

Klaus Vogel, Silke Sous, Matthias Zöller,
Gunnar Grün, Victor Norrefeldt

Bewertung von Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen – Handlungsempfehlung für Baupraktiker

F 3012

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-8167-9917-7

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des
Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert



■ **Bewertung von
Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen
– Handlungsempfehlung für Baupraktiker**

Forschungsthema:

Bewertung von Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen – Handlungsempfehlung für Baupraktiker

Kurztitel: Bewertung von Luft-Leckagen

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der
Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes
für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-14.20;
Bewilligungszeitraum: 20.10.2014 bis 20.10.2016)

Die Verantwortung für den Inhalt der jeweiligen
Berichtsteile liegt bei den AutorInnen.

Antragsteller und Zuwendungsempfänger

Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V.
Kekuléstraße 2-4
12489 Berlin
Tel.: +49 30 6392 53 94
Fax: +49 30 6392 53 96
E-Mail: info@flib.de
Internet: www.flib.de

Durchführende Institutionen

Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V.
Kekuléstraße 2-4, 12489 Berlin
(FLiB e. V.)
in Kooperation mit
Aachener Institut für Bauschadensforschung
und angewandte Bauphysik gGmbH
Theresienstraße 19, 52072 Aachen
(AIBAU gGmbH)
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley
(Fraunhofer IBP)

Projektleitung

FLiB e. V. / Klaus Vogel

Institutionen / BearbeiterInnen

AIBAU gGmbH / Silke Sous, Matthias Zöller
FLiB e. V. / Klaus Vogel
Fraunhofer IBP / Gunnar Grün, Victor Norrefeldt

Fachliche Betreuung BBSR

Steffen Kisseler, Bonn

Mit externen Fachbeiträgen von

Andrea Burdack-Freitag, Holzkirchen/Valley
Ulf Köpcke, Freiburg
Josef Schmid † und Michael Stiller, Rosenheim
Jochen Zehfuß und Jan Lyzwa, Braunschweig
Joachim Zeller, Biberach
Martin Zerwas et al., Koblenz

Fremdmittel

Das Forschungsprojekt wurde finanziell
unterstützt von
Moll bauökologische Produkte GmbH, Schwetzingen
BlowerDoor GmbH, Springe
ISOCELL GmbH, A-Neumarkt am Wallersee

Satz und Layout

Gerd Kleinert, Kassel

***„Bei gleicher Umgebung lebt doch jeder in
einer anderen Welt“***

Arthur Schopenhauer, 1788 -1860

	<i>Seite</i>
VORBEMERKUNG	7
ZUSAMMENFASSUNG	9
1 EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES	11
1.1 Fehlstellen in raumbegrenzenden Flächen: zeitlos und interdisziplinär	11
1.2 Fehlstellen in raumbegrenzenden Flächen: von Druckdifferenzen beeinflusst	12
1.3 Fehlstellen in raumbegrenzenden Flächen: Wie dicht ist luftdicht?	12
1.4 Fehlstellen in raumbegrenzenden Flächen: Arten und Verteilung	13
1.5 Fehlstellen in raumbegrenzenden Flächen: lokalisier- und visualisierbar	15
1.6 Fehlstellen in raumbegrenzenden Flächen: vermeidbar und reduzierbar	16
1.7 Fehlstellen in raumbegrenzenden Flächen: Bewertungsprobleme	18
1.7.1 Bewertungsprobleme im Rahmen der Messpraxis	18
1.7.2 Bewertungsprobleme im Rahmen feuchtebedingter Bauschäden	21
1.8 Zielsetzung des Forschungsprojektes	21
1.9 Literaturverzeichnis	22
2 LECKAGESYSTEMATIK	25
2.1 Definitionen	25
2.2 Parameter der Leckagebewertung	25
2.3 Literaturverzeichnis	27
3 UMFRAGE UNTER SACHVERSTÄNDIGEN UND MESSDIENSTLEISTERN	29
3.1 Methodisches Vorgehen	29
3.2 Umfrageergebnisse	29
3.2.1 Tätigkeitsfelder und Tätigkeitsdauer der Umfrageteilnehmer	29
3.2.2 Objektanzahl pro Umfrageteilnehmer und Objektalter	29
3.2.3 Erfahrungen mit Schadens- und Nichtschadensfällen	30
3.3 Zusammenfassung	35
3.4 Danksagung	36
3.5 Literaturverzeichnis	36
4 OBJEKTDOKUMENTATION DER PRAXISFÄLLE	37
5 SIMULATIVE BEWERTUNG VON LECKAGEN	83
5.1 Methodisches Vorgehen	83
5.2 Grundlagen	83
5.2.1 Hygrothermische Grundlagen	83
5.2.2 Thermisch induzierte Druckdifferenz	83
5.2.3 Strömungsrechnung	83
5.2.4 Simulationswerkzeuge	84
5.3 Implementierung der HygZO Modellbibliothek	86
5.3.1 Erweiterung des Materialmodells	86
5.3.2 Implementierung des Leckagemodells	86
5.3.3 Implementierung des thermischen Strömungsantriebes	86
5.3.4 Verifikation des implementierten Codes	86
5.4 Referenz-Untersuchungsfall	89
5.4.1 Dokumentation des Referenzfalles	89
5.4.2 Kategorisierung des Referenzdaches	90
5.4.3 Aufnahme der Leckagen	90
5.5 Bewertung der Feuchterelevanz von Leckagen	91
5.5.1 Referenzfall	92
5.5.2 Variantenbildung Luftdichtheit	93

5.5.3	Variantenbildung Dachaufbau	98
5.6	Energetische und Komfortbewertung des Daches	102
5.6.1	Modellaufbau	102
5.6.2	Simulationsergebnisse	102
5.7	Zusammenfassung und Ausblick	102
5.8	Literaturverzeichnis	104
6	LECKAGEBEWERTUNG UNTER DEM GESICHTSPUNKT LÜFTUNG	105
	<i>Joachim Zeller</i>	
6.1	Luftdichtheit und Lüftung	105
6.2	Freie Lüftung	106
6.3	Zu-Abluft-Anlagen	106
6.4	Abluftanlagen	107
6.5	Zuluftanlagen	108
6.6	Leckagebewertung - Zusammenfassung	108
6.7	Auswahl von Lüftungssystemen in Abhängigkeit von der Luftdichtheit	109
6.8	Literaturverzeichnis	109
7	BEWERTUNG VON LECKAGEN UNTER DEM ASPEKT DES EINTRAGS VON GERÜCHEN	111
	<i>Andrea Burdack-Freitag</i>	
7.1	Einleitung	111
7.2	Phänomen Geruch	112
7.2.1	Physiologie	112
7.2.2	Emotionale Faktoren	112
7.2.3	Sensitivität und Selektivität	112
7.2.4	Intensität	112
7.2.5	Adaption	112
7.3	Charakterisierung eines Geruchs	112
7.4	Vorgehensweise bei der Geruchsbegehung	113
7.4.1	Begehungskonzept	113
7.4.2	Probenahme-Planung und Laboranalytik	115
7.4.3	Vor-Ort-Begehung	115
7.4.4	Bewertung	116
7.5	Empfehlungen für weitere Maßnahmen	118
7.6	Zusammenfassung und Fazit für die Baupraxis	118
7.7	Literaturverzeichnis	119
8	LECKAGEBEWERTUNG BEI FENSTERN UND AUSSENTÜREN	121
	<i>Josef Schmid † und Michael Stiller</i>	
8.1	Ebenenmodell	121
8.1.1	Trennung zwischen Raum- und Außenklima (Ebene 1)	121
8.1.2	Funktionsbereich (z. B. Wärmeschutz – Ebene 2)	122
8.1.3	Wetterschutz (Ebene 3)	122
8.2	Fugendurchlässigkeit und Leckagen in den Dichtebenen	122
8.3	Überprüfung der Dichtheit	123
8.4	Bewertung der Luft-Leckagen	123
8.5	Zusammenfassung	124
8.6	Literaturverzeichnis	124
9	BEWERTUNG VON LUFT-LECKAGEN IM HINBLICK AUF DEN BRANDSCHUTZ	127
	<i>Jochen Zehfuß und Jan Lyzwa</i>	
9.1	Einleitung	127
9.2	Gefahren des Brandrauchs	127
9.3	Abschlüsse	128
9.3.1	Feuerschutzabschlüsse und Brandschutztüren	128
9.3.2	Rauchschutztüren	128
9.3.3	Brand- und Rauchschutzklappen	129

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

9.3.4	Rauchschutzvorhänge	129
9.4	Sicherheitstreppenräume	129
9.4.1	Allgemeines	129
9.4.2	Differenzdrucksysteme	130
9.5	Fazit	130
9.6	Literaturverzeichnis	130
10	BEWERTUNG VON LUFT-LECKAGEN IM HINBLICK AUF DEN SCHALLSCHUTZ	131
	<i>Martin Zerwas, Stefan Mock, Dirk Lahr, Ann-Sophie Schumacher</i>	
10.1	Schalldruckpegel	131
10.2	Schalldämm-Maß R	131
10.3	Bewertetes Schalldämm-Maß R_w	132
10.4	Schalltechnisches Verhalten von Bauteilen	132
10.4.1	Einschalige massive Bauteile	132
10.4.2	Vorsatzschalen auf massiven Bauteilen	132
10.5	Gebäudeausstattung	133
10.6	Makro- und Mikrobetrachtung von Leckagen	133
10.7	Rechnerische Betrachtung eines Musterraumes	134
10.8	Zusammenfassung	134
10.9	Literaturverzeichnis	135
11	LUFT-LECKAGEN UND DEREN BEURTEILUNG AUS JURISTISCHER SICHT	137
	<i>Ulf Köpcke</i>	
11.1	Einleitung und Fragestellung	137
11.2	Der „Hohwacher Leckagepegel“ als juristisch basierte Orientierungshilfe	137
11.2.1	Rechtliche Bewertung planungsbedingter Luftdichtheitsmängel	138
11.2.2	Rechtlich sachgerechter Umgang mit Luftdichtheitsmängeln bei Bauüberwachung und baubegleitender Qualitätssicherung	139
11.2.3	Beurteilung und Bewertung der Luftdichtheit bei Abnahme	142
11.2.4	Rechtliche Aspekte der Luftdichtheitsprüfung kurz vor Ablauf der Gewährleistungsfrist	144
11.2.5	Rechtliche Aspekte der Prüfung der Luftdichtheit nach Schadenseintritt	144
11.3	Ergebnis: Juristisch begründete Handlungsempfehlungen	144
11.4	Literatur- und Rechtsprechungsverzeichnis	144
11.4.1	Literatur	144
11.4.2	Rechtsprechung (sortiert nach Stichworten)	145
12	HANDLUNGSEMPFEHLUNG	147
12.1	Leckagebewertung im Allgemeinen	147
12.1.1	Risikoeinschätzung	147
12.1.2	Restleckagen	147
12.1.3	Leckageströme	147
12.1.4	Betrachtungszeitpunkt	148
12.2	Leckagebewertung im Speziellen	148
12.2.1	Leckagen	148
12.2.2	Feuchtetechnische Aspekte	148
12.3	Ausblick	149
13	ANHANG	151
13.1	Formelzeichen – Abkürzungen – Glossar	151
13.2	Bildverzeichnis	153
13.3	Tabellenverzeichnis	155

Vorbemerkung

Die Herstellung luftdichter bzw. wenig luftdurchlässiger Gebäudehüllen ist kein Selbstzweck. Sie ist als ein Teil, als eine „Stellschraube“ in Maßnahmenpakete eingebettet, mit denen spezifische Ziele erreicht werden sollen. Diese Ziele können sehr unterschiedlicher Art sein und werden beispielsweise als globale Klimaschutzziele oder Ziele zur Erhaltung der dauerhaften Funktionstauglichkeit einer Konstruktion formuliert.

Der Themenbereich Luftdichtheit/Luftdurchlässigkeit ist untrennbar mit Luft-Leckagen und deren Feststellung, Bewertung bzw. Beurteilung verbunden. Die Vielfalt der prinzipiellen Bauweisen, Konstruktionen, eingesetzten Materialien, individuellen Gegebenheiten eines Bauwerks vor Ort und die Sichtweisen auf das Thema aus den Blickwinkeln der verschiedenen Disziplinen erschweren die rasche Entscheidung im Umgang mit vorhandenen Luft-Leckagen.

Erklärtes Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, der Baupraxis eine Handlungsempfehlung für den Umgang mit Luft-Leckagen anzubieten. Um dieses Ziel mit der notwendigen inhaltlichen Bandbreite erreichen zu können, haben sich drei Institutionen, der **Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen**, das **Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik** mit Arbeitsschwerpunkt Umfrage unter Sachverständigen und Messdienstleistern sowie das **Fraunhofer-Institut für Bauphysik** mit Arbeitsschwerpunkt feuchtetechnische simulative Bewertung von Leckagen, zusammengeslossen.

Ferner haben sich zahlreiche Personen in dem Forschungsprojekt engagiert, sei es in der das Projekt begleitenden Arbeitsgruppe, durch Teilnahme an der Umfrage, durch die Bereit-

stellung von Unterlagen zu Praxisfällen und durch die Organisation von Ortsterminen sowie durch Fachbeiträge in diesem Forschungsbericht. Ihnen allen sei hierfür herzlich gedankt. Stellvertretend für dieses Engagement gilt der persönliche Dank den durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung benannten und das Forschungsprojekt begleitenden Arbeitsgruppenmitgliedern:

- Dipl.-Ing. Michael Förster, Schwetzingen
- RA Ulf Köpcke, Freiburg
- Gabriele Leibetseder, A-Neumarkt am Wallersee
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anton Maas, Kassel
- Dipl.-Ing. (FH) Søren Peper, Darmstadt
- Dipl.-Ing. Paul Simons, Springe
- Dipl.-Arch. (HTL/FH) Christoph Tanner, CH-Winterthur
- Dipl.-Ing. (FH) Wilfried Walther, Springe

Besonderer Dank gilt auch Frau Inken Pfrengle und Herrn Dipl.-Ing. Steffen Kisseler vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung für ihre wohlwollende, das Projekt unterstützende Art.

Im Forschungsbericht werden Praxisfälle anonymisiert vorgestellt. Damit keine konkrete Verbindung zu Personen und Orten hergestellt werden kann, wird auf Quellenangaben und Bildnachweise verzichtet. Den Personen, die Bildmaterial zur Verfügung gestellt und Ortstermine organisiert haben, wird zusammenfassend in Kapitel 3 namentlich gedankt.

Berlin/Aachen/Valley, Oktober 2016



PROJEKTLEITUNG/PROJEKTBEARBEITUNG

KLAUS VOGEL
DR. RER. SILV.

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger u. a. für Luftdichtheit von Gebäuden; selbstständig tätig in Pflaumdorf (Oberbayern) als Sachverständiger, im Forschungs- und Entwicklungsbereich zu bautechnischen und stofflichen Fragestellungen sowie als Mediator im Planungs-, Bau- und Umweltbereich

PROJEKTBEARBEITUNG



GUNNAR GRÜN
PROF. DR.-ING.

Leiter der Abteilung Energieeffizienz und Raumklima und stv. Institutsleiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen/Valley; Professor für Systemintegration effizienter Gebäude an der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm; Schwerpunktgebiet: nutzer- und nutzungsgerechte Raumklimatisierung



VICTOR NORREFELDT
DR.-ING.

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



SILKE SOUS
DIPL.-ING.

Staatlich anerkannte Sachverständige für Schall- und Wärmeschutz, wissenschaftliche Mitarbeiterin im Büro von Prof. Dr.-Ing. Oswald und beim AIBAU; Tätigkeitsschwerpunkte liegen in der baukonstruktiven und bauphysikalischen Planung und Beratung sowie in der praktischen Bauschadensforschung

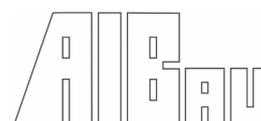


MATTHIAS ZÖLLNER
PROF. DIPL.-ING.

Honorarprofessor für Bauschadensfragen an der Universität Karlsruhe; öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Schäden an Gebäuden; Gesellschafter des AIBAU; Sachverständigenbüro in Neustadt a. d. Weinstraße; Referententätigkeit u. a. beim Institut für Sachverständigenwesen; Mitherausgeber diverser Fachzeitschriften



Fachverband Luftdichtheit
im Bauwesen e.V.



Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsbericht zu dem vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung geförderten Forschungsprojekt (Az. SWD-10.08.18.7-14.20) mit dem Titel „Bewertung von Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen – Handlungsempfehlung für Baupraktiker“ wird der Frage nach dem „richtigen Vorgehen bei der Bewertung von Luft-Leckagen“ nachgegangen. Erklärtes Ziel des Forschungsprojektes ist es, der Baupraxis eine Handlungsempfehlung für den Umgang mit Luft-Leckagen anzubieten.

Für das von Oktober 2014 bis Oktober 2016 laufende Projekt haben sich der Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V., das Aachener Institut für Bauschadensforschung und angewandte Bauphysik gGmbH und das Fraunhofer-Institut für Bauphysik zusammengeschlossen.

Der Forschungsbericht umfasst 12 Kapitel. Er dokumentiert die Forschungsarbeit und enthält zudem externe Fachbeiträge unterschiedlicher Disziplinen, die das Thema Leckagebewertung inhaltlich bereichern und abrunden. Nach dem einleitenden Kapitel 1 mit Beschreibung der Ausgangssituation und der Zielsetzung des Forschungsprojektes werden in Kapitel 2 Definitionen für Leckagen und Parameter der Leckagebewertung aufgezeigt. Kapitel 3 informiert über die im Forschungsprojekt durchgeführte Umfrage unter Sachverständigen und Messdienstleistern. Daran anknüpfend werden 33 Praxisfälle in Kapitel 4 vorgestellt. Über die simulative Bewertung von Leckagen hinsichtlich ihrer feuchtechnischen, energetischen und komforttechnischen Relevanz wird in Kapitel 5 berichtet. Die externen Fachbeiträge zu Luft-Leckagen und deren Bewertung im Hinblick auf Lüftungstechnik (Kapitel 6), Eintrag von Gerüchen (Kapitel 7), Fenstertechnik (Kapitel 8), Brand- (Kapitel 9) und Schallschutz (Kapitel 10) sowie aus juristischer Sicht (Kapitel 11) schließen den Diskurs ab. Am Ende des Forschungsberichts steht die Handlungs-

empfehlung, die keinen starren Rahmen vorgibt und sowohl Aussagen zur Leckagebewertung im Allgemeinen als auch im Speziellen enthält (Kapitel 12).

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes unterstreichen die Vielschichtigkeit des Themas Leckagebewertung. Wie im konkreten Fall mit Leckagen umzugehen ist, darüber entscheidet zunächst die an den betroffenen Personenkreis gerichtete Frage- bzw. Aufgabenstellung. Die technischen Gesichtspunkte machen deutlich, dass es keine einfache und zuverlässige Faustformel zur Leckagebewertung für alle möglichen Fälle (Wirkungsweisen, Konstruktionen etc.) geben kann. Insbesondere unter feuchtechnischen Aspekten kommt weiterhin der Leckagevermeidung und der Leckagereduktion eine besondere Rolle zu.



1 Einführung und Zielsetzung des Forschungsprojektes

1.1 FEHLSTELLEN IN RAUMBEGRENZENDEN FLÄCHEN: ZEITLOS UND INTERDISZIPLINÄR

Im Rahmen des Themenbereichs Luftdichtheit bzw. Luftdurchlässigkeit von Gebäuden kommt den Fehlstellen in den raumbegrenzenden Flächen eines Gebäudes, häufig auch als Undichtigkeiten, Undichtigkeiten, Lecks, Leckstellen oder Leckagen bezeichnet, eine zentrale Rolle zu. Es gibt zahlreiche Hinweise darauf, dass der Vermeidung und der Reduktion dieser Fehlstellen, sei es durch Aufbringen von flächig abdichtenden Putzen, sei es durch Ausstopfen von Fugen, seit jeher (vgl. z. B. Kropf et al. 1989, Fingerling 2012) Aufmerksamkeit geschenkt wird (Bild 1.1). Dabei bestimmen übergeordnete Ziele den Umgang mit Fehlstellen. Bautechnisch wird die Leckagevermeidung und Leckagereduktion von den Möglichkeiten und Grenzen der jeweiligen Zeit bestimmt (Vogel 2015).

Die Wirkungsweisen von Luft-Leckagen sind vielfältig und bereits beschrieben.

Es werden häufig die energetischen (z. B. Carlsson et al. 1980) und feuchtetechnischen Wirkungsweisen angeführt (z. B. Wagner 1989). Hauser und Maas (1991) verdeutlichen die prinzipiellen hygrothermischen Wirkungsweisen eines Spaltes an einem schematischen Bauteil. Bild 1.2 können die Randbedingungen und Ergebnisse dieser theoretischen Betrachtung entnommen werden. Die dort aufgeführten spezifischen Lüftungswärmeverluste sind faktisch als eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten aufzufassen. Bei einem 100 mm tiefen und 2 mm breiten Spalt würde das im Falle eines 1 m breiten Bauteils zu einer Erhöhung von 7 W/(m²K) führen. Für diese Spaltmaße ergibt sich ein konvektiver Feuchtetransport, ausgedrückt in dem spezifischen Wasserdampfstrom, von rund 140 g/mh. Hauser und Maas stellen diese konvektiv bedingten Ergebnisse den durch entsprechende



Bild 1.1: Mögliche frühzeitliche Bemühungen im Umgang mit Fehlstellen in der Gebäudehülle, dargestellt an Gebäuden im Pfahlbaumuseum Unteruhldingen/Bodensee, Bild links: Lehmputz auf „Leichtbauwand“, Bild rechts: ausgestopfte Fuge zwischen Hölzern

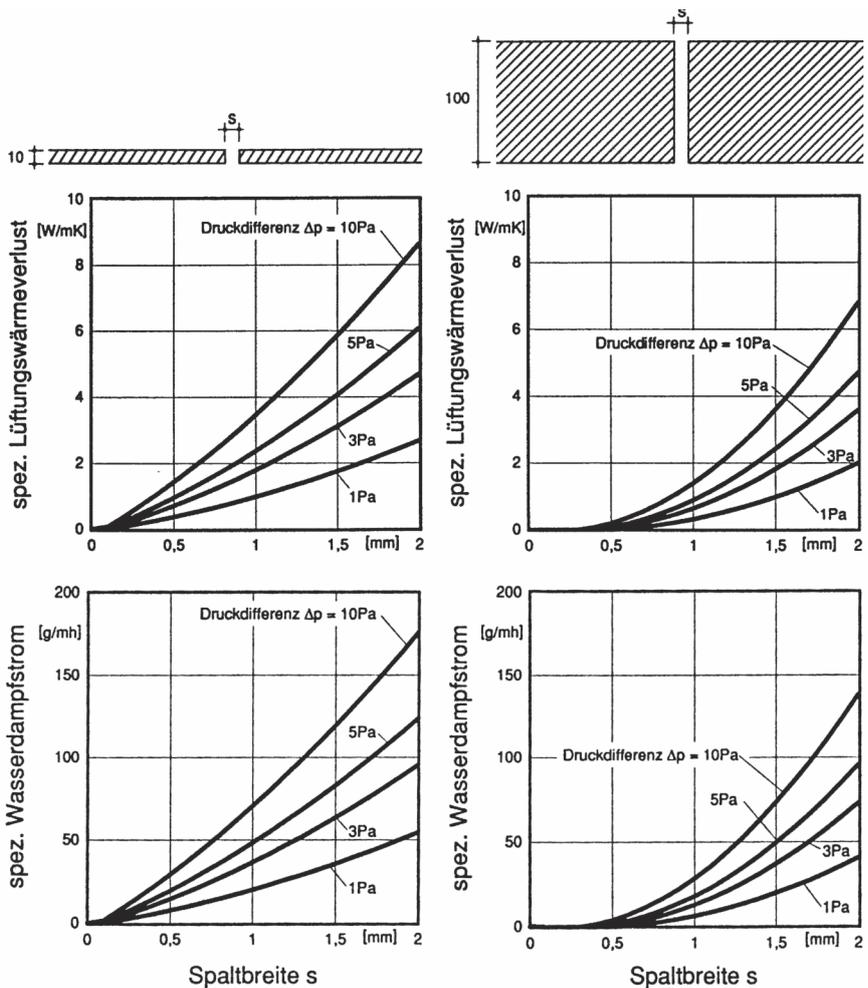


Bild 1.2: Prinzipielle Darstellung der Wirkungsweisen eines Spaltes im Hinblick auf konvektiv bedingten Wärme- (Grafiken oben) und Feuchtetransport (Grafiken unten) nach Hauser und Maas (1991). Annahmen: Außenlufttemperatur -10 °C, Innenlufttemperatur 20 °C, relative Luftfeuchte innen 50 %, relative Luftfeuchte außen 80 %, Spalttiefe 10 mm (Grafiken links) und 100 mm (Grafiken rechts)

Fehlstellen in der Dämmung (ohne Konvektion) verursachen, zusätzlichen Wärmeverlusten und dem durch Wasserdampfdiffusion verursachten Feuchtetransport gegenüber. Ungeachtet der konkreten Zahlen für die einzelnen Konstruktionen können sowohl der konvektiv bedingte Wärmetransport als auch der konvektiv bedingte Feuchtetransport um ein Vielfaches höher liegen.

Über die energetische und feuchte-technische Wirkungsweise hinaus werden unter anderem Fehlstellen in den raumbegrenzenden Flächen auch mit Wirkungsweisen in Bezug auf die Behaglichkeit (z. B. Kropf et al. 1989) und die Effizienz von Lüftungstechnischen Einrichtungen thematisiert (z. B. Werner und Zeller 1993). Ferner finden sich Hinweise zu Undichtigkeiten im Zusammenhang mit dem Schallschutz (z. B. Gösele, Schüle und Künzel 1997) und im Zusammenhang mit der Übertragung unerwünschter Substanzen (z. B. Bischof 2012). Bolender und Weissmüller (2012), die „Gründe für eine Luftdichtheit der Gebäudehülle“ mit diversen Nachweisen nennen, führen zu den oben genannten Wirkungsweisen von Fehlstellen noch den Brandschutz auf. Praktisch lassen sich aus allen Gründen für luftdichtes Bauen Wirkungsweisen von Leckagen ableiten.

1.2 FEHLSTELLEN IN RAUMBEGRENZENDEN FLÄCHEN: VON DRUCKDIFFERENZEN BEEINFLUSST

Fehlstellen in der raumbegrenzenden Fläche werden erst dadurch wirksam, dass in der ein oder anderen Art und Weise die Lecks von Luft durchströmt werden. Dies setzt an den Lecks anliegende Druckdifferenzen voraus. „Druckdifferenzen können durch Windeinwirkungen, durch thermischen Auftrieb im Gebäude oder durch Lüftungsanlagen entstehen“ (Hauser und Maas 1991).

Bild 1.3 verdeutlicht die Auftriebsdruckverteilung an einer beheizten Gebäudehülle nach Werner und Zeller (1993). Der Auftrieb wird durch Dichteunterschiede der Luft zwischen einem Gebäude oder Gebäudeteil und außen verursacht. Der Dichte- und somit auch der wirksame Druckunterschied hängen von der Temperaturdif-

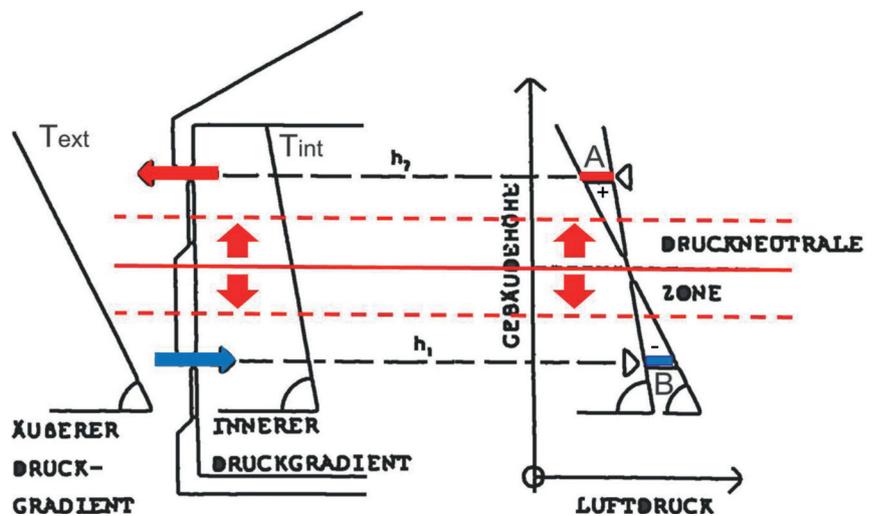


Bild 1.3: Auftriebsdruckverteilung an einer beheizten Gebäudehülle – verändert nach Werner und Zeller (1993)

ferenz, der wirksamen Höhendifferenz, der Luftfeuchte sowie der Verteilung der Leckagen ab. Bild 1.3 zeigt die Druckverhältnisse für eine Fassade eines beheizten Gebäudes bei kühler Außenluft und zwei übereinanderliegenden Öffnungen. Auf der Außenseite der Fassade (in der kühleren Luft) sinkt der Luftdruck mit zunehmender Höhe schneller als im Gebäude. Das führt dazu, dass sich in der kalten Jahreszeit im unteren Bereich des Gebäudes ein Unterdruck (Luft strömt in das Gebäude) und im oberen Bereich ein Überdruck (Luft strömt aus dem Gebäude) einstellt. Die Höhe, bei der die Druckdifferenz 0 ist (durchgezogene rote Linie), wird als druckneutrale Zone bezeichnet. Eine Veränderung der Leckagesituation (Größe, Verteilung der Leckagen) kann zu einer Veränderung der druckneutralen Zone (gestrichelte rote Linien) führen.

1.3 FEHLSTELLEN IN RAUMBEGRENZENDEN FLÄCHEN: WIE DICHT IST LUFTDICHT?

Die Luftdichtheit bzw. Luftdurchlässigkeit ganzer Gebäude oder Gebäudeteile wird häufig mit Kennwerten beschrieben. Zwei in Deutschland wichtige Quellen für diese Kennwerte und ihre Grenzwerte sind die Energieeinsparverordnung (2013) und DIN 4108-7 (2011). Bei den dort genannten Kennwerten handelt es sich um die Luftwechselrate bei 50 Pa (n_{50}) und um die Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa (q_{50}). Soll die Einhaltung der

Grenzwerte nachgewiesen werden, so hat wegen datierter Verweise in Norm und Verordnung bis auf Weiteres eine Messung nach der zurückgezogenen DIN EN 13829 (2001) und noch nicht nach der sie ersetzenden DIN EN ISO 9972 (2015) zu erfolgen. In Tabelle 1.1 werden die Grenzwerte der Verordnung und der Norm aufgeführt. Die Grenzwerte der Energieeinsparverordnung sind dann von Bedeutung, wenn im Rahmen der für sie erforderlichen energetischen Berechnungen die Option „Luftdichtheit“ in Ansatz gebracht wird.

Für kleinere konstruktive Einheiten, wie z. B. für Fenster und Bauteilanschlussfugen, gibt es auch Klassen bzw. Grenzwerte. In DIN EN 12207 (2000) werden nach der Durchlässigkeit bei 100 Pa die Klassen 1 bis 4 unterschieden. Je nach Klasse beträgt diese Referenzdurchlässigkeit bezogen auf die Fugenlänge zwischen Flügel und Blendrahmen zwischen $0,75 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ für die Klasse 4 und $12,50 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ für die Klasse 1. DIN 4108-2 (2013) enthält eine Grenzwertangabe zu Bauteilanschlussfugen: „Die aus Messungen abgeleitete Luftdurchlässigkeit von Bauteilanschlussfugen muss kleiner als $0,1 \text{ m}^3/(\text{mh}(\text{daPa}^{2/3}))$ sein“, was rund $0,3 \text{ m}^3/(\text{mh}(5\text{daPa}^{2/3}))$ entspricht.

Eine Antwort auf die Frage „Wie dicht ist luftdicht?“ geben Zeller und Biasin (1998) mit einem qualitativen Ansatz. Danach bedeute „dicht“, „daß die gesamte Gebäudehülle so luftdicht ist wie eine gemauerte, verputzte Wand.“

Tabelle 1.1: Anforderungen an die Luftdichtheit/Luftdurchlässigkeit gemäß Energieeinsparverordnung (2013) und DIN 4108-7 (2011)

	Energieeinsparverordnung		DIN 4108-7	
	Gebäude ohne / mit raumlufthechnischer Anlage		Gebäude ohne / mit raumlufthechnischer Anlage	
	ohne	mit	ohne	mit
n_{50} ¹⁾	3,0	1,5	3,0	1,5
q_{50} ²⁾	4,5 ³⁾	2,5 ³⁾	3,0 ⁴⁾	
n_{50} ⁵⁾	–	–	1,0 / 1,5 / 3,0	

¹⁾ $n_{50} = \frac{\text{Leckagestrom bei 50 Pa in m}^3/\text{h}}{\text{Innenvolumen in m}^3} \text{ in } \frac{1}{h} \text{ bzw. } h^{-1}$

²⁾ $q_{50} = \frac{\text{Leckagestrom bei 50 Pa in m}^3/\text{h}}{\text{Hüllfläche in m}^2} \text{ in } \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \text{ bzw. } \frac{\text{m}}{\text{h}}$

³⁾ bei Gebäuden mit einem Innenvolumen von mehr als 1.500 m³ und bestimmten Berechnungsansätzen

⁴⁾ wird bei Gebäuden und Gebäudeteilen mit einem Innenvolumen von mehr als 1.500 m³ zusätzlich herangezogen

⁵⁾ empfohlene Höchstwerte je nach Lüftungssystem und empfohlener Gebäudepräparation

Quantitativ fordern Zeller et al. (1995) eine Materialdichtigkeit bei 50 Pa Druckdifferenz von $\leq 0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Die obigen Ausführungen verdeutlichen, dass es eine einfache Antwort auf die Frage „Wie dicht ist luftdicht?“ nicht gibt. Auf jeden Fall ist luftdicht nicht mit keinerlei Luftdurchgang, nicht mit absolut dicht im chemisch-physikalischen Sinne gleichzusetzen.

1.4 FEHLSTELLEN IN RAUMBEGRENZENDEN FLÄCHEN: ARTEN UND VERTEILUNG

Tabelle 1.2 enthält Ergebnisse einer Untersuchung, die Ende der achtziger Jahre an 34 Wohnhäusern, Hausteilen und Wohnungen in Holz-, Mauerwerks- und Mischbauweise durch die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt in der Schweiz durchgeführt wurde (Kropf et al. 1989).

Danach liegen die Luftwechselraten bei 50 Pa je nach Objekt zwischen $1,4 \text{ h}^{-1}$ und 29 h^{-1} . „Hinsichtlich Art und Lage der Leckstellen lassen sich drei Kategorien charakterisieren. Es sind dies insbesondere Fugen und Risse (1) im Bereich der Verbindungen unterschiedlicher Materialien, z.B. von Beton bzw. Backstein und Holz; (2) im Bereich von Bauteilübergängen, vor allem zwischen Wand und Dach und (3) bei Durchdringungen aller Art, z.B.

bei nach aussen führenden Sparren, Pfetten und Deckenbalken sowie bei Durchführungen von sanitären Leitungen, Lüftungsrohren und elektrischen Leitungen“ (Kropf et al. 1989). Hinsichtlich der Verantwortlichkeit für die vorgefundenen Undichtigkeiten werden „z.T. Planungsfehler, zu einem erheblichen Teil aber auch Ausführungsmängel und schliesslich 'traditionelle' Materialeigenheiten wie beispielsweise eine zu hohe Einbaufeuchtigkeit des Holzes...“ genannt.

Geißler und Hauser (1996) stellen ebenso eine Untersuchung zur Luftdurchlässigkeit mit Schwerpunkt Holzhausbau an 87 Holzhäusern in Deutschland vor. Für die überwiegend bis zu fünf Jahre alten Gebäude machen sie Angaben zu den Häufigkeiten des örtlichen Auftretens von Leckagen. Für die fünf häufigsten Orte werden Installationen, Balkendurchdringungen, Türen zu unbeheizten Räumen, Rollladenantriebe und Luken zu Spitzböden genannt. In einer zusammenfassenden Betrachtung benennen sie als „Schwachpunkte in der Luftdichtheit“ neben den bereits genannten Türen zu unbeheizten Räumen „insbesondere Außenwand/Boden-Anschlüsse, Fensterlaibung“ und „konzeptionelle Fehler im Dach- und Kellerbereich“.

Ferner gehen Geißler und Hauser auf Basis von 42 zusätzlichen Messungen an 34 Objekten auf die mittleren Anteile

des Dachgeschosses, des Kellers und des Kerngebäudes an der Gesamtleckage ein (Bild 1.4). Danach entfällt bei den hier untersuchten Gebäuden der größte Anteil an der Gesamtleckage auf das Kerngebäude mit rund 60 %, gefolgt vom Dachgeschoss mit 18 % bzw. 24 % (Es werden hier auch Einzelwerte bis 70 % genannt!) und dem Keller mit rund 20 %.

Sehr eindrücklich werden zudem potentielle Strömungswege verdeutlicht. In einem Fall wird davon ausgegangen, dass eine Folie in der Dachschräge, die bis zur Fußpfette geführt ist, die Funktion der Luftdichtheitschicht übernehmen soll. Hierzu ist aus Bild 1.5 ersichtlich, dass der Ort, an dem eine Leckage von innen ggf. wahrgenommen wird, räumlich nicht zwangsläufig mit dem Ort der ursächlichen Fehlstelle übereinstimmen muss und ein längerer Strömungsweg vorliegen kann. Diese innenseitig wahrnehmbaren Luftströmungen werden an anderer Stelle auch als „Luft-eintrittsstellen an der Sekundärebene“ bezeichnet (Simons 2013).

Die Strömungswege durch die Gebäudehülle können sehr vielgestaltig sein (Bild 1.6) und werden, auch unter quantitativen Gesichtspunkten, in Forschungsarbeiten der letzten Jahre betrachtet (z. B. Wolf und Tyler 2013).

1 EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES

Tabelle 1.2: Untersuchungsergebnisse zur gesamten Luftdurchlässigkeit (ausgedrückt in der Luftwechselrate bei 50 Pa, hier: n_{L50} -Wert) und zu Arten von Leckagen an 34 Wohnhäusern, Hausteilen und Wohnungen in Holz-, Mauerwerks- und Mischbauweise in der Schweiz (Kropf et al. 1989)

Objekt-Nr.	n_{L50} -Wert [h ⁻¹]	äquivalente Leck- durchmesser [Ø cm]	Arten von Leckstellen											
			Bauteilübergänge					Bauteildurchdringungen						
			Wand/Dach	Wand/Decke bzw. Boden	Fenster, Türen	Estrich- Klappe	First	Konstruktion			Installation			
					Sparren	Decken- balken	Täfer	Steckdosen, Schalter	Heizung	Lüftung	Rolläden			
Altbauten														
17	16.4	29												
20	11.0	37		x		x								
26	28.9	61	x		x2)	x							x	
EFH gemischt														
1	~8.0	49			x									
2	5.6	31	x											
10	4.5	34												
18	3.3	24												
19	6.3	30			x								x	
23	4.2	29	x		x									
24	5.5	40		x	x1)									x
EFH Holz														
22	4.1	25		x	x1)	x							x	
25	7.1	30	x		x									
Fertighäuser														
3	4.4	26	x											
11	2.9	17												
12	3.1	22			x1)									
MFH gemischt														
13	8.2	34	x	x	x	x								
14	17.0	54												
15	16.3	46	x	x		x								
16	6.5	38			x2)									
35	8.0	32	x	x	x	x								x
6 Reihen-Einfamilienhäuser Siedlung 1 (Holz)														
4	5.6	35	x	x	x									
5	12.7	53	x	x	x									
6	7.6	41	x	x	x									
7	9.2	45	x	x	x									
8	6.4	38	x	x	x									
9	7.3	40	x	x	x2)									
8 Reihen-Einfamilienhauswohnungen Siedlung 2 (gemischt)														
27	4.4	30	x		x									
28	4.2	28		x										
29	1.8	13		x	x									
30	1.4	12		x										
31	2.4	15		x	x									
32	5.2	22	x		x									
33	4.2	20			x									
34	5.0	22			x									
T o t a l			16	16	24	6	13	19	11	15	19	3	1	1
1) mit Dachfenster			2) zusätzlich auch Dachfenster			3) gesamte Innentäferfläche								
<ul style="list-style-type: none"> • Altbauten: Bj. 17. Jh.-1870, EG/OG Mauerwerksbau oder Riegelkonstruktion, DG z. T. ausgebaut • EFH, gemischt: Bj. 1969-1983, EG/OG Mauerwerksbau oder gemischt, DG ausgebaut • EFH, Holz: Bj. 1981 bis 1984, DG ausgebaut • Fertighäuser (EFH), Holz: Bj. 1973 bis 1980, DG ausgebaut • MFH, gemischt: Bj. 1981 bis 1983, EG/OG Mauerwerksbau oder Holz, DG ausgebaut • Reihen-Einfamilienhäuser, Holz: Bj. 1982, DG ausgebaut • Reihen-Einfamilienhauswohnungen, gemischt: Bj. 1983, EG/OG Mauerwerksbau und Holz, DG ausgebaut 														

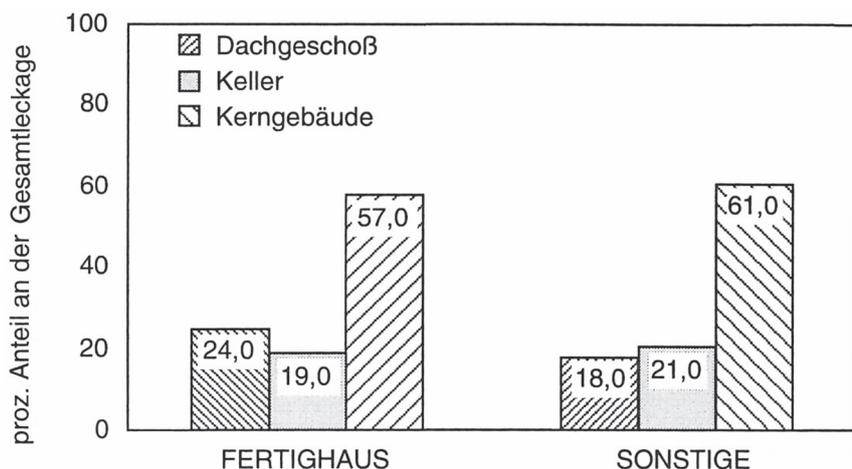


Bild 1.4: „Mittlere prozentuale Verteilung der Gesamtleckage auf die Bereiche 'Dachgeschoß', 'Kernbereich' sowie 'Keller'. Mittelwerte aus 42 Zusatzmessungen an 34 Objekten“ in Holzbauweise (Geißler und Hauser 1996) – Balken von links nach rechts: Dachgeschoss, Keller, Kerngebäude

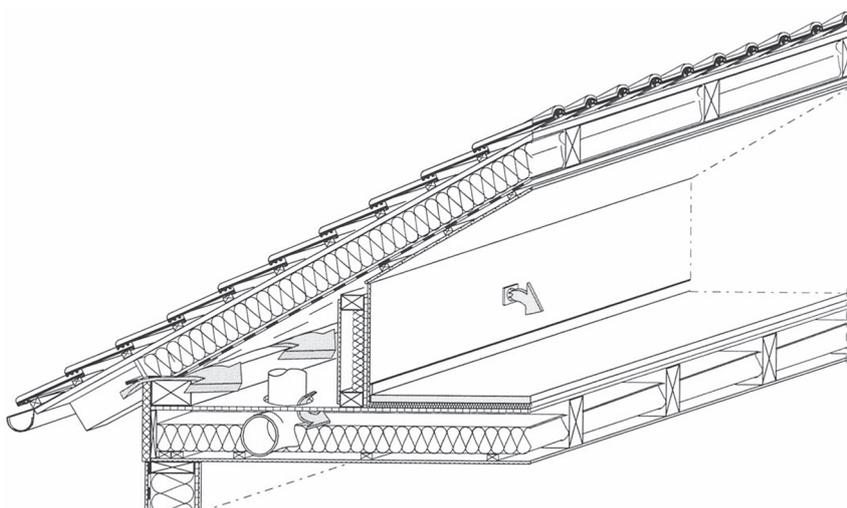


Bild 1.5: Mögliche Strömungswege über Fehlstellen in der planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitsschicht (hier: Folie unter der Dämmung mit Fehlstellen im Anschlussbereich zur Fußpfette), die über Öffnungen in Decke und Abseitenwand ins Gebäudeinnere führen (Geißler und Hauser 1996)

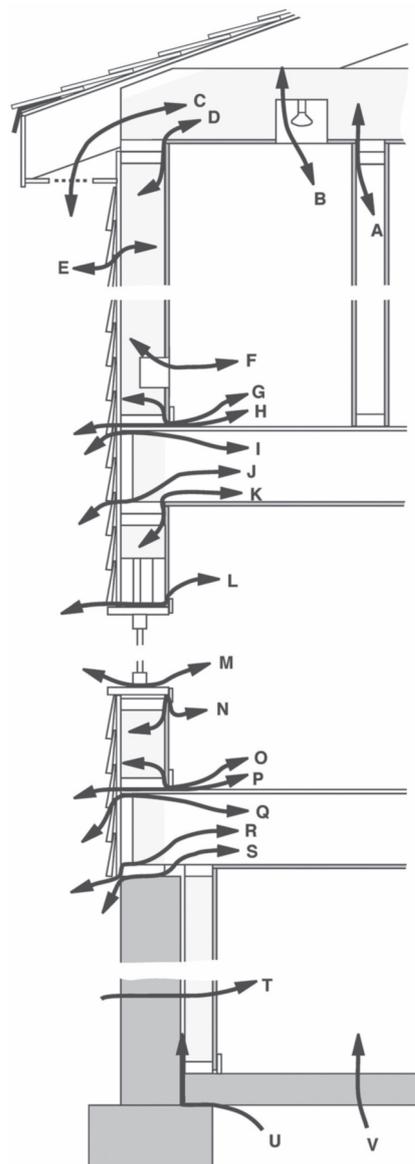


Bild 1.6: Mögliche Strömungswege in der Gebäudehülle nach Wolf und Tyler (2013)

1.5 FEHLSTELLEN IN RAUMBEGRENZENDEN FLÄCHEN: LOKALISIER- UND VISUALISIERBAR

Für die Suche bzw. Ortung von Leckagen kommen verschiedene Hilfsmittel zum Einsatz. Zur Grundausstattung gehören steuerbare Ventilatoren (häufig auch als Blower-Door bezeichnet), die i. d. R. mittels Rahmen oder Klammern und luftdichten Folien in die Öffnungen der Gebäudehülle (z. B. Türöffnung) eingebaut werden. Mit solch einem Ventilator wird je nach dessen Drehrichtung ein Unterdruck oder Überdruck zwischen dem zu untersuchenden Objekt und der Umgebung erzeugt. Damit werden Luftströmungen an Lecks witterungsunabhängig nach innen (bei Unter-

druck im Gebäude) oder nach außen (bei Überdruck im Gebäude) erzwungen. Mit den üblicherweise eingesetzten, steuerbaren Ventilatoren wird auch für ganze Gebäude oder Gebäudeteile der Leckagestrom als quantitative Größe bestimmt. Leckagen können je nach Größenordnung und Verteilung durch Messungen vor und nach deren Abdichtung abgeschätzt werden. Mehrere steuerbare Ventilatoren kommen beispielsweise bei der Guard-Zone-Methode zum Einsatz, mit der „Leckagevolumenströme über Außenwände und Deckenbereiche einzelner Räume bzw. Gebäudeteile untersucht werden“ (Hall, Geißler und Hauser 2000; Quelle enthält umfangreiche Hinweise zu erweiterten Messmethoden).

Liegt eine durch den Ventilator erzeugte Druckdifferenz vor, dann kommen weitere Hilfsmittel für die Leckagesuche bzw. Leckageortung zum Einsatz. Hinsichtlich der Art und Häufigkeit wird sich auf eine Befragung von 43 Teilnehmerinnen und Teilnehmern anlässlich eines Workshops zur Leckagebewertung bezogen (FLiB 2015): „Als Hilfsmittel bzw. Messgeräte zur Ortung der Leckagen verwenden etwa 70 % der Teilnehmer die Hand, circa 60 % das Thermoanemometer, rund 40 % die Thermografiekamera, etwa 10 % Rauch oder Nebel und rund 5 % Vogelfedern (Marabu- oder Straußenfedern). Die Hilfsmittel werden einzeln oder in Kombination eingesetzt. Die Auswahl erfolgt situationsbedingt. So wird zum

Beispiel der Nebel nur gelegentlich eingesetzt, um Strömungswege zu visualisieren.“

Die **menschliche Hand** ist ein relativ empfindliches „Instrument“ für die qualitative Bewertung, besonders dann, wenn kältere Luft die Handoberfläche berührt. Die händische Wahrnehmung von Luftströmungen setzt voraus, dass eine räumliche Nähe zur Leckage gegeben ist. Letzteres gilt auch für **Anemometer**, Geräte zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit. Diese kommen mit Flügelrad, Hitzkugelsonde und Hitzdrahtsonde zum Einsatz. Renn (2012) führt im Zusammenhang mit den beiden letztgenannten Sonden aus: „Wird ein

Anemometer im Rahmen der Leckagesuche bei Luftdichtheitsprüfungen eingesetzt, so dient es in erster Linie dazu, eine gegebenenfalls vorhandene Luftströmung festzustellen.“ Sollen neben diesem qualitativen Ansatz auch quantitative Aussagen zu einer Leckage gemacht werden, so nennt Renn eine Reihe von Einflussfaktoren, die zu beachten sind. Hierzu gehören die „Größe und Geometrie der Leckage“, die „Entfernung zwischen Anemometer und Leckage“, die „Lage des Anemometers bezüglich der Hauptströmungsrichtung der Luft“, der „Temperaturausgleich mit dem Luftstrom“ und die „Reaktionszeit des Anemometers“ (vgl. auch Kapitel 6.4).

Die **Thermografiekamera** ist hinsichtlich der physikalischen Eingangsgrößen ein anspruchsvolles bildgebendes System. Mit diesem System können Oberflächentemperaturen eines Körpers als Farbbild dargestellt werden. Der Einsatz einer Thermografiekamera ist dann besonders hilfreich, wenn der Zugang zu den Leckagen erschwert ist und ein Überblick über die Leckagesituation gewonnen werden soll. Für die Anwendung in der Leckagesuche sind Temperaturdifferenzen zwischen der Außenluft und der Innenluft notwendig. Besonders durch thermografische Aufnahmen von innen ohne und mit einem Unterdruck erzeugenden Ventilator können die sich durch Luftströmungen verändernden Oberflächentemperaturen mit Leckagen in Verbindung gebracht werden (Bild 1.7). Eine ausführliche Abhandlung zur Leckagesuche mittels Thermografie findet sich bei Geißler und Hauser (2000).

Rauch und Nebel werden überwiegend mit rauchenden Stäbchen oder mit Nebelmaschinen, die beispielsweise auch im Theater eingesetzt werden, erzeugt. Sie kommen entweder zur Visualisierung von Luftströmungen in räumlicher Nähe zu Leckagen (z. B. an Fenstern) oder auch zum Auffinden und Visualisieren längerer Strömungswege zum Einsatz. Mit den Nebelmaschinen werden auch ganze Gebäude mit Nebel beaufschlagt, so dass vor deren Einsatz die Feuerwehr benachrichtigt werden sollte.

1.6 FEHLSTELLEN IN RAUMBEGRENZENDE FLÄCHEN: VERMEIDBAR UND REDUZIERBAR

In diversen Publikationen wird auf die Bedeutung eines konzeptionellen Vorgehens im Zusammenhang mit dem Themenbereich Luftdichtheit eingegangen und es werden zugleich auch Lösungsvorschläge unterbreitet (z. B. Kropf et al. 1989, Preisig und Zumberhaus 1990, Zeller et al. 1995, Feist 1998, DIN 4108-7 2011, Solcher 2015). Der Grundansatz dabei ist, einer Bauteilschicht die Funktion der Luftdichtheit zuzuordnen und dafür zu sorgen, dass diese Schicht die Räumlichkeiten eines Gebäudes lückenlos umgibt.

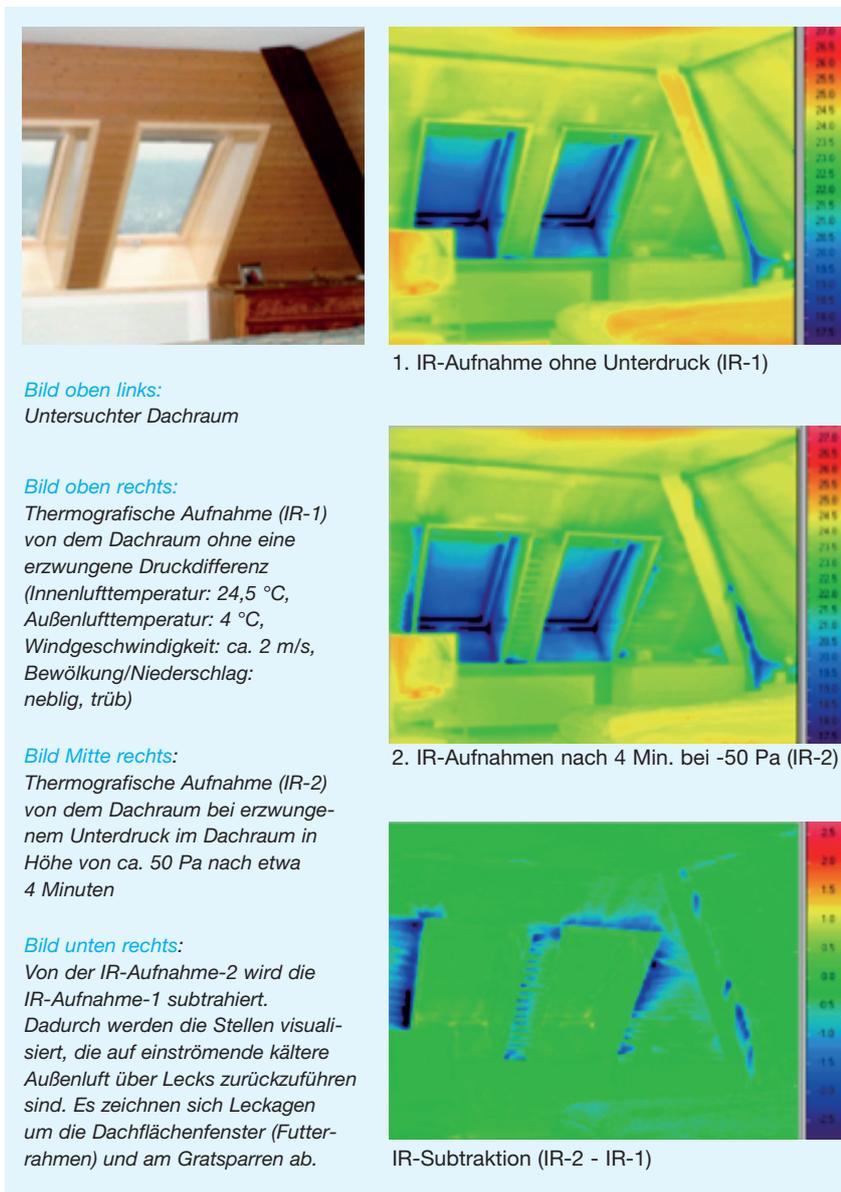


Bild 1.7: Visualisierung von mit Lecks in Verbindung zu bringenden Luftströmungen mittels Thermografie (hier: Infrarot-Subtraktionsbilder, Tanner (2016a))

Feist (1998) nennt im Zusammenhang mit der Konzepterstellung drei Strategien: Vermeidungs-, Detailplanungs- und Nachbesserungsstrategie. Bei der Vermeidungsstrategie geht es darum, bereits im Planungsprozess mögliche „Problemzonen“ zu vermeiden. Für die Detailplanungsstrategie nennt Feist insbesondere die „zeichnerische Bearbeitung von Anschlußdetails“, die „Aufnahme der notwendigen Leistungen in die Ausschreibung“ und die „Einbeziehung der Luftdichtungsarbeiten in die Planung des Bauablaufs“ sowie die „Koordinierung der Gewerke“ mit „Bauüberwachung“. Die Nachbesserungsstrategie stellt die letzte Stufe dar, in der die Punkte zu bearbeiten sind, die durch die vorangegangenen „strategischen Siebe“ hindurchgefallen sind. Im Rahmen dieser Strategie verweist Feist auch auf eine richtig im Bauablauf platzierte Überprüfung der ausgeführten Luftdichtungsmaßnahmen z. B. mittels Blower-Door-Tests und damit auf die Möglichkeit, in dieser Phase Leckagen relativ einfach suchen und reduzieren zu können.

Der richtige Zeitpunkt für eine solch qualitätssichernde Untersuchung wird während des Bauprozesses gesehen (z. B. DIN EN ISO 9972 2015), zu einem Zeitpunkt, bei dem die planmäßig vorgesehene Luftdichtheitsebene fertig gestellt und zugänglich ist. Bild 1.8 zeigt den zeitlichen Erfolg einer Leckagesuche, ausgedrückt in dem Anteil der gefundenen Leckagen an dem gesamten für ein Objekt ermittelten Leckagestrom. Diese Grafik basiert auf persönlichen Einschätzungen von vier mit baubegleitenden Untersuchungen vertrauten Personen (Vogel et al. 2016). Die getroffenen Annahmen hierfür sind:

- Aufgabe ist es, theoretisch alle Leckagen in einem Einfamilienhaus mit 500 m³ Innenvolumen zu suchen
- die Luftdichtheitsebene ist zugänglich
- es wird erfahrene Personal für die Leckagesuche bei Unterdruck im Haus eingesetzt
- Variante A: das Haus ist hinsichtlich des Themas Luftdichtheit konzeptionell und handwerklich „optimal“ (grüne Linien, Leckagestrom bei 50 Pa: 300 m³/h)
- Variante B: das Haus ist hinsichtlich des Themas Luftdichtheit konzeptionell und handwerklich

„suboptimal“ (rote Linie, Leckagestrom bei 50 Pa: 1.500 m³/h)

Die Kurven in Bild 1.8 haben einen ähnlichen Verlauf – unabhängig davon, ob es sich um die „optimale“ oder „suboptimale“ Variante handelt. Der steile Verlauf der Kurven in der Anfangsphase wird damit begründet, dass mit der Leckagesuche erfahrene Personen typische Schwachstellen kennen und relativ rasch aufspüren. Jede weitere Stunde wird der Anteil der am gesamten Leckagestrom beteiligten, gefundenen Leckagen geringer. Nach vier Stunden sind noch nicht alle Leckagen gefunden, was in Verbindung mit der schwierigen Suche nach letztlich stofflich bedingten Leckagen (viele Baustoffe sind im chemisch-physikalischen Sinne immer etwas luftdurchlässig) gebracht wird. Bei dieser relativen Betrachtung nähert sich die grüne Kurve der roten Kurve. Sie bleibt jedoch unterhalb der roten Kurve, weil bei der „optimalen“ Variante der prozentuale Anteil der stofflichen Leckagen an dem gesamten Leckagestrom sehr wahrscheinlich höher ist als bei der „suboptimalen“ Variante. In Bild 1.8 wird für die

„optimale“ Variante eine von Anfang an durchgezogene und eine in der Anfangsphase der Leckagesuche gestrichelte grüne Linie gezeigt. Hierzu gibt es zwei Argumentationsketten, die sich darin unterscheiden, ob bei einem solchen Haus überhaupt noch eine quantitativ nennenswerte Leckage vorhanden sein kann. Bei der durchgezogenen grünen Linie ist dies der Fall. Diese Leckage wird rasch gefunden. Die gestrichelte Linie bringt zum Ausdruck, dass es nur noch winzige und mit üblichen Untersuchungsmethoden nicht so schnell wahrnehmbare Leckagen gibt. Die Suche benötigt dann etwas mehr Zeit.

Unabhängig von der Variante wird deutlich, dass in relativ kurzer Zeit, nach ca. ein bis zwei Stunden, der größte Teil der am gesamten Leckagestrom beteiligten Leckagen gefunden wird. Dieser Zeitraum passt gut zu Angaben, die Teilnehmer bei einem Workshop des Fachverbandes Luftdichtheit im Bauwesen im Hinblick auf ihr zeitliches Engagement bei der Leckagesuche im Bauprozess gemacht haben (FLiB 2015).

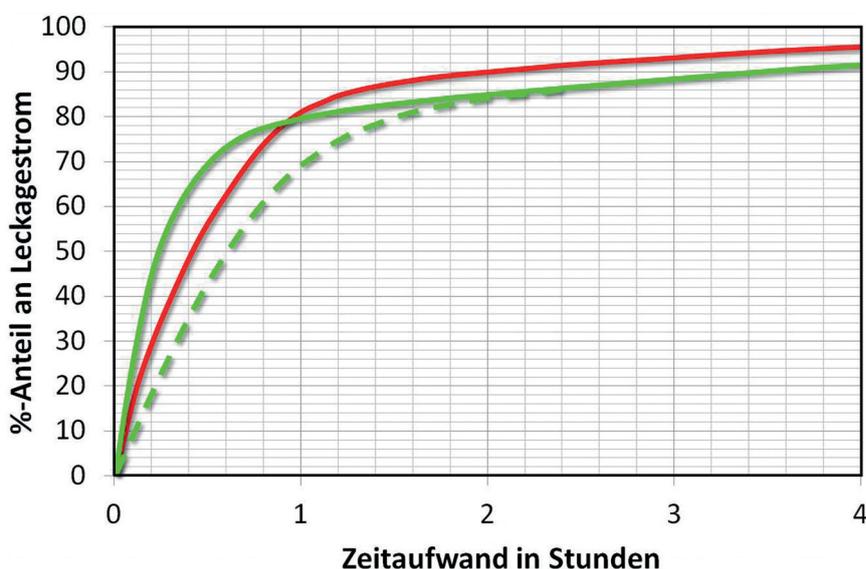


Bild 1.8: Zeitlicher Erfolg einer Leckagesuche, ausgedrückt in dem Anteil der gefundenen Leckagen an dem gesamten für ein Objekt ermittelten Leckagestrom nach Einschätzungen von Vogel et al. (2016). Rote Linie: Haus ist hinsichtlich Luftdichtheit „suboptimal“ (Leckagestrom: 1.500 m³/h). Grüne durchgezogene Linie: Das Haus ist hinsichtlich Luftdichtheit „optimal“ und hat ein paar quantitativ nennenswerte Leckagen (Leckagestrom: 300 m³/h). Grüne gestrichelte Linie: Das Haus ist hinsichtlich Luftdichtheit „optimal“ und hat nur winzige, mit üblichen Untersuchungsmethoden nicht rasch feststellbare Leckagen (Leckagestrom: 300 m³/h).

1.7 FEHLSTELLEN IN RAUMBEGRENZENDEN FLÄCHEN: BEWERTUNGSPROBLEME

Die nennenswerte Anzahl möglicher Wirkungsweisen von Leckagen zeigt, dass Leckagen aus verschiedenen Blickrichtungen betrachtet und bewertet werden können. Biasin und Zeller (2002) nennen allein neun „Merkmale von Leckagen“, die in deren Bewertung einfließen können. Hierzu zählen in Bezug auf ein Leck dessen Größe, die an ihm messbare Strömungsgeschwindigkeit, seine Lage im Haus, seine Lage in Bezug auf die Aufenthaltszone, seine Nähe zu einem Heizkörper, der Aufwand für seine Nachbesserung, die vorhandene Haustechnik (Lüftungssystem), die Art und Weise, wie ein bestimmter Raum genutzt wird, sowie der vorliegende Baustandard. Die Leckagesuche und die Leckagebewertung können zudem in unterschiedlichen Lebensphasen eines Gebäudes, während oder am Ende des Bauprozesses und am Bestandgebäude anstehen.

Nachfolgend wird exemplarisch auf Bewertungsprobleme im Rahmen der Messpraxis und im Rahmen feuchtebedingter Bauschäden eingegangen.

1.7.1 BEWERTUNGSPROBLEME IM RAHMEN DER MESSPRAXIS

1.7.1.1 LECKAGEN BEI DER BESTIMMUNG DER LUFTDURCHLÄSSIGKEIT

Mit steigenden Anforderungen an z. B. den Wärme- und Feuchteschutz sowie Bemühungen beim energiesparenden Bauen wurden Spezialbaustoffe und messtechnische Ausrüstungen entwickelt. Seit etwa zwei Jahrzehnten haben Messungen zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden, häufig als „Luftdichtheitsmessungen“ oder „Blower-Door-Messungen“ bezeichnet, im Baugeschehen Einzug gehalten und dürfen mittlerweile als etabliert angesehen werden. Diese Messungen bzw. Untersuchungen sind untrennbar mit der Suche und der Bewertung von Leckagen verbunden.

An einer Messung am Ende des Bauprozesses, häufig als Schlussmessung, Abnahmemessung oder Nachweismessung bezeichnet, kann ein Bewertungsproblem verdeutlicht werden. Die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit bei einer sogenannten

Schlussmessung wird normativ in der zurückgezogenen DIN EN 13829 (2001) und in DIN EN ISO 9972 (2015) behandelt. Danach findet vor der eigentlichen Messung eine „vorausgehende Prüfung“ statt. Nach DIN EN 13829 (2001) „ist ungefähr bei der höchsten für die Messung vorgesehenen Druckdifferenz die gesamte Gebäudehülle auf große Leckagen und fehlerhafte provisorische Abdichtungen zu untersuchen. Wenn solche Leckagen gefunden werden, sind sie genau zu protokollieren“. Die entsprechende Passage in DIN EN ISO 9972 (2015) hierzu lautet: „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.“ Abgesehen davon, dass in der einen Beschreibung von großen Leckagen und deren genauer Protokollierung und in der anderen Beschreibung von großen Lecks und deren ausführlicher Beschreibung die Rede ist, ergeben sich daraus zwei Problemfelder:

1. Beide Normen definieren nicht, ab wann eine Leckage bzw. ein Leck als groß anzusehen ist. Tanner (2016b) bringt in diesem Zusammenhang zum Ausdruck, dass der Maßstab für groß oder klein ggf. von dem jeweiligen Objekt abhängen kann, und vergleicht hierbei ein Passivhaus mit einem „08/15 EFH“.
2. Beide Normen enthalten unter Punkt 5.3.4 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 zu erfolgen hat, kann die Prüfung auf große Leckagen bzw. Lecks je nach Messobjekt bei unterschiedlichen Druckdifferenzen stattfinden. Dadurch werden Vergleiche zwischen Objekten und der Aufbau eines Erfahrungsschatzes erschwert.

1.7.1.2 LECKAGEBEWERTUNG DURCH MESSPRAKTIKER

Im April 2013 fand in Fulda ein Workshop zum Thema Leckagebewertung statt, an dem 43 Personen teilnahmen (FLiB 2015): „Ziel war es, einen aktuellen Stand zur Bewertung von Leckagen zu erhalten, um damit Aufklärung betreiben und Hilfestellungen bei der Bewertung von Leckagen geben zu können.“ Die „TeilnehmerInnen hatten die Aufgabe, 14 Leckagen in einem Gebäude bei einem konstanten Unterdruck von 50 Pa nach einem vorgegebenen Schema [Bild 1.9, Anmerkung nicht im Original enthalten] zu bewerten. Ferner wurden allgemeine Fragen zur Leckageortung und Bewertung gestellt. Jede/r TeilnehmerIn erhielt einen eigenen, anonymisierten Fragebogen zur Bearbeitung und durfte die Hilfsmittel zur Beurteilung von Leckagen (z. B. Thermoanemometer, Thermografiekamera) frei wählen und einsetzen“ (FLiB 2015).

An dieser Stelle werden zwei Leckagen näher betrachtet:

- eine Kellertürschwelle und
- Steckdosen.

Nr:	Leckage (z.B. Steckdose)	Raum (z.B. Küche)	WE-Nr.	Geschoss				
Ist die Leckage eine „große“ Leckage im Sinne der DIN EN 13829 <input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein								
Bewertung der Leckage (Bitte ein Kästchen pro Zeile ankreuzen)		unkritisch ----- kritisch						
		1	2	3	4	5	6	nicht bewertbar¹
• Energieverluste		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Feuchteintrag in Konstruktion		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Behaglichkeit		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Beeinträchtigung der Lüftungsanlage		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
¹Nicht bewertbar, da:								

Bild 1.9: Schema zur Bewertung von Leckagen bei dem Workshop im April 2013 (FLiB 2015)

Kellertürschwelle

In dem zur Verfügung stehenden Gebäude gab es nicht so viele unterschiedliche Leckagen. Deshalb wurden auch künstlich erzeugte Undichtigkeiten im Workshop betrachtet. Hierzu gehört der in Bild 1.10 gezeigte Spalt, der eine Kellertürschwelle darstellt.

Diese Leckage ist ein Beispiel dafür, wie relativ einheitlich die Bewertung einer Leckage erfolgen kann. Nach Bild 1.11 sieht ein Großteil der Teilnehmerinnen und Teilnehmer diese Leckage als eine große Leckage im Sinne der DIN EN 13829 (2001) an. Wie aus Bild 1.12 zu entnehmen ist, wird sie im Hinblick auf die Wirkungs-

weisen „Energieverluste“, „Behaglichkeit“ und „Beeinträchtigung der Lüftungsanlage“ eher im kritischen Bereich angesiedelt.



Bild 1.10: Künstlich geschaffene Undichtigkeit (1), die eine Kellertürschwelle darstellt. Der Volumenstrom durch die Leckage bei 50 Pa, ca. 35 m³/h, war den TeilnehmerInnen des Workshops nicht bekannt (FLiB 2015).



Bild 1.11: Antworten auf die Frage, ob die Luftströmung an der Kellertürschwelle eine große Leckage im Sinne der DIN EN 13829 (2001) sei (n.b. = nicht bewertet) (FLiB 2015)

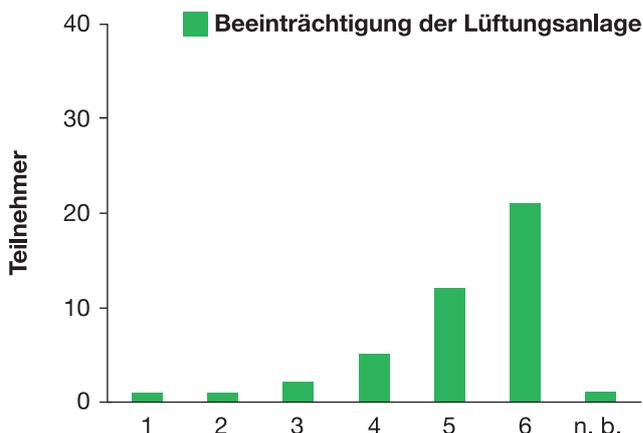
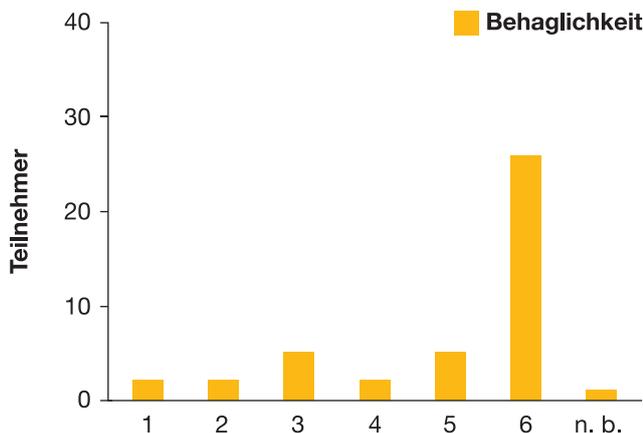
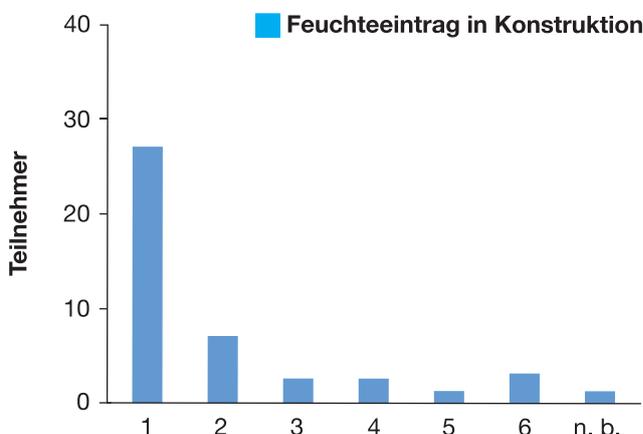
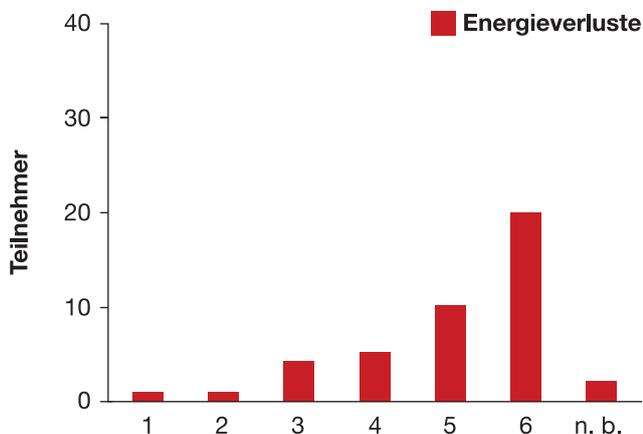


Bild 1.12: Bewertungen der Kellertürschwelle im Hinblick auf unterschiedliche Wirkungsweisen einer Leckage (1 = unkritisch, 6 = kritisch, n.b. = nicht bewertet) (FLiB 2015)

Steckdosen

Die beiden Steckdosen in einer Außenwand in Holzbauweise befanden sich im Obergeschoss (Bild 1.13).

Dem Bild 1.14 kann entnommen werden, dass die Mehrheit der Teilnehmerinnen und Teilnehmer diese Leckage als eine kleine Leckage im Sinne der DIN EN 13829 (2001) ansieht. Im Hinblick auf die verschiedenen Wirkungs-

weisen einer Leckage ist das Meinungsbild nicht mehr so deutlich zu fassen wie beispielsweise bei der Kellertürschwelle (Bild 1.15).

Dieser Workshop hat ein paar interessante Aspekte. Jeder Teilnehmerin und jedem Teilnehmer bot sich die Chance, dieselben Leckagen zu bewerten. Es wurde keine „Musterlösung“ angeboten. Jedoch konnte das individuelle

Bewertungsergebnis mit den Ergebnissen der Gruppe abgeglichen werden. Ferner bot der anschließende Austausch mit Kolleginnen und Kollegen die Gelegenheit, die eigene Bewertungspraxis zu bestätigen oder zu korrigieren. Die Ergebnisse zeigen, dass bei manchen Leckagen die Wirkungsweisen relativ einheitlich bewertet werden.



Bild 1.13: Steckdosen in einer Außenwand in Holzbauweise im 1. Obergeschoss. Der Volumenstrom durch die Leckage bei 50 Pa, ca. 1 m³/h, war den TeilnehmerInnen nicht bekannt (FLiB 2015)



Bild 1.14: Antworten auf die Frage, ob die Luftströmung an den Steckdosen im 1. Obergeschoss eine große Leckage im Sinne der DIN EN 13829 sei (n.b. = nicht bewertet) (FLiB 2015)

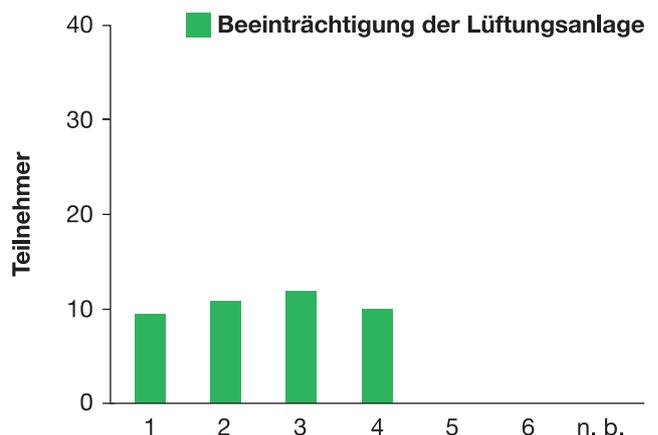
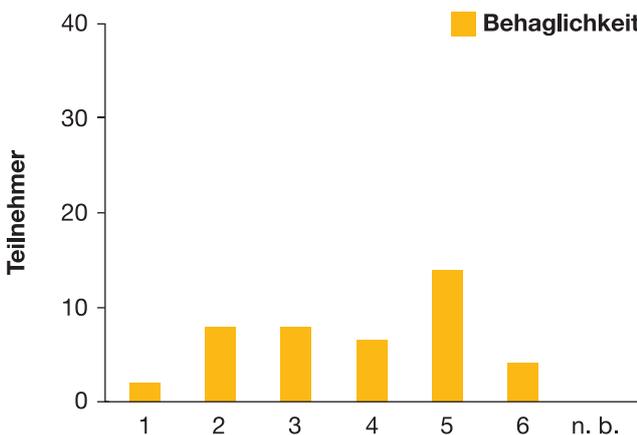
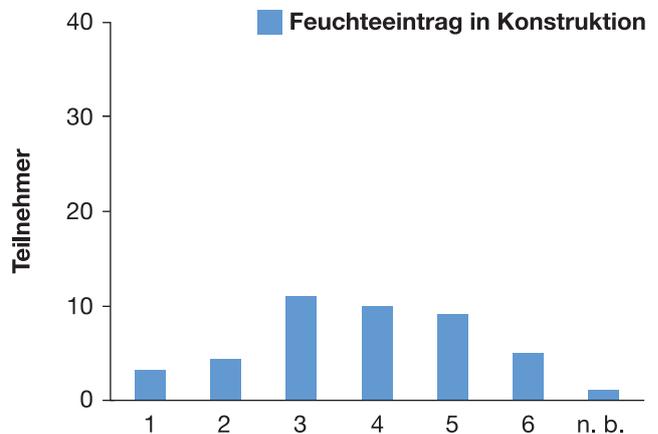
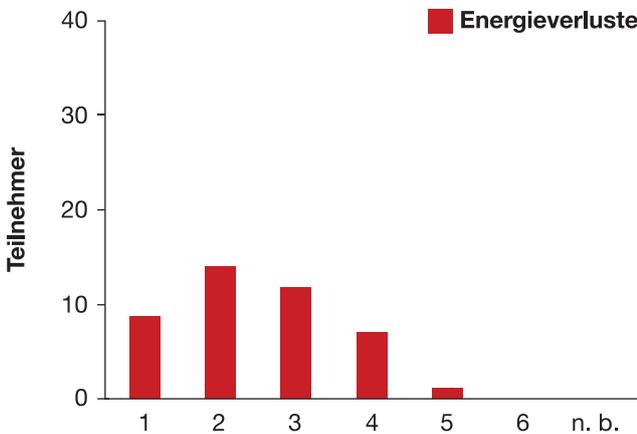


Bild 1.15: Bewertungen der Steckdosen im Hinblick auf unterschiedliche Wirkungsweisen einer Leckage (1 = unkritisch, 6 = kritisch, n.b. = nicht bewertet) (FLiB 2015)

1.7.2 BEWERTUNGSPROBLEME IM RAHMEN FEUCHTEBEDINGTER BAUSCHÄDEN

Dem konvektiven Feuchtetransport über Lecks kommt eine große Bedeutung im Rahmen feuchtebedingter Bauschäden zu. Er ist seit mehreren Jahrzehnten Bestandteil der fachlichen Diskussion (z. B. Pohl 1987, Künzel 1999, Borsch-Laaks 2006, Oswald et al. 2014).

