet, ob es sich um »zulässige« oder »schlimme« Leckagen handelt. Hierzu drängen sich die Fragestellungen auf, ob der Messdienstleister darauf zu antworten hat und ob ihm das zu diesem Messzeitpunkt überhaupt möglich ist.
- Beide Normen enthalten Vorgaben zur höchsten Druckdifferenz für die eigentliche Messung (mindestens 50 Pa, bis hinauf zu 100 Pa werden empfohlen). Da die vorausgehende Prüfung bei der höchsten für die eigentliche Messung vorgesehenen Druckdifferenz durchzuführen ist, kann die Prüfung auf große Lecks je nach Messobjekt bei unterschiedlichen Druckdifferenzen stattfinden. Dadurch werden Vergleiche zwischen Objekten und der Aufbau eines Erfahrungsschatzes erschwert.

Bewertungsprobleme im Rahmen feuchtebedingter Bauschäden

Es ist unstrittig, dass konvektiver Feuchtetransport zu Bauschäden führen kann. Dieses Gedankengut hat Eingang in die Nor-

mung gefunden. So enthält die Norm für den Holzschutz DIN 68800-2 [10] u. a. folgende Hinweise: »Eine unzuträgliche Veränderung des Feuchtegehaltes durch Tauwasser aus Wasserdampfdiffusion oder Wasserdampfkonvektion ist zu verhindern [...] Für beidseitig geschlossene Bauteile der Gebäudehülle ist bei der Berechnung mit den Verfahren nach DIN 4108-3 (Glaser-Verfahren) zur Berücksichtigung eines konvektiven Feuchteintrags und von Anfangsfeuchten eine zusätzliche rechnerische Trocknungsreserve $\geq 250 \text{ g/(m}^2\text{a)}$ bei Dächern und $\geq 100 \text{ g/(m}^2\text{a)}$ bei Wänden und Decken nachzuweisen. Beim Nachweis mit numerischen Simulationsverfahren nach DIN EN 15026 ist der konvektive Feuchteintrag entsprechend der geplanten Luftdurchlässigkeit mit dem q_{50} -Wert nach DIN 4108-7 in Rechnung zu stellen ...«.

Eine kritische Anmerkung im Zusammenhang mit der Einhaltung von Grenzwerten, wie sie in der Energieeinsparverordnung [11] und in DIN 4108-7 [12] enthalten sind (z. B. n_{50} -Werte), wird in DIN 4108-7 [12] ausgeführt: »Selbst bei Einhaltung der oben genannten Grenzwerte sind lokale Fehlstellen in der Luftdichtheitsschicht möglich, die zu Feuchteschäden durch Konvektion führen können. Die Einhaltung der Grenzwerte ist somit kein hinreichender Nachweis für die sachgemäße Planung und Ausführung eines einzelnen Konstruktionsdetails, beispielsweise eines Anschlusses oder einer Durchdringung.«

Aus diesen beiden Normtexten kann entnommen werden, dass das Thema konvektiver Feuchtetransport durch flächenbezogene »Sicherheitszuschläge« quantitativ berücksichtigt wird. Des Weiteren kann entnommen werden, dass einzelne Stellen dennoch feuchtetechnisch relevant sein können und trotz Einhaltung von Grenzwerten der Luftdichtheit im Hinblick auf Planung und Ausführung nicht zwingend als »sachgemäß« zu bezeichnen sind.

Bewertungsprobleme im Sinne der Leistungserfüllung

Wie oben schon ausgeführt, werden Messdienstleister auch im Rahmen der Schlussmessungen dazu befragt, wie etwa festgestellte Leckagen nun zu bewerten seien. Solche Fragen zielen meistens nicht nur auf die bauphysikalische oder bautechnische Schadensträchtigkeit der Luftleckagen, sondern natürlich auch darauf ab, ob die Bauleistung »Luftdichtheit der Gebäudehülle« ordentlich oder aber mangelhaft erbracht wurde. Das aber ist primär eine juristische Fragestellung, die schon deshalb vom Messdienstleister kaum beantwortet werden kann oder sollte.

Die dauerhaft luftundurchlässige Ausführung der wärmeübertragenden Hüllfläche von Gebäuden wird durch § 6 Abs.1 S.1 der Energieeinsparverordnung (EnEV) bauordnungsrechtlich zwingend vorgeschrieben. Trotzdem gibt es in den Bauämtern keine Luftdichtheitspolizei. Die eigentliche Kontrolle dieses Gebots erfolgt im Zivilrecht: Weil § 6 Abs. 1 S. 1 EnEV zwingendes Bauordnungsrecht ist, wäre jedes Gebäude, das unter Verstoß gegen diese Vorschrift ausgeführt würde, zivilrechtlich mangelhaft. Auch ohne ausdrückliche vertragliche Erwähnung gehören die Anforderungen der EnEV zur Sollbeschaffenheit einer Werkleistung (OLG Düsseldorf, Urt. v. 23.10.2015, Az. 22 U 57/15; OLG Brandenburg, Urt. v. 02.10.2008, Az. 12 U 92/08).

Wird zivilrechtlich über Luftleckagen der Gebäudehülle gestritten, kommt dem schuldrechtlichen Fehlerbegriff zentrale Bedeutung zu. Hiernach ist die Leistung dann mangelhaft, wenn die tatsächliche »Ist-Beschaffenheit« der Bauleistung von der vertraglich geschuldeten »Soll-Beschaffenheit« abweicht. Ob eine Luftleckage hiernach wirklich einen Mangel der zivilrechtlich geschuldeten Leistung darstellt, lässt sich aber nicht nach

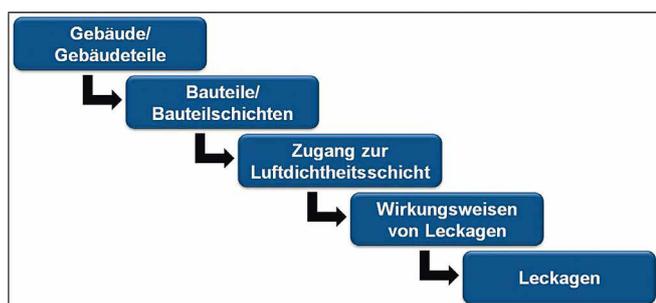


Abb. 6: Parameter der Leckagebewertung

einheitlichen (und erst recht nicht nach etwa immer gleichen naturwissenschaftlichen) Kriterien beurteilen.

