

2025

BAUPHYSIK KALENDER



Sonderdruck

Einblicke in die
hygrothermische
Bauteilsimulation
für die Praxis

Hartwig M. Künzle
Christian Bludau
Daniel Zirkelbach

Hartwig M. Künzel, Christian Bludau, Daniel Zirkelbach

Einblicke in die hygrothermische Bauteilsimulation für die Praxis

Sonderdruck aus Bauphysikkalender 2025

Für dauerhafte Gebäude mit gesundem Raumklima ist ein guter Feuchteschutz unverzichtbar. Seine Bedeutung wird leider häufig unterschätzt, wie immer noch viele kostspielige Bauschäden beweisen. Der Klimawandel und laienhaft ausgeführte energetische Sanierungsmaßnahmen tragen ebenfalls ihren Anteil zu feuchtebedingten Bauschäden bei. Daher sind gute Werkzeuge für die Feuchteschutzbemessung und deren sachgerechte Umsetzung wesentliche Bestandteile einer nachhaltigen Gebäudeplanung.

Weltweit haben sich hier hygrothermische Simulationsmodelle als sicherste Lösung für die Feuchteschutzplanung erwiesen. Nach Jahrzehnten der Erforschung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Baustoffen und Konstruktionen sowie der Umsetzung der Ergebnisse in Normen und Richtlinien, ist es den Autoren ein Anliegen, die wesentlichen Erkenntnisse in die Praxis zu tragen, um eine vermehrte Umsetzung feuchtetoleranterer Bauteile zu erleichtern. Deshalb greift dieser Beitrag die Entwicklung der modernen Feuchteschutzbemessung auf und fasst sie in allgemeinverständlicher Form zusammen.

Auch Praktiker, die selbst keine Simulationen durchführen, sollten die Hintergründe, Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der simulativen Feuchteschutzbeurteilung kennen, damit sie Feuchteschutzplanungen und Schadensgutachten nachvollziehen und kritisch hinterfragen können.

Nach der Analyse des Verhaltens von Baustoffen gegenüber Feuchte werden die Durchführung der Simulation, neue Ergebnisanalysemethoden und der Stand der Normung betrachtet. Neben typischen Anwendungsbeispielen werden auch neue Einsatzfelder, wie z.B. die technische Bauteiltrocknung oder die Optimierung von Laborprüfverfahren vorgestellt. Abschließend wird der Einfluss der Feuchte auf Energiebedarf, Raumklima und Hygiene bei der Gebäudesimulation beleuchtet.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Standort Holzkirchen

Fraunhoferstraße 10 | 83626 Valley
Telefon +49 8024 643-0

info@ibp.fraunhofer.de
www.ibp.fraunhofer.de
www.wufi.de

C Nachweisverfahren und Berechnungsmethoden

**C 2 Einblicke in die hygrothermische Bauteilsimulation
für die Praxis**

Hartwig M. Künzel, Christian Bludau und Daniel Zirkelbach

Sonderdruck aus:

Bauphysik-Kalender 2025: Simulationen, BIM und KI.

Herausgegeben von Nabil A. Fouad.

© 2025 Ernst & Sohn GmbH. Published 2025 by Ernst & Sohn GmbH.

ISBN 978-3-433-03451-4

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung 153		
1.1	Erläuterung der Intention dieses Beitrags 153	4.3	Zweidimensionale Beurteilung von Anschlussdetails 180
1.2	Vorstellung der Inhalte 153	4.4	Dämmung von Kaltwasserrohren und Kühlleitungen 181
2	Wärme- und Feuchteverhalten von Baustoffen und Bauteilen 153	4.5	Bautrocknungsmaßnahmen 183
2.1	Verhalten von Baustoffen gegenüber Feuchte 154	4.6	Entwicklung von Prüfmethoden zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit und Alterung von Bauteilen 184
2.1.1	Hygroskopizität und Hydrophilie 154	4.7	Anwendungsgrenzen der hygrothermischen Simulation 185
2.1.2	Feuchtetransport in porösen Medien 156	5	Bewertung von Simulationsergebnissen 188
2.1.3	Wärmetransport in feuchten Baustoffen 160	5.1	Analyse der Wassergehaltsverläufe 188
2.2	Außen- und raumklimatische Einflüsse 161	5.2	Beurteilung von Schadensrisiken 188
2.2.1	Raumseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen 161	5.2.1	Schimmel 188
2.2.2	Außenseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen 161	5.2.2	Holzfäule 190
2.2.3	Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen im Erdreich 162	5.2.3	Korrosion 191
2.2.4	Solare Einstrahlung 163	5.2.4	Frost 192
2.2.5	Niederschlag 164	5.2.5	Tauwasser in hydrophoben Faserdämmungen 193
2.2.6	Luftströmungen in und durch Außenbauteile mit Auswirkungen auf den Wärme- und Feuchtetransfer 166	5.3	Einfluss der Feuchte auf die Dämmwirkung 194
2.3	Anfangsfeuchte 168	6	Normen und Richtlinien zur Feuchteschutzbemessung durch hygrothermische Simulation 195
3	Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports 169	6.1	Feuchteschutzbemessung mithilfe der hygrothermischen Simulation gemäß DIN EN 15026 195
3.1	Grundlagen 169	6.2	Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3 (03-2024) 196
3.2	Klimatische Randbedingungen 170	6.3	Weitere europäische Normen und Richtlinien zum Feuchteschutz durch hygrothermische Simulation 197
3.3	Durchführung der Simulation 170	7	Schlussfolgerung 198
4	Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen der hygrothermischen Simulation 173	8	Ausblick 199
4.1	Feuchteschutzbemessung für Neubau und Sanierung 173		Literatur 200
4.1.1	Bemessung von Dächern 174		
4.1.2	Bemessung von Außenwänden 178		
4.2	Prüfung wesentlicher oder unsicherer Einflussgrößen durch Parametervariation 179		