In der Normung hat das Thema Fuß gefasst. So enthält die Norm für den Holzschutz DIN 68800-2 (2012) u. a. die 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 $\geq 250 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ bei Dächern und $\geq 100 \text{ g}/(\text{m}^2\text{a})$ 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 für die Luftdichtheit von Gebäuden oder Gebäudeteilen enthält bereits DIN 4108-7 aus dem Jahr 2001: „Die Einhaltung der Anforderungen an die Luftdichtheit schließt lokale Fehlstellen, die zu Feuchteschäden infolge von Konvektion führen können, nicht aus“ (DIN 4108-7 2001). Auch in der überarbeiteten Fassung dieser Norm aus dem Jahr 2011 findet sich diese Anmerkung leicht abgewandelt und erweitert wieder: „Selbst bei Einhaltung der oben genannten Grenzwerte sind lokale Fehlstellen in der Luftdichtheitschicht 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“ (DIN 4108-7 2011).

Aus diesen Normtexten kann entnommen werden, dass das Thema konvektiver Feuchtetransport durch flä-

chenbezogene „Sicherheitszuschläge“ quantitativ berücksichtigt wird. Desweiteren 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. Es überrascht somit nicht, dass es immer wieder Bemühungen gibt, den konvektiven Feuchtetransport durch Bauteile besser beschreiben zu können. Intensiv wird sich beispielsweise in Arbeiten von Geißler und Hauser (2002), Kempkes (2004), Künzel, Zirkelbach und Schafaczek (2010), Nusser (2012) und Schmidt (2014) mit diesem Transportmechanismus beschäftigt. Letztgenannte Arbeit gibt einen guten Überblick über das Schrifttum und den themenbezogenen Diskurs. Sie enthält u. a. auch Ergebnisse zu Differenzdruckuntersuchungen zwischen Innenraum und Umgebung an verschiedenen realen Gebäuden aus unterschiedlichen Regionen Deutschlands. Schmidt (2014) schließt seine Arbeit damit ab: „Es sollte jedoch das vorrangige Ziel sein, Feuchteinträge in die Gebäudehülle zu vermeiden. Eine leckagefreie Planung, anforderungsentsprechende Materialauswahl, regelkonforme Ausführung und das Verständnis des Nutzers für entstehende Feuchtetransportprozesse und daraus folgende Probleme sind dafür die erfolgversprechendsten Präventionsmaßnahmen.“

Der oben genannte Hinweis in DIN 4108-7 (2011) auf „sachgemäße Planung und Ausführung eines einzelnen Konstruktionsdetails“ hat beim Thema konvektiver Feuchtetransport über Lecks im Speziellen und beim Thema Luftdichtheit im Allgemeinen auch eine juristische Dimension. Eine Abhandlung darüber findet sich beispielsweise bei Köpcke (2012), der zum Thema Mängel im Hinblick auf eingehaltene Grenzwerte aus der Sicht eines Juristen ausführt: „Immer wieder trifft man in der Baupraxis auf den Irrglauben, durch die Einhaltung der in dieser Messnorm, DIN EN 13829 [Anmerkung nicht im Original enthalten], vorgegebenen Grenzwerte könnte auch die bauwerkvertragrechtliche Mängelfreiheit der luftdichten Ebene positiv bewiesen werden.“ In diesem Zusammenhang führt Köhnke (2013) aus: „Wenn eine gewisse Leckluftmenge einströmen darf,

können die dafür verantwortlichen Leckagen nicht automatisch einen Baumangel darstellen. Würde man dieser Ansicht folgen, wäre nahezu jedes Gebäude mangelhaft, da es wohl kaum ein Gebäude mit einem n_{50} -Wert von $0,0 \text{ h}^{-1}$ gibt.“

Aus diesen Ausführungen kann zusammenfassend festgehalten werden: Der konvektive Feuchtetransport wird unzweifelhaft in Verbindung mit Bauschäden gebracht. Wenngleich „Sicherheitszuschläge“ in der Bemessung von Bauteilen bereits zum Einsatz kommen, so besteht ein Bewertungsproblem bei der einzelnen, konkret auf der Baustelle vorhandenen Leckage.

1.8 ZIELSETZUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES

Aus den vorangehenden Kapiteln wird deutlich, dass Fehlstellen in raumbegrenzenden Flächen, die als Luft-Leckagen in Erscheinung treten, vielfältig und deren Suche sowie Bewertung z. T. äußerst aufwendig und komplex sein können. Bisher fehlen der Baupraxis nachvollziehbare, allgemein akzeptierte und handhabbare Kriterien im Umgang mit Luft-Leckagen. Dies führt immer wieder zu Diskussionen zwischen den am Bau Beteiligten, die auch in Rechtsstreitigkeiten enden. Aus diesem Grund wurde das Forschungsprojekt „Bewertung von Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen“ mit dem **Ziel** initiiert, der Baupraxis eine **Handlungsempfehlung für den Umgang mit Luft-Leckagen** zu erarbeiten. Dabei soll geklärt werden, ob Luft-Leckagen und deren Bedeutung differenziert dargestellt werden können, ob sich Grenzwerte für Leckagen finden lassen und ob eine Untersuchungsmethodik zielführend eingesetzt werden kann.

Die Arbeitspakete umfassen die Erstellung einer Leckagesystematik, die Durchführung und Auswertung einer Umfrage unter Sachverständigen und Messdienstleistern, die Dokumentation von Praxisfällen und die simulative Bewertung von Leckagen. Zudem widmen sich externe Beiträge der Bewertungsfrage von Luft-Leckagen hinsichtlich Lüftung, Gerüchen, Fenstern und Türen, Brandschutz, Schallschutz und juristischer Aspekte.

1.9 LITERATURVERZEICHNIS

- Biasin, K., Zeller, J. (2002): Luftdichtigkeit von Wohngebäuden. Messen der Luftdurchlässigkeit – Bewerten der Messergebnisse – Typische Leckagen – Luftdichtungskonzept – Ausführungsdetails. 3. Aufl., Frankfurt: VVEW Energieverlag.
- Bischof, W. (2012): Luftqualität und Luftdichtheit von Gebäuden. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V., (Hrsg.), Gebäude-Luftdichtheit. Band 1, zweite, aktualisierte Auflage. Berlin: Selbstverlag, 19-27.
- Bolender, T., Weissmüller A. (2012): Gründe für eine Luftdichtheit der Gebäudehülle. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V., (Hrsg.), Gebäude-Luftdichtheit. Band 1, zweite, aktualisierte Auflage. Berlin: Selbstverlag, 13-18.
- Borsch-Laaks, R. (2006): Risiko Dampfkongvektion. Wann gibt es wirklich Schäden? Holzbau – die neue quadriga, Heft 3, 17-22.
- Carlsson, B., Elmroth, A., Engvall, P. (1980): Airtightness and thermal insulation. Byggforskingsradet. Stockholm D 37: 198.0. Aus: Feist, W. (Hrsg., 1998). Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewußtes Bauen. 5. überarbeitete Auflage. Heidelberg: C. F. Müller.
- DIN 4108-2 (2013): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth.
- DIN 68800-2 (2012): Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Berlin: Beuth.
- DIN 4108-7 (2001): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele. Berlin: Beuth.
- DIN 4108-7 (2011): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele. Berlin: Beuth.
- DIN EN 12207 (2000): Fenster und Türen. Luftdurchlässigkeit. Klassifizierung. Deutsche Fassung EN 12207:1999. Berlin: Beuth.
- 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.
- DIN EN ISO 9972 (2015): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden. Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden. Differenzdruckverfahren (ISO 9972:2015). Berlin: Beuth.
- Energieeinsparverordnung (2013): Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. In: Bundesgesetzblatt Teil I, 2013 Nr. 67.
- Feist, W. (Hrsg., 1998): Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewußtes Bauen. 5. überarbeitete Auflage. Heidelberg: C. F. Müller.
- FLiB (2015): Leckagebewertung. Abschlussbericht zum FLiB-Workshop am 17./18. April 2013 in Fulda. Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.). Berlin.
- Geißler, A., Hauser, G. (1996): Untersuchung der Luftdichtheit von Holzhäusern. Bericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 9579, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Bauphysik.
- Geißler, A., Hauser, G. (2000): Leckageortung an Gebäuden. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben HMUEJFG VI A 31-78a 70-25/02, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Bauphysik.
- Geißler, A. und Hauser, G. (2002): Abschätzung des Risikopotenzials infolge konvektiven Feuchtetransports. Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben 12764, Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik.
- Gösele, K., Schüle, W., Künzel, H. (1997): Schall, Wärme, Feuchte. Grundlagen, neue Erkenntnisse und Ausführungshinweise für den Hochbau. 10. Auflage. Wiesbaden/Berlin: Bauverlag.
- Hall, M., Geißler, A., Hauser, G. (2000): Quantifizierung einzelner Leckagen und Leckagewege bei Gebäuden in Holzbauart. Abschlussbericht in zwei Teilen zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11402N, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Bauphysik.
- Hauser, G., Maas, A. (1991): Auswirkungen von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmschichten. In: Tagungsband Aachener Bausachverständigentage 1991. Aachen, 88-95.
- Kempkes, C. (2004): Das Feuchterisiko bei der Durchströmung von Leckagen. In: Tagungsunterlagen 9. BlowerDoor-Symposium am Deister GmbH (Hrsg.). Springe-Eldagsen.
- Köhnke, E. (2013): Eine zusammenfassende Stellungnahme von E. U. Köhnke zur Frage: Leckluft gleich Baumangel? Holzbau – die neue quadriga, Heft 4, 33-34.
- Köpcke, U. (2012): Die Luftdichtheit der Gebäudehülle im öffentlichen und privaten Baurecht. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.), Gebäude-Luftdichtheit. Band 1, zweite, aktualisierte Auflage. Berlin: Selbstverlag, 115-137.
- Kropf, F., Michel, D., Sell, J., Zumboverhaus, M., Hartmann, P. (1989): Luftdurchlässigkeit von Gebäudehüllen im Holzhausbau. Bericht Nr. 218, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt. Dübendorf, Schweiz.
- Künzel, H. (1999): Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis? IBP-Mitteilung Nr. 355. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart.
- Künzel, H., Zirkelbach, D., Schafaczek, B. (2010): Berücksichtigung der Wasserdampfkongvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen. wksb, 25-33.
- Nusser, B. (2012): Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen. Systemanalysen und neue Ansätze zur Planung hygrisch robuster flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen unter Beachtung konvektiver Feuchteinträge und temporärer Beschattungssituationen. Dissertation TU Wien. Wien: Technische Universität Wien.
- Oswald, R., Zöllner, M., Spilker, R., Sous, S. (2014): Zuverlässigkeit von Holzdachkonstruktionen ohne Unterlüftung der Abdichtungs- oder Decklage, Bauforschung für die Praxis Band 115. Stuttgart: IRB Verlag.
- Pohl, W. (1987): Konstruktive und bauphysikalische Problemstellungen bei leichten Dächern. In: Tagungsband Aachener Bausachverständigentage 1987. Aachen, 30-52.
- Preisig, H., Zumboverhaus, M. (1990): Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle. Seminarunterlage IPH-Projekt „Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle im Holzbau“,

- Bundesamt für Konjunkturfagen (Hrsg.), Bern.
- Renn, M. (2012): Hinweise zur Verwendung des Thermo-Anemometers bei der Leckagesuche. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.), Gebäude-Luftdichtheit. Band 1, zweite, aktualisierte Auflage. Berlin: Selbstverlag, 70-71.
 - Schmidt, J. (2014): Konvektiver Feuchtetransport durch Leckagen in Holzleichtbaukonstruktionen mit permeablen Dämmstoffen. Dissertation TU Kaiserslautern. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern.
 - Simons, P. (2013): Bewertung einzelner Luftleckagen. In: Tagungsunterlagen 8. Internationales BUILD-AIR-Symposium in Hannover. Energie- und Umweltzentrum am Deister GmbH (Hrsg.), Springe-Eldagsen.
 - Solcher, O. (2015): Leitfaden Luftdichtheitskonzept. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.), Gebäude-Luftdichtheit. Band 2. Berlin: Selbstverlag, 10-12.
 - Tanner, C. (2016a): Persönliche Mitteilungen zu einer thermografischen Untersuchung in einer Dachgeschosswohnung im Jahr 1996 zur Visualisierung von Leckagen mittels Infrarot-Subtraktionsbildern. Baucheck-Tanner, CH-Winterthur.
 - Tanner, C. (2016b): Persönliche Mitteilungen zu Problemfeldern der Leckagesuche und deren Beurteilung. Baucheck-Tanner, CH-Winterthur.
 - Vogel, K. (2015): Zum Thema Luftdichtheit – „Rundumschlag“ eines Sachverständigen. In: Seminarunterlagen zum 22. Münchener Dachtag in München, Dachdeckerinnung München-Oberbayern (Hrsg.), München.
 - Vogel, K., Tanner, C., Peper, S., Renn, M. (2015): Persönliche Mitteilungen zum zeitlichen Erfolg einer Leckagesuche. Sachverständigenbüro Vogel, Pflaumdorf; Baucheck-Tanner, CH-Winterthur; Passivhaus Institut, Darmstadt; protherm, Erlangen.
 - Wagner, H. (1989): Luftdichtheit und Feuchteschutz beim Steildach mit Dämmung zwischen den Sparren. DBZ 12/89. Aus: Feist, W. (Hrsg., 1998). Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewußtes Bauen. 5. überarbeitete Auflage. Heidelberg: C. F. Müller.
 - Werner, J., Zeller, J. (1993): Die Luftdichtigkeit von Gebäuden und ihre Bedeutung für die Funktion und Effizienz von Wohnungslüftungsanlagen. In: Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung. VDI-Berichte Nr. 1029, 555-577.
 - 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.
 - Zeller, J., Biasin, K. (1998): Luftdichtigkeit von Wohngebäuden. Messung, Bewertung, Ausführungsdetails, zweite erweiterte Auflage. RWE Energie Aktiengesellschaft (Hrsg.), Essen.
 - Zeller, J., Dorschky, S., Borsch-Laaks, R., Feist, W. (1995): Luftdichtigkeit von Gebäuden. Luftdurchlässigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen Gebäuden. 1. Auflage. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt.



2 Leckagesystematik

Die Ausführungen in Kapitel 1 machen deutlich, dass die „Welt der Leckagen“ sehr bunt und bisweilen unübersichtlich ist. Bezeichnungen wie beispielsweise Leck und Leckage werden teilweise identisch und teilweise differenziert benutzt. Ferner werden zahlreiche Parameter genannt, die bei einer umfassenden Leckagebewertung zu beachten sind. Die verschiedenen Aspekte der Leckagebewertung sind nachfolgend in Form einer Leckagesystematik gegliedert. Dabei werden die Wörter Luftdichtheitsebene und Luftdichtheitsschicht synonym verwendet.

2.1 DEFINITIONEN

Im Forschungsprojekt werden Luft-Leckagen in Anlehnung an die Beschreibungen zu Leck und Leckage gemäß Der Große Brockhaus (1983) wie folgt definiert:

- A) Definition im weiteren Sinne
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. Diese allgemein gehaltene Definition entspricht zugleich der Definition für Leck.
- B) Definition im engeren Sinne
Fehlstellen in der Luftdichtheitsebene/Luftdichtheitsschicht mit einem Luft-Massenstrom. Bei dieser Definition wird der Stofftransport herausgestellt und gemäß Otto und Ringeler (2004) einer Ebene bzw. Schicht das Thema Luftdichtheit funktional zugeordnet. Sie stellt zugleich die Definition für primäre Leckagen dar.

Unter Leckagefeststellung (Leckagesuche, Leckageortung) wird eine Tätigkeit verstanden, die ausschließlich der Wahrnehmung von mit Lecks in Verbindung zu bringenden Luftströmungen dient und deren räumliche Lage in einem Objekt beschreibt.

Von Leckagebewertung wird gesprochen, wenn über die Leckagefeststellung

hinaus weitere Parameter (Kapitel 2.2) im Kontext einer bestimmten Aufgaben- bzw. Fragestellung in die Entscheidungsfindung einfließen.

2.2 PARAMETER DER LECKAGEBEWERTUNG

Bild 2.1 zeigt die stufenweise Gliederung verschiedener Parameter. Diese reichen 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.

Auf der obersten Stufe richtet sich der Blick auf Gebäude oder Gebäudeteile in ihrer Gesamtheit (Bild 2.2). Die Nutzungsart und die damit verbundene technische Ausstattung sowie die Lage sind bei der Bewertung von Leckagen zu berücksichtigen. So macht es beispielsweise einen Unterschied, ob es sich um ein exklusives Wohngebäude in einer Großstadt oder um eine Schwimmhalle mit einem im Überdruck betriebenen Lüftungssystem auf freier Fläche handelt. Bereits auf dieser Stufe ist auch den Fragen nach der Bauweise und den eingesetzten Stoffen nachzugehen, die ggf. bei der Bewertung feuchtetechnischer Wirkungsweisen von Leckagen bedeutsam sein können. Ferner spielt der Zeitpunkt eine wichtige Rolle, zu dem ein Objekt im Hinblick auf seine Leckagen näher untersucht werden

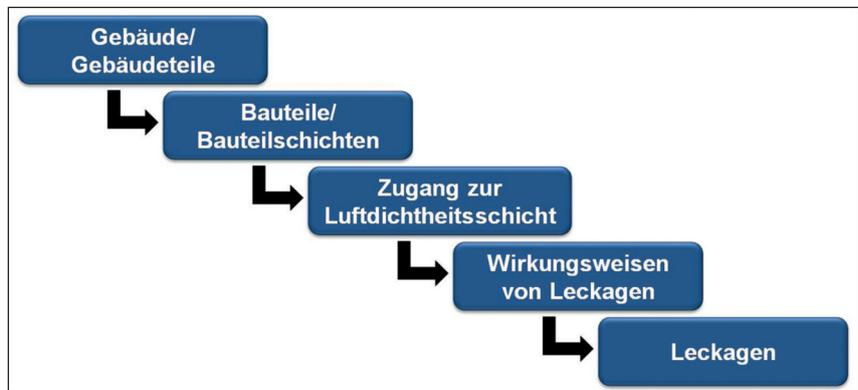


Bild 2.1: Parameter der Leckagebewertung

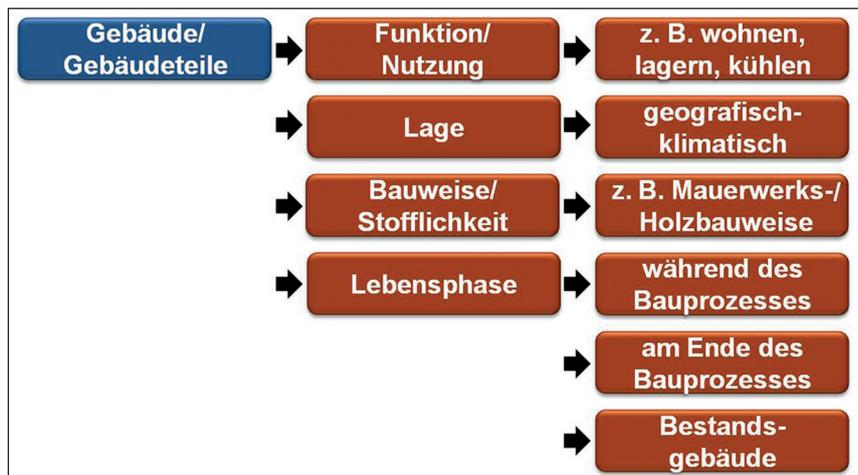


Bild 2.2: Makrobetrachtung bei der Bewertung von Luft-Leckagen

soll. Während des Bauprozesses stattfindende Untersuchungen erleichtern oft die Entscheidungsfindung, wie mit Leckagen umzugehen ist. Vieles ist noch einsehbar und mit relativ geringem Aufwand zu beheben. Im Gegensatz dazu sind am Ende des Bauprozesses oder bei einem Bestandsgebäude die entscheidungsrelevanten Schichten häufig überbaut.

In der darunterliegenden Stufe werden die Bauteile und Bauteilschichten näher betrachtet (Bild 2.3). Hier ist die Lage der Bauteile im Gebäude zu berücksichtigen. Wie in den Kapiteln 1 und 5 näher erläutert, führen allein Dichteunterschiede zwischen der Luft in einem Gebäude und der Umgebung dazu, dass Lecks je nach ihrer Höhenlage im Gebäude überwiegend in eine

Richtung durchströmt werden, sofern die Strömungsrichtung nicht durch Lüftungssysteme bestimmt wird. Ferner ist auf dieser Stufe unter anderem den Fragen nachzugehen, aus welchen Schichten die Konstruktion aufgebaut ist, welche Schicht planmäßig die Funktion der Luftdichtheit übernehmen soll und wie diese in der Fläche sowie an Anschlüssen und Durchdringungen ausgebildet ist.

Aus den obigen Ausführungen zur Lebensphase und zum Schichtenaufbau einer Konstruktion abgeleitet ergibt sich auf der nächsten Stufe die Frage nach dem Zugang zur planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitschicht (Bild 2.4). Der für die Bewertung von Luft-Leckagen günstigste Fall ist dann gegeben, wenn die Luft-

dichtheitschicht offen vorliegt und somit direkt einsehbar ist. Demgegenüber macht die Leckagebewertung an einer von anderen Bauteilschichten verdeckt vorliegenden Luftdichtheitschicht einen Rückbau bis zur entscheidungsrelevanten Schicht notwendig.

In Bild 2.5 und Bild 2.6 werden zwei weitere Stufen als Parameter der Leckagebewertung aufgeführt: die Wirkungsweisen und die Einzelansprache von Leckagen.

Die Art und Weise, wie Leckagen wirken können, ist vielfältig (Bild 2.5). Praktisch lassen sich aus allen Gründen für luftdichtes Bauen Wirkungsweisen von Leckagen ableiten. Häufig werden energetische und feuchtechnische Wirkungsweisen genannt. Darüber hinaus werden Luft-Leckagen im Zusammenhang mit komfort- und sicherheitstechnischen Fragestellungen sowie im Zusammenhang mit der Lufthygiene thematisiert. Zu den komfort- und sicherheitstechnischen Wirkungsweisen zählen beispielsweise Zuglufterscheinungen, die Beeinträchtigung des Schallschutzes und eine unzureichende Abtrennung bei der Rauchausbreitung im Brandfalle. Im Rahmen der Lufthygiene geht es beispielsweise um Geruchsübertragungen bzw. um die Übertragung unerwünschter Stoffe wie Feinstaub und Radon sowie um die mögliche Beeinflussung der Effizienz von Lüftungssystemen.

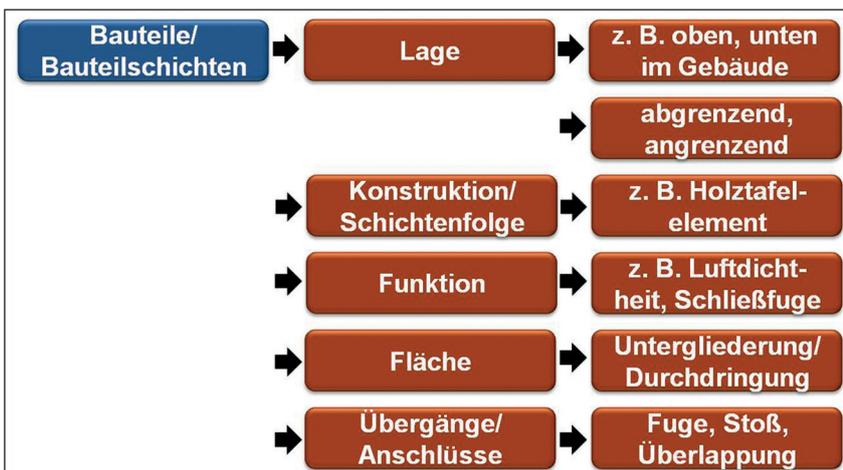


Bild 2.3: Parameter der Leckagebewertung auf der Stufe der Bauteile und Bauteilschichten



Bild 2.4: Zugang zur planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitschicht

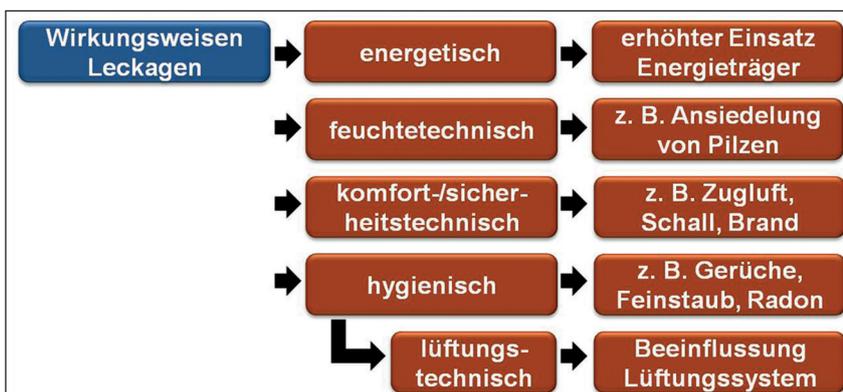


Bild 2.5: Wirkungsweisen von Leckagen

Bild 2.6 zeigt eine Auswahl an Parametern für die Einzelansprache von Leckagen. Bei dieser Mikrobetrachtung werden einzelne Leckagen daraufhin angesprochen, ob es sich im Hinblick auf eine bestimmte Wirkungsweise um **primäre, sekundäre oder tertiäre Leckagen** handelt. Eine Leckage gilt dann als primär und somit als ursächlich für wahrnehmbare Luftströmungen, wenn sich das Leck in der planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitschicht bzw. Luftdichtheitsebene befindet. Davon abgegrenzt werden sekundäre und tertiäre Leckagen, bei denen das Leck in einer anderen, nicht planmäßig die Funktion der Luftdichtheit übernehmenden Schicht bzw. Ebene liegt und damit als nicht ursächlich für wahrnehmbare Luftströmungen anzusehen ist. Sekundäre und tertiäre Leckagen unterscheiden sich durch ihre Lage

gegenüber der planmäßig vorgesehene Luftdichtheitsschicht (Bild 2.7). 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 vorgesehene Luftdichtheitsschicht vorliegt. Wird eine auch in der Nutzungsphase vom Innenraum aus sichtbare Schicht (z. B. Plattenwerkstoff) planmäßig als Luftdichtheitsebene vorgesehen, gibt es definitionsgemäß nur primäre und tertiäre Leckagen. Primäre, sekundäre und tertiäre Leckagen können im Hinblick auf Strömungswiderstände in einer Konstruktion seriell und parallel wirksam sein.

Bauteile und Bauprodukte sind für Luft mehr oder weniger durchlässig und werden nach Bild 2.6 als stofflich bedingte Leckagen bezeichnet. Ferner können Luft-Leckagen danach unterschieden werden, ob sie planmäßig und in diesem Zusammenhang funktionsbedingt vorgesehen sind oder außerplanmäßig vorliegen. Als typische Vertreter planmäßiger Leckagen gelten diejenigen zwischen Flügel und Blendrahmen an Fenstern mit definierter Luftdurchlässigkeit.

Mit internen Leckagen wird zum Ausdruck gebracht, dass die Luft-Leckagen zwischen Nutzungseinheiten vorliegen. Davon zu trennen sind externe Leckagen, bei denen ein Strömungsweg/Strömungspfad vom Gebäudeinneren zur Gebäudeumgebung be-

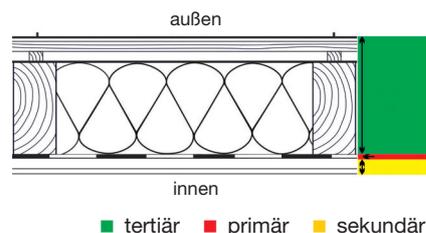


Bild 2.7: Differenzierung primärer, sekundärer und tertiärer Leckagen in Bezug auf deren Lage zu einer planmäßig vorgesehene Luftdichtheitsschicht in einem Dachquerschnitt (hier: Folie/Plattenwerkstoff unterhalb der Sparren/Dämmung als Luftdichtheitsschicht)

steht. Ist im Laufe der Zeit mit geometrischen Veränderungen an den Lecks zu rechnen, beispielsweise durch unter Spannung stehende Verklebungen, dann handelt es sich um variable Leckagen. Liegen Fehlstellen einzeln, also räumlich begrenzt vor, so werden diese als singuläre Leckagen bezeichnet. Demgegenüber wird von summarischen Leckagen gesprochen, wenn mehrere in räumlicher Nähe gehäuft auftretende Leckagen einen Leckagekomplex bilden.

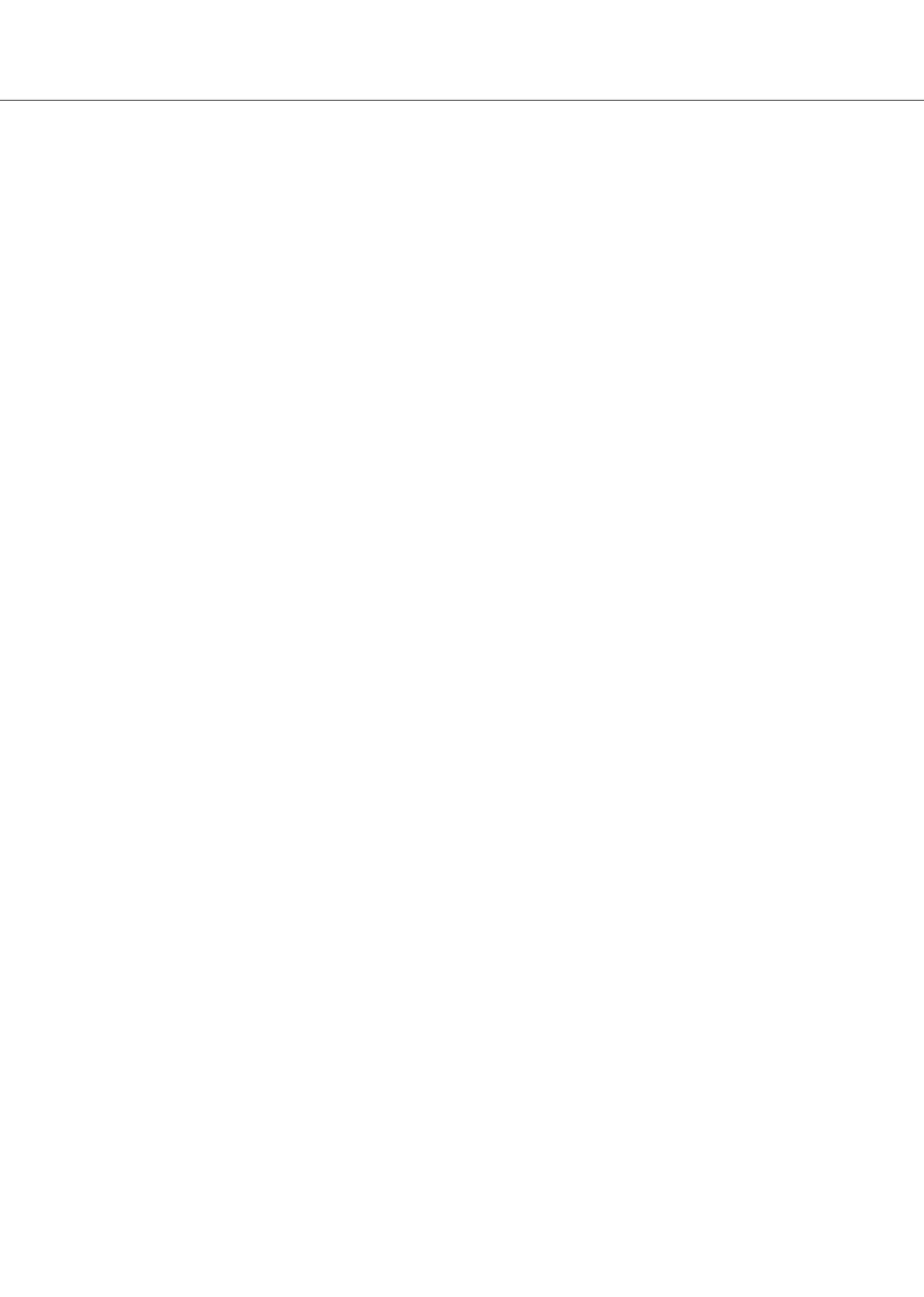
Hinsichtlich der Länge des Strömungsweges können direkte und indirekte Leckagen unterschieden werden. Direkte Leckagen stehen in Verbindung mit kurzen Strömungswegen (z. B. Fuge zwischen Flügel und Blendrahmen an einem Fenster). Indirekte Leckagen sind mit langen Strömungswegen in Verbindung zu bringen (z. B. Steckdose in Zwischenwand mit Luftverbund zur mehrere Meter entfernt liegenden Außenwand). Letztlich können nach Bild 2.6 Leckagen hinsichtlich ihrer Geometrie als punktförmige, linienförmige und flächige Leckagen beschrieben werden, wozu entsprechend z. B. Bohrlöcher, nicht abgedichtete Plattenstöße und Mauerwerk ohne Innenputz zu zählen sind.

2.3 LITERATURVERZEICHNIS

- Der Große Brockhaus (1983): Kompaktausgabe in 26 Bänden, aktualisierte 18. Auflage, Wiesbaden.
- Otto, F., Ringeler, M. (2004): Funktionsschichten und Anschlüsse für den Holzbau. holzbau handbuch, Reihe 1, Teil 1, Folge 8. Holzabsatzfonds Bonn und DGfH Innovations- und Service GmbH München (Hrsg.).



Bild 2.6: Einzelsprache von Leckagen (Mikrobetrachtung)



3 Umfrage unter Sachverständigen und Messdienstleistern

3.1 METHODISCHES VORGEHEN

Ein wesentlicher Baustein der Forschungsarbeit ist eine im Jahr 2015 durchgeführte, bundesweite Umfrage unter rund 1.500 Sachverständigen der Beststellungsgebiete Schäden an Gebäuden und Dachdeckerhandwerk sowie unter rund 500 Personen, die in Verbindung zum Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen stehen und überwiegend als Messdienstleister tätig sind.

In Bild 3.1 wird der von der Forschergruppe entwickelte Fragebogen gezeigt, der auf Literaturangaben (vgl. Kapitel 1) und der Auswertung von Gutachten und bauphysikalischen Beratungen der Forscher aufbaut.

In dem Fragebogen wird nach Angaben zu positiven und negativen Erfahrungen mit Luft-Leckagen sowie deren Ursachen gefragt. Ferner wird danach gefragt, ob konkrete Objekte benannt werden können und hierfür Pläne, Skizzen, Fotos zur Verfügung stehen und ob diese Objekte besichtigt werden können.

Der Fragebogen wurde mit der Post und mit E-Mail an die Zielgruppe gesendet. Zur Erhöhung des Rücklaufs wurden auch Rundmails an interessierte Fachkollegen verschickt sowie weitere Personen, die im Forschungsthema tätig sind, direkt angesprochen. Dadurch gab es auch Rückmeldungen aus der Schweiz und Österreich. Insgesamt liegen 96 ausgefüllte Fragebögen vor.

Die Teilnahme an der Umfrage bedeutete für die angesprochenen Personengruppen einen entsprechenden Arbeitsaufwand. Um einen nennenswerten Rücklauf zu erhalten, war die Umfrage auf großes Interesse und Wohlwollen der Teilnehmer angewiesen. Die Rückläufe an Fragebögen und eingereichten Praxisfällen bzw. Untersuchungsobjekten (vgl. Kapitel 4) sind nicht im Sinne einer repräsentativen Stichprobe zu verstehen. Es sollen damit Tendenzen zu Schadensmechanismen und Leckagearten in Abhängigkeit von den jewei-

ligen Einbaurandbedingungen aufgezeigt werden.

3.2 UMFRAGEERGEBNISSE

3.2.1 TÄTIGKEITSFELDER UND TÄTIGKEITSDAUER DER UMFRAGETEILNEHMER

Aus Bild 3.2 geht hervor, dass rund 60 % der Teilnehmer an der Umfrage sich dem Tätigkeitsfeld Sachverständiger und rund 20 % sich dem Tätigkeitsfeld Messdienstleister zuordnen. Etwas weniger als die Hälfte der Teilnehmer (47 %) gibt an, zwischen 11 und 20 Jahren im Tätigkeitsfeld aktiv zu sein. Etwa ein Viertel blickt auf eine bis zu zehnjährige und ein Fünftel auf eine mehr als zwanzigjährige Tätigkeit zurück (Bild 3.3).

3.2.2 OBJEKTANZAHL PRO UMFRAGETEILNEHMER UND OBJEKTALTER

Deutliche Unterschiede zeigen sich bei den Umfrageteilnehmern im Hinblick auf die Angaben zur Anzahl der von ihnen zu untersuchenden bzw. zu

beurteilenden Objekte in einem Zeitraum von zehn Jahren. Die Extreme bewegen sich zwischen einem Objekt und 2.000 Objekten pro Umfrageteilnehmer. Wie aus Bild 3.4 hervorgeht, geben etwas mehr als ein Drittel der Umfrageteilnehmer an, dass sie mehr als 100 Objekte zu bearbeiten hatten. Dabei handelt es sich um Kolleginnen und Kollegen, die Messungen zur Luftdurchlässigkeit durchführen. Die Dokumentationen umfassen in diesen Fällen die reinen Messunterlagen bzw. die erforderlichen Messprotokolle. Sachverständige können solch eine große Anzahl nicht benennen. Dieser Personenkreis findet sich in den 21 % und 27 % der Umfrageteilnehmer, die eine Objektanzahl von 11 bis 50 bzw. von bis zu 10 pro Person aufweisen. Dies lässt sich auf die häufig speziellen Fragestellungen und aufwendigen Untersuchungen zu Ursachen und Wirkungen sowie eine entsprechende umfangreiche Ausarbeitung zurückführen.

1. Tätigkeitsfeld:			
1.1 Ich bin seit <input type="text"/> Jahren überwiegend als <input type="checkbox"/> Sachverständiger <input type="checkbox"/> Messdienstleister tätig.			
1.2 In meiner überwiegenden Tätigkeit nach 1.1 hatte ich zum Thema Luftdichtheit von Gebäuden in den letzten maximal zehn Jahren ca. <input type="text"/> Objekte zu beurteilen.			
1.3 Dabei handelte es sich überwiegend um Objekte <input type="checkbox"/> während des Bauprozesses <input type="checkbox"/> am Ende des Bauprozesses (EB) <input type="checkbox"/> im Neubau (EB-5 Jahre) <input type="checkbox"/> im Bestand (> 5 Jahre)			
2. Angabe positiver Erfahrungen:			
2.1 Bei der unter 1.2 genannten Objektanzahl sind ca. <input type="text"/> Objekte enthalten, bei denen keine Schäden / Beeinträchtigungen aufgetreten sind, obwohl Luft-Leckagen vorliegen / vorlagen.			
2.2 Welches Alter weisen / wiesen diese Gebäude auf? ca. <input type="text"/> bis <input type="text"/> Jahre			
2.3 Welche Arten von Leckagen wurden dort überwiegend festgestellt? (ggf. Zusatzblatt)			
2.4 Welche Randbedingungen waren Ihrer Meinung nach gegeben, dass die unter 2.3 genannten Luft-Leckagen keine Schäden / Beeinträchtigungen hervorgerufen haben? (ggf. Zusatzblatt)			
3. Angabe negativer Erfahrungen:			
3.1 Bei der unter 1.2 genannten Objektanzahl sind ca. <input type="text"/> Objekte enthalten, bei denen Schäden / Beeinträchtigungen aufgetreten sind, die auf Luft-Leckagen zurückzuführen sind/waren.			
3.2 Welche Arten von Leckagen wurden dort festgestellt? (ggf. Zusatzblatt)			
3.3 Worauf ließen sich die hauptsächlichsten Leckagen / Mängel in der Luftdichtheitsebene nach Ihrer Einschätzung zurückführen? <input type="checkbox"/> unzureichende Planung <input type="checkbox"/> Machbarkeitsproblem <input type="checkbox"/> Ausführungsfehler <input type="checkbox"/> Beschädigung durch den Nutzer <input type="checkbox"/> unbekannt <input type="checkbox"/> Sonstiges (ggf. Zusatzblatt)			
3.4 Welche Schäden / Beeinträchtigungen lagen schwerpunktmäßig vor? <input type="checkbox"/> Feuchteeintrag in die Konstruktion/Bauschaden <input type="checkbox"/> Energieverluste <input type="checkbox"/> Beeinträchtigung der Behaglichkeit <input type="checkbox"/> Sonstiges (ggf. Zusatzblatt)			
3.5 In welchem Zeitraum traten die Schäden / Beeinträchtigungen besonders häufig auf? <input type="checkbox"/> innerhalb des ersten Jahres nach der Herstellung <input type="checkbox"/> nach 1 - 5 Jahren <input type="checkbox"/> nach mehr als 5 Jahren			
3.6 Ich kann meine negativen Erfahrungen mit Luft-Leckagen an nachfolgend genannten konkreten Objekten erläutern:			
Adresse des Objekts	Baujahr	Gibt es Pläne/ Skizzen/Fotos?	Ist eine Besichtigung möglich?

Bild 3.1: Fragebogen für Sachverständige und Messdienstleister (Auszug)

In Bild 3.5 wird das Alter der von den Umfrageteilnehmern zu bearbeitenden Objekte aufgeführt. Die Kategorisierung geht auf die Verfasser zurück, da bei der Umfrage keine Zeiträume vorgegeben wurden, sondern eine freie Antwort erwünscht war. Nahezu die Hälfte der in Augenschein genommenen bzw. messtechnisch untersuchten Objekte gehört der Kategorie 0 bis 5 Jahre an. Etwa zu gleichen Teilen werden die Zeiträume 6 bis 10 Jahre und 11 bis 50 Jahre genannt. Eine weitere Differenzierung der Antworten zu den Untersuchungszeitpunkten wird in Bild 3.6 gezeigt. Danach geben mehr als die Hälfte der Umfrageteilnehmer an, dass sie am Ende des Bauprozesses bzw. in den ersten fünf Jahren nach der Objekterrichtung mit der Untersuchung der Objekte beauftrag wurden (jeweils 55 Nennungen). Deutlich seltener (28-mal, 29-mal) werden Untersuchungszeitpunkte im Bestand (> 5 Jahre) bzw. während des Bauprozesses genannt.

Die Untersuchungen während oder am Ende des Bauprozesses gehen überwiegend auf die Messdienstleister zurück. Sachverständige werden häufig erst nach Gebäudefertigstellung oder am Ende des Gewährleistungszeitraumes hinzugezogen.

3.2.3 ERFAHRUNGEN MIT SCHADENS- UND NICHTSCHADENSFÄLLEN

In dem Fragebogen werden zwei Fallvarianten unterschieden: Zum einen Fälle, bei denen trotz Leckagen keinerlei Beeinträchtigungen bzw. Schäden an den Gebäuden bzw. Objekten auftraten, und zum anderen Fälle, bei denen es wegen vorhandener Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen zu Schäden kam.

Die Zahl der Kolleginnen und Kollegen, die sich mit der erst- oder zweitgenannten Fallvariante zu beschäftigen hatten, ist etwa gleich groß (63 bzw. 71 Angaben). Aufgrund der Möglichkeit der Mehrfachnennung wird 55-mal sowohl die Untersuchung von Nichtschadensfällen als auch die Beurteilung von Schadensfällen angegeben. Von den 96 auf die Umfrage antwortenden Kolleginnen und Kollegen geben drei Personen an, dass sie in den letzten 10 Jahren keine Schäden zu beurteilen hatten, die auf Leckagen in den Luftdichtheitsschichten der Gebäude zurückzuführen wären (ca. 3 %). 87 Personen (ca.

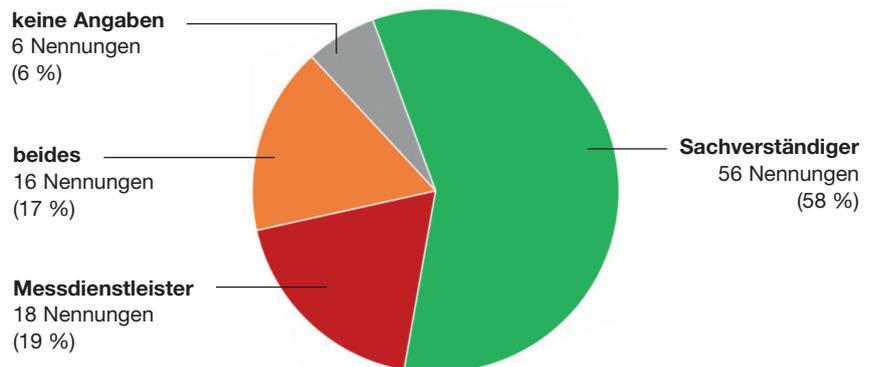


Bild 3.2: Tätigkeitsfelder der Umfrageteilnehmer

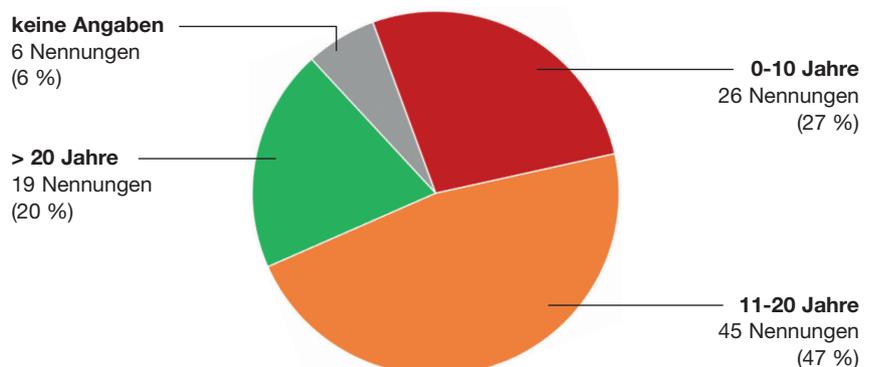


Bild 3.3: Tätigkeitsdauer der Umfrageteilnehmer

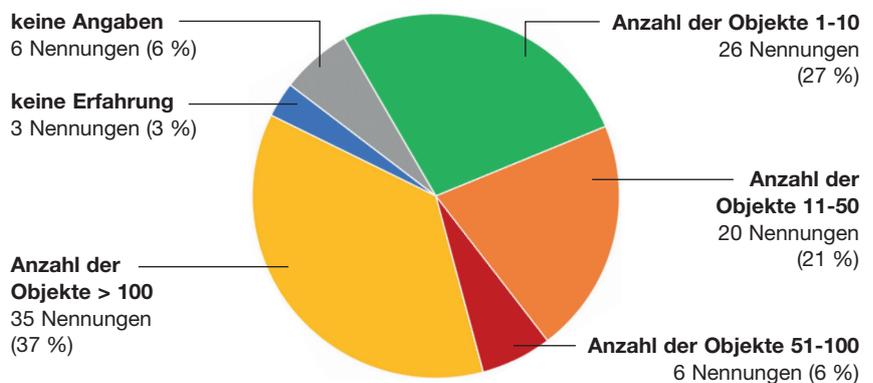


Bild 3.4: Objektanzahl pro Umfrageteilnehmer

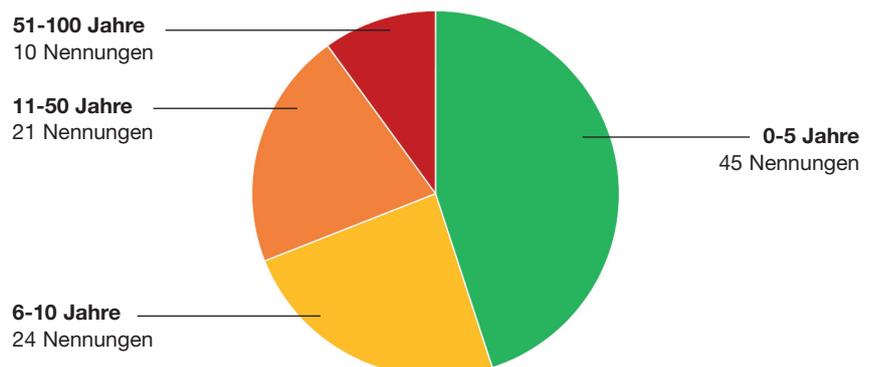


Bild 3.5: Alter der von den Umfrageteilnehmern zu bearbeitenden Objekte (Einteilung der Kategorien durch die Verfasser)

91 %) benennen insgesamt 17.540 zu untersuchende Leckagefälle.

Die genannte Anzahl der Schadens- und Nichtschadensfälle variiert deutlich: Etwa 12.000 (11.874) schadensfreien Gebäuden stehen ca. 2.500 (2.642) Gebäude mit Schäden gegenüber. Hier ist allerdings zu beachten, dass Personen, die messtechnisch bereits während oder am Ende des Bauprozesses vor Ort sind, relativ viele Objekte auf sich vereinen. Sie sind in einer frühen Lebensphase eines Gebäudes zugegen, in der sich überwiegend noch keine Beeinträchtigungen bzw. Schäden offenbaren.

In den Fragebögen werden insgesamt 53 mögliche Untersuchungsobjekte genannt. Für 22 Objekte sehen die entsprechenden Umfrageteilnehmer die Möglichkeit für einen Ortstermin.

3.2.3.1 NICHTSCHADENSFÄLLE

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse zu den Objekten eingegangen, bei denen trotz festgestellter Leckagen keine nennenswerten Schäden aufgetreten sind. Die Anzahl der Objekte pro Umfrageteilnehmer schwankt von einem bis zu mehr als 100 Gebäuden. Die meisten Nennungen (jeweils 21) entfallen auf bis zu 10 bzw. mehr als 100 untersuchte Objekte (Bild 3.7).

In nahezu der Hälfte der Fälle beträgt das Alter der untersuchten Objekte unter fünf Jahre. Etwa zu gleichen Teilen werden die Altersklassen 11 bis 50 Jahre und 51 bis 100 Jahre genannt (Bild 3.8).

Von den Umfrageteilnehmern werden zahlreiche Beispiele für unterschiedliche Leckagearten genannt. In Bild 3.9 sind diese zu den folgenden Leckagegattungen zusammengefasst: Leckagen in Bauteilebene (grüne Balken), Leckagen an Übergängen zwischen unterschiedlichen Bauteilen (gelbe Balken), Leckagen im Bereich von Durchdringungen (blaue Balken) sowie Leckagen, die auf allgemeine handwerkliche Fehler (Mängel) zurückzuführen sind (rote Balken).

Die meisten Nennungen liegen für die Leckagen an Übergängen zwischen unterschiedlichen Bauteilen vor. Dort wiederum werden die meisten Fehlstellen für Fenster- und Türanschlüsse und für Einbindestellen der Sparren und Pfetten in das angren-

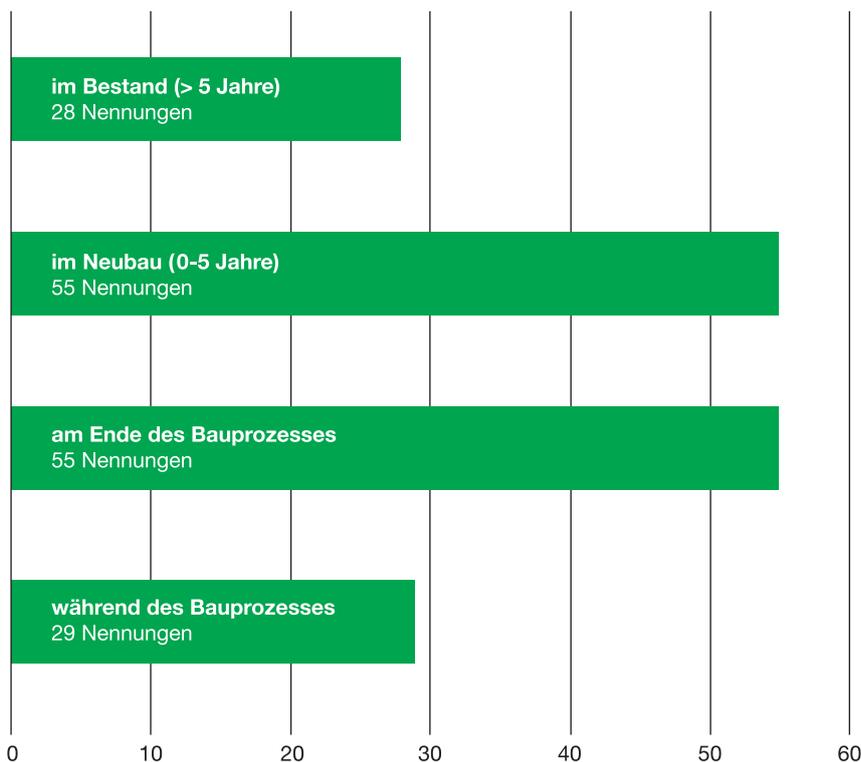


Bild 3.6: Untersuchungszeitpunkt der Objekte (Mehrfachnennungen möglich)

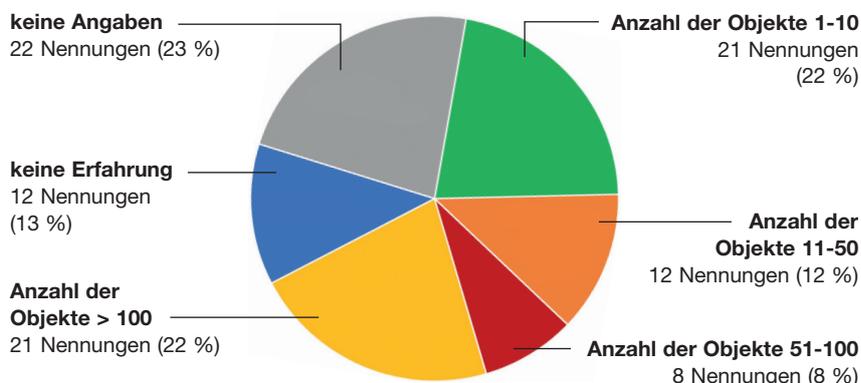


Bild 3.7: Objektanzahl pro Umfrageteilnehmer bei Nichtschadensfällen

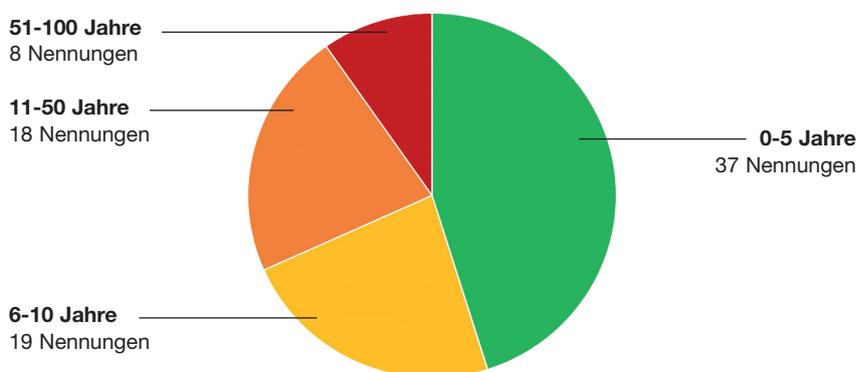


Bild 3.8: Objektalter Nichtschadensfälle

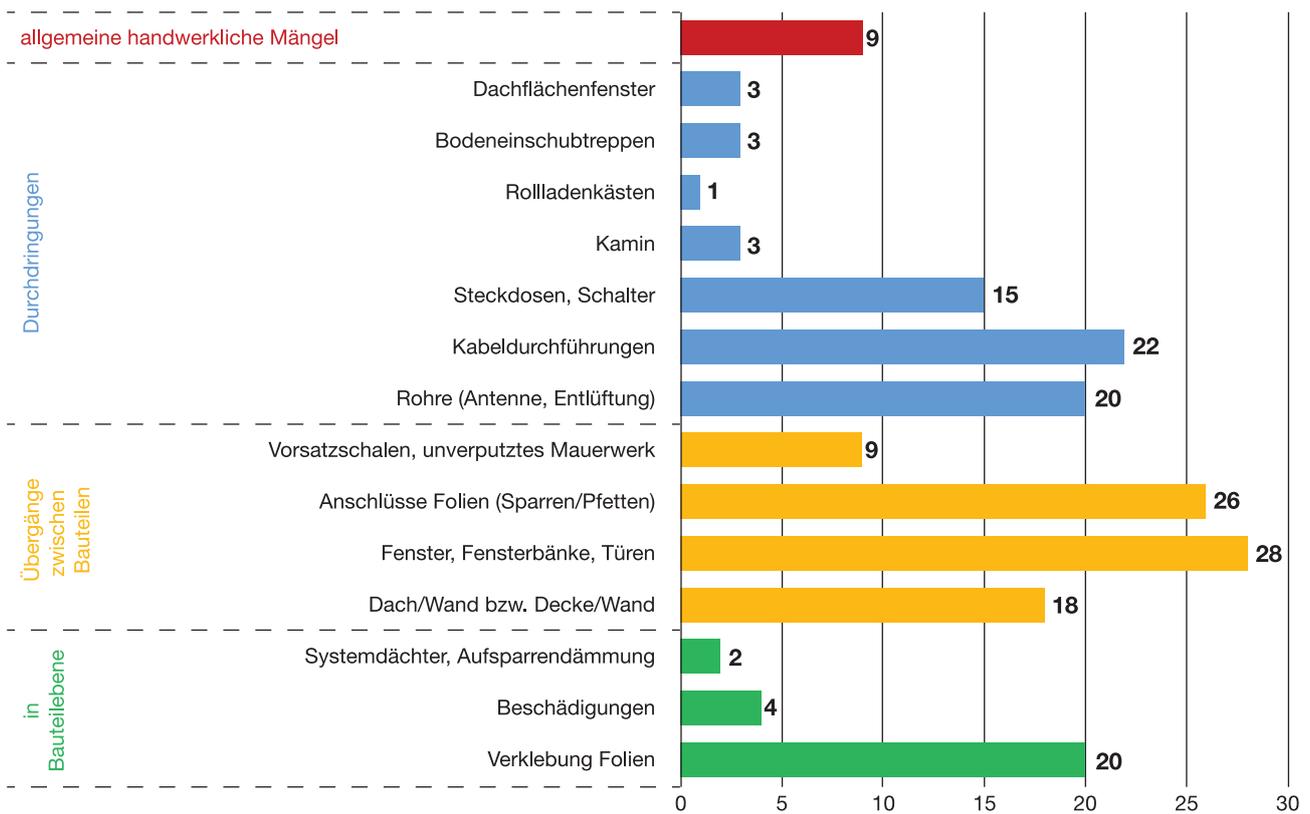


Bild 3.9: Arten und Häufigkeit der benannten Leckagen ohne Schadensfolgen (Mehrfachnennungen möglich)

zende Mauerwerk genannt. An dritter Stelle der Nennungen folgen die linearen Anschlüsse zwischen Dach und Wand im Bereich von Streichsparren oder Decken-Wand-Übergängen entlang der Geschossdeckenaufleger.

In der Gattung Durchdringungen werden die meisten Fehlstellen im Zusammenhang mit Kabeldurchführungen sowie dem Einbau von Rohrleitungen (z. B. Strangentlüftungen) genannt. Leckagen an Steckdosen und Schaltern folgen an dritter Stelle. Nach der Häufigkeit der Nennungen folgen gemäß Bild 3.9 die Leckagen in der Bauteilebene den Leckagen an Übergängen und Durchdringungen. In der Bauteilebene werden Leckagen in Verbindung mit Verklebungen der verwendeten Luftdichtheitsfolien am häufigsten genannt. Beschädigungen der Luftdichtheitsschicht und Leckagen in Verbindung mit Systemdächern und Aufsparrendämmungen nennen die Umfrageteilnehmer selten im Zusammenhang mit Ursachen für Leckagen ohne Schadensfolgen.

In Bild 3.10 werden die Ursachen für Fälle genannt, bei denen es trotz Leckagen nicht zu Schadensereignissen – hier in feuchtetechnischer

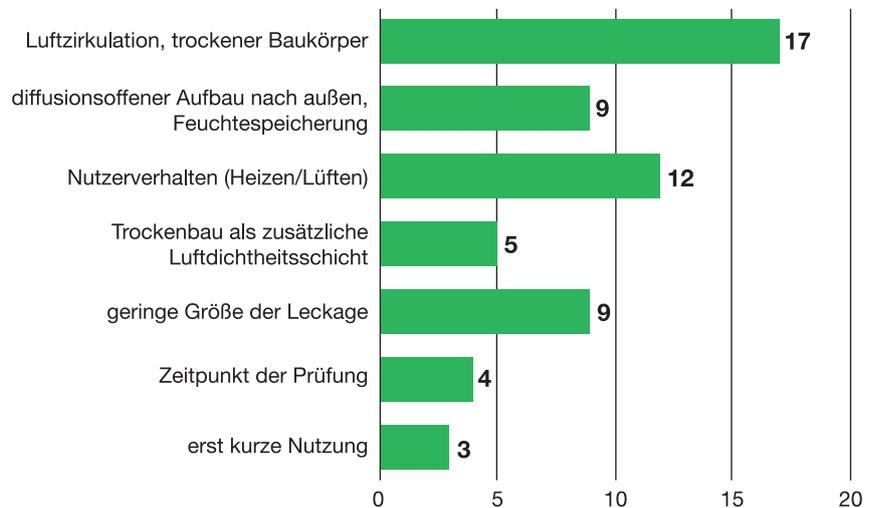


Bild 3.10: Ursache für Schadensfreiheit (Mehrfachnennungen möglich)

Sicht – gekommen ist. Als wichtigste Ursache ist nach der Anzahl der Nennungen die Möglichkeit einer ausreichenden Luftzirkulation mit trockenen Baukörpern festzuhalten. Ferner wird ein angepasstes Nutzerverhalten mit regelmäßigem Heizen und Lüften als bedeutsam angesehen. Zahlenmäßig gleichauf werden ein diffusionsoffener Aufbau nach außen mit der damit verbundenen Austrocknungsmöglichkeit der Konstruktion einschließlich der Feuchtespeicherfähigkeit der verwen-

deten Baustoffe und eine geringe Leck-/Leckagegröße genannt. Als weitere Ursachen für Schadensfreiheit können Bild 3.10 das Vorhandensein einer zusätzlichen, die Luftdichtheit unterstützenden Schicht und der Zeitpunkt der Prüfung sowie eine erst kurze Nutzungszeit entnommen werden. Bei den zwei letztgenannten Punkten soll zum Ausdruck gebracht werden, dass noch nicht ausreichend Zeit vergangen ist, in der sich Schäden hätten einstellen können.

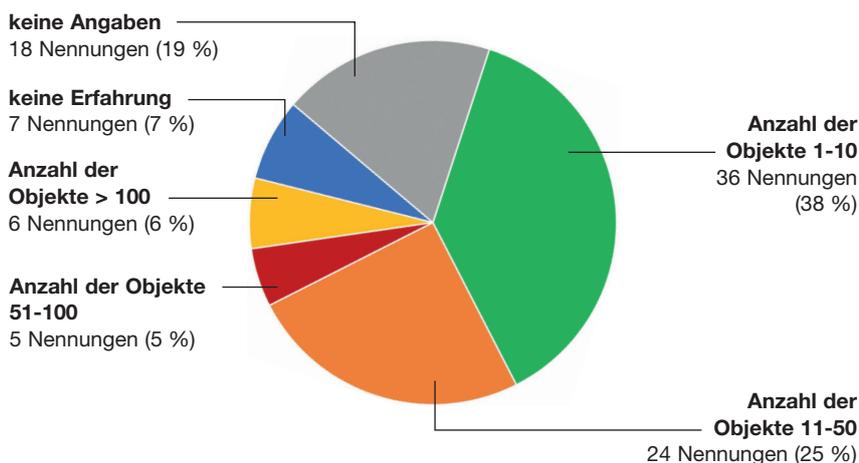


Bild 3.11: Objektanzahl pro Umfrageteilnehmer bei Schadensfällen

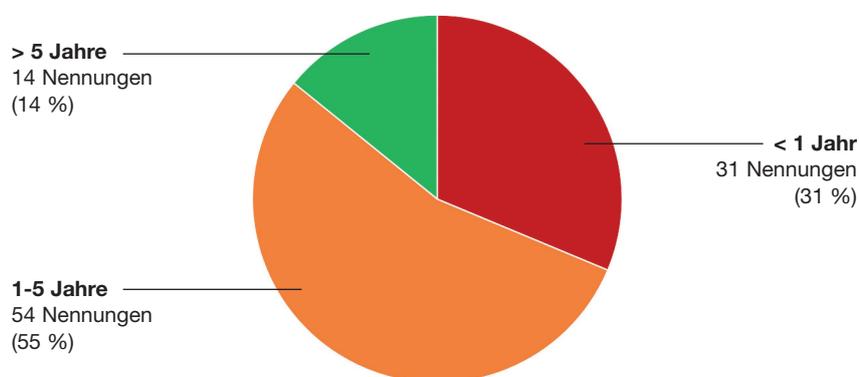


Bild 3.12: Zeitpunkt des Schadenseintritts

3.2.3.2 SCHADENSFÄLLE

Bei der Fallvariante Schadensfälle ist die Anzahl der Objekte pro Umfrageteilnehmer geringer als bei der Fallvariante Nichtschadensfälle (Bild 3.11). Grund hierfür ist, dass Aussagen zu Schadensfällen im Wesentlichen von Sachverständigen vorliegen und nicht von den befragten Messdienstleistern.

Etwa 40 % der Befragten entfallen auf die Objektanzahl 1-10 (36 Nennungen) und 25 % auf die Objektanzahl 11-50 (24 Nennungen). 51-100 und mehr als 100 Untersuchungsobjekte pro Teilnehmer sind die Ausnahme.

Deutlich ist die Aussage zum Zeitpunkt des durch unterschiedliche Leckagen bedingten Schadenseintritts. Nach Bild 3.12 geben hierzu 86 % der Teilnehmer den Zeitraum der ersten fünf Jahre (< 1 Jahr, 1-5 Jahre) an. Etwa 40 % davon benennen das erste Jahr der Gebäudestandzeit (31 Nennungen) als häufigsten Zeitraum des Schadenseintritts. Hier zeigen sich Parallelen zur Forschungsarbeit an unbelüfteten Holzdachkonstruktionen (Oswald et al. 2014).

Bild 3.13 zeigt die Arten und Häufigkeiten der benannten Leckagen mit

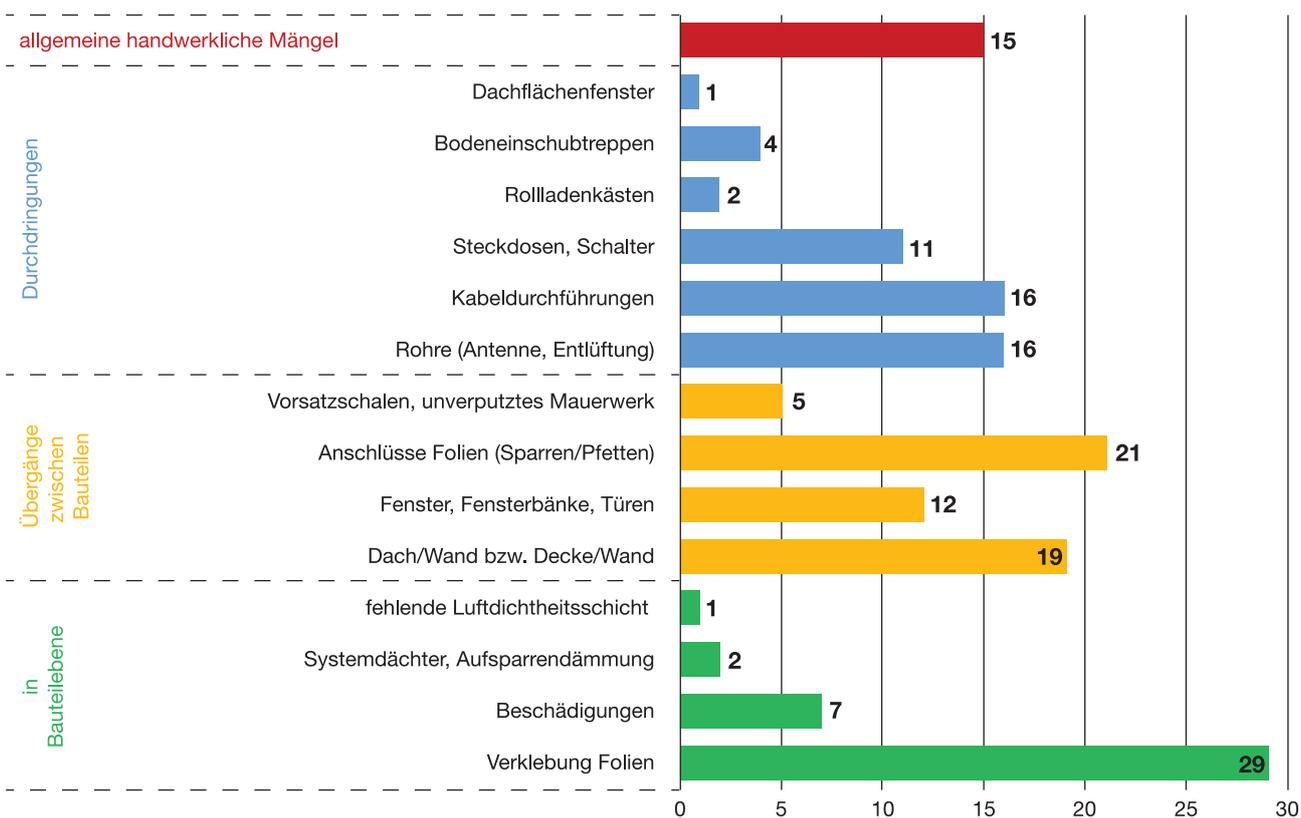


Bild 3.13: Arten und Häufigkeit der benannten Leckagen mit Schadensfolgen (Mehrfachnennungen möglich)



Bild 3.14a: Typische Fehlstellen in der Folienverklebung



Bild 3.14b: Typische Fehlstellen in der Folienverklebung



Bild 3.15: Anschluss der Luftdichtheitsschicht auf der Fußpfette – nicht auf dem Mauerwerk

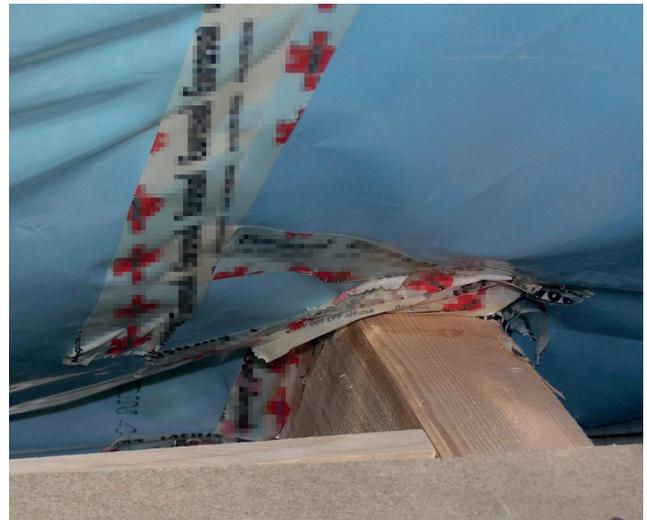


Bild 3.16: Ungeeigneter Anschluss an eine Durchdringung

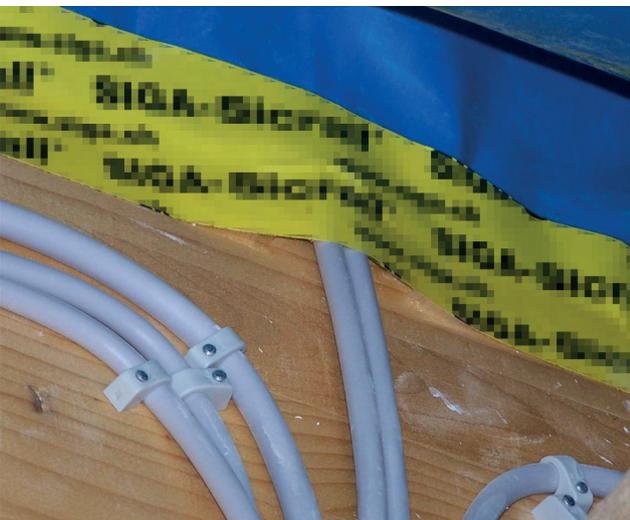


Bild 3.17: Offener Anschluss im Bereich von Kabeldurchführungen



Bild 3.18: Offene Anschlüsse im Bereich von Durchführungen

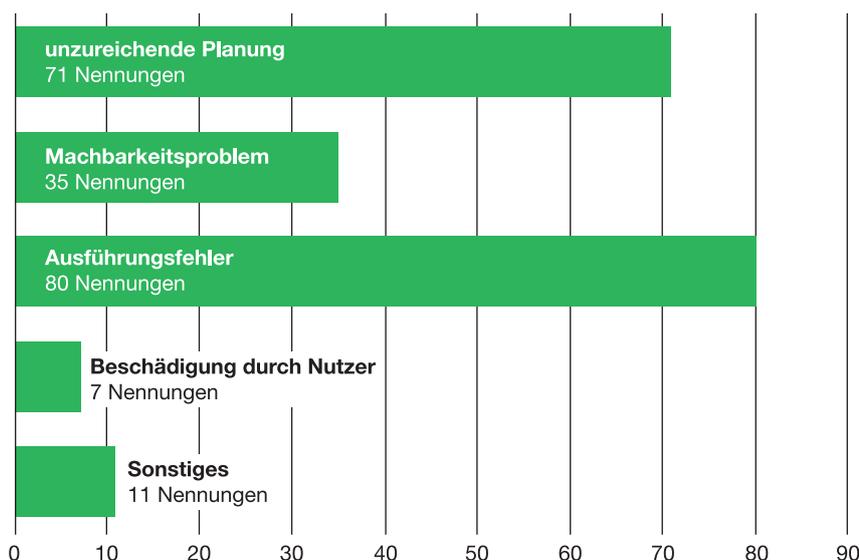


Bild 3.19: Ursache für Schäden (Mehrfachnennungen möglich)

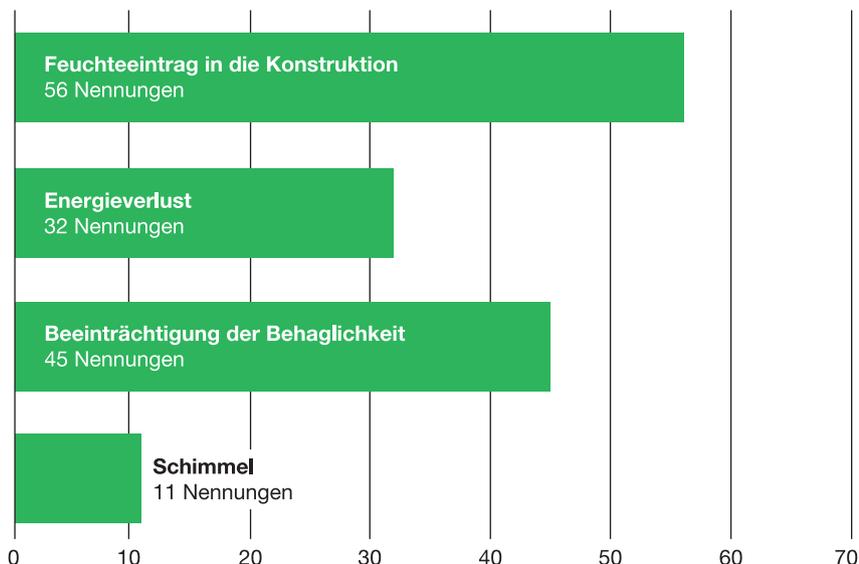


Bild 3.20: Arten der benannten Schäden (Mehrfachnennungen möglich)

Schadensfolge, die tendenziell mit den benannten Leckagen ohne Schadensfolge übereinstimmen. Danach werden Leckagen mit Schadensfolge häufig mit unzureichenden Verklebungen von Folien und deren unzureichenden Anschlüssen an Sparren und Pfetten in Verbindung gebracht (vgl. Bild 3.14a und Bild 3.14b).