Werkzeuge der Leckagebeurteilung und Leckagebewertung

Sowohl die technisch-physikalische Sicht wie auch die juristische Perspektive fragen also zwar scheinbar übereinstimmend danach, inwieweit eine konkrete Luftleckage relevant oder aber hinnehmbar ist. Ihre Beurteilungskriterien sind gleichwohl sehr verschieden, wie im Folgenden verdeutlicht werden soll. Beide Disziplinen sind auf je verschiedene Informationsgrundlagen angewiesen, die teilweise aber auch eng miteinander verwoben sind. Für beide Betrachtungsweisen wurden im Zusammenhang des Forschungsberichts Werkzeuge entwickelt, die für eine praxisnahe Leckagebewertung hilfreich erscheinen und deshalb im Folgenden vorgestellt werden:

Mit dem »Hohwacher Leckagepegel« wird als Ergebnis der juristischen Mitarbeit am Forschungsbericht ein tabellarisches Werkzeug zur Verfügung gestellt, das insbesondere dem Zweck dient, den Bauteiligten relativ einfach zu verdeutlichen, ob die konkret festgestellte Luftdichtheitsqualität rechtlich mutmaßlich als fehlerhaft beurteilt würde und hinsichtlich welcher Fragestellungen weiterführende Untersuchungen zweckmäßig erscheinen. Der rein technischen Leckagebewertung ist demgegenüber das Werkzeug der numerischen Simulation verpflichtet, das anhand eines im Forschungsbericht detailliert untersuchten Referenzfalles exemplarisch erläutert wird.

Der »Hohwacher Leckagepegel« als juristisch basierte Orientierungshilfe

Die juristische Orientierungshilfe ist eine Tabelle (nach dem Ort ihrer Erarbeitung benannt als »Hohwacher Leckagepegel«). Ihre Verwendung soll den Baupraktikern möglichst unkompliziert zielführende Hinweise dazu geben, welchen Umständen bei der Beurteilung von Luftleckagen im konkreten Einzelfall aus rechtlicher Sicht voraussichtlich besonderes Gewicht zukommen wird. Dafür nimmt die Tabelle jene sechs Kriterien in Bezug, die für die juristische Beurteilung von Luftleckagen in einer Gebäudehülle von zentraler Bedeutung sind (»Mustertabelle« Spalten 2-7). Jedes Kriterium kann mit ganzen Zahlen in der Skala von 0-6 »gewichtet« werden. Ergibt sich in der Additi-

Tabelle 1: »Hohwacher Leckagepegel« Mustertabelle (RA Ulf Köpke © 2017)

Objektdatei: z. B. Gebäudetyp, Bauweise, Nutzungseinheiten, Lüftungsanlage, Ergebnis Schlussmessung usw.

Symptom: z. B. Luftwechselrate, Leckageortung, Ergebnisse von Bauteilöffnungen, Thermografie, Beschreibung einzelner Leckagen usw.

	rein juristisch		naturwissenschaftlich		gemischt	naturwiss.	
	Gewicht in Vertrag und Leistungsbeschreibung	Relevanz für EnEV-Nachweis, Finanzierung usw.	Direkte obj. Beinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit	Risiko des Eintritts von Folgeschäden	Vermeidbarkeit (einschl. Bedenkenanmeldung)	Sanierungskosten (einschl. Vor- und Nacharbeit)	»Summe« bzw. Tendenz
	irrelevant → unverzichtbar (Wertung 0–6)	irrelevant → unverzichtbar (Wertung 0–6)	gering → hoch (Wertung 0–6)	gering → hoch (Wertung 0–6)	unvermeidbar → sehr leicht vermeidbar (Wertung 0–6)	teuer → billig (Wertung 0–6; also teuer=0!)	≥ 6 rechtl. Bewertung als Mangel naheliegend
Bewertung	0 – 6	0 – 6	0 – 6	0 – 6	0 – 6	0 – 6	0 – 36
							sicher ≥ 6 = Mangel

on der so zu allen Kriterien vergebenen »Gewichtungs-Werte« eine Summe von mindestens 6, ist dies ein Hinweis darauf, dass die mittels der Tabelle betrachtete Leckage rechtlich mit erheblicher Wahrscheinlichkeit als Mangel der Bauleistung eingestuft würde. Vor allem aber lenkt der für jedes einzelne Kriterium vergebene »Gewichtungs-Wert« das Augenmerk darauf, ob die abschließende Beurteilung der in Rede stehenden Leckagen überwiegend nach juristischen oder eher nach naturwissenschaftlichen Aspekten erfolgen wird und hinsichtlich welcher Kriterien eine tiefer gehende Sachverhaltsermittlung besonders sinnvoll wäre. Denn diese sechs Kriterien sind je für sich höchst unterschiedlicher Natur.

Gewichtung der Luftdichtheit im Vertrag und in der Leistungsbeschreibung

Dieses Kriterium fragt, ob und wie die Luftdichtheitsanforderungen im Bauvertrag konkret geregelt sind. Es ist also rein juristischer Natur. Im Streitfall wäre eine sorgfältige Vertragsauslegung notwendig. Beim »schlüsselfertigen« Erwerb vom Bau-träger oder Generalunternehmer und beim Fertighausbau werden Verträge und Leistungsverzeichnisse häufig absichtsvoll vage gehalten. Das geschuldete Bau-Soll bleibt vertraglich unklar. Die einschlägige Rechtsprechung lässt sich dadurch nicht beirren. Sie setzt bei Luftdichtheitsmängeln von Wohngebäuden sehr pragmatisch an der Erfahrungswelt der Erwerber und Nutzer an. So betonte das Oberlandesgericht Karlsruhe in seinem Urteil vom 08.05.2015 (Az. 14 U 127/13): »Der Besteller eines Fertighauses muss ohne besonderen Hinweis oder Vereinbarung nicht

davon ausgehen, dass er selbst mit Maßnahmen des Innenausbau – hier: Verfugen und Spachteln – Eigenschaften, die die Gebäudehülle haben muss, selbst maßgeblich herstellt, sondern darf davon ausgehen, dass dies Teil der vom Unternehmer geschuldeten Leistung ist.« Damit scheiterte der in jenem Prozess beklagte Fertighaushersteller mit dem Versuch, eine lediglich kaschierende Sanierung der sekundären Leckagen durchzusetzen.