Nach Bild 3.13 kommen an dritter Stelle Übergänge zwischen unterschiedlichen Bauteilen (Dach/Wand bzw. Decke/Wand), gefolgt von verschiedenen Arten von Durchdringungen.

In der Gruppe der Übergänge zwischen den Bauteilen werden die handwerklich anspruchsvollen An-

schlüsse der Folien zu Sparren und Pfetten sowie der Dach-Wand- bzw. Decken-Wand-Anschluss als Hauptproblempunkte genannt (vgl. Bild 3.15 und Bild 3.16).

Das Problemfeld der Durchdringungen betrifft Kabel- und Rohrdurchführungen gleichermaßen. Weniger häufig werden Steckdosen und Schalter genannt (vgl. Bild 3.17 und Bild 3.18).

Aus Bild 3.19 kann entnommen werden, dass als Ursachen für Leckagen und die damit einhergehenden Schäden hauptsächlich Ausführungsfehler (80 Nennungen), unzureichende Planung (71 Nennungen) und Machbarkeitsprobleme (35 Nennungen) angeführt werden. Beschädigungen durch

den Nutzer (7 Nennungen) wird als Schadensursache ein geringer Stellenwert beigemessen.

Nach Bild 3.20 werden als Schadensarten überwiegend der Feuchteeintrag in eine Konstruktion (56 Nennungen) und die Beeinträchtigung der Behaglichkeit (45 Nennungen) genannt. Erst an dritte Stelle treten energetische Gesichtspunkte (32 Nennungen). Schimmelbefall, der auf Fehlstellen in der Luftdichtheitsschicht zurückzuführen ist, ist gemäß Umfrage von deutlich untergeordneter Bedeutung.

3.3 ZUSAMMENFASSUNG

Die Umfrage lässt erkennen, dass Sachverständige und Messdienstleister häufig zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit dem Thema Leckagen konfrontiert werden. Dies kann auf die unterschiedlichen Aufgabenstellungen zurückgeführt werden. Messdienstleister werden eher zu einem relativ frühen Zeitpunkt in der Lebensphase eines Objektes eingebunden, zu dem häufig noch keine Schäden vorliegen. Sachverständige hingegen werden eher gerufen, wenn bereits Schäden aufgetreten sind. Häufig vereinen Messdienstleister zahlenmäßig mehr untersuchte Objekte auf sich.

Bei Gebäuden gibt es Luft-Leckagen, die keine Schäden nach sich ziehen, und solche, die nennenswerte Schäden verursachen. Die Umfrage in unterschiedlichen Gruppen (Messdienstleister, Sachverständige) und, hierdurch bedingt, zu unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten, kann als Grund dafür gesehen werden, dass deutlich mehr Gebäude als schadensfrei statt schadensbehaftet benannt werden. Arten und Häufigkeiten der benannten Leckagen mit und ohne Schadensfolgen stimmen tendenziell überein. Leckagen mit Schadensfolge werden häufig mit unzureichenden Verklebungen von Folien und deren unzureichenden Anschlüssen an Sparren und Pfetten in Verbindung gebracht. Fehlerhafte Ausführung und unzureichende Planung gelten als Hauptursachen für Leckagen und die von ihnen ausgehenden Schäden.

Hinsichtlich Schäden bzw. Beeinträchtigungen wird an erster Stelle der Feuchteeintrag in eine Konstruktion genannt. Wenn Schäden auftreten,

entstehen diese meist in den ersten fünf Jahren der Gebäudestandzeit. Erwartungsgemäß liegt der Schwerpunkt schadensträchtiger Leckagen im Dachbereich, der häufig zugleich die Überdruckzone eines Gebäudes in der kalten Jahreszeit ist. In diesem Kontext sind auch die Antworten auf Ursachen für Schadensfreiheit zu sehen, wonach in erster Linie die Luftzirkulation (ausreichende Belüftung des Dachaufbaus auf der raumabgewandten Seite der Wärmedämmung) und der trockene Baukörper als Schäden verhindernd genannt werden.

3.4 DANKSAGUNG

Eine solche Untersuchung ist nur möglich, wenn ausreichend Teilnehmer unentgeltlich an der Umfrage teilnehmen, persönliche Erfahrungen und Erkenntnisse einbringen sowie umfangreiches Informationsmaterial zur Verfügung stellen. Einige Kollegen haben darüber hinaus geholfen, geeignete Untersuchungsobjekte zu finden. Ihnen allen gilt daher ein besonderer Dank:

- Herr Hartwig Bernhardt-van Laak, Eurasburg
- Herr Hagen Bertram, Seeshaupt
- Herr Reinhard Bücken, Allensbach
- Herr Carsten Clobes, Wabern
- Herr Andreas Geuther, Oberau
- Herr Bernd Grothe, Weil am Rhein
- Herr Paul H. von Haxthausen, Grasbrunn
- Herr Helmut König, Weitnau
- Herr Thomas Kretzschmar, München
- Herr Andreas Marchtaler, Bad Überkingen
- Herr Michael Meyer-Olbersleben, Lüneburg
- Herr Marco Simon Ranz, Freiburg
- Herr Richard Riekenbrauk, Düsseldorf
- Herr Andreas R. Ruhdorfer, Starnberg
- Herr Wilhelm-Peter Ruhdorfer, Starnberg
- Herr Christof Scheuber, Linkenheim
- Herr Heinz Schnaubelt, München
- Herr Ben Standecker, Schwabach
- Herr Günther Stiegelmaier, Augsburg
- Herr Volker Steinbauer, Happurg-Thalheim
- Herr Christoph Tanner, CH-Winterthur
- Herr Michael Wehrli, CH-Martalen
- Herr Wolfgang Wendel, Kaufbeuren

3.5 LITERATURVERZEICHNIS

- 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: IRB Verlag.

4 Objektdokumentation der Praxisfälle

Die folgende Objektdokumentation umfasst in der Umfrage benannte Praxisfälle, die teilweise besichtigt und detailliert untersucht wurden. Außerdem werden Schadensfälle aus der eigenen Gutachtertätigkeit der Forschergruppe aufgeführt. Die nachfolgend aufgeführten 33 Praxisfälle befinden sich überwiegend in Deutschland (Bild 4.1).

Es handelt sich in den meisten Fällen um Wohngebäude. Bei zwei Objekten liegt eine wohnähnliche Nutzung vor (Seminargebäude, Mehrzweckgebäude), bei zwei weiteren Fällen handelt es sich um Schwimmhallen. Für 15 Praxisfälle liegen messtechnisch gewonnene Ergebnisse zur Leckagesuche und zur Luftdurchlässigkeit vor. In fünf Fällen werden die zulässigen n_{50} -Werte überschritten. In einigen Fällen fanden die Messungen während des Bauprozesses statt, so dass die Fehlstellen ohne großen Aufwand nachgebessert werden konnten. Für die übrigen Objekte werden trotz Einhaltung der Grenzwerte zahlreiche Leckagen genannt.

In 26 Praxisfällen liegen die meisten Leckagen in den Dachflächen bzw. allgemein in den Dachgeschossen vor. Für zwei Objekte werden Leckagen im Bereich der obersten Geschossdecke bzw. in einem weiteren entlang des Geschossdeckenaufslagers benannt. Bei drei Objekten werden Leckagen im Zusammenhang mit Fensteranschlüssen thematisiert. Lediglich bei einem Objekt von diesen drei Objekten wird eine Leckage in der Luftdichtheitsebene im Sockelbereich beschrieben.

Die Luft-Leckagen werden in 18 Fällen mit erhöhten Feuchtegehalten in der Dachkonstruktion bis hin zu starkem Pilz-/Hausschwammbefall bzw. zur vollständigen Verrottung der gesamten Konstruktion in Verbindung gebracht. Für sieben Gebäude wird das Auftreten von Schimmelpilzen auf Holzoberflächen im nicht ausgebauten Dach oder im Bereich von Dachüberständen benannt. Über Zuger-

scheinungen und starke Luftströmungen wird in sechs Fällen berichtet.

Bei drei Praxisfällen sind trotz Leckagen keine Schäden aufgeführt. In zwei Fällen wird dies mit frühzeitig durchgeführten, baubegleitenden Untersuchungen und der damit verbundenen relativ einfachen Leckagereduktion begründet.



Bild 4.1: Karte zur regionalen Lage der Praxisfälle

Tabelle 4.1: Verfärbungen mit Schimmelpilzbefall im Bereich einer Decke zu einem nicht ausgebauten Dachgeschoss

Objekt: 12-1		Zeitpunkt der Besichtigung: 2013
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienwohnhaus	
Baujahr	2003 / 2004	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2012	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Schimmelpilzerscheinungen auf Holzsparren und entlang der Fugen der OSB-Beplankung der obersten Geschossdecke	
Lage im Gebäude	nicht ausgebautes Dachgeschoss über zweitem Obergeschoss	
		Schimmelpilzbildungen auf den Holzsparren
Konstruktion (von außen nach innen)		
nicht ausgebauter, unbelüfteter und unbeheizter Dachraum		
oberste Geschossdecke	OSB-Platte – Dämmung – Holzträgerplatte – Dampfsperre – GK-Platte	
		Verfärbungen im Bereich der Fugen der OSB-Platten
Bilder zu Leckagen		
		
grau-schwarze Verfärbungen im Anschluss des eingebauten Lichttunnels an die OSB-Platte	grau-schwarze Verfärbungen im Bereich des Wechsels der Bodentreppe	Anschluss der Dampfsperre etwa 2 – 3 mm breit, teilweise lückenhaft (primäre Leckage)

Tabelle 4.2: Leckage entlang eines Fensteranschlusses im Sockelbereich

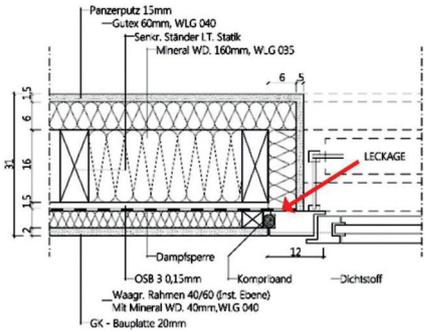
Objekt: 12-2		Zeitpunkt der Besichtigung: 2013	
Allgemeine Angaben			
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienwohnhaus		
Baujahr	2010		
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2013		
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	keine		
Lage im Gebäude	Fußpunkt bodentiefer Fensteranlage im Erdgeschoss		
n₅₀ in 1/h	0,7		
Konstruktion (von außen nach innen)			
Außenwand	Putz (1,5 cm) auf Holzfaserplatte (6 cm, WLK 040) – Holzständerwerk mit MW-Dämmung (16 cm, WLK 035) – OSB-Schalung (1,5 cm) – Dampfsperre – Installationsebene mit MW-Dämmung (4 cm, WLK 040) – GK-Platte (2 cm)		
		Detailzeichnung des Fensteranschlusses	
Bilder zu Leckagen			
			
Öffnung des Fensteranschlusses von der Raumseite: Luftdichtheitsebene verläuft auf der Außenseite des Fensterblendrahmens	Lücke in der Luftdichtheitsebene im Bereich des unteren Fensteranschlusses (Pfeil)	Öffnung des Fensteranschlusses von der Außenseite: Fehlstellen im Bereich des Anschlusses der Luftdichtheitsebene (Folie) an das Fenster (primäre Leckage)	

Tabelle 4.3: Luftströmungen aus einer Steckdose im Dachgeschoss

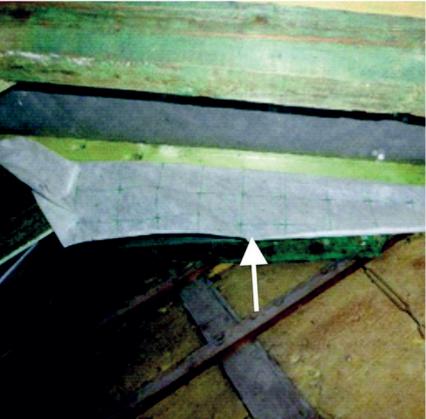
Objekt: 16-1		Zeitpunkt der Besichtigung: –
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohnhaus	
Baujahr	–	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	–	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Luftströmung aus einer Steckdose	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
		Dachöffnung zur Ursachenforschung
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Dacheindeckung auf Lattung und Konterlattung – Unterspannbahn – MW-Dämmung (18 cm) – Dampfsperre	
Bilder zu Leckagen		
		
offene Anschlüsse der Luftdichtheitsebene (Folie)	nicht geschlossene Luftdichtheitsebene (Folie) im Anschluss zum Anbaudach (Pfeil)	offene Anschlüsse der Luftdichtheitsebene zum Nachbargebäude (Pfeil, primäre Leckage)

Tabelle 4.4: Luftströmungen aus einer Steckdose und aus Einbauleuchten im Dachgeschoss

Objekt: 16-2		Zeitpunkt der Besichtigung: 2012
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohnhaus	
Baujahr	–	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2012	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Luftströmung aus einer Steckdose und aus Einbauleuchten	
Lage im Gebäude	ausgebautes Dachgeschoss	
Luftdurchlässigkeit	n_{50} in 1/h: 3,2 (große Einzelleckagen an Dachfenstern und Durchdringungen)	
		Luftdichtheitsebene (Folie oben) und aufgebrachte Dämmung (unten) während der Bauzeit
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Dacheindeckung – Vordeckung – PUR-Aufdachdämmung – Dampfsperre (Luftdichtheitsebene) – Holzsparren	
		Dachquerschnitt
Bilder zur Ausführung		
		
Anschluss der Luftdichtheitsebene an die Sparren der Gaube	offene Überlappung einer Folie unterhalb der Dacheindeckung	nicht dauerhafte Verklebung auf Holzoberfläche

Tabelle 4.5: Leckagen im Bereich der Traufe und an Kehlbalken in einem nachträglich ausgebauten Dachgeschoss

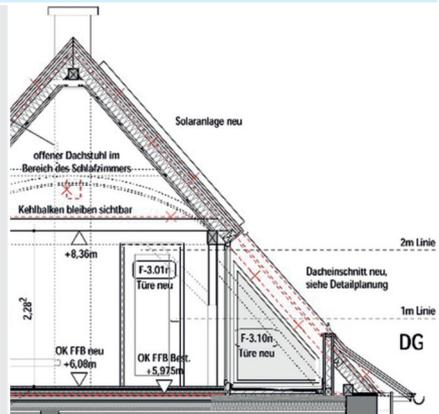
Objekt: 20-1	Zeitpunkt der Besichtigung: 2007 - 2009
Allgemeine Angaben	
Objekttyp / Nutzung	Wohnhaus
Baujahr	1937, Dachgeschossausbau 2007
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	erste Feststellung 2008 während der Bau- phase, kein Schadensbild
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	diverse Fehlstellen in der Luftdichtheits- schicht, insb. im Bereich der traufseitigen Decke zum Obergeschoss und im Bereich der Kehlbalken
Lage im Gebäude	Dachgeschoss
Haustechnik	Ölheizung, kein Lüftungssystem



Durchdringungspunkte der Luftdichtheits- schicht bei innen sichtbarer Tragkonstruk- tion des Daches

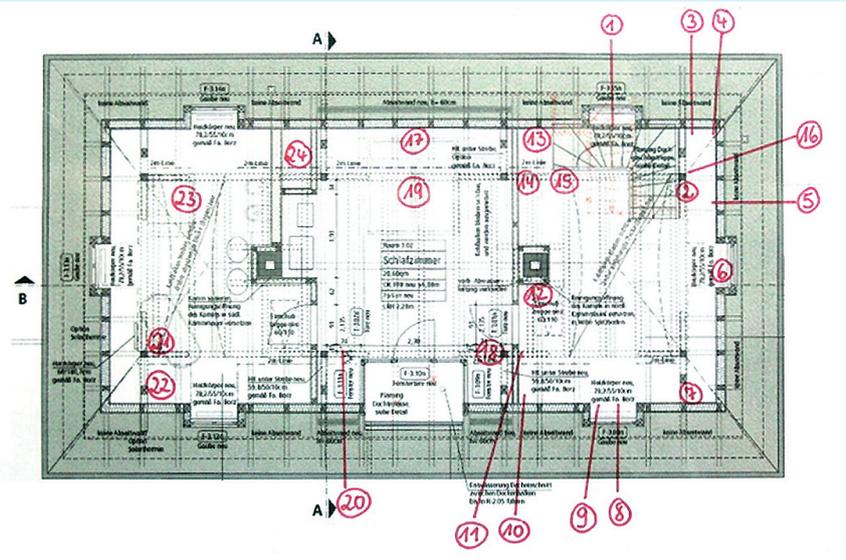
Konstruktion (von außen nach innen)

Dach
 Eindeckung mit Photovoltaikanlage auf Lattung und Konterlattung – Unterspannbahn auf Holzweichfaserplatte – Zwischensparrendämmung aus MW, hinterlüftet – Dampfsperre – Gipskartonbekleidung auf Lattung (teilweise)



Luftströmung insb. im Bereich der traufseitigen Decke (fehlende Luftdichtheits- schicht in Höhe der Decke zum Ober- geschoss) und im Bereich der Kehlbalken

Leckageverteilung (Plangrundriss)

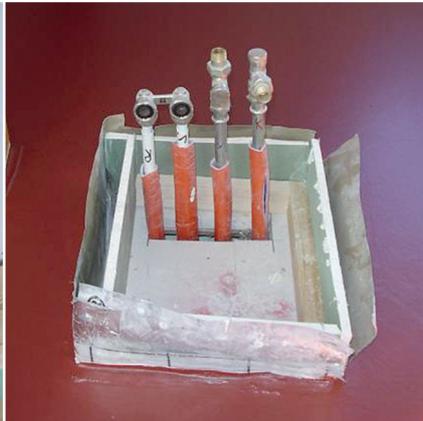


Fortsetzung Tabelle 4.5

Bilder zu Leckagen (primäre und sekundäre Leckagen)



handwerklich nicht zu lösender Anschluss der Kehlbalken (mit Rissen) an die Luftdichtheitsebene (primäre Leckagen)



Unter Testbedingungen (Unterdruck im Gebäude) sind Luftströmungen an den Leitungsdurchführungen in der Decke wahrnehmbar, da ein Luftverbund des Deckenhohlraums über die Traufe nach außen besteht (sekundäre Leckagen).

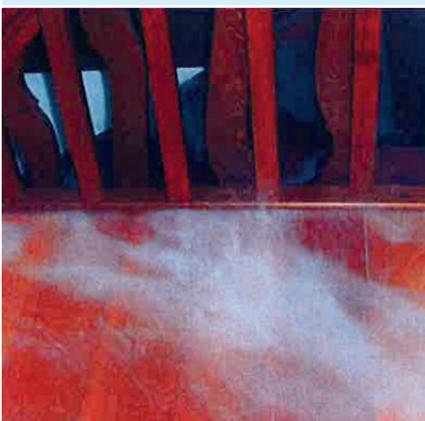


Versorgungsleitungen durchdringen in Bodennähe (traufseitig) die Folie der Luftdichtheitsebene; Leckagen aufgrund fehlender Deckeneinbindung und fehlerhafter Anschlüsse an die Rohrleitungen (primäre und sekundäre Leckagen)



Fehlstellen in der Verklebung der Folie (zugleich Luftdichtheitsschicht) an den Kamin

Bilder zu Leckagen (sekundäre Leckagen)



Visualisierung der Durchströmbarkeit des Deckenhohlraumes mit Theaternebel

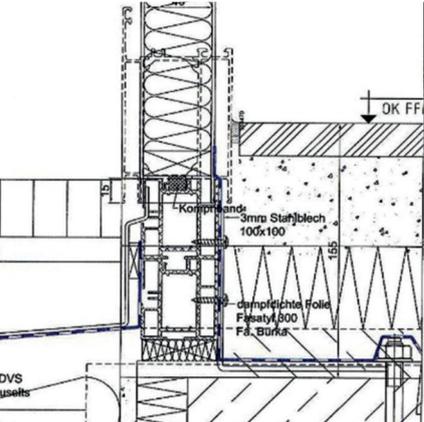


sekundäre Leckagen im Bereich einer Elektroinstallation einer Zwischenwand



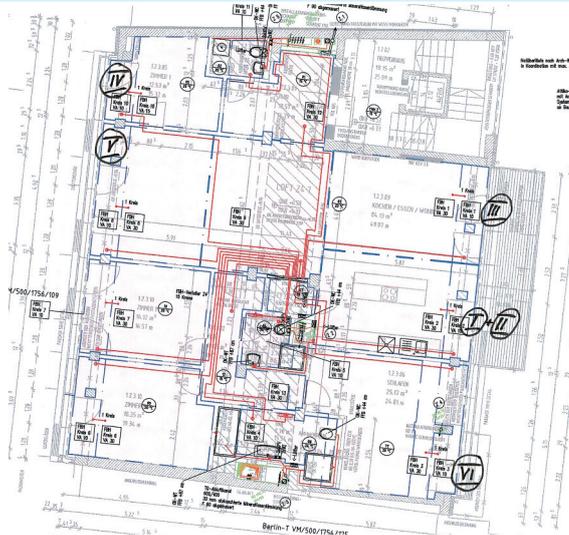
sekundäre Leckagen im Bereich von Steckdosen

Tabelle 4.6: Tauwasserbildung auf der Innenseite einer Fensterkonstruktion

Objekt: 20-2		Zeitpunkt der Besichtigung: 2012
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohnung in einem MFH	
Baujahr	2006-2008	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2009	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Fensterelemente mit Kondensat und Pfützenbildung auf Parkettboden, Schimmelpilzbildung entlang der Randfuge	
Lage im Gebäude	2. Obergeschoss	
		Tauwasserausfall auf der Innenseite der Fensterrahmen
Konstruktion		
Außenwand	Stahlbetonschottenbauweise mit Metallfassade bzw. geschosshohen Fensterelementen	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	444 Unterdruck	
Innenvolumen in m³	ca. 500 - 550	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	0,8 – 0,9	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	
		Leckagen im Sockelbereich des Paneel-elementes (Visualisierung mit Theaternebel außen bei Überdruck innen)

Fortsetzung Tabelle 4.6

Verteilung der Untersuchungsstellen (Plangrundriss)



Im nebenstehenden Grundriss sind mit röm. Ziffern die Untersuchungsstellen eingetragen, an denen Theaternebel eingesetzt wurde.

Bilder zu Leckagen und Art der Schäden



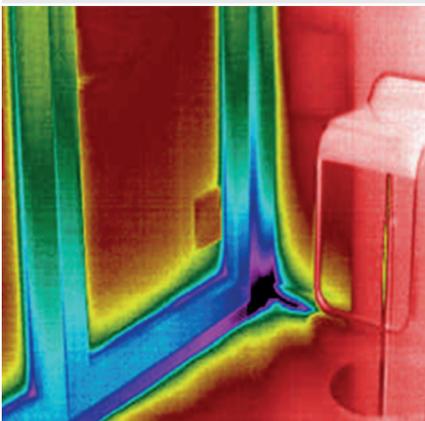
Pfützenbildung aufgrund von Tauwasser- ausfall auf Fensterscheibe und Fenster- rahmen



Schimmelpilzbildung auf den Korkrand- dämmstreifen unterhalb des Fensterele- mentes



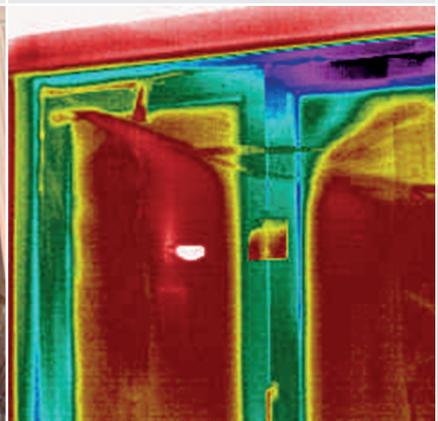
Visualisierung von Luftströmungen zwi- schen Sockelblech und Blendrahmen bzw. Paneel mit Theaternebel bei Überdruck in der Wohnung



Thermogramm zeigt deutlich kühlere Bereiche (schwarz gefärbt) am Blendrah- men und am angrenzenden Paneel (Auf- nahme im Winter bei 50 Pa Unterdruck in der Wohnung)



zum rechten Thermogramm gehörende Echtfarbenaufnahme von einer Fenstertür mit Sturz; zur räumlichen Auflösung von Luftströmungen ist die Fuge zw. Flügel und Blendrahmen mit einer infrarotdurch- lässigen Folie überklebt



Thermogramm zeigt deutlich kühlere Bereiche (schwarz gefärbt) am Fensterflü- gel als Hinweis auf Leckagen zwischen Flügel und Blendrahmen (Aufnahme im Winter bei 50 Pa Unterdruck in der Woh- nung)

Tabelle 4.7: Verrottung eines Flachdaches in Holzbauweise

Objekt: 26-1	Zeitpunkt der Besichtigung: –	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Mehrfamilienwohnhaus	
Baujahr	2010	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	–	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	vollständige Verrottung des Flachdaches	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
Zeitpunkt der Sanierung	2013	
Konstruktion		
unbelüftetes Flachdach in Holzbauweise mit Dachbegrünung		
		offene Anschlüsse und Beschädigungen der Luftdichtheitsebene

Tabelle 4.8: Weißrost an einem Metaldach

Objekt: 26-2	Zeitpunkt der Besichtigung: 2014	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Mehrfamilienwohnhaus	
Baujahr	2014	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2014	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Weißrost an der Metalleindeckung (mit Luft-Leckagen in Verbindung gebracht)	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
Zeitpunkt Sanierung	2014	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Metaldach, Dachneigung 3° – Holzschalung – PUR-Dämmelement, 80 mm – Dampfsperre?	
		Blick in die geöffnete Dachkonstruktion

Tabelle 4.9: Durchfeuchtung einer Holzschalung und Schimmelpilzbildung unter einem Dachüberstand

Objekt: 45-1		Zeitpunkt der Besichtigung: 2011
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohngebäude	
Baujahr	–	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2011	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Durchfeuchtung der Holzschalung, Schimmel unter Dachüberstand	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
		Dachöffnung zur Ursachenermittlung
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Dacheindeckung – Unterspannbahn – Holzschalung (24 mm) – Mineralwolle als Zwischensparrendämmung – Dampfsperre – Gipskartonplattenbekleidung auf Lattung	
		auf der Innenseite geöffnete GK-Bekleidung, Luftdichtheitsschicht (Folie) eingerrissen (Pfeil)
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h (Verfahren A nach DIN EN 13829)	550 Unterdruck	
Innenvolumen in m³	500	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	1,1	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	

Tabelle 4.10: Zugluft und Geruchsbelästigungen in einem ausgebauten Dachgeschoss

Objekt: 52-1	Zeitpunkt der Besichtigung: 2004	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Dachgeschosswohnungen im MFH	
Baujahr	1997 (Sanierung)	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2004	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Zugluft, Geruchsbelästigungen aus Nachbarwohnungen	
Lage im Gebäude	ausgebautes Dachgeschoss	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Sparrendach → Aufsparrendämmung – Holzschalung	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h Mittelwerte	(Verfahren A nach DIN EN 13829) –	
Innenvolumen in m³	–	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	15,2 (Wohnung 1) bzw. 24,3 (Wohnung 2)	
w₅₀ in m³/(m²h)	39,7 (Wohnung 1) bzw. 44,8 (Wohnung 2)	
		exemplarische Luftgeschwindigkeitsmessung an einem Downlight

Tabelle 4.11: Verfärbungen mit Schimmelpilzbefall unter einem Dachüberstand

Objekt: 69-1		Zeitpunkt der Besichtigung: 2015
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienwohnhaus	
Baujahr	2013	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2014 / 2015	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Laufspuren und Schimmelpilzbildung unter dem Dachüberstand, Feuchteintrag in die Dachkonstruktion	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
		Verfärbungen und Laufspuren, ausgehend v. d. Unterseite des Dachüberstandes
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Dacheindeckung – Unterspannbahn – Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle – Dampfsperre – Sparschalung im Dachboden bzw. Bekleidung im ausgebauten Dach	
		linienförmige Verfärbungen unterhalb einer Fehlstelle in der Luftdichtheitsschicht (Pfeil)
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	609 → 650 → 630 Unterdruck → Überdruck → Mittelwert	
Innenvolumen in m³	552	
Hüllfläche in m²	221	
n₅₀ in 1/h	1,11	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	
		undichte Klebeverbindungen zwischen Folie (Luftdichtheitsschicht Dach) und der OSB-Platte (Luftdichtheitsschicht Wand), (primäre Leckagen)

Tabelle 4.12: Verrottung einer Dachkonstruktion

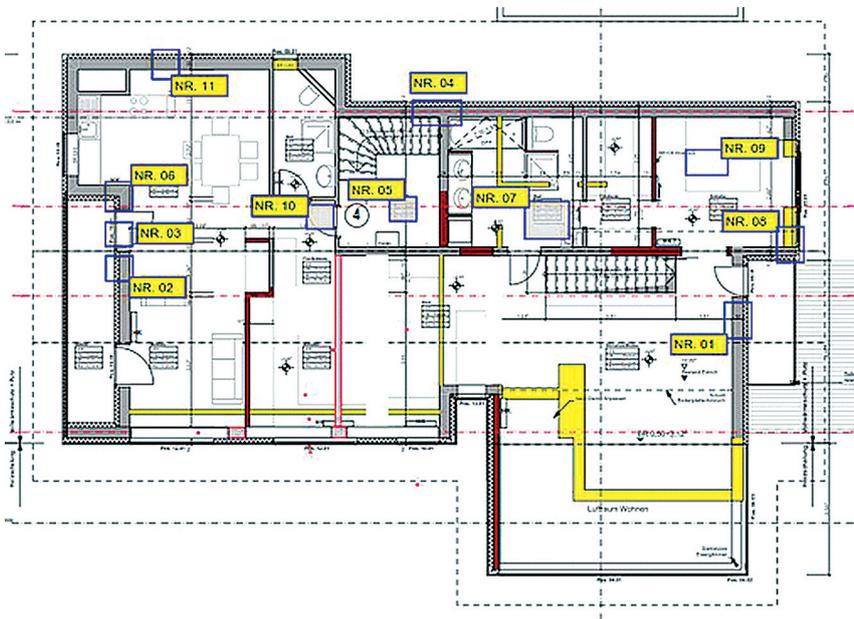
Objekt: 76-1	Zeitpunkt der Besichtigung: –	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohngebäude	
Baujahr	60-er Jahre	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	ca. 5 Jahre nach energetischer Sanierung des Daches	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Fäulnis im Bereich der hölzernen Dachkonstruktion	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h Unterdruck	nicht gemessen, nur Leckageortung bei ca. 50 Pa	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Ziegeleindeckung auf Unterkonstruktion – Linitherm N+F – alte Bitumenbahn + Holzschalung – Sparren mit Zwischensparrendämmung (Mineralwolle) – Dampfbremse – innere Bekleidung als Holzdecke auf UK	

Tabelle 4.13: Verfärbungen auf der Unterseite eines Dachüberstandes und Durchfeuchtung einer Dachkonstruktion

Objekt: 69-2		Zeitpunkt der Besichtigung: 2015
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Mehrfamilienwohnhaus	
Baujahr	2007 (Umbau und Erweiterung)	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	erste Wahrnehmung 2008	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Verfärbungen der Unterseiten der Dachüberstände, Feuchteintrag in die Dachkonstruktion, Pilzbefall	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
Haustechnik	Niedertemperatur-Ölzentralheizung, Kaminofen	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand	Ziegelmauerwerk mit WDVS	
Dach	Eindeckung auf Lattung und Konterlattung – Unterdeckbahn auf Holzschalung – Zwischensparrendämmung aus MW – Dampfsperre (Luftdichtheitsschicht) – Gipskartonbekleidung auf Lattung	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	1.553 → 1.670 → 1.611 Unterdruck → Überdruck → Mittelwert	
Innenvolumen in m³	701	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	2,3	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	

Fortsetzung Tabelle 4.13

Übersicht zu den Bauteilöffnungen (Plangrundriss)



Bilder zu Leckagen



Öffnung der Mauerwerkskrone



Luftdichtheitsschicht an unverputztes Mauerwerk angeschlossen (primäre Leckage)



Fehlstellen in der Luftdichtheitsschicht, Öffnung zum Innenraum (primäre Leckage)



Fehlstellen in der Luftdichtheitsschicht im Bereich von Kabeldurchführungen (primäre Leckagen)



Abrisse der inneren Bekleidung im Bereich der Pfette (sekundäre Leckagen)



Riss in der Gipskartonbekleidung der Dachkonstruktion (sekundäre Leckage)

Tabelle 4.14: Durchfeuchtung der Dämmung an einer Gaube

Objekt: 87-1	Zeitpunkt der Besichtigung: –	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohnhaus	
Baujahr	–	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	während des Dachgeschossausbaus	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	durchfeuchtete Dämmung der Gaubenseitenwände	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss über Erdgeschoss	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Dacheindeckung – Zelluloseeinblas- bzw. Mineralwollgedämmung (Gaubenseitenwände) – Folie als Luftdichtheitsebene – Holzschalung als innere Bekleidung der Dachschräge	
Bilder zu Leckagen		
		
gedämmter und mit Dampfbremse innenseitig bekleideter Giebel (links), Dachschräge mit Nut- und Federbrettern in der Dachschräge (rechts); an Nut- und Federbrettern bei 50 Pa Unterdruck Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,2 m/s messbar	Die Folie (Luftdichtheitsebene) der Gaubenseitenwand ist an die Holzkonstruktion angeklebt (Pfeile). Es besteht keine Verbindung zwischen der Folie der Gaubenseitenwand mit der Folie der Dachschräge.	

Tabelle 4.15: Durchfeuchtung von Dämmung und Holzschalung einer Dachkonstruktion

Objekt: 88-1		Zeitpunkt der Besichtigung: 2013
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohnhaus	
Baujahr	1976, Umbau 2011	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2013	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Geruchsbelästigung, Durchfeuchtung der Dämmung und Holzkonstruktion am Nordostdach	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
Haustechnik	Gas-Brennwerttechnik, keine Lüftungsanlage	
		durchfeuchtete Dämmung und Holzsparren im Dachaufbau, Strömungsmessung bei 50 Pa Überdruck im Gebäude
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Eindeckung auf Lattung und Konterlattung – diffusionsdichte Unterdeckung – Holzweichfaserdämmung – Luftdichtheitschicht – GK-Bekleidung	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	1.499 → 1.551 → 1.525 Unterdruck → Überdruck → Mittelwert	
Innenvolumen in m³	433	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	3,5	
w₅₀ in m³/(m²h)	9,2	
		Strömungsmessung an der Pfette bei 50 Pa Unterdruck

Tabelle 4.16: Durchfeuchtung von Dämmung und Holzschalung einer Dachkonstruktion

Objekt: 88-2		Zeitpunkt der Besichtigung: 2015
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohnhaus	
Baujahr	2015	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2015	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	durchfeuchtete Dämmung und Holzschalung	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
Haustechnik	Lüftungsanlage mit WRG, Wärmepumpe	
Strömungsmessung an offenem Anschluss der Luftdichtheitsschicht (Gaubenseitenwand / Fenster) bei 50 Pa Unterdruck		
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Eindeckung auf Lattung und Konterlattung – Holzschalung – Dämmung – Luftdichtheitsschicht – Untersparrendämmung – GK-Bekleidung	
exemplarische Leckage ohne Bezug zum Schaden, Messung der Strömungsgeschwindigkeit an einem Rollladenkasten im OG bei 50 Pa Unterdruck		
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	1.386 Unterdruck	
Innenvolumen in m³	834	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	1,7	
w₅₀ in m³/(m²h)	4,1	
exemplarische Leckage ohne Bezug zum Schaden, Messung der Strömungsgeschwindigkeit an einer Steckdose im EG bei 50 Pa Unterdruck		

Tabelle 4.17: Zugerscheinungen und Wasserablaufspuren in einem ausgebauten Dachgeschoss

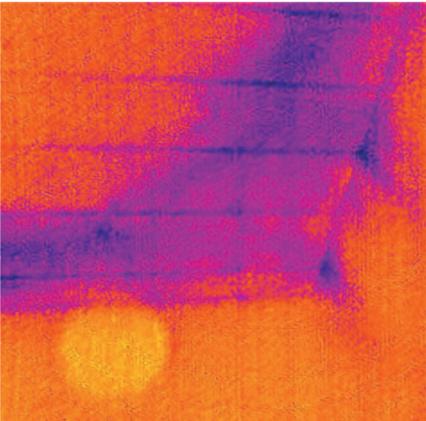
Objekt: 89-1		Zeitpunkt der Besichtigung: 2013	
Allgemeine Angaben			
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienwohnhaus		
Baujahr	2009		
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2013		
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Zugerscheinung, je nach Wetterlage traufseitig Tauwasser aus Dämmung ablaufend		
Lage im Gebäude	Dachgeschoss		
		Leckagen im Bereich des Anschlusses zwischen Dachfläche und Außenwand	
Konstruktion (von außen nach innen)			
Dach	Dacheindeckung auf Lattung und Konterlattung – MDF-Unterdeckplatten (18 mm) – Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle (19 kg/m ³) – Dampfbremse aus PE-Folie mit verklebten Stößen – Bekleidung aus Profilholzschalung (15 mm)		
Luftdurchlässigkeit			
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	611 → 788 → 699 Unterdruck → Überdruck → Mittelwert		
Innenvolumen in m³	561		
Hüllfläche in m²	–		
n₅₀ in 1/h	1,2		
q₅₀ in m³/(m²h)	–		
		Messbedingung: 50 Pa Unterdruck Zeitpunkt: Frühjahr 2013, morgens	
		Thermogramm von o. g. Decken-Wand-Anschluss mit violetter Einfärbung der Luftströmungen	

Tabelle 4.18: Zugerscheinungen und Wasserablaufspuren in einem ausgebauten Dachgeschoss

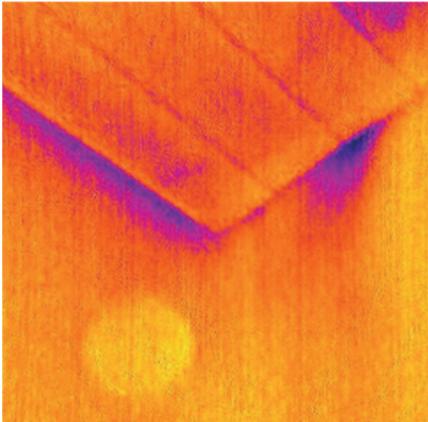
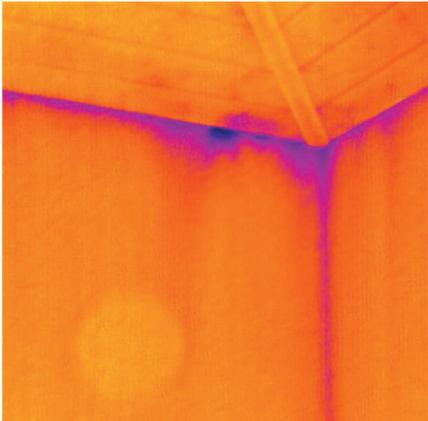
Objekt: 89-2		Zeitpunkt der Besichtigung: 2013
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienwohnhaus	
Baujahr	2009	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2013	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Zugerscheinung, je nach Wetterlage traufseitig Tauwasser aus Dämmung ablaufend	
Lage im Gebäude	Dachgeschoss	
		Leckagen im Bereich des Decken-Wand-Anschlusses
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	Dacheindeckung auf Lattung und Konterlattung – MDF-Unterdeckplatten (18 mm) – Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle (19 kg/m ³) – Dampfbremse aus PE-Folie mit verklebten Stößen – Bekleidung aus Profilholzscha-lung (15 mm)	
	Messbedingung: 50 Pa Unterdruck Zeitpunkt: Frühjahr 2013, morgens	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	464 → 528 → 496 Unterdruck → Überdruck → Mittelwert	
Innenvolumen in m³	475,5	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	1,0	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	
	Messbedingung: 50 Pa Unterdruck Zeitpunkt: Frühjahr 2013, morgens	weiteres Thermogramm, mit dem die Luft-Leckagen visualisiert werden

Tabelle 4.19: Durchfeuchtung und Verrottung einer Dachkonstruktion

Objekt: 91-1		Zeitpunkt der Besichtigung: 2011/2014	
Allgemeine Angaben			
Objekttyp / Nutzung	Seminargebäude		
Baujahr	2006		
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2011 - 2014		
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Tauwasser und Fäulnis der Dachschalung		
Lage im Gebäude	Dachkonstruktion über dem Erdgeschoss		
		Kunststoffdach-Bahnenabdichtung (im Bild links) neben diffusionsdichtem Metalldach	
Konstruktion (von außen nach innen)			
Dach	Kunststoffdachabdichtung auf Unterspannbahn – Holzschalung – Luftschicht, unbelüftet – Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle (20 cm) – Dampfbremse – Holzwolleleichtbauplatten auf Lattung		
		Innenansicht des nicht gedämmten Firstes (Zustand vor Sanierung)	
Bilder zu Leckagen			
			
Lücken in der Folie, die zugleich die Luftdichtheitsschicht darstellt (Zustand vor Sanierung)	Bauteilöffnung mit verfallener Holzschalung im nicht gedämmten Bereich	Detailansicht der Innenseite des Firstes (Zustand vor Sanierung)	

Tabelle 4.20: Verrottung einer Dachkonstruktion

Objekt: 91-2		Zeitpunkt der Besichtigung: 2015	
Allgemeine Angaben			
Objekttyp / Nutzung	Mehrzweckgebäude		
Baujahr	1999		
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2015		
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Fäulnis der Dachschalung		
Lage im Gebäude	Dachkonstruktion über dem Erdgeschoss		
		großflächige Schädigung der Dachschalung	
Konstruktion (von außen nach innen)			
Dach	Kunststoffdachabdichtung – Holzschalung – Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle – Dampfbremse – Luftschicht – GK-Bekleidung		
		verfulte Dachschalung	
Bilder zu Leckagen			
			
Lücken in der Folie, die zugleich die Luftdichtheitsschicht darstellt		nicht angeschlossene Luftdichtheitsschicht	

Tabelle 4.21: Durchfeuchtung einer Dachkonstruktion mit Schimmelpilzbildung

Objekt: 91-3		Zeitpunkt der Besichtigung: 2013	
Allgemeine Angaben			
Objekttyp / Nutzung	Schwimmhalle		
Baujahr	2008		
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2013		
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Durchfeuchtung der Dachkonstruktion, Schimmelpilzbildung auf der Holzschalung		
Lage im Gebäude	Dachkonstruktion über Schwimmhalle		
		Übersicht zur Öffnungsstelle	
Konstruktion (von außen nach innen)			
Dach	Aluminium-Stehfalzdeckung mit belüfteter Luftschicht (6 cm) – Unterspannbahn auf Holzschalung – Zwischensparrendämmung (15 cm) – Polyurethandämmplatte mit verklebten Stößen (6 cm) – Hohlraum (20 – 30 cm) – Lackspanndecke		
Bilder zu Leckagen			
			
offene Kabeldurchführungen (primäre Leckage)	mit Montageschaum nicht luftdicht verschlossene Durchführungen	Lichteinfall von außen weist auf Lücken in der Luftdichtheitsschicht hin	

Tabelle 4.22: Mikrobiologischer Befall einer Fassade im Bereich von Fenster

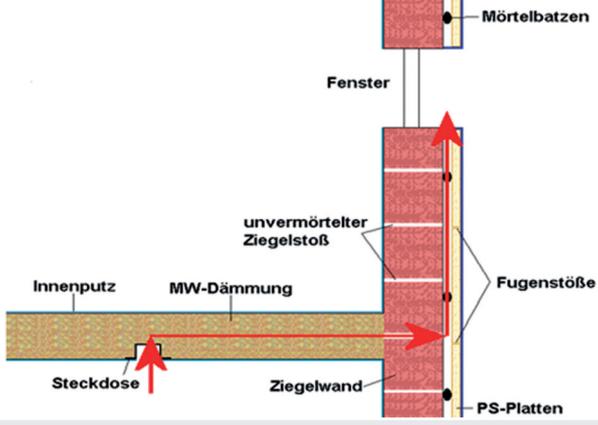
Objekt: 99-1	Zeitpunkt der Besichtigung: 2006	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Wohngebäude	
Baujahr	ca. 2000	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	kurz nach Fertigstellung	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	mikrobiologischer Befall der Fassade	
		Fassadenansicht
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand	Außenputz WDVS aus PS auf Mörtelbatzen – Ziegelmauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen – Innenputz (nach Einbau der Innenwände)	
Innenwand	Leichtbauweise	
		Eckbereich Fensterbank mit Schädigung des Putzes
Bilder zu Leckagen und Strömungspfad		
		
Verdeutlichung des Konvektionsstromes / Strömungspfades		

Tabelle 4.23: Schimmelpilzbefall an Hölzern in einem nicht ausgebauten Dachgeschoss

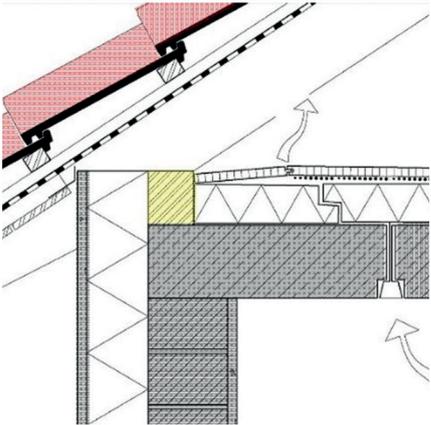
Objekt: 100-1		Zeitpunkt der Besichtigung: 2008
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienwohnhaus	
Baujahr	2007	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	Winter 2007/2008	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Schimmel an Hölzern im Dachboden oberhalb der in Küche und Esszimmer eingebauten Downlights	
Lage im Gebäude	Fußboden im nicht ausgebauten Dachgeschoss	
		Schimmelpilzverfärbungen am Fußpunkt der Holzstützen
Konstruktion (von außen nach innen)		
oberste Geschossdecke	Holzspanplatte mit Nut und Feder – Polystyrolhartschaumdämmung, Stufenfalz – Stahlbetondecke	
		Verdeutlichung des Konvektionsstromes
Bilder zu Schadensbild und Leckagen		
		
Schimmel auf der Unterseite der Holzspanplatten, oberhalb der Dämmplattenfugen	Leerrohrverlegung auf der Oberseite der Stahlbetondecke im Dachboden	Zuleitung der Downlights in Esszimmer und Küche mittels Leerrohr durch die Betondecke (primäre Leckage)

Tabelle 4.24: Durchfeuchtungsschäden entlang von Dachtraufen

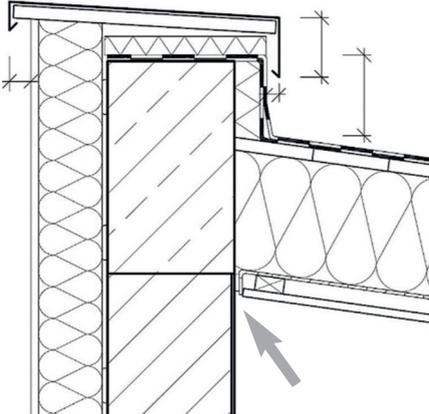
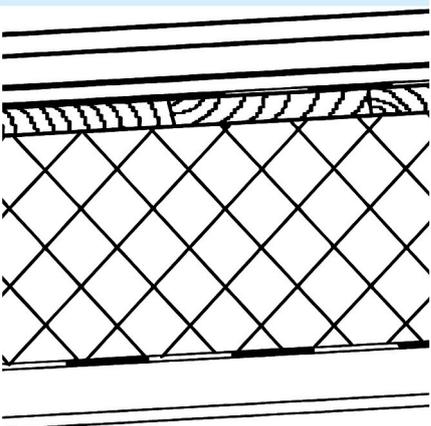
Objekt: 101-1		Zeitpunkt der Besichtigung: 2008
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienreihenwohnhaus	
Baujahr	2003	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2008	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Wasserschäden entlang der Traufen	
Lage im Gebäude	Pultdach über 2. Obergeschoss	
n₅₀ in 1/h	0,8	
		versetzt angeordnete Pultdächer
Konstruktion (von außen nach innen)		
Dach	zweilagige Bitumenbahnabdichtung – Holzschalung – Mineralwollgedämmung als Zwischensparrendämmung, unbelüftet – Dampfsperre – innere Bekleidung auf Lattung	
		Anschluss der Luftdichtheitsschicht an die verputzte Wandoberfläche mit einer Klebeschnur
Bilder zu Leckagen und Schadensbild		
		
Leck zwischen Folie und verputzter Wandfläche, Ablösung der Klebeschnur (primäre Leckage)	Luftströmung am Spalt der Elektroanschlussleitung zur Deckenbekleidung (sekundäre Leckage)	Wasserschäden entlang der Traufe

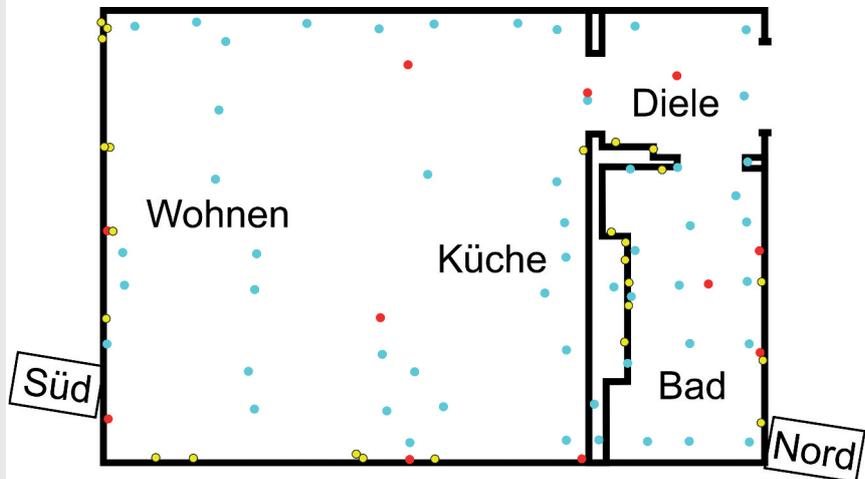
Tabelle 4.25: Lokal begrenzte Zersetzung einer Holz-Dachkonstruktion (Referenzfall)

Objekt: 102		Zeitpunkt der Besichtigung: April/Mai 2015
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Dachgeschosswohnung in Mehrfamilienhaus (Keller-, Erd-, Ober-, Dachgeschoss)	
Baujahr	2006	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	2009/2010	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	lokal begrenzte Zersetzung der Holzschalung und zum Teil der Sparren	
Haustechnik	Fußbodenheizung, zwei Außenluftdurchlässe	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand	verputztes Ziegelmauerwerk (36,5 cm)	
Dach (Pulldach, 4,7°)	Aluminium-Doppelstehfalzdeckung – Vordeckung (diffusionsoffen) – Holzschalung (2,4 cm) – Mineralwolle/Sparren (22 cm) – Dampfbremse (feuchtevariabel) – Unterkonstruktion/Luftraum (4 cm, z. T. variabel bei abgehängter Decke) – Gipskartonbekleidung (1,25 cm)	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	371 → 397 → 384 Unterdruck → Überdruck → Mittelwert	Die Messung in der Dachgeschosswohnung wurde im Rahmen der Sanierung durchgeführt. Eindeckung, Vordeckung, Holzschalung und Mineralwollendämmung waren entfernt. Die Vorbereitungen zur Messung entsprachen Verfahren A nach DIN EN 13829.
Innenvolumen in m³	96,8	
Hüllfläche in m²	139,3	
n₅₀ in 1/h	4,0	
q₅₀ in m³/(m²h)	2,8	

Fortsetzung Tabelle 4.25

Leckageverteilung von außen und innen (Plangrundriss)

Räumliche Verteilung primärer und sekundärer Leckagen: Die blauen Punkte markieren Stellen mit primären Leckagen (Folie). Teilweise handelt es sich nicht nur um singuläre, sondern zum Teil auch um summarische Leckagen. Die roten Punkte stehen für sekundäre Leckagen (Gipskartonbekleidung der Decke). Die gelben Punkte markieren primäre (z. B. Gurtführung Rollladen) und sekundäre Leckagen (z. B. Steckdosen), die unterhalb der Gipskartonbekleidung der Decke vorliegen. Zwischen Küche und Bad liegt ein Schacht vor, durch den diverse Leitungen laufen. Er ist zu den unteren Geschossen verschlossen.



Bilder zum Schaden

Die Holzschalung und die Sparren sind seitlich bis zur Mauerkrone hin angegriffen. In der Nähe des Schachtes liegt die Folie auf der abgehängten Decke des Bades. Auf der Folie sind Trocknungsrückstände erkennbar, die auf eine Feuchtesammlung hinweisen. Eine der größten primären Leckagen befindet sich im Überlappungsbereich der Folie in Nähe der über das Dach geführten Rohrleitung (Schacht).

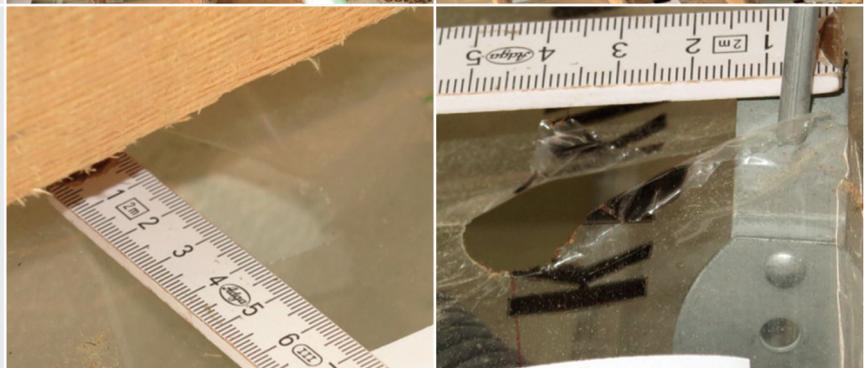


Bilder zu Leckagen (primäre Leckagen)

nummerierte primäre Leckagen oberhalb des Bades und zur angrenzenden Küche (Bild links) sowie oberhalb Küche/Wohnen (Bild rechts)



Beispiele für primäre Leckagen oberhalb des Bades; Beschädigungen der Folie im Bereich mechanischer Befestigungen



Fortsetzung Tabelle 4.25

Bilder zu Leckagen (primäre Leckagen)

Beispiele für primäre Leckagen oberhalb des Bades; offene Überlappungsbereiche der Folie

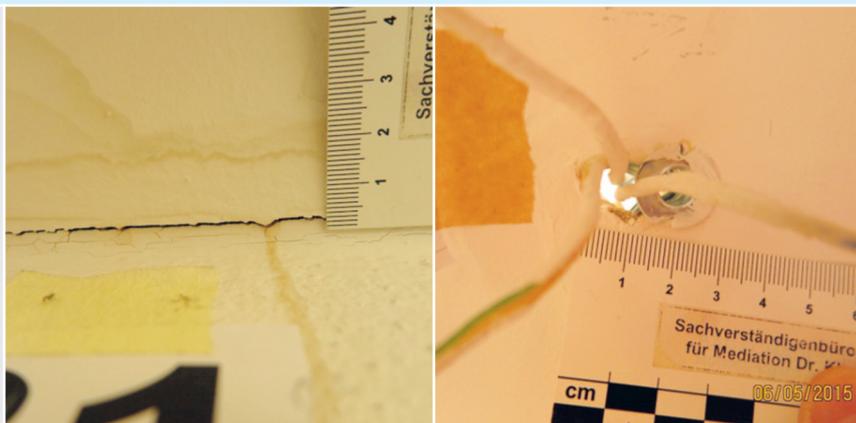


Beispiele für primäre Leckagen oberhalb des Bades im Bereich einer Folienfalte (Bild links) und im Bereich der Abdichtung an eine Rohrleitung (Bild rechts)



Bilder zu Leckagen (sekundäre Leckagen)

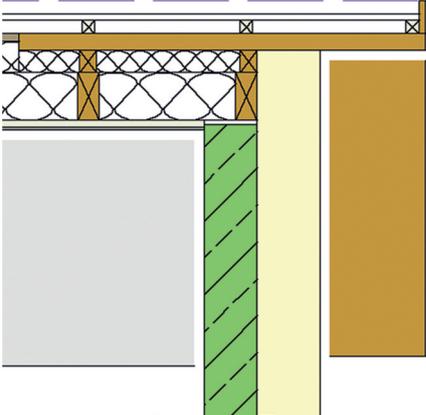
Beispiele für sekundäre Leckagen an der Gipskartonbekleidung der Decke im Bad und der Diele; Riss zwischen Gipskartonbekleidung der Decke und verputztem Mauerwerk mit bräunlichen Ablaufspuren im Bad (Bild links); Durchführung von Elektroleitungen an der Gipskartonbekleidung der Decke in der Diele (Bild rechts)



Beispiele für sekundäre Leckagen unterhalb der Gipskartonbekleidung der Decke an dem Schacht zwischen Bad und Küche (z. B. WC-Spültaste, Steckdosen, Elektroleitungen)



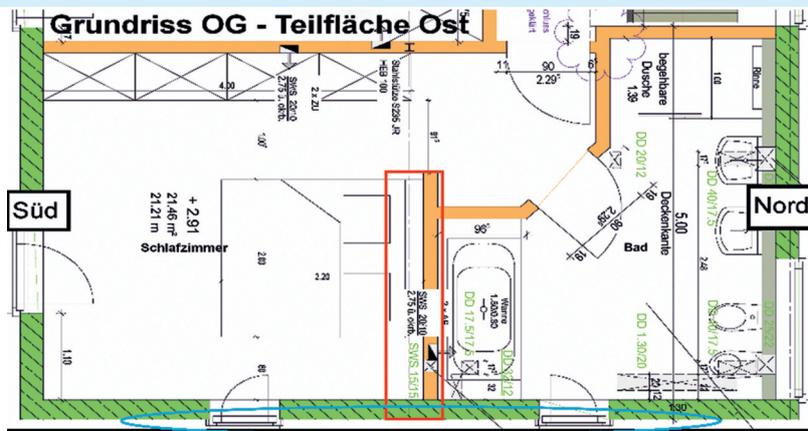
Tabelle 4.26: Verfärbungen auf der Unterseite eines Dachüberstandes

Objekt: 103	Zeitpunkt der Besichtigung: März/September 2015	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienhaus in Betonbauweise mit Unter-, Erd- und Obergeschoss	
Baujahr	2014	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	Winter 2014/2015	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Wasserflecken bzw. Verfärbungen an der Unterseite des Dachüberstandes	
Haustechnik	Wärmepumpe, Kaminofen im Erdgeschoss, Zu-Abluft-Anlage	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand	WDVS (30 cm) – Beton (25 cm)	
Dach	Eindeckung – Konterlattung – Lattung – 3-Schichtholzplatte (7,5 cm) im Ortgangbereich – Holzfaser (10 cm) – Mineralwolle/Sparren (22 cm) – Dampfbremse – Lattung (3 cm) – Gipskarton (1,25 cm)	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	482 → 688 → 585 Unterdruck → Überdruck → Mittelwert	Die Messung wurde zu einem früheren Zeitpunkt zwecks Nachweis einer ausreichenden Luftdichtheit gemäß Energieeinsparverordnung nach DIN EN 13829 (Verfahren B) für das gesamte Gebäude durchgeführt. Bei Betrieb der Lüftungsanlage wird von ihr gegenüber außen eine Druckdifferenz von -3 bis -5 Pa im Gebäude erzeugt.
Innenvolumen in m³	844	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	0,69	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	

Fortsetzung Tabelle 4.26

Leckageverteilung von außen und innen (Plangrundriss)

Primäre und sekundäre Leckagen stimmen innen räumlich überein – rotes Rechteck. Der Einfluss von weiteren sekundären Leckagen – z. B. Einbaustrahler in der Dachschräge des angrenzenden Bades – kann nicht ausgeschlossen werden. Außen liegen die Verfärbungen über einen relativ weiten Bereich vor – blaue Ellipse. Dort tritt Theaternebel bei Überdruckbetrieb und Einsatz im Gebäude mehr oder weniger deutlich wahrnehmbar aus.



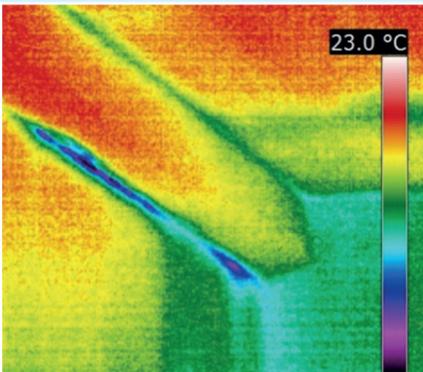
Bilder zu Leckagen (primäre Leckagen)

Bei der Öffnung des Daches von außen ist am Ortsgang eine Dampfbremse ersichtlich, die im Bereich der Innenwand aus Ziegel nicht an die Betonaußenwand und nicht an die Firstpfette luftdicht angeschlossen ist. Der fehlende luftdichte Anschluss der Dampfbremse an die Firstpfette umfasst ca. 2,8 m.



Bilder zu Leckagen (sekundäre Leckagen)

Bei einem erzwungenen Unterdruck von ca. 50 Pa im gesamten Gebäude wird kältere Außenluft nach innen gesaugt, die im Bereich der Firstpfette zu Abkühlungen führt.



Sonstiges

Zwischen Firstpfette und Innenwand ist eine Holzleiste geklebt. Dahinter befindet sich ein Hohlraum, in dem eine Dampfbremse erkennbar ist.

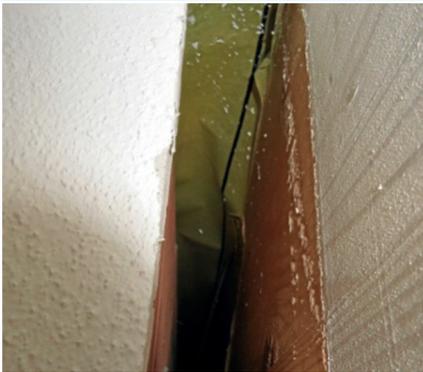
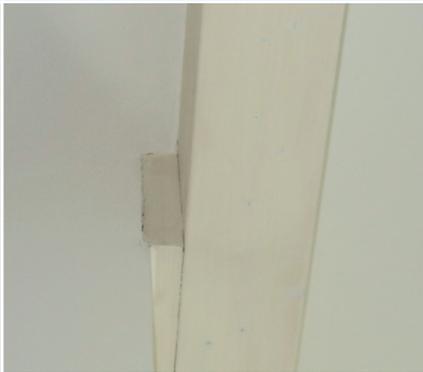
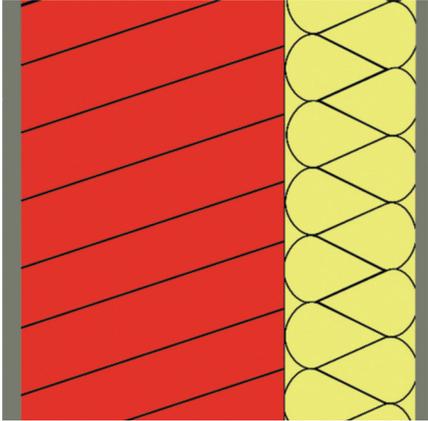


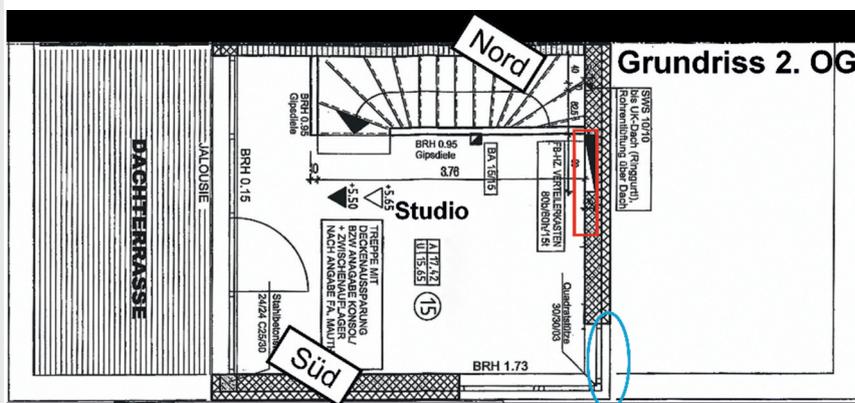
Tabelle 4.27: Wasserflecken bzw. Verfärbungen an einem Dachüberstand

Objekt: 104		Zeitpunkt der Besichtigung: Oktober 2013
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Reiheneckhaus in Ziegelbauweise mit Keller-, Erd-, 1. und 2. Obergeschoss	
Baujahr	2010	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	Winter 2011/2012	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Wasserflecken bzw. Verfärbungen an den Unterseiten des Dachüberstandes und nahegelegener Fensterbleche	
Haustechnik	Nahwärme, Zu-Abluft-Anlage	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand	Putz (1 cm) – Polystyrol-Partikelschaum (12 cm) – Ziegelstein (24 cm) – Putz (1,5 cm)	
Dach	Kunststoffabdichtung – (... / Dachüberstand mit Holzwerkstoffplatte) – Dämmung/Sparren (24 cm) – Dampfbremse – Holzunterkonstruktion – Gipskarton (1,25 cm)	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	285 / 355 Unterdruck 1 / Unterdruck 2	Der Leckagestrom wurde orientierend nur im Unterdruckbetrieb für EG, 1. und 2. OG bei verschlossener (mit Schlüssel – 285 m³/h) und geschlossener Hauseingangstür (ohne Schlüssel – 355 m³/h) bestimmt. Die Vorbereitungen entsprachen DIN EN 13829 (Verfahren B).
Innenvolumen in m³	285	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	1,0 / 1,2	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	

Fortsetzung Tabelle 4.27

Leckageverteilung von außen und innen (Plangrundriss)

Primäre und sekundäre Leckagen stimmen innen räumlich überein – rotes Rechteck. Außen sind die Verfärbungen und der Austritt von Theaternebel bei Überdruckbetrieb ca. 2 m bis 4 m von den primären Leckagen entfernt – blaue Ellipse.



Bilder zu Leckagen (primäre Leckagen)

In dem Heizkreisverteilerkasten sind unverputzte Ziegelsteine ersichtlic. Ein luftdichter Abschluss des Mauerwerks fehlt.



Bilder zu Leckagen (sekundäre Leckagen)

Sowohl an der Tür (im Bild versuchstechnisch abgeklebt) des Heizkreisverteilerkastens als auch an Schalter/Steckdosen sowie an der Sockelleiste sind bei Unterdruck im Gebäude Luftströmungen wahrnehmbar. An der Außenwanddecke liegen im Bereich der Verfärbungen Abrisse zwischen der Holzwerkstoffplatte des Dachüberstandes und des Wärmedämmverbundsystems vor.

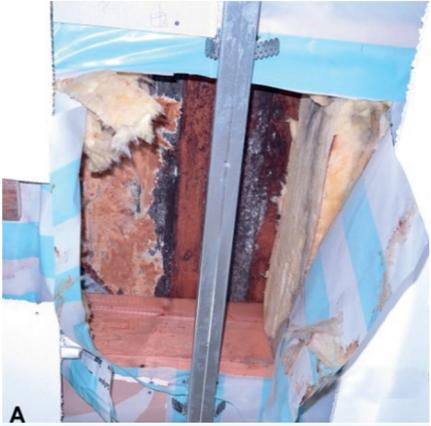
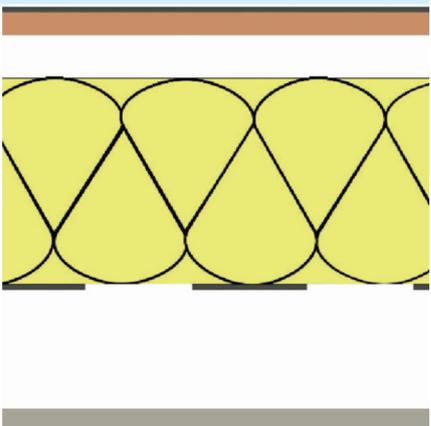


Sonstiges

Bei Überdruck im Gebäude dringt Theaternebel von innen über den Heizkreisverteilerkasten in das Ziegelmauerwerk ein und verteilt sich hinter dem Wärmedämmverbundsystem. Außen tritt in ca. 2 m bis 4 m von dem Heizkreisverteilerkasten entfernt Theaternebel u. a. zwischen Wärmedämmverbundsystem und Holzwerkstoffplatte und unterhalb des Fensterbleches aus.



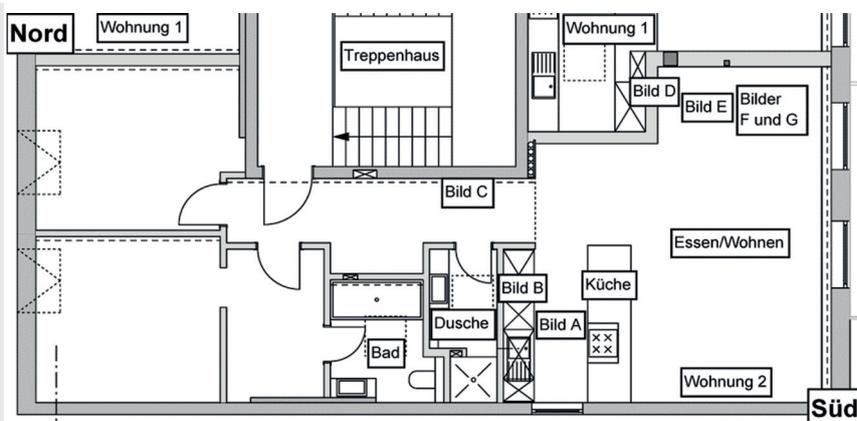
Tabelle 4.28: Verfärbungen mit Pilzbefall in einer Dachkonstruktion

Objekt: 105		Zeitpunkt der Besichtigung: Mai 2015	
Allgemeine Angaben			
Objekttyp / Nutzung	zwei Dachgeschosswohnungen in Mehrfamilienhaus (EG + 4 Obergeschosse)		
Baujahr	2008 oder jünger (Dachgeschoss-Whg.)		
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	gesamtes Schadensausmaß Mai 2015		
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	lokal bräunliche Verfärbung an der Gipskartonbekleidung der Dachschräge, z. T. massiver Pilzbefall an der Holzschalung		
Haustechnik	Zentralheizung, Kaminofen in Whg. 1, Abluft-Dunstabzugshauben		
Konstruktion (von außen nach innen)			
Dach (z. T. flach geneigt, z. T. Steildach)	<p>Im Bereich des flach geneigten Daches: aufgeständerte Dachterrasse und diverse Lüfter zur Belüftung der Luftschicht unterhalb der Holzschalung</p> <p>Bitumenbahn – Holzschalung (22 mm) – Sparren (240 mm) / Mineralwolle­dämmung (200 mm, z. T. bis zur Holzschalung angrenzend) – Dampfbremse – 2 x Unterkonstruktion/Luftschicht (120 mm) – Gipskarton (14 mm), endet traufseitig mit Abstand vor aufgehender Wand</p>		
Luftdurchlässigkeit			
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	1.587 / 1.469 Unterdruck Wohnung 1 (1) / Unterdruck Wohnung 2 (2)	Die Messungen wurden zu einem früheren Zeitpunkt im Rahmen einer Leckagesuche als „Einpunktmessung“ im Unterdruckbetrieb durchgeführt. Die Vorbereitungen entsprachen Verfahren B nach DIN EN 13829.	
Innenvolumen in m³	248 (1) / 249 (2)		
Hüllfläche in m²	–		
n₅₀ in 1/h	6,4 (1) / 5,9 (2)		
q₅₀ in m³/(m²h)	–		

Fortsetzung Tabelle 4.28

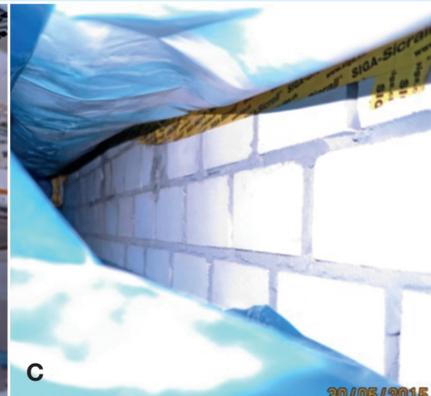
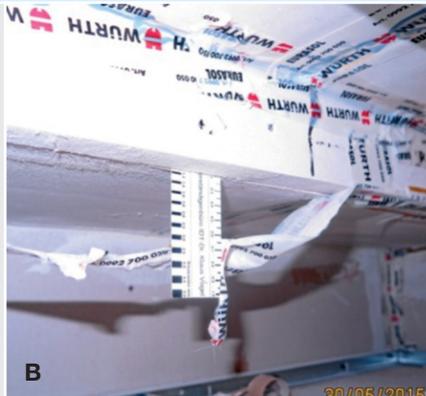
Leckageverteilung (exemplarisch, mit Bildhinweisen)

Die Leckagesituation (primäre Leckagen) ist geprägt von einer Vielfalt in Form und Größe sehr unterschiedlicher Einzelleckagen. Insgesamt werden die vorhandenen Leckagen in ihrer Gesamtheit für die festgestellten Schäden als ursächlich angesehen. Weitere Einflüsse durch beispielsweise die Dachabdichtung sind nicht auszuschließen. Zwischen Schadensbild und Leckage(n) kann ein räumlicher Abstand bestehen (z. B. Bild A und Bild B; Bild D und Bild F).



Bilder zu Leckagen (primäre Leckagen, exemplarisch)

In der Nähe eines stärkeren Pilzbefalls der Holzschalung (siehe allgemeine Angaben, Bild A) befindet sich ein Stahlträger, der mit einer Brandschutzbauplatte verkleidet ist. Dieser Bereich ist nicht vollständig in die Luftdichtheitsschicht eingebunden und verfügt über zahlreiche offene Fugen (Bild B entstand bei Nachbesserungsversuch). Bild C zeigt eine undichte Anschlusssituation der Dampfbremse an unverputztes Mauerwerk.



Die Mineralwolledämmung im Sparrenfeld zeigt Verfärbungen, die räumlich gut zu den in Voruntersuchungen festgestellten Undichtigkeiten in der Folie (Dampfbremse)/Verklebung passen (Bild D entstand nach Nachbesserungsversuch mit anschließender Bauteilöffnung). Bild E zeigt eine schwebende Verklebung der Dampfbremse, bei der es offene Stellen zwischen Klebeband und Folie gibt.



Sonstiges

Bräunliche Verfärbung an der Gipskartonbekleidung der Dachschräge im Bereich eines Plattenstoßes (Bild F). Auf der Rückseite der Gipskartonplatte ist eine rund 1,2 m lange Ablaufspur zu erkennen, die ihren Anfangspunkt an einer offenen Stelle zwischen Klebeband und Folie hat (Bild G, siehe auch Bild E). Diese Verfärbungen haben ihren Ursprung in einer Feuchteansammlung auf der Dampfbremse im Bereich von Bild D.

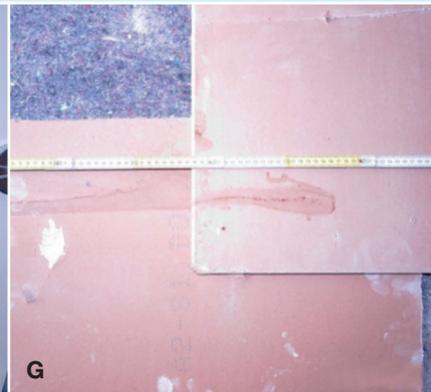
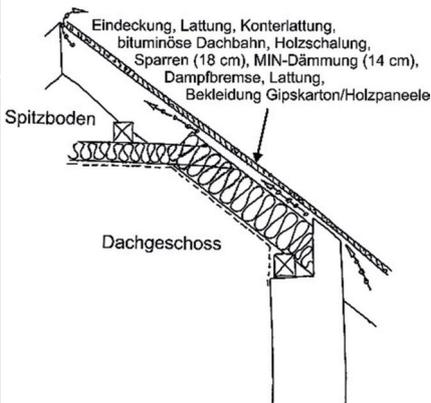
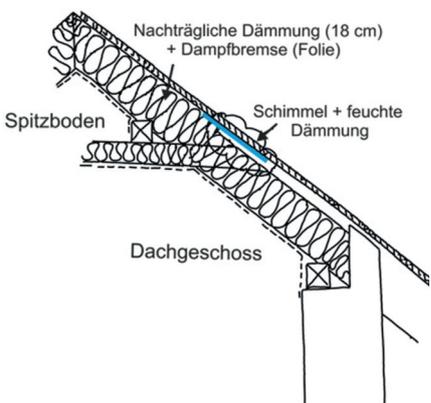


Tabelle 4.29: Verfärbungen unter einem Dachüberstand und Geruchsbelästigungen

Objekt: 110	Zeitpunkt der Besichtigung: Mai 2013	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienhaus in Ziegelbauweise mit Keller-, Erd-, Dachgeschoss, Spitzboden	
Baujahr	2000 / Dämmung der Dachschräge des Spitzbodens in 2012	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	Geruchsbeeinträchtigung zeitnah zu zusätzlicher Dämmung des Spitzbodens, traufseitige Verfärbungen etc. Mai 2013	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Geruchsbeeinträchtigungen, traufseitige Verfärbungen am weißen Dachüberstand, Schimmelbefall auf der Innenseite der Dachschalung und feuchte Dämmung im Bereich der Kehlbalckendecke	
Haustechnik	Gasheizung	
		Bauteilöffnung im Spitzboden mit auf der Holzschalung sichtbarem Schimmelbefall
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand verputztes Ziegelmauerwerk		
Dach 2000 bis Sommer 2012 (Skizze links) ab Herbst 2012 (Skizze rechts)	 <p>Eindeckung, Lattung, Konterlattung, bituminöse Dachbahn, Holzschalung, Sparren (18 cm), MIN-Dämmung (14 cm), Dampfbremse, Lattung, Bekleidung Gipskarton/Holzpaneele</p>	 <p>Nachträgliche Dämmung (18 cm) + Dampfbremse (Folie)</p> <p>Schimmel + feuchte Dämmung</p>
Bilder zu Schädigungen		
Schimmelbefall auf der Innenseite der Dachschalung im Bereich der Kehlbalckendecke, der nach Bauteilöffnung sichtbar wird. Der Schimmel reicht bis ca. 1,5 m in den nachträglich gedämmten Dachspitz, welcher durch die Dämmmaßnahme nicht mehr luftdurchströmt ist (Bild links). An einer Bauteilöffnung von außen zeigt die exemplarisch entnommene Mineralwollendämmung eine Verfärbung als Hinweis auf Luftströmungen auf (Bild rechts).		