Relevanz der Luftleckagen für den EnEV-Nachweis oder für Kreditbedingungen

Auch das zweite Kriterium »Relevanz der Leckage für den EnEV-Nachweis oder auch für die Einhaltung von Kreditbedingungen« ist rein juristischer Natur. In diesem Zusammenhang können Grenzwerte zur einzuhaltenden Luftwechselrate sehr bedeutsam werden. Diese Grenzwerte können vertraglich frei ausgehandelt und als verbindlich vereinbart werden. Sie können sich aber auch aus den Kreditbedingungen für finanzierte und staatlich geförderte Bau- oder Sanierungsvorhaben ergeben. Und sie können gegebenenfalls auch direkt aus der Energieeinsparverordnung resultieren: Neubauten müssen die durch die Energieeinsparverordnung vorgegebenen Grenzwerte zum maximalen Jahres-Primärenergiebedarf einhalten. Nach § 6 Abs. 1 S. 2 EnEV kann dabei die Luftdichtheit der wärmeübertragenden Gebäudehülle als rechnerischer Bonus berücksichtigt werden. Dafür ist eine exakt nach DIN EN 13829 (2000) und im Verfahren B durchgeführte Dichtheitsprüfung mit dem Ergebnis der Einhaltung der in EnEV Anlage 4 ausgewiesenen Grenzwerte der n₅₀-Luftwech-

selrate von höchstens 3,0 l/h bei Gebäuden ohne raumlufttechnische Anlagen und 1,5 l/h bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen zwingend erforderlich (vgl. zum Messverfahren Rolfmeier 2015) [18]. Wird von dieser rechnerischen Option Gebrauch gemacht, dann führt eine Überschreitung des Grenzwertes von 1,5 l/h zwingend zur Feststellung einerseits der bauordnungswidrigen Ausführung des Gebäudes und andererseits der zivilrechtlichen Fehlerhaftigkeit der erbrachten Leistung.

Luftleckagen als direkte und objektive Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit

Rein naturwissenschaftlicher Natur ist demgegenüber das dritte Kriterium: Wird nach der »direkten und objektiven Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit« gefragt, sind dafür naturwissenschaftliche Tatsachen festzustellen, deren Gewinnung und Erläuterung der Jurist nicht leisten kann. Gefragt sind vielmehr bautechnische und bauphysikalische Sachverständige und Messdienstleister. Notfalls ist die »Funktionsweise« der in Rede stehenden Luftleckage(n) naturwissenschaftlich zu ermitteln und mit den naturwissenschaftlich relevanten Gebrauchszwecken des betroffenen Gebäudes in Beziehung zu setzen. Wichtig ist dabei, dass dieses Kriterium nur die unmittelbaren Leckagebedingten Beeinträchtigungen erfassen soll.

Durch Luftleckagen bedingtes Risiko des Eintritts von Folgeschäden

Die Dauerhaftigkeit der Gebrauchstauglichkeit und das Risiko von Folgeschäden sind demgegenüber zentraler Inhalt des vierten Bewertungskriteriums im »Hohwacher Leckagepegel«. Erneut kann der Jurist diese Themen nicht selbst klären.

Die für dieses Kriterium einschlägige Rechtsprechung ist mittlerweile streng. Finden sich an Anschlüssen und Überlappungen der als Luftdichtheitsebene eingebauten Folie zahlreiche einzelne Fehlstellen, ist meist eine vollständige Neuverlegung geschuldet. Gerade wegen des hohen Risikos konvektiver Feuchteschäden muss der Besteller kein »Flickwerk« hinnehmen (OLG Karlsruhe, Urt. v. 29.11.2013, Az. 13 U 80/12; OLG Celle, Urt. v. 13.10.2004, Az. 7 U 114/02; OLG Brandenburg, Urt. v. 11.05.2005, Az. 4 U 172/04). Unerheblich ist, ob und in welchem Umfang Feuchteschäden bereits eingetreten sind. Der Bauherr muss, wenn die Werkleistung nur das Risiko eines spä-

teren Schadens in sich birgt, den Schadenseintritt nicht erst abwarten (OLG Düsseldorf, Urt. v. 14.07.1995, Az. 22 U 46/95). Für die Annahme eines Baumangels reicht es deshalb schon aus, dass eine Ungewissheit über die Risiken des Gebrauchs besteht (OLG Köln, Urt. v. 22.09.2004, Az. 11 U 93/01).

Handwerkliche Vermeidbarkeit der Luftleckagen und unterlassene Bedenkenanmeldungen

Das fünfte Kriterium, welches bezogen auf festgestellte Luftleckagen nach deren »Vermeidbarkeit und (gegebenfalls) dem Unterlassen gebotener Bedenkenanmeldung« fragt, ist gemischter Natur. Es enthält sowohl juristisch wertende Elemente (z. B.: War eine Bedenkenanmeldung von Rechts wegen geboten? Welche Sorgfalt war geschuldet?), wie auch naturwissenschaftliche Aspekte (z. B.: Ist die in Rede stehende Leckage technisch überhaupt vermeidbar gewesen?). Insoweit ist zu betonen: Das Zivilrecht kennt keine Grenzwerte, bei deren Einhaltung handwerklicher Pfusch etwa kein Mangel mehr wäre. Alle technisch vermeidbaren »Restleckagen« sind niemals hinzunehmen, sondern ausnahmslos als Fehler der Werkleistung zu behandeln.

Der Sanierungsaufwand für die Beseitigung von Luftleckagen

Das sechste Kriterium schließlich, welches nach den »Sanierungskosten einschließlich etwaiger Vor- und Nacharbeiten« fragt, hat zwar seinen Ausgangspunkt in dem rechtlichen Gesichtspunkt der möglichen Unverhältnismäßigkeit von Mängelbeseiti-

gungskosten. Gleichwohl muss es durch naturwissenschaftliche und sachverständige Tatsachenfeststellungen ausgefüllt werden. Der Werkunternehmer kann die Nachbesserung einer mangelhaften Bauleistung nach § 635 Abs. 3 BGB nur dann verweigern, wenn der Auftraggeber nur ein objektiv geringes Interesse an einer völlig mangelfreien Leistung hat und dem Auftragnehmer andererseits durch die Nachbesserung ein ganz erheblicher und deshalb unangemessener Aufwand entstehen würde (BGH, Urt. v. 24.04.1997, Az. VII ZR 110/96; OLG Köln, Urt. v. 16.09.2010, Az. 7 U 158/08; OLG Düsseldorf, Urt. v. 03.07.2012, Az.: 21 U 150/09). Die Bemessung des objektiven Interesses des Auftraggebers kann der Jurist ohne bausachverständige Beratung nur in seltenen Ausnahmefällen allein beantworten.

Anwendungsbeispiele für den »Hohwacher Leckagepegel«

Die Verwendbarkeit und Funktion des »Hohwacher Leckagepegels« für konkrete Einzelfälle soll an zwei Beispielen, die hier als Fallbeispiel 1: »EnEV-Grenzwert« und Fallbeispiel 2: »schlechte Ausführung« wiedergegeben sind, erläutert werden:

Für die Verwendung der Tabelle ist es zunächst wichtig, ausschließlich jene Informationen zum Objekt und zu den Symptomen zu beachten, die im jeweiligen Schaubild überhaupt mitgeteilt sind. In der Baupraxis verfügen die Beteiligten in jenen Situationen, in denen plötzlich erheblicher Streit entsteht, auch nicht über mehr Informationen, als in diesen Beispielfällen in den jeweiligen Tabellen dargestellt.

Tabelle 2: »Hohwacher Leckagepegel« Fallbeispiel 1: »EnEV-Grenzwert«

Objektdaten: Mehrfamilienhaus, Wohnungseigentumsanlage, vier Vollgeschosse, 12 Einheiten mit Lüftungsanlage

Symptom: Normmessung nach DIN EN 13829 bei Abnahme Gemeinschaftseigentum ergibt Luftwechselrate n_{50} von 1,7 l/h – aber Luftdichtheitsbonus für EnEV-Nachweis eingeplant und für die Einhaltung der EnEV-Grenzwerte notwendig

	rein juristisch		naturwissenschaftlich		gemischt	naturwiss.	
	Gewicht in Vertrag und Leistungsbeschreibung	Relevanz für EnEV-Nachweis, Finanzierung usw.	Direkte obj. Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit	Risiko des Eintritts von Folgeschäden	Vermeidbarkeit (einschl. Bedenkenanmeldung)	Sanierungskosten (einschl. Vor- und Nacharbeit)	»Summe« bzw. Tendenz
	irrelevant → unverzichtbar (Wertung 0–6)	irrelevant → unverzichtbar (Wertung 0–6)	gering → hoch (Wertung 0–6)	gering → hoch (Wertung 0–6)	unvermeidbar → sehr leicht vermeidbar (Wertung 0–6)	teuer → billig (Wertung 0–6; also teuer=0!)	≥ 6 rechtl. Bewertung als Mangel naheliegend
Bewertung	0 – 6	6	0	0 – 4	4	1	11 – 21
							sicher ≥ 6 = Mangel

Tabelle 3: »Hohwacher Leckagepegel« Fallbeispiel 2: »schlechte Ausführung«

Objektdaten: Einfamilien-Fertighaus Holztafelbauweise, EG+DG+Dachspitz, ohne Lüftungsanlage schlichte Ausstattung, Luftwechselrate n_{50} von 1,9 1/h; Malerarbeiten innen einschließlich Spachteln und Verfugen des Gipskartons als Eigenleistung vereinbart

Symptom: Starker Lufteintritt bei Unterdruck an diversen Fugen, Bauteilöffnung offenbart vollständig fehlende oder schadhafte Anschlüsse der PE-Folie an Kehlbalkenlage

	rein juristisch		naturwissenschaftlich		gemischt	naturwiss.	
	Gewicht in Vertrag und Leistungsbeschreibung	Relevanz für EnEV-Nachweis, Finanzierung usw.	Direkte obj. Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit	Risiko des Eintritts von Folgeschäden	Vermeidbarkeit (einschl. Bedenkenanmeldung)	Sanierungskosten (einschl. Vor- und Nacharbeit)	»Summe« bzw. Tendenz
	irrelevant → unverzichtbar (Wertung 0–6)	irrelevant → unverzichtbar (Wertung 0–6)	gering → hoch (Wertung 0–6)	gering → hoch (Wertung 0–6)	unvermeidbar → sehr leicht vermeidbar (Wertung 0–6)	teuer → billig (Wertung 0–6; also teuer=0!!)	≥ 6 rechtl. Bewertung als Mangel naheliegend
Bewertung	6	0 – 6	3	4	6	3	16 – 22
							sicher ≥ 6 = Mangel

Im Fallbeispiel 1 (»EnEV-Grenzwert«) hat der Tabellenverwender noch keinerlei Kenntnisse darüber, ob im Bauvertrag und in der Leistungsbeschreibung irgendwelche spezifischen Anforderungen zur Luftdichtheit enthalten sind. Deshalb wird hier kein absoluter Beurteilungswert in die zweite Tabellenzeile eingetragen, sondern mit dem Eintrag »0 – 6« sozusagen optional alles Denkbare auch für möglich gehalten. Anderes gilt für die Spalte 3. Hier muss wegen der eindeutigen Verfehlung des durch die Energieeinsparverordnung zwingend vorgeschriebenen Grenzwertes die Bedeutung dieses Kriteriums mit dem maximalen Wert von 6 erfasst werden. In der vierten Spalte erfolgt die Beurteilung mit dem absoluten Wert von 0, weil diesbezüglich keinerlei Informationen vorliegen und auch realistisch keine Befürchtungen im Hinblick auf aktuelle und konkrete Beeinträchtigungen der Gebrauchstauglichkeit anzunehmen sind. In der fünften Spalte muss das Risiko von Folgeschäden mangels detaillierter Informationen ebenfalls offen gehalten werden, allerdings erscheint es gerechtfertigt, besonders hohe Risikoeinschätzungen (die mit den Werten 5 oder 6 anzusetzen gewesen wären) als höchst unwahrscheinlich außer Acht zu lassen. In der sechsten Spalte ist es sicherlich (mindestens) gerechtfertigt, den Grad der Vermeidbarkeit im Rahmen handwerklicher Ausführung mit dem Wert von 4 anzusetzen, weil bessere Luftwechselraten als im vorliegenden Fall ermittelt, heutzutage bei ordentlicher Bauausführung unproblematisch erreicht werden können. In der siebten Spalte schließlich ist hinsichtlich der zu erwartenden Sanierungskosten der Wert

von 1 gerechtfertigt, weil in Anbetracht der in der Tabelle mitgeteilten Objektdaten und unter Berücksichtigung der vollständigen Fertigstellung des Gebäudes (Normmessung nach DIN EN 13829 ist bereits erfolgt) die offensichtlich erforderliche Nachbesserung der Luftdichtheitsebene zur Beseitigung der primären Luftleckagen zweifelsfrei mit hohen Kosten verbunden sein wird. In der Addition der so ermittelten konkreten und/oder potenziellen Bewertungskriterien im System des »Hohwacher Leckagepegels« ist damit schon nach den wenigen in der Tabelle selbst mitgeteilten Ausgangsdaten mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Annahme gerechtfertigt, dass im juristischen Streitfall die Qualität der in diesem konkreten Beispielfall erbrachten Bauleistung



Abb. 7: Referenzfall – lokal begrenzte Zersetzung der Holzschalung und zum Teil der Sparren

»Luftdichtheit der wärmeübertragenden Gebäudehülle« zivilrechtlich als mangelhaft beurteilt werden würde.

Im Fallbeispiel 2 (»schlechte Ausführung«) finden die vorstehend noch einmal detailliert erläuterten Kriterien entsprechende Anwendung. Es handelt sich in diesem Fallbeispiel um eine konkrete Anwendung der Tabelle auf jenen vom Oberlandesgericht Karlsruhe entschiedenen Fall (Urteil vom 08.05.2015, Az. 14 U 127/13), auf den bereits vorstehend in den textlichen Erläuterungen zum Kriterium der »Gewichtung der Luftdichtheit im Vertrag und in der Leistungsbeschreibung« Bezug genommen worden ist.