Fortsetzung Tabelle 4.29

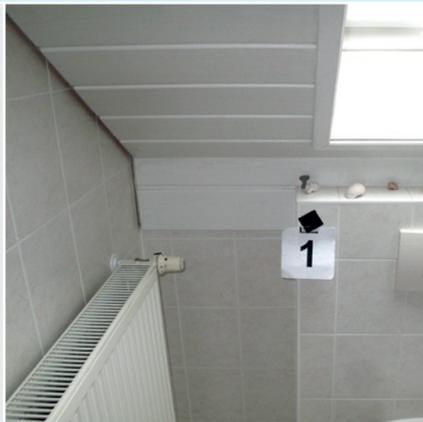
Bilder zu Leckagen (primäre Leckagen)

Hinter der bereits entfernten Gipskartonbekleidung der Dachschräge befindet sich eine Folie, die weder an die Fußpfette (Bild links) noch an die Giebelwand (Bild rechts) luftdicht angeschlossen ist.



Bilder zu Leckagen (sekundäre Leckagen)

sekundäre Leckagen im Bereich der Holzpaneele (Schattenfuge, Nut-Feder-Verbindung – Bild links) und an Fugen der Gipskartonbekleidung im Bereich Dachschräge/Wand (Bild rechts)

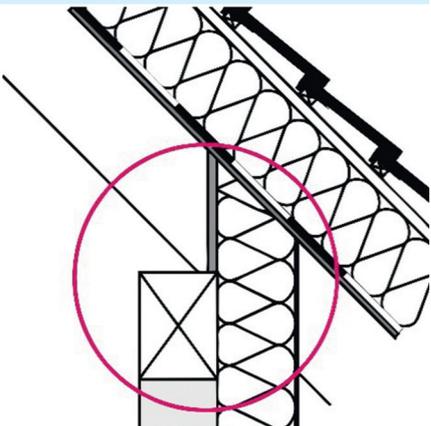


Sonstiges

Bei Überdruck im Gebäude dringt Theaternebel von innen über die Holzpaneele und Folie (siehe sekundäre Leckagen Nr. 1) nach außen und wird traufseitig unterhalb der Dachschalung und um den Sparren sichtbar (Bild links). Ferner verteilt sich der Theaternebel über den Luftspalt oberhalb der Bestandsdämmung und tritt im Spitzboden aus (Bild rechts; hier: nachträgliche Dämmung und Folie entfernt).



Tabelle 4.30: Eisbildung unter einem Dachüberstand

Objekt: 107		Zeitpunkt der Besichtigung: Juni 2008
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienhaus in Ziegelbauweise, z. T. Fachwerk, mit Erd- und Dachgeschoss	
Baujahr	um 1890, verschiedene Umbauten, 2007 Sanierung mit neuer Dämmung in den Bereichen Dach und Außenwand	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	Winter/Frühjahr 2007/2008	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Reif-/Eisbildung an der Außenseite von Giebel und Traufe	
Haustechnik	Ölheizung/Raumbefeuchtung ($\varphi < 50 \%$)	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand	Wärmedämmung (z. T. verputzt, z. T. Vorhangfassade) – verputzter Ziegel unterschiedl. Dimension (z. T. Fachwerk)	
Dach	Eindeckung – Traglattung – Konterlattung – PU-Dämmung – Dampfbremse – Holzschalung – Sparren	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	ca. 1.800 Unterdruck	<p>Der Leckagestrom wurde anlässlich einer Leckagesuche im Jahr 2008 orientierend bestimmt.</p> <p>Einzelne Ventilatoren, die Dunstabzugshaube und Fenster ohne Gummidichtung wurden vor der Untersuchung abgeklebt.</p>
Innenvolumen in m³	ca. 600	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	ca. 3,0	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	

Fortsetzung Tabelle 4.30

Bilder zu Schäden und Leckagen

An den Dachüberständen im Bereich des Ortgangs (Bild links) und der Traufe (Bild rechts) tritt Raumluft nach außen, wodurch es in der kalten Jahreszeit zu Reif- bzw. Eisbildung kommt.



Bei der Sanierung in 2007 soll der Dachstuhl mit Holzschalung erhalten bleiben (Bild links, Innenaufnahme). Die Folie oberhalb der Holzschalung läuft im Bereich der Traufe über die Außenwand hinweg, wodurch keine in sich geschlossene Luftdichtheitsebene zwischen Dach und Wand gegeben ist. Raumluft kann zwischen Holzschalung des Daches und der Wand, an den Sparrendurchdringungen und der Fußpfette ausströmen (Bild rechts). Am Ortgang ist die Sichtschalung unterbrochen und die Folie auf die Mauerkrone geführt, dennoch liegen ausführungsbbedingt Leckagen vor, wodurch es auch dort zu Reif- bzw. Eisbildung kommt.



Durchgeführte Nachbesserungen, bei denen u. a. auch die Holzschalung traufseitig geöffnet und eine Verbindung der Folie des Daches mit der Außenwand hergestellt wird (Bild links), bringen keinen umfassenden Erfolg. Es gibt weiterhin Leckagen im Bereich der Anschlüsse und an den mit Rissen versehenen historischen Sparren. Im auf die Nachbesserungen folgenden Winter kommt es erneut zur Reif- bzw. Eisbildung (Bild rechts).



Tabelle 4.31: Verfärbungen einer Mineralwolledämmung und Schimmel auf der Unterseite einer Unterspannbahn

Objekt: 108	Zeitpunkt der Besichtigung: August 2015	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Einfamilienhaus in Porenbetonbauweise mit Keller-, Erd-, 1. und 2. Dachgeschoss	
Baujahr	2006	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	Sommer 2015, bei vollständiger Erneuerung der Luftdichtheitsschicht	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	Verfärbung der Mineralwolledämmung, z. T. Schimmel auf der Innenseite der Dachbahn, Wasserablaufspuren auf Holzoberflächen im Gefachbereich	
Haustechnik	Gas-Brennwertheizung, Abluft-Dunstabzugshaube	
Fall mit OLG-Urteil	OLG Karlsruhe, Urteil vom 29.11.2013, Geschäftsnummer 13 U 80/12	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand	verputztes Porenbetonmauerwerk (30 cm)	
Dach	Eindeckung – Lattung / Konterlattung – Dachbahn – Sparren / Mineralwolledämmung (20 cm) – Dampfbremse -Lattung – Gipskarton	
Luftdurchlässigkeit		
Leckagestrom bei 50 Pa in m³/h	709 → 795 → 752 Unterdruck → Überdruck → Mittelwert	Die Messung wurde 2009 im Rahmen eines gerichtlichen Verfahrens durchgeführt. Es bestanden Öffnungen in der Gipskartonbekleidung, die im Rahmen von lokal durchgeführten Nachbesserungen erstellt wurden.
Innenvolumen in m³	447	
Hüllfläche in m²	–	
n₅₀ in 1/h	1,7	
q₅₀ in m³/(m²h)	–	

Fortsetzung Tabelle 4.31

Bilder zu Schäden und Leckagen

Hinter der bereits entfernten Gipskartonbekleidung der Dachschräge im 2. Dachgeschoss befindet sich eine Folie, die in dem hier exemplarisch gezeigten Bereich keine sichtbaren Beschädigungen aufweist. Hinter der Folie ist eine verfärbte Mineralwolle-dämmung zu erkennen.



Lokal treten Verfärbungen auf der Innenseite der Dachbahn auf, die auf Schimmelpilze zurückzuführen sind (Bild links). Auf der Oberseite der Mittelpfette zwischen 1. und 2. Dachgeschoss (Niveau Boden 2. DG) sind z. T. Lecks im Anschlussbereich Folie der Dachschräge auf Mittelpfette vorhanden (hier: Einsatz einer pastösen Masse – Bild rechts). Diese Lecks befinden sich z. T. in deutlichem Abstand zu Verfärbungen in der Mineralwolle-dämmung.



Auf der Oberseite der Mittelpfette zwischen 1. und 2. Dachgeschoss (Niveau Boden 2. DG) sind Lecks im Anschlussbereich Folie der Dachschräge auf Mittelpfette vorhanden (hier: Verlängerung der Folie mit Folienstreifen und Einsatz von Haftklebeband – Bild links). Im Anschlussbereich Folie der Dachschräge auf Firstpfette gibt es zahlreiche Fehlstellen, beispielsweise an nicht mit Klebmasse verfüllten Folienfalten (Bild rechts).



Primäre Leckage an einem Schnitt in der Folie im 2. Dachgeschoss mit dahinter sichtbarer Verfärbung der Mineralwolle-dämmung (Bild links). Sekundäre Leckage an einer Fuge im bodennahen Bereich der Gipskartonbekleidung im 2. Dachgeschoss (Bild rechts).

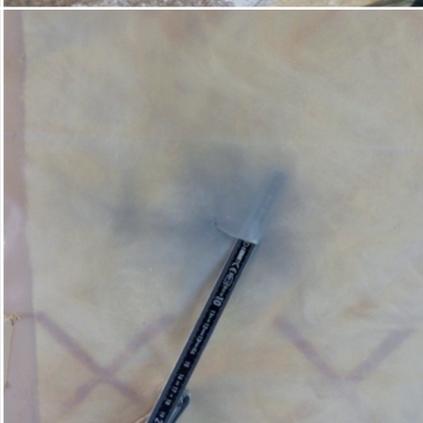
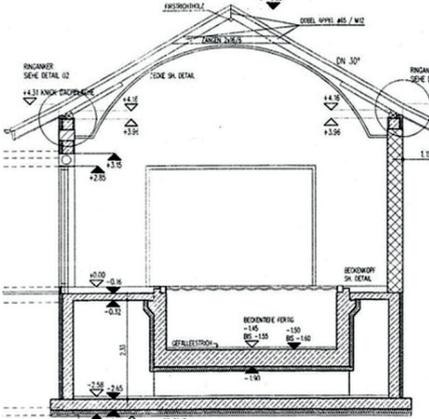


Tabelle 4.32: Verfärbungen unter einem Dachüberstand und Zerstörung der Holzschalung einer Dachkonstruktion

Objekt: 109	Zeitpunkt der Besichtigung: April 2008	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	private Schwimmhalle in Ziegelbauweise	
Baujahr	2000	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	erste Jahreshälfte 2004	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	zum Teil traufseitige Verfärbungen des weißen Dachüberstandes; Beginn einer teilweise flächigen Zersetzung der Holzschalung mit oberseitig angegriffenen Sparren	
Haustechnik	Lüftungsanlage im Überdruckbetrieb	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand	verputztes Ziegelmauerwerk	
Dach	Schiefereindeckung – Dachbahn – Holzschalung (30/130 mm) – Lattung (35/100 mm) – Dachbahn – Holzschalung (22/95 mm) – Sparrenlage (10/18 cm) – Sparrenlage (10/16 cm) / Mineralwolle – Folie als Dampfsperre + Luftdichtheitschicht – Unterkonstruktion – Gipskarton	
Bilder zu Schädigungen		
traufseitige Verfärbungen/Ablaufspuren am Dachüberstand (Bild links), Bauteilöffnung am Dach mit geschädigter Holzschalung (Bild rechts)		

Fortsetzung Tabelle 4.32

Bilder zu Schädigungen (von innen)

Nach Entfernen von Gipskartonbekleidung, Folie und Dämmung wird der Beginn einer teilweise flächigen Zersetzung der Holzschalung mit oberseitig angegriffenen Sparren durch Pilze sichtbar.



Bilder zu Leckagen (primäre Leckagen)

Im Anschlussbereich der Folie der Dachschräge an die Wand strömt der Rauch eines Rauchröhrchens aufgrund des durch die Lüftungsanlage erzeugten Überdrucks in den Dachaufbau (Bild links). Der entsprechende Anschluss der Folie an die Wand mittels pastöser Masse ist nicht luftdicht (Bild rechts).



Die Ablaufspuren liegen sowohl zwischen Folie der Dachschräge und der Wand (Bild links) als auch auf der Folie der Dachschräge vor. Die Ablaufspuren auf der Folie sind in Verbindung mit Lecks an den Verklebungen der Folienüberlappungen und Durchdringungen der Abhänger zu bringen (Bild rechts: A, B).

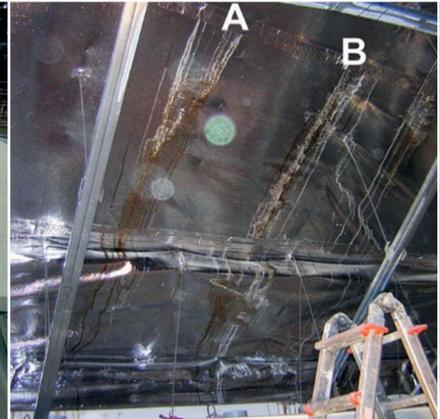
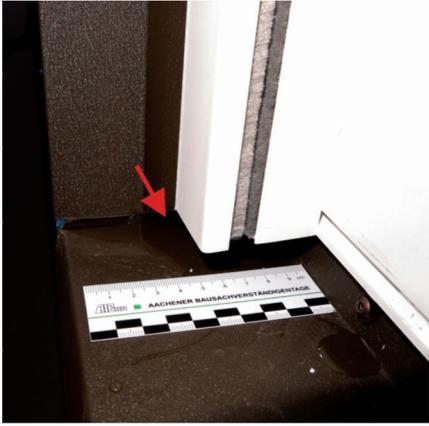


Tabelle 4.33: Feuchtigkeitsausfall auf der Außenseite neu eingebauter Kunststofffenster

Objekt: 106	Zeitpunkt der Besichtigung: Dezember 2015	
Allgemeine Angaben		
Objekttyp / Nutzung	Aufstockung (DG) eines Einfamilienhauses (KG, EG, 1. OG) in Holzbauweise	
Baujahr	Bestandsgebäude ca. 1950/2015	
Zeitpunkt der Feststellung der Beeinträchtigung / des Schadens	Herbst 2015	
Art der Beeinträchtigung / Schadensbild	während des Bauprozesses Feuchtigkeitsausfall außen im Bereich neu eingebauter Kunststofffenster	
Haustechnik	Kaminofen, Ölheizung im Bestandsgebäude	
Konstruktion (von außen nach innen)		
Außenwand/Gaube	Blech – Fassadenbahn – Holzschalung (24 mm) – Holzständer (80 x 180 mm) / Dämmung aus Altpapier – Holzwerkstoffplatte-OSB (15 mm) – Kantholz (60 x 60 mm) / Mineralwolle dämmung – Gipskartonplatte (12,5 mm, noch nicht angebracht); vertikale Fugen zwischen Kunststofffenster und Holzständer mit vorkomprimiertem Dichtband (64 mm breit) versehen; im Brüstungsbereich Einsatz eines Fensteranschlussbandes	
Bilder zu Leckagen (primäre Leckagen)		
Das vorkomprimierte Dichtband ist nicht ausreichend komprimiert. Im Eckbereich der Leibung treffen unterschiedliche Materialien für die luftdichte Anbindung des Fensters an das Holzbauteil zusammen (Bild links). Bei Überdruck im Gebäude dringt Theaternebel von innen überwiegend im Bereich des nicht ausreichend komprimierten Dichtbandes nach außen (Bild rechts).		

5 Simulative Bewertung von Leckagen

5.1 METHODISCHES VORGEHEN

Um Leckagen hinsichtlich ihrer feuchtechnischen, energetischen und Behaglichkeitsrelevanz zu untersuchen, werden zielgerichtet Simulationen durchgeführt. Hierzu wird die HygZO (Hygrothermal ZOnal) Modellbibliothek erstellt. Diese basiert auf bereits am IBP erarbeiteten Modellbibliotheken und -bausteinen und erweitert diese um Modelle für Leckageströmungen und die hygrothermische Interaktion zwischen Luft und Feststoff in einem durchströmten Material. Zudem werden einzelne Materialmodelle auf eine 3D-Simulation erweitert.

Als Referenzfall für die Simulation dient ein im Rahmen des Forschungsprojekts näher untersuchtes und gut dokumentiertes Objekt (vgl. Kapitel 4, Tabelle 4.25). Basierend auf diesem Objekt werden Varianten bezüglich der Luftdichtheit gebildet. Da bei der Fragebogenauswertung die feuchtebezogene Relevanz von Leckagen als wichtigstes Untersuchungsobjekt heraussteht (vgl. Kapitel 3), wird diese Untersuchung in der Simulation weiter detailliert. In einer Parameterstudie werden die Größen verschiedener Leckagen variiert und deren Einfluss auf die Feuchteakkumulation im Dach bewertet. Die Relevanz von Leckagen hinsichtlich Energie und Komfort wird mithilfe des zonalen Modells VEPZO (VELOCITY Propagating ZOnal Model) bewertet.

5.2 GRUNDLAGEN

5.2.1 HYGROTHERMISCHE GRUNDLAGEN

Die Wärmestromdichte q (in W/m^2) ergibt sich aus dem Temperaturgradienten $(\Delta T/\Delta x)$ (in K/m) und der Wärmeleitfähigkeit λ (in W/mK) des Materials:

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{5.1}$$

Die Dampfstromdichte infolge Diffusion m_{vap} (in kg/m^2s) ergibt sich aus

dem Dampfdruckgradienten $(\Delta p_{vap}/\Delta x)$ (in Pa/m) und der Dampfpermeabilität δ (in $kg/(m \cdot s \cdot Pa)$). Letztere ergibt sich aus dem Verhältnis des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten δ_a (in $kg/msPa$) und der dimensionslosen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ (DIN 52615 1987):

$$m_{vap} = \delta \cdot \frac{\Delta p_{vap}}{\Delta x} \tag{5.2}$$

$$\delta = \frac{\delta_a}{\mu} \text{ mit } \delta_a = \frac{2e^{-7} \cdot T^{0,81}}{p} \tag{5.3}$$

wobei T die Lufttemperatur (in K) und p der Luftdruck (in Pa) sind.

Der s_d -Wert (in m) berechnet sich aus der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ und der Materialdicke d (in m):

$$s_d = \mu \cdot d \tag{5.4}$$

Der Wasserdampfdruck im Material p_{vap} (in Pa) berechnet sich aus der relativen Feuchte φ (in $\%$) multipliziert mit dem Sättigungsdampfdruck p_{sat} (in Pa). Der Sättigungsdampfdruck ist abhängig von der Temperatur v (in $^\circ C$):

$$p_{vap} = \varphi \cdot p_{sat} \tag{5.5}$$

mit $p_{sat} = 611 \cdot e^{\left(\frac{a \cdot v}{v_0 + v}\right)} Pa$

Für Temperaturen über $0^\circ C$ gilt $a = 17,08$ und $v_0 = 234,18^\circ C$; darunter gilt $a = 22,44$ und $v_0 = 272,44^\circ C$.

Die relative Feuchte φ im Material ergibt sich aus dem Wassergehalt im Material und der Sorptionsisotherme. Die Sorptionsisotherme ist eine materialspezifische Funktion.

Für die Simulation werden Bauteile in Knoten aufgeteilt. Die Bilanzierung der Wärme- und Feuchteströme erfolgt für jeden dieser Knoten. Die Summe der ein- bzw. ausströmenden Wärme und Feuchteströme ergeben die Änderung der Materialenthalpie H (in J) im Knoten i,j bzw. des Wassergehaltes W

(in kg). Bei der Berechnung der Materialenthalpie gehen neben den Wärmestromdichten auch die Dampfstromdichten mit der jeweiligen spezifischen Dampfenthalpie h_v (in J/kg) ein. A ist die Kontaktfläche zweier benachbarter Knoten:

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial t} = \sum q \cdot A + \sum h_v \cdot m_{vap} \cdot A \tag{5.6}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \sum m_{vap} \cdot A \tag{5.7}$$

5.2.2 THERMISCH INDUZIERTER DRUCKDIFFERENZ

Der Grund für thermisch induzierte Strömungen ist, dass der Luftdruck in einer Luftsäule mit zunehmender Höhe abnimmt. Erdnah ist diese Abnahme mit guter Näherung linear über der Höhe h (in m). Die Steigung wird durch die Dichte ρ (in kg/m^3) der Luft bestimmt. Die Gravitationsbeschleunigung ist g ($9,81 m/s^2$):

$$p(h) = p_0 - \rho \cdot g \cdot h \tag{5.8}$$

Die Dichte der Luft ist bei niedrigen Temperaturen größer als bei höheren Temperaturen. Dies bedingt eine unterschiedliche Abnahme des Luftdrucks über der Höhe. Somit stellt sich zwischen zwei Volumina unterschiedlicher Temperatur eine höhenabhängige Druckdifferenz ein. Sind Leckagen oder Öffnungen vorhanden, führt dies dazu, dass Luft aus dem Volumen mit kälterer Luft im unteren Bereich in das Volumen mit wärmerer Luft strömt, während die wärmere Luft im oberen Bereich in das Volumen mit kälterer Luft strömt. Dazwischen liegt ein Bereich, die sogenannte druckneutrale Zone, in dem keine antreibende Druckdifferenz auftritt (vgl. Bild 5.1).

5.2.3 STRÖMUNGSRECHNUNG

Für Leckagen wird der Luftvolumenstrom \dot{V} (in m^3/h) häufig über einen Faktor und einen Exponenten berechnet:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^n \tag{5.9}$$

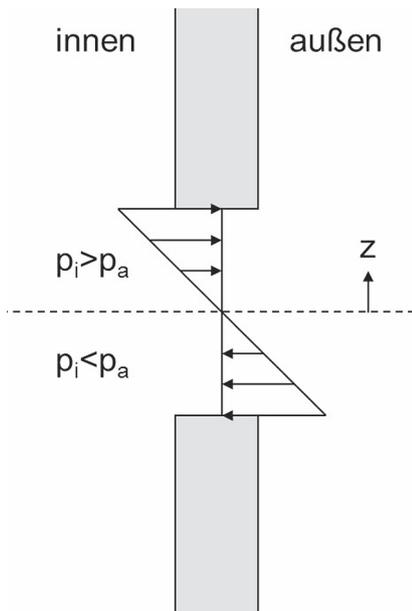


Bild 5.1: Thermisch induzierte Druckdifferenz am Beispiel eines geöffneten Fensters (Annahme: Luft außen kälter als innen)

Gegebenenfalls muss obige Formel mit der Fugenlänge bzw. durchströmten Fläche korrigiert werden.

5.2.3.1 BAUTEILANSCHLUSSFUGEN

Für Bauteilanschlussfugen besagt DIN 4108-2 (2013): „Die aus Messergebnissen abgeleitete Luftdurchlässigkeit von Bauteilanschlussfugen muss kleiner als

$$0,1 \frac{m^3}{m \cdot h \cdot (daPa)^{2/3}} \text{ sein}.$$

Von diesem Wert ausgehend lässt sich für Formel (5.9)

$$0,1 \cdot l \frac{m^3}{m \cdot h \cdot (daPa)^{2/3}}$$

und $n = 2/3$ ableiten, wobei l die Fugenlänge (in m) ist.

5.2.3.2 EINBAUELEMENTE

Wolf und Tyler (2013) geben einen Überblick über Leckageströme verschiedener Einbauelemente wie Steckdosen, Schalter, Einbaustrahler und den Bereich um Lüftungsöffnungen. Dabei werden für die Strömungsmenge Korrelationen gemäß Tabelle 5.1 abgeleitet.

5.2.3.3 FENSTER UND TÜREN

DIN EN 12207 (2000) definiert Klassen der Luftdurchlässigkeit von Fenstern gemäß Tabelle 5.2.

Unter der Annahme, dass $n = 2/3$ ist, ergibt sich

$$C = 0,3133 \cdot l \frac{m^3}{h \cdot m} \text{ für Klasse 2}$$

und

$$C = 0,1044 \cdot l \frac{m^3}{h \cdot m} \text{ für Klasse 3,}$$

wobei l die Fugenlänge (in m) ist.

5.2.3.4 MINERALWOLLE

Angaben zum längenbezogenen Strömungswiderstand von Mineralwolle finden sich vor allem unter dem Aspekt des Schallschutzes. Typische Werte für den längenbezogenen Widerstand sind $5000 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m} / \text{m}^3$ (z. B. Urša 2015).

Da nur sehr langsame Sickerströmungen durch Mineralwolle erwartet werden, wird angenommen $n = 1$ und

$$C = \frac{A}{5000 \cdot l} \frac{m^2}{s \cdot Pa}$$

wobei l die durchströmte Länge (in m) und A die Querschnittsfläche (in m^2) sind.

5.2.4 SIMULATIONSWERKZEUGE

Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Modelica Sprache und das vom Fraunhofer IBP entwickelte Tool WUFI verwendet. Beide unterteilen die zu simulierenden Bauteile in Knoten. Zwischen diesen Knoten wird der

Wärme- und Feuchtetransport berechnet. Ein- und ausgehende Ströme werden knotenweise bilanziert.

Modelica ist eine objektorientierte, gleichungsbasierte Modelliersprache (Modelica and the Modelica Association 2016). Gleichungsbasiert bedeutet hierbei, dass Modellentwickler sich auf die mathematisch-physikalische Problemdefinition konzentrieren können und die zu bestimmenden Differentialgleichungen direkt in der Modellsprache formulieren. Die Lösung des daraus resultierenden Gleichungssystems übernimmt eine speziell dafür entwickelte Simulationssoftware. Objektorientiert bedeutet in diesem Kontext, dass Modelica es ermöglicht, Schnittstellen-, Parameter- und Variablendefinitionen einfacherer Modelle zu übernehmen und um weitere Funktionen zu erweitern. Zur Simulation von in Modelica programmiertem Code werden verschiedene Softwarepakete verwendet, wie beispielsweise Dymola (kommerziell) oder OpenModelica (frei verfügbar).

5.2.4.1 WUFI

WUFI ist eine Software zur Simulation des Wärme- und Feuchtetransports in Materialschichtaufbauten (WUFI 2016). Ausgehend von der Materialschichtfolge, der Ausrichtung des

Tabelle 5.1: Strömungskoeffizienten verschiedener Leckagen nach Wolf und Tyler (2013)

	C in $l/(s \cdot Pa^n)$	n
Deckenstrahler	0,494	0,552
Durchführung für Lüftungsöffnung	0,415	0,554
Innensteckdose	0,117	0,601
Außensteckdose	0,096	0,668
Lichtschalter	0,085	0,524

Tabelle 5.2: Luftdichtheitsanforderungen an Fenster bezogen auf Fugenlänge nach DIN EN 12207 (2000)

Klasse	Luftdurchlässigkeit bei 100 Pa in $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$
0	nicht geprüft
1	12,5
2	6,75
3	2,25
4	0,75

Bauteils, der Außen- und Innenklima- randbedingungen werden die transienten Temperatur- und Feuchteprofile in den Materialschichten berechnet. Luft-Leckagen in das Bauteil können in WUFI als äquivalente Feuchtequelle hinzugefügt werden (Zirkelbach et al. 2009). Der Nutzer gibt hierzu den q_{50} -Wert des Bauteils ein, die Höhe der anliegenden Luftsäule und den Druck durch mechanische Lüftungsanlagen. Der q_{50} -Wert wird auf die entsprechend anliegende Druckdifferenz umgerechnet. Es wird angenommen, dass rund 7 % des so berechneten Luftstromes in Dachaufbauten als äquivalente Feuchtequelle zur Verfügung stehen.

5.2.4.2 MODELICA

Um flexibel Parameterstudien und Modellanpassungen vornehmen zu können, wurden die hygrothermischen Gleichungen, die WUFI zugrunde liegen, von Nouidui (2008) in Modelica übertragen. Die hieraus entstandene Modellbibliothek bildet die Grundlage für die in diesem Projekt durchgeführten Simulationen.

Ein Wand- bzw. Deckenaufbau besteht aus verschiedenen Schichten entsprechend der Materialabfolge (Bild 5.2). Diese sind wiederum in Knoten diskretisiert. Wetterdaten aus Testreferenzjahren oder aus Messungen bilden die Außenrandbedingung, ein angenommenes Raumklimaprofil bildet die Innenrandbedingung.

In Norrefeldt et al. (2012) und Norrefeldt (2013) wurde das zonale Modell VEPZO entwickelt. Zonale Mo-

delle unterteilen einen Raum in typischerweise 10 bis 100 Zonen (Boukhris et al. 2009), die miteinander im Luftaustausch stehen. Zonale Modelle stellen einen Kompromiss zwischen schnell zu berechnenden, aber nicht räumlich aufgelösten Ein- und Multizonenmodellen und der numerisch aufwändigen CFD (Computational Fluid Dynamics) dar (Bild 5.3). Das zonale Modell erfasst den Einfluss von Lage und Intensität verschiedener Wärme- und Strömungsquellen im Raum. Zudem wer-

den stark angetriebene Strömungen durch einen Trägheitsterm in der Gleichungsformulierung in den Raum hineingetragen.

Um die Modellerstellung zu erleichtern, wird eine Toolkette genutzt, die basierend auf einer Geometriedatei ein zonales Modell erstellt (Bild 5.4). Einzelne Räume können dabei unterschieden werden und Zonen werden konsistent an die Nachbarzone bzw. Nachbarwand angebunden (Pathak et al. 2014).

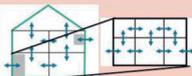
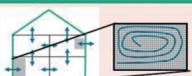
Modell	Schema	Rechenzeit	Auflösung
Einzonen		Niedrig	Nein
Multizonen		Niedrig	Niedrig
Zonal		Mittel	Mittel
CFD		Hoch	Hoch

Bild 5.3: Einordnung zentraler Modelle zur Simulation von Raumluftströmungen

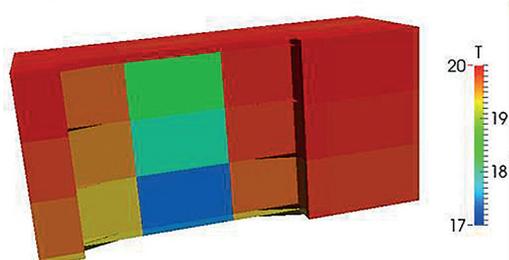
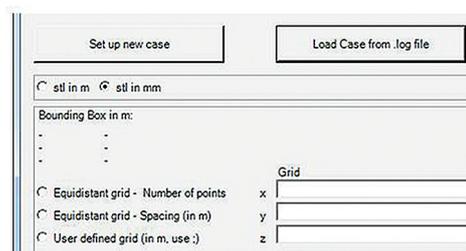
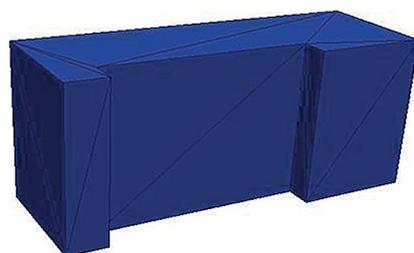


Bild 5.4: Schematische Funktion des Thermal Model Generation Tool, oben: Eingangsgeometrie, Mitte: Benutzerdialog, unten: Darstellung des Simulationsergebnisses

Schicht 1 Schicht ... Schicht m

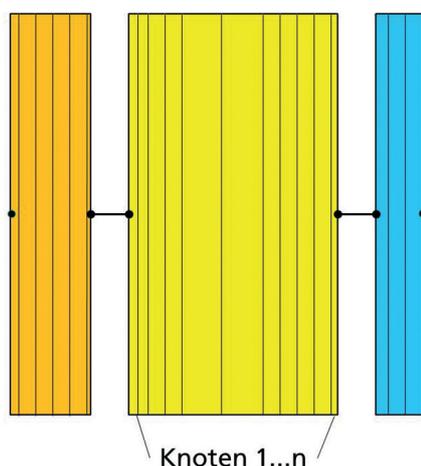


Bild 5.2: Unterteilung eines Wand- bzw. Dachaufbaus in Schichten und Knoten

5.3 IMPLEMENTIERUNG DER HYGZO MODELLBIBLIOTHEK

Basierend auf den Vorarbeiten wird die HygZO Bibliothek erstellt (Hygrothermal ZONal). Diese Bibliothek stellt Modelle zur zonierten hygrothermischen Simulation zur Verfügung.

5.3.1 ERWEITERUNG DES MATERIALMODELLS

Um mittels Simulation die Bewertung von Leckagen vornehmen zu können, wird die hygrothermische Modelica-Bibliothek von Noudui (2008) in diesem Projekt entsprechend Bild 5.5 erweitert. Zum einen wird ein dreidimensionales hygrothermisches Modell 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 Material-

knoten 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 warmfeuchte Luft in das Luftknotenmodell gedrückt. Somit entsteht ein zusätzlicher Feuchte- und Wärmeeintrag in die Konstruktion.

5.3.2 IMPLEMENTIERUNG DES LECKAGE-MODELLS

Je nach Leckageart variiert der Strömungsexponent n (vgl. Gleichung (5.9)) zwischen 0,5 und 1,0. Ist n kleiner als 1, ergibt sich ein schwer lösbares Gleichungssystem, da bei einer Druckdifferenz von Null eine unendliche Ableitung entsteht. Wechselt also das Vorzeichen einer Druckdifferenz,

muss der numerische Löser die Zeitschritte deutlich verkleinern bzw. scheitert unter Umständen sogar an der Lösung. Daher wird für jede betrachtete Leckage eine linearisierte Druck-Volumenstrom-Funktion implementiert (Bild 5.6). Um die tatsächliche Funktion besser abzubilden, werden zwei lineare Teilabschnitte gebildet. Der erste gilt für Druckdifferenzen < 5 Pa, der zweite darüber. Für negative Druckdifferenzen wird die Kurve entsprechend gespiegelt.

5.3.3 IMPLEMENTIERUNG DES THERMISCHEN STRÖMUNGSANTRIEBES

Um die thermisch angetriebene Strömung zu simulieren, wird jedem Strömungspfad eine Höhe zugewiesen. Der im Bilanzmodell eines Luftknotens berechnete Luftdruck wird mit der entsprechenden Höhe des Strömungspfades korrigiert. Verbindet man so zwei Volumina verschiedener Temperatur über je einen unten und einen oben liegenden Strömungspfad, werden die kühlere Luft im unteren und die wärmere Luft im oberen Bereich strömen.

Externe Leckagen werden an das Außenklimamodell angebunden. Auch dieses Modell weist jedem Strömungspfad eine entsprechende Höhe zu, sodass der meteorologische Luftdruck aus der Wetterrandbedingung um die jeweilige Höhe korrigiert wird.

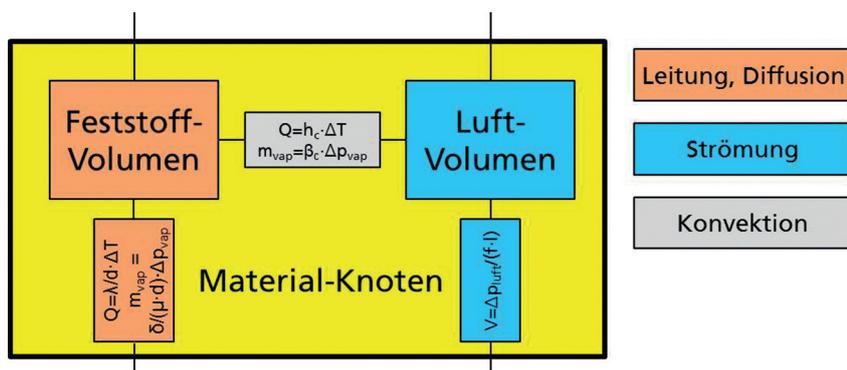


Bild 5.5: Schematische Darstellung der Implementierung eines hygrothermischen Materialknotens mit Durchströmung. Widerstände in den anderen beiden kartesischen Richtungen sind analog zu den dargestellten Widerständen implementiert.

5.3.4 VERIFIKATION DES IMPLEMENTIERTEN CODES

5.3.4.1 VERGLEICH LUFTDICHTES HYGZO MODELL MIT WUFI

Um den erstellten Modelica-Code zu verifizieren, wird ein leckagefreies Modell mit WUFI verglichen. Simuliert wird ein horizontaler Aufbau bestehend aus fünf Schichten (Tabelle 5.3).

Als Innenrandbedingung werden konstant 20 °C und 50 % relative Luftfeuchte angesetzt. Als Außenrandbedingung werden die Wetterdaten „Holzkirchen; IBP, Feuchtereferenzjahr“ benutzt. Ab dem 1. Januar beginnend werden drei Jahre simuliert.

Die Simulationsergebnisse für die Feuchteentwicklung in der Holzschalung (Weichholz) und in der Mineralwolle sind in Bild 5.7 und Bild 5.8 dargestellt. In den Wintermonaten stimmen WUFI und HygZO gut überein, in den Sommermonaten sagt HygZO

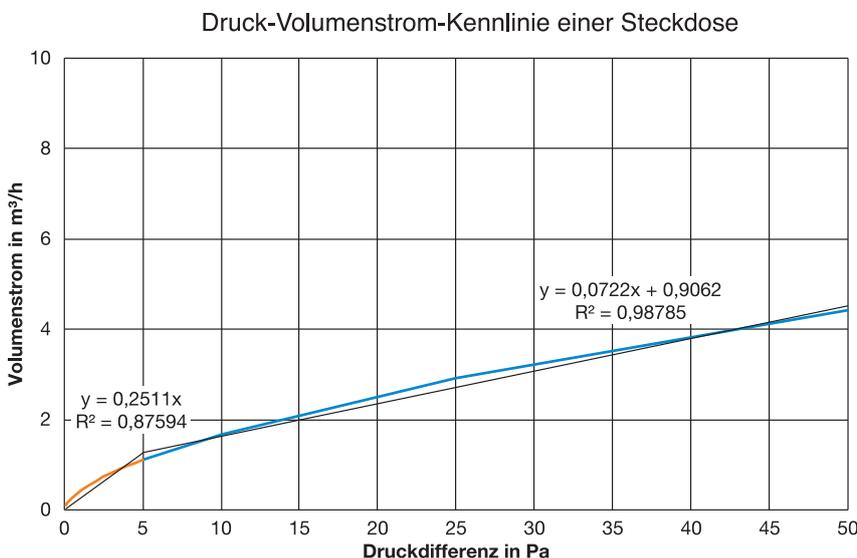


Bild 5.6: Linearisierung der Druck-Volumenstromkurve am Beispiel einer Steckdose

eine höhere Feuchteumlagerung von der Holzschalung in die Mineralwolle voraus als WUFI. Ein Grund könnte sein, dass HygZO zur schnelleren Rechnung mit vereinfachten, linear von der relativen Feuchte abhängigen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen und Wärmeleitfähigkeiten rechnet. Die Abweichung wird als unkritisch bewertet, da sie vor allem im trockeneren und somit nicht schadensträchtigen Bereich auftritt.

5.3.4.2 VERGLEICH DES DURCHSTRÖMUNGSMODELLS MIT HYGZO UND WUFI

Zum eben beschriebenen Modell wird nun in WUFI eine Leckage als Feuchtequelle mit dem IBP Luftinfiltrationsmodell mit einer Höhe der Luftsäule von 3 m und ohne zusätzliche Druckbeanspruchung durch eine Lüftungsanlage simuliert. Die Feuchtequelle liegt bei einer Schichttiefe von 0,017 m in der Holzschalung. Als Grundlage für die Feuchtequelle wird ein q_{50} -Wert von $2,8 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ angenommen.

In HygZO werden die tatsächliche Durchströmung und die hygrothermische Reaktion des Aufbaus simuliert (Bild 5.9). Der Aufbau ist in 5×2 Zonen (jeweils $0,1 \times 0,5 \text{ m}$) in der horizontalen Ebene unterteilt. In der Vertikalen bestehen die Folien (Schicht Nr. 1, 2, 5) jeweils aus einem Knoten und die Dämmung und Holzschalung aus fünf Knoten. Insgesamt ist der Aufbau somit in 130 Zonen unterteilt, von welchen 100 Zonen luftdurchströmt sind.

Der Strömungswiderstand des Aufbaus wird zunächst so angepasst, dass sich bei 50 Pa Überdruck ein Luftvolumenstrom von $1/15$ von $2,8 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ ergibt. Dies entspricht dem IBP Modell zur Berücksichtigung

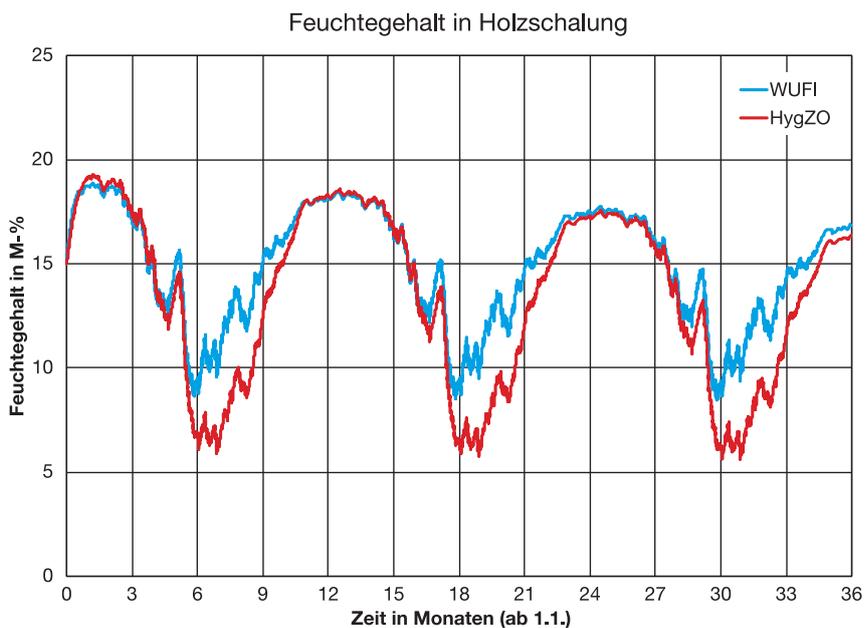


Bild 5.7: Entwicklung der Feuchte in der Holzschalung

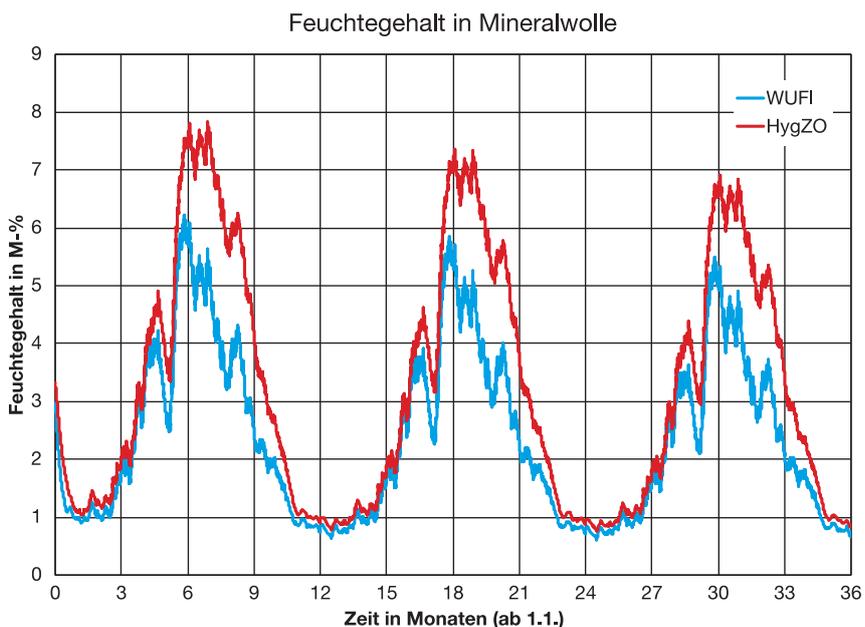


Bild 5.8: Entwicklung der Feuchte in der Mineralwolle

Tabelle 5.3: Materialaufbau im Simulationsmodell von außen nach innen

Lfd. Nr.	Name	d in m	ρ in kg/m^3	c in J/kgK	λ in W/mK	μ dimensionslos	w_0 in kg/m^3
1	Dampfbremse	0,001	130	2300	2,3	50000	0,0
2	Witterungsschutzbahn	0,001	130	2300	2,3	100	0,0
3	Weichholz	0,018	400	1500	0,09	200	60,0
4	Mineralwolle	0,22	60	850	0,04	1,3	1,79
5	Dampfbremse	0,001	130	2300	2,3	100000	0,0

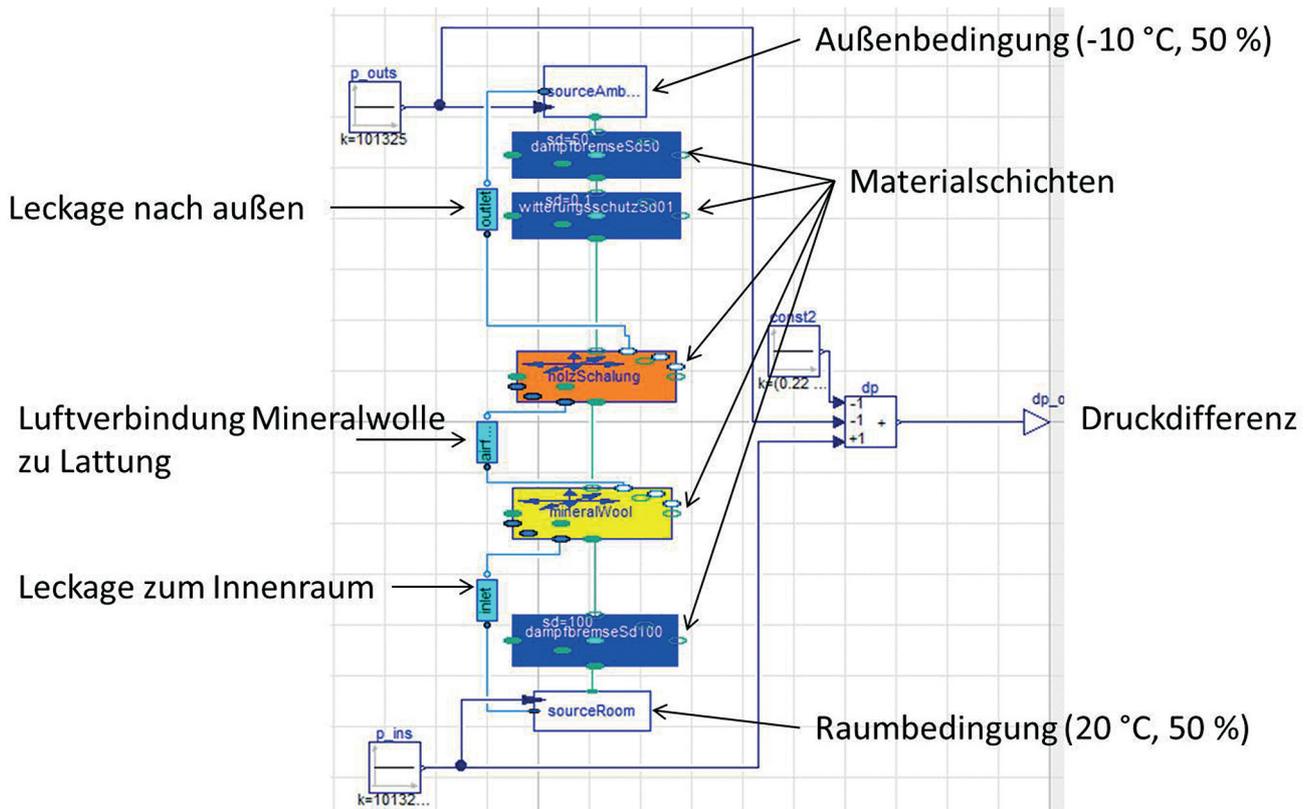


Bild 5.9: Aufbau des HygZO Modells

von konvektivem Feuchteeintrag nach Zirkelbach et al. (2009). Anschließend wird die entsprechend der Luftsäulen- und Aufbauhöhe anliegende Druckdifferenz als Randbedingung aufgebracht (1,32 Pa Überdruck am Dach bei einer Luftsäulenhöhe von 2,4 m und einer Temperaturdifferenz von 30 K).

Wie aus Bild 5.10 ersichtlich, zeigt WUFI in den ersten zwei Simulationsmonaten eine schnellere Veränderung des Wassergehalts in der Holzschalung. Danach nähern sich die Steigungen der beiden Modelle an. Insgesamt ist die Vorhersage des Wassergehaltes in der Holzschalung mit WUFI höher als bei HygZO.

Der Grund für den Unterschied der Feuchtegehalte kann in der Interpolation der Sorptionsisotherme (Wassergehalt über relativer Feuchte) liegen. Typischerweise steigt diese bei Feuchten über 90-95 % stark an, sodass bereits kleine Unterschiede der berechneten relativen Feuchte zu erheblichen Unterschieden des Wassergehaltes führen können. Zudem wird die Luft-Leckage in WUFI als äquivalente Feuchtequelle abgebildet, während diese in HygZO direkt berücksichtigt wird.

Vergleich WUFI mit Feuchtequelle und Modelica 3D mit Luftströmung

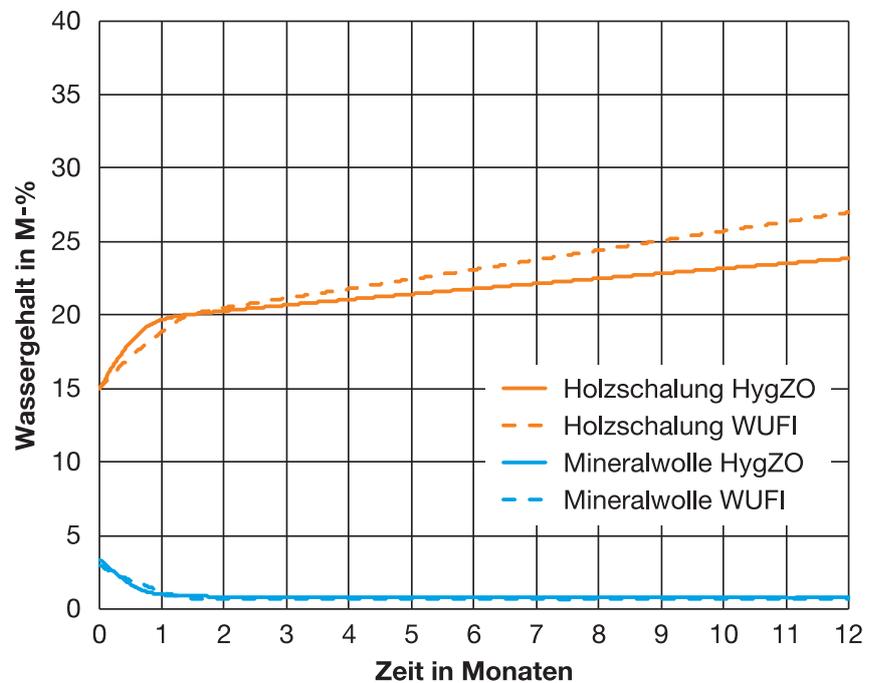


Bild 5.10: Vergleich der Modelica- und WUFI Simulationsergebnisse

5.4 REFERENZ-UNTERSUCHUNGSFALL

Die Umfrageergebnisse zeigen, dass Dächer häufig als schadensträchtige Bauteile angesehen werden. Deshalb wird für die simulative Bewertung von Leckagen ebenfalls ein Dachaufbau als Referenz gewählt.

Der Referenz-Untersuchungsfall orientiert sich an einem im Rahmen des Forschungsprojektes näher untersuchten und gut dokumentierten Dach. Aufgrund eines Feuchteschadens wurde der Dachaufbau zurückgebaut und komplett saniert. Die Untersuchung zeigte, dass eine mangelnde Luftdichtheit der Dampfbremse zu dem Feuchteschaden geführt haben muss, da weitere Feuchtequellen (z. B. Leckagen im Dach) von den beteiligten Unternehmen ausgeschlossen wurden. Das Gebäude liegt in der TRY Klimaregion 13 (TRY = Test Reference Year).

5.4.1 DOKUMENTATION DES REFERENZFALLES

Bei dem Referenz-Untersuchungsfall handelt es sich um eine Dachgeschosswohnung in einem Mehrfamilienhaus in Ziegelbauweise aus dem Jahr 2006 (siehe Tabelle 4.25).

Folgende Eckdaten liegen für das Objekt vor:

- Dachaufbau
 - Aluminium-Doppelstehfalzdeckung
 - diffusionsoffene Vordeckung, überlappend, nicht verklebt
 - Holzschalung (2,4 cm)
 - Sparren mit Mineralwolle als Zwischensparrendämmung (22 cm)
 - feuchteadaptive Dampfbremse (Luftdichtheitsebene)
 - Unterkonstruktion mit Luftspalt
 - Gipskartonbekleidung (verwendet für die Gipskartonplatte in der Decke bzw. Dachschräge)
 - Raumhöhe: 2,46 m bis 2,97 m
- Luftdichtheit
 - 384 m³/h bei 50 Pa
 - Innenvolumen: 96,8 m³
 - Hüllfläche: 139,3 m²
 - n₅₀: 4,0 1/h q₅₀: 2,8 m³/m²·h
- dokumentierte Leckagen (Bild 5.11)
 - 52 in Luftdichtheitsebene (primäre Leckagen, blau)
 - 11 in der Gipskartonbekleidung (sekundäre Leckagen, rot)
 - 25 unterhalb der Gipskartonbekleidung (sekundäre Leckagen)

und Leckagen an Fensterschließfugen, gelb)

Die luftdichte Ebene (Dampfbremse) besteht aus drei Teilstücken:

- Bad und Diele: Folienabschnitte zwischen Bad und Diele sowie zwischen Bad/Diele und Küche sind über Folienstreifen oberhalb der Zwischenwände miteinander verbunden
- Küche: von Zwischenwand zu Bad/Diele bis Pfette
- Wohnzimmer: von Pfette bis Süd-Außenwand

Das Schadensbild des Daches zeigt ebenfalls drei Teilstücke. In Bild 5.12

zeigen sich die Sparren oberhalb des Bades bereits an der Oberseite stark beschädigt (Bereich vom unteren Bildrand bis einschließlich Schacht). Daran anschließend nimmt die Schädigung bis zur Pfette ab. Nach der Pfette sind die Sparren weitgehend unbeschädigt. In dem bis zum Dach führenden Schacht verlaufen Wasser- und Elektroinstallationen.

Für jede der festgestellten Leckagen liegen ein Foto und soweit möglich ihre geometrischen Abmessungen vor. Dies ist beispielhaft in Bild 5.13 gezeigt.

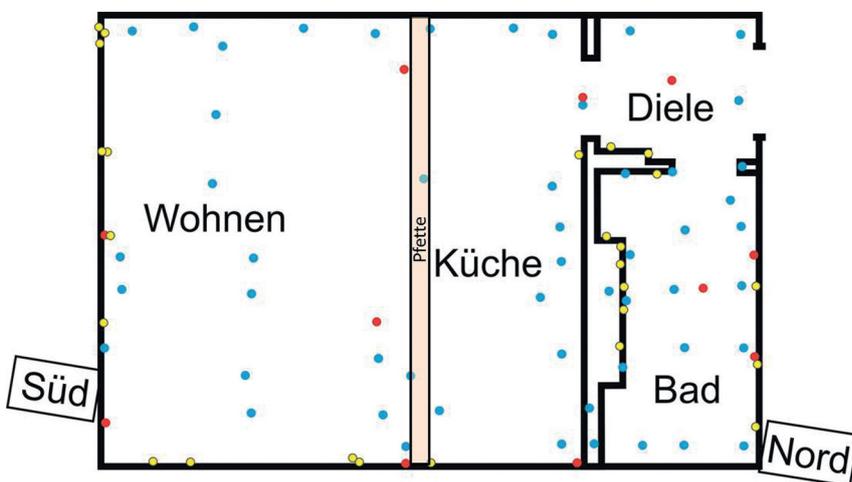


Bild 5.11: Im Rahmen einer Untersuchung aufgenommene Leckage-Verteilung, blau: primär, in der Luftdichtheitsebene, rot: sekundär, in der Gipskartonbekleidung, gelb: sekundär, unterhalb Gipskartonbekleidung und Leckagen an Fensterschließfugen



Bild 5.12: Schadensbild des Referenzdaches, wie es sich im Rahmen des Rückbaus gezeigt hat



Bild 5.13: Dokumentation der Leckagen (links: Blick von außen auf Nummerierung der Leckagen in der Dampfbremse, oben rechts: Blick von innen auf eine Leckage in der Gipskartonbekleidung, unten rechts: Blick von außen auf eine Leckage im Bereich des Schachtes an einer Folienüberlappung)

5.4.2 KATEGORISIERUNG DES REFERENZDACHES

Basierend auf dem Schadensbild der Sparren wird das Dach für die Simulation entsprechend Bild 5.14 in drei Teilbereiche unterteilt:

- grün (nahezu schadenfrei)
- gelb (mittlere Schädigung)
- rot (stark beschädigt)

Diese Farbeinteilung wird im weiteren Berichtsverlauf entsprechend eingehalten.

5.4.3 AUFNAHME DER LECKAGEN

Für jede der aufgenommenen Leckagen wurde die Größe abgeschätzt. Summarisch ergeben sich die in Tabelle 5.4 aufgeführten Leckagen.



Bild 5.14: Einteilung des Daches nach Schadensbild

Im Rahmen des Blower-Door-Tests deutete sich bei Überdruck in der Wohnung durch ein Aufwölben der Folie im roten und gelben Bereich an, dass die Hauptdruckdifferenz an der Folie anliegt. Im grünen Bereich wölbte sich die Folie kaum. Daher ist anzunehmen, dass hier die Gipskartonbekleidung faktisch die luftdichte Ebene darstellt, wengleich dies planerisch nicht vorgesehen war.

Tabelle 5.4: Aufgenommene Leckagen

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	

5.5 BEWERTUNG DER FEUCHTERELEVANZ VON LECKAGEN

Für die Simulation werden basierend auf dem Referenzfall Varianten gebildet, um die Sensitivität der einzelnen Leckagen für die Feuchterelevanz zu untersuchen.

Aus dem Raum strömt die Luft über die in Tabelle 5.4 genannten Pfade ins Dach ab. Im Dach durchdringt die Strömung die Dämmung und die Holzschalung und tritt über eine angenommene, gleichmäßig verteilte Leckage durch die Vordeckung und die Aluminium-Doppelstehfalzdeckung nach außen. Externe Leckagen werden an das Außenklima angebunden. Jede Leckage wird mit ihrer entsprechenden Höhenlage berücksichtigt, um

den thermischen Antrieb abzubilden. Windeinflüsse werden vernachlässigt. Diese Vereinfachung ist im Hinblick auf das hygrothermische Verhalten des Daches als konservativ anzusehen, da Wind insbesondere im Winter weitere, zur Austrocknung der Konstruktion beitragende Luft in den Dachaufbau befördern kann.

Für die Simulation werden jeweils drei Jahre ab dem 1. Januar mit dem Wetterdatensatz „Holzkirchen IBP, Feuchtereferenzjahr“ betrachtet. Da die Simulationsstudie im Besonderen die Luftdichtigkeit von Dachkonstruktionen betrachtet, wird der Einfluss möglicher Nutzungs- und Jahresgangprofile im Innenraum vernachlässigt. Hierzu wird die Innenrandbedingung mit konstant 20 °C und 50 % relativer

Luftfeuchte angenommen.

Simuliert wird ein horizontaler Aufbau bestehend aus den in Tabelle 5.5 genannten Schichten. Das Modell bildet einen halben Sparren (Breite 4 cm) und ein halbes Dämmfeld (Breite 35 cm) ab (vgl. Bild 5.15).

Es wird jeweils der Feuchtegehalt in der Holzschalung ausgewertet.

Die in Tabelle 5.4 aufgenommenen Leckagen werden in der Simulation mit den in Tabelle 5.6 aufgeführten Modellen abgebildet. Es wird angenommen, dass Einzelleckagen sich entsprechend der Anzahl bzw. Fugenlänge addieren. Die Leckagen werden jeweils mit ihrer entsprechenden Höhenlage parametrisiert.

Tabelle 5.5: Materialaufbau im Simulationsmodell von außen nach innen

Lfd. Nr.	Name	d in m	ρ in kg/m ³	c in J/kgK	λ in W/mK	μ dimensionslos	w_{80} in kg/m ³	w_f in kg/m ³	a_{sw} / a_{lw} in %
1	Deckung (Alu-Stehfalz)	0,001	130	2300	2,3	50000	0,002	0,0048	40
2	Unterdeckbahn	0,001	130	2300	2,3	100	0,002	0,0048	–
3	Holzschalung	0,024	400	1500	0,09	200	60	575	–
4	Mineralwolle Sparren	0,22 0,22	60 400	850 1500	0,04 0,09	1,3 200	2 60	45 575	–
5	Dampfbremse (feuchteadaptiv)	0,001	130	2300	2,3	140 - 4472	0,002	0,0048	–
6	Luftsicht	0,02	1,2	1004	–	–	–	–	–
7	Gipskarton	0,012	850	850	0,95	8,3	6,3	400	–

Tabelle 5.6: Umsetzung der Leckagen in der Simulation

Leckageart	Leckagemodell	Höhenlage in m
anteilige Leckagefläche in Dampfbremse	Strömungspfad zwischen Luftsicht und Mineralwolle mit entsprechender Fläche	2,50 bis 2,90
Anzahl Deckendurchführungen für Lichter in Gipskartonbekleidung	linearisiertes Leckagemodell für Deckenstrahler (vgl. Tabelle 5.1)	2,48 bis 2,88
Fugenrisse Decke	linearisiertes Leckagemodell für Anschlussfugen (vgl. 5.2.3.1)	2,48 bis 2,88
Anzahl Steckdosen, Schalter, Spülkästen etc. mit Luftverbund zu Dach (Schacht), Höhe 0,9 m	linearisiertes Leckagemodell für Innensteckdose (vgl. Tabelle 5.1)	0,9
Bauteilanschlussfuge Boden	linearisiertes Leckagemodell für Anschlussfugen nach DIN 4108-2 (vgl. 5.2.3.1)	0,0
Fenster- und Türfugen	linearisiertes Leckagemodell für Fenster Klasse 2 nach DIN EN 12207 (vgl. 5.2.3.3)	1,5

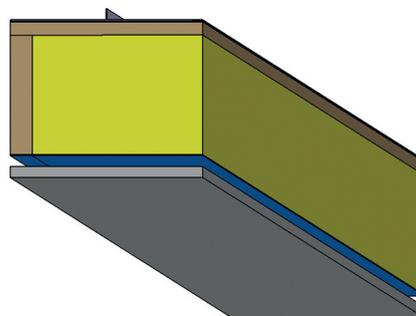


Bild 5.15: Darstellung des in der Simulation betrachteten Dachaufbaus. Von oben nach unten: Alu-Stehfalz (grau), Unterdeckbahn (schwarz), Holzschalung (braun), Sparren (braun) / Mineralwolle (gelb), Dampfbremse (blau), Luftsicht, Gipskarton (grau)

5.5.1 REFERENZFALL

5.5.1.1 TRANSIENTE HYGROTHERMISCHE SIMULATION

Die Feuchteakkumulation in den einzelnen Dachbereichen ist mit der Simulation unterscheidbar abgebildet (Bild 5.16).

5.5.1.2 STRÖMUNGSSIMULATION UND ANLIEGENDE DRUCKDIFFERENZ

Bild 5.17 zeigt die Luftmenge der einzelnen Strömungspfade unter stationären Randbedingungen (innen: 20 °C, außen: 0 °C). Die Pfeildicke skaliert hierbei die Luftmenge. Es ist deutlich, dass nur ein geringer Anteil der Gesamtluftmenge über den Dachaufbau entweicht, der Hauptluftwechsel im Raum wird durch Fensterfugen und Anschlussfugen hergestellt.

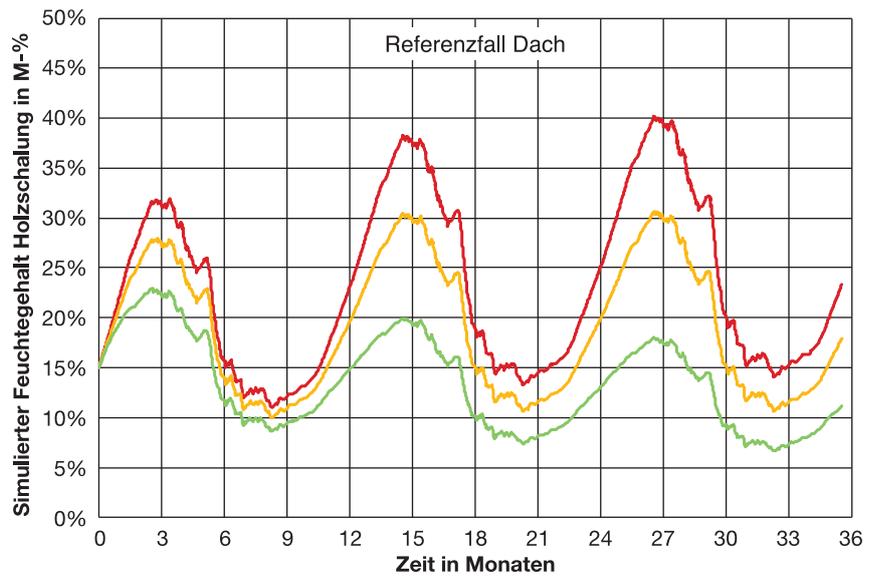


Bild 5.16: Simulationsergebnis des Referenzfalles

Bild 5.18 zeigt die Druckdifferenz an den einzelnen Strömungswiderständen im Dachaufbau für zwei Fälle. Im ersten Fall wird die Druckdifferenz rein thermisch induziert, im zweiten wird durch einen steuerbaren Ventilator (Blower-Door) ein Überdruck von 50 Pa erzeugt. Werden die so in der Simulation pro Teilfläche ermittelten Luftvolumenströme auf die entsprechende Größe bezogen, ergeben sich lokale q_{50} -Werte von 3,4, 1,4 und 0,15 $m^3/m^2 \cdot h$ für den roten, gelben und grünen Bereich. Für den roten und gelben Bereich zeigt sich, dass die größte Druckdifferenz an der Folie anliegt. Dies bedeutet, dass hier die Folie als Luftdichtheitsebene fungiert. Im grünen Bereich zeigt sich die Hauptdruckdifferenz an der Gipskartonbekleidung. Somit erfüllt hier die Gipskartonbekleidung faktisch (außerplan-

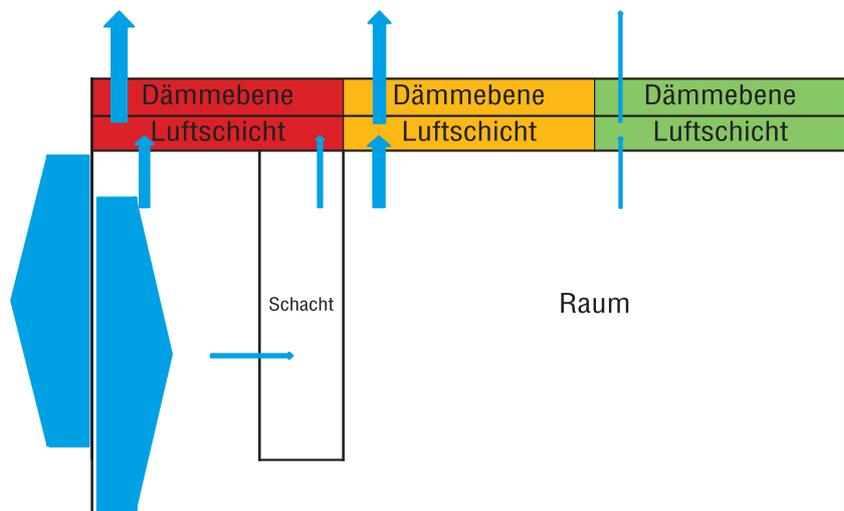


Bild 5.17: Schematische Darstellung der berechneten Durchlüftung des Raumes und des Dachaufbaus. Die beiden dicken Pfeile beschreiben den Luftaustausch durch Fugen (Fenster, Anschlüsse etc.). Unterhalb der druckneutralen Zone strömt Außenluft in den Raum ein, oberhalb strömt Raumluft nach außen ab.

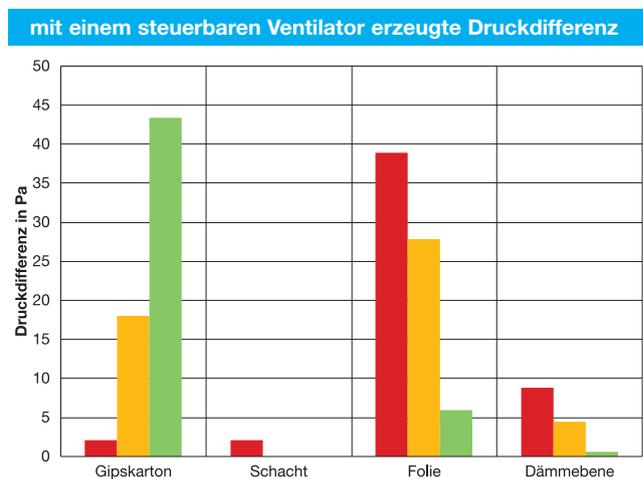
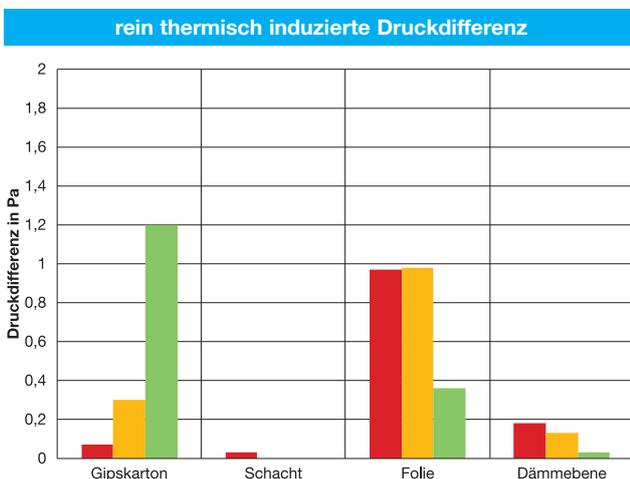


Bild 5.18: An einzelnen Strömungswiderständen anliegende Druckdifferenz (Schacht nur in rotem Bereich, parallel zu Gipskarton. Gipskarton, Folie und Dämmebene – inkl. oberer Dachaufbau – bilden eine Serie von Strömungswiderständen)

mäßig) die Funktion einer Luftdicht-
heitsebene.

5.5.2 VARIANTENBILDUNG LUFTDICHT- HEIT

Für die Betrachtung der Luftdichtheit
werden Parameter entsprechend
Tabelle 5.7 variiert. Nicht aufgeführte
Parameter werden gleich belassen.

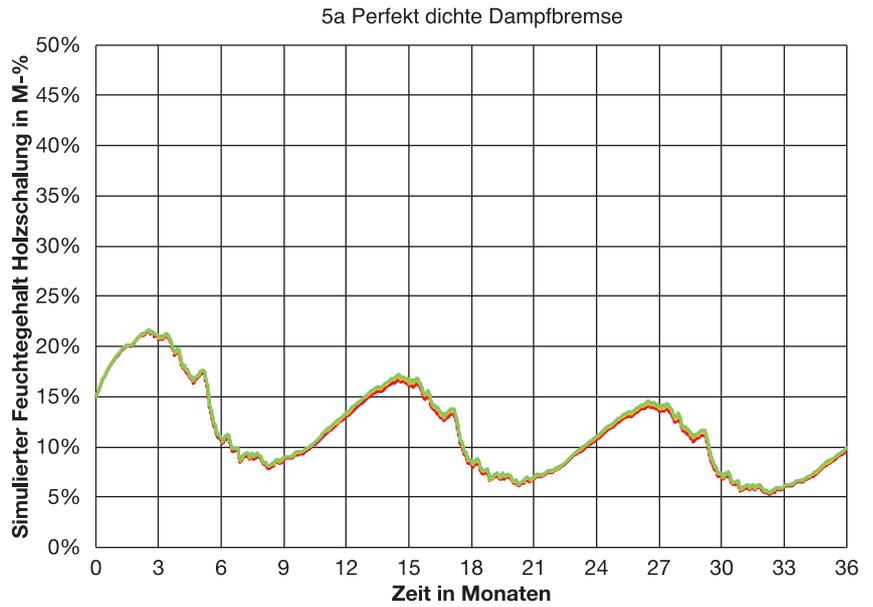
Tabelle 5.7: Parametervariation der Luftdichtheit bzw. Luftdurchlässigkeit

Fall	Zuordnung	Beschreibung	Einheit	rot	gelb	grün
a	primär	vollständige Abdichtung der Leckage in Dampfbremse	%	0	0	0
b	primär	Leckage in Dampfbremse auf Niveau des grünen Bereichs	%	0,08	0,08	0,08
c	sekundär	Anzahl Deckendurchführungen in Gipskartonbekleidung	–	0	0	0
		Risslänge in Gipskartonbekleidung	m	2	2	2
		Schacht	–	ohne	ohne	ohne
d	sekundär	Anzahl Deckendurchführungen in Gipskartonbekleidung	–	0	0	0
		Risslänge in Gipskartonbekleidung	m	0	0	0
		Schacht	–	mit	ohne	ohne
e	sekundär	Anzahl Deckendurchführungen in Gipskartonbekleidung	–	5	2	0
		Risslänge in Gipskartonbekleidung	m	11	10	2
		Schacht	–	ohne	ohne	ohne
f	extern (exkl. Dach)	Verringerung Bauteilanschluss- fuge Boden nach DIN 4108-2	m	10,5		
		Verbesserung der Fenster- und Türfugen auf Klasse 3 nach DIN EN 12207	m	30		
g	extern (exkl. Dach)	Erhöhung der Leckage zwi- schen Raum und außen (DIN 4108-2) knapp unterhalb der Gipskartonbekleidung → neutra- le Höhe steigt, Überdruck am Dach verringert sich	m	21		
h	tertiär (Dach)	10 x höherer Strömungswider- stand in Holzschalung	–	–		
i	tertiär (Dach)	2 x höherer Strömungswider- stand in Dämmung	–	–		

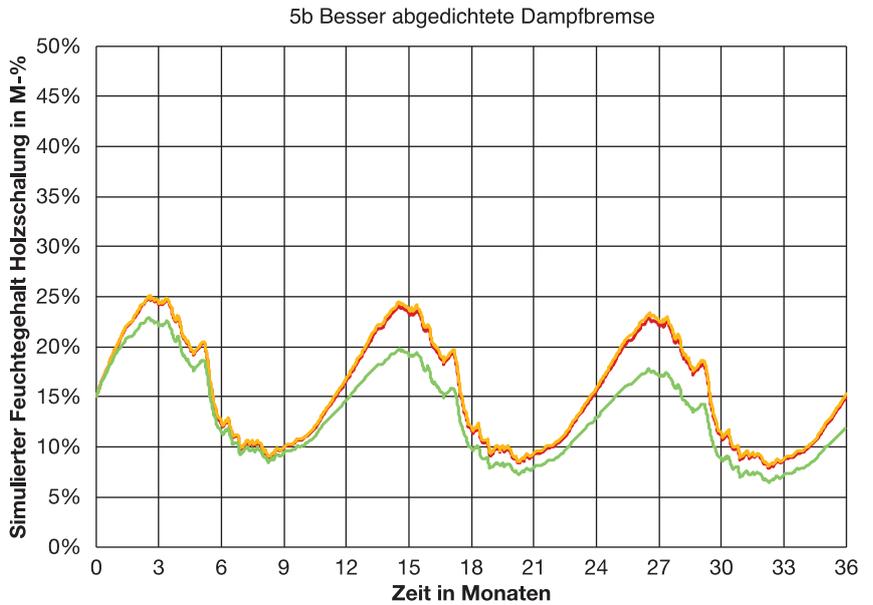
5.5.2.1 BEWERTUNG VON MASSNAHMEN AN PRIMÄRLECKAGEN

Die Erhöhung der Luftdichtheit der Dampfbremse führt zu einer Reduktion der Feuchteakkumulation im Dach. Die höhere Feuchteakkumulation im roten und gelben Bereich ist auf größere Sekundärleckagen (Deckendurchdringungen, Risse und Schacht) zurückzuführen (Bild 5.19).

a: vollständige Luftdichtheit der Dampfbremse



b: Luftdichtheit Dampfbremse auf Niveau von grünem Bereich (0,08 % Leckagefläche)



Referenz

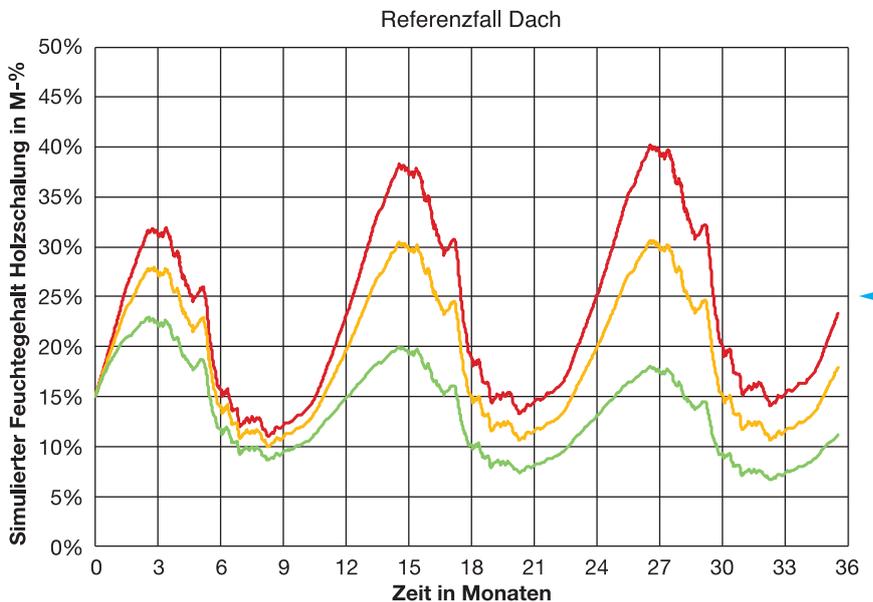
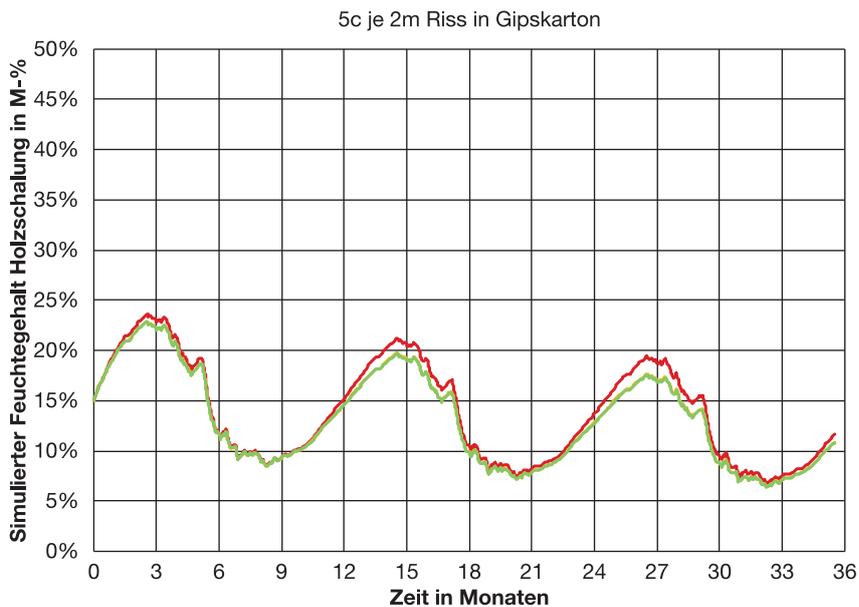


Bild 5.19: Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Luftdichtheit

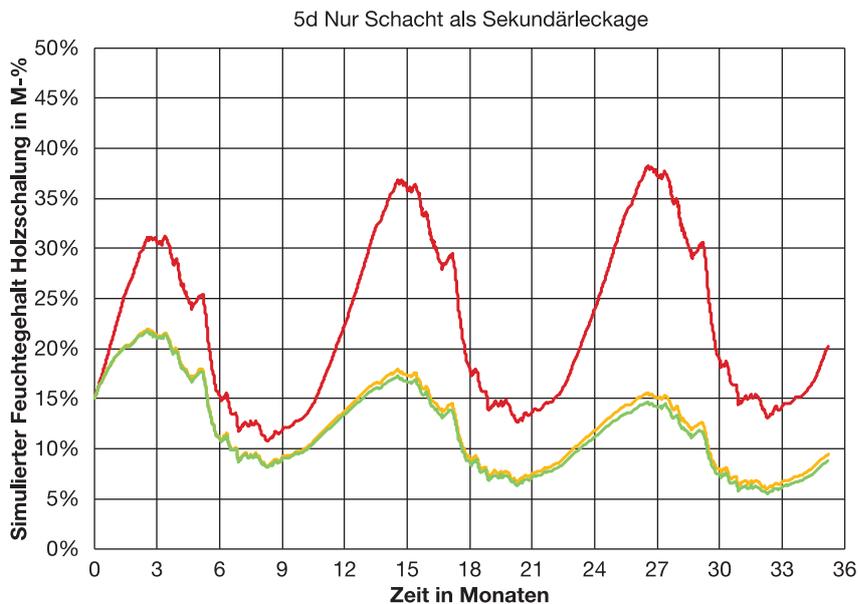
5.5.2.2 BEWERTUNG VON MASSNAHMEN AN SEKUNDÄRLECKAGEN

Die Reduktion paralleler Sekundärleckagen wirkt sich nur positiv aus, wenn diese vollständig ist. Nur eine Abdichtung des Schachtes oder nur eine Abdichtung der Gipskartonbekleidung führt kaum zu einer Verbesserung (Bild 5.20).

c: 2 m Riss in Gipskartonbekleidung, kein Schacht (je Zone)



d: nur Schachtleckagen, dichte Gipskartonbekleidung



Referenz

e: nur Leckagen in Gipskartonbekleidung, kein Schacht

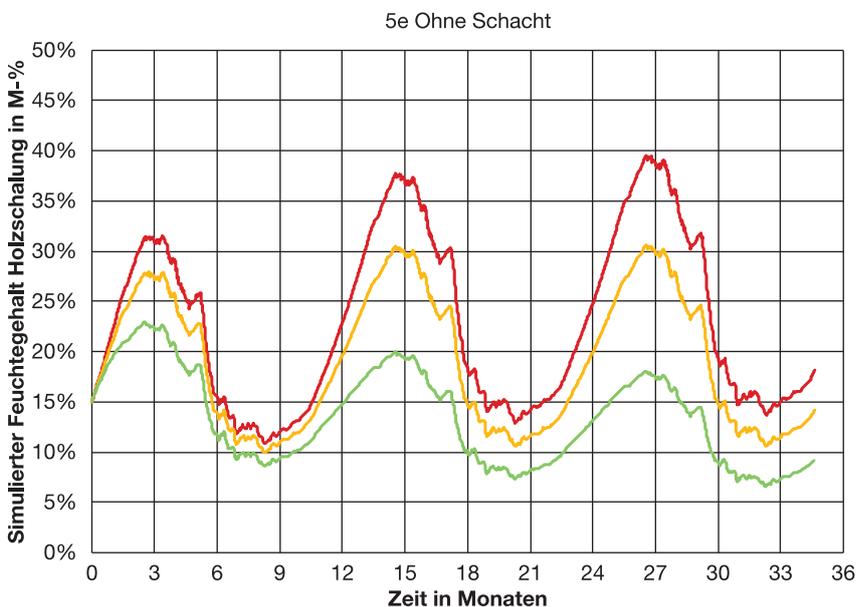
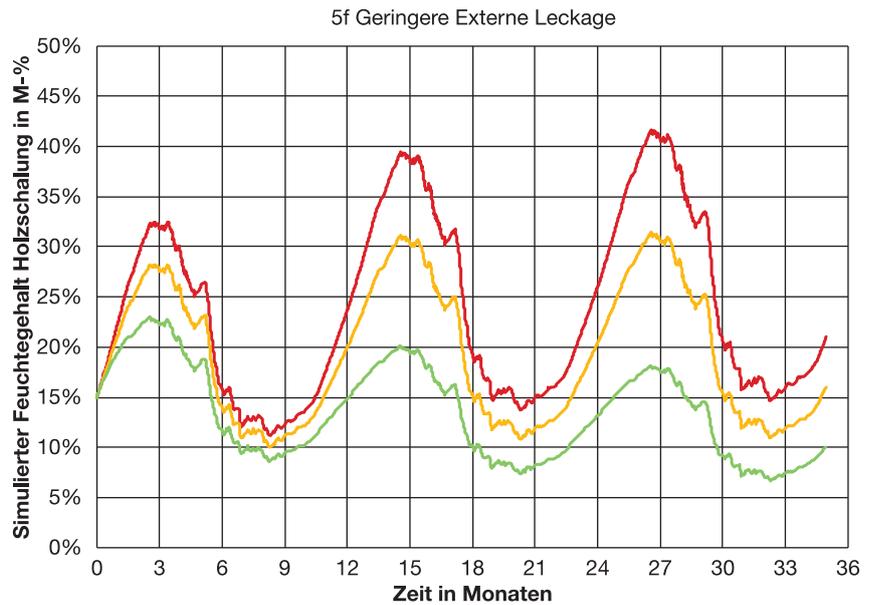


Bild 5.20: Bewertung der Maßnahmen zur Reduktion der Sekundärleckagen

5.5.2.3 BEWERTUNG VON MASSNAHMEN AN EXTERNEN LECKAGEN (EXKL. DACH)

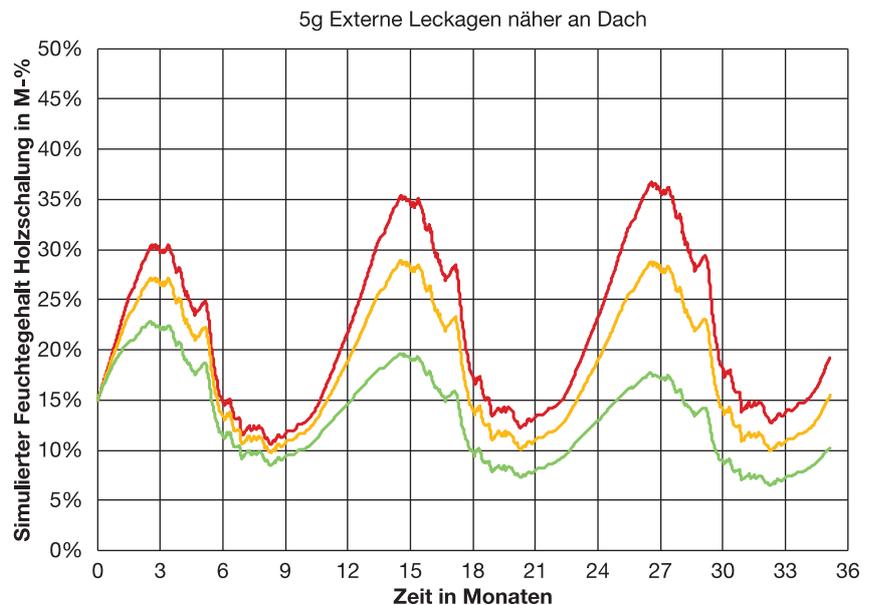
Die Reduktion externer Leckagen (z. B. durch Fenster- oder Anschlussfugen) vermag nicht die Feuchteakkumulation im Dach zu beeinflussen. Selbst die reduzierte Zuluftmenge durch externe Leckagen ist deutlich höher als die Luftmenge, die den Dachaufbau durchströmt und zu einem Feuchteintrag führt.

f: Reduktion externer Leckagen (Verbesserung Anschlussfugen, dichtere Fenster)



Größere Leckagen im oberen Bereich des Raumes führen zu einer Verlagerung der druckneutralen Zone näher an den Dachaufbau. Dies bedingt eine Verringerung der Druckdifferenz an den Leckagen im Dach. Hierdurch zeigt sich eine geringere, jedoch nach wie vor schadensträchtige Feuchteakkumulation im Dachaufbau (Bild 5.21).

g: höhere externe Leckagen im oberen Bereich des Raumes → geringerer Überdruck am Dachaufbau



Referenz

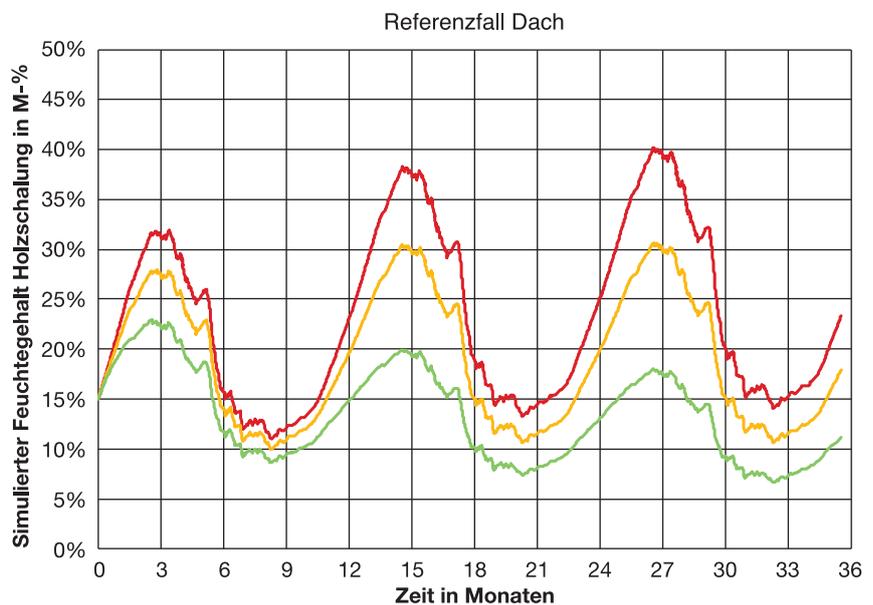


Bild 5.21: Bewertung von Maßnahmen an externen Leckagen (exkl. Dach)

5.5.2.4 BEWERTUNG VON MASSNAHMEN ZUR REDUKTION DER LUFTDURCHLÄSSIGKEIT VERSCHIEDENER BAUTEILSCHICHTEN IM DACH

Die Verringerung der Luftdurchlässigkeit in Bauteilschichten oberhalb der Luftdichtheitsebene führt zu einer geringeren Feuchteakkumulation (Bild 5.22). Mögliche Maßnahmen zur Verringerung der Luftdurchlässigkeit sind zum Beispiel die Nutzung von dichtgefügteten Nut- und Federverbindun-

h: 10 x höherer Strömungswiderstand in Holzschalung

gen in der Schalung, die Abdichtung von Stößen und Überlappungen und die Nutzung von Dämmmaterialien mit höherem Strömungswiderstand.

i: 2 x höherer Strömungswiderstand in Dämmung

Referenz

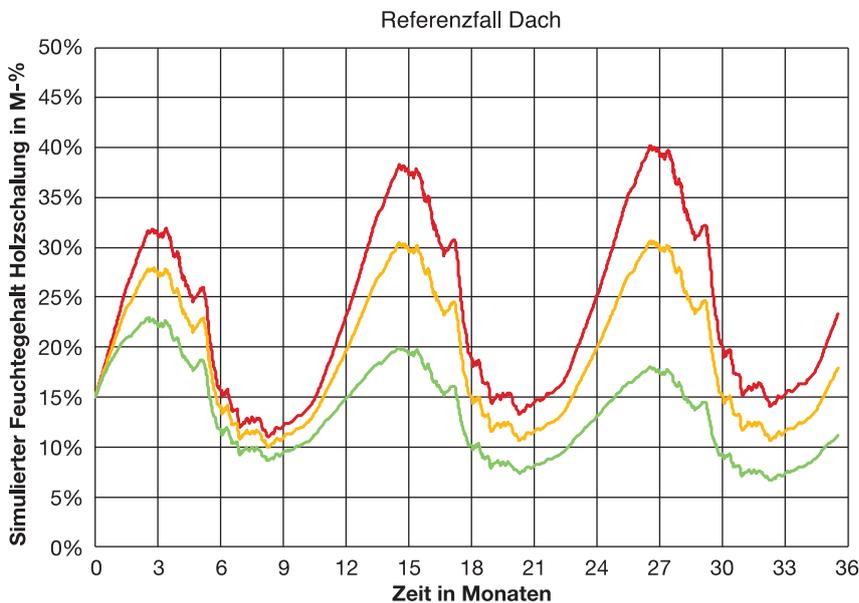
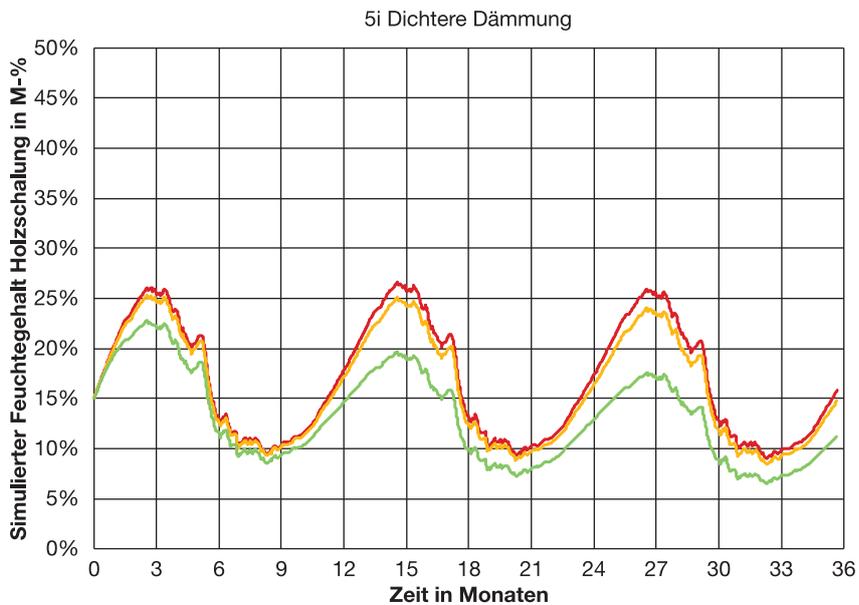
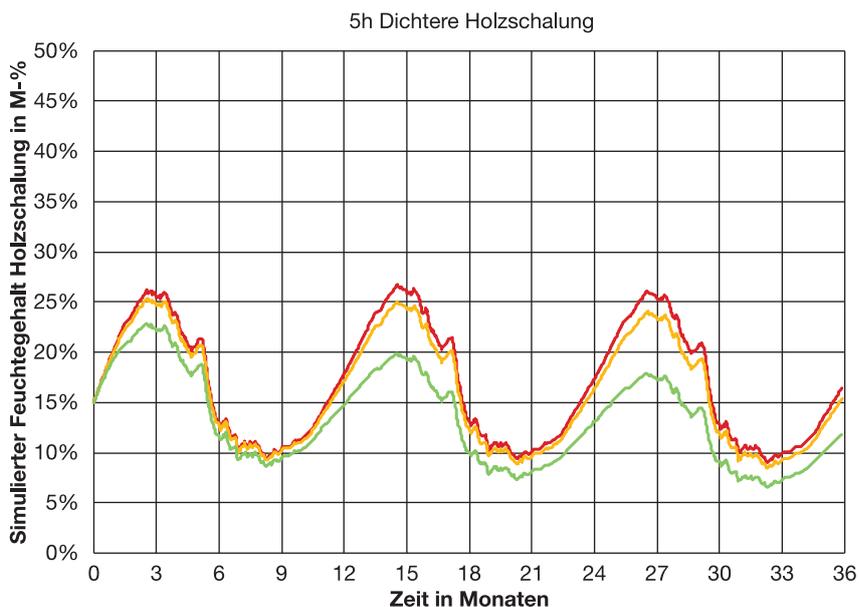


Bild 5.22: Bewertung von Maßnahmen zur Reduktion der Luftdurchlässigkeit von Bauteilschichten im Dach

5.5.3 VARIANTENBILDUNG DACHAUFBAU

Zusätzlich zur Variation der Luftdichtheit werden die in Tabelle 5.8 aufgeführten Varianten für den Dachaufbau gebildet.

Tabelle 5.8: Variation des Dachaufbaus

Fall	Beschreibung
a	Erhöhung des Absorptionsgrades des Daches (kurz- und langwellig von 0,4 auf 0,9)
b	Unterdeckbahn mit $s_d = 100$ m
c	hinterlüftete Dachkonstruktion mit 2 cm Luftspalt (Aluminium-Doppelstehfalzdeckung, 2,4 cm Schalung, Luftspalt, Referenz-Dachaufbau)
d	hinterlüftete Dachkonstruktion (wie Fall c) mit 5 cm Luftspalt
e	Folie mit $s_d = 50$ m als Luftdichtheitsebene (anstatt feuchteadaptiver Folie)

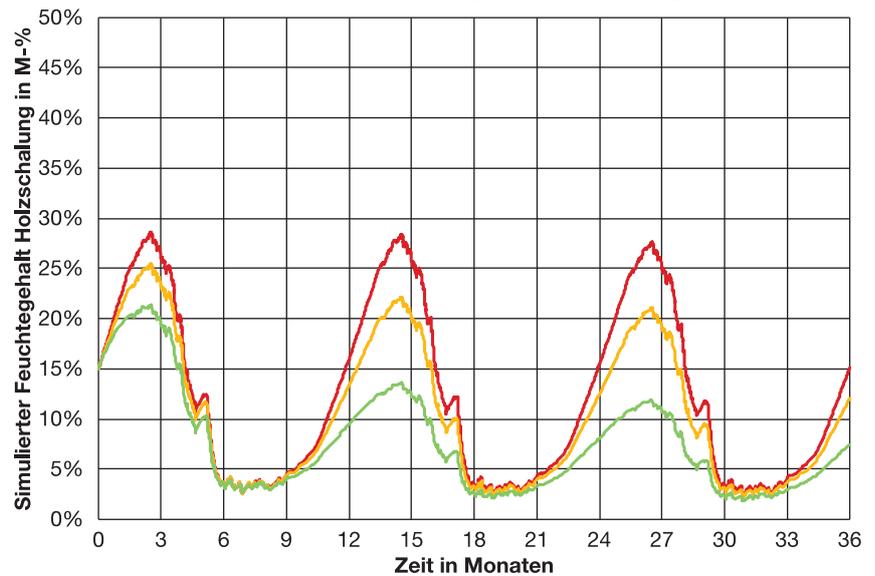
5.5.3.1 BEWERTUNG DER ERHÖHUNG DES ABSORPTIONSGRADES DES DACHES

Die Erhöhung des Absorptionsgrades des Daches führt zu einer geringeren Feuchteakkumulation (Bild 5.23).

a: höherer Absorptionsgrad Dach

Referenz

6a Hoher Absorptionsgrad Dacheindeckung



Referenzfall Dach

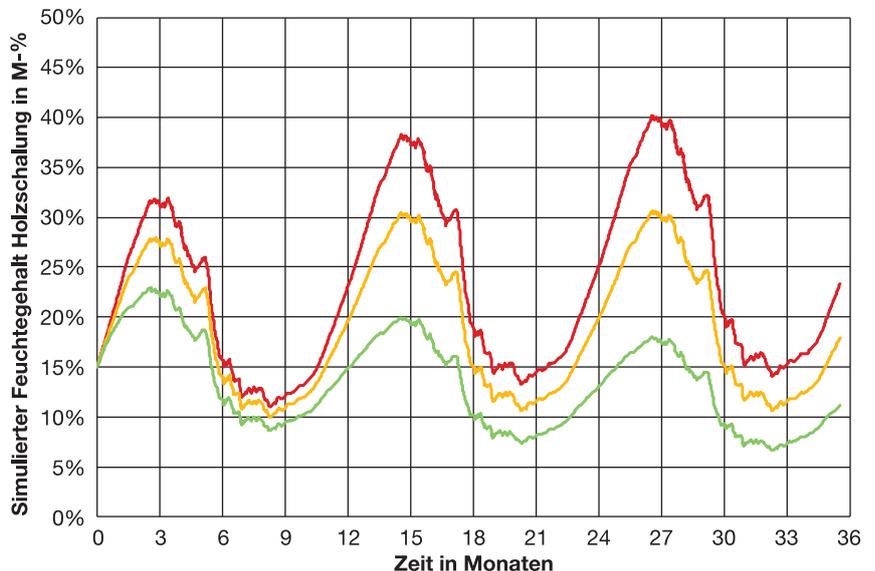
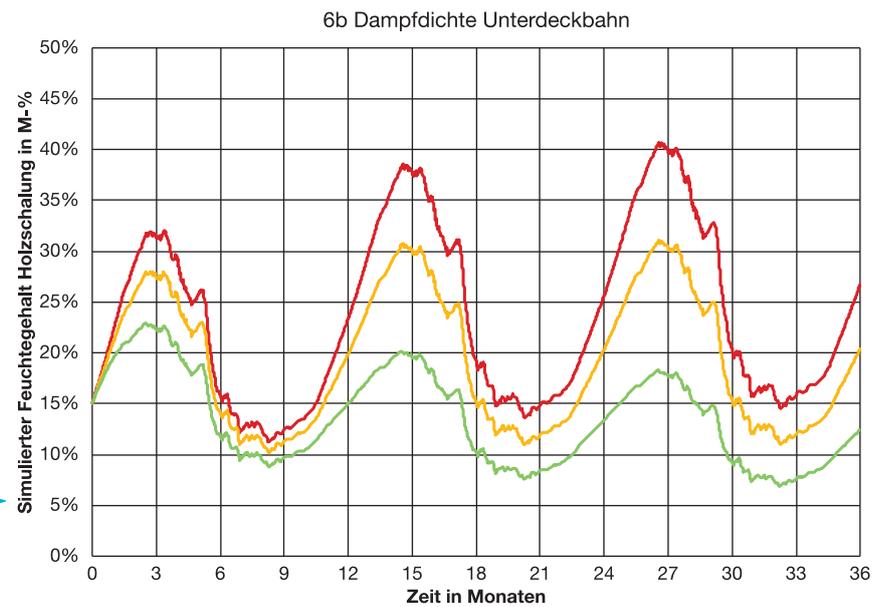


Bild 5.23: Bewertung der Erhöhung des Absorptionsgrades des Daches

5.5.3.2 BEWERTUNG EINER UNTERDECKBAHN MIT $S_D = 100 M$

Bedingt durch den hohen Dampfdiffusionswiderstand der Aluminium-Doppelstehfalzdeckung ist der Effekt einer Variation des Dampfdiffusionswiderstands der Unterdeckbahn gering (Bild 5.24).

b: Unterdeckbahn mit $s_d = 100 m$



Referenz

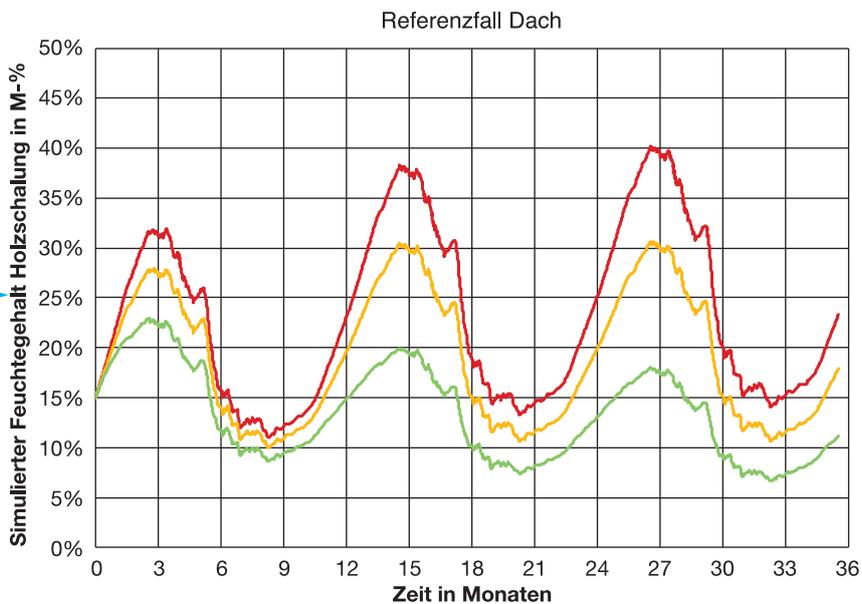
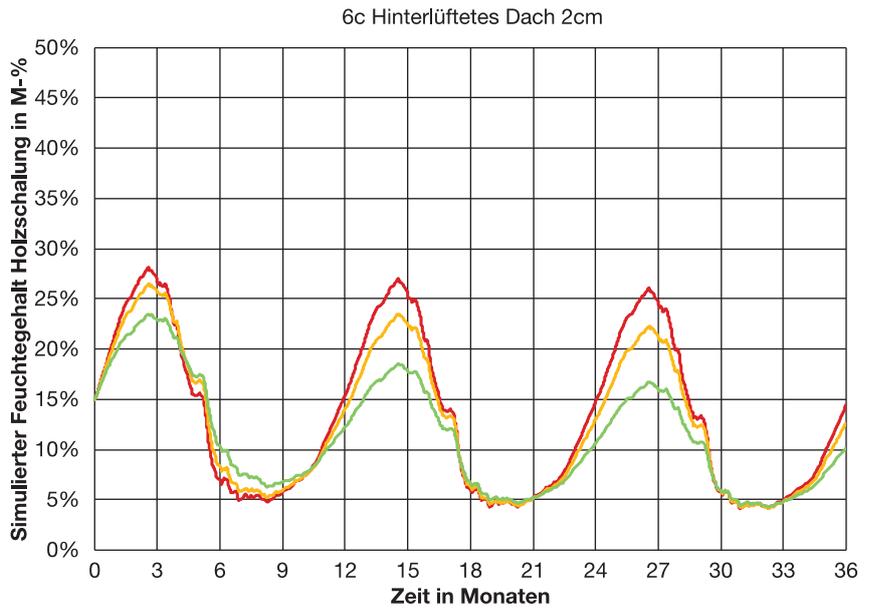


Bild 5.24: Bewertung der Einbringung einer Unterdeckbahn mit $s_d = 100 m$

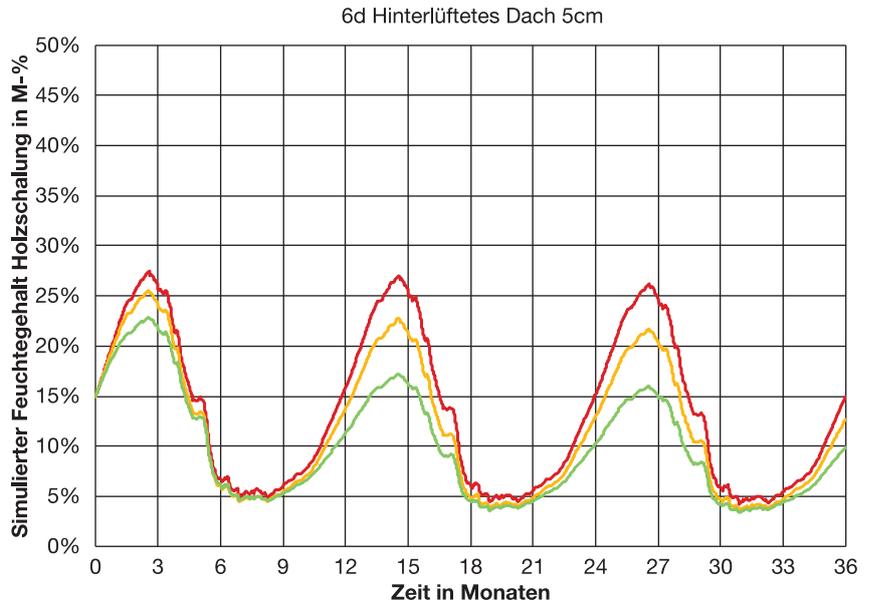
5.5.3.3 BEWERTUNG DES HINTERLÜFTETEN DACHES

Die Hinterlüftung des Daches führt zu einer geringeren Feuchteakkumulation. Zwischen einem 2 und 5 cm hohen Luftspalt ist der Unterschied gering (Bild 5.25). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Windanströmung in dieser Simulation vernachlässigt wurde, d. h. es wurde nur der thermisch induzierte Luftwechsel im Dach berechnet.

c: 2 cm Luftspalt



d: 5 cm Luftspalt



Referenz

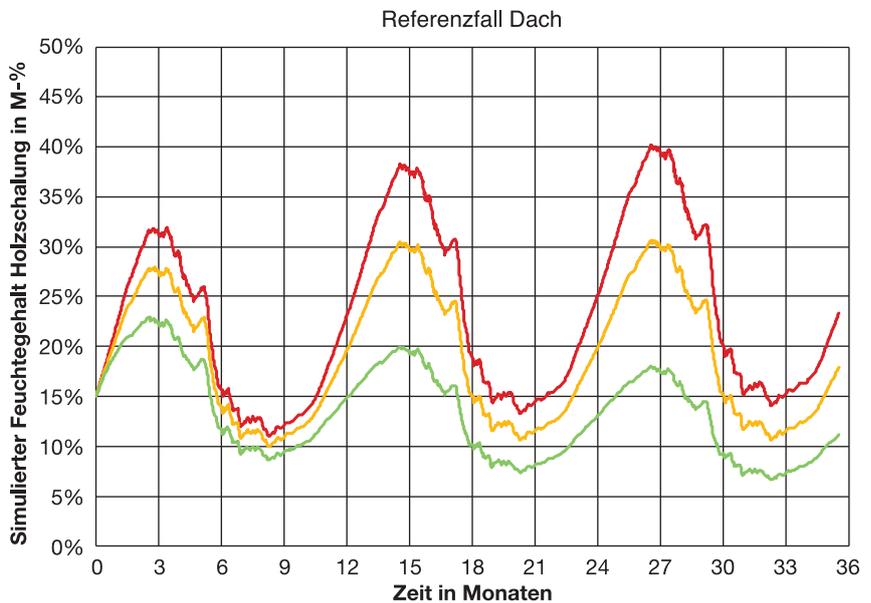
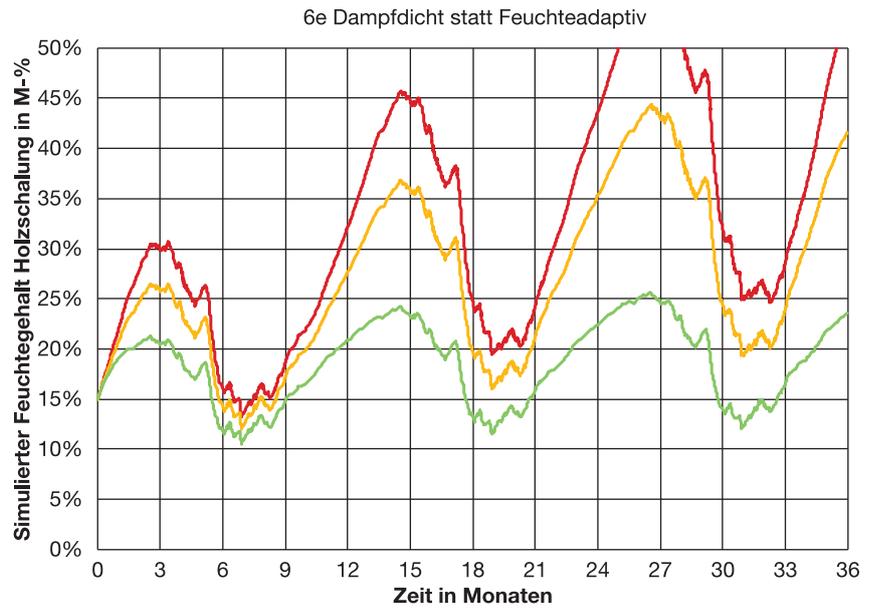


Bild 5.25: Bewertung eines hinterlüfteten Daches

5.5.3.4 BEWERTUNG EINER FOLIE ALS LUFTDICHTHEITSEBENE MIT $S_D = 50 M$

Der Einbau einer Folie als Luftdicht-
heitsebene mit $s_d = 50 m$ führt sehr
wahrscheinlich zu einem noch größe-
ren Schadensausmaß (Bild 5.26).

f: Folie als Luftdichttheitsebene
mit $s_d = 50 m$



Referenz

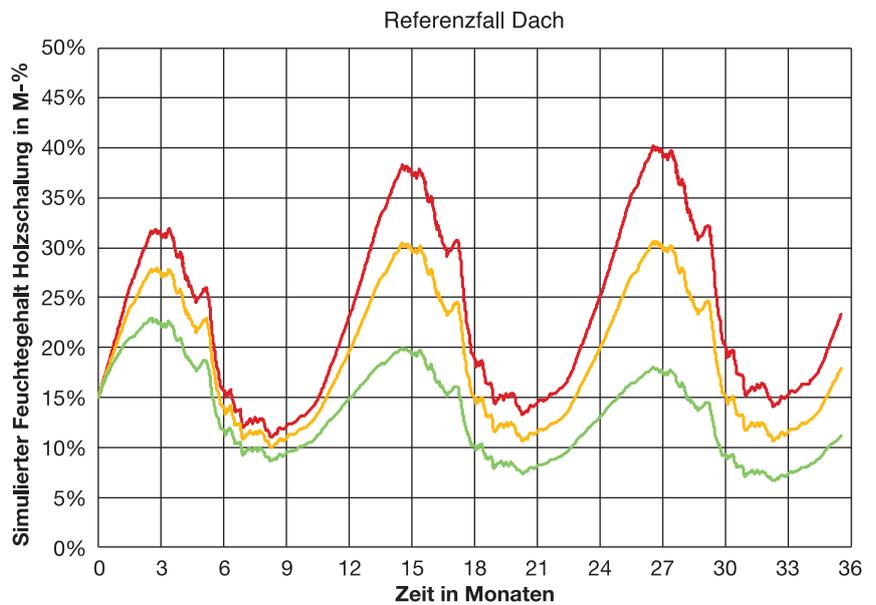


Bild 5.26: Bewertung des Einflusses einer Folie als Luftdichttheitsebene mit $s_d = 50 m$

5.6 ENERGETISCHE UND KOMFORTBEWERTUNG DES DACHES

Für die Erstellung des Simulationsmodells wird zunächst die Geometrie der Wohnung des Referenzfalles modelliert. In Bild 5.27 ist das Dach ausgeblendet, nur der in der Feuchtebewertung betrachtete Modelldachaufbau (Größe: halber Sparren und halbes Dämmfeld) wird gezeigt.

5.6.1 MODELLAUFBAU

Aus der Geometrie wird mithilfe des Thermal Model Generation Tool ein zonales Modell erstellt (Bild 5.28). Pro Raum wird eine Heizung eingefügt, die die Raumlufttemperatur auf 20 °C regelt.

Die Lufttemperatur in der Wohnung wird auf 20 °C geregelt. Außen herrscht eine Lufttemperatur von 0 °C. Der Windeinfluss wird vernachlässigt. Leckagen werden nach Tabelle 5.4 entsprechend ihrer Lage im zonalen Modell eingefügt und verbinden den Raum mit dem Außenklima. Um nur den Einfluss von Leckagen zu betrachten, werden Umschließungsflächen adiabatisch modelliert.

5.6.2 SIMULATIONSERGEBNISSE

5.6.2.1 ENERGETISCHE AUSWERTUNG

Insgesamt fließen durch die geschlossenen Fenster und Türen (externe Leckagen exkl. Dach) 4,7 m³/h Luft. Durch Leckagen im Dach entweichen 0,8 m³/h. Bei einer Temperaturdifferenz von 20 °C zwischen Außen- und Raumlufttemperatur ergibt sich somit ein Enthalpiestrom von 32 W für exter-

ne Leckagen (exkl. Dach) und 5,6 W durch die Leckagen im Dach.

Würde diese Randbedingung einen Monat anliegen, so ergäbe sich ein leckagebedingter Wärmeverlust von 27 kWh pro Monat. Auf die Grundfläche der Wohnung (36,25 m²) bezogen wären dies 0,75 kWh/m² pro Monat. Verglichen beispielsweise mit dem Passivhausstandard, zulässige Heizenergie 15 kWh/m² pro Jahr (co2GmbH 2016), können die Leckagen somit je nach Dauer der Kaltperiode einen merklichen Anteil des Gesamtwärmebedarfs des Gebäudes bedingen.

5.6.2.2 KOMFORTAUSWERTUNG

In den Zonen stellen sich Lufttemperaturen zwischen 19,75 °C und 20,0 °C ein. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit beträgt 0,056 m/s. Im Sinne der Norm DIN EN ISO 7730 (2006), Tabelle A.5, ist demnach nicht mit einer Zuglufterscheinung zu rechnen. Da die maximale Temperaturdifferenz zwischen den Zonen 0,25 °C beträgt, ist nicht mit einer Komfortbeeinträchtigung durch den vertikalen Temperaturgradienten zu rechnen (< 2 °C lt. DIN EN ISO 7730 2006, Tabelle A.2).

Es ist zu berücksichtigen, dass das zonale Modell nur Effekte auf der Skala der Zonengröße erfassen kann. Der Nahbereich von Leckagen wird unter Umständen nicht fein genug aufgelöst, um hier eine gesicherte Aussage über Zugluftbeeinträchtigung tätigen zu können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die in diesem Modell implementierten Leckagen in der Simulation keine Komfortrelevanz zeigen.

5.7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dem Forschungsprojekt werden bestehende Werkzeuge zur hygrothermischen Bauteilsimulation um folgende Aspekte erweitert:

- 3D hygrothermisches Materialmodell mit Luftdurchströmung
- Modellierung verschiedener Leckagen (Fugen, Fenster, Steckdosen)
- Simulation von Leckagekomplexen: Parallel- und Serienschaltung von Leckagen
- Simulation der Auswirkung von lokalen Leckageverteilungen
- Berechnung des thermisch induzierten Luftwechsels abhängig von der Lage der Leckagen und Zuluftöffnungen
- Möglichkeit, Leckagen bezüglich ihrer feuchtetechnischen Schadensfähigkeit, der energetischen Auswirkung und der Behaglichkeitsrelevanz zu bewerten

Es wird ein Referenzdachaufbau gewählt, um die Variationen der Luftdichtheit feuchtetechnisch zu bewerten. Als besonders vielversprechend zeigen sich folgende Maßnahmen:

- Erhöhung der Luftdichtheit des Dachaufbaus, z. B. durch
 - Abdichtung der innenliegenden Folie (Dampfbremse)

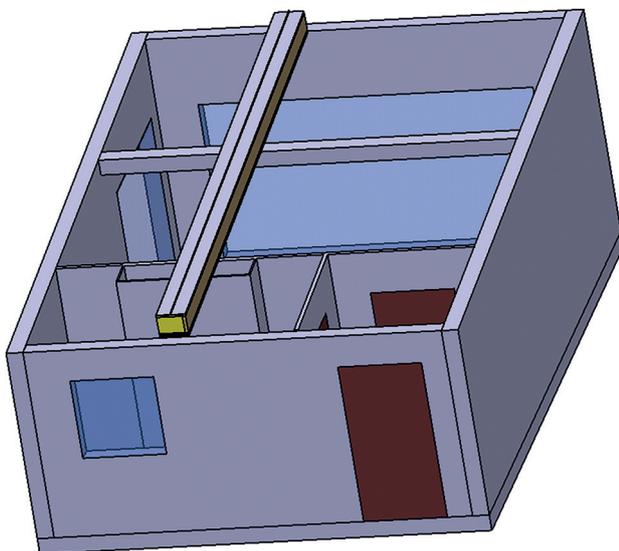


Bild 5.27: Geometrie des Referenzraumes



Bild 5.28: Zonierung des Modells (Blick von oben auf die Grundfläche)

- Erhöhung der Luftdichtheit der Gipskartonbekleidung, wenn sichergestellt ist, dass alle Nebenpfade (z. B. Schacht) auch luftdicht sind
- Verwendung von Dämmstoffen, Schalungen etc. mit geringerer Luftdurchlässigkeit
- Hinterlüftung des Daches

Die Simulation mit dem zonalen Modell VEPZO zeigt keine Komfortrelevanz der betrachteten Leckagen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sehr lokale Strömungen (örtliche Auflösung < 0,5 m) in dieser Simulation nicht aufgelöst werden können. Die energetische Relevanz der Leckagen ist erkennbar. Bei einer Temperaturdifferenz von 20 K beträgt sie für den betrachteten Referenzfall 0,75 kWh/m² pro Monat.

Für weitere Berechnungen sollte der Einfluss der Windanströmung auf den Leckagekomplex in der Modellierung erweitert werden. Derzeit werden Leckagen lediglich unter Berücksichtigung der Thermik modelliert, wodurch einzig deren vertikale Lage maßgeblich für den Luftwechsel ist. Die horizontale Leckageverteilung wird allerdings noch nicht berücksichtigt.

In der Simulation wird angenommen, dass die Dämmung dicht am Sparren anliegt, d. h. es existieren keine Nebenpfade für Luftströmungen im Dachaufbau.

Ein weiteres Forschungsfeld ist die Interpolation der Druck-Volumenstrom-Kennlinien für geringe Druckdifferenzen. Strömungswiderstände werden häufig bei deutlich höheren Druckdifferenzen bestimmt, welche in der Realität nur selten auftreten. Im Allgemeinen wird angenommen, dass die Druck-Volumenstrom-Kennlinie über einen Faktor und einen Exponenten dargestellt werden kann (vgl. Formel (5.9)). Allerdings bestimmt der Exponent maßgeblich, welcher Luftvolumenstrom sich für niedrige Druckdifferenzen einstellen wird. Insbesondere für den Strömungswiderstand der Dämmung ist der Exponent nicht ausreichend belegt, weshalb im Rahmen dieser Arbeit auf eine Annahme zurückgegriffen wird. In künftigen Arbeiten sollte das HygZO Modell validiert werden. Hierzu sollten Druckdifferenzen an Bauteilen aufgenommen werden, Feuchteprofile in

Materialschichten ermittelt und der Luftwechsel in z. B. Dachaufbauten bei verschiedenen Witterungsrandbedingungen z. B. durch Tracergas bestimmt werden.

Als Empfehlung für die Baupraxis kann aus den Simulationen abgeleitet werden, gewissenhaft und qualitativ hochwertig zu planen und auszuführen. Der für ein Gebäude ermittelte q_{50} -Wert ist kein hinreichendes Kriterium um von der feuchtetechnischen Funktionstüchtigkeit eines Daches auszugehen. Die Simulation des betrachteten Dachaufbaus zeigt, dass bereits bei einem deutlich niedrigeren lokalen q_{50} -Wert als dem für das Gebäude ermittelten eine Schädigung des Dachaufbaus zu erwarten ist. Bild 5.29 veranschaulicht die für das Referenzdach in der Simulation angesetzte prozentuale Leckagefläche in der Dampfbremse anhand des grünen, gelben und roten Quadrates gegenüber dem grauen Quadrat. Zum einen zeigt sich, dass die Unterscheidung, ob eine Leckage in „rot“, „gelb“ oder „grün“ zuzuordnen ist, schwierig ist, da der messbare Unterschied zwischen diesen nur gering ist. Zum

anderen zeigt sich aber, dass Leckagen aller drei Kategorien noch im deutlich sichtbaren Bereich liegen. Somit sollte jede sichtbare Leckage beseitigt werden. Bei dieser Einteilung ist zu berücksichtigen, dass die Luftsäule als thermischer Antrieb der Dachdurchströmung in der vorliegenden Untersuchung zwischen 2,48 und 2,88 m variiert. Für höhere Luftsäulen oder bei zusätzlicher Druckbeanspruchung durch eine Lüftungsanlage ist mit einer höheren Anforderung an die Luftdichtheit zu rechnen.

Es sollte auch berücksichtigt werden, dass der grüne Dachabschnitt zusätzlich von der Luftdichtheit der Gipskartonbekleidung profitiert. Unter Berücksichtigung der Verteilung primärer und sekundärer Leckagen in diesem Dachabschnitt zeigt die Simulation, dass eine mit Leckagen behaftete Anschlussfugenlänge von 2 m pro Raum noch tolerabel ist, sofern sich die Fuge mit DIN 4108-2 (vgl. Kapitel 5.2.3.1) ausreichend genau beschreiben lässt. Luftdurchlässige Durchdringungen der Gipskartonbekleidung sind in diesem Fall zu unterlassen. Auch muss sorgfältig geprüft werden,

Vergleich des Flächenverhältnisses der Folie (grau) zur primären Leckagefläche in den drei Teilbereichen des Referenz-Daches (rot, gelb, grün). Insbesondere der grüne Bereich profitiert zusätzlich von der Luftdichtheit der darunterliegenden Gipskartonbekleidung.

Bild 5.29: Maßstabsgetreue Darstellung des Verhältnisses primäre Leckagefläche zu Grundfläche für den roten, gelben und grünen Bereich des Referenzdaches (jeweils als Quadrate)

ob sämtliche parallel verlaufende Strömungswege, wie beispielsweise durch Installationsschächte, Vorwandkonstruktionen etc., luftdicht vom Deckenaufbau getrennt sind.

5.8 LITERATURVERZEICHNIS

- Boukhris, Y., Gharbi, L., Ghrab-Morcos, N. (2009): Modeling coupled heat transfer and air flow in a partitioned building with a zonal model: application to the winter thermal comfort. *Building Simulation*, vol. 2, pp. 67-74.
- co2online gGmbH (2016): Klima sucht Schutz. <http://www.klimasucht-schutz.de/modernisieren-und-bauen/passivhaus/passivhaus-energiestandards/>, Seite aufgerufen am 14.06.2016.
- DIN 4108-2 (2013): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Februar 2013. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 7730 (2006): Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Mai 2006. Berlin: Beuth.
- DIN 52615 (1987): Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen. November 1987. Berlin: Beuth.
- DIN EN 12207 (2000): Fenster und Türen. Luftdurchlässigkeit. Klassifizierung. Deutsche Fassung EN 12207:1999. Berlin: Beuth.
- Modelica and the Modelica Association (2016): <https://www.modelica.org/>, Seite aufgerufen am 1.7.2016.
- Nouidui, T. (2008): Entwicklung einer objektorientierten Modellbibliothek zur Ermittlung und Optimierung des hygrothermischen und hygienischen Komforts in Räumen. Dissertation an der Universität Stuttgart.
- Norrefeldt, V., Grün, G., Sedlbauer, K. (2012): VEPZO – Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space. *Building and Environment*, vol. 48, pp. 183-194.
- Norrefeldt, V. (2013): VEPZO – Velocity Propagating Zonal Model – A locally refined airflow model for confined spaces to use in optimization applications. Dissertation an der Universität Stuttgart.
- Pathak, A., Norrefeldt, V., Lemouedda, A., Grün, G. (2014): The Modelica Thermal Model Generation Tool for Automated Creation of Coupled Airflow, Radiation Model and Wall Model in Modelica. 10th Modelica Conference, 10.-12. März 2014, Lund, Schweden.
- Ursa (2015): Dämmen und Wohlfühlen. Produktbroschüre der Firma URSA Deutschland GmbH, Stand 01.2015, Leipzig.
- 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.
- WUFI (2016): <https://wufi.de/de/>, Seite aufgerufen am 1.7.2016.
- Zirkelbach, D., Künzel, H. M., Schafaczek, B., Borsch-Laaks, R. (2009): Dampfkongression wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. 4th Intern. Symposium on Building and Ductwork Air tightness. 1.-2. Oktober 2009, Berlin.

6 Leckagebewertung unter dem Gesichtspunkt Lüftung

Joachim Zeller

6.1 LUFTDICHTHEIT UND LÜFTUNG

Die Forderung nach luftdichtem Bauen kam in Deutschland Ende der 80er-Jahre im Zusammenhang mit der Idee des Niedrigenergiehauses auf und resultierte aus dem Wunsch, Lüftungswärmeverluste zu minimieren (Feist und Klien 1989). Die naheliegende Frage, ob Leckagen in der Gebäudehülle nicht sinnvoll seien, um den notwendigen Luftwechsel zwischen innen und außen sicherzustellen, wurde schon damals verneint. Gründe dafür sind, dass die Größe der Leckagen nicht planbar ist, dass gelegentlich Bauschäden durch Leckagen entstehen und dass die freie Lüftung über nicht einstellbare Öffnungen stark vom Wetter abhängt. Die Empfehlung für Niedrigenergiehäuser lautete deshalb, eine Lüftungsanlage zu installieren und die Gebäudehülle luftdicht zu bauen.

Um den Zusammenhang zwischen Luftdichtheit und Lüftung diskutieren

zu können, muss man zwischen den verschiedenen Lüftungssystemen unterscheiden (Tabelle 6.1): Bei der **freien Lüftung** wirken Druckunterschiede an der Gebäudehülle, die durch Wind und Thermik entstehen, als antreibende Kraft. Dabei treten positive Druckdifferenzen (Überdruck) und negative Druckdifferenzen (Unterdruck) an anderer Stelle immer gleichzeitig auf, denn es strömt immer gleich viel Luft nach innen wie nach außen. Über alle Öffnungen gemittelt gibt es keine Druckdifferenz zwischen innen und außen. Wo die Luft ein- und wo sie ausströmt, hängt von der Gebäudeausrichtung und vom Wetter ab.

Bei einer **Abluftanlage** wird die Abluft aus den Räumen, in denen Feuchtigkeit und Gerüche vorwiegend freigesetzt werden, also Küche, Bad und WC (Ablufträume), über Abluftkanäle mithilfe eines Ventilators entnommen und nach außen abgeführt. Durch den Ventilatorbetrieb entsteht ein leichter Unterdruck in der Wohnung. In den Wohn- und Schlafräumen (Zulufräume) sind so genannte Außenbauteil-

luftdurchlässe (ALD) eingebaut, durch die Außenluft nachströmen kann. Es entsteht eine gerichtete Strömung von den Zulufräumen zu den Ablufträumen. Durch die Doppelnutzung der Luft in Zuluft- und Ablufträumen kann man mit relativ kleinen Luftvolumenströmen effektiv lüften. Räume, die zwischen Zulufräumen und Ablufträumen liegen, z. B. dazwischenliegende Flure, werden ebenfalls durchströmt. Man bezeichnet sie als Überströmräume.

Bei einer **Zu-Abluft-Anlage** wird zusätzlich zur Abluft auch die Zuluft über ein Kanalnetz mit Ventilator transportiert und den Zulufräumen zugeführt. Auch hier gibt es also eine gerichtete Durchströmung der Wohnung. Es besteht die Möglichkeit, Außen- und Abluft über einen Wärmeübertrager (früher Wärmetauscher genannt) so aneinander vorbei zu führen, dass Wärme von der Abluft auf die Außenluft übertragen wird. Dies spart Heizenergie und erhöht die Behaglichkeit dort, wo Zuluft in den Raum einströmt. Aufgrund des annä-

Tabelle 6.1: Übersicht Lüftungssysteme

	freie Lüftung	Zu-Abluft-Anlage	Abluftanlage	Zuluftanlage
LEGENDE  Luftströmung ungerichtet Ventilator Luftströmung gerichtet				
Ventilator	–	Zu- und Abluft	Abluft	Zuluft
Außenbauteilluftdurchlässe	alle Räume	–	Zulufräume	Ablufträume
gerichtete Strömung?	nein, wetterabhängig	ja	ja	ja
anlagenbedingter Differenzdruck innen - außen	–	–	Unterdruck	Überdruck
Wärmeübertrager zur Vorwärmung der Zuluft	–	üblich	–	–

hernd balancierten Betriebs von Zu- und Abluftmassenstrom entsteht außer den wetterbedingten Differenzdrücken kein Druckunterschied zwischen innen und außen.

Eine **Zuluftanlage** arbeitet im Gegensatz zur Abluftanlage mit einem leichten Überdruck in der Wohnung. Zuluft wird von einem Ventilator gefördert und in die Wohn- und Schlafräume eingebracht. In Küche, Bad und WC werden Außenbauteilluftdurchlässe eingebaut, durch die Abluft gezielt nach außen strömen kann.

Neben diesen drei in DIN 1946-6 (2009) beschriebenen Systemen von ventilatorgestützten Lüftungsanlagen gibt es weitere mechanische Lüftungseinrichtungen, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Bei diesen findet die oben beschriebene, gerichtete Strömung von den Zuluft- zu den Ablufträumen und die damit verbundene „doppelte Nutzung“ der Luft nicht oder nicht dauerhaft statt.

6.2 FREIE LÜFTUNG

Freie Lüftung kann allein über die vorhandenen Leckagen in der Gebäudehülle stattfinden oder es können zusätzlich Außenbauteilluftdurchlässe (ALD) eingebaut sein, um einen geplanten Luftvolumenstrom zu erreichen. Ein Sonderfall der freien Lüftung ist die in älteren Mehrfamilienhäusern übliche Schachtlüftung, bei der im Winter wegen der Thermik Luft aus Bädern, WCs und Küchen durch einen über Dach geführten Schacht nach außen strömt.

Für die Auslegung von ALD nach DIN 1946-6 (2009) wird ein Auslegungsdifferenzdruck von 2 bis 8 Pascal angenommen, dessen Höhe davon abhängt, ob die Wohnung ein- oder mehrgeschossig ist, ob sie sich in windschwacher oder windstarker Lage befindet und ob ein Abluftschacht vorhanden ist. Aus dem Auslegungsdifferenzdruck und der Luftwechselrate bei 50 Pascal (n_{50}) wird der Volumenstrom durch Infiltration berechnet. Die Differenz zum gewünschten Auslegungsvolumenstrom der Wohnung wird dann durch Einbau von ALD erreicht. Nach Norm zulässig und üblich ist es, den Auslegungsvolumenstrom so zu wählen, dass bei Anwesenheit von Personen

zusätzlich über Fenster gelüftet werden muss. Die Norm empfiehlt allerdings die Auslegung auf die so genannte Nennlüftung, d. h. den Volumenstrom, der bei normaler Personenbelegung erforderlich ist.

Folgende Vereinfachungen liegen der beschriebenen Vorgehensweise bei der Planung zu Grunde:

- In der Regel ist die Luftwechselrate bei 50 Pascal zum Zeitpunkt der Planung (noch) nicht bekannt. Es wird deshalb mit Planungswerten oder Standardwerten aus der Norm (DIN 1946-6 2009) gerechnet.
- Die Verteilung der Luftdurchlässigkeit des Gebäudes auf die Wohnungen oder gar die Räume ist nicht bekannt, auch dann nicht, wenn eine Messung der Luftdurchlässigkeit durchgeführt wurde.
- Die realen Differenzdrücke an der Gebäudehülle und damit die Volumenströme durch freie Lüftung sind stark wetterabhängig. Bei mildem und windstillem Wetter ist der Volumenstrom sehr gering, sofern der Nutzer dies nicht durch Öffnen der Fenster korrigiert. Bei windigem oder kaltem Wetter kann der Volumenstrom durch freie Lüftung den notwendigen Volumenstrom weit übersteigen, insbesondere wenn entsprechend den Empfehlungen der Norm die Außenbauteilluftdurchlässe auf Nennlüftung ausgelegt wurden.
- Die realen Differenzdrücke an der Gebäudehülle hängen auch von der Lage der Öffnung ab. Die Auslegung erfolgt unter der Annahme, an der Hälfte der Öffnungsfläche aller Leckagen und ALD herrsche beispielsweise 4 Pa Unterdruck, an der anderen Hälfte 4 Pa Überdruck. Tatsächlich gibt es auch Bereiche mit höheren oder niedrigeren Druckdifferenzen, so dass die Verteilung der Volumenströme auf die Räume nicht der Planung entsprechen muss.

Unter dem Aspekt der Lüftung ist eine einzelne Leckage nur dann relevant, wenn sie sehr groß ist. Relevant ist dagegen die Summe der Leckagen in einem Raum bzw. in einer Wohnung. Eine erhöhte Luftdurchlässigkeit in einem Raum oder einer Wohnung führt dazu, dass dieser Bereich besonders stark gelüftet wird. Andere Räume oder Wohnungen können

dementsprechend zu wenig gelüftet werden. Die Leckagen reduzieren die Lüftungsautorität der ALD.

Daraus resultiert die Forderung, auch Gebäude mit freier Lüftung eher luftdicht zu bauen. Im Hinblick auf die Wetterabhängigkeit der Differenzdrücke und damit der Volumenströme ist aber auch zu fordern, dass ALD entsprechend den gerade herrschenden Wetterverhältnissen vom Nutzer einstellbar sein sollten. DIN 1946-6 (2009) empfiehlt die Verwendung von selbsttätig regelnden ALD, wobei zu fragen ist, inwieweit solche einfachen Vorrichtungen den Volumenstrom einigermaßen konstant halten können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine wetterunabhängige Lüftung über Undichtheiten und Einrichtungen zur freien Lüftung praktisch nicht erreichbar ist. In Frankreich sind deshalb im Neubau Lüftungsanlagen quasi vorgeschrieben (Arrêté 1982). Freie Schachtlüftung ist zwar ebenfalls zulässig, wird aber seit den 90er-Jahren kaum mehr realisiert.

6.3 ZU-ABLUF-ANLAGEN

Eine Zu-Abluft-Anlage wird so geplant und einreguliert, dass die Zuluft- und Abluftmassenströme einer Wohnung gleich groß sind. Somit wird in der Wohnung kein Unter- oder Überdruck erzeugt.

Wetterbedingt wird an Lecks genauso viel Luft in- bzw. exfiltriert, wie es ohne Vorhandensein der Lüftungsanlage der Fall wäre. Dieser für die Lüftung der Wohnung unnötige Luftvolumenstrom über Leckagen führt zu unnötigen Lüftungswärmeverlusten. Wegen der Wärmerückgewinnung von typisch 65 % bis 85 % führen die Luftvolumenströme über die Lüftungsanlage zu verhältnismäßig kleinen Lüftungswärmeverlusten. Ein In- und Exfiltrationsvolumenstrom von einem Siebtel bis einem Drittel des Volumenstroms über die Anlage führt zu einer Verdoppelung des Lüftungswärmeverlustes gegenüber der Lüftungsanlage allein. In der Konsequenz empfehlen Werner und Laidig (2012) einen Grenzwert der Luftdichtheit von $n_{50} \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$ und einen Zielwert von $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$. Sie weisen auch darauf hin, dass Werte unter $0,3 \text{ h}^{-1}$ keinen weiteren Vorteil bringen.

So ungünstig Leckagen in energetischer Hinsicht sind, so harmlos sind sie bei einer Zu-Abluft-Anlage in lüftungstechnischer Hinsicht. Wetterbedingte Differenzdrücke an Lecks sind die meiste Zeit des Jahres deutlich kleiner als der Druckabfall in der Lüftungsanlage. Die von der Anlage geförderten Volumenströme werden daher vom Wetter kaum beeinflusst. Zu- und Ablufträume werden deshalb jederzeit im geplanten Maß be- bzw. entlüftet.

Gibt es in Zu- und/oder Ablufträumen eine hohe Luftdurchlässigkeit, dann kann dies dazu führen, dass z. B. die über die Anlage in einen Zulufräum eingebrachte Luftmenge fast vollständig über Lecks nach außen strömt. Ein an diesen Zulufräum angrenzender Überströmraum kann in diesem Fall unzureichend gelüftet sein.

Zu-Abluft-Anlagen sind also insgesamt robust gegenüber Leckagen, die Luftqualität wird wenig beeinflusst. Bei der Leckagebewertung spielt die Einzelleckage keine große Rolle. Im Hinblick auf eine möglicherweise schlechte Lüftung eines Überströmraumes ist die Luftdurchlässigkeit eines einzelnen Zuluft- oder Abluftraumes entscheidend. Im Hinblick auf die Lüftungswärmeverluste ist die Luftdurchlässigkeit der gesamten Wohnung relevant. Für Gebäudesanierungen, die von der KfW gefördert werden, geben deren Regularien ein Berechnungsverfahren an, durch das der im Nachweis anrechenbare Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage mit steigender Luftdurchlässigkeit des Gebäudes verringert wird (KfW 2016).

6.4 ABLUFTANLAGEN

Abluftanlagen erzeugen einen Unterdruck in der Wohnung. Dieser Unterdruck wird von wetterbedingten Differenzdrücken überlagert. An Stellen, an denen wetterbedingt innen Überdruck entsteht, wird der anlagenbedingte Unterdruck abgeschwächt. Es kann auch vorkommen, dass der Überdruck den Unterdruck übersteigt, so dass in einzelnen Räumen insgesamt innen Überdruck herrscht.

Damit alle Zulufräume über die ALD belüftet werden, ist es erforderlich, dass der Unterdruck weitgehend wet-

terunabhängig in der gesamten Wohnung besteht. Ist in einzelnen Räumen kein Unterdruck vorhanden, werden diese unzureichend belüftet. In Einfamilienhäusern sind vor allem die im Obergeschoss liegenden Räume, meist die Schlafräume, kritisch. So wurde bei Untersuchungen an vom Land Hessen geförderten, bewohnten Niedrigenergiehäusern festgestellt, dass die Filtereinlagen in ALD im Obergeschoss gelegentlich auch auf der Innenseite verschmutzt waren – ein Hinweis auf eine zeitweilige Durchströmung von innen nach außen (Werner et al. 1995). Diese Feststellung deckte sich mit der Aussage der Bewohner, dass sie in diesen Räumen die Luftqualität als unbefriedigend empfinden.

Der von der Anlage erzeugte Unterdruck ist umso höher, je größer der von der Anlage geförderte Luftvolumenstrom ist. Er ist umso kleiner, je größer die Öffnungsfläche in der Gebäudehülle ist, die sich aus Lecks und ALD zusammen ergibt. Eine hohe Luftwechselrate bei 50 Pascal ließe sich theoretisch durch eine kleinere Bemessung der ALD ausgleichen. Da man die Leckageverteilung aber nicht kennt, würde dies zu einer nicht bekannten Verteilung der Außenluft auf die Zulufräume führen.

Im Hinblick auf einen ausreichenden Unterdruck sollte die Öffnungsfläche der ALD also klein bemessen werden, im Hinblick auf eine hohe Lüftungsautorität der ALD groß. Dieses Dilemma lässt sich nur durch eine dichte Gebäudehülle lösen. Werner und Laidig (2012) empfehlen auch bei Abluftanlagen einen Grenzwert der Luftwechselrate bei 50 Pascal von $n_{50} \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$ und einen Zielwert von $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$.

Wie bei den anderen bisher behandelten Lüftungssystemen kommt es also auch bei Abluftanlagen zunächst auf die Summe aller Leckagen einer Wohnung bzw. die Luftwechselrate bei 50 Pascal an. Bei der Leckagebewertung gibt es aber auch Besonderheiten der Abluftanlage:

Sofern bei jedem Wetter an jeder Stelle der Gebäudehülle Unterdruck herrscht, werden alle Lecks immer von außen nach innen durchströmt. Schäden, die dadurch entstehen, dass feuchtwarme Raumluft durch ein

Leck ins Bauteil und dann nach außen strömt, wären damit ausgeschlossen. Selbst bei nicht idealen Druckverhältnissen kann dieses Bauschadensrisiko durch Abluftanlagen erheblich verringert werden.

Dagegen ist das Zugluftisiko durch den Unterdruck erhöht. Leckagen, an denen bei der Luftdichtheitsprüfung die Luft mit hoher Strömungsgeschwindigkeit in Richtung des Aufenthaltsbereiches einströmt, sollten aus diesem Grund nachgebessert werden. Der vom Autor in früheren Veröffentlichungen genannte Maximalwert von 2 m/s bei 50 Pascal (Zeller und Biasin 1996) sollte dabei nur als Anhaltswert verstanden werden, denn eine Vielzahl anderer Faktoren wie die Fläche des Lecks, dessen Lage im Haus, dessen Lage in Bezug zu einem Heizkörper oder der Baustandard spielen ebenfalls eine Rolle (Biasin und Zeller 2002).

Eine weitere Folge des Unterdrucks bei Abluftanlagen ist die erhöhte Geruchs- und Schadstoffübertragung, z. B. an Leckagen zwischen verschiedenen Wohnungen, weil der zu einem bestimmten Zeitpunkt erzeugte Unterdruck in verschiedenen Wohnungen unterschiedlich sein kann: So klagten Mieter einer Wohnung in einem Mehrfamilienhaus mit Abluftanlagen über den Zigarettenrauch einer anderen Mieterin, der von der Abluftanlage über einen Installationsschacht angesaugt wurde. Der Differenzdruck zwischen den Wohnungen konnte dadurch erklärt werden, dass die Raucherin gewöhnlich am offenen Fenster rauchte. Somit gab es in ihrer Wohnung während des Rauchens keinen Unterdruck und die internen Lecks wurden von ihrer Wohnung weg zu den anderen Wohnungen hin durchströmt.

Eine große Luftdurchlässigkeit in Ablufträumen oder in Räumen der Überströmzone führt bei Abluftanlagen dazu, dass die Außenluft direkt in diesen Abluft- oder Überströmraum einströmt und die Zulufräume entsprechend weniger belüftet werden. Undichte Wohnungseingangstüren in einem Mehrfamilienhaus mit Abluftanlagen führten beispielsweise dazu, dass die Mieter die Zulufräume über die Fenster lüfteten, weil über die ALD zu wenig Luft strömte. Nach Austausch der Türen funktionierte die Belüftung der Zulufräume.

6.5 ZULUFTANLAGEN

Bei Zuluftanlagen wird die Zuluft über einen zentralen oder mehrere dezentrale Ventilatoren den Zuluft Räumen zugeführt. Ein leichter Überdruck in der Wohnung führt zu einer Durchströmung der Wohnung hin zu den Ablufträumen, wo die Abluft über ALD ins Freie strömt.

Durch den Überdruck in der Wohnung werden auch Lecks von innen nach außen durchströmt. Das feuchtetechnische Schadensrisiko aufgrund einer Durchströmung von Bauteilen von innen nach außen ist daher erhöht.

6.6 LECKAGEBEWERTUNG – ZUSAMMENFASSUNG

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle ist ausgesprochen relevant für die Funktion von Lüftungsanlagen (Tabelle 6.2). Aber die Einzelleckage spielt für die Lüftung in der Regel keine Rolle. Relevant ist die Summe der Leckagen je Raum (Leckageverteilung) sowie die Gesamt-Undichtheit (Luftwechselrate bei 50 Pascal n_{50}).

Für ventilatorgestützte Lüftungsanlagen fordert dementsprechend die Energieeinsparverordnung (2013), dass n_{50} maximal $1,5 \text{ h}^{-1}$ betragen darf, bzw. bei Gebäuden mit mehr als 1500 m^3 Luftvolumen, für die der Nachweis nach DIN V 18599 (2011) erbracht wird, dass die auf die Hüllfläche bezogene Luftdurchlässigkeit q_{50} nicht größer als $2,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ sein darf.

Eine große Öffnungsfläche der Lecks in einem Abluftraum führt dazu, dass bei Abluftanlagen die Zuluft- und Überströmräume zu wenig gelüftet werden, bei Zu-Abluft-Anlagen kann die Lüftung der Überströmzone beeinträchtigt sein. Eine Leckagehäufung in der Überströmzone beeinträchtigt die Belüftung der Zuluft Räume bei einer Abluftanlage.

Ein einzelnes Leck ist dann lüftungstechnisch relevant, wenn es so groß ist, dass es allein die geplante Durchströmung der Wohnung von den Zuluft- zu den Ablufträumen stört, wie beispielsweise die oben erwähnte undichte Wohnungstür in einer Wohnung mit Abluftanlage.

Angaben, ab welcher Größe ein Einzelleck oder eine Leckagehäufung in einem Raum lüftungstechnisch störend ist, sind aus der Literatur nicht bekannt. Irrelevant sind schätzungsweise Volumenströme unter $10 \text{ m}^3/\text{h}$ in einem Raum während der Nutzung, entsprechend 30 bis $50 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 50 Pascal. Wünschenswert wären zu dieser Fragestellung aber belastbare Untersuchungen z. B. mit Modellrechnungen.

Bei jedem Lüftungssystem sind Leckagen dann besonders störend, wenn durch sie Luft schlechter Qualität einströmt, wie Luft aus dem Keller oder aus benachbarten Wohnungen. Bei Abluftanlagen ist dieser Gesichtspunkt wegen des permanenten Unterdrucks besonders wichtig.

Undichtheiten zwischen Räumen der gleichen Nutzungseinheit sind lüftungstechnisch erwünscht, denn sie fungieren als Überströmöffnung, d. h. sie ermöglichen die gerichtete Durchströmung der Wohnung von den Zuluft Räumen über Überströmräume zu den Ablufträumen. Häufig werden deshalb Zimmertüren unten etwas gekürzt.

Tabelle 6.2: Übersicht Leckagebewertung bei verschiedenen Lüftungssystemen

	freie Lüftung	Zu-Abluft-Anlage	Abluftanlage	Zuluftanlage
feuchtetechnische Schadensanfälligkeit	normal	normal	gering	erhöht
Zugluftrisiko	normal	normal	erhöht	verringert
empfohlener Höchstwert für n_{50} (DIN 4108-7 2011)	Gebäude ohne ALD: $3,0 \text{ h}^{-1}$, mit abgedichteten ALD: $1,5 \text{ h}^{-1}$	$1,0 \text{ h}^{-1}$	$1,0 \text{ h}^{-1}$ mit abgedichteten ALD	$1,0 \text{ h}^{-1}$ mit abgedichteten ALD
Folgen eines erhöhten n_{50}	erhöhte Lüftungswärmeverluste, Lüftung evtl. verbessert (ohne ALD), Autorität der ALD verringert	erhöhte Lüftungswärmeverluste	Autorität der ALD verringert, Belüftung der Zuluft Räume verschlechtert	Autorität der ALD verringert, Entlüftung der Ablufträume verschlechtert
große Leckage in Abluftraum	–	–	Belüftung der Zuluft- und Überströmräume verschlechtert	Entlüftung anderer Ablufträume verschlechtert, in Bädern erhöhte Schadensanfälligkeit
große Leckage in Überströmraum	–	–	Belüftung der Zuluft Räume verschlechtert	Entlüftung der Ablufträume verschlechtert
große Leckage in Zuluft Raum	–	–	Belüftung anderer Zuluft Räume verschlechtert	Lüftung der Abluft- und Überströmräume verschlechtert
Leckagen zwischen Wohnungen	störend	störend	besonders störend	besonders störend
Leckagen zum Keller	störend	störend	besonders störend	weniger störend

6.7 AUSWAHL VON LÜFTUNGSSYSTEMEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER LUFTDICHTHEIT

So wichtig eine hohe Luftdichtheit für Gebäude mit Lüftungsanlage ist, so falsch ist der Umkehrschluss, Lüftungsanlagen in undichten Gebäuden wären nicht sinnvoll.

Insbesondere Zu-Abluft-Anlagen sind in lüftungstechnischer Hinsicht sehr robust. Die Zuluft- und Abluftmengen werden von Leckagen praktisch nicht beeinflusst. Die In- und Exfiltration über die Lecks ist ohne und mit Lüftungsanlage gleich. Eine Zu-Abluft-Anlage sorgt unabhängig vom Wetter für den notwendigen Luftaustausch; und wegen der Wärmerückgewinnung sind mit diesem Luftaustausch verhältnismäßig geringe Lüftungswärmeverluste verbunden.

Auch eine Abluftanlage kann in einem undichten Haus sinnvoll sein, denn sie stellt unabhängig von der Dichtheit der Gebäudehülle die Entlüftung der Nassräume sicher, und der Unterdruck verringert das Risiko von Feuchteschäden an Lecks.

Lüftungsanlagen sollten aber – abweichend von den Empfehlungen der DIN 1946-6 (2009) – so ausgelegt werden, dass eine mögliche zukünftige Verbesserung der Luftdichtheit eingeplant wird. Daher sollten ALD etwas größer dimensioniert werden, aber einstellbar sein, um Leckagen ausgleichen zu können.

Die Empfehlung für den Neubau lautet, eine hohe Luftdichtheit anzustreben und eine ventilatorgestützte Lüftungsanlage einzubauen. Im Bestand sollte die Dichtheit nach Möglichkeit verbessert werden. Aber auch wenn dies nicht möglich oder vorgesehen ist, sollten ventilatorgestützte Lüftungsanlagen aus Gründen der (wetterunabhängigen) Luftqualität auch in eher undichten Gebäuden eingebaut und betrieben werden.

6.8 LITERATURVERZEICHNIS

- Arrêté du 24 mars (1982): Dispositions relatif à l'aération des logements. In: Journal officiel de la République française, 27.03.1982.
- Biasin, K., Zeller, J. (2002): Luftdichtigkeit von Wohngebäuden – Messung, Bewertung und Ausführungsdetails, 3. Aufl., Frankfurt: VWEW Energieverlag.
- DIN 1946-6 (2009): Raumluftechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung, Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN 4108-7 (2011): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele, Berlin: Beuth-Verlag.
- DIN V 18599 (2011): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung, Berlin: Beuth-Verlag.
- Energieeinsparverordnung (2013): Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. In: Bundesgesetzblatt Teil I, 2013 Nr. 67.
- Feist, W., Klien, J. (1989): Das Niedrigenergiehaus, Karlsruhe: C. F. Müller-Verlag.
- KfW (2016): Anlage zu den Merkblättern Energieeffizient Sanieren - Kredit (151/152), Energieeffizient Sanieren Investitionszuschuss (430), Energieeffizient Bauen (153) – Liste der Technischen FAQ, Stand 08/2016, Frankfurt: KfW.
- Werner, J., Rochard, U., Zeller, J., Laidig, M. (1995): Meßtechnische Überprüfung und Dokumentation von Wohnungslüftungsanlagen in hessischen Niedrigenergiehäusern – Endbericht, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- Werner, J., Laidig, M. (2012): Empfehlung von Luftdichtheitsanforderungen. In: FLiB Buch / Band 1. Gebäude-Luftdichtheit, 2. Aufl., Berlin: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V.
- Zeller, J., Biasin, K. (1996): Luftdichtigkeit von Wohngebäuden – Messung und Bewertung, Essen: RWE Energie Aktiengesellschaft.