Juristische Schlussfolgerungen

Die juristische Bewertung von Luftleckagen ist nur eine von vielen Fragestellungen innerhalb unserer Thematik. Sie unterscheidet sich von den anderen gängigen Fragestellungen vor allem dadurch, dass sie die Problematik nicht naturwissenschaftlich, sondern geisteswissenschaftlich betrachtet. Wird eine juristische Bewertung von Luftleckagen benötigt, gibt nur der juristische Kontext die Bewertungskriterien, also den Beurteilungsmaßstab vor. Bevor allerdings der juristische Beurteilungsmaßstab zur Anwendung gebracht werden kann, bedarf es immer einer möglichst zuverlässigen Sachverhaltsfeststellung. Bei der Feststellung der für die Beurteilung von Luftleckagen relevanten Anknüpfungstatsachen sind die Juristen zwingend auf die Zuarbeit von Sachverständigen, Ingenieuren, Messdienstleistern und Naturwissenschaftlern angewiesen.

Die nachfolgenden Erläuterungen zur rein naturwissenschaftlich und mathematisch begründeten numerischen Simulation als Werkzeug für die bautechnische und bauphysikalische Bewertung von Luftleckagen machen das eindrucksvoll deutlich. Die Zusammenarbeit beider Professionen fällt immer umso qualifizierter aus, je stärker sich die beteiligten Disziplinen während der Zusammenarbeit auf ihre jeweiligen Aufgaben und Kompetenzbereiche besinnen und beschränken.

Werkzeug numerische Simulation

Bei der technisch-physikalischen Bewertung von Leckagen wird der Frage nachgegangen, ob eine Leckage zu einem feuchtebedingten Bauschaden führen kann. Die vereinbarte Leistung im juristischen Sinne ist hierbei hintergründig. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde das Werkzeug der numerischen Simulation zur Leckagebewertung entwickelt und anhand eines Referenzfalles verifiziert.

Referenzfall

Im Forschungsprojekt wurde eine bundesweite Umfrage unter Sachverständigen und Messdienstleistern durchgeführt. Der hierfür von der Forschergruppe entwickelte Fragebogen enthielt auch eine Abfrage, ob konkrete Objekte benannt und hierfür Pläne, Skizzen, Fotos zur Verfügung ständen und ob diese Objekte besichtigt werden könnten. Aus den häufig mit Schäden an Dächern benannten Objekten konnte ein Fall während des Rückbaus untersucht und gut dokumentiert werden. Bei diesem Referenzfall handelt es sich um eine Dachgeschosswohnung in einem Mehrfamilienhaus in Ziegelbauweise aus dem Jahr 2006. Erste Hinweise auf Schäden traten ca. drei bis vier Jahre nach der Errichtung auf. Zum Zeitpunkt des Rückbaus im Jahr 2015 lag eine lokal begrenzte Zersetzung der Holzschalung und zum Teil auch der Sparren vor (Abb. 7). Als Schadensursache konnten Luftleckagen ausgemacht werden.

Leckagesituation im Referenzfall

Eine Grobskizze der Dachgeschosswohnung ist in Abb. 8 dargestellt. Der Installationsschacht zwischen Bad und Küche ist laut Bauunternehmer zu den unteren Geschossen luftdicht abgeschlossen und mündet im Dach an die Luftdichtheitsebene (in diesem Fall die Dampfbremse). In Abb. 9 ist die aufgenommene Leckagesituation schematisch aufgezeigt. Deutlich erkennbar ist, dass die Anzahl primärer und sekundärer Leckagen mit den in Abb. 10 gezeigten Schädigungen der Sparren korreliert. Daher wurde das Dach in drei Bereiche unterteilt:

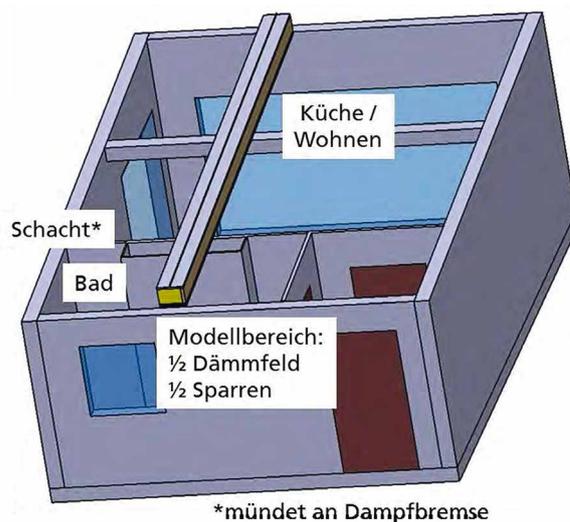
- intakter Bereich: grün
- beginnende Schädigung der Sparren: gelb
- fortgeschrittene Schädigung der Sparren und der Holzschalung: rot

Die Größe bzw. Art der Primär- und Sekundärleckagen wurde abgeschätzt und ist in Tab. 4 zusammenfassend dargestellt.

Dachaufbau des Referenzfalles

Der Dachaufbau besteht aus folgenden Materialschichten (von außen nach innen):

- Aluminium-Doppelstehfalzdeckung,
- diffusionsoffene Vordeckung, überlappend, nicht verklebt,
- Holzschalung (2,4 cm),
- Sparren mit Mineralwolle als Zwischensparrendämmung (22 cm),
- feuchteadaptive Dampfbremse (Luftdichtheitsebene),



*mündet an Dampfbremse

Abb. 8: Skizze der Dachgeschosswohnung mit modelliertem Dämm- und Sparrenbereich

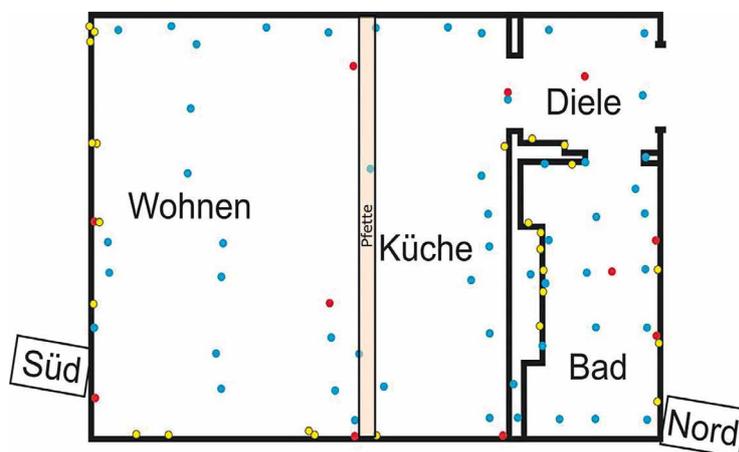


Abb. 9: Leckageverteilung: blau: primär, in der Luftdichtheitsebene, rot: sekundär, in der Gipskartondecke, gelb: sekundär, unterhalb Gipskartondecke (z. B. Durchführungen in Installationsschacht) und Leckagen an Fensterschließfugen