AUTOR



JOACHIM ZELLER
DIPL.-PHYS.

Freiberuflicher Ingenieur und Gutachter (Biberach) in den Bereichen Luftdichtheit, Lüftung, Wärmeschutz, Niedrigenergiehäuser und Passivhäuser



7 Bewertung von Leckagen unter dem Aspekt des Eintrags von Gerüchen

Andrea Burdack-Freitag

7.1 EINLEITUNG

Der Einfluss von Gerüchen wird immer noch abschätzig als archaische und subjektive Wahrnehmung beschrieben. Dabei beeinträchtigt kaum ein latenter Einfluss den Nutzer mehr als Gerüche. Ein irritierender Geruchseindruck (im folgenden Fehlgeruch genannt) entsteht immer dann, wenn ein extrem unangenehmer Geruch auftritt oder wenn ein zwar im Grunde angenehmer Geruch an einem Ort oder bei einem Material auftritt, bei dem er nicht erwartet wird.

Auftretende Fehlgerüche in baulichen Schadensfällen wurden lange Zeit ignoriert. Dies liegt an zwei wesentlichen Gründen. Zum einen ist dies der individuellen Wahrnehmung geschuldet. Einige Personen reagieren extrem sensitiv auf Gerüche, andere sind als eher robust anzusehen.

Zum anderen liegt es an dem Unwillen, sich mit Störquellen auseinanderzusetzen, die mit gängigen Messmethoden nicht zu quantifizieren sind. Erfahrungsgemäß wird im Falle von Fehlgerüchen erst einmal eine ganze Reihe an physikalischen, chemischen oder biologischen Schadensanalysen durchgeführt, z. B. Feuchte-, Strömungs- und Emissionsmessungen oder mikrobiologische Untersuchungen. Führen diese Messungen zu keinem Ergebnis, so ist für die involvierten Parteien der Fall erst einmal abgeschlossen, da gesundheitliche Beeinträchtigungen nicht zu erwarten sind. Die Kommission Innenraumlufthygiene des Umweltbundesamtes hält dem entgegen:

„Auch wenn eine erhebliche gesundheitliche Belästigung im toxikologischen Sinne keine gesundheitliche Gefährdung darstellt, ist eine erhebliche Belästigung zumindest im baurechtlichen Sinne als eine regulatorisch relevante Eigenschaft anzusehen.“ (UBA 2014a)

Bis akzeptiert wird, dass es sich in einem Schadensfall um ein geruchli-

ches Problem handelt und ein Geruchsexperte eingeschaltet wird, haben die Betroffenen häufig einen langen Leidensweg hinter sich.

Die Herausforderung bei der objektiven Erfassung von Fehlgerüchen liegt sowohl in der Ermittlung der Quellen als auch in der qualitativen und quantitativen Beschreibung der Natur des

Geruchs, die unterschiedlicher nicht sein könnten. Um eine Kategorisierung beider Kriterien vornehmen zu können, wird in einem ersten Schritt von zwei eindeutig auf Luft-Leckagen zurückzuführenden Fällen aus der Praxis berichtet. Auf diese beiden Fälle wird im weiteren Verlauf dieses Beitrags immer wieder eingegangen.

FALL 1: ANGENEHMER GERUCH AN FALSCHER STELLE

Ein beliebtes Marketing-Instrument sind unternehmensspezifische Gerüche (sog. Corporate Scents), die exklusiv mit Parfümeuren entwickelt werden und einen Wiedererkennungswert haben. Besonders große Modeketten beduften gerne ihre Läden, um den Kunden ein Shopping-Erlebnis zu bieten. Peinlich, wenn das Parfüm die Neigung hat, in angrenzende Nutzungseinheiten einzudringen, die nicht zum Unternehmen gehören und in denen dieser Geruch unerwünscht ist.

Im genannten Fall zog unterhalb einer renommierten Kanzlei ein solch angesagter Laden ein. Der im Prinzip angenehme Parfümgeruch breitete sich völlig unerwartet in der Kanzlei aus. Zunächst trat bei Meetings oder Klienten-Gesprächen eine plötzliche Geruchsentwicklung auf, die für Irritation, später dann für Verärgerung sorgte. Mit Hilfe von Bausachverständigen wurde der Verursacher des Geruchs schnell festgestellt. Die Parteien einigten sich darauf, die Lüftungsanlage mit Aktivkohlefiltern auszustatten.

Leider war diese Maßnahme nicht dauerhaft erfolgreich. Die Gerüche traten immer noch an unerwarteten Stellen auf. Die größte Schwierigkeit der eingeschalteten Bausachverständigen bestand in deren schnellen Adaption an den Geruch. Eine eindeutige Zuordnung der Lecks war ihnen nicht möglich.

FALL 2: INTENSIVER UNANGENEHMER GERUCH

Im Rahmen der Sanierung eines ganzen Straßenzuges entstanden viele moderne und zugleich begehrte Wohneinheiten. Um den aktuellen Ansprüchen an Wohnraumgröße, Klimatisierung und Licht zu genügen, wurden teilweise bisher unabhängige Gebäudeteile bzw. leere Flächen zusammengefasst und mit Wohnungen überbaut. Dadurch entstanden unterschiedliche Ebenen und teilweise meterhohe Fugen zwischen den Gebäudeteilen, die schall- und wärmegeämmt wurden.

Einige Wohnungen wurden bereits bezogen, obwohl noch nicht alle Gewerke (z. B. Dachbegrünungen, Fassadenaufbauten, andere Wohnungseinheiten) fertiggestellt waren. Zum Zeitpunkt der Abnahme und Übergabe der Wohnungen hatten sich keine Mängel gezeigt.

In einer dieser Wohnungen trat nach wenigen Wochen ein zunächst schwacher, dann immer stärker werdender, unangenehmer Fischgeruch auf. Dieser Geruch war beim Betreten der Wohnung besonders penetrant wahrzunehmen. Das schreckte potenzielle Mieter ab.

Eingeschaltete Bausachverständige veranlassten präzise und regelkonform alle messtechnisch möglichen Maßnahmen, um die Quelle ausfindig zu machen. Eine eindeutige Quellenermittlung war jedoch nicht möglich, da während des Aufenthaltes in der Wohnung eine schnelle Adaption an den Geruch stattfand.

7.2 PHÄNOMEN GERUCH

Um zu verstehen, mit welchen Schwierigkeiten Sachverständige in den beiden oben genannten Fällen konfrontiert waren und warum eine objektive Messung nicht immer zielführend ist, wird zunächst das Phänomen „Geruch“ beleuchtet.

Geruch ist eine komplexe Sinneswahrnehmung mit vielen Einflussfaktoren. Jeder für sich isoliert betrachtet kann ein störendes Geruchsereignis nicht unbedingt erklären. Um einen Geruch als Fehlgeruch klassifizieren zu können, muss häufig eine Kombination aus mehreren Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

7.2.1 PHYSIOLOGIE

Die menschliche Geruchswahrnehmung ist eine Interaktion von gasförmigen Molekülen mit den Riechrezeptoren in der Nasenhöhle. Da ein Geruchsstoff aus verschiedenen molekularen Strukturen aufgebaut ist, die gleichzeitig unterschiedliche Rezeptoren reizen, findet eine kombinatorische Geruchscodierung statt, die eine einmalige Geruchsstoff-Identität bildet. Auf diese Weise ist der menschliche Geruchssinn in der Lage, zwischen 10.000 und 100.000 Geruchsstoffe zu unterscheiden (Platig 1987, Axel 2005, Buck 2005).

7.2.2 EMOTIONALE FAKTOREN

Die Geruchswahrnehmung ist eng mit dem limbischen System verknüpft. Diese zentrale Funktionseinheit des Gehirns ist für die Verarbeitung von Emotionen zuständig. Die emotionale Antwort auf einen Geruchseindruck ist evolutionsgeschichtlich eng mit lebenswichtigen Informationen über Essbares, Giftiges und soziale Interaktion verknüpft. Auch wenn diese rudi-

mentären Verhaltensweisen auf Gerüche nur noch ansatzweise vorhanden sind, so reagieren Menschen doch mit Ablehnung oder Annäherung auf bestimmte Gerüche. Dies wiederum kann zu einer subjektiven Meinungsbildung über den Geruch führen. Daher sollten mit Fehlgerüchen konfrontierte Parteien sehr vorsichtig mit einer frühzeitigen Bewertung sein, um Manipulation zu vermeiden (Klages 1964, Dalton 1999).

7.2.3 SENSITIVITÄT UND SELEKTIVITÄT

Die Geruchssensitivität kann innerhalb einer Bevölkerung stark variieren. Was für den einen nicht störend ist, kann für den anderen absolut unerträglich sein. Für einzelne Geruchsstoffe treten bei jedem Menschen in geringem Maße Riechausfälle auf, d. h. man hat hierfür keine Riechrezeptoren. Treten diese Riechausfälle gehäuft auf, so spricht man von einer Anosmie (Riechstörung). Das Gegenteil, also eine vorübergehend verstärkte Geruchswahrnehmung, ist bei schwangeren Frauen zu beobachten. Sie riechen vieles plötzlich intensiver oder lehnen bisher angenehme Gerüche ab (Hatt 2013).

7.2.4 INTENSITÄT

Die individuell wahrgenommene Intensität stellt eine Funktion aus der Konzentration des Geruchstoffes in der Luft und der individuellen Geruchsschwelle dar. Gemäß dem Gesetz nach Weber und Fechner für die subjektiv empfundene Stärke von Sinnesindrücken besteht zwischen der wahrgenommenen Intensität und der Geruchsstoffkonzentration kein linearer Zusammenhang, vielmehr verhält sich die wahrgenommene Intensität proportional zum Logarithmus der Stärke des dargebotenen Sinnesreizes. Dies führt dazu, dass ein doppelt

so hoch konzentrierter Geruch u. U. gleich intensiv wie die einfache Konzentration bewertet und eine um 10-fach höhere Konzentration nur doppelt so intensiv wahrgenommen wird. Hier verhält sich der Geruchssinn analog der Wahrnehmung von Geräuschen oder Lichtreizen (Jiang et al. 2006, Miyazawa et al. 2008).

7.2.5 ADAPTION

Wird man über längere Zeit einem Sinnesreiz ausgesetzt, so passt sich die Wahrnehmung an den Reiz an, bis er final nicht mehr wahrgenommen wird. Dieses Reaktionsschema tritt bei olfaktorischen, akustischen und visuellen Reizen gleichermaßen auf. Dieser Effekt ist bei dauerhaft auftretenden Fehlgerüchen nicht zu unterschätzen, da er zu einem Fehlurteil der Geruchsexposition führen kann und besonders die Quellenermittlung erschwert (Plattig 1987).

7.3 CHARAKTERISIERUNG EINES GERUCHS

Das Besondere an einem Geruchsstoff ist, dass seine Wahrnehmung und Bewertung über die menschliche Nase erfolgt und häufig nicht mit gängigen Messmethoden bestimmt werden kann. Geruchsstoffe mit sehr niedrigen Geruchsschwellen lösen eine Geruchsantwort an den Rezeptoren bei Konzentrationen aus, die weit unter den Nachweisgrenzen gängiger Analysegeräte liegen. Der Mensch ist somit der empfindlichste Detektor für einen bestimmten Geruchsstoff. Um einen Eindruck über die Bandbreite der Geruchsstoffe, deren Geruchsschwellen und die potenzielle Detektierbarkeit mit Messgeräten zu geben, sind in der nachfolgenden Tabelle 7.1 ausge-

Tabelle 7.1: Geruchsschwellen ausgewählter innenraumrelevanter Geruchsstoffe (van Gemert 2011)

Geruchsstoff	Geruchsqualität	potenzielle Quelle	Geruchsschwelle in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Acetaldehyd	beißend, stechend	Bodenbeläge, Mineralwolldämmung	2 - 3
beta-Pinen	latschenkieferartig	Holz und Holzwerkstoffe, Wald	180
Dimethyltrisulfid	schweflig, verbrannt	Gips, Kamine und Kaminöfen	0,06 - 1,2
Essigsäure	sauer	Mörtel, Putze, Wandfarben	1 - 2
Limonen	citrusartig	Pflanzen, Reiniger, Parfüms und Raumbeduftung	200
Methanthiol	fäkalisch	Landwirtschaftliche Einträge, Sanitär und Kanalisation	0,1 - 0,5
Trimethylamin	fischig	Polyurethan-Beschichtungen, Schaumstoffe, Dichtmassen	0,08

wählte Geruchsstoffe aufgelistet, die in von Menschen genutzten Innenräumen relevant sein können.

Ein Geruch wird primär als Einzelgeruch angenommen, der nur durch eine chemische Substanz verursacht wird. Tatsächlich wird ein Geruch aber weit- aus häufiger aus einer Vielzahl an unterschiedlichen Substanzen gebildet, die einen Gesamtgeruch formen. Diese Differenzierung ist jedoch nur für den chemischen Analytiker relevant, der im Labor die Identität und die Struktur der Geruchsstoffe aufklärt. Für die Bewertung von Gerüchen durch einen Sachverständigen ist es nicht entscheidungsrelevant, aus wie vielen Einzelkomponenten sich der Fehlgeruch zusammensetzt. Viel wichtiger sind die Herkunft bzw. Quelle und die Ursache des Geruchseindrucks. Daher wird im Folgenden der Begriff Geruch sowohl für einen einzelnen Geruchsstoff als auch für einen Gesamtgeruch, der aus mehreren Geruchsstoffen bestehen kann, verwendet.

Um einen Geruch charakterisieren zu können, werden sensorische Panels eingesetzt. Dabei handelt es sich um regelmäßig auf Geruchsstoffe und Geruchsstoff-Intensitäten geschulte Testpersonen, die in der Lage sind, Gerüche emotionsfrei anhand von Skalen zu bewerten. Für sie stellen sich folgende Fragen:

• **Wonach riecht es?**

Geruchsqualität: Ein Geruch wird in Bezug auf dessen Ähnlichkeit zu realen Referenzgerüchen bzw. Referenzgeruchsstoffen oder zu einer von Experten vereinbarten Deskriptoren-Skala beschrieben. Typische Beispiele sind: holzig, faulig, blumig, grün, erdig usw. (Amoore 1970, Meilgaard et al. 1982, Nobel et al. 1987, Ohloff 1996, Acree 2004, Edwards 2016).

äußerst unangenehm

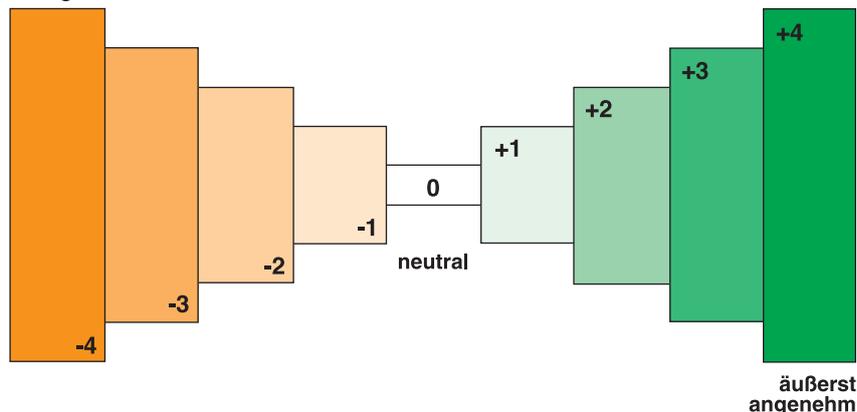


Bild 7.2: Neunstufige Hedonik-Skala

• **Wie intensiv riecht es?**

Geruchsintensität: Je nach Einsatzgebiet (z. B. Automobil, Innenraumhygiene, Lebensmittel) werden verschiedene Skalen verwendet: VDA 270 (1992), DIN EN 13725 (2003), BVL L 00.90-13 (2004), VDI 4302-1 (2012), DIN ISO 16000-28 (2012), VDI 3882/1 (1992), DIN ISO 16000-30 (2015), E DIN ISO 12219-7 (2015), DIN EN ISO 13299 (2016). Allen Skalen gemeinsam ist die Verbalisierung oder Kategorisierung der wahrgenommenen Intensität durch ein sensorisches Panel (siehe Bild 7.1).

• **Wie angenehm riecht es?**

Hedonik: Sie beschreibt auf einer Empfindungsskala (siehe Bild 7.2), ob ein Geruch angenehm oder unangenehm ist - DIN ISO 16000-28 (2012), DIN ISO 16000-30 (2015).

Praxisnahe Geruchsuntersuchungen setzen für die Geruchsqualität und -intensität ein sensorisch geschultes Panel ein und arbeiten auf der subjektiven Ebene der Hedonik mit untrainierten Testpersonen, um ein möglichst realistisches Bild zu erhalten.

7.4 VORGEHENSWEISE BEI DER GERUCHSBEGEGUNG

Berücksichtigt man die vielen humanen Einflussfaktoren (physisch, psychisch, kulturell usw.) und die Charakteristik eines Geruchs (Qualität, Intensität, Hedonik), dann gestaltet sich eine Bewertung und Lokalisierung eines Geruchseintrags als sehr komplex. Eine planvolle und systematische Vorgehensweise, wie sie beispielsweise in der DIN EN ISO 16000-32 (2014) gefordert wird, ist äußerst hilfreich. Für die geruchliche Begehung hat sich folgendes Konzept als nützlich erwiesen:

- Begehungskonzept
- Begehung und ggf. Probenahme
- ggf. sensorische Laboranalytik
- Bewertung (Quellenanalyse und Störpotenzial)
- Empfehlung für weitere Maßnahmen

7.4.1 BEGEGUNGSKONZEPT

Mit dem Begehungskonzept wird die Vor-Ort-Begehung vorbereitet. Hier werden die Motive der Schadensfallanalyse bestimmt, Vorüberlegungen zur Natur des Fehlgeruchs und zu



Bild 7.1: Fraunhofer SmiLe-Skala®

räumlichen Zusammenhängen ange stellt sowie die Standort-, Bau- und Nutzungssituation recherchiert. Vorab gegebene Aussagen (Beschwerden, Klagen, Protokolle) werden auf deren Relevanz geprüft und ggf. eine Probe nahme mit anschließender Laborana lytik geplant.

7.4.1.1 MOTIV DER GERUCHSBEGEHUNG

Eine geruchliche Belästigung gilt immer noch als subjektiv, obwohl objektive Bewertungsskalen (wie z. B. die empfundene Intensität) vorliegen. Der Leidensdruck der betroffenen Personen und das Interesse der ver antwortlichen Personen durch z. B. massive Kundenbeschwerden müs sen genügend hoch sein, damit es zu einer Reaktion kommt. Zudem liegen noch keine zwingenden rechtlichen Vorschriften vor.

Das Hauptmotiv, warum eine geruch liche Schadensfallanalyse initiiert wird, liegt daher überwiegend in dem Sach verhalt der massiven Beschwerde von betroffenen Personen über einen Fehlgeruch. In den seltensten Fällen wird proaktiv auf potenzielle geruch liche Beeinträchtigungen eingegangen.

Dies wurde bei den zuständigen Stel len (DIBt 2010, AGÖF 2013, UBA 2014b, AgBB 2015) schon lange erkannt und floss bereits in mehrere Bewertungsschemata für die Zulas sung von Bauprodukten mit ein. Ein Zwang zur Überprüfung von Baupro dukten auf geruchliche Emissionen und deren Einfluss auf die Innenraum luft im Rahmen der Bauprodukten Zulassung steht momentan in intensi ver Diskussion.

7.4.1.2 VORÜBERLEGUNGEN ZUR GE RUCHSBEGEHUNG

Bei der Frage nach der Art des Geru ches tauscht sich der Geruchsexperte zunächst mit den beteiligten Personen im Vorfeld über das Störpotenzial und das räumliche Auftreten aus (z. B. Geruchsprotokolle und Baupläne anfordern). Er muss sich aber immer darüber im Klaren sein, dass es sich um geruchliche Laien handelt, sie also Gerüche rein subjektiv beschreiben. Um nicht geruchlich voreingenommen zu sein, ist es sogar häufig besser, sich den Fehlgeruch nicht von Laien beschreiben zu lassen, sondern völlig neutral an die Bewertung heranzugehen. Bei der Zuordnung der räum lichen Einheit muss die Geruchsquelle

nicht im unmittelbaren Zusammen hang mit der Exposition stehen. Es kann also durchaus sein, dass der Geruch zwar im Raum bemerkt wird, die Quelle aber nicht unbedingt im Raum lokalisierbar ist.

7.4.1.3 BEWERTUNG VON VORAB GEGEBENEN AUSSAGEN

Vorab gegebene Aussagen sind, wie bereits erwähnt, unter Vorbehalt ein zuholen, da es sich um geruchliche Laien handelt, die Fehlgerüche nicht objektiv (Geruchsqualität und Inten sität) beschreiben können. Selbstver ständlich gibt es untrainierte Perso nen, die in der Lage sind, Gerüche sehr präzise zu beschreiben. In den meisten Fällen erhält man aber ein

ganzes Sammelsurium an unter schiedlichsten Beschreibungen, die je nach persönlicher Erfahrung diametral zueinander stehen können. Wenn kon krete geruchliche Beschreibungen gegeben werden, sollten also stets die Erfahrungen und Motive der Einzel person hinterfragt werden:

- Wie kommt sie zu der Einschät zung?
- Welche Erfahrungen hat sie mit dem Geruch oder ähnlichen Gerü chen früher gemacht?
- Steht sie evtl. negativ dem Gebäu de/Produkt gegenüber?
- Interessiert sie sich für Gerüche bzw. wie ist ihre geruchliche Wahr nehmung im Allgemeinen (z. B. Weinkenner oder Anosmiker)?

FALL 1: ANGENEHMER GERUCH AN FALSCHER STELLE

Nachdem die Ausstattung der Kli maanlage mit Aktivkohlefiltern nur bedingt eine Geruchsreduktion ergab und der Parfümgeruch plötz lich und unerwartet an unterschied lichen Stellen auftrat, schalteten die Betreiber einen Geruchsexperten ein.

Das Motiv war eine klare Beschwer desituation. Die betroffenen Par teien waren der Vermieter bzw. der Betreiber und die Kanzlei als Miete rin und Leidtragende. Für den Päch ter des darunterliegenden Ladenlo kals war mit dem Einbau der Filter in die Klimaanlage das Problem erle digt. Vorhergehende Emissionsmes sungen auf flüchtige organische Verbindungen (VOC) in der Kanzlei waren unauffällig. Der Ladenbetreiber verweigerte jedwede weitere Zusammenarbeit.

Das Ziel der Vor-Ort-Begehung lag zunächst in der geruchlichen Verifi zierung der partiell auftretenden Fehlgerüche. Die subjektiven Geruchsbeschreibungen waren, je nach befragter Person, nicht ein deutig dem Parfümspektrum zuzu ordnen. Des Weiteren sollte eine Quellenanalyse der potenziell vielen Einzelquellen erfolgen. Da der Ein trag von außen und von der angren zenden Einheit stammte, wurde bereits im Vorfeld besprochen, dass die Kanzlei alleinig nicht Gegen stand der Begehung sein konnte. Die Quellenermittlung musste auf

die angrenzenden Bereiche (Klima schächte, Dach, Treppenhaus, andere Mieteinheiten) und den Außenbereich erweitert werden.

Die Schwierigkeit des Falls lag darin, dass das Ladenlokal nicht betreten werden durfte, wodurch ein wichtiger Baustein fehlte.

FALL 2: INTENSIVER UNANGENEHMER GERUCH

Die beteiligten Parteien waren der Betreiber der Wohnanlage, der Eigentümer der Wohnung, die bau ausführende Firma und die Bau sachverständigen. Das Motiv lag objektiv in der Eliminierung des Geruchs, um die Wohnung in einen vermietbaren Zustand zu bringen. Alle beteiligten Parteien waren bereit, aktiv an den Maßnahmen zur Geruchsreduktion mitzuwirken.

Das Ziel war zweistufig. Primär war die Quelle zu ermitteln. Es wurde bereits schon im Vorfeld bespro chen, die einzuleitenden Maßnah men komplett zu begleiten, um die Wirksamkeit der Maßnahmen festzu stellen und ggf. noch weitere Maß nahmen anzuschließen. Das verein barte, finale Ziel war eine völlige Fehlgeruchseliminierung, beschei nigt durch den Geruchsexperten.

Die Schwierigkeit in diesem Fall lag in dem unabwägbaren Faktor, wie viele Maßnahmen aneinandergereiht werden müssten, damit kein Fehlgeruch mehr wahrzunehmen ist.

- Hält sie sich in einem belastenden Umfeld auf, das die Geruchswahrnehmung verfälschen kann (Arbeit mit Lösungsmittel, Raucher, Liebhaber von Raumbedeufung)?

7.4.1.4 RECHERCHE DER STANDORT-, BAU- UND NUTZUNGSSITUATION

Alle verfügbaren Unterlagen und Informationen zu dem Gebäude, dessen Standort und Nutzung sind im Vorfeld einzuholen. Dazu gehören u. a. Baupläne, Materialien, Leitungs- und Klimatisierungspläne, frühere Gutachten, Bescheide und Analysen, Technische Merkblätter, frühere Schädigungen, versteckte Materialien und Schächte, aktuelle und frühere Nutzung, Betriebsstoffe, betroffene Personengruppen. Je nach Beschwerdesituation sollte für geruchliche Schadensfallanalysen auch das weitere Umfeld, wie Industrieanlagen in der Nähe, Verkehrssituation oder ländliche Umgebung, mit in Betracht gezogen werden, um den potenziellen Einfluss der Außenluft mit zu erfassen.

7.4.2 PROBENAHME-PLANUNG UND LABORANALYTIK

Der Umfang und die Art einer potenziellen Probenahme nach DIN ISO 16000-6 (2012) und DIN EN 16516 (2015) mit anschließender sensorischer Laboranalytik (gemäß Burdack-Freitag et al. 2016) sollte im Vorfeld mit dem Auftraggeber abgestimmt werden. Wenn bereits klassische Emissionsmessungen vorgeschaltet wurden oder eine reine Quellenermittlung vorliegt, ist eine weitere Laboranalyse oftmals nicht notwendig. Die Begehung kann auch nach DIN ISO 16000-30 (2015) durch ein sensorisches Panel im Labor unterstützt werden. Die Raumluftprobenahme erfolgt dann in Probenahme-Beuteln. Diese werden anschließend im Labor durch das geschulte Panel bewertet.

7.4.3 VOR-ORT-BEGEHUNG

Die Vor-Ort-Begehung stellt im Prinzip eine Sammelaktion aller relevanten Fakten dar. Bevor der Prüfer startet, muss er sich überlegen, welches Equipment er mitzuführen hat und welche Personen vor Ort benötigt werden. Auch wenn der wichtigste Sensor bei der geruchlichen Schadensfallanalyse die trainierte menschliche Nase ist, so werden gelegentlich einige Geräte benötigt, um die Quellenanalyse zu unterstützen (z. B. Kamera, Temperatur-/Feuchtemess-

gerät, Strömungsmesser, Probenahme-Beutel). Welche Geräte das im Detail sind, liegt im Ermessen und in der Erfahrung des Prüfers.

Die Begehung muss stets unter den Aspekten Nachvollziehbarkeit, Objektivität und Relevanz für den Fehlgeruch erfolgen. Dies lässt sich durch eine präzise und kontinuierliche Dokumentation der begangenen Wege, begutachteten Bereiche, Dimensionen und Bauteile, Zuordnung der Bauteilbeziehungen (z. B. Verbindungswege der Klimatisierung, Nachbarbereiche), der klimatischen Bedingungen vor

Ort, der räumlichen Besonderheiten (z. B. geöffnete Fenster, Pflanzen, Nutzungszustand), eingesetzten Geräte und Hilfsmittel und der befragten und begleitenden Personen (Name, Funktion, Bezug zur Fragestellung/Beschwerde) bewerkstelligen. Eine systematische Fotodokumentation unterstützt eine spätere Zuordnung und bekräftigt die Erkenntnisse im Bericht.

Der Prüfer muss Neutralität gegenüber dem Geruch und den betroffenen Personen wahren. Er sollte die zu bewertenden Bereiche zunächst allei-

FALL 1: ANGENEHMER GERUCH AN FALSCHER STELLE

Mit Ausnahme des darunterliegenden Ladenlokals lagen für alle relevanten Räume die notwendigen Unterlagen zu Klimatisierung, Bauausführung und Raumaufteilung vor. Einzelne Personen der Kanzlei wurden zudem über die verschiedenen Geruchsexpositionen (betroffene Bereiche, Geruchsqualität unter Vorbehalt und Störpotenzial) befragt. Die Begehung folgte zunächst unter der Prämisse, die Bereiche der Geruchsemissionen in den Bauplänen zu skizzieren und die Luftströmungen nachzuvollziehen. Der Haustechniker unterstützte mit Feuerzeug und Räucherstäbchen. Danach wurden die Kanzlei und alle angrenzenden Einheiten systematisch Bereich für Bereich begangen, alle geruchsaktiven Luft-Leckagen gesondert aufgespürt, markiert und im Anschluss noch einmal einzeln geruchlich bewertet.

FALL 2: INTENSIVER UNANGENEHMER GERUCH

Alle notwendigen Dokumente und vorhergehenden Protokolle zu bereits erfolgten Maßnahmen durch den Bausachverständigen lagen vollständig vor. In diesem Fall wurde auch labortechnisches Equipment für eine potenzielle Probenahme und anschließende Analyse im Labor mit vorbereitet.

Die Wohnung lag zwischen mehreren Nutzungseinheiten und wies eine bauliche Besonderheit auf: Sie umfasste zwei Etagen. Die Außenfassade grenzte teilweise an einen

weiteren Gebäudetrakt, so dass die Fenster der oberen Etage zum Dach des angrenzenden Gebäudes orientiert waren. Das Dach lag ca. 1 m unterhalb der Fensterbrüstung. Ein Großteil der Wohnung hatte somit eine großflächige, innenliegende Wand zum Nachbargebäude. Unter der Wohnung befanden sich Keller- und Technikräume.

Vor der Begehung wurde die Anweisung gegeben, dass die Wohnung mehrere Stunden zuvor nicht mehr betreten werden durfte und dass sie leer und verschlossen sein musste. Sie wurde zunächst durch den Geruchsexperten alleine betreten, um störende Einflüsse von anderen Personen, Fluktuation und Verdünnung durch Außenluft auszuschließen.

Der erste Eindruck beim Öffnen der Türe war ein extrem intensiver, fischartiger Geruch. Bei der Begehung in der Wohnung trat im Lauf der Zeit tatsächlich ein Gewöhnungseffekt auf. Bei Bedarf bestand die Möglichkeit, an die Frischluft zu gehen, um die Geruchswahrnehmung wieder zu neutralisieren. Während dieser ersten Begehung wurden alle Räume, Fenster, Installationen (z. B. Revisionsschächte, Steckdosen, Schalter) und Innenraumwände intensiv geruchlich bewertet. Die Verteilung des Geruchs (v. a. Stellen mit intensiven Emissionen) in den einzelnen Räumen wurde im Bauplan skizziert. Erst danach wurde mit den betroffenen Parteien über die Geruchsentwicklung und -verteilung beraten.

ne betreten, um die Qualität des Geruchs, dessen Quellen und Störpotenzial unbeeinflusst beurteilen zu können. Erst nachdem er sich ein unabhängiges Bild über den Geruch gemacht hat, sollte er seinen Eindruck den beteiligten Personen mitteilen und sich deren Wahrnehmung einholen. Nicht selten tritt nach der fachgerechten Beschreibung ein überraschendes Erkennen des gesuchten, zuvor unbekanntes Geruches bei den Begleitpersonen ein.

Da es keinen Bereich gibt, der nicht einen marginalen Eigengeruch aufweist (bestenfalls können Bereiche als neutral oder unauffällig definiert werden), empfiehlt es sich, diese unauffälligen Bereiche gesondert im Prüfbericht auszuweisen. Damit wird eine vollständige Begehung und der Ausschluss von nicht relevanten Aspekten dokumentiert.

7.4.4 BEWERTUNG

7.4.4.1 GRUNDSÄTZE

Bei der eigentlichen Bewertung selbst sind relevante, aktuelle Regelwerke (Normen, Verordnungen und wissenschaftliche Erkenntnisse) mit einzubeziehen. Die Auswahl der Bewertungsskalen muss begründet werden.

Im weitesten Sinne fallen Gerüche in die Kategorie der Schadstoffe. Diese werden in erster Linie entsprechend ihres Gefährdungspotenzials klassifiziert. Dementsprechend sind je nach zu untersuchendem Bereich unterschiedliche Gesetzesgrundlagen zu berücksichtigen (z. B. Chemikaliengesetz, Arbeitsschutzgesetz, Abfallwirtschaftsgesetz etc.). Sinnvoll ist die Ermittlung von Gerüchen erst nach begründetem Ausschluss potenziell toxikologisch relevanter Faktoren (z. B. VOC, Mikroorganismen, Radon). In der Norm zur Schadstoff-Erkundung ISO 16000-32 (2014) betreffen sie den gesondert ausgewiesenen Bereich der negativen Einflussfaktoren auf die menschliche Gesundheit und das Wohlbefinden.

7.4.4.2 QUELLENANALYSE

Bei der Quellenanalyse gibt es keine hierarchische Ursache-Wirkungs-Beziehung, sondern es spielen viele Faktoren eine Rolle.

7.4.4.2.1 PRIMÄRER ODER SEKUNDÄRER GERUCHSSTOFF

Ein Primärschadstoff/-geruchsstoff wird direkt von der „Schadstoffquelle“ freigesetzt. Die Zusammensetzung des Baumaterials selbst ist die Ursache für die Geruchsstoffemission. Wird dieser Begriff auf die Luftdichtheit erweitert, so ist zu ermitteln, ob hinter einer Undichtigkeit ein für den Inspektor nicht sichtbares, emittierendes Bauprodukt vorhanden sein kann.

Sekundäre Geruchsstoffe entstehen durch Übertritte in andere Bauteile oder Bauwerksabschnitte. Dies umfasst auch chemische Reaktionen von Primärgeruchsstoffen an Oberflächen oder mit Stoffen in der Luft (z. B. Ozon) – definiert in DIN EN ISO 16000-32 (2014) und GreenFacts (2001-2016). Sekundärgeruchsstoffe können bei der Ermittlung der Herkunft von Geruchsemissionen durch Luftdichtheitsproblematiken zu Fehleinschätzungen führen, und zwar genau dann, wenn der ursprüngliche, diffuse Geruchseintrag durch eine Leckage das Bauprodukt kontaminiert. Nicht selten emittieren solchermaßen kontaminierte Bauprodukte den Geruchsstoff wesentlich dominanter als die Leckage, da sie die Gerüche massiv anreichern können. Das Bauprodukt wird somit irrtümlich als Primärquelle definiert und ausgetauscht. Die eigentliche Quelle bleibt unentdeckt und gibt weiterhin kontinuierlich ihre Geruchsemissionen ab.

7.4.4.2.2 VORÜBERGEHENDER ODER KONTINUIERLICHER GERUCHSSTOFFEINTRAG

Bei kontinuierlichen Einträgen wird von einer Dauerauspostion der Nutzer ausgegangen, deren Quelle behoben werden muss.

Vorübergehende Belastungen und Emissionen entstehen durch die akute Nutzung oder Aktivitäten, wie Entsorgung, Malerarbeiten oder Nutzung der Sanitäranlagen. Sie können auch bei akuten Vorfällen auftreten, wie Wetterumschwüngen, Klimaanlagenschwankungen durch technische Umstellungen oder zeitgesteuerten Vorgängen (DIN EN ISO 16000-32 2014). Derartige Einträge sind meistens von kurzer Dauer und verschwinden mit der Zeit. Der Ratschlag an den Nutzer lautet hier üblicherweise, genügend manuell zu lüften und Geduld aufzubringen. Sie müssen allerdings dann berücksichtig

werden, wenn es sich nicht nur um einen einmaligen Vorfall handelt, sondern wenn zu erwarten ist, dass diese Zustände in unregelmäßigen (diskontinuierlichen) Abständen wieder auftreten können.

7.4.4.2.3 DIFFUSE ODER KLAR LOKALISIERBARE QUELLEN

Für Geruchsemissionen sind diffuse Quellen ein sehr großes Problem (Definition „diffuse Quelle/diffuse Emission“ siehe United Nations (2008)). Eine einzelne Quelle kann vom Geruchseintrag her schwach sein. Erst die Summe der Vielzahl an Quellen und der einzelnen marginalen Einträge führt zu einer deutlichen Geruchswahrnehmung. Sofern keine Adsorption von Geruchsstoffen an Oberflächen stattfindet, stellen diffuse Quellen/Leckagen in Form von porösen Wänden (z. B. Porenbeton, Leichtbauwände, Holzvertäfelungen) für Geruchsstoffe auch kein wirksames Hindernis dar. Hier reicht allein das Diffusionsvermögen der Geruchsstoffe aus, um diese Bauteile zu durchdringen.

Das klar lokalisierbare Gegenstück dazu wird als Punktquelle bezeichnet. Damit sind große lokale Quellen gemeint. Die Beurteilung, was im Falle von Geruchseinträgen als „groß“ zu bezeichnen ist, hängt von der Natur des Geruchs, der Konzentration, der Dauer des Eintrages, von der Leckgröße und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft durch die Quelle ab. Eine eindeutig sichtbare Öffnung (z. B. ein Sanitärrohr von 10 cm Ø), durch die ein deutlich wahrnehmbarer Geruch strömt, ist auch für einen sensorischen Laien zu erkennen. Wohingegen ein kleiner Riss, der versehentlich mit einem Cutter in die Dampfbremse geritzt wurde, oder ein nicht sauber abgedichtetes Leerrohr einer Steckdose nicht so ohne weiteres als Geruchsquelle erkannt werden würde. Eine solch minimale oder versteckte Leckage spielt dann eine Rolle, wenn der Geruch wirksam genug ist, um einen störenden Geruchseindruck auszulösen (Grosch 1993).

7.4.4.2.4 BETRIEBS- ODER NUTZUNGSBEDINGTER GERUCHSSTOFF

Betriebsbedingte Geruchsstoffe entstammen dem Unterhalt und Betrieb eines Bauwerks oder einer Produktionsstätte – DIN EN ISO 16000-32 (2014). Dies umfasst im nicht

industriellen Sektor die Klimatisierung/Heizung, Instandhaltung (z. B. Reinigung, Desinfektion, Abfallentsorgung), Einrichtungsgegenstände (z. B. Drucker, Mobiliar, Pflanzen), Sanitärbereich und Küche. Im industriellen Bereich sind die Emissionen der Produktionsprozesse und deren Infrastruktur zu beachten (z. B. Rohre, Steuerung, Klimatisierung, Entsorgung).

Nutzungsbedingte Geruchsstoffe erweitern die betriebsbedingten Einträge durch den unmittelbaren Bezug zum menschlichen Handeln. Dies können sowohl der unangenehme Geruch in Meeting-Räumen durch zu geringen Luftaustausch, die Beduftung von Räumen, Modergerüche durch zu viel Feuchtigkeit als auch das Nichtbeachten von Betriebsvorschriften sein, wie beispielsweise das Lüftungsverhalten in Produktionsstätten.

7.4.4.2.5 GEOGENER, ANTHROPOGENER ODER BIOLOGISCH BEDINGTER GERUCHSSTOFF

Für Leckagen ist die Unterscheidung geogener, anthropogener oder biogener Einflüsse im Hinblick auf die späteren Maßnahmen und die mit einzubeziehenden Parteien relevant. Anthropogene und biogene Einflüsse können durch bauliche, hygienische oder regulatorische Maßnahmen abgestellt werden. Geogene Einflüsse benötigen das Miteinbeziehen von Sachverständigen aus Landschafts- und Umweltschutz oder der Geologie (Aneja 1990, Hellmann 2001, Król et al. 2010, Grün et al. 2013).

7.4.4.2.6 UMGEBUNGSBEDINGTER GERUCHSSTOFF (INNEN/AUSSEN)

Die für die Quellenermittlung von Luft-Leckagen wichtigste Fragestellung liegt in der Unterscheidung einer innen- oder außenliegenden Quelle, da dies Art und Ausmaß der einzuleitenden Maßnahmen wesentlich mitbestimmt. Typische unerwünschte Außenquellen sind landwirtschaftliche Betriebe, Industrieanlagen, Verkehr, Deponien, Kläranlagen und lebensmittelproduzierendes Gewerbe. Gegen außenliegende Quellen sind nur Abdichtungsmaßnahmen und Filter wirksam. Eine Entfernung der Quelle ist nicht möglich.

Liegt die Quelle im Innenbereich eines Gebäudes, so ist zu untersuchen, ob

FALL 1: ANGENEHMER GERUCH AN FALSCHER STELLE

Die ursprüngliche Quelle des Parfümgeruchs, das unter der Kanzlei liegende Ladenlokal, konnte nicht mehr zur Ursachenbehebung herangezogen werden. Daher mussten alle potenziellen Leckagen, die ein Einströmen des Geruchs in die Kanzlei ermöglichen konnten, gefunden werden.

In diesem Fall stellte sich die Lüftungsregelung in der Kanzlei als Hauptursache heraus. Die Zuluftführung war dergestalt ausgelegt, dass es einen zentralen Einlass in die Kanzlei gab, von dem aus viele Nebenstränge in die einzelnen Räume abzweigten. Innerhalb der Räume verteilte sich die Zuluft über Klimadecken in den Raum. Oberhalb der Türen befanden sich die Auslässe für die Abluft. Die Strömungen sollten sich theoretisch so verteilen, dass die Räume von oben laminar belüftet wurden und erst dann der Abzug erfolgte. Je näher ein Raum an der zentralen Zuluft lag, umso besser funktionierte das System. In den weiter entfernten Räumen brach die Frischluft-Versorgung ab. Durch den Sog der Abluft wurde Fehlluft, die mit dem Parfümgeruch angereichert war, aus allen denkbaren internen und externen Lecks (Schächte, undichte Fensterschließfugen, Türschlitze) gesaugt. Über interne Lecks in Revisionschächten wurde der Parfümgeruch kontinuierlich in die Innenräume angesaugt. Der Fehlgeruch verteilte sich jedoch nicht nur durch die Schächte, sondern auch über die Außenluft. Sobald die Tür des Ladengeschäfts geöffnet wurde, strömte der Geruch an der Fassade nach oben und konnte über Lecks in den Fenstern angesaugt werden. Gerade wegen der unregelmäßigen Öffnung der Ladentüren trat der Geruch diskontinuierlich in den darüberliegenden Räumen auf.

FALL 2: INTENSIVER UNANGENEHMER GERUCH

Der fischartige Geruch verteilte sich in der Wohnung unterschiedlich stark. In den Räumen konnten gewisse Zonen mit intensiver Geruchsentwicklung lokalisiert wer-

den. Sie lagen allesamt entlang der Wand zu dem angrenzenden Gebäudetrakt. Die gesamte Oberfläche der Wand roch extrem stark, aber auch einige in ihr eingebaute Schalter und Steckdosen verströmten den Geruch. Je weiter man sich von dieser Wand entfernte, umso schwächer wurde der Geruch. Die weiter entfernt befindlichen Steckdosen und Schächte wiesen keinen Fehlgeruch auf.

Eine geruchlich untrainierte Person hätte dem Fehlurteil aufliegen können, die kontaminierte Wand wäre die eigentliche Quelle. Tatsächlich wurde die Wand erst im Laufe der Expositionszeit durch die eigentliche Quelle kontaminiert und stellte eine Sekundärquelle dar.

Als Primärquelle erwiesen sich nicht abgedichtete Steckdosen in der Wand, aus denen der fischartige Geruch dauerhaft ausströmte. Nach intensiver Beratung mit der bauausführenden Firma wurde das Dach des angrenzenden Gebäudes begangen. Am Anschluss unterhalb der Fenster sollte eine Abdeckung angebracht werden. Dies war zum Zeitpunkt der Begehung noch nicht erfolgt. Zwischen den beiden Gebäuden befand sich eine ca. 30 cm breite, mehrere Meter hohe Bauteilfuge, die mit Mineralwolle gedämmt war. Durch die fehlende Abdeckung regnete es in die Mineralwolle hinein. Sie wurde bis in die Tiefe durchnässt. Die Melaminharze der Mineralwolle hydrolysierten teilweise durch die Feuchtigkeit und setzten fischartig riechende Amine frei. Dies wurde in einer anschließenden Laboruntersuchung an einer entnommenen, feuchten Mineralwolle-Probe aus der Fuge bestätigt.

Die Ursache war somit die durchfeuchtete Mineralwolle, die die fischartigen Gerüche freisetzte. In die Wohnung gelangten diese dann durch nicht abgedichtete Leerrohre für Schalter und Steckdosen und kontaminierten kontinuierlich die innenliegende Wand. Die tatsächliche Kontamination entstand aus einer Kettenreaktion mehrerer baulicher Fehler.

es sich um eine unmittelbar im Nahbereich der Geruchsexposition befindliche Quelle handelt oder ob angrenzende Räume und Installationen für die geruchliche Beeinträchtigung verantwortlich sind. Hier können unerwünschte Strömungen aus Klimaschächten, Leerrohren, Fugen oder auch durch den Sog von Aufzügen für die Geruchsverteilung verantwortlich sein. Typische Quellen, die durch interne Luft-Leckagen auf angrenzende Bereiche übergreifen können, sind beispielsweise modrige Keller, unhygienische Zustände in Nachbarwohnungen, Sanitär-Entlüftungsrohre oder Müllschächte. Bei internen Quellen stehen sowohl Abdichtungsmaßnahmen und der Einbau von Filtern zur Disposition als auch die Entfernung der Quelle (Younes et al. 2011, BayLfU 2015).

7.5 EMPFEHLUNGEN FÜR WEITERE MASSNAHMEN

Sofern alle beteiligten Parteien an einer Problemlösung unter dem Aspekt der Minderung des Fehlgeruchs interessiert sind, können Maßnahmen zur Reduktion des Geruchseintrags diskutiert werden. Im Prinzip sind hier dieselben Maßnahmen

gefragt, die für den Eintrag von gesundheitlich relevanten VOC empfohlen werden. Im optimalen Fall wäre dies das Entfernen der Geruchsquelle. Ist dies nicht möglich, so muss der Geruch isoliert oder soweit verdünnt werden, dass er nicht mehr stört. Dies kann durch Sanierungsmaßnahmen, Nutzungs- und Verhaltensänderungen, Abdichtungen oder Klimatisierungs- und Filtermaßnahmen erfolgen. Hier ist eine Zusammenarbeit mit weiteren Experten (z. B. Umweltbiologen, Haustechniker, Bauplaner) anzustreben, um durch regen Austausch die bestmögliche Geruchsreduktion (bei vertretbarem Aufwand) zu erreichen.

7.6 ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT FÜR DIE BAUPRAXIS

Ein Fehlgeruchseintrag durch eine Luft-Leckage hängt von **drei wesentlichen Faktoren** ab. Der **erste Faktor** liegt in der Natur des Geruchs selbst. Dieser ist bestimmt durch

- die Intensität: im weitesten Sinne das Verhältnis Konzentration zu Geruchsschwelle,
- die Geruchsqualität: z. B. natürlicher oder synthetischer Geruch, Brandgeruch, Geruch an unerwünschter Stelle,

- die Hedonik: angenehmer oder unangenehmer Geruch.

Der Mensch stellt den **zweiten Faktor** dar. Die Bewertung kann sehr individuell sein und hängt von verschiedenen psychologischen, physiologischen und kulturellen Prägungen ab. Die Stärke eines sensorisch trainierten Geruchsexperten liegt in der emotionalen Distanz zu dem Geruch, der Fähigkeit, einen Geruch zu beschreiben („Geruchsvokabular“), und den gelernten Strategien, um Adaption zu verringern und eine Quellenermittlung zielgerichtet vorzunehmen.

Der **dritte Faktor** liegt in der Leckage selbst. Eine Leckage ist dann als groß zu betrachten, wenn der durch sie strömende Geruch potent genug ist, den Innenraum geruchlich zu kontaminieren. Dies ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, der Größe und Anzahl der Lecks, dem Verhältnis von Konzentration zu Geruchsschwelle des einzelnen Geruchsstoffs, der Häufigkeit bzw. Kontinuität des Eintrags und der Verteilung im Raum (wird der Geruchsstoff abgetragen oder reichert er sich an).

Eine proaktive Beurteilung einer Leckage auf einen potenziellen Geruchseintrag ist faktisch kaum möglich, da nicht die Leckage an sich die Quelle eines Fehlgeruchs ist, sondern stets der nicht offensichtliche Hintergrund (z. B. kontaminiertes Bauprodukt).

Anders liegt der Fall, wenn während der Bauplanung „Geruchs-Leckagen“ absehbar sind (z. B. Türschlitze, Kabelschächte, Lüftungskanäle). Der Bauplaner sollte sich hier im Vorfeld Gedanken machen, ob ein potenzieller Geruchseintrag durch Nebenräume, Außenluft oder geruchsintensive Tätigkeiten möglich sein kann. Angrenzende Einheiten sind bei der Planung zu berücksichtigen.

Die baubegleitende Überwachung ist ein guter Zeitpunkt, um sich der Fehlgeruchsproblematik bewusst zu werden und ein gesondertes Augenmerk auf mögliche geruchliche Beeinträchtigungen zu legen. Geruchsmindernde Maßnahmen können zu dieser frühen Phase noch mit relativ geringem Aufwand durchgeführt werden. Spä-

FALL 1: ANGENEHMER GERUCH AN FALSCHER STELLE

Zusammen mit den technischen Experten wurden weitere Maßnahmen besprochen, ausgeführt und deren Wirksamkeit in einer finalen Begehung überprüft. Die Strömungen der Lüftungsanlage wurden überprüft und neu eingeregelt. Die Schächte wurden abgedichtet und undichte Fensterdichtungen ausgetauscht. Alle Maßnahmen zusammen ergaben eine deutliche Reduktion des Störpotenzials, so dass alle betroffenen Parteien zufrieden waren.

FALL 2: INTENSIVER UNANGENEHMER GERUCH

Auch hier waren alle beteiligten Parteien intensiv an einer Lösung interessiert. Es fanden regelmäßige Treffen zum Fortschritt der Sanierung statt. Der gesamte Prozess bis zum Abschluss des Falls dauerte über ein Jahr.

Die Mineralwolle-Dämmung konnte nicht mehr entfernt werden, da sie sich über mehrere Meter erstreckte. Daher wurden in die Wand von Seiten der Kellerräume und des angrenzenden Gebäudes, welches noch nicht ausgebaut war, Kernbohrungen zur Bauteilfuge vorgenommen und Trockner angeschlossen. Die Dämmung wurde über mehrere Wochen bis zur vollständigen Trockenheit getrocknet. In der Zwischenzeit wurden die fehlende Abdeckung am Dach angebracht und alle nicht abgedichteten Leerrohre in der kontaminierten Wand verschlossen. Nach Abdichten der Leckagen zur Wohnung wurde die Wand abgeschliffen und neu verputzt. Eine weitere Kontamination der Wand trat danach nicht mehr auf. Alle Maßnahmen wurden regelmäßig durch zwischenzeitliche Begehungen begleitet, um den Fortschritt zu dokumentieren und final die Wohnung als geruchlos zu übergeben.

tere Fehlgeruchsschäden, die nach Einzug auftreten, ziehen immer ein ganzes Bündel von Beschwerden, Fehlkommunikation und aufwendigen nachträglichen Sanierungen nach sich.

Die Schwierigkeit für den Baupraktiker liegt somit nicht in der Feststellung einer offensichtlichen Leckage. Aus seiner Erfahrung kann er schon wesentliche Erkenntnisse ableiten. Die Lokalisierung von diffusen, kleinen Leckage und von nicht offensichtlich nachvollziehbaren Emissionswegen/Strömungspfaden stellt die große Herausforderung dar. In solchen Fällen sollte frühzeitig ein geruchlich geschulter Experte hinzugezogen werden, um nicht zielführenden Aktionismus zu verhindern.

7.7 LITERATURVERZEICHNIS

- Acree, T., Arn, H. (2004): Flavornet and human odor space, <http://www.flavornet.org/flavornet.html>, 2016-07-22.
- Amoores, J. E. (1970): Molecular Basis of Odor, Springfield (USA), Charles C. Thomas.
- Aneja, Viney P. (1990): Natural Sulfur Emissions into the Atmosphere. In: Journal of the Air & Waste Management Association, 40, 4, 469-476.
- Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute e. V. (AGÖF 2013): Gerüche in Innenräumen – Sensorische Bestimmung und Bewertung, Springe-Eldagsen, 25.09.2013.
- Ausschuss zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten (AgBB 2015): Vorgehensweise bei der gesundheitlichen Bewertung der Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, VOC und SVOC) aus Bauprodukten, 02/2015.
- Axel, R. (2005): Geruch und Empfindung: eine molekulare Logik der olfaktorischen Wahrnehmung (Nobel-Vortrag). In: Angewandte Chemie, 117, 6264-6297.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (BayLfU 2015): UmweltWissen – Schadstoffe – Gerüche und Geruchsbelästigung, Augsburg, Neufassung, 08/2015.
- Buck, L. B. (2005): Die Aufklärung des Geruchssinns (Nobel-Vortrag). In: Angewandte Chemie, 117, 6283-6296.
- Burdack-Freitag, A., Heinlein, A., Mayer, F. (2016): Material Odor Emissions and Indoor Air Quality. In: Büttner, Andrea: Springer Handbook of Odor, Berlin, Heidelberg Springer-Verlag, 563-581.
- BVL L 00.90-13 (2004): Untersuchung von Lebensmitteln – Sensorische Prüfverfahren – Intensitätsprüfung (Übernahme der gleichnamigen Norm DIN 10966, Ausgabe Dezember 1997), Normenausschuss Lebensmittel und landwirtschaftliche Produkte (NAL) im DIN.
- Dalton, P. (1996): Odor Perception and Beliefs about Risk. In: Chemical Senses, 21, 447-458.
- Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt 2010): Grundsätze zur gesundheitlichen Bewertung von Bauprodukten in Innenräumen. In: DIBt Mitteilungen, 5/2010.
- DIN EN ISO 13299 (2016): Sensorische Analyse – Prüfverfahren – Allgemeiner Leitfaden zur Erstellung eines sensorischen Profils, Normenausschuss Lebensmittel und landwirtschaftliche Produkte (NAL) im DIN, 2016-03. Berlin: Beuth.
- DIN EN 13725 (2003): Luftbeschaffenheit – Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie, Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN – Normenausschuss, 2003-07. Berlin: Beuth.
- DIN EN 16516 (2015): Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Bestimmung von Emissionen in die Innenraumluft, DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, 2015-07. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 16000-32 (2014): Innenraumluftverunreinigungen – Teil 32: Untersuchung von Gebäuden auf Schadstoffe und andere schädliche Faktoren – Erkundung, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, 2014-10. Berlin: Beuth.
- DIN ISO 16000-6 (2012): Innenraumluftverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf Tenax TA®, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, 2012-11. Berlin: Beuth.
- DIN ISO 16000-28 (2012): Innenraumluftverunreinigungen – Teil 28: Bestimmung der Geruchsstoffemissionen aus Bauprodukten mit einer Emissionsprüfkammer, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, 2012-12. Berlin: Beuth.
- DIN ISO 16000-30 (2015): Innenraumluftverunreinigungen – Teil 30: Sensorische Prüfung der Innenraumluft, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, 2015-05. Berlin: Beuth.
- E DIN ISO 12219-7 (2015): Innenraumluft von Straßenfahrzeugen – Teil 7: Geruchsbestimmung in der Innenraumluft von Straßenfahrzeugen und der Emissionsprüfkammerluft von Bestandteilen der Innenausstattung durch olfaktorische Messungen, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, Normenausschuss Automobiltechnik (NA Automobil) im DIN, 2015-12. Berlin: Beuth.
- Edwards, M. (2016): The Fragrance Wheel, <http://www.fragrancesoftheworld.com/fragrancewheel.aspx>, 2016-07-22.
- GreenFacts (2001-2016): Primär- und Sekundärschadstoffe, <http://www.greenfacts.org/de/glossar/pqrs/primaerschadstoffsekundaerschadstoff.htm>, 2016-07-22.
- Grosch, W. (1993): Detection of potent odorants in food by aroma extract dilution analysis. In: Trends in Food Science & Technology, 4, 68-73.
- Grün, L., Kaester, Ch., Wiesmüller, G. A. (2013): MVOC-Vergleichbarkeit und Aussagekraft von Messungen. In: Wiesmüller, G. A., Heinzow, B., Herr, C. E. W.: Gesundheitsrisiko Schimmelpilze im Innenraum. E - Risiko Geruchswirkung und Befindlichkeitsstörung, 293-306. Heidelberg: Verlag ecomed-storck.
- Hatt, H. (2013): Geruch. In: Schmidt, Robert F.: Neuro- und Sinnesphysiologie. 3. korrigierte Auflage, 357-368. Berlin: Springer-Verlag.
- Hellmann, H. (2001): Definition der Hintergrund- bzw. Background-Konzentration – eine Übersicht. In: Acta hydrochimica et hydrobiologica, 29, 6-7, 391-398.

- Jiang, J., Coffey, P., Toohy, B. (2006): Improvement of Odor Intensity Measurement Using Dynamic Olfactometry. In: Journal of the Air & Waste Management Association, 56, 675-683.
- Klages, W., Klages, I. (1964): Zur Psychologie und Psychopathologie des Geruchssinnes. In: Archiv für Psychiatrie und Zeitschrift für die ges. Neurologie, 205, 37-48.
- Król, S., Zabiegała, B., Namieśnik, J. (2010): Monitoring VOCs in atmospheric air I. On-line gas analyzers. In: Trends in Analytical Chemistry, 29, 9, 1092-1100.
- Meilgaard, M. C., Reid, D. S., Wyborski, K. A. (1982): Reference Standards for Beer Flavor Terminology System 1. In: American Society of Brewing Chemists, 40, 4, 119-128.
- Miyazawa, T., Gallagher, M., Preti, G., Wise, P. M. (2008): Synergistic Mixture Interaction in Detection of Perithreshold Odors by Humans. In: Chemical Senses, 33, 363-369.
- Nobel, A. C., Arnold, R. A., Buechsestein, J., Leach, E. J., Schmidt, J. O., Stern, P. M. (1987): Modification of standardized system of wine aroma terminology. In: American Journal of Enology and Viticulture, 38, 143-146.
- Ohloff, G. (1996): Irdische Düfte, Himmlische Lust. Eine Kulturgeschichte der Duftstoffe, 11. Basel: Birkhäuser.
- Plattig, K.-H. (1987): Der Geruchssinn des Menschen. In: Physik in unserer Zeit, 18, 5, 146-158.
- Umweltbundesamt (UBA 2014a): Bekanntmachung des Umweltbundesamtes: Gesundheitlich-hygienische Beurteilung von Geruchsstoffen in der Innenraumluft mithilfe von Geruchsleitwerten, Entwurf der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumluftthygiene und der obersten Landesgesundheitsbehörden zur öffentlichen Diskussion bis Ende Dezember 2015. In: Bundesgesundheitsblatt 57, 148-153.
- Umweltbundesamt (UBA 2014b): Ringversuch zur Einführung der Geruchsmessung nach DIN ISO 16000-28 in die Bewertung von Bauprodukten. In: UBA-Texte 88, Dessau-Roßlau, 01/2014.
- United Nations (2008): Guidance on Implementation of the Protocol on Pollutants Release and Transfer Register, New York, Geneva, Environment, Housing and Land Management Division, United Nations Economic Commission for Europe.
- van Gemert, L. J. (2011): Compilations of Odor Threshold Values in Air, Water, and other Media. 2. Auflage. Utrecht (NL): Oliemans Punter & Partners BV.
- VDA 270 (1992): Bestimmung des Geruchsverhaltens von Werkstoffen der Kraftfahrzeug-Innenausstattung, Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA).
- VDI 3882 Blatt 1 (1992): Olfaktometrie – Bestimmung der Geruchsintensität (bestätigt 2015-04), VDI-Kommission Reinhaltung der Luft.
- VDI 4302 Blatt 1 (2012): Geruchsprüfung von Innenraumluft und Emissionen aus Innenraummaterialien – Grundlagen, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, Fachbereich Umweltmesstechnik.
- Younes, C., Shdid, C. A., Bitsuamlak, G. (2011): Air infiltration through building envelopes: A review. In: Journal of Building Physics, 35, 3, 267-302.

AUTORIN



ANDREA BURDACK-FREITAG
DR. RER. NAT.

Sensorisch-chemische Analytikerin am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen/Valley mit umfassenden Kenntnissen in den Bereichen sensorischer Begehung vor Ort, geruchlicher Schadensfallanalyse und Quellenermittlung von Fehlgerüchen sowie Strukturaufklärung von Geruchsstoffen aus Bauprodukten, Innenräumen und technischen Materialien

8 Leckagebewertung bei Fenstern und Außentüren

Josef Schmid † und Michael Stiller

Fenster, Fenstertüren und Fensterwände sowie Außentüren, im Folgenden Fenster genannt, sind Teile der wärmeübertragenden Umfassungsfläche eines Gebäudes. Sie haben damit im Grundsatz, auch hinsichtlich der Dichtheit, die gleichen Anforderungen zu erfüllen wie die übrige Außenwand. Dabei ist zu beachten, dass die Dichtheit der Gebäudehülle nur eine von vielen Eigenschaften ist, welcher die Außenwand in ihrer Gesamtheit gerecht werden muss. Bei Fenstern sind planmäßige Luftdurchlässigkeit vorgesehen, welche sich aus der ursprünglichen Aufgabe zur Lüftung über die Fenster ableitet. Die Anforderungen an die Luftdurchlässigkeit von Fenstern wird in Abschnitt 4.12 von DIN 18055 (2014) geregelt (Tabelle 8.1). Die Luftdurchlässigkeit für Fenster muss nach DIN 4108-2 (2013) eingehalten werden. Danach gelten für Fenster, einschließlich Dachflächenfenster, folgende Anforderungen an die Fugendurchlässigkeit:

- bis zu 2 Vollgeschosse: Klasse 2 nach DIN EN 12207
- mehr als 2 Vollgeschosse: Klasse 3 nach DIN EN 12207

Als Luft-Leckagen kommen bei Fenstern Undichtigkeiten an den Anschlussfugen zur Wand, an Konstruktionsfugen und an Fugen der raumseitigen Glasabdichtung sowie zwischen Flügel und Blendrahmen in Betracht. DIN 18055 (2015) sieht die Luftdurchlässigkeit als planmäßigen Luftaustausch zwischen der Raum- und

Außenseite vor. Die Luftdurchlässigkeit ist als planmäßige Luft-Leckage zu bewerten.

8.1 EBENENMODELL

Ein Modell zum Erkennen der kritischen Punkte an Fenstern über die Konstruktionstiefe ist das Ebenenmodell (Schmid 1993), welches als Ordnungssystem für den Aufbau der Konstruktion und der Einordnung von drei Ebenen ausgeht (Bild 8.1):

- Ebene 1: Trennung zwischen Raum- und Außenklima
- Ebene 2: Funktionsbereich, z. B. Wärmeschutz
- Ebene 3: Wetterschutz

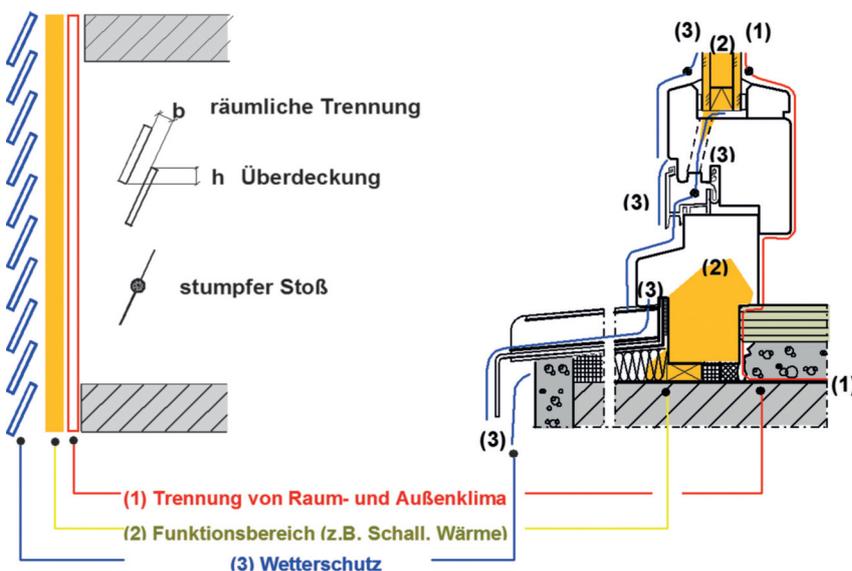


Bild 8.1: Ebenenmodell als Ordnungssystem für den Aufbau einer Fensterkonstruktion mit Zuordnung von Aufgaben zu den Ebenen 1 bis 3 (Schmid 1993)

8.1.1 TRENNUNG ZWISCHEN RAUM- UND AUSSENKLIMA (EBENE 1)

Die Trennung zwischen Raum- und Außenklima ist Dichtebene 1, d. h. die Ebene der Dichtheit gegenüber dem Luftdurchtritt von der Raumseite zur Außenseite. Die Trennung muss in einer Ebene erfolgen, deren Oberflächentemperatur über der Taupunkttemperatur des Raumklimas liegt. Die Dichtebene 1 liegt auf der raumseitigen Oberfläche der Gebäudehülle. Die Dichtebene 1 am Fenster muss mit der Dichtebene 1 der Außenwand eine geschlossene Fläche bilden. Die Dichtebene darf sowohl am Fenster als auch am Anschluss zur Außenwand nicht unterbrochen sein.

Tabelle 8.1: Auszug aus DIN 18055 (2014) – Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit

Nr.	Abschnitt	Eigenschaft/ Wert/Einheit	Klassifizierung/Wert				
			1	2	3	4	
14	4.14	Luftdurchlässigkeit					
		Max. Prüfdruck (Pa) Referenz-Luftdurchlässigkeit bei 100 Pa ((m³/hm) oder m³/(hm²))	NPD	(150 (50 oder 12,50))	(300 (27 oder 6,75))	(600 (9 oder 2,25))	(600 (3 oder 0,75))

Zur Vermeidung von Tauwasserbildung darf auch im Anschlussbereich zur Außenwand die Taupunkttemperatur auf der Raumseite nicht unterschritten werden. Die Führung dieser für die Gebrauchstauglichkeit notwendigen Dichtebene ist für den Bereich der ungestörten Außenwand leichter zu erkennen als beim Bauteil Fenster. Beim Fenster muss die Wahl der Konstruktion und die Lage des Fensters in der Außenwand in die Realisierung der Dichtebene mit einbezogen werden.

8.1.2 FUNKTIONSBEREICH (Z. B. WÄRMESCHUTZ – EBENE 2)

In diesem Bereich müssen insbesondere die Eigenschaften der Wärmedämmung und des Schallschutzes über einen angemessenen Nutzungszeitraum sichergestellt werden. Beim geschlossenen Fenster ist der Funktionsbereich (Falz, Glasfalz und Baukörperanschluss) über die Ebene 3 (Wetterschutz) mit dem Außenklima zu verbinden. Allgemein formuliert bedeutet dies, dass der Funktionsbereich (Ebene 2) trocken bleiben und vom Raumklima getrennt sein muss. Er muss zur Außenseite geöffnet sein, um austrocknen zu können.

8.1.3 WETTERSCHUTZ (EBENE 3)

Die Ebene des Wetterschutzes muss an der Außenseite den Eintritt von Regenwasser weitgehend verhindern und eingedrungenes Regenwasser kontrolliert nach außen abführen. Zugleich muss die Feuchte aus dem Funktionsbereich (Ebene 2) nach außen entweichen können. Es handelt sich dabei um ein offenes System. Daher auch die in Bild 8.1 bei-

spielhafte Auffächerung dieser Ebene, die den bewährten Grundelementen der Dacheindeckung nachempfunden ist.

8.2 FUGENDURCHLÄSSIGKEIT UND LECKAGEN IN DEN DICHTEBENEN

Auch wenn im Rahmen der vorliegenden Betrachtung die Trennung zwischen Raum- und Außenklima zu behandeln ist (Ebene 1), kann auf eine Gesamtbetrachtung der Einbindung des Fensters in die Außenwand nicht verzichtet werden.

Die Gesamtbetrachtung ist auch deshalb notwendig, da mit der Einbindung des Fensters in die Außenwand in der Regel Bauteile mit unterschiedlicher Dicke verbunden werden.

Damit ist der Übergang von der Außenwand zum Fenster auch hinsichtlich der Führung der Dichtebene 1 dahingehend zu überprüfen, ob die Dichtebene in einem Bereich geführt wird, welcher die Taupunkttemperatur des Raumklimas nicht unterschreitet. Die Überprüfung erfolgt dabei in der Regel entsprechend den Vorgaben nach DIN 4108-2 (2013) mit einem Raumklima von 20 °C Lufttemperatur und 50 % relative Luftfeuchte.

Als kritischer Bereich ist der Übergang der Dichtebene 1 von der Außenwand zum Fenster zu sehen. Hier endet die materialisierte Dichtebene 1 in der Regel und wird in einem Winkel von 90° senkrecht zur Wandebene bis zur Fensterebene weitergeführt.

Der Markt bietet für die Ausführung der Dichtebene 1 im Übergang von der Außenwand zum Fenster verschiedene Produkte an, welche vielfach mit der Außenwand und mit dem Fenster verklebt werden. Der Erfolg der dauerhaft funktionsfähigen Abdichtung wird wesentlich von der richtigen Wahl der Produkte, dem Zustand der Haftflächen und der handwerklichen Ausführung bestimmt. Auch ist für eine dauerhafte Dichtheit die Breite der Haftfläche von Bedeutung. Bei geringen Haftflächen mit einer Breite unter 2 cm am Fenster und unter 4 cm an der Außenwand wird nach praktischen Erfahrungen eine mechanische Sicherung der Klebefläche empfohlen, damit die angestrebte Dichtheit der Verklebung über einen angemessenen Nutzungszeitraum sichergestellt ist.

Der Zustand der Haftflächen an der Außenwand ist hinsichtlich der Ebenheit und der Tragfähigkeit zu überprüfen. Die Ebenheit der Haftflächen ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Dichtebene 1 im Übergang von Fenster und Außenwand mit vorkomprimierten und imprägnierten Fugendichtbändern nach DIN 18542 (2009) ausgeführt wird (vgl. IVD-Merkblatt Nr. 26 2014 und RAL-Leitfaden zur Montage 2014).

Nur mit PU-Ortschaum ausgefüllte Fugen zwischen Fenster und Außenwand können aus Erfahrungen der Praxis die Funktion der Dichtebene 1 über einen angemessenen Nutzungszeitraum nicht sicherstellen.



Bild 8.2: Sichtbarmachung von Leckagen durch Rauchdurchtritt zur Raumseite am Stulp einer 2-flg. Fenstertür bei natürlicher Druckdifferenz



Bild 8.3: Geöffnete Fensterkonstruktion mit erkennbarer Schimmelpilzbildung an den von der Raumseite offenen Konstruktionsfugen

Die Frage „Wie dicht ist luftdicht?“ wird für die Gesamtbetrachtung der Außenbauteile bereits an anderer Stelle des Forschungsberichtes behandelt. Für Bauteilanschlussfugen benennt DIN 4108-2 (2013) einen Höchstwert des Luftdurchganges von $0,1 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{h}(\text{daPa}^{2/3}))$ als praktisch luftdicht. Dieser Wert wurde aus den bei Versuchen im Labor nach DIN EN 12114 (2000) gewonnen Erkenntnissen abgeleitet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Leckagen über die Länge der Bauteilanschlussfugen verteilt sind und sich damit nicht, oder nur unwesentlich, auf die bauphysikalischen Eigenschaften der Bauteilanschlussfugen auswirken.

Im Prüfstand wird auf die getrennte Messung des Luftdurchganges der Bauteilanschlussfugen an Fenstern in der Regel verzichtet. Der Höchstwert des Luftdurchganges nach DIN 4108-2 (2013) wird als Sicherheit auf den Messwert aufgeschlagen. Bei der Bewertung vor Ort wird in der Regel auf die getrennte Messung des Luftdurchganges an eingebauten Fenstern verzichtet und die Luftdurchlässigkeit entsprechend der CE-Kennzeichnung nach DIN EN 14351-1 (2010) in die Gesamtbetrachtung mit einbezogen.

8.3 ÜBERPRÜFUNG DER DICHTHEIT

Die Überprüfung der Dichtheit mit Rauchbelastung unter Ausnutzung der vorhandenen natürlichen Druckdifferenz durch Inaugenscheinnahme hat sich für die Suche nach Leckagen

am Fenster bewährt (Bild 8.2). Die Prüfung mit Rauchbelastung hat den Vorteil, dass die Luftströmungen und damit die Leckagen sichtbar werden. Bei entsprechender Erfahrung kann auch der Beitrag der Leckagen auf die Dichtheit des Gesamtgebäudes eingeordnet werden.

8.4 BEWERTUNG DER LUFT-LECKAGEN

Bei der Bewertung der Luft-Leckagen ist zu beachten, dass diese nicht nur Auswirkungen auf den Wärmebedarf von Gebäuden haben, sondern auch zu Feuchtigkeitsschäden in der Außenwand und im Fenster führen können (Schmid, Schwarz und Stiller 2009). Dies gilt insbesondere dann, wenn keine direkte Durchströmung der Fensterkonstruktion stattfindet, sondern die Durchströmung über einen längeren Weg in Falzen und Fugen erfolgt (Bild 8.4). Auf diesem Weg kommt die abströmende feuchte, warme Raumluft mit kalten Oberflächen in Kontakt und kühlt ab. Als Folge tritt Tauwasserbildung innerhalb der Fensterkonstruktion auf.

Die Feuchtebelastung durch abströmende feuchte, warme Raumluft ist insbesondere bei undichten Konstruktionsfugen als kritisch zu bewerten, da hier die Luft langsam abströmt und damit durch die Abkühlung der Raumluft zunächst Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze entstehen und bei Holzfenstern in der Folge anhaltende Durchfeuchtungen auftreten, welche zur Holzzerstörung durch Pilzbefall führen (Bild 8.3).

Innerhalb der Fensterkonstruktion ist weiter das Eindringen und das Durchströmen der Falze zwischen Flügel und Blendrahmen als kritisch einzustufen. Die Dichtebene 1 reicht in ihrer Dichtwirkung zwischen Flügel und Blendrahmen in der Regel nicht aus, um das Eindringen von feuchter, warmer Raumluft in den Falz zwischen Flügel und Blendrahmen zu verhindern (Bild 8.5). Dies gilt insbesondere dann, wenn der Druckausgleich zwischen dem Innenraum des Gebäudes und dem Umgebungsklima vorwiegend über die Leckagen der Fenster erfolgt. Auch hier ist der Schutz vor Feuchtigkeit und Schimmelpilzbildung von gleicher Bedeutung wie die Energieverluste.

Auch im Bereich der Verglasung ist die Funktion der Dichtebene 1 häufig nicht gegeben. Der Eintritt von feuchter, warmer Raumluft in den Glasfalz (Bild 8.6) führt dort zu einer erhöhten Feuchtebelastung des Randverbundes des Mehrscheiben-Isolierglases, welcher negative Auswirkung auf die Nutzungsdauer des Mehrscheiben-Isolierglases hat.

Die Beschreibung der Dichtebene 1 für den Bereich des Fensters zeigt, dass die Einsparung von Energie nur ein Aspekt ist, welcher bei der Bewertung von Luft-Leckagen an Fenstern zu beachten ist.

Wird neben der Einsparung von Energie auch die Gebrauchstauglichkeit der Fenster über einen angemessenen Nutzungszeitraum in die Betrachtung mit einbezogen, ist es wichtig,

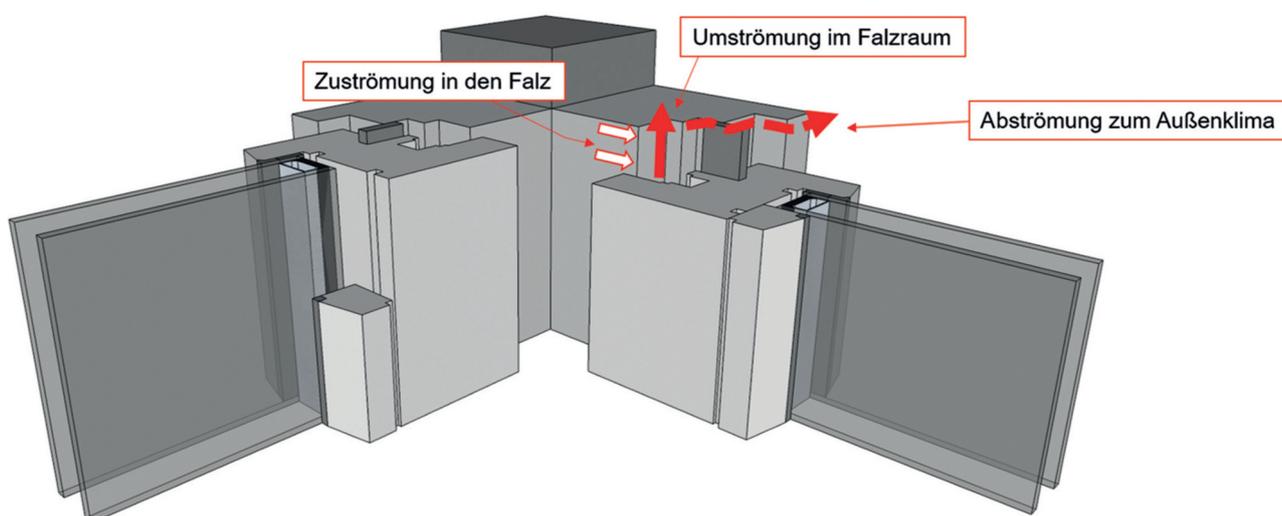


Bild 8.4: Skizze zum Aufbau einer Elementecke mit Darstellung der Durchströmung von Konstruktionsfugen



Bild 8.5: Tauwasser- und Schimmelpilzbildung im Falz des Stulpbereiches eines 2-flg. Holzfensters als Folge der Durchströmung der Konstruktion, da die Wirkung der Dichtebene 1 nicht gegeben ist



Bild 8.6: Leckage zum Glasfalz über die Glashalteleisten

dem Planer und den ausführenden Handwerkern die Auswirkungen eines großzügigen Umganges mit der Dichtebene 1 zu vermitteln und Lösungen mit handwerklich sicher umsetzbaren Ausführungen anzubieten.

Für die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit des Fensters als Bauteil reicht die Betrachtung der Dichtebene 1 nicht aus. Für die Gesamtbetrachtung der Gebrauchstauglichkeit sind die Dichtebenen 2 und 3 mit einzubeziehen.

8.5 ZUSAMMENFASSUNG

Für die Gebrauchstauglichkeit der Fenster ist die Funktionsfähigkeit der Dichtebene 1 eine notwendige, aber nicht hinreichende Eigenschaft.

Für die Bewertung der Luftdurchlässigkeit und von Luft-Leckagen bei Fenstern ist es notwendig, zwischen den Dichtebenen nach dem Ebenenmodell (Bild 8.1) zu unterscheiden. Für die Vermeidung von Tauwasser- und Schimmelpilzbildung innerhalb der Konstruktion und im Anschluss zur Außenwand ist es notwendig, dass die raumseitige Dichtebene 1 umlaufend dicht ausgeführt ist und der Funktionsbereich über die Dichtebene 3 (Wetterschutz) zur Außenseite hin geöffnet ist.

In DIN 18055 (2014) wird in Abschnitt 4.12 der Luftdurchgang über die Falze zwischen Flügel und Blendrahmen beschrieben. Es wird dabei davon

ausgegangen, dass Konstruktionsfugen und Verglasungen dicht sind. Aber auch wenn die Forderung zur Luftdurchlässigkeit nach DIN 18055 (2014) erfüllt wird, kann die unkontrollierte Abluft über die Falze zu Tauwasser- und Schimmelpilzbildung führen. Daraus folgt, dass die Einhaltung der Vorgaben von normativen Festlegungen noch keine Sicherheit dafür bietet, dass keine unerwünschten Effekte wie Tauwasser- und Schimmelpilzbildung in den Falzen auftreten.

Bereits kleine und lokal begrenzte Luft-Leckagen lassen den unkontrollierten Eintritt von feuchter, warmer Raumluft in die Konstruktion und damit in Bereiche zu, welche unter der Taupunkttemperatur liegen. Häufig sind lokal begrenzte Luft-Leckagen im Bereich der Beschläge, im Eckbereich der Dichtungen und im Stulpbereich vorhanden. Feuchtigkeitsbedingte Schäden und Schimmelpilzbildung sind als Folge nicht auszuschließen.

Bei einer pauschalen Betrachtung der Dichtheit der Gesamtkonstruktion ohne Unterscheidung zwischen den Dichtebenen besteht die Gefahr, dass die Fenster zwar in Bezug auf den unkontrollierten Luftaustausch zwischen der Raum- und Außenseite als ausreichend luftdicht anzusehen sind, davon losgelöst aber die Gebrauchstauglichkeit des Fensters nicht gegeben sein muss.

Diese Auswirkungen sind unabhängig vom Werkstoff der Fenster.

8.6 LITERATURVERZEICHNIS

- IVD-Merkblatt Nr. 26 (2014): Abdichten von Fenster- und Fassadenfugen mit vorkomprimierten und imprägnierten Fugendichtbändern (Kompribandern), Nov. 2014.
- DIN 4108-2 (2013): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Feb. 2013. Berlin: Beuth.
- DIN 18055 (2014): Kriterien für die Anwendung von Fenstern und Außentüren nach DIN EN 14351-1, Nov. 2014. Berlin: Beuth.
- DIN 18542 (2009): Abdichten von Außenwandfugen mit imprägnierten Fugendichtungsbändern aus Schaumkunststoff – Imprägnierte Fugendichtungsbänder – Anforderungen und Prüfung, Juli 2009. Berlin: Beuth.
- DIN EN 12114 (2000): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Luftdurchlässigkeit von Bauteilen – Laborprüfverfahren; Deutsche Fassung EN 12114, Apr. 2000. Berlin: Beuth.
- DIN EN 14351-1 (2010): Fenster und Türen – Produktnorm, Leistungseigenschaften – Teil 1: Fenster und Außentüren ohne Eigenschaften bezüglich Feuerschutz und/oder Rauchdichtheit, Aug. 2010. Berlin: Beuth.
- RAL-Leitfaden zur Montage (2014): Leitfaden zur Planung und Ausführung der Montage von Fenstern und Haustüren, RAL-Gütegemeinschaft Fenster und Haustüren e. V., März 2014.

- Schmid, J. (1993): Konstruktion von Wintergärten. Die Konstruktion und der Werkstoff bestimmen die Gebrauchstauglichkeit. Vortrag Feb. 1993, Institut für Fenstertechnik e. V., Rosenheim.
- Schmid, J., Schwarz, B., Stiller, M. (2009): Info-Blatt Tauwasser – Vermeidung von Tauwasser in Falzen von Fenstern zwischen Flügel und Blendrahmen. Bezug unter www.isp-Rosenheim.de, Jan. 2009.

AUTOREN



JOSEF SCHMID († 2016)
PROF. DIPL.-ING.

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Konstruktion und Schäden an Fenstern und Türen aus Holz, Kunststoff und Aluminium; von 1964 bis 2000 Mitarbeiter und später Leiter des Instituts für Fenstertechnik (ift) in Rosenheim; im Jahr 2000 Gründung des Ingenieurbüros isp Rosenheim



MICHAEL STILLER
DIPL.-ING. (FH), M. ENG.

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Fenster, Türen und Außentüren aus Holz, Kunststoff und Glas; Inhaber des Ingenieurbüros isp Rosenheim



9 Bewertung von Luft-Leckagen im Hinblick auf den Brandschutz

Jochen Zehfuß und Jan Lyzwa

9.1 EINLEITUNG

Bei ca. 95 % der Brandtoten lautet die Todesursache Erstickung oder Rauchvergiftung. Brandrauch ist deshalb so gefährlich, weil er sich grundsätzlich schneller als das Feuer und die Flammen ausbreitet und zudem geräuschlos ist. Brandrauch besteht aus Brandgasen und kleinen Partikeln, dem Ruß. Aufgrund dessen und seiner hohen Temperatur ist der Brandrauch „flüchtig“ und kann sich über Öffnungen, aber auch über offene Fugen, Ritzen und Undichtigkeiten ausbreiten. Ein wesentliches Prinzip des Brandschutzes ist das Abschottungsprinzip. In einem Gebäude sind brandschutzrelevante Abtrennungen vorzusehen, die auch eine Barriere für die Rauchausbreitung darstellen. Dies betrifft:

- Brandabschnitte,
- Nutzungseinheiten,
- Räume erhöhter Brandgefahr,
- Rettungswege,
- Schächte,
- Rauchabschnitte.

Die Abschottung muss sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung funktionieren. Unvermeidliche Leckagen in den Abschottungen wie z. B. an den Brandschutz- und Rauchschutztüren sowie den Rauchschutzhängern müssen so begrenzt bleiben, dass der Rauchausbreitung und der Ausbreitung heißer Gase vorgebeugt wird.

9.2 GEFAHREN DES BRANDRAUCHS

Durch den Rauch entstehen Gefahren wie Trübung der Sicht, Verdrängung von Sauerstoff, Entstehung von Schadstoffen sowie Wärme- und Schadstofftransport. Folgende Faktoren beeinflussen die Entstehung und Zusammensetzung von Rauchgas maßgeblich (Hartung und Reintsema 2002):

- Zusammensetzung des Zündmaterials,

- Reaktion mit Nebenprodukten,
- Abbrandgeschwindigkeit,
- Umgebungsdruck,
- Luftfeuchtigkeit.

Die zunehmende Verwendung von Kunststoffen bei der Produktion von Haushaltsgegenständen (Möbel, Elektrokleingeräte usw.) sowie bei Baumaterialien hat nachhaltigen Einfluss auf das Gefahrenpotenzial in Wohngebäuden, da Kunststoffe im Brandfall zu einem hohen Verrauchungsgrad führen.

Bild 9.1 illustriert das jeweilige Rauchpotenzial verschiedener Materialien. Nach Klingsohr (1987) handelt es sich hierbei um idealisierte Werte bei Verbrennung 10 kg schwerer Probekörper unter Normalbedingungen.

Rauchgas verdrängt Sauerstoff und wird von den Opfern eingeatmet, was zur Vergiftung der Atemwege führt. Diese Vergiftungen können trotz freier Atemwege zu zentraler Atemlähmung führen. Kommt es zur Apnoe, muss unverzüglich eine künstliche Beatmung erfolgen, da bereits nach 3 bis 4 Minuten eine irreversible Schädigung der Hirnzellen einsetzt und der Atemstillstand nach 8 Minuten zum letalen Ende führt (Moll und Ries 1971).

Neben dem gesundheitlich gefährlichen Effekt führt Brandrauch zu erheblichen Sichtbehinderungen und erschwert eine zügige Gebäuderäumung oder macht sie gar unmöglich. Die Verrauchung kann zur Folge haben, dass selbst ortskundige Personen die Orientierung verlieren.

Der vorbeugende Brandschutz muss sicherstellen, dass im Falle eines Brandereignisses den Gebäudenutzern genügend Zeit zur Räumung zur Verfügung steht. Dies erfolgt u. a. durch eine Aufrechterhaltung der (rauchfreien) Rettungswege. Hier berührt der „Dichtheitsgedanke“ den Brandschutz.

In Abhängigkeit von der Gebäudeklasse und der vorgesehenen Nutzung werden unterschiedliche Anforderungen an ein Gebäude gestellt. Bei der Ausbildung von Brand- und Rauchabschnitten werden Bauteile mit speziellen Anforderungen eingesetzt.

Die Berücksichtigung von Leckagen bei raumabschließenden Bauteilen (Trennwände, Außenwände, Decken, obere Raumabschlüsse) und Sonderbauteilen (Feuerschutzabschlüsse, Lüftungsleitungen) ist essentiell. Hierbei sind neben dem Gesamtsystem

Rauchpotenzial im m³

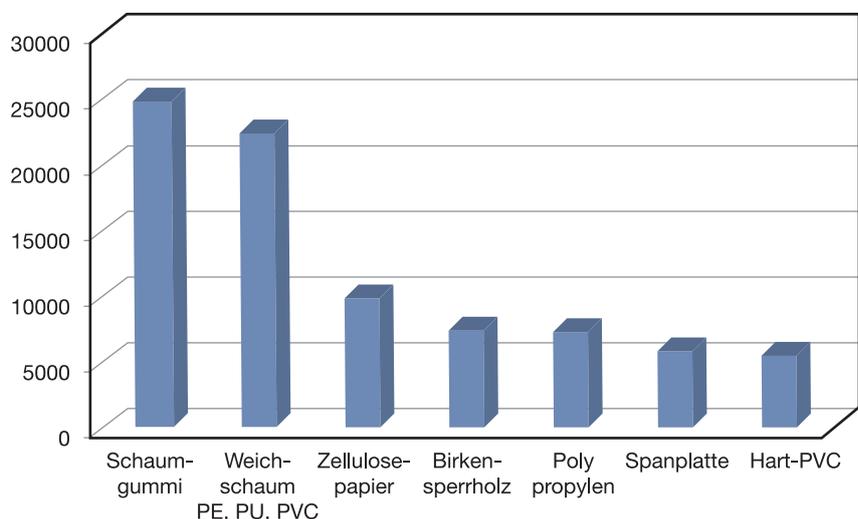


Bild 9.1: Rauchpotenzial von 10 kg Probematerial (Klingsohr 1987)

auch lokale Fehlstellen relevant. Gemäß DIN EN 13501-2 (2010) ist bei Bauteilen mit raumtrennender Funktion der Raumabschluss E die Fähigkeit, bei der Beanspruchung eines nur an einer Seite angreifenden Feuers eine Übertragung des Feuers zur nicht dem Feuer ausgesetzten Seite zu verhindern. Hierbei muss das Bauteil dem Durchtritt signifikanter Mengen von Flammen und/oder heißer Gase widerstehen, die eine Entzündung der dem Feuer abgekehrten Oberfläche oder in der Nähe dieser Oberfläche befindlicher Materialien verursachen. Die Feststellung des Raumabschlusses wird im Allgemeinen auf Basis der folgenden drei Versagensmerkmale durchgeführt:

- Risse und Öffnungen, die über bestimmte Abmessungen hinausgehen,
- Entzündung eines Wattebausches,
- andauernde Entflammung auf der vom Feuer abgewandten Seite.

Hinsichtlich der brandschutztechnischen Schutzwirkung ist zwischen dem Raumabschluss, welcher den Durchtritt eines Feuers über eine bestimmte Dauer verhindern soll, und der Leistungseigenschaft „rauchdicht“ zu unterscheiden.

Nachfolgend wird auf die brandschutztechnische Wirksamkeit von Brand- und Rauchschutztüren, Rauchschutzklappen, Rauchschutzvorhängen, Druckbelüftungsanlagen und Sicherheitstreppe nräumen eingegangen. Diese finden in der Praxis häufige Verwendung.

9.3 ABSCHLÜSSE

9.3.1 FEUERSCHUTZABSCHLÜSSE UND BRANDSCHUTZTÜREN

Der Begriff „Feuerschutzabschlüsse“ ist gemäß DIN 4102-5 (1977) Abschnitt 5.1 folgendermaßen definiert:

„Feuerschutzabschlüsse sind selbstschließende Türen und selbstschließende andere Abschlüsse (z. B. Klappen, Rollläden, Tore), die dazu bestimmt sind, im eingebauten Zustand den Durchtritt eines Feuers durch Öffnungen in Wänden oder Decken zu verhindern.“

Feuerschutzabschlüsse gemäß DIN 4102-5 (1977) sind nicht mit Rauchschutztüren (vgl. Abschnitt 9.3.2) nach

DIN 18095-1 (1988) gleichzusetzen, da Feuerschutzabschlüsse nicht rauchdicht sein müssen.

Je nach Anordnung werden folgende Anforderungen an Brandschutztüren gestellt:

- bestimmte Feuerwiderstandsdauer gemäß DIN 4102-5 (1977) (national) bzw. DIN EN 13501-2 (2010) (europäisch),
- Rauchdichtheit nach DIN 18095-3 (1999) (national) bzw. DIN EN 13501-2 (2010) (europäisch),
- Vollwandigkeit,
- selbstschließende Eigenschaften.

Gemäß DIN 18095-1 (1988) ist die Leckrate Q_d die maßgebende Kenngröße für die Dichtheit einer Rauchschutztür. Diese wird versuchstechnisch ermittelt. Sie wird durch den Luftvolumenstrom bezogen auf den Zustand (T_0, p_0) beschrieben, der durch die Spalten und Ritzen an einer Tür bei einer bestimmten Druckdifferenz durchtritt. Sie ist definiert durch:

$$Q_d = Q_t - Q_a \left(\text{in } m^3 / h \right), \quad (9.1)$$

wobei Q_a die Leckrate der Prüfeinrichtung ohne Probekörper bei einer abgedichteten Prüföffnung und Q_t die Gesamtleckrate des Probekörpers einschließlich der Prüfeinrichtung sind. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass hierbei die Messwerte aus der Prüfung auf den Zustand (T_0, p_0) umgerechnet werden müssen. Die Umrechnung erfolgt auf Grundlage von $T_0 = 293,15 \text{ K}$ bzw. $p_0 = 101325 \text{ Pa}$.

Die Leckrate Q_a ist für die Druckstufen $\Delta p = 5, 10, 20, 30$ sowie 50 Pa zu ermitteln. Gleichermäßen wird die Leckrate auch bei erhöhter Temperatur bestimmt.

Die Ermittlung der Leckrate Q_t ($Q_t = Q_d + Q_a$) erfolgt mit dem im Prüfraum eingebauten Probekörper.

Die nach Gleichung (9.1) errechneten Leckraten Q_d der Probekörper für die Druckstufen $5, 10, 20, 30$ und 50 Pa sind hierbei anzugeben.

Die Leistungseigenschaft rauchdichter Abschlüsse nach DIN EN 13501-2 (2010) erfordert in Anlehnung an DIN 18095-3 (1999) die Begrenzung der Leckage.

Gemäß DIN EN 13501-2 (2010) ist die Rauchdichtheit S die Fähigkeit eines Bauteils, den Durchtritt von Rauch und/oder Gas von einer zur anderen Seite eines Bauteils zu verringern bzw. auszuschließen. Hierbei berücksichtigt S_a die Rauchdichtheit bei der Umgebungstemperatur 25 °C ($\pm 15 \text{ K}$) und S_m die Rauchdichtheit bei Umgebungstemperatur sowie bei 200 °C ($\pm 20 \text{ K}$). In Deutschland ist das Kriterium S_m maßgebend.

Zum Nachweis einer Rauchdichtheit sind gemäß DIN EN 13501-2 (2010) folgende Leistungsniveaus festgelegt:

- „Rauchdichtheit S_m : wenn die größte Leckrate, gemessen sowohl bei Umgebungstemperatur als auch bei 200 °C und bis zu einem Druck von 50 Pa , für eine einflügelige Türanlage $20 \text{ m}^3/h$ und für eine zweiflügelige Türanlage $30 \text{ m}^3/h$ nicht überschreitet.“
- „Rauchdichtheit S_a : wenn die maximale Leckrate, gemessen bei Umgebungstemperatur und bis zu einem Druck von nur 25 Pa , den Wert von $3 \text{ m}^3/h$ je Meter Spaltlänge zwischen den festen und den beweglichen Teilen der Türeinheit (z. B. zwischen Türblatt und Türzarge) nicht überschreitet, ausgenommen der Leckage an der Schwelle.“

9.3.2 RAUCHSCHUTZTÜREN

Gemäß DIN 18095-1 (1988) Abschnitt 2.1 sind Rauchschutztüren „selbstschließende Türen und dazu bestimmt, im eingebauten und geschlossenen Zustand den Durchtritt von Rauch zu behindern“. Hierbei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich um eine Behinderung und keine Verhinderung bezüglich des Durchtritts von Rauch handelt. In allgemein zugänglichen notwendigen Fluren dürfen Rauchschutztüren keine unteren Anschläge und keine Schwellen aufweisen. Zulässig ist nur eine Flachschwelle mit einer maximalen Höhe von 5 mm .

Die zulässige Leckrate von Rauchschutztüren wird in der DIN 18095-1 (1988) Abschnitt 4.6 (vgl. auch DIN EN 13501-2 2010) definiert:

„Die auf den Normzustand bezogene Leckrate Q_d der Tür bei einer Druckdifferenz während der Prüfung zwischen 0 und 50 Pa darf sowohl bei Raumtemperatur (zwischen 10 °C und 40 °C) als auch bei einer Temperatur

des Prüfmediums Luft von 200 °C nicht größer sein als

- 20 m³/h bei einflügeligen Rauchschutztüren
- 30 m³/h bei zweiflügeligen Rauchschutztüren“.

9.3.3 BRAND- UND RAUCHSCHUTZKLAPPEN

Die Weiterleitung von Feuer und Rauch durch Lüftungsanlagen in andere Brandabschnitte, notwendige Flure oder Treppenträume ist gleichermaßen zu unterbinden. Durchdringen Leitungen Decken oder Wände mit gefordertem Feuerwiderstand, sind Brand- oder Rauchschutzklappen anzuordnen. DIN EN 1366-2 (2015) gilt hierbei als Prüfnorm, DIN EN 15650 (2010) als Anwendungsnorm und DIN 13501-3 (2010) als Klassifizierungsnorm. Bei Brandschutzklappen, die mit S klassifiziert werden, ist gemäß DIN 13501-3 (2010) eine Begrenzung der Leckrate für Rauchgas auf maximal 200 m³/(m²·h) festgelegt.

9.3.4 RAUCHSCHUTZVORHÄNGE

Rauchschutzvorhänge bzw. Rauchschürzen sind textile Feuerschutzabschlüsse. Diese bestehen in der Regel aus Glasgewebe. Grundsätzlich werden die Schürzen und Vorhänge mobil eingesetzt. Sie werden im Bedarfsfall ausgerollt und sollen als Rauchabschlüsse fungieren. Hierbei soll die Rauchausbreitung in einem Gebäude verhindert werden – eine Behinderung der Wärmestrahlung erfolgt jedoch nicht.

Die Rauchdichtheit dieser Systeme wird nach DIN 18095-3 (1999) geprüft. Hierbei darf die Leckrate des Probekörpers mit einer lichten Durchgangsöffnung von etwa 3 m × 3 m nicht mehr als 40 m³/h betragen. Bei der Prüfung hiervon abweichender, größerer Rauchschutzabschlüsse ist dieser Grenzwert nach dem Flächenverhältnis umzurechnen. Zur Beurteilung der Dichtheit von Rauchschutzabschlüssen der vorgesehenen Größe stellt DIN 18095-3 (1999) in Abschnitt 6.2 Rechengrundlagen zur Verfügung. Unter Verwendung der gemäß DIN 18095-2 (1991) bestimmten Messwerte der Leckraten sind folgende Abschätzungs-Verhältnismerte zu errechnen:

a) Fugenlängenverhältnis V_{FL}

$$V_{FL} = L_e / L_p \quad (9.2)$$

Mit:

L_e Fugenlänge des zu beurteilenden Rauchschutzabschlusses,
 L_p Fugenlänge des Probekörpers.

b) Öffnungsflächenverhältnis $V_{ÖF}$

$$V_{ÖF} = A_e / A_p \quad (9.3)$$

Mit:

A_e die lichte Öffnung des zu beurteilenden Rauchschutzabschlusses,
 A_p die lichte Öffnung des Probekörpers.

c) Leckratenzuschläge Z zur Berücksichtigung fester Fugen

Den ermittelten Leckraten sind ggf. Leckratenzuschläge hinzuzufügen, die die konstruktive Ausführung der Abschlüsse berücksichtigen (z. B. Fugen zwischen festen Teilen oder Verglasungen, vgl. DIN 18095-3 (1999) Abschnitt 5.2.2.2).

Aus den ermittelten Werten werden die Leckraten-Abschätzungswerte bestimmt:

$$L_1 = (L_{pr} \cdot V_{FL}) + Z \quad (\text{in } m^3 / h) \quad (9.4)$$

$$L_2 = (L_{pr} \cdot V_{ÖF}) + Z \quad (\text{in } m^3 / h) \quad (9.5)$$

Dabei sind:

- L_1 Leckrate des Fugenlängenverhältnisses,
- L_2 Leckrate des Öffnungsflächenverhältnisses,
- L_{pr} Leckrate des Probekörpers.

Zur Beurteilung ist bei der Abschätzung der größere Zahlenwert maßgebend.

Eine Bewertung der Rauchleckage durch Spalten in Rauchschürzen kann nach DIN EN 12101-1 (2006), Anhang E.5 erfolgen. Rauchschürzen neigen dazu, sich bei Druck, verursacht durch heiße, aufsteigende Brandgase, auszulenken (Bild 9.2). Hierbei kann die Rauchleckage durch vertikale Spalten an den Kanten von Rauchschürzen mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$M_g = \frac{2A_g}{3} \left(\frac{352,17}{T_l} \right) \left(\frac{2gD_l\theta_l}{T_0} \right)^{1/2} \quad (9.6)$$

Dabei sind:

- M_g die Masse des Gases, das durch die Spalte strömt (in kgs⁻¹),
- A_g die Öffnungsfläche der Spalte (in m²),
- T_l die absolute Temperatur der Gase in der Schicht (in K),
- T_0 die absolute Umgebungstemperatur (in K),
- D_l die Tiefe der Gasschicht im Rauchabschnitt (in m),
- g die Erdbeschleunigung (ms⁻²),
- θ_l die Temperaturerhöhung des Gases über Umgebungstemperatur (in °C).

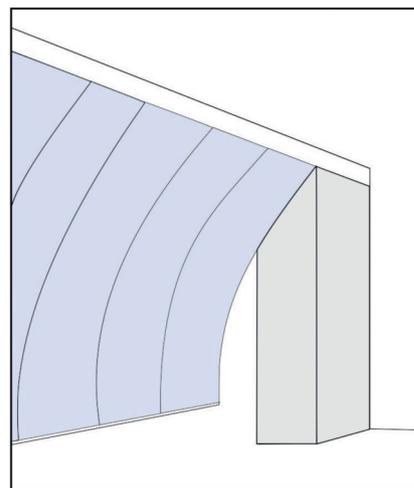


Bild 9.2: Rauchschürze zwischen zwei Säulen (DIN EN 12101-1 2006)

9.4 SICHERHEITSTREPPENRÄUME

9.4.1 ALLGEMEINES

Sicherheitstreppenträume stellen notwendige Treppenträume mit erhöhten Anforderungen dar. Diese sind dort erforderlich, wo zur vertikalen Rettungswegführung nur ein baulicher Rettungsweg zur Verfügung steht. Weiterhin werden sie insbesondere bei Hochhäusern vorgesehen. In der Regel ist dem Sicherheitstreppenraum eine Schleuse vorgeschaltet, die mit zwei selbstschließenden T 30-RS Brandschutz Türen abgetrennt ist. Diese Schleuse steht unter einem Luftüberdruck. Hinsichtlich der zulässigen Leckraten wird hierbei auf die Ausführungen zu Rauchschutztüren verwiesen.

9.4.2 DIFFERENZDRUCKSYSTEME

Differenzdrucksysteme werden nach DIN EN 12101-6 (2005) geregelt. Diese können Bestandteil eines Sicherheitstreppenraums sein. Zur Bemessung dieser Systeme und Ermittlung der Gesamtleckrate von druckbelüfteten Räumen stellt die Norm Tabellen zur Annahme von durchschnittlichen Leckraten bei Türen, Fenstern, Decken und Wänden zur Verfügung. Eine Berechnung der Leckage kann nach DIN EN 12101-6 (2005) A.2 erfolgen.

9.5 FAZIT

Die Dichtheit von brandschutzrelevanten Abschottungen wie Brandschutz- und Rauchschutzabschlüssen in Gebäuden ist zur Gewährleistung der Personensicherheit von zentraler Bedeutung. Hinsichtlich der Leckrate werden – wie exemplarisch dargestellt – unterschiedliche Anforderungen an die Bauteile gestellt. Das baurechtlich verankerte Schutzziel der Abschottungen ist die Vorbeugung der Brand- und Rauchausbreitung. Damit ist keine „vollständige“ Dichtheit gefordert, sondern eine „ausreichende“ Dichtheit, um eine sichere Personenrettung und erfolgreiche Löscharbeiten zu gewährleisten. Die vom Hersteller vorgeschriebenen Einbaufunktionen der zugelassenen Bauteile müssen beachtet und durchgeführt werden. Damit soll die Schutzwirkung der geplanten brandschutztechnischen Maßnahmen vor Ort sichergestellt werden. Eine Einzelsprache von Leckagen im Brandschutz erfolgt nicht ausdrücklich. Vielmehr müssen die Leistungskriterien, die an Bauteile gestellt werden, um die vorgeschriebenen Schutzziele zu erreichen, erfüllt werden. Die Dichtheit wird damit implizit berücksichtigt.

Wärmegeämmte Häuser mit geringer Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle sind hiermit nicht gleichzusetzen. Durch eine hohe Luftdichtheit der Gebäudehülle können im Brandfall Drücke entstehen, die Gefahrenpotenziale (z. B. Türen in Rettungswegen, die sich nicht mehr öffnen lassen) für Gebäudenutzer darstellen können. Derartige Fragestellungen sind Gegenstand der Forschung.

9.6 LITERATURVERZEICHNIS

- DIN 4102-5 (1977): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Feuerschutzabschlüsse, Abschlüsse in Fahrschachtwänden und gegen Feuer widerstandsfähige Verglasungen, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin: Beuth.
- DIN 4102-18 (1991): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Feuerschutzabschlüsse; Nachweis der Eigenschaft "selbstschließend" (Dauerfunktionsprüfung). Berlin: Beuth.
- DIN 18095-1 (1988): Türen; Rauchschutztüren; Begriffe und Anforderungen. Berlin: Beuth.
- DIN 18095-2 (1991): Türen; Rauchschutztüren; Bauartprüfung der Dauerfunktionstüchtigkeit und Dichtheit. Berlin: Beuth.
- DIN 18095-3 (1999): Rauchschutzabschlüsse - Teil 3: Anwendung von Prüfergebnissen. Berlin: Beuth.
- DIN EN 12101-1 (2006): Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 1: Bestimmungen für Rauchschürzen. Berlin: Beuth.
- DIN EN 12101-6 (2005): Festlegungen für Differenzdrucksysteme, Bausätze. Berlin: Beuth.
- DIN EN 13501-2 (2010): Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen. Berlin: Beuth.
- DIN EN 13501-3 (2010): Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 3: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen an Bauteilen von haustechnischen Anlagen: Feuerwiderstandsfähige Leitungen und Brandschutzklappen. Berlin: Beuth.
- DIN EN 1366-2 (2015): Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen – Teil 2: Brandschutzklappen. Berlin: Beuth.
- DIN EN 15650 (2010): Lüftung von Gebäuden – Brandschutzklappen. Berlin: Beuth.
- Hartung, C., Reintsema, J. (2002): Brandschutz im Krankenhaus. Wegscheid: Wikom-Verlag.
- Klingsohr, K. (1987): Brandrauch, Erfahrungen der Feuerwehr. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.
- Moll, H., Ries, J. (1971): Pädiatrische Unfallfibel. Berlin: Springer Verlag.

AUTOREN



JOCHEN ZEHFUSS
UNIV.-PROF. DR.-ING.

Leiter des Fachgebiets Brandschutz am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig; Prüfsachverständiger für Brandschutz in Schleswig-Holstein; Gesellschafter und Mitglied der Geschäftsführung von hhp berlin Ingenieure für Brandschutz



JAN LYZWA
M. SC.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig

10 Bewertung von Luft-Leckagen im Hinblick auf den Schallschutz

Martin Zerwas, Stefan Mock, Dirk Lahr, Ann-Sophie Schumacher

10.1 SCHALLDRUCKPEGEL (NOCKE 2014)

Luftschall ist die Ausbreitung von Schwingungen im Medium Luft und drückt sich durch eine lokale Luftdruckänderung aus. So kann der Luftschall mithilfe des Drucks gemessen und beschrieben werden. Der Schalldruckpegel L in Dezibel (dB) wird über den gemessenen Schalldruck p in Verbindung mit dem Referenzschalldruck p_0 als Bezugswert berechnet.

Der energetisch gemittelte Schalldruckpegel wird nach Gleichung 10.1 berechnet:

$$L = 10 \log_{10} (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + 10^{L_n/10}) \quad (10.1)$$

Dabei sind L_1, L_2, \dots, L_n die Schalldruckpegel an n -Positionen im Raum. Bei Pegeldifferenzen zwischen 6 bis 15 dB berechnen sich die Korrekturen des Signalpegels nach Gleichung 10.2.

$$L_{2,k} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_2}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \quad (10.2)$$

Wichtige Größen sind die Frequenz f , welche die Anzahl der Schwingungen (Luftdruckwechsel) pro Sekunde in Hertz (Hz) beschreibt, sowie der Abstand zwischen zwei gleichartigen Schwingungszuständen, der als Wellenlänge λ bezeichnet wird. Das Produkt aus Wellenlänge und Frequenz ergibt die Schallgeschwindigkeit c . Im Medium Luft beträgt diese ca. 343 m/s. Ferner lässt sich herausstellen: je höher die Frequenz, desto kleiner die Wellenlänge – Bild 10.1.

Die Frequenzzusammensetzung des Schalls wird allgemein Spektrum genannt. Stehen mehrere Frequenzen eines Schallereignisses in keinem regelmäßigen Zusammenhang, spricht man von einem Geräusch. Gibt es jedoch einen festen Bezug, bei dem die höheren Frequenzen Vielfache der niedrigsten sind, wird das Schallereig-

nis als Klang bezeichnet. Schall mit nur einer Frequenz ist ein reiner Ton. Um Pegeldifferenzen richtig einordnen zu können, ist es erforderlich, bei der Pegeladdition und Subtraktion eine logarithmische Funktion (Gleichung (10.1) heranzuziehen. Dezibel sind logarithmische „Einheiten“, die nicht wie andere Zahlen linear addiert werden dürfen. Erzeugt eine Schallquelle einen Schallpegel von $L_1 = 80$ dB und eine andere Schallquelle kommt mit $L_2 = 80$ dB hinzu, dann ergeben die beiden Signale keinen Pegel von 160 dB, sondern einen Gesamtpegel von 83 dB.

Zur vereinfachten Anwendung dieser Additionsregel folgt Tabelle 10.1.

10.2 SCHALLDÄMM-MASS R (FISCHER ET AL. 2008)

Das Schalldämm-Maß R beschreibt das Verhältnis der auftreffenden Schallenergie zu der auf der Rückseite eines Bauteils abgestrahlten Energie und wird in der Hilfsmaßeinheit Dezibel (dB) angegeben.

Unterschieden wird zwischen dem Schalldämm-Maß R in Prüfständen, bei dem der Schall nahezu ausschließlich durch das zu prüfende Bauteil übertragen wird (keine Flankenübertragung), und dem Bauschalldämm-Maß R' , bei dem zusätzlich zum o. g. Schalldämm-Maß R die Schallübertragung über Flanken und andere Nebenwege berücksichtigt wird. Beide Schalldämm-Maße hängen stark vom Frequenzbereich ab. Aus diesem Grund werden die Schall-

Tabelle 10.1: Merkregel zur Addition von gleichen Schallpegeln (Nocke 2014)

Differenz zwischen den Pegeln	Pegelzunahme (zum höheren Pegel addieren)
0 dB bis 1 dB	+ 3 dB
2 dB bis 3 dB	+ 2 dB
4 dB bis 9 dB	+ 1 dB
10 dB und mehr	+ 0 dB

pegeldifferenzen bei Prüfstandsmessungen in einem Frequenzbereich von 100 bis 5000 Hz in Terzen ermittelt und in Form einer Kurve in einem Diagramm in Abhängigkeit von der Frequenz f dargestellt.

Im Vergleich zu den rein physikalischen Messwerten werden einige Frequenzbereiche vom menschlichen Gehör unterschiedlich gut erfasst.

Die für das menschliche Hörvermögen relevanten Frequenzbewertungskurven A und C sollen die Hörgewohnheit bei unterschiedlichen Lautstärken nachahmen und Schallpegel bewerten, wie in Bild 10.2 dargestellt. Hierbei wird berücksichtigt, dass bei gleichen Schallpegeln tiefe Töne leiser empfunden werden als hohe. International wird i. d. R. die Bewertungskurve A zur Messung der Stärke eines Geräuschs herangezogen. Der hieraus

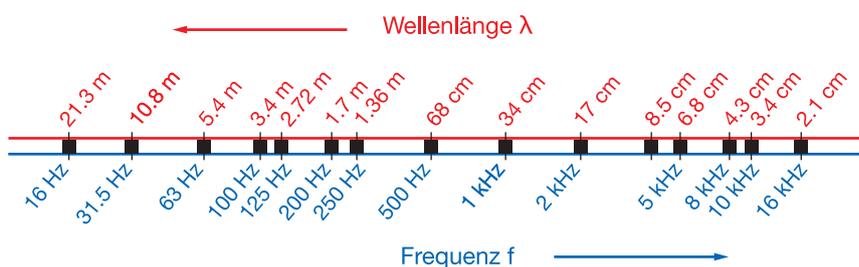


Bild 10.1: Frequenz und Wellenlänge von Luftschallwellen (Nocke 2014)

gewonnene Messwert wird als bewerteter Schallpegel L_A in dB(A) angegeben und soll ungefähr die durch das menschliche Ohr empfundene Störwirkung ausdrücken.

Die gemessenen Pegel werden somit durch die o. g. „Bewertungskurve“ korrigiert. In diesem Fall wird dann also mit den korrigierten Werten weitergerechnet.

10.3 BEWERTETES SCHALLDÄMM-MASS R_w (FISCHER ET AL. 2008)

Gute schalldämmende Eigenschaften von Wandkonstruktionen in tiefen Frequenzbereichen gleichen sich **nicht** mit schlechten schalldämmenden Eigenschaften in hohen Frequenzbereichen aus. Aus Bild 10.3 kann entnommen werden, wie mit Hilfe einer Bezugskurve B , nicht zu verwechseln mit den o. g. Korrekturkurven, die Bewertungskurve B_v gebildet wird. Die Bezugskurve B stellt den stilisierten Kurvenverlauf der Schalldämmung einer 24 cm dicken Ziegelwand dar. Zusammen mit der Messkurve $R_i(f)$ wird daraus eine Bewertungskurve B_v gebildet. Hierbei werden nur die Messungen der 16 Terzen zwischen 100 und 3150 Hz beachtet. Die Bezugskurve B wird solange in Richtung niedriger Schalldämm-Maße verschoben, bis die Summe der Unterschreitungen zwischen der verschobenen Bezugsk-

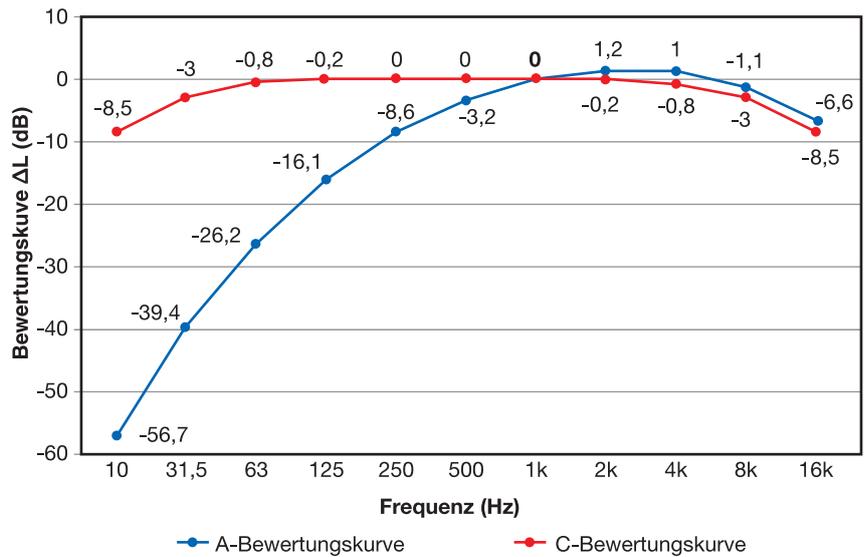


Bild 10.2: A- und C-Bewertungskurven (Nocke 2014)

kurve B_v und der Messkurve $R_i(f)$ maximal 32 dB beträgt. Der unter Berücksichtigung der Bezugskurve B_v ermittelte Wert in Dezibel bei 500 Hz stellt dann die Einzahlangabe des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w eines Bauteils dar.

10.4 SCHALLTECHNISCHES VERHALTEN VON BAUTEILEN

10.4.1 EINSCHALIGE MASSIVE BAUTEILE (FISCHER 2010)

Das schalltechnische Verhalten einschaliger Bauteile kann durch das

sogenannte „Massegesetz nach BERGER“, welches vor 80 Jahren erstmals eine elementare Gesetzmäßigkeit aussprach, einfach beschrieben werden. Das Gesetz besagt, dass die Schalldämmung mit der flächenbezogenen Masse m' (kg/m^2) und mit steigender Frequenz zunimmt. Die erreichbare Schalldämmung ist somit umso besser, je schwerer das einschalige Bauteil und je höher die Frequenz des zu dämmenden Geräusches ist. Bei einer bauteilbezogenen Eigenfrequenz (Eigenschwingung) unterhalb von etwa 200 Hz spricht man von biegesteifen Bauteilen (z. B. massive Wände). Bauteile werden als biegeweich bezeichnet, wenn ihre bauteilbezogene Eigenfrequenz oberhalb von etwa 1600 Hz liegt.

10.4.2 VORSATZSCHALEN AUF MASSIVEN BAUTEILEN

Eine massive Wand mit sogenannter Vorsatzschale ist eine akustisch günstige Kombination. Diese zweischalige Wandkonstruktion besteht aus einer biegesteifen und einer biegeweichen Schale. Der optimale Abstand zwischen den Schalen liegt bei 40 bis 80 mm. Zu beachten ist, dass bei einer direkten Befestigung der Vorsatzschale auf der biegesteifen Wand Schallbrücken durch Körperschallübertragung entstehen können. Damit wäre der Vorteil einer Vorsatzschale aufgehoben. Günstig ist eine Befestigung mittels freistehender, meist hölzerner oder metallischer Ständerwerke.

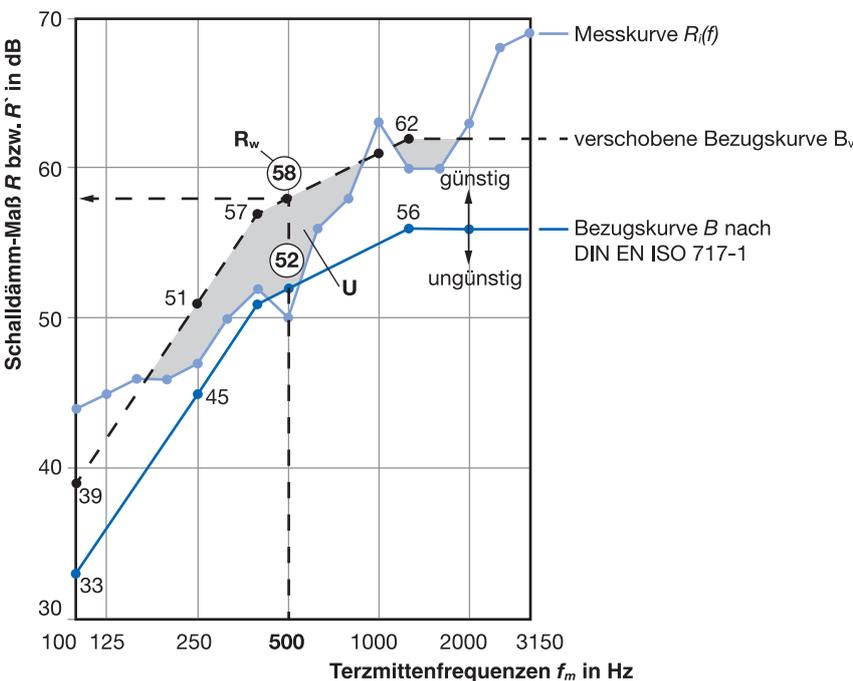


Bild 10.3: Definition des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w (Fischer et al. 2008)

10.5 GEBÄUDEAUSSTATTUNG

Die heutige Baukultur fördert eine starke „Halligkeit“ von Wohnungen durch viele glatte Flächen und eine zurückhaltende Möblierung. Maßnahmen, die diesen Effekt mindern, können unter anderem Gardinen, Stoffbespannung an den Wänden, Polstermöbel und Teppichböden sein. Der hohe Grad an eingesetzter Technik, welcher heutzutage in vielen Wohnungen vorherrscht, führt zu vermehrten Stör-/Nebengeräuschen, die einzukalkulieren sind. Küchengeräte und haustechnische Anlagen, wie Heizung und/oder Lüftung, sind aus vielen Gebäuden nicht mehr wegzudenken. Daher müssen die Einflüsse und die akustische Bedeutung von Leckagen hier besonders genau betrachtet und abgeschätzt werden. Denn wenn ein hoher Nebengeräuschpegel in der Wohnung anzutreffen ist, wird eine kleine Leckage, die ggf. in einer ruhigeren Wohnung ein Problem darstellen würde, evtl. nicht relevant sein. Die Wahrnehmung von Nebengeräuschen ist sehr subjektiv und muss daher im Einzelfall betrachtet werden.

Die vorgenannten Sachverhalte gelten für Außenwände sowie auch für Wohnungstrennwände.

10.6 MAKRO- UND MIKROBETRACHTUNG VON LECKAGEN

In Kapitel 2 dieses Forschungsberichtes wird eine Leckagesystematik beschrieben, deren stufenweise Gliederung verschiedener Parameter von der Makrobetrachtung bis hin zur Mikrobetrachtung reicht.

Fragen zur **Makrobetrachtung** in Bezug auf den Schallschutz betreffen beispielsweise die geographische und damit auch klimatische Lage eines Gebäudes, seine Funktion und die sich daraus ergebenden technischen Anforderungen.

Für Deutschland werden nach DIN EN 1991-1-4 (2010) vier Windlastzonen unterschieden, die Windgeschwindigkeiten $U_{b,0}$ zwischen 22,5 m/s und 30 m/s beschreiben. Windlastzone 3 und 4 mit großen Windgeschwindigkeiten und Winddrücken liegen am Meer oder in exponierten Lagen. Windlastzone 1 und 2 sind i. d. R. dem Binnenland zuzurechnen. Des

Weiteren hat auch die Geländekategorie einen Einfluss auf den das Gebäude belastenden Winddruck. In Geländekategorie I spricht man von der offenen See oder glattem, flachen Land ohne Hindernisse. Geländekategorie II beschreibt dünn besiedeltes Gelände mit beispielsweise Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen. Es handelt sich dabei eher um landwirtschaftliche Gebiete. In Kategorie III sind Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete und Wälder angesiedelt. Zu Kategorie IV werden Stadtgebiete gezählt, bei denen mindestens 15 % der Fläche mit Gebäuden bebaut sind, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet.

Im Zusammenhang mit Leckagen, welche den Schallschutz verschlechtern, lässt sich postulieren, dass eine Leckage in Windzone 1 eine geringe Relevanz für den Schallschutz hat, da der Schalleintrag, bedingt durch den geringen Winddruck, sehr klein bzw. nicht vorhanden ist. In Windzone 4 hingegen kann diese Leckage relevant werden, da sich durch erhöhten Winddruck die Infiltrationsrate ebenfalls erhöht. Der Außenlärm kann somit leichter ins Gebäude dringen.

Bei der **Mikrobetrachtung** wird jede Leckage einzeln betrachtet. Es wird zwischen primären, sekundären und tertiären Leckagen unterschieden und ob ein direkter Kontakt zur Außenluft besteht oder nicht.

Aus schallschutztechnischer Sicht kommt der Länge des Strömungsweges die größte Bedeutung zu. Dabei wird der kurze bzw. direkte von dem langen bzw. indirekten Strömungsweg unterschieden.

Ist beispielsweise ein Fensteranschluss mit angrenzender Fenster-

bank nicht luftdicht ausgeführt, so dass dort Luft ins Gebäude dringen kann, wirkt die Leckage aufgrund des relativ kleinen Strömungsweges direkt. Der Schall wird ungestört und zu annähernd 100 % durch das Leck übertragen.

Anders ist es beispielsweise bei Rissen oder Fehlstellen im Außenputz eines Mauerwerks. Der Schall muss hier viele verschiedene Porengänge/Schichten durchlaufen, bevor er dann im Innenbereich, zum Beispiel an einer Steckdose, ankommt. Auf diesem Weg wird er oft reflektiert und absorbiert, so dass letztendlich nur ein Bruchteil der ursprünglichen Schallenergie im Gebäude wirksam werden kann.

Eine größere Leckage kann eine Undichtigkeit im Bereich einer Türschwelle oder eine offene Schließfuge eines Fensters sein. Fugen müssen so geplant und ausgeführt werden, dass das bewertete Schalldämm-Maß des Fensters erhalten bleibt. Als Planungskriterium für Fugen gilt die Forderung, dass das Schalldämm-Maß R_w des Bauteils um nicht mehr als 1 dB reduziert wird.

Um dieses Kriterium zu erfüllen, gilt als Richtwert für das allgemeine Fugenschalldämm-Maß $R_{s,w}$ nachfolgende Vorgabe (DIN 4109-2 2016):

$$R_{s,w} \geq R_w + 10 \text{ dB} \quad (10.3)$$

Wird die Fuge mit einem Bauteil kombiniert, so ergibt sich mit der zugehörigen Fugenlänge l das resultierende Schalldämm-Maß $R_{i,w}$ nach der Beziehung:

$$R_{i,w} = -10 \lg \left(10^{-0,1 \cdot R_w} + \frac{l \cdot l_0}{S} \cdot 10^{-0,1 \cdot R_{s,w}} \right) \quad (10.4)$$

Tabelle 10.2: Exemplarische Auflistung direkter und indirekter Leckagen

direkte Leckagen	indirekte Leckagen (Strömungsweg: außen → innen)
undicht eingebaute Fenster	unverputztes Mauerwerk/offene Mauerkrone → Steckdose → Raum
Abluftanlagen/Außenluftdurchlässe	undichter Dachanschluss → Fehlstellen der Dampfbremse → Raum

10.7 RECHNERISCHE BETRACHTUNG EINES MUSTERRAUMES

Kleine Bauteile bzw. Fassadenbauteile, wie z. B. Lüftungselemente, weisen eine Vielzahl von Konstruktionsmerkmalen auf, für die oft keine allgemeinen akustischen Daten angegeben werden können.

Nicht gedämmte Anbauten, wie z. B. Raffstores oder Jalousien, sind allgemein als Bauteile mit vernachlässigbarer Schalldämmung zu betrachten.

Bei kleinen Öffnungen können Resonanzen auftreten, die durch die effektive Tiefe des Bauteils bestimmt werden. In verschiedenen Frequenzbändern führt das zu einer geringeren Norm-Schallpegeldifferenz des Bauteils nach Gleichung 10.5 (DIN 4109-2 2016):

$$D_{n,e,w} = -10 \lg \left(\frac{S_{\text{Öffnung}}}{A_0} \right) \tag{10.5}$$

Dabei sind

- $D_{n,e,w}$ die bewertete Norm-Schallpegeldifferenz in dB,
- $S_{\text{Öffnung}}$ die Fläche der Öffnung in m^2 ,
- A_0 die Bezugsabsorptionsfläche mit $A_0 = 10 \text{ m}^2$.

Nachfolgend wird ein Musterraum mit einer möglichen $S_{\text{Öffnung}}$ näher betrachtet.

Für diesen Raum gelten die folgenden Randbedingungen:

- Grundfläche 4 x 4 m,
- Höhe 2,5 m,
- Mauerwerk 24 cm mit einer rechnerischen Rohdichte von 1600 kg/m^3 ,
- Putzschicht 3,5 cm (Kalk-/Kalkzementputz) mit einer rechnerischen Rohdichte von 1600 kg/m^3 ,
- Leck 4 x 4 cm.

Die flächenbezogene Masse m' dieser einschaligen Wand beträgt 384 kg/m^2 ($m' = 0,24 \text{ m} \times 1600 \text{ kg/m}^3$).

Der Einfluss von unmittelbar auf dem Mauerwerk aufgetragenen Putzschichten (ein- oder beidseitig) wird durch eine Erhöhung der flächenbezogenen Masse berücksichtigt, indem die flächenbezogene Masse der Putzschichten m'_{Putz} zur flächenbezogenen Masse des unverputzten Bauteils m' addiert wird, woraus sich m'_{ges} ergibt. Unter den für die Musterwand

getroffenen Randbedingungen erhöht sich die flächenbezogene Masse um 56 kg/m^2 ($m'_{\text{Putz}} = 0,035 \text{ m} \cdot 1600 \text{ kg/m}^3$) auf 440 kg/m^2 ($m'_{\text{ges}} = 384,00 \text{ kg/m}^2 + 56,00 \text{ kg/m}^2$).

Das bewertete Schalldämm-Maß R_w für homogene einschalige Bauteile wird wie folgt berechnet (DIN 4109-2 2016):

$$R_w = 30,9 * \log \left(\frac{440 \text{ kg/m}^2}{1 \text{ kg/m}^2} \right) - 22,2 \tag{10.6}$$

$$R_w = 59,48 \text{ dB} \cong R_w = 60,00 \text{ dB}$$

Für die weitere Berechnung der Norm-Schallpegeldifferenz wird zunächst die Bezugsabsorptionsfläche A_0 abgeschätzt (Willems 2013):

$$A_0 = 0,163 * \frac{V}{T} \text{ (in } m^2 \text{)} \tag{10.7}$$

Dabei sind

- V das Volumen des Musterraums in m^3 ,
- T Nachhallzeit (Zeitspanne der Raumantwort).

Für diesen Fall wird eine Nachhallzeit von 0,6 s gewählt.
 $A_0 = 10,87 \text{ m}^2$

Bei der angenommenen Leckgröße von 4 x 4 cm ergibt sich eine Norm-Schallpegeldifferenz nach der Gleichung 10.5 in Höhe von 38,37 dB

$$\left(D_{n,e,w} = -10 \lg \left(\frac{0,0016 \text{ m}^2}{10,87 \text{ m}^2} \right) \right)$$

Das Schalldämm-Maß der Öffnung $R_{\text{Öffnung}}$ ergibt sich wie folgt (DIN 4109-2 2016):

$$R_{\text{Öffnung}} = D_{n,e,w} + 10 \log \left(\frac{0,0016 \text{ m}^2}{10 \text{ m}^2} \right) \tag{10.8}$$

$$R_{\text{Öffnung}} = 10,41 \text{ dB}$$

Das gesamte bewertete Bau-Schalldämm-Maß $R'_{w,ges}$ der Fassade für diffusen Schalleinfall ergibt sich für den Musterraum aus dem auf die übertragende Fläche bezogenen Schalldämm-Maß $R_{i,w}$ der an der Direktübertragung beteiligten Bauteile (Wand, Fenster, Dach, Rollladenkasten, Lüftungselement etc.).

Für den häufigen Fall, dass die flankierende Übertragung keine Rolle spielt,

wird die vereinfachte Beziehung nach Gleichung 10.9 (DIN 4109-2 2016) angewendet:

$$R'_{w,ges} = -10 \log \left[\sum_{i=1}^m 10^{\frac{-R_{e,j,w}}{10}} \right] \tag{10.9}$$

Für die Wand des Musterraumes ergibt sich ein resultierendes Schalldämm-Maß in Höhe von 37,57 dB:

$$R'_{w,ges} = -10 \log \left[\begin{matrix} \frac{1,0}{10 \text{ m}^2} \sum_{i=1}^m 8,56 \text{ m}^2 \\ * 10^{-60/10} + 1,44 \text{ m}^2 \\ * 10^{-37/10} + 0,0016 \\ * 10^{-10,41/10} \end{matrix} \right]$$

Wird unterstellt, dass der Außenpegel $L_1 = 50 \text{ dB}$ (TA-Lärm, reines Wohngebiet, Tag) und der Ruhepegel $L_2 = 35 \text{ dB}$ (TA-Lärm, reines Wohngebiet, Tag) beträgt, dann ist in diesem Fall das Bau-Schalldämm-Maß mit 37,57 dB nach TA-Lärm ausreichend. Das Leck hat somit eine Einwirkung auf das Schalldämm-Maß der Wand. Der notwendige Schallschutz ist aber weiterhin gewährleistet, auch wenn die Öffnung ein besseres Schalldämm-Maß verhindert.

Dies schließt nicht aus, dass dieses Leck bei anderen Wirkungsweisen (z. B. feuchtetechnisch) dennoch problematisch sein kann.

10.8 ZUSAMMENFASSUNG

Klima- und energiepolitische Zielsetzungen sowie die Erwartungshaltung der Nutzer haben die Anforderungen an die Gebäudehülle erhöht. Dabei gewinnt auch der Schallschutz zunehmend an Bedeutung im Nichtwohnungs- und Wohnungsbau. Die Raumakustik spielt hier ebenso eine große Rolle wie Fragen nach dem erforderlichen Schalldämm-Maß oder danach, welches schalltechnische Verhalten die Bauteile erreichen sollen. Aber wo berührt der „Dichtheitsgedanke“ den Schallschutz? In erster Linie lässt sich darstellen, dass die gesamten Vorgaben der DIN 4109 als Schallschutzziel einzuhalten sind.

Nicht relevant dagegen ist der Umstand, wie das erforderliche Schalldämm-Maß erreicht wird. Eine schwere, massive Wand kann also durchaus auch mit Leckagen das

Normziel erreichen. Mit erhöhten Anforderungen an den Schallschutz steigen somit auch die Anforderungen an die Luftdichtheit.

Beim Schallschutz sind nicht nur die rechnerisch nachzuweisenden Bauteile und Fertigelemente entscheidend. Eine fehlerhafte Planung und Ausführung, die zu Leckagen in der Gebäudehülle führen, haben teilweise relevante und teilweise eben nicht relevante Auswirkungen auf den Schallschutz. Nicht bei allen Lecks strömt die Luft auf direktem Weg von außen nach innen. Es gibt auch eine erhebliche Anzahl von Nebenwegen (längere Strömungswege), worüber die Luft ins Innere strömen kann. Aus schalltechnischer Sicht sind Leckagen vor allem in direkte und indirekte einzuteilen. Eine direkte Übertragung von Luft führt in der Regel auch zu einer direkten Übertragung von Schall (z. B. geöffnetes Fenster). Indirekte Wege bzw. längere Strömungswege bieten dem Schall einen Widerstand (z. B. Leckage in der mehrschaligen Wand) und können ggf. den Schalldruck reduzieren. Zurzeit sind noch keine genauen „harten Kriterien“ über die relevanten Größen einer Leckage im Hinblick auf schalltechnische Fragestellungen verfügbar. Hilfsmittel, die beispielsweise die Leckgröße dem Schalldämm-Maß gegenüberstellen, sowie Diagramme oder Beurteilungstabellen mit verschiebbarer Lochlehre für verschiedene Leckgrößen liegen nicht vor und müssten erst erarbeitet werden.

Zudem besteht Forschungsbedarf dazu, welchen Einfluss die Begleitparameter wie die subjektive Wahrnehmung des Nutzers und die sich vor Ort einstellenden Ruhepegel sowie die akustischen Parameter wie Nachhallzeit und Absorptionsfläche in Bezug auf Leckagen haben.

10.9 LITERATURVERZEICHNIS

- DIN EN 1991-1-4 (2010): Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010.
- DIN 4109-2 (2016): Schallschutz im Hochbau – Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung von Anforderungen, Juli 2016.
- Fischer M. (2010): Kalksandstein. Schallschutz – Bewertung und Bemessung. Düsseldorf: Bau + Technik.
- Nocke, C. (2014): Raumakustik im Alltag. Stuttgart: Fraunhofer IRB.
- Willems, W. M. (2013): Lehrbuch der Bauphysik. 7. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- DIN 4109-32 (2016): Schallschutz im Hochbau – Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Massivbau, Juli 2016.
- Fischer, H.-M., Freymuth, H., Häupl, P., Homann, M., Jenisch, R., Richter, E., Stohrer, M. (2008): Lehrbuch der Bauphysik. 6., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

AUTORIN UND AUTOREN



MARTIN ZERWAS
PROF. DIPL.-ING.

Professor für Bauphysik und Baukonstruktion an der Hochschule Koblenz



STEFAN MOCK
DIPL.-ING. (FH), M. ENG.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Fachrichtungen Bauphysik und Baukonstruktion an der Hochschule Koblenz



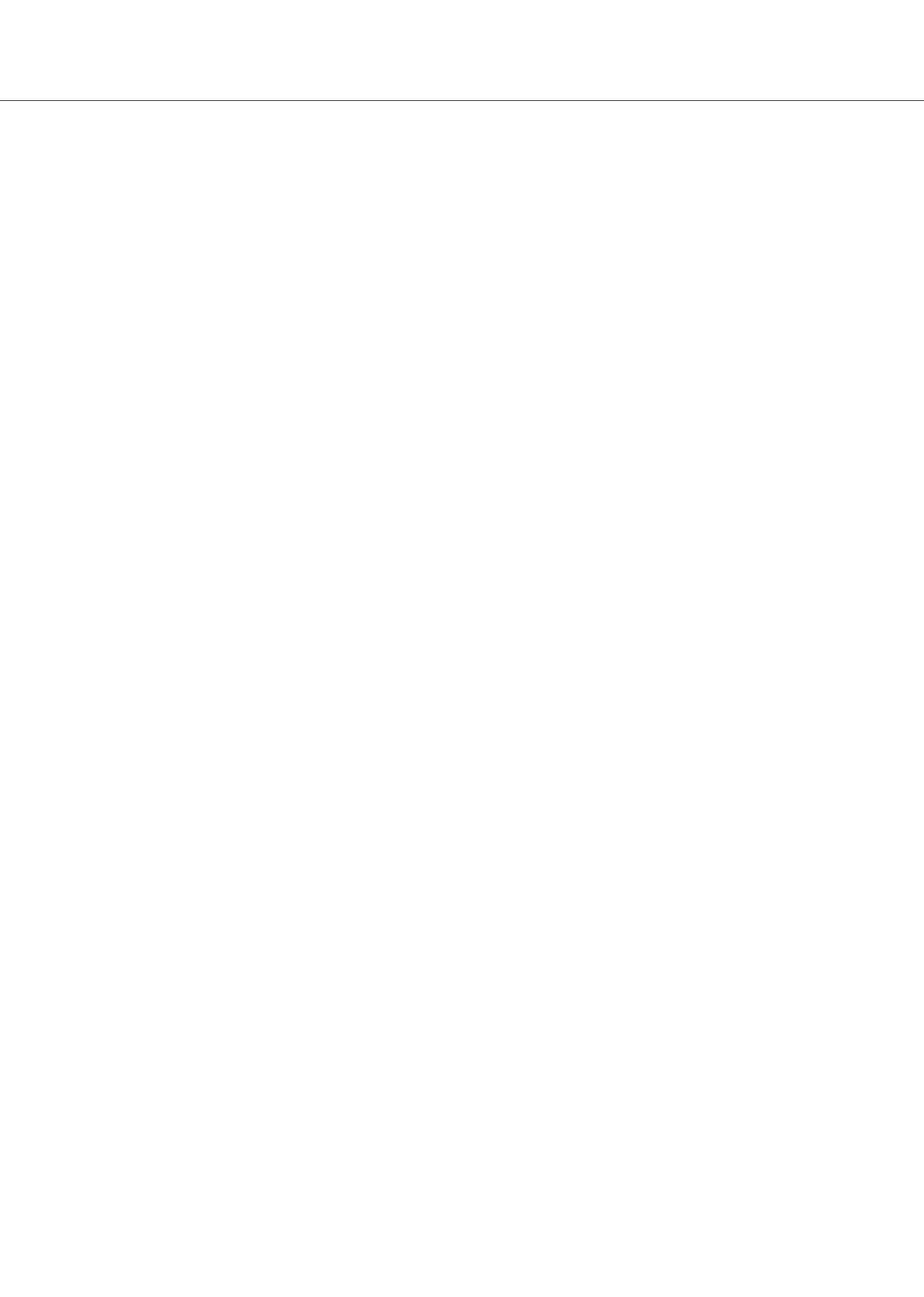
DIRK LAHR
B. ENG.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Fachrichtungen Bauphysik und Baukonstruktion an der Hochschule Koblenz



ANN-SOPHIE SCHUMACHER
B. ENG.

Wissenschaftliche Hilfskraft in den Fachrichtungen Bauphysik und Baukonstruktion an der Hochschule Koblenz



11 Luft-Leckagen und deren Beurteilung aus juristischer Sicht

Ulf Köpcke

11.1 EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG

Wärmeübertragende Gebäudehüllen müssen in Deutschland seit mehr als 40 Jahren dauerhaft luftundurchlässig ausgeführt werden. Heute schreibt das § 6 Abs. 1 S. 1 der Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) zwingend vor. Schon die am 01.01.1995 in Kraft getretene dritte Novelle der Wärmeschutzverordnung verlangte den Einbau einer „luftundurchlässigen Schicht über die gesamte Fläche“ der wärmeübertragenden Gebäudehülle. Die Wärmeschutzverordnung 1995 war damit die „ordnungsrechtliche Geburtsstunde“ der Luftdichtheitsebene von Gebäudehüllen in Deutschland (vgl. zur Gesetzgebungsgeschichte und m. w. Nachw. eingehend Köpcke 2012, 115-120). Seither gilt: Luftdicht ist Pflicht.

Trotzdem gibt es in den Bauämtern keine Luftdichtheitspolizei. Der Staat hat die Kontrolle dieser Pflicht nämlich faktisch ins Privatrecht delegiert: 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). Das gilt kauf- und mietrechtlich gleichermaßen.

Zivilrechtlich kann man sich streiten, man muss es aber nicht. Wird über eine Beanstandung der Luftdichtheit der Gebäudehülle verhandelt, sind die Vertragspartner grundsätzlich völlig frei darin, wie und mit welchem Ergebnis sie diese Verhandlungen beenden wollen. „Harte“ juristische Beurteilungs- und Bewertungskriterien sind erst gefragt, wenn der Streit in eine rechtsförmliche Auseinandersetzung mündet. Dann kommt dem schuldrechtlichen Fehlerbegriff zentrale

Bedeutung zu. Im Werkvertragsrecht, Kaufvertragsrecht und Mietrecht gilt gleichermaßen: Die Leistung ist dann mangelhaft, wenn die tatsächliche „Ist-Beschaffenheit“ der Werkleistung, Ware oder Räumlichkeit von der vertraglich geschuldeten „Soll-Beschaffenheit“ abweicht. Dabei ist es immer derjenige, der einen zivilrechtlichen Streit unter der Behauptung unzureichender Luftdichtheit der Gebäudehülle beginnt, der faktisch „festlegt“, welchen Beurteilungskriterien ein konkreter Luftdichtheitsstreit unterliegt. Die verschiedenen Wirkungsebenen der Luftdichtheit einer Gebäudehülle – insbesondere: Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz, Brandschutz, Behaglichkeit und Geruchsfreiheit, Schadstofffreiheit, Hygiene, Funktionsfähigkeit von Lüftungsanlagen (vgl. hierzu die übrigen Fachbeiträge im vorliegenden Forschungsbericht; außerdem Bolender/Weissmüller 2012) – bestimmen den Inhalt der jeweils juristisch relevanten Fragestellungen.

Zivilrechtlich wird aber in all diesen Fällen abstrakt immer die gleiche Ausgangsfrage gestellt: *Wer will was von wem aus welchem Rechtsgrund?*

Das ist deshalb auch die Leitlinie jeder juristischen Prüfung von Luftdichtheitsbauleistungen. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich im Wesentlichen auf das Werkvertragsrecht. Die Erläuterungen gelten aber zumindest im Grundsatz so auch im Kauf- und Mietrecht.

11.2 DER „HOHWACHTER LECKAGE-PEGEL“ ALS JURISTISCH BASIERTE ORIENTIERUNGSHILFE

Der vorliegende Beitrag ergänzt einen Forschungsbericht, der Baubeteiligten pragmatische Handlungsempfehlungen im Umgang mit Luft-Leckagen geben will. Dieser Praxisnähe fühlt sich auch der juristische Fachbeitrag verpflichtet. Die weiteren Ausführungen folgen deshalb dem Bauablauf und insbesondere dem zeitlichen

Ablauf jener Ereignisse, in denen baupraktisch Beurteilungen und Bewertungen von Luft-Leckagen typischerweise vorgenommen werden.

Diese Erörterungen werden ergänzt durch die zum vorliegenden Beitrag gehörende Tabelle 11.1. Diese Tabelle (nach dem Ort ihrer Erarbeitung benannt als „Hohwächter Leckagepegel“) ist nur eine **Orientierungshilfe**. Ihre Verwendung soll den Baupraktikern möglichst unkompliziert zielführende Hinweise dazu geben, welchen Umständen bei der Beurteilung von Luft-Leckagen im konkreten Einzelfall aus rechtlicher Sicht voraussichtlich besonderes Gewicht zukommen wird. Dafür nimmt die Tabelle sechs Kriterien in Bezug, die für die juristische Beurteilung von Luft-Leckagen in einer Gebäudehülle (aber sinngemäß auch von Baumängeln generell) von zentraler Bedeutung sind (Tabelle 11.1, Spalten 2-7). Jedes Kriterium kann mit ganzen Zahlen in der Skala von 0-6 „gewichtet“ werden. Ergibt sich in der Addition der so zu allen Kriterien vergebenen „Gewichtungswerte“ 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 „Gewichtungswert“ 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 tiefere Sachverhaltsermittlung besonders sinnvoll wäre. Denn die sechs Kriterien sind je für sich höchst unterschiedlicher Natur:

Das Kriterium „Gewichtung im Vertrag und in der Leistungsbeschreibung“ (Spalte 2) fragt nach der Genauigkeit, mit der die Luftdichtheitsanforderungen im Vertrag geregelt sind. Dieses Kriterium ist also rein juristischer Natur. Im Streitfall wäre eine sorgfälti-

ge Vertragsauslegung notwendig. Auch das zweite Kriterium „Relevanz der Leckage für den EnEV-Nachweis oder auch für die Einhaltung von Kreditbedingungen“ (Spalte 3) ist in diesem Sinne rein juristischer Natur; auch hier ist immer eine sorgfältige juristische Einzelfallprüfung geboten.

Rein naturwissenschaftlicher Natur sind demgegenüber das dritte und vierte Kriterium: Wird nach der „direkten und objektiven Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit“ (Spalte 4) oder nach dem „Risiko des Eintritts von Folgeschäden“ (Spalte 5) gefragt, sind dafür naturwissenschaftlich basierte Tatsachen festzustellen, deren Gewinnung und Erläuterung typische Tätigkeiten von Sachverständigen oder Messdienstleistern sind. Der Jurist kann diese Fragen nicht beantworten, obwohl sie später für die juristische Bewertung eminent wichtig werden (vgl. zu risikogeeigneten Bauleistungen insbes. OLG Stuttgart, Urt. v. 25.09.2012, Az. 10 U 34/12; BGH, Urt. v. 10.11.2005, Az. VII ZR 137/04).

Das fünfte Kriterium, welches zu den Leckagen nach deren „Vermeidbarkeit und dem Unterlassen gebotener Bedenkenanmeldung“ (Spalte 6) fragt, ist gemischter Natur. Es enthält sowohl juristisch wertende Elemente (z. B.: War eine Bedenkenanmeldung geboten? Welche Sorgfalt war geschuldet?), wie auch naturwissenschaftliche Aspekte (z. B.: Ist die in Rede stehende Leckage technisch überhaupt vermeidbar gewesen?).

Das sechste Kriterium schließlich, welches nach den „Sanierungskosten einschließlich etwaiger Vor- und Nacharbeiten“ (Spalte 7) fragt, hat zwar seinen Ausgangspunkt in dem rechtlichen Gesichtspunkt der möglichen Unverhältnismäßigkeit von Mängelbeseitigungskosten. Gleichwohl muss es durch naturwissenschaftliche und sachverständige Tatsachenfeststellungen ausgefüllt werden. Bei der Bearbeitung dieses Kriteriums in der Tabelle muss beachtet werden, dass hier die Skalierung etwas ungewohnt erfolgt, nämlich von „teuer nach billig“. Je höher die Sanierungskosten geschätzt werden, desto niedriger ist der tabellarische „Gewichtungswert“.

In der Tabelle 11.1 werden bereits verschiedene **Beispielfälle** exempla-

risch bewertet. Alle diese Beispielfälle tauchen so oder ähnlich in nahezu jeder Fachdiskussion über Luft-Leckagen auf. Zum **Beispielfall 1** ist zudem dargestellt, dass in einer erweiterten Fassung der Tabelle die entsprechenden „Gewichtungswerte“ auch jeweils gesondert für die Leistungsbereiche Planung, Bauleitung und Ausführung vergeben werden könnten. Hierdurch lassen sich zusätzlich Tendenzen für eine Haftungsquote der jeweiligen Beteiligten (nützlich etwa für Vergleichsverhandlungen) verdeutlichen. Wo bei den Beispielfällen als „Gewichtungswerte“ noch keine exakten Zahlen, sondern beispielsweise Werte wie „0-6“ angegeben sind, macht dies die Notwendigkeit weiterer Feststellungen und deren potentiell Gewichtung deutlich.

Nachdrücklich sei betont: Rechtliche Beurteilungen lassen sich nicht mathematisch ermitteln. Der „Hohwacher Leckagepegel“ produziert keine rechtlichen Ergebnisse in Zahlenwerten; er ist kein „Standgericht aus dem Taschenrechner“. Er ist eine Orientierungshilfe – nicht mehr, aber auch nicht weniger.

11.2.1 RECHTLICHE BEWERTUNG PLANUNGSBEDINGTER LUFTDICHTHEITSMÄNGEL

Luftdichtheit muss geplant werden. Es gilt das Prinzip der „durchgehenden roten Linie“ (vgl. z. B. Solcher 2015). Die Luftdichtheitsebene muss im Gebäudeschnitt in ununterbrochener Strichführung darstellbar sein (dargestellt z. B. auch in Bild 1 in DIN 4108-7 (2011)). Die DIN 4108-7 (2011) – wie jede DIN-Norm keine Rechtsnorm, sondern nur eine „private technische Regelung mit Empfehlungscharakter“ (vgl. BGH, Urt. v. 14.06.2007, Az. VII ZR 45/06; OLG Celle, Urt. v. 02.11.2011, Az. 14 U 52/11) – stellt eine Vielzahl tauglicher Prinzip- und Beispielskizzen zur Verfügung, aus denen die Planung einer luftdichten Gebäudehülle gut abgeleitet werden kann.

Fehler der Luftdichtheitsplanung werden in aller Regel schnell erkannt, denn jede Planung wird zwangsläufig durch Experten geprüft: die ausführenden Werkunternehmer. Es sind kaum planungsbedingte Fehlstellen der Luftdichtheitsebene vorstellbar, die einem achtsamen Ausführenden entgehen könnten. Eine umgehende

Bedenkenanmeldung ist dann dringend geboten (OLG Stuttgart, Urt. v. 15.04.2014, Az. 10 U 127/13). Ob erkannte Planungsfehler dem Bauherrn tatsächlich mitgeteilt werden, ist allerdings eine andere Frage. Meldet aber der ausführende Handwerker keine Bedenken an, gerät er neben dem planenden Architekten in die gesamtschuldnerische Haftung für die so bedingten Leckagen (vgl. Kleinmöller et al. 2014, § 15, Rn. 1002 ff.). Gibt es gar keine echte (Detail-)Planung für die Luftdichtheit, sondern nur vage Formeln im Leistungsverzeichnis (z. B.: „Dampfsperre/Luftdichtheitschicht: Verlegen gemäß Werkvorschrift und Richtlinien des ZVDH“), dann erfüllt der Architekt damit seinen Planungsauftrag sicher nicht (OLG Stuttgart, Urt. v. 15.04.2014, Az. 10 U 127/13). Übernimmt der ausführende Unternehmer jedoch die Detailplanung stillschweigend selbst (statt Bedenken wegen fehlender Planung anzumelden), haftet er für seine Konzeption wie ein Planer (OLG Celle, Urt. v. 21.10.2004, Az. 14 U 26/04).

Beim „schlüsselfertigen“ Erwerb vom Bauträger oder Generalunternehmer und beim Fertighausbau sind konkrete Festlegungen zu Lage, Art und Ausführung der Luftdichtheitsebene extrem selten. Verträge und Leistungsverzeichnisse werden häufig absichtsvoll vage gehalten. Das Bau-Soll ist dann schwer zu ermitteln. Allerdings verkennen die Verwender solch nebulöser Leistungsbeschreibungen oft, dass es für die rechtliche Bewertung im Streitfall entscheidend auch darauf ankommt, was der Erwerber als stillschweigend versprochen erwarten durfte. Die einschlägige Rechtsprechung setzt bei Luftdichtheitsmängeln von Wohngebäuden sehr pragmatisch an der Erfahrungswelt der Erwerber und Nutzer an. Für das Oberlandesgericht Karlsruhe war in seinem Urteil vom 08.05.2015 (Az. 14 U 127/13; vgl. **Beispielfall 4** im „Leckagepegel“) selbstverständlich: *„Der Besteller eines Fertighauses muss ohne besonderen Hinweis oder Vereinbarung nicht davon ausgehen, dass er selbst mit Maßnahmen des Innenausbaus – hier: Verfugen und Spachteln – Eigenschaften, die die Gebäudehülle haben muss (DIN 4108-2, -3), 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. Mit recht ähnlicher Begründung nahm das AG Brandenburg (Urt. v. 28.06.2013, Az. 31 C 279/11) einen Mieter in Schutz, der wegen Zuglufterscheinungen die Miete gemindert hatte und sich dann dem Vorwurf des Vermieters ausgesetzt sah, der Mieter habe die Zugluft doch selbst verursacht: „Zudem darf ein Mieter auch ein Loch in eine Decke bohren, um dort eine Lampe anzubringen, ohne dass derartige Dübellocher gleich zu derartigen Zuglufterscheinungen führen.“

11.2.2 RECHTLICH SACHGERECHTER UMGANG MIT LUFTDICHTHEITSMÄNGELN BEI BAU-ÜBERWACHUNG UND BAUBEGLEITENDER QUALITÄTSSICHERUNG

Baubegleitende Qualitätskontrolle schafft frühzeitig Klarheit. Wird sofort nach Fertigstellung der Luftdichtheitsebene eine differenzdruckgestützte Leckagesuche durchgeführt, kommt es erfahrungsgemäß kaum einmal zu massivem Streit über dabei festgestellte Fehlstellen. Der Streit entsteht meist deshalb gar nicht erst, weil die ermittelten Leckagen in aller Regel mit wirtschaftlich äußerst geringem Aufwand und in der Ausführung einfach beseitigt werden können (vgl. **Beispielfall 5** in Tabelle 11.1: Das Verschließen der entstandenen Löcher in der Folie, nötigenfalls die Korrektur der Folienbefestigung und sogar das Überkleben der Tackernadeln kosten wenig und sind schnell erledigt).