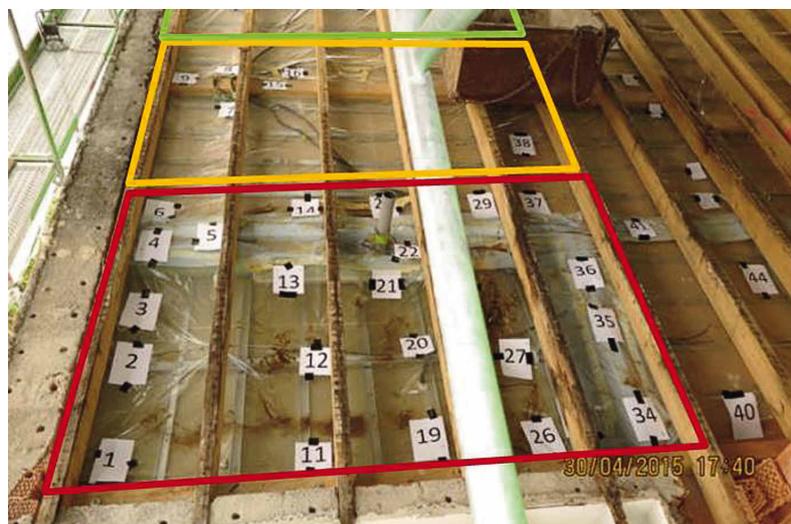


Abb. 10: Einteilung des Daches in drei Bereiche entsprechend der Schädigung. Nummerierte Zettel markieren gefundene Primärleckagen

Tabelle 4: Aufgenommene Leckagesituation im Referenzobjekt

Zuordnung	Beschreibung	Einheit	rot	gelb	grün
primär	anteilige Leckagefläche in Dampfbremse	%	0,28	0,17	0,08
sekundär	Anzahl Deckendurchführungen für Lichter in Gipskartonbekleidung	–	5	2	0
sekundär	Länge Fugenrisse Decke	m	11	10	2
sekundär	Anzahl Steckdosen, Schalter, Spülkästen, etc. mit Luftverbund zu Dach (Schacht), Höhe 0,9 m	–	6	0	0
extern (exkl. Dach)	Bauteilanschlussfuge Boden	m	21		
extern (exkl. Dach)	Fenster- und Türfugen	m	30		

- Unterkonstruktion mit Luftspalt,
- Gipskartonbekleidung (verwendet für die Gipskartonplatte in der Decke bzw. Dachschräge).

Weitere Informationen zum Referenzfall

Ein Blower-Door-Test ergab einen n_{50} -Wert von 4,0 1/h bzw. q_{50} von 2,8 m³/hm². Auffällig war, dass die Dampfbremse sich hierbei nur im gelben und roten Bereich merkbar ausbeulte. Im grünen Bereich schien sie während des Blower-Door-Tests jedoch nicht beansprucht zu werden. Dies zeigt, dass die Gipskartonbekleidung im grünen Bereich faktisch die Funktion der luftdichten Ebene übernommen hat, wenngleich sie planerisch nicht dafür vorgesehen war. Das Innenvolumen der Wohnung beträgt 97 m³ und die Hüllfläche 139 m². Die Raumhöhe fällt von 2,97 auf 2,46 m ab.

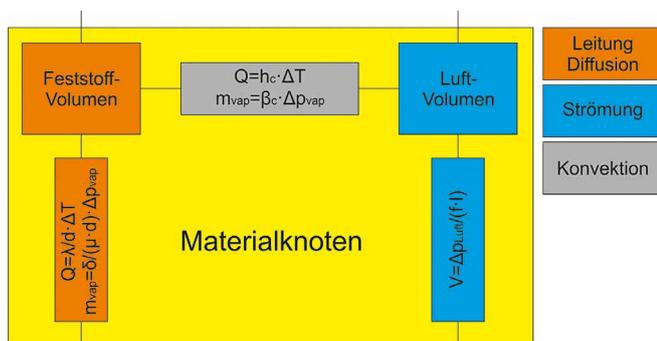


Abb. 11: Schematische Darstellung der Implementierung eines hygrothermischen Materialknotens mit Durchströmung. Widerstände in den anderen beiden kartesischen Richtungen sind analog zu den dargestellten Widerständen implementiert.

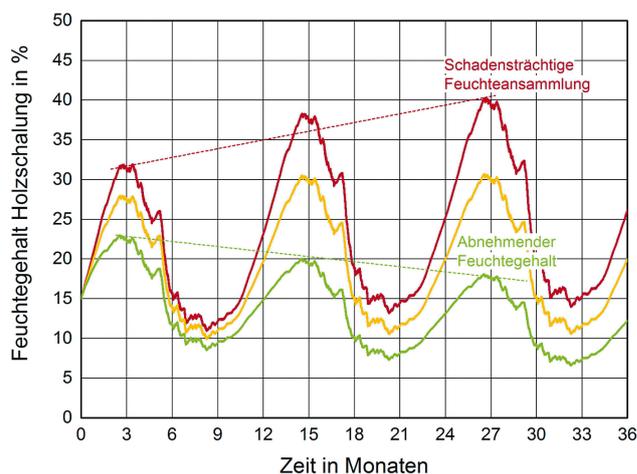


Abb. 12: Simulation des Feuchteverlaufs in der Holzschalung

Werkzeugentwicklung

Zur technischen Bewertung von Leckagen wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein Simulationsmodell entwickelt. Hierzu wird die hygrothermische Modelica-Bibliothek von Nouidui (2008) [13] in diesem Projekt entsprechend Abb. 11 erweitert. Zum einen wird ein dreidimensionales hygrothermisches Materialmodell implementiert, bei dem Wärme- und Feuchteleitung in den zwei parallelen und in der senkrechten Richtung zum Bauteil auftreten. Zum anderen wird das Bauteilmodell mit einem dreidimensionalen Luftknotenmodell erweitert. Somit steht jedem Materialknoten auch ein entsprechender Luftknoten gegenüber. Die einzelnen Luftknoten sind über Strömungswiderstände miteinander verbunden. Ein Konvektionsmodell berechnet den Wärme- und Feuchtestrom zwischen dem Material und dem entsprechenden Luftvolumen. Tritt eine Luftleckage im Zusammenhang mit einem Überdruck auf, so wird aus dem Raum warm-feuchte Luft in das Luftknotenmodell gedrückt. Somit entsteht ein zusätzlicher Feuchte- und Wärmeeintrag in die Konstruktion.