Hinzu kommt: Die einschlägige Rechtsprechung ist mittlerweile streng. Finden sich an Anschlüssen und Überlappungen der Folie viele 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 späteren Schadens in sich birgt, den Schadenseintritt nicht erst ab-

warten (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).

Gerade die frühzeitigen Kontrollen der Luftdichtheitsebene verdeutlichen außerdem sehr gut, wie mit so genannten „Restleckagen“ rechtlich richtig umzugehen ist: Das Zivilrecht kennt keine Grenzwerte, bei deren Einhaltung handwerklicher Pfusch etwa kein Mangel mehr wäre. Die häufig – und sehr häufig: falsch! – zitierte „Lehre von den hinzunehmenden Unregelmäßigkeiten im Bauwesen“ (vgl. Liebheit 2015, 65 ff.; Köpcke 2015b; jeweils m. w. Nachw.) wird von der herrschenden Meinung in Rechtsprechung und Literatur nämlich nur deshalb akzeptiert, weil es sich bei dieser Art von „Unregelmäßigkeiten“ immer um solche handelt, die *technisch unvermeidbar* sind. Das ist ein Wesensmerkmal der Definition der „hinzunehmenden Unregelmäßigkeit“. Zur Verdeutlichung: Holzwerkstoffplatten sind unterschiedlich luftdicht, aber wohl nie vollständig dicht. Diese Luftdurchlässigkeit ist bei solchen Materialien technisch unvermeidbar. Trotzdem kann das Material bei fachgerechter Planung unproblematisch als funktionstüchtige Luftdichtheitsebene der Gebäudehülle verwendet werden.

Das bedeutet im Umkehrschluss aber auch: Alle technisch vermeidbaren „Restleckagen“ sind selbstverständlich niemals hinzunehmen, sondern ausnahmslos als Fehler der Werkleistung zu behandeln. Und der Fehler, der aus Anlass baubegleitender Qualitätskontrolle sofort und „ohne Murren“ beseitigt wird, wird natürlich nicht dadurch geheilt, dass er mit Gipskarton überbaut und deshalb „unsichtbar“ wird (vgl. dazu sehr einschlägig OLG Köln, Urt. v. 13.03.2013, Az. 16 U 123/12). Erst recht wird diese Betrachtungsweise plausibel, wenn man bedenkt: Handwerklicher „Pfusch“ rechtfertigt stets den Vorwurf zumindest fahrlässiger und damit schuldhafter Begehung. Zur Mängelbeseitigung ist jeder Werkunternehmer aber schon verschuldensunabhängig verpflichtet. Trifft ihn an der Schlechtleistung sogar ein Verschulden, haftet er auch für über die

Mängelbeseitigung hinausgehenden Schadensersatz. Es gibt deshalb rechtlich nicht den geringsten Grund für die Erwägung, durch fahrlässigen Pfusch verursachte Mängel etwa als „hinzunehmende Unregelmäßigkeit“ anzuerkennen. Insoweit kennt der zivilrechtliche Fehlerbegriff keine Toleranzen (vgl. Köpcke 2015b; Werner/Pastor 2015, Rn. 2102; jeweils m. w. Nachw.). Die Suche nach „Luftdichtheittoleranzen“ wäre deshalb juristisch von vornherein ein Irrweg.

Als Rechtsregel, die einem wegen eines Baumangels eigentlich begründeten Mängelbeseitigungsanspruch ausnahmsweise (!) entgegengehalten werden kann, anerkennt das deutsche Recht nur den in § 242 BGB fundamental verankerten Grundsatz von „Treu und Glauben“, wonach alle Rechtsverhältnisse fair und rücksichtsvoll abzuwickeln sind. Dazu gehört auch das Verbot, formal begründete Rechtspositionen dem Vertragspartner gegenüber in unverhältnismäßig „kleinlicher“ Weise geltend zu machen. Für das Kauf- und Werkvertragsrecht ist dieser Grundsatz speziell in §§ 439 Abs. 3, 635 Abs. 3 BGB normiert. Der Auftragnehmer kann die Nachbesserung einer mangelhaften Bauleistung aber auch 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). Je stärker sich der Werkunternehmer aber sogar einen Verschuldensvorwurf gefallen lassen muss, desto eher ist ihm der Unverhältnismäßigkeitseinspruch versagt (BGH, Urt. v. 10.11.2005, Az. VII ZR 64/04). Im **Beispielfall 3** des „Leckagepegels“ wird man eine Unverhältnismäßigkeit diskutieren können, auch wenn der fehlerhafte Anschluss des Fenstertürelements handwerklich sicher vermeidbar war.

Der baubegleitenden Qualitätssicherung kommt noch aus einem weiteren Grunde rechtlich große Bedeutung zu: Zu allen Bauleistungen, die der „Abdichtung“ (egal wogegen!) eines

Tabelle 11.1: „Hohwachter Leckagepegel“

	rein juristisches Kriterium		naturwissenschaftlich zu ermitteln		juristisch-naturwissenschaftlich	naturwissenschaftlich zu ermitteln	„Summe“ bzw. Tendenz						
	Gewichtung in Vertrag/Leistungsbeschreibung	Relevanz für EnEV-Nachweis, Finanzierung usw.	direkte objektive Beeinträchtigung der Gebrauchstaugl.	Risiko des Eintritts von Folgeschäden	Vermeidbarkeit (einschl. Bedenkenanmeldung)	Sanierungskosten (einschl. Vor- und Nacharbeiten)							
								irrelev. → unverzichtb.	gering → hoch	gering → hoch	gering → hoch	gering → hoch	teuer → billig
								Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6
							(≥ 6: rechtliche Bewertung als Mangel nahelegend)						
Objekt	Einfamilienhaus in Passivhausstandard, fertiggestellt						FALL 1						
Symptom	Luftwechselrate n_{50} von $0,7 \text{ h}^{-1}$, vertragliche Vereinbarung „Passivhaus“, somit $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$, keine Einzelleckage feststellbar												
allgemein	6	0-6	1	0	4	0-6	11-23						
speziell													
Planung	6	0-6	0-1	0	0-4	0-6	6-23						
Bauleitung	6	0-6	1	0	4	0-6	11-23						
Ausführung	6	0	0-1	0	0-4	0-6	6-17						
							sicher > 6 = Mangel						
Objekt	Mehrfamilienhaus, Wohnungseigentumsanlage, 4 Vollgeschosse, 12 Einheiten, mit Lüftungsanlage, Luftdichtheitsbonus für EnEV-Nachweis notwendig						FALL 2						
Symptom	Normmessung nach DIN EN 13829 bei Abnahme Gemeinschaftseigentum ergibt Luftwechselrate n_{50} von $1,7 \text{ h}^{-1}$												
allgemein	0-6	6	0	0-6	4	1	11-23						
							sicher > 6 = Mangel						
Objekt	Einfamilienhaus, Architektenbau, Erdgeschoss und Dachgeschoss, Dachspitz für Ausbau vorbereitet, ohne Lüftungsanlage, schlichte Ausstattung, Luftwechselrate n_{50} von $1,4 \text{ h}^{-1}$ bei einer Schlussmessung ermittelt						FALL 3						
Symptom	bei Leckageortung spürbarer Lufteintritt Anschluss Fenstertür Erdgeschoss (Terrassenaustritt) / Fußboden (mit Fußbodenheizung)												
allgemein	0	0	0-1	0-1	4	1	5-7						
							fraglich > 6 = Mangel?						
Fazit: Leckage kann technisch hingenommen werden, muss es juristisch wegen guter Vermeidbarkeit aber eigentlich nicht! Das Prozessrisiko ist für alle (!) Beteiligten kaum kalkulierbar.													

Fortsetzung Tabelle 11.1: „Hohwacher Leckagepegel“

	rein juristisches Kriterium		naturwissenschaftlich zu ermitteln		juristisch-naturwissenschaftlich	naturwissenschaftlich zu ermitteln	„Summe“ bzw. Tendenz
	Gewichtung in Vertrag/Leistungsbeschreibung	Relevanz für EnEV-Nachweis, Finanzierung usw.	direkte objektive Beeinträchtigung der Gebrauchstaugl.	Risiko des Eintritts von Folgeschäden	Vermeidbarkeit (einschl. Bedenkenanmeldung)	Sanierungskosten (einschl. Vor- und Nacharbeiten)	
	irrelev. → unverzichtb.	gering → hoch	gering → hoch	gering → hoch	gering → hoch	teuer → billig	
	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	Wertung 0 bis 6	
Objekt	Einfamilienhaus, Fertighaus, Holztafelbauweise, Erdgeschoss, Dachgeschoss und Dachspitz, ohne Lüftungsanlage, schlichte Ausstattung, Luftwechselrate 1,9 h ⁻¹ , Malerarbeiten innen einschließlich Spachteln/Verfugen der Gipskartonplatten als Eigenleistung der privaten Bauherrschaft vereinbart und ausgeführt						FALL 4
Symptom	starker Lufteintritt bei Unterdruck an Fugen im Dachgeschoss an der Bekleidung zwischen Wand/Fußboden und Wand/Decke, lokale Bauteilöffnungen offenbaren fehlende bzw. grob fehlerhafte Anschlüsse der PE-Folie an Kehlbalkenlage (vgl. OLG Karlsruhe, Urt. v. 08.05.2015, Az. 14 U 127/13)						
allgemein	0	0-6	3	4	6	3	16-22
							deutlich > 6 = Mangel!
Objekt	Einfamilienhaus, Neubau, Steildach mit Zwischensparrendämmung, feuchteadaptive Folie raumseitig als Dampfbremse und Luftdichtheitsebene angebracht						FALL 5
Symptom	Leckageortung im Dach als baubegleitende Qualitätssicherung sofort nach Folienverlegung, bei einem Unterdruck von ca. 50 Pascal wölbt sich die Folie nach innen und reißt an einem Sparren an drei zur Befestigung verwendeten Tackernadeln aus, alle Tackernadeln unverklebt						
allgemein	0	0	0	0-6	6	6	12-18
							deutlich > 6 = Mangel!
Objekt	Einfamilienhaus, Neubau, Steildach mit Zwischensparrendämmung, feuchteadaptive Folie raumseitig als Dampfbremse und Luftdichtheitsebene angebracht						FALL 6
Symptom	Schlussmessung nach DIN EN 13829 bei Abnahme mit Luftwechselrate n ₅₀ von 0,7 h ⁻¹ , der private Bauherr legt Fotos vom Beginn der Anbringung der raumseitigen Beplankung vor, auf denen alle Tackernadeln in der feuchteadaptive Folie erkennbar unverklebt sind						
allgemein	0-6	0	0	0-6	6	0	6-18
							≥ 6 = Mangel?
	Fazit: Bei klarer Festlegung in der Leistungsbeschreibung (Verklebung Tackernadeln beauftragt oder nicht) wäre der Fall rechtlich zweifelsfrei zu entscheiden. Ohne konkreten Schadenseintritt (hier: Leckagen wegen ausgerissener Folie) kein Mangel. So aber hohes Prozessrisiko, vor allem für den Bauherrn, wobei als Risiko auch nicht ausgeschlossen werden kann, dass das Gericht einen Sachverständigen beauftragt, der prinzipiell jede nicht überklebte Tackernadeldurchdringung als Fehler bezeichnet.						

Gebäudes dienen, verlangt die Rechtsprechung eine besonders gründliche und insgesamt gesteigerte Bauüberwachung (OLG Köln, Urt. v. 13.03.2013, Az. 16 U 123/12). Das gilt insbesondere für alle mit der Herstellung der Luftdichtheit und Wärmedämmung verbundenen Arbeiten. Das Haftungsrisiko ist also bei unzureichender Kontrolle aller „Luftdichtheitsarbeiten“ sehr hoch. Auch droht die gesamtschuldnerische Haftung zusammen mit weiteren Baubeteiligten. Im **Beispielsfall 1** des „Leckagepegels“ wird für Planung, Bauleitung und Ausführung je einzeln eine ergänzende Bewertung vorgenommen. Danach ist die Haftung der Bauleitung für den eindeutigen Mangel der Werkleistung (Verfehlung des im Vertrag als unverzichtbar vereinbarten Passivhausstandards mit einer Luftwechselrate n_{50} von höchstens $0,6 \text{ h}^{-1}$) gesteigert wahrscheinlich, während sich für den Planer und den ausführenden Werkunternehmer noch ganz erhebliche Änderungen der „Haftungsquoten“ ergeben können, je nachdem, zu welchen Ergebnissen eine detaillierte Sachverhaltsaufklärung führen würde.

11.2.3 BEURTEILUNG UND BEWERTUNG DER LUFTDICHTHEIT BEI ABNAHME

Die werkvertragsrechtliche Bauabnahme wird häufig mit der Durchführung einer normgerechten Luftdichtheitsprüfung nach DIN EN 13829 (2001) kombiniert. Anlass und Zweck der normgemäßen Messung sind jedoch eigentlich öffentlich-rechtlicher (oder auch kreditrechtlicher) Natur, nicht aber die werkvertragsrechtliche Überprüfung der erbrachten Bauqualität. Es lohnt, beides zu unterscheiden.

11.2.3.1 RECHTLICHE BEDEUTUNG DER LUFTDICHTHEITSPRÜFUNG NACH DIN EN 13829 (2001) – UND „GROSSE“ ODER KEINE LECKAGEN IN IHRER PROTOKOLLIERUNG

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 (2001) und im Verfahren B durchgeführte Dichtheitsprüfung mit dem Ergebnis der Einhaltung der in EnEV Anlage 4 ausgewiesenen Grenz-

werte der n_{50} -Luftwechselrate von höchstens $3,0 \text{ h}^{-1}$ bei Gebäuden ohne raumlufttechnische Anlagen und $1,5 \text{ h}^{-1}$ bei Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen zwingend erforderlich (vgl. zum Messverfahren Rolfsmeier 2015). Im **Beispielsfall 2** des „Leckagepegels“ führt die Überschreitung des Grenzwertes von $1,5 \text{ h}^{-1}$ zwingend zur Feststellung des Mangels. Damit darf aber nie verwechselt werden:

Keinesfalls kann durch Einhaltung der Grenzwerte aus der EnEV Anlage 4 die Fehlerfreiheit der Luftdichtheitsebene der Gebäudehülle abgeleitet werden. Ein solcher Nachweis ist weder Regelungsgegenstand der Energieeinsparverordnung noch der DIN 4108-7 (2011) - (vgl. dazu eingehend jeweils m. w. Nachw. Köpcke 2012, 119 f.; Böhmer et al. 2011, 36).

Dass die DIN EN 13829 mittlerweile als nationale Norm vom DIN zurückgezogen und durch die europäische Norm EN ISO 9972 (2015) ersetzt wurde, ändert nichts daran, dass für Messungen nach § 6 Abs. 1 S. 2 EnEV weiterhin nur die DIN EN 13829 (2001) anwendbar bleibt.

Messunternehmer beklagen recht häufig, dass die DIN EN 13829 (2001) ihnen die Dokumentation „großer“ Leckagen abverlangt, obwohl in der Norm nicht geregelt ist, wann eine Leckage in diesem Sinne „groß“ sein und wie deren Dokumentation erfolgen soll. Nicht selten fürchten Messunternehmer gar eine Haftung für nicht dokumentierte Leckagen. Aus juristischer Sicht ist hierzu anzumerken:

Anwendungsbereich der DIN EN 13829 (2001) ist nicht die Leckageortung, sondern die „Luftdurchlässigkeitsmessung der Hülle von Gebäuden oder Gebäudeteilen vor Ort“. Nach Ziffer 7 der Norm gehört der Hinweis auf vorgefundene Leckagen grundsätzlich nicht einmal zu den Angaben, die im Prüfbericht mindestens enthalten sein müssen. Vielmehr wird die Dokumentation „großer“ Leckagen nur in Ziffer 5.3.1 der Norm verlangt (vgl. Böhmer et al. 2011, 27 ff.). Diese Regelung dient jedoch erkennbar nicht der Leckagesuche, sondern der Sicherstellung normgemäßer Rahmenbedingungen für die Messung. Vorrangig sollen die im

Rahmen der Gebäudepräparation hergestellten Abdichtungen kontrolliert und nötigenfalls nachgebessert werden. „Große“ Leckagen können das Messergebnis ähnlich entscheidend beeinflussen wie eine fehlerhafte Gebäudepräparation. Deshalb sind auch sie im Abschnitt 5.3.1 der Norm, in welchem die Vorbereitung der eigentlichen Messung geregelt ist, erwähnt. Die Dokumentation „großer“ Leckagen dient also der Qualitätssicherung der Messung, nicht aber der Qualitätssicherung der Gebäudehülle. Gerade weil die Norm selbst keine Hinweise dazu enthält, wann eine Leckage als „groß“ gelten soll, ist Messunternehmern zu empfehlen, sich auf den Zweck der im Abschnitt 5.3.1 geregelten Vorbereitung zu besinnen. Rücken damit Qualitätssicherung der Messung und die Selbstkontrolle der Messunternehmer in den Vordergrund, erscheint die Aufnahme der bei der Vorbereitung mit einfachen Mitteln (z. B. Hand) wahrgenommenen Leckagen in den Prüfbericht geboten oder zumindest sehr empfehlenswert. Denn hierdurch wird die Plausibilität des Prüfberichtes und der in ihm dokumentierten Messergebnisse erhöht, was den Prüfbericht für Dritte gut nachvollziehbar macht (vgl. Vogel/Köpcke 2015, 23 f.). Das wiederum ist gerade deshalb sehr wünschenswert, weil es für die „echte Grenzwertkontrolle“ nach DIN EN 13829 (2001) an sich keine Rolle spielt, ob eine Grenzwertüberschreitung auf einer einzigen „großen“ Leckage oder einer Vielzahl „kleiner“ Fehlstellen beruht.

11.2.3.2 SYMPTOMORIENTIERTE LECKAGESUCHE ALS TEIL DER WERKVERTRAGSRECHTLICHEN ABNAHMEPRÜFUNG

Die werkvertragsrechtliche Abnahme geht dem abschließenden Austausch der gegenseitigen vertraglichen Hauptleistungen (Herstellung und Überlassung der funktionstauglichen Werkleistung im Austausch gegen die Entrichtung der grundsätzlich erst nach Abnahme zahlungsfälligen Vergütung) unmittelbar voraus. Die Prüfung der Beschaffenheit und der Funktionstauglichkeit der Werkleistung durch den Besteller ist der eigentliche Inhalt der Abnahme (vgl. BGH, Urt. v. 25.02.2016, Az. VII ZR 210/13; Palandt/Sprau 2016, Rn. 3 ff. zu § 640 BGB; Kleine-Möller et al. 2014, § 14, Rn. 2 ff., 154; Werner/Pas-

tor 2015, Rn. 1798 ff.). Der Besteller muss entscheiden, ob er die Leistung als im Wesentlichen vertragsgerecht akzeptiert und ob er Mängel der Werkleistung bei der Abnahme rügen will. Was bekannt ist und bei Abnahme nicht beanstandet wird, kann gemäß § 640 Abs. 2 BGB später nicht mehr als Werkmangel gerügt werden (vgl. Palandt/Sprau 2016, Rn. 13 zu § 640 BGB; Kleine-Möller et al. 2014, § 14, Rn. 165 ff.).

Für diese Beurteilung ist der sog. „subjektive Fehlerbegriff“ maßgeblich. Hiernach liegt ein Fehler der geschuldeten Werkleistung nicht nur bei beeinträchtigter Funktionstauglichkeit (die allerdings muss ausnahmslos gegeben sein; vgl. OLG Celle, Urteil vom 16.05.2013, Az. 13 U 11/09; Palandt/Sprau 2016, Rn. 5 zu § 633 BGB; Werner/Pastor 2015, Rn. 1964), sondern schon dann vor, wenn deren Ist-Beschaffenheit von der vertraglich geschuldeten Soll-Beschaffenheit abweicht. Die differenzdruckgestützte Leckagesuche ist eine aufwändige, aber effektive Methode, die Luftdichtheitsqualität der Gebäudehülle bei der Abnahme zu prüfen (Böhmer et al. 2011, 70; Köpcke 2015a, 88 f.; vgl. Vogel/Köpcke 2015, 26 f.). Ihre Ergebnisse beschreiben den nach Fertigstellung des Gebäudes erreichten Ist-Zustand. Dass nach Fertigstellung des Gebäudes eine solche Leckagesuche ganz überwiegend nur sekundäre Leckagen anzeigen wird, ist wegen der für die Mängelrüge maßgeblichen Symptomtheorie (dazu eingehender unten) rechtlich unschädlich. Ob der bauliche Ist-Zustand vom geschuldeten Bau-Soll abweicht, ist mittels eines dreistufigen Prüfschemas festzustellen. Dabei haben die zwischen den Beteiligten vereinbarten Qualitätskriterien absoluten Vorrang (eben deshalb: „subjektiver“ Fehlerbegriff). Nach dem dreistufigen Prüfschema des Bundesgerichtshofs ist – und das genau in dieser Reihenfolge! – zu fragen (Köpcke 2012, 124–126; Werner/Pastor 2015, Rn. 1962 ff.):

Stufe 1:

Wurde im Vertrag die Soll-Beschaffenheit exakt beschrieben? Zu berücksichtigen sind dabei auch Pläne, Ausschreibungsunterlagen, Leistungsverzeichnisse, Musterskizzen, allgemeine Vertragsbedingungen und ähnliche vertragsrechtlich relevanten Vorgänge (OLG Düsseldorf, Urte. v. 21.11.2014,

Az. 22 U 37/14). Liegt eine exakte vertragliche Vereinbarung vor, ist der zur Mängelbewertung notwendige Vergleich zwischen Soll und Ist ausschließlich nach diesem Bewertungsmaßstab vorzunehmen. Erweist sich die Leistung danach als mangelhaft, ist die Prüfung abgeschlossen; auf die weiteren Stufen des Prüfschemas kommt es nicht mehr an. Das gilt auch, wenn die Abweichung von der vereinbarten Beschaffenheit nicht zu einer Beeinträchtigung des Werts oder der Gebrauchstauglichkeit des Werks führt (BGH, Beschl. v. 30.07.2015, Az. VII ZR 70/14; Werner/Pastor 2015, Rn. 1963).

Stufe 2:

Haben die Vertragsparteien keine exakte Beschaffenheitsvereinbarung getroffen, kommt es darauf an, ob die Ist-Beschaffenheit von der von beiden Parteien stillschweigend vorausgesetzten Gebrauchstauglichkeit und Beschaffenheit abweicht. Wieder hat das von den Vertragspartnern subjektiv Gewollte und Vereinbarte höchste Priorität (BGH, Urte. v. 21.11.2013, Az. VII ZR 275/12; Urte. v. 14.06.2007, Az. VII ZR 45/06; Werner/Pastor 2015, Rn. 1963).

Stufe 3:

Nur und erst dann, wenn sich eine Mangelhaftigkeit der Werkleistung auf den ersten beiden Stufen noch nicht feststellen lassen, ist auf der dritten Stufe zu prüfen, ob das Werk die für solche Werke allgemein übliche Beschaffenheit und Gebrauchstauglichkeit aufweist. Erst dann rücken rein objektive Kriterien, die sich insbesondere aus den allgemein anerkannten Regeln der Technik, DIN-Normen und anderen technischen Regelwerken ergeben können, in den Vordergrund der Beurteilung.

Nur aus der vertraglich geschuldeten Soll-Beschaffenheit ergibt sich also, nach welchen Kriterien die objektive Ist-Beschaffenheit der in Rede stehenden Bauleistung überhaupt beurteilt werden soll. Ohne vorausgegangene Klärung des geschuldeten Bau-Solls lassen sich die Beweisfragen, die etwa durch ein Sachverständigengutachten geklärt werden sollen, kaum richtig formulieren (vgl. Liebheit 2015, 62). Und erst nach der notwendigen Sachverhaltsfeststellung kann dann der wertende Vergleich zwischen Ist und Soll durchgeführt

werden und damit eine rechtliche Beurteilung der Fehlerhaftigkeit der Werkleistung erfolgen.

Bei der Abnahme bietet der Werkunternehmer dem Besteller die geschuldete Hauptleistung als im Wesentlichen vertragsgerecht erbracht zur Übergabe an. Häufig sind vertragliche Leistungsbeschreibungen aber nicht wirklich konkret. Eindeutige Festlegungen zu Konstruktion und Ausführung der Luftdichtheitsebene sind selten. Gerade bei nur vagen Leistungsbeschreibungen hat die Abnahme eminent wichtige Bedeutung: Denn der Werkunternehmer konkretisiert mit dem von ihm als abnahmefähig bezeichneten Werk, wie er diese Unschärfen in der Leistungsbeschreibung als aus seiner Sicht vertragsgerecht ausgefüllt wissen will. Nimmt der Besteller eine in der Leistungsbeschreibung noch nicht konkretisierte Ausführungsart bei der Abnahme als vertragsgerecht an, so manifestiert dies dauerhaft das zwischen den Parteien geltende Bau-Soll. Beide Parteien können dann bei späteren Streitigkeiten nicht mehr geltend machen, die unkonkrete Leistungsbeschreibung hätte auch eine ganz andere Art der Ausführung erlaubt oder geboten. In seinem Urteil vom 08.05.2015 (Az. 14 U 127/13; **Beispielfall 4** im „Leckagepegel“) hob das Oberlandesgericht Karlsruhe entscheidend auf den berechtigten Erwartungshorizont der Erwerber (vgl. oben 11.2.1) ab; darüber hinaus genügte dem Gericht die sachverständige Feststellung, dass die eingebaute PE-Folie objektiv sowohl die Funktion der Dampfbremse wie auch der luftdichten Ebene erfüllen könne, um den Erwerbern einen Kostenvorschuss für die Mangelbeseitigung an der PE-Folie (also an den primären Leckagen) zuzusprechen.

Für die Abnahmeprüfung kommt der sog. „Symptomrechtsprechung“ des Bundesgerichtshofs herausragende Bedeutung zu (vgl. BGH, Urte. v. 06.10.1988, Az. VII ZR 227/87; Urte. v. 26.03.1992, Az. VII ZR 258/90; Urte. v. 09.10.2008, Az. VII ZR 80/07; OLG Celle, Teilurte. v. 02.06.2010, Az. 14 U 205/03; Werner/Pastor 2015, Rn. 1980, 2153; speziell zur Luftdichtheit der Gebäudehülle OLG Karlsruhe, Urte. v. 08.05.2015, Az. 14 U 127/13): Hiernach erhebt der Besteller eine rechtlich wirksame, also umfassend auf

den eigentlichen Mangel und dessen wirkliche Ursachen bezogene Mängelrüge schon dann, wenn er den Mangel nur anhand feststellbarer und vom Besteller erkannter Symptome beschreibt. Es bleibt dann Sache des Unternehmers, die wirkliche Ursache des vom Besteller rein symptomatisch beschriebenen Mangels zu ermitteln und eine auch die Mangelursache fachgerecht beseitigende Nacherfüllung vorzunehmen. Speziell Luftdichtheitsmängel werden bei der Abnahme in aller Regel symptomatisch ausreichend durch die Benennung sekundärer Leckagen gerügt. Trotzdem darf sich der Werkunternehmer dann nicht mit kaschierender Kosmetik der sekundären Leckagen mittels Acryl, Schaum oder Silikon begnügen.

11.2.4 RECHTLICHE ASPEKTE DER LUFTDICHTHEITSPRÜFUNG KURZ VOR ABLAUF DER GEWÄHRLEISTUNGSFRIST

Die Prüfung der Luftdichtheit einer Gebäudehülle kurz vor Ablauf der vertraglichen Gewährleistungsfrist wird immer häufiger in Auftrag gegeben. Für die dann in Rede stehende zivilrechtliche Beurteilung gelten derselbe Fehlerbegriff und dasselbe Prüfschema, wie bereits im Zusammenhang der Abnahmeprüfung erläutert. Allerdings liegt nun die Beweislast für das Vorliegen von Mängeln beim Besteller bzw. Erwerber des jeweiligen Gebäudes. Im Zusammenhang solcher Prüfungen treten häufig extrem heikle Rechtsprobleme auf, ganz besonders gilt das für Wohnungseigentümergeinschaften. Diese Rechtsprobleme sind nicht Thema des vorliegenden Beitrags. Messunternehmern und Privatgutachtern sei hier gleichwohl dringend empfohlen, sich bei solchen Untersuchungen nicht in das Risiko eigener Beratungshaftung außerhalb ihrer eigenen Fachkompetenz zu begeben.

11.2.5 RECHTLICHE ASPEKTE DER PRÜFUNG DER LUFTDICHTHEIT NACH SCHA-DENSEINTRITT

Haben Mängel der Luftdichtheitsebene einer Gebäudehülle bereits zu Bauschäden geführt, hängt es erneut ganz entscheidend von den jeweiligen juristischen Rahmenbedingungen ab, ob und mit welcher Zielsetzung die Luftdichtheitsebene naturwissenschaftlich überprüft werden soll. Benötigt wird dann echte Sachverständigentätigkeit, die unter höchst individuellen Fragestellungen denkbar

ist. Jeder, der nach bereits eingetretenem Bauschaden als „Luftdichtheits-Experte“ zu Rate gezogen wird, sollte zur Vermeidung eigener Haftung selbstkritisch und sehr genau prüfen,

- ob die gutachterlich zu beantwortende Fragestellung eindeutig und naturwissenschaftlich zielführend formuliert ist,
- ob er über die zur Erstattung des verlangten Gutachtens notwendige Sachkunde und auch über die notwendige technische Ausstattung verfügt und
- ob die zur fachgerechten Erstattung eines solchen Gutachtens notwendigen Rahmenbedingungen gewährleistet sind (z. B. Verfügbarkeit von Bauplänen, Betretungsrechte, Gestattung, Durchführung und Kostentragung von Bauteilöffnungen, angemessene Honorierung u. a. m.).

11.3 ERGEBNIS: JURISTISCH BEGRÜNDETE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Feststellung und Bewertung von Leckagen in der Luftdichtheitsebene einer Gebäudehülle erfolgen immer in einem spezifischen sozialen Kontext. Der Kontext gibt die Bewertungskriterien vor. Beispielsweise wird sich die naturwissenschaftliche Forschung höchst unterschiedlicher Bewertungskriterien bedienen, je nachdem ob sie sich mit der Wirkungsweise von Luft-Leckagen im Zusammenhang des Feuchteschutzes in Schwimmbädern, des Schallschutzes in Konzertsälen und Musikhochschulen oder etwa der Hygiene in Krankenhäusern befasst. Die juristische Bewertung von Luft-Leckagen ist also nur eine von vielen Fragestellungen. 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 Luft-Leckagen 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 Luft-Leckagen relevanten Anknüpfungstat-sachen sind die Juristen in erhebli-

chem Umfang auf die Zuarbeit von Sachverständigen, Ingenieuren, Messdienstleistern und Naturwissenschaftlern angewiesen. Nicht wenige der typisch juristischen Bewertungskriterien sind aber eben diesen Ingenieuren, Messdienstleistern und Naturwissenschaftlern eher fremd; den juristischen Beurteilungsmaßstab zu akzeptieren, fällt ihnen häufig schwer. Trotzdem ist Zusammenarbeit unerlässlich. Und das Kooperationsergebnis interdisziplinärer Zusammenarbeit fällt immer umso qualifizierter aus, je stärker sich die beteiligten Disziplinen während der Zusammenarbeit auf ihre jeweiligen Aufgaben und Kompetenzbereiche besinnen und beschränken.

Die konsequente Orientierung an den sechs Prüfungskriterien, die für die spezifisch juristische Beurteilung und Bewertung von Luft-Leckagen zentrale Bedeutung haben (und die deshalb auch Gegenstand des „Hohwacher Leckagepegels“ sind), ist gerade für die Baupraxis zielführend. Die aus der Betrachtung dieser sechs Prüfungskriterien folgende Arbeitsteilung und das Bewusstsein über das je nach Einzelfall höchst unterschiedliche Zusammenwirken dieser Prüfungskriterien erscheinen geeignet, die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der juristischen Aufarbeitung von Luftdichtheitsmängeln zu fördern und aus der Verschiedenheit der beteiligten Professionen herrührenden Missverständnissen vorzubeugen.

11.4 LITERATUR- UND RECHTSPRECHUNGSVERZEICHNIS

11.4.1 LITERATUR

- Böhmer, Heike / Brinkmann-Wicke, Tania / Fanslau-Görlitz, Dirk / Zedler, Julia / Helmbrecht, Horst / Trauernicht, Herbert (2011): Luftdichtheitsmessung in der Praxis. Institut für Bauforschung e. V. (Hrsg.). Köln 2011. (Zitierweise: Böhmer et al. 2011).
- Bolender, Torsten / Weissmüller, Armin (2012): Gründe für eine Luftdichtheit der Gebäudehülle. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.); Gebäude-Luftdichtheit (Band 1); 2., aktualisierte Auflage, Berlin 2012; S. 13 – 18.
- Kleine-Möller, Nils / Merl, Heinrich / Glöckner, Jochen (2014): Handbuch des privaten Baurechts. 5. neu bearbeitete und erweiterte Auf-

- lage, München 2014. (Zitierweise: Kleine-Möller et al. 2014, §, Rn.).
- Köpcke, Ulf (2012): Die Luftdichtheit der Gebäudehülle im öffentlichen und privaten Baurecht. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.); Gebäude-Luftdichtheit (Band 1); 2., aktualisierte Auflage, Berlin 2012; S. 115 – 137.
 - Köpcke, Ulf (2015a): Der werkvertragsrechtliche Streit um Luftdichtheit. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.); Gebäude-Luftdichtheit (Band 2); 1. Auflage, Berlin 2015; S. 85 – 101.
 - Köpcke, Ulf (2015b): Dicht, nicht ganz dicht, undicht. Wie (in)tolerant ist der juristische Fehlerbegriff? Anmerkungen zu „baulichen Toleranzen“ und damit verbundenen Missverständnissen. In: Reader zum 9. Internationalen Buildair-Symposium. Springe-Eldagsen 2015.
 - Liebheit, Uwe (2015): Qualitäten am Bau: Vertragsauslegung durch den Richter. Beratung des Gerichts bei der Vertragsauslegung durch den Sachverständigen. In: Der Bau-sachverständige, 11. Jahrgang (2015), Heft 1, S. 58 – 68.
 - Palandt (2016): Bürgerliches Gesetzbuch. 75. Auflage, München 2016 (Zitierweise: Palandt / Bearbeiter).
 - Rolfsmeier, Stefanie (2015): Messpraxis. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.); Gebäude-Luftdichtheit (Band 2); 1. Auflage, Berlin 2015; S. 45 – 53.
 - Solcher, Oliver (2015): Leitfaden Luftdichtheitskonzept. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.); Gebäude-Luftdichtheit (Band 2); 1. Auflage, Berlin 2015; S. 10 – 12.
 - Vogel, Klaus / Köpcke, Ulf (2015): Luftdichtheit – Luftdurchlässigkeit – Ein Rundumschlag. In: Der Bau-sachverständige, 11. Jahrgang (2015), Heft 6, S. 22 – 27.
 - Werner, Ulrich / Pastor, Walter (2015): Der Bauprozess. 15., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Köln 2015 (Zitierweise: Werner / Pastor 2015, Rn.).
- Bedenkenanmeldung**
- OLG Stuttgart, Urt. v. 15.04.2014, Az. 10 U 127/13
 - OLG Celle, Urt. v. 21.10.2004, Az. 14 U 26/04
- DIN-Normen (rechtliche Bedeutung)**
- BGH, Urt. v. 14.06.2007, Az. VII ZR 45/06
 - OLG Celle, Urt. v. 02.11.2011, Az. 14 U 52/11
- EnEV (auch ohne Vereinbarung Pflicht)**
- OLG Düsseldorf, Urt. v. 23.10.2015, Az. 22 U 57/15
 - OLG Brandenburg, Urt. v. 02.10.2008, Az. 12 U 92/08
- Funktionstauglichkeit der Werkleistung**
- OLG Celle, Urteil vom 16.05.2013, Az. 13 U 11/09
- Luftdichtheitsmängel**
- OLG Karlsruhe, Urt. v. 08.05.2015, Az. 14 U 127/13
 - OLG Karlsruhe, Urt. v. 29.11.2013, Az. 13 U 80/12
 - OLG Köln, Urt. v. 13.03.2013, Az. 16 U 123/12
 - OLG Brandenburg, Urt. v. 11.05.2005, Az. 4 U 172/04
 - OLG Celle, Urt. v. 13.10.2004, Az. 7 U 114/02
 - OLG Köln, Urt. v. 22.09.2004, Az. 11 U 93/01
 - OLG Düsseldorf, Urt. v. 14.07.1995, Az. 22 U 46/95
- Risikogeneigte Bauleistungen**
- BGH, Urt. v. 10.11.2005, Az. VII ZR 137/04
 - OLG Stuttgart, Urt. v. 25.09.2012, Az. 10 U 34/12
- Subjektiver Fehlerbegriff**
- BGH, Beschl. v. 30.07.2015, Az. VII ZR 70/14
 - BGH, Urt. v. 21.11.2013, Az. VII ZR 275/12
 - BGH, Urt. v. 14.06.2007, Az. VII ZR 45/06
 - OLG Karlsruhe, Urt. v. 08.05.2015, Az. 14 U 127/13
 - OLG Düsseldorf, Urt. v. 21.11.2014, Az. 22 U 37/14
 - AG Brandenburg, Urt. v. 28.06.2013, Az. 31 C 279/11
- Symptomrechtsprechung**
- BGH, Urt. v. 09.10.2008, Az. VII ZR 80/07
 - BGH, Urt. v. 26.03.1992, Az. VII ZR 258/90

- BGH, Urt. v. 06.10.1988, Az. VII ZR 227/87
- OLG Karlsruhe, Urt. v. 08.05.2015, Az. 14 U 127/13
- OLG Celle, Teilurt. v. 02.06.2010, Az. 14 U 205/03

Unverhältnismäßig hoher Mängelbeseitigungsaufwand

- BGH, Urt. v. 10.11.2005, Az. VII ZR 64/04
- BGH, Urt. v. 24.04.1997, Az. VII ZR 110/96
- OLG Düsseldorf, Urt. v. 03.07.2012, Az. 21 U 150/09
- OLG Köln, Urt. v. 16.09.2010, Az. 7 U 158/08

AUTOR



ULF KÖPCKE
RECHTSANWALT

Selbständiger Rechtsanwalt in der Anwaltskanzlei Am Augustinerplatz in Freiburg im Breisgau mit den Tätigkeitsschwerpunkten privates Baurecht und Strafrecht; Autor und Referent zu juristischen Fragestellungen u. a. zum Thema Luftdichtheit

11.4.2 RECHTSPRECHUNG

(SORTIERT NACH STICHWORTEN)

Abnahme (rechtliche Bedeutung)

- BGH, Urt. v. 25.02.2016, Az. VII ZR 210/13

Bauüberwachung

- OLG Köln, Urt. v. 13.03.2013, Az. 16 U 123/12



12 Handlungsempfehlung

Erklärtes Ziel dieses Forschungsprojektes ist es, der Baupraxis eine Handlungsempfehlung für den Umgang mit Luft-Leckagen anzubieten. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit unterstreichen die Vielschichtigkeit des Themas Leckagebewertung. Wie im konkreten Fall mit Leckagen umzugehen ist, darüber entscheidet zunächst die an den betroffenen Personenkreis gerichtete **Frage- bzw. Aufgabenstellung** (vgl. Kapitel 11.1). Die technischen Gesichtspunkte machen deutlich, dass es keine einfache und zuverlässige **Faustformel** zur Leckagebewertung für alle möglichen Fälle (Wirkungsweisen, Konstruktionen etc.) geben kann. Die üblicherweise eingesetzten **Hilfsmittel zur Leckagesuche** (vgl. Kapitel 1.5) reichen aus, um einen Überblick über die Leckagesituation in einem Gebäude zu erhalten. Die Hilfsmittel sind aufgaben- und objektbezogen auszuwählen.

Der Forschungsbericht in seiner Gesamtheit mit den darin vorgestellten, verschiedenen Blickrichtungen auf das Thema Leckagen und die nachfolgende Handlungsempfehlung liefern zahlreiche Informationen und Anregungen, um eine Leckagebewertung bzw. Leckagebeurteilung auf eine gute Grundlage stellen zu können. Es wird kein starrer Rahmen vorgegeben. Dies ist inhaltlich begründet und soll ferner den am Bau Tätigen möglichst **autonome Entscheidungen** im Einzelfall ermöglichen.

Die Handlungsempfehlung enthält verdichtete Informationen aus den vorhergehenden Kapiteln. Für die weitergehende inhaltliche Auseinandersetzung mit den verschiedenen Punkten wird auf entsprechende Kapitel im Forschungsbericht verwiesen.

12.1 LECKAGEBEWERTUNG IM ALLGEMEINEN

12.1.1 RISIKOEINSCHÄTZUNG

Bei der Leckagebewertung/-beurteilung und bei der damit verbundenen Entscheidungsfindung im Einzelfall ist der Blick auf mögliche Risiken zu richten, die sich aus unterschiedlichen Wirkungsweisen von Leckagen und juristischen Aspekten ergeben können (Bild 12.1). Liegen nur wenige Informationen vor, dann sind die Risiken prinzipiell höher einzuschätzen als bei einer umfassenden Informationsgrundlage. Eine umfassende Informationsgrundlage (vgl. Kapitel 2.2, Bild 2.1; Kapitel 11.2, Tabelle 11.1) erhöht in der Regel die Anzahl der Handlungsoptionen. Stehen mehrere Handlungsoptionen zur Verfügung, dann ist diejenige zu bevorzugen, die möglichst eindeutig zu beschreiben ist und möglichst geringe Anforderungen an die Umsetzung stellt. Dadurch werden die Risiken minimiert.



Bild 12.1: Diagramm „Risikoeinschätzung“ als Ausgangspunkt für die Entscheidungsfindung im Umgang mit Leckagen

Je detaillierter eine technisch ausgerichtete Leckagebewertung erfolgen soll, desto mehr Informationen, beispielsweise zu Druckverhältnissen, zu Leckgrößen und zur Leckageverteilung, werden benötigt. Bei einer geringen Informationsgrundlage ist eine Leckagebewertung mit prognostischer Ansprache zu Wirkungsweisen von Leckagen nicht möglich.

12.1.2 RESTLECKAGEN

Das Wissen und das Können zur Vermeidung von Leckagen sind allgemein auf einem hohen Niveau (vgl. Kapitel 1.6). Dennoch gibt es auch bei größter Sorgfalt in Planung, Materialauswahl und Ausführung Restleckagen, die in letzter Konsequenz stofflich oder funktional (z. B. Fuge zwischen Fensterflügel und Fensterblendrahmen) bedingt sind. Dies ist bei einer detaillierten Leckagebewertung, die eine anspruchsvolle Tätigkeit darstellt und hohe Sachkenntnis und Erfahrung voraussetzt, durch eine Einzelsprache der Leckagen entsprechend zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 2.2, Bild 2.6). Die reine Existenz von wahrnehmbaren Luftströmungen ist isoliert betrachtet nur als Kriterium für die Leckagefeststellung heranzuziehen (vgl. Kapitel 2.1).

12.1.3 LECKAGESTRÖME

Eine umfassende Leckagebewertung berücksichtigt zahlreiche Parameter, die von der Makro- bis zur Mikro Betrachtung reichen (vgl. Kapitel 2.2, Bild 2.1). Die für ein gesamtes Objekt gemessenen Leckageströme und die daraus ermittelten Kennwerte (z. B. n_{50} , q_{E50}) sind nur hinsichtlich einer ersten Einschätzung der gesamten Leckagesituation zu berücksichtigen. Sie sind wegen der fehlenden Differenzierung ungeeignet, um auf die unterschiedlichen Wirkungsweisen von singulären und summarischen Leckagen schließen zu können (z. B. feuchtetechnische Wirkungsweise, vgl. z. B. Kapitel 1.7.2).

Im Rahmen einer normgemäßen Bestimmung der Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes oder Gebäudeteils zur Überprüfung von Luftdichtheitsanforderungen sind mit einfachen Mitteln (z. B. Hand) wahrgenommene Leckagen im Hinblick auf eine Plausibilitätskontrolle der Messergebnisse und zur Qualitätssicherung der Messung zu dokumentieren (vgl. Kapitel 11.2.3.1). Für die Plausibilitätskontrolle der Messergebnisse ist es hilfreich, die überblicksartige Leckagesuche möglichst immer bei der gleichen

Druckdifferenz (z. B. -50 Pa) durchzuführen. Dadurch können Vergleiche mit anderen Überprüfungen angestellt und ein Erfahrungsschatz aufgebaut werden. Dies alles stellt jedoch keine detaillierte Leckagebewertung dar.

12.1.4 BETRACHTUNGSZEITPUNKT

Der Betrachtungszeitpunkt (Lebensphase eines Gebäudes) entscheidet maßgeblich über die Möglichkeiten und Grenzen der Leckagevermeidung, der Leckagereduktion, der Leckagebewertung sowie über die baurechtlichen Aspekte zu Leckagen (vgl. z. B. Kapitel 7.6 und Kapitel 11.2).

Der Leckagevermeidung und der Leckagereduktion (vgl. Kapitel 1.6, Kapitel 3 und Kapitel 4) ist eine höhere Priorität einzuräumen als der Leckagebewertung. Zur Leckagevermeidung ist vor dem Bauprozess ein planerisches Konzept zum Themenbereich Luftdichtheit zu erstellen. Während des Bauprozesses sind baubegleitende Untersuchungen bzw. Überprüfungen zur Leckagereduktion durchzuführen. Hierbei ist das Augenmerk auf außerplanmäßige, primäre Leckagen zu richten. Die festgestellten Leckagen und die Beschaffenheit der Luftdichtheitsebene sind zumindest in Form von fotografischen Übersichtsaufnahmen zu dokumentieren.

Bei Bestandsgebäuden kann die „Geschichte des Gebäudes“ in die Bewertung von Leckagen einfließen. Wertvolle Hilfestellungen sind beispielsweise Hinweise sowohl zu Schäden, Beeinträchtigungen und zu Nutzungsgewohnheiten in der Vergangenheit als auch zu geplanten baulichen sowie zu sich abzeichnenden nutzungsbezogenen Änderungen in der Zukunft.

12.2 LECKAGEBEWERTUNG IM SPEZIELLEN

12.2.1 LECKAGEN

Das Hauptaugenmerk bei der Leckagebewertung ist auf die primären Leckagen zu richten. Sekundäre Leckagen wirken sich aus, jedoch sind sie nicht zwangsläufig für die Bewertung der gesamten Leckagesituation und der von Luft-Leckagen ausgehenden Schädigungen bzw. Beeinträchtigungen geeignet (vgl. Kapitel 2.2, Bild 2.7).

Nicht jede Leckage ist für jede Wirkungsweise gleich bedeutsam. Zum Beispiel ist eine feuchtetechnisch wirksame Leckage nicht zwangsweise energetisch relevant (vgl. z. B. Kapitel 5.5 und Kapitel 5.6). Je nach Frage- bzw. Aufgabenstellung ist der einen oder der anderen Wirkungsweise besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Der ausschließliche Blick auf eine einzelne Leckage ist nicht in jedem Fall zielführend. Für Schäden bzw. Beeinträchtigungen kann die Summe der Leckagen entscheidend sein. Es ist im Rahmen der Leckagebewertung zu klären, ob es sich um singuläre oder summarische Leckagen handelt (vgl. Kapitel 2.2).

Leckagen können Indikatoren für andere Themenbereiche darstellen. Wird beispielsweise eine Leckage als variabel eingestuft (z. B. bei unter Spannung stehender Verklebung), oder kann dies zumindest nicht ausgeschlossen werden, dann ist eine vertiefende Leckagebewertung nicht zielführend. Die Ursachen für die Variabilität sind abzustellen.

Da Schäden bzw. Beeinträchtigungen nicht in räumlicher Nähe zu primären oder sekundären Leckagen stehen müssen (vgl. Kapitel 1.4 und Kapitel 4, Tabelle 4.22), bedarf es der kritischen Auseinandersetzung mit der Konstruktion und den sich daraus ableitbaren potenziellen Strömungspfaden bzw. Strömungswegen.

Werden Leckagen beseitigt, dann sind deren räumliche Verteilung und deren Anteil an den gesamten Leckagen zu beachten. Denn nennenswerte Veränderungen der Gesamtleckagesituation können bei sonst unveränderten Randbedingungen die Lage der druckneutralen Zone verändern und bisher „passive“ Leckagen „aktivieren“ (vgl. Kapitel 1.2 und Kapitel 5.2.2). Hierbei ist zu beachten, dass sich beheizte Gebäude hinsichtlich der sich einstellenden Druckdifferenzen gegenüber außen anders verhalten als gekühlte Gebäude.

12.2.2 FEUCHTECHNISCHE ASPEKTE

Nicht jede Konstruktion kommt unter sonst gleichen Randbedingungen gleich gut mit Luft-Leckagen und dem damit verbundenen Feuchteintrag aus (vgl. Kapitel 4 und Kapitel 5.5).

Diese „Fehlertoleranz“ ist bei in Planung befindlichen Gebäuden und bei bereits erstellten Gebäuden zu berücksichtigen. „Fehlertoleranz“ ist im Sinne einer zusätzlichen Sicherheit, einer Abpufferung von außerplanmäßigen Unwägbarkeiten zu verstehen und nicht im Sinne einer Abpufferung von planerischen und ausführungsbedingten Unzulänglichkeiten (vgl. Kapitel 11.2.2).

Feuchteschäden sind nicht zwangsläufig mit wahrgenommenen singulären oder summarischen Leckagen in Verbindung zu bringen. Andere potenzielle Schadensmechanismen (z. B. Beschädigung der Eindeckung und einer zweiten wasserführenden Ebene) dürfen bei der Ursachenforschung nicht ausgeblendet werden.

Geschädigte und nicht geschädigte Teilbereiche können sich am selben Objekt z. T. kleinflächig abwechseln. Daher bedürfen verallgemeinernde Aussagen zu einem Schadensausmaß einer guten Informationsgrundlage, basierend auf einer detaillierten Leckagesuche und ggf. mehreren Bauteilöffnungen.

Unter feuchtetechnischen Aspekten ist der Aufwand einer Leckagesuche insbesondere in der Überdruckzone eines Gebäudes bzw. Gebäudeteils zu intensivieren.

Eine zweite Ebene (Beispiel: Gipskartonbekleidung auf Lattung vor einer Luftdichtheitsfolie im Dachaufbau) kann unter technischen Gesichtspunkten auch außerplanmäßig einen positiven feuchtetechnischen Beitrag leisten, indem sie faktisch die Funktion einer Luftdichtheitsebene übernimmt (vgl. Kapitel 5.5.1.2). Die Vorteile einer raumseitigen Bekleidung als Luftdichtheitsebene bestehen darin, dass die Fläche gut einsehbar und relativ leicht nachzubearbeiten ist. Die Nachteile liegen in der eingeschränkten Nutzbarkeit (z. B. hohe Anforderung an nachträgliche Einbauten und ggf. Gefahr der Zerstörung der Luftdichtheitsebene) und der unmittelbaren Eingriffsmöglichkeit der Nutzer. Die Nutzer sind über die wichtige Funktion dieser Bekleidung aufzuklären und derart zu sensibilisieren, dass Veränderungen an der Bekleidung (z. B. Risse) zeitnah angezeigt werden. Soll in einem solchen Fall (d. h. Konstruktion wie oben beschrieben,

es liegen bisher keine Hinweise auf Schäden vor, eine Abwägung der vorgenannten technischen Vor- und Nachteile sowie ggf. juristischer Belange hat stattgefunden) eine Leckagesuche mit Bewertung stattfinden, dann ist das Augenmerk neben der eigentlichen Bekleidung auch auf Installationsschächte, Vorwandkonstruktionen etc. zu richten. Diese können nämlich Strömungswege vom Innenraum zum Luftraum zwischen Luftdichtheitsfolie und Gipskartonbekleidung darstellen (vgl. Kapitel 4, Tabelle 4.25). Im Rahmen dieser Bewertung ist insbesondere bei als feuchtetechnisch kritisch einzustufenden Konstruktionen den Fragen nachzugehen, seit wann die sekundären Leckagen vorhanden sind und in welcher Größenordnung sie vorliegen (vgl. Kapitel 5.5.2.2). Grobe Anhaltspunkte für die Entscheidung, die dahinterliegende Luftdichtheitschicht und die Konstruktion näher zu untersuchen (ggf. durch Monitoring zu überwachen), sind hierbei Zeiträume über ca. ein Jahr mit Rissen über ca. 2 m Länge in der Gipskartonbekleidung pro Wohnraum (vgl. Kapitel 5.7) bei ansonsten dichter Bekleidung oder mit nicht auszuschließenden Schachtwirkungen.

Unter baupraktischen Gesichtspunkten ist die exakte Bestimmung der Leckageflächen als schwierig einzustufen (vgl. Kapitel 5.7) und setzt einen entsprechenden Zugang zu den Leckagen voraus. Ungeachtet der Frage nach der Vermeidbarkeit (vgl. Kapitel 11.2.2) ist es aufgrund der vorgenannten Punkte meist auch kaufmännisch zweckmäßig, alle sichtbaren Lecks unmittelbar zu beseitigen, statt die Leckageflächen aufwendig zu bestimmen.

Der Normwert für Bauteilanschlussfugen ($< 0,1 \text{ m}^3/(\text{mh}(\text{daPa}^{2/3}))$) nach DIN 4108-2 2013, vgl. Kapitel 5.7 und Kapitel 8.2) kann im Einzelfall zu hoch bemessen sein und ist für sich betrachtet kein hinreichendes Kriterium zur Leckagebewertung.

Als Ultima Ratio im Umgang mit Leckagen, nicht nur im Hinblick auf die feuchtetechnische Wirkungsweise, ist die Abwägung zwischen Risiken und finanziellen Aspekten zu sehen. Sie setzt eine gute Informationsgrundlage, ggf. unterstützt durch Simulation und Monitoring, eine ver-

ständige technische Aufklärung der betroffenen Personenkreise und ggf. die Beachtung baurechtlicher Belange voraus.

12.3 AUSBLICK

In dem Forschungsbericht werden erstmals die verschiedenen Blickrichtungen auf das Thema Leckagebewertung zusammengeführt. Er enthält für die Beschreibung von Leckagen und dafür, wie mit Leckagen umzugehen ist, konkrete Empfehlungen für die Praxis, wobei feuchtetechnische Aspekte den Schwerpunkt bilden.

Über die bereits innerhalb des Forschungsprojektes geführten Diskussionen hinaus werden Impulse für weitere Diskurse gesetzt. Es ist wünschenswert, dass auf dem Forschungsbericht aufbauend entsprechende Abstimmungen in den verschiedenen Disziplinen stattfinden. Zusammen mit den Erfahrungen aus der Praxis sollten die Inhalte der Handlungsempfehlung von Zeit zu Zeit angepasst und ergänzt werden.



13 Anhang

13.1 FORMELZEICHEN, ABKÜRZUNGEN, GLOSSAR

FORMELZEICHEN

δ	Dampfpermeabilität	kg/msPa	A_0	Bezugsabsorptionsfläche	m ²
δ_a	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient	kg/msPa	C	Strömungskoeffizient	m ³ /hPan
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK	D_l	Tiefe der Gasschicht im Rauchabschnitt	m
λ	Wellenlänge	cm	$D_{n,e,w}$	bewertete Norm-Schallpegeldifferenz	dB
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	-	H	Materialenthalpie	J
ρ	Dichte	kg/m ³	L	Schalldruckpegel	dB
φ	relative Feuchte	%	L_e	Fugenlänge des zu beurteilenden Rauchschutzabschlusses	m
ν	Temperatur	°C	L_p	Fugenlänge des Probekörpers	m
θ_l	Temperaturerhöhung des Gases über Umgebungstemperatur	°C	L_{pr}	Leckrate des Probekörpers	m ³ /h
$\Delta T/\Delta x$	Temperaturgradient	K/m	L_A	bewerteter Schallpegel	dB(A)
$\Delta p_{vap}/\Delta x$	Dampfdruckgradient	Pa/m	L_1	Leckrate des Fugenlängenverhältnisses	m ³ /h
a_{lw}	Absorptionsgrad langwellig	%	L_2	Leckrate des Öffnungsflächenverhältnisses	m ³ /h
a_{sw}	Absorptionsgrad kurzwellig	%	M_g	Masse des Gases, das durch die Spalte strömt	kg s ⁻¹
c	spezifische Wärmekapazität	J/kgK	Q_a	Leckrate der Prüfeinrichtung ohne Probekörper bei einer abgedichteten Prüfoffnung	m ³ /h
c	Schallgeschwindigkeit	m/s	Q_d	Leckrate	m ³ /h
d	Materialdicke/Schichtdicke	m	Q_t	Gesamtleckrate des Probekörpers einschließlich der Prüfeinrichtung	m ³ /h
f	Frequenz	Hz	R	Schalldämm-Maß	dB
g	Gravitationsbeschleunigung 9,81	m/s ²	$R_{i,w}$	resultierende Schalldämm-Maß	dB
h	Höhe	m	$R_{\text{Öffnung}}$	Schalldämm-Maß einer Öffnung	dB
h_v	spezifische Dampfenthalpie	J/kg	$R_{S,w}$	Fugenschalldämm-Maß	dB
l	Fugenlänge	m	R_w	bewertetes Schalldämm-Maß	dB
m_{vap}	Dampfstromdichte infolge Diffusion	kg/m ² s	R'	Bauschalldämm-Maß	dB
m	flächenbezogenen Masse	kg/m ²	$R'_{w,ges}$	gesamtes bewertetes Bau-Schalldämm-Maß	dB
n	Strömungsexponent	-	S_a	Rauchdichtheit bei der Umgebungstemperatur 25 °C (± 15 K)	m ³ /h
n_{50}	Luftwechselrate bei 50 Pa	h ⁻¹	S_m	Rauchdichtheit bei Umgebungstemperatur sowie bei 200 °C (± 20 K)	m ³ /h
p	Luftdruck	Pa	$S_{\text{Öffnung}}$	Fläche der Öffnung	m ²
p	Schalldruck	N/m ²	T	Lufttemperatur	K
p_0	Referenzschalldruck	N/m ²	T	Nachhallzeit	s
p_{sat}	Sättigungsdampfdruck	Pa	T_l	absolute Temperatur der Gase in der Schicht	K
p_{vap}	Wasserdampfdruck im Material	Pa	T_0	absolute Umgebungstemperatur	K
q	Wärmestromdichte	W/m ²	V	Volumen	m ³
q_{50}/q_{E50}	Luftdurchlässigkeit bei 50 Pa/ spezifischer hülfflächenbezogener Leckagestrom bei 50 Pa durch die Gebäudehülle	m ³ /hm ²	$V_{b,0}$	Windgeschwindigkeiten	m/s
r	längenbezogener Strömungswiderstand	Pa·s·m/m ³	V_{FL}	Fugenlängenverhältnis	-
s_d	wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	m	$V_{\text{ÖF}}$	Öffnungsflächenverhältnis	-
w_{50}	nettogrundflächenbezogener Leckagestrom bei 50 Pa	m ³ /hm ²	\dot{V}	Luftvolumenstrom	m ³ /h
A	Fläche (Kontaktfläche zweiter benachbarter Knoten, Querschnittsfläche)	m ²	W	Wassergehalt	kg
A_e	lichte Öffnung des zu beurteilenden Rauchschutzabschlusses	m ²	Z	Leckratenzuschlag	m ³ /h
A_g	Öffnungsfläche der Spalte	m ²			
A_p	lichte Öffnung des Probekörpers	m ²			

ABKÜRZUNGEN

ext	extern
int	intern
DG	Dachgeschoss
EG	Erdgeschoss
GK	Gipskarton
MW / MIN	Mineralwolle
IR	Infrarotthermografie
N+F	Nut und Feder
OG	Obergeschoss
PE	Polyethylen
UK	Unterkonstruktion
EFH	Einfamilienhaus / Einfamilienhäuser
MDF	Medium Density Fiberboard / Mitteldichte Holzfaserplatte
MFH	Mehrfamilienhaus / Mehrfamilienhäuser
NPD	No Performance Determined / keine Leistung festgelegt (Hinweis gemäß Bauprodukte-Verordnung)
OSB	Oriented Structural Board / Holzwerkstoffplatte mit ausgerichteten, relativ großen Spänen
Whg.	Wohnung
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe
WDVS	Wärmedämmverbundsystem

GLOSSAR

adiabat	ohne Wärmeleitung nach außen
anthropogen	durch den Menschen beeinflusst; anthropogene Geruchsstoffe überschneiden sich teilweise mit den nutzungsbedingten Geruchsstoffen im Falle von Humangerüchen in Innenräumen oder Modergerüchen aufgrund von zu viel Feuchtigkeit durch menschliche Ausdünstungen; sie umfassen aber auch vom Menschen verursachte Emissionen (resp. Luftschadstoffe)
biogen	durch Tätigkeit von Lebewesen entstanden; biologisch bedingte Geruchsstoffe entstammen mikrobiellem oder tierischem Ursprung, einschließlich deren Aktivitäten und Ausscheidungen; die häufigsten Schadensursachen stellen dabei Schimmel- und Bakterienbefall in feuchten Fassaden und Wänden, Sanitärrohren und Kellern sowie geruchliche Ausscheidungen dar
geogen	unter geogenen Emissionen werden natürliche Hintergrundbelastungen verstanden; der Begriff stammt primär aus der Geologie und wird hauptsächlich für gewässerverunreinigende Schwermetalle oder luftverunreinigendes Radon verwendet; im Falle von Geruchsstoffen können das schwefelorganische Gerüche aus Sümpfen (Faulgas), thermalen Quellen oder Fumarolen (vulkanisch austretende Gase) sein
transient	Entwicklung über die Zeit, zeitveränderlich, instationär
validiert	auf Vorhersagegüte überprüft
Adaption	Anpassung; Adaption an einen Geruch: Wird eine Person über einen längeren Zeitraum einem Sinnesreiz ausgesetzt, so passt sich die Wahrnehmung an den Reiz an, bis er final gar nicht mehr wahrgenommen wird; dieses Reaktionsschema tritt bei olfaktorischen, akustischen und visuellen Reizen gleichermaßen auf
Adsorption	Anlagerung von Gasen oder gelösten Stoffen an der Oberfläche eines festen Stoffes
Akkumulation	Ansammlung, Anhäufung, Speicherung
Anosmiker	Personen mit Verlust des Geruchssinnes
Apnoe	Atemstillstand, Atemlähmung
Interpolation	Errechnen von Werten, die zwischen bekannten Werten einer Funktion liegen
Panel	bei einem Panel handelt es sich um regelmäßig auf Geruchsstoffe und Geruchsstoff-Intensitäten geschulte Testpersonen, die in der Lage sind, Gerüche emotionsfrei anhand von Skalen zu bewerten

13.2 BILDVERZEICHNIS

	<i>Seite</i>	
Bild 1.1:	Mögliche frühzeitliche Bemühungen im Umgang mit Fehlstellen in der Gebäudehülle, dargestellt an Gebäuden im Pfahlbaumuseum Unteruhldingen/Bodensee	11
Bild 1.2:	Prinzipielle Darstellung der Wirkungsweisen eines Spaltes im Hinblick auf konvektiv bedingten Wärme- und Feuchtetransport	11
Bild 1.3:	Auftriebsdruckverteilung an einer beheizten Gebäudehülle	12
Bild 1.4:	Mittlere prozentuale Verteilung der Gesamtleckage auf die Bereiche 'Dachgeschoß', 'Kernbereich' sowie 'Keller'	15
Bild 1.5:	Mögliche Strömungswege über Fehlstellen in der planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitsschicht	15
Bild 1.6:	Mögliche Strömungswege in der Gebäudehülle	15
Bild 1.7:	Visualisierung von mit Lecks in Verbindung zu bringenden Luftströmungen mittels Thermografie	16
Bild 1.8:	Zeitlicher Erfolg einer Leckagesuche, ausgedrückt in dem Anteil der gefundenen Leckagen an dem gesamten für ein Objekt ermittelten Leckagestrom	17
Bild 1.9:	Schema zur Bewertung von Leckagen bei dem Workshop im April 2013	18
Bild 1.10:	Künstlich geschaffene Undichtigkeit, die eine Kellertürschwelle darstellt	19
Bild 1.11:	Antworten auf die Frage, ob die Luftströmung an der Kellertürschwelle eine große Leckage im Sinne der DIN EN 13829 (2001) sei	19
Bild 1.12:	Bewertungen der Kellertürschwelle im Hinblick auf unterschiedliche Wirkungsweisen einer Leckage	19
Bild 1.13:	Steckdosen in einer Außenwand in Holzbauweise im 1. Obergeschoss	20
Bild 1.14:	Antworten auf die Frage, ob die Luftströmung an den Steckdosen im 1. Obergeschoss eine große Leckage im Sinne der DIN EN 13829 sei	20
Bild 1.15:	Bewertungen der Steckdosen im Hinblick auf unterschiedliche Wirkungsweisen einer Leckage	20
Bild 2.1:	Parameter der Leckagebewertung	25
Bild 2.2:	Makrobetrachtung bei der Bewertung von Luft-Leckagen	25
Bild 2.3:	Parameter der Leckagebewertung auf der Stufe der Bauteile und Bauteilschichten	26
Bild 2.4:	Zugang zur planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitsschicht	26
Bild 2.5:	Wirkungsweisen von Leckagen	26
Bild 2.6:	Einzelsprache von Leckagen (Mikrobetrachtung)	27
Bild 2.7:	Differenzierung primärer, sekundärer und tertiärer Leckagen in Bezug auf deren Lage zu einer planmäßig vorgesehenen Luftdichtheitsschicht	27
Bild 3.1:	Fragebogen für Sachverständige und Messdienstleister	29
Bild 3.2:	Tätigkeitsfelder der Umfrageteilnehmer	30
Bild 3.3:	Tätigkeitsdauer der Umfrageteilnehmer	30
Bild 3.4:	Objektanzahl pro Umfrageteilnehmer	30
Bild 3.5:	Alter der von den Umfrageteilnehmern zu bearbeitenden Objekte	30
Bild 3.6:	Untersuchungszeitpunkt der Objekte	31
Bild 3.7:	Objektanzahl pro Umfrageteilnehmer bei Nichtschadensfällen	31
Bild 3.8:	Objektalter Nichtschadensfälle	31
Bild 3.9:	Arten und Häufigkeit der benannten Leckagen ohne Schadensfolgen	32
Bild 3.10:	Ursache für Schadensfreiheit	32
Bild 3.11:	Objektanzahl pro Umfrageteilnehmer bei Schadensfällen	33
Bild 3.12:	Zeitpunkt des Schadenseintritts	33
Bild 3.13:	Arten und Häufigkeit der benannten Leckagen mit Schadensfolge	33
Bild 3.14:	Typische Fehlstellen in der Folienverklebung	34
Bild 3.15:	Anschluss der Luftdichtheitsschicht	34
Bild 3.16:	Ungeeigneter Anschluss an eine Durchdringung	34
Bild 3.17:	Offener Anschluss im Bereich von Kabeldurchführungen	34
Bild 3.18:	Offene Anschlüsse im Bereich von Durchführungen	34
Bild 3.19:	Ursache für Schäden	35
Bild 3.20:	Arten der benannten Schäden	35
Bild 4.1:	Karte zur regionalen Lage der Praxisfälle	37
Bild 5.1:	Thermisch induzierte Druckdifferenz am Beispiel eines geöffneten Fensters	84
Bild 5.2:	Unterteilung eines Wand- bzw. Dachaufbaus in Schichten und Knoten	85

	<i>Seite</i>	
Bild 5.3:	Einordnung zonaler Modelle zur Simulation von Raumluftrömungen	85
Bild 5.4:	Schematische Funktion des Thermal Model Generation Tool	85
Bild 5.5:	Schematische Darstellung der Implementierung eines hygrothermischen Materialknotens mit Durchströmung	86
Bild 5.6:	Linearisierung der Druck-Volumenstromkurve am Beispiel einer Steckdose	86
Bild 5.7:	Entwicklung der Feuchte in der Holzschalung	87
Bild 5.8:	Entwicklung der Feuchte in der Mineralwolle	87
Bild 5.9:	Aufbau des HygZO Modells	88
Bild 5.10:	Vergleich der Modelica- und WUFI Simulationsergebnisse	88
Bild 5.11:	Im Rahmen einer Untersuchung aufgenommene Leckageverteilung	89
Bild 5.12:	Schadensbild des Referenzdaches, wie es sich im Rahmen des Rückbaus gezeigt hat	89
Bild 5.13:	Dokumentation der Leckagen	90
Bild 5.14:	Einteilung des Daches nach Schadensbild	90
Bild 5.15:	Darstellung des in der Simulation betrachteten Dachausschnitts	91
Bild 5.16:	Simulationsergebnis des Referenzfalles	92
Bild 5.17:	Schematische Darstellung der berechneten Durchlüftung des Raumes und des Dachaufbaus	92
Bild 5.18:	An einzelnen Strömungswiderständen anliegende Druckdifferenz	92
Bild 5.19:	Bewertung von Maßnahmen zur Verbesserung der Luftdichtheit	94
Bild 5.20:	Bewertung der Maßnahmen zur Reduktion der Sekundärleckagen	95
Bild 5.21:	Bewertung von Maßnahmen an externen Leckagen (exkl. Dach)	96
Bild 5.22:	Bewertung von Maßnahmen zur Reduktion der Luftdurchlässigkeit von Bauteilschichten im Dach	97
Bild 5.23:	Bewertung der Erhöhung des Absorptionsgrades des Daches	98
Bild 5.24:	Bewertung der Einbringung einer Unterdeckbahn mit $s_d = 100$ m	99
Bild 5.25:	Bewertung eines hinterlüfteten Daches	100
Bild 5.26:	Bewertung des Einflusses einer Folie als Luftdichtheitsebene mit $s_d = 50$ m	101
Bild 5.27:	Geometrie des Referenzraumes	102
Bild 5.28:	Zonierung des Modells (Blick von oben auf die Grundfläche)	102
Bild 5.29:	Maßstabsgetreue Darstellung des Verhältnisses primäre Leckagefläche zu Grundfläche für den roten, gelben und grünen Bereich des Referenzdaches	103
Bild 7.1:	Fraunhofer SmILe-Skala®	113
Bild 7.2:	Neunstufige Hedonik-Skala	113
Bild 8.1:	Ebenenmodell als Ordnungssystem für den Aufbau einer Fensterkonstruktion	121
Bild 8.2:	Sichtbarmachung von Leckagen durch Rauchdurchtritt zur Raumseite am Stulp einer 2-flg. Fenstertür	122
Bild 8.3:	Geöffnete Fensterkonstruktion mit erkennbarer Schimmelpilzbildung an den von der Raumseite offenen Konstruktionsfugen	122
Bild 8.4:	Skizze zum Aufbau einer Elementecke mit Darstellung der Durchströmung von Konstruktionsfugen	123
Bild 8.5:	Tauwasser- und Schimmelpilzbildung im Falz des Stulpbereiches eines 2-flg. Holzfensters	124
Bild 8.6:	Leckage zum Glasfalz über die Glashalteleisten	124
Bild 9.1:	Rauchpotenzial von 10 kg Probematerial	127
Bild 9.2:	Rauchschürze zwischen zwei Säulen	129
Bild 10.1:	Frequenz und Wellenlänge von Luftschallwellen	131
Bild 10.2:	A- und C-Bewertungskurven	132
Bild 10.3:	Definition des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w	132
Bild 12.1:	Diagramm „Risikoeinschätzung“ als Ausgangspunkt für die Entscheidungsfindung im Umgang mit Leckagen	147

13.3 TABELLENVERZEICHNIS

	<i>Seite</i>
Tabelle 1.1: Anforderungen an die Luftdichtheit / Luftdurchlässigkeit gemäß Energieeinsparverordnung (2013) und DIN 4108-7 (2011)	13
Tabelle 1.2: Untersuchungsergebnisse zur gesamten Luftdurchlässigkeit und zu Arten von Leckagen an 34 Wohnhäusern, Hausteilen und Wohnungen in Holz-, Mauerwerks- und Mischbauweise in der Schweiz	14
Tabelle 4.1: Verfärbungen mit Schimmelpilzbefall im Bereich einer Decke zu einem nicht ausgebauten Dachgeschoss	38
Tabelle 4.2: Leckage entlang eines Fensteranschlusses im Sockelbereich	39
Tabelle 4.3: Luftströmungen aus einer Steckdose im Dachgeschoss	40
Tabelle 4.4: Luftströmungen aus einer Steckdose und aus Einbauleuchten im Dachgeschoss	41
Tabelle 4.5: Leckagen im Bereich der Traufe und an Kehlbalken in einem nachträglich ausgebauten Dachgeschoss	42
Tabelle 4.6: Tauwasserbildung auf der Innenseite einer Fensterkonstruktion	44
Tabelle 4.7: Verrottung eines Flachdaches in Holzbauweise	46
Tabelle 4.8: Weißrost an einem Metaldach	47
Tabelle 4.9: Durchfeuchtung einer Holzschalung und Schimmelpilzbildung unter einem Dachüberstand	48
Tabelle 4.10: Zugluft und Geruchsbelästigungen in einem ausgebauten Dachgeschoss	49
Tabelle 4.11: Verfärbungen mit Schimmelpilzbefall unter einem Dachüberstand	50
Tabelle 4.12: Verrottung einer Dachkonstruktion	51
Tabelle 4.13: Verfärbungen auf der Unterseite eines Dachüberstandes und Durchfeuchtung einer Dachkonstruktion	52
Tabelle 4.14: Durchfeuchtung der Dämmung an einer Gaube	54
Tabelle 4.15: Durchfeuchtung von Dämmung und Holzschalung einer Dachkonstruktion	55
Tabelle 4.16: Durchfeuchtung von Dämmung und Holzschalung einer Dachkonstruktion	56
Tabelle 4.17: Zugerscheinungen und Wasserablaufspuren in einem ausgebauten Dachgeschoss	57
Tabelle 4.18: Zugerscheinungen und Wasserablaufspuren in einem ausgebauten Dachgeschoss	58
Tabelle 4.19: Durchfeuchtung und Verrottung einer Dachkonstruktion	59
Tabelle 4.20: Verrottung einer Dachkonstruktion	60
Tabelle 4.21: Durchfeuchtung einer Dachkonstruktion mit Schimmelpilzbildung	61
Tabelle 4.22: Mikrobiologischer Befall einer Fassade im Bereich von Fenstern	62
Tabelle 4.23: Schimmelpilzbefall an Hölzern in einem nicht ausgebauten Dachgeschoss	63
Tabelle 4.24: Durchfeuchtungsschäden entlang von Dachtraufen	64
Tabelle 4.25: Lokal begrenzte Zersetzung einer Holz-Dachkonstruktion (Referenzfall)	65
Tabelle 4.26: Verfärbungen auf der Unterseite eines Dachüberstandes	68
Tabelle 4.27: Wasserflecken bzw. Verfärbungen an einem Dachüberstand	70
Tabelle 4.28: Verfärbungen mit Pilzbefall in einer Dachkonstruktion	72
Tabelle 4.29: Verfärbungen unter einem Dachüberstand und Geruchsbelästigungen	74
Tabelle 4.30: Eisbildung unter einem Dachüberstand	76
Tabelle 4.31: Verfärbungen einer Mineralwolle-Dämmung und Schimmel auf der Unterseite einer Unterspannbahn	78
Tabelle 4.32: Verfärbungen unter einem Dachüberstand und Zerstörung der Holzschalung einer Dachkonstruktion	80
Tabelle 4.33: Feuchtigkeitsausfall auf der Außenseite neu eingebauter Kunststofffenster	82
Tabelle 5.1: Strömungskoeffizienten verschiedener Leckagen	84
Tabelle 5.2: Luftdichtheitsanforderungen an Fenster bezogen auf Fugenlänge	84
Tabelle 5.3: Materialaufbau im Simulationsmodell von außen nach innen	87
Tabelle 5.4: Aufgenommene Leckagen	90
Tabelle 5.5: Materialaufbau im Simulationsmodell von außen nach innen	91
Tabelle 5.6: Umsetzung der Leckagen in der Simulation	91
Tabelle 5.7: Parametervariation der Luftdichtheit bzw. Luftdurchlässigkeit	93
Tabelle 5.8: Variation des Dachaufbaus	98
Tabelle 6.1: Übersicht Lüftungssysteme	105
Tabelle 6.2: Übersicht Leckagebewertung bei verschiedenen Lüftungssystemen	108
Tabelle 7.1: Geruchsschwellen ausgewählter innenraumrelevanter Geruchsstoffe	112

	<i>Seite</i>
Tabelle 8.1: Auszug aus DIN 18055 (2014) – Klassifizierung der Luftdurchlässigkeit	121
Tabelle 10.1: Merkregel zur Addition von gleichen Schallpegeln	131
Tabelle 10.2: Exemplarische Auflistung direkter und indirekter Leckagen	133
Tabelle 11.1: „Hohwachter Leckagepegel“	140