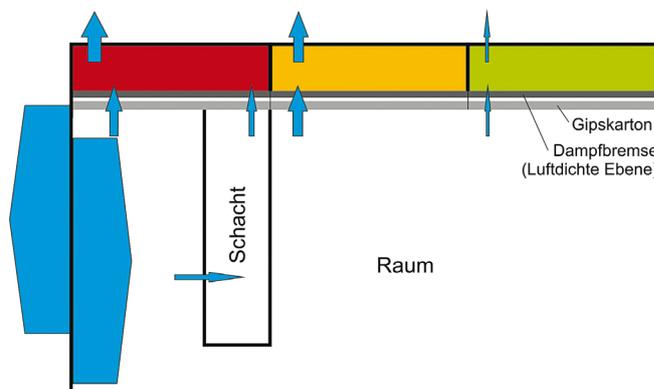


Abb. 13: Proportionale Darstellung der Luftvolumenströme durch Leckagen bei thermischem Antrieb und einer Lufttemperaturdifferenz von 20 K zwischen innen und außen

Um die Luftströmungen durch Leckagen simulieren zu können, wurden basierend auf einer Literaturrecherche Leckagemodelle für Bauteilanschlussfugen [14], Einbauelemente wie Lichtschalter, Steckdosen, etc. [15], Fenster- und Türen entsprechend ihrer Klasse [16] sowie ein stoffliches Leckagemodell von Mineralwolle [17] implementiert. Jede Leckage wird im Modell mit ihrer Höhenlage parametrisiert, um die thermisch angetriebene Durchströmung abzubilden. Die Leckagen sind an ein Raummodell gekoppelt, in dem ein- und abfließende Luftmengen bilanziert werden.

Verifikation anhand des Referenzobjekts

Mit dem Simulationsmodell wurde der Verlauf der Feuchteakkumulation in der Holzschalung über drei Jahre simuliert (Abb. 12). Das Modell zeigt, dass unter Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Leckagesituation im roten Bereich, ein Aufschwingen des Feuchtegehaltes auf schadensträchtige Gehalte eintritt. Die Holzschalung im grünen Bereich trocknet hingegen infolge geringerer Leckagen über die Jahre sogar noch aus. Somit ist das Modell in seiner Vorhersage kohärent zum beobachteten Schadensbild.

Um die Intensität der Leckagen vergleichend darzustellen, wurde die Simulation für eine Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft von 20 K durchgeführt. In Abb. 13 sind die Luftvolumenströme mit Pfeilen entsprechend ihrer Richtung und proportional zur Intensität dargestellt. Die meiste Luft fließt durch Fenster-/Tür- und Bauteilanschlussfugen in den Raum hinein bzw. auch wieder hinaus. Nur ein geringer Teil der Luft gelangt tatsächlich in den Dachaufbau. Zudem ist deutlich, dass im roten Bereich der Schacht und die Gipskartonbekleidung zwei parallele Luftpfade vom Raum hin zur luftdichten Ebene bilden. Diese zwei Volumenströme addieren sich zur Durchströmungsmenge im Dach.

Um einen Blower-Door-Test simulativ nachzustellen, wird auf das Raummodell, mit dem die Leckagen verbunden sind, ein Überdruck von 50 Pa aufgebracht. Ziel ist, die Druckdifferenz an den jeweiligen Strömungswiderständen zum Dach darzustellen. Abb. 14 zeigt, dass die Hauptdruckdifferenz im roten und gelben Bereich von der Folie abgefangen wird. Im grünen Bereich liegt die Hauptdruckdifferenz an der Gipskartonbekleidung an, diese ist also faktisch die luftdichte Ebene. Im roten Bereich sind die Druckabfälle an der Gipskartonbekleidung und am Schacht untergeordnet, ein hoher Strömungswiderstand liegt an diesen

Elementen also nicht vor. Die sich ergebenden lokalen q_{50} -Werte sind in Tab. 5 dargestellt.

Tabelle 5: Aus Simulation ermittelte q_{50} -Werte

Bereich	rot	gelb	grün
q_{50} (in m^3/m^2h)	3,4	1,4	0,15

Maßnahmenableitung mittels Simulation

Durch Variantenstudien können verschiedene Maßnahmen in das Simulationsmodell implementiert und ihre Auswirkungen vorhergesagt werden. Die vollständige Variantenstudie findet sich im Forschungsbericht [6].

Als vielversprechende Maßnahmen zur Vermeidung feuchtebedingter Bauschäden zeigen sich in der Simulation folgende Möglichkeiten:

- Verbesserung der Luftdichtheit der Dampfbremse,
- Gleichzeitige Abdichtung der Gipskartonbekleidung und des Schachtes.

Eine Verbesserung, jedoch weiterhin mit grenzwertiger Feuchteansammlung wird mit folgenden Maßnahmen erzielt:

- Verbesserung der Luftdichtheit der gesamten Dampfbremse auf das Niveau des grünen Bereichs (0,08 % Leckagefläche),
- Hinterlüftung des Dachaufbaus.

Keine Verbesserung bringen folgende Maßnahmen:

- Nur eine Abdichtung der Gipskartonbekleidung bzw. des Schachtes,
- Veränderung externer Leckagen durch dichtere Anschlussfugen und dichtere Fenster/Türen.

Die Simulation zeigt die Notwendigkeit, die Luftdichtheit insgesamt wiederherzustellen. Ob dies an der vorgesehenen luftdichten Ebene durch Vermeidung von Primärleckagen oder durch das sorgsame Abdichten aller Sekundärleckagen erfolgt, ist hierbei aus technischer Sicht nebensächlich. Bei letzterer Lösung sollte besonders auf parallele Strömungspfade, wie beispielsweise die Gipskartonbekleidung, der Schacht oder Leerrohre achtgegeben werden, da Sekundärleckagen hier nur einen geringen Strömungswiderstand aufweisen und somit nur eine ganzheitlich überarbeitete Luftdichtheit einen positiven Effekt erzielt.

Die Simulation zeigt, dass der grüne Bereich vor allem durch die Luftdichtheit der Gipskartondecke profitiert. Diese kompensiert Primärleckagen in der Dampfbremse. Ohne diese zweite luftdichte Schicht wäre die Holzfeuchte nur knapp unterhalb von 20 M-% in weniger als drei Monaten gewesen. Eine Hinterlüftung ist im Sinne der Fehleranfälligkeit zu bevorzugen, allerdings ist bei dieser gegebenen Leckagesituation auch diese Maßnahme alleine nicht ausreichend.

Das Abdichten externer Leckagen wie Fugen und Anschlüsse zeigt sich als wenig zielführend im Sinne des Feuchteschutzes. Um den feuchtetechnisch relevanten Luftstrom in das Dach merklich zu reduzieren, müssten die externen Leckagen um Größenordnungen verbessert werden (vgl. Pfeildicken in Abb. 13).

Es zeigt sich, dass der Mehrwert der Simulation bei der Leckagebewertung vor allem in einer relativ schnell umzusetzenden Variantenbildung liegt. Somit kann die Lernkurve für das spezifische Problem beschleunigt und die Informationsgrundlage erweitert werden. Dies erlaubt die Ableitung eines Maßnahmenpakets, mit dem eine bessere, weniger risikobehaftete Lösung umgesetzt werden kann.

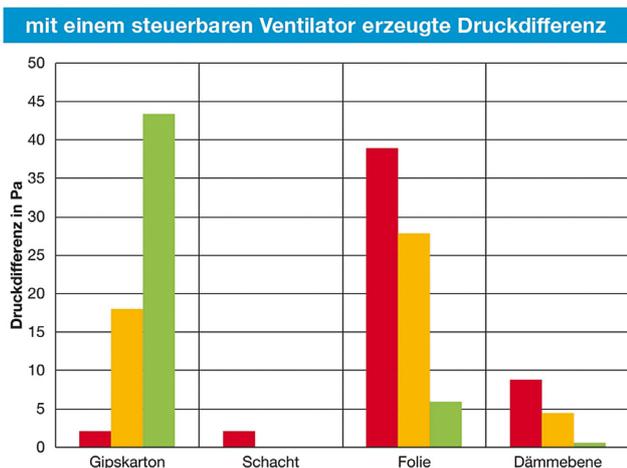


Abb. 14: Simulationsergebnis: Druckdifferenz an Schichten bei einem Blower-Door-Test

Literatur

- [1] Vogel, K., Köpcke, U. (2015): Luftdichtheit – Luftdurchlässigkeit – Ein Rundumschlag. Der Bausachverständige 11, Heft 6, 22-27.
- [2] Oswald, R., Zöller, M., Spilker, R., Sous, S. (2014): Zuverlässigkeit von Holzdachkonstruktionen ohne Unterlüftung der Abdichtungs- oder Decklage. Bauforschung für die Praxis, Band 115, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [3] Geißler, A., Hauser, G. (2002): Abschätzung des Risikopotenzials infolge konvektiven Feuchtetransports. Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben 12764, Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik.
- [4] Borsch-Laaks, R. (2006): Risiko Dampfkongression. Wann gibt es wirklich Schäden? Holzbau – die neue quadrige, Heft 3, 17-22.
- [5] Schmidt, J. (2014): Konvektiver Feuchtetransport durch Leckagen in Holzleichtbaukonstruktionen mit permeablen Dämmstoffen. Dissertation TU Kaiserslautern. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern.
- [6] Vogel, K., Sous, S., Zöller, M., Grün, G., Norrefeldt, V. (2017): Bewertung von Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen – Handlungsempfehlung für Baupraktiker. Abschlussbericht einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderte Forschungsarbeit. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [7] Otto, F., Ringeler, M. (2004): Funktionsschichten und Anschlüsse für den Holzhausbau. holzbau handbuch, Reihe 1, Teil 1, Folge 8. Holzabzatzfonds Bonn und DGfH Innovations- und Service GmbH München (Hrsg.).
- [8] DIN EN 13829 (2001): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden. Differenzdruckverfahren (ISO 9972: 1996, modifiziert), Deutsche Fassung EN 13829: 2000. Berlin: Beuth.
- [9] DIN EN ISO 9972 (2015): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972: 2015), Deutsche Fassung EN ISO 9972: 2015. Berlin: Beuth.
- [10] DIN 68800-2 (2012): Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Berlin: Beuth.
- [11] Energieeinsparverordnung (2013): Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. In: Bundesgesetzblatt Teil I, 2013 Nr. 67.
- [12] DIN 4108-7 (2011): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele. Berlin: Beuth.
- [13] Nouidui, T. (2008): Entwicklung einer objektorientierten Modellbibliothek zur Ermittlung und Optimierung des hygrothermischen und hygienischen Komforts in Räumen. Dissertation an der Universität Stuttgart.
- [14] DIN 4108-2 (2013): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Februar 2013. Berlin: Beuth.
- [15] Wolf, D., Tyler, F. (2013): Characterization of Air Leakage in Residential Structures - Part 1: Joint Leakage. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference – Proceedings of ASHRAE, Clearwater, FL, 1.-5. Dezember 2013.
- [16] DIN EN 12207 (2000): Fenster und Türen. Luftdurchlässigkeit. Klassifizierung. Deutsche Fassung EN 12207:1999. Berlin: Beuth.
- [17] Ursa (2015): Dämmen und Wohlfühlen. Produktbroschüre der Firma URSA Deutschland GmbH, Stand 01.2015, Leipzig.
- [18] Rolfsmeier, Stefanie (2015): Messpraxis. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.); Gebäude-Luftdichtheit (Band 2); 1. Auflage, Berlin 2015; S. 45 – 53.

HINWEIS

Der Forschungsbericht zu diesem Thema kann auf www.baufachinformation.de bezogen werden, Download kostenlos!

Bewertung von Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen – Handlungsempfehlung für Baupraktiker

Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3012

Klaus Vogel, Silke Sous, Matthias Zöller, Gunnar Grün, Victor Norrefeldt, Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. -FLiB-, Berlin, Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik gGmbH -AIBau-, Fraunhofer-Institut für Bauphysik -IBP-, Holzkirchen 2017, 156 S., zahlr. Abb. u. Tab., kartoniert, Fraunhofer IRB Verlag, Best.-Nr. F 3012 (Kopie des Manuskripts) 42,- Euro ISBN 978-3-8167-9917-7

www.baufachinformation.de/literatur/17029008942

Die Autoren

Dr. Klaus Vogel

Von der Industrie und Handelskammer für München und Oberbayern öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger u. a. für Luftdichtheit von Gebäuden; Projektleiter und Projektbearbeiter des Forschungsprojektes »Bewertung von Luft-Leckagen« im Auftrag des Fachverbandes Luftdichtheit im Bauwesen e. V., Berlin

Sachverständigenbüro und Büro für Mediation Dr. Klaus Vogel
Sankt-Georg-Str. 9, 86926 Pflaumdorf
Tel. 08193/9057-78
idt-vogel@t-online.de



Dr.-Ing. Victor Norrefeldt

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen/Valley mit dem Tätigkeitsschwerpunkt der zonalen Simulation von Luftströmungen und der modellbasierten Co-Validierung von Testaufbauten; Projektbearbeiter in o. g. Forschungsprojekt mit dem Themenschwerpunkt simulative Bewertung von Leckagen

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley
Tel. 08024/643-273
Victor.norrefeldt@ibp.fraunhofer.de



Rechtsanwalt Ulf Köpcke

Selbständiger Rechtsanwalt in Freiburg im Breisgau mit den Tätigkeitsschwerpunkten privates Baurecht und Strafrecht; Mitglied in der das Forschungsprojekt begleitenden Arbeitsgruppe und Autor des Kapitels Luft-Leckagen und deren Beurteilung aus juristischer Sicht

Anwaltskanzlei Am Augustinerplatz
Gerberau 11, 79098 Freiburg im Breisgau
Tel. 0761/20751-0
koepcke.u@t-online.de