1 Einleitung

Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau dienen der Hygiene für die Nutzer und der Energieeffizienz sowie Gebrauchstauglichkeit von Konstruktionen. Durch die Notwendigkeit der Dekarbonisierung sind die Anforderungen an die Nachhaltigkeit weiter gestiegen. D. h. neben der Verbesserung von Wärmedämmung und Luftdichtheit werden auch die CO_2 -Emissionen bei der Erstellung eines Gebäudes und bei der Produktion der verwendeten Baustoffe betrachtet. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Lebensdauer und der Recycelbarkeit von Baustoffen und Bauelementen zu, denn jeder Neubau steigert die Emissionen. Da die Feuchte nach wie vor die Hauptursache für Bauschäden und vorzeitige Alterung darstellt, gilt die Feuchteschutzbemessung von Baukonstruktionen als essenzieller Teil der Gebäudeplanung. Die hygrothermische Bauteilsimulation hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einem zuverlässigen Werkzeug für die Feuchteschutzbeurteilung von Bauteilen entwickelt. Darüber hinaus dienen solche Simulationen beispielsweise auch der Ursachenforschung von Bauschäden, der Vorhersage der Austrocknungszeit nach Wasserschäden und der Definition von Randbedingungen für die labor-technische Schnellbewitterung.

1.1 Erläuterung der Intention dieses Beitrags

Zum Erlernen der Grundlagen und des Umgangs mit hygrothermischen Simulationswerkzeugen ist ein zweitägiges Seminar von Vorteil und anschließend die regelmäßige Anwendung in der Praxis. Um mehr Sicherheit bei der Eingabe und Interpretation der Rechenergebnisse zu erlangen, bieten sich weitere Vertiefungsseminare an. Der Umfang der notwendigen Informationen und Sachkenntnisse für die erfolgreiche Anwendung der hygrothermischen Bauteilsimulation übersteigt daher den möglichen Informationsgehalt eines Beitrags dieses Kalenders. Deshalb wird im Folgenden nicht die vollumfängliche Darstellung des Simulations-Knowhows angestrebt, sondern Ziel ist, den Praktiker die Möglichkeiten und Fallstricke der hygrothermischen Simulation an Beispielen zu erläutern und gleichzeitig entsprechende Literaturhinweise für eine Vertiefung der Materie anzubieten.

Dabei sind die Inhalte so gestaltet, dass sie nicht nur für Simulationslaien einen Einblick gewähren, sondern auch für Experten auf diesem Gebiet weiterführende Informationen bieten. Das gilt insbesondere für neue Forschungsergebnisse, die in den letzten Jahren die Beurteilung von hygrothermischen Simulationsergebnissen verbessert haben. Außerdem werden einige Anwendungsgrenzen und die Frage von notwendigen Sicherheitsreserven angesprochen. Mit dem nötigen Sachverstand sollte es auch Laien auf dem Gebiet der hygrothermischen Simulation möglich sein, Rechenergebnisse auf ihre Plausibilität hin zu beurteilen. Deshalb werden hier auch praktische Erfahrungen vorgestellt und diskutiert.

1.2 Vorstellung der Inhalte

Im Folgenden wird zunächst das Verhalten von Baustoffen gegenüber Feuchte diskutiert. Dazu werden die Eigenschaften Hygroskopizität und Hydrophilie definiert und anschließend die Feuchte- und Wärmetransport- und -speichermechanismen in porösen Baustoffen erklärt. Daran anschließend wird analysiert, welchen äußeren und raumseitigen Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen unterschiedliche Bauteile ausgesetzt sind und mit welcher Anfangsfeuchte im Einzelfall zu rechnen ist. Der Abschnitt 3 widmet sich den Voraussetzungen für eine hygrothermische Simulation und ihrer Durchführung. Dabei wird kurz auf die Ein- und Ausgabedaten eingegangen und der prinzipielle Unterschied der thermischen und feuchte-technischen Ergebnisse erklärt. In Abschnitt 4 werden die Einsatzbereiche für die hygrothermische Simulation sowie die Anwendungsgrenzen genauer beleuchtet. Dabei kommen neben der Feuchteschutzbemessung im Neubau und bei der Bausanierung auch Beispiele zur Sprache, die eine zweidimensionale oder eine kreisförmige Betrachtung erforderlich machen. Außerdem wird gezeigt, wie die hygrothermische Simulation auch für spezielle Anwendungsfälle, wie z. B. zur Entwicklung von Prüfverfahren oder zur Planung von Bautrocknungsmaßnahmen eingesetzt werden kann. Der Abschnitt 5 fasst sich mit Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse. Dabei werden auch sogenannte Postprozessmodelle beleuchtet, die die Risiken von Schimmelpilzwachstum, Holzfäule, Korrosion und Frostschäden auf der Basis der stationären Temperatur- und Feuchteergebnisse bewerten können. Zusätzlich wird eine neue Beurteilungsmethode zur Abschätzung der Gefahr von ablaufendem Tauwasser vorgestellt und der Einfluss der Feuchte auf die Wärmedämmwirkung diskutiert. Eine Zusammenfassung von relevanten Normen und Richtlinien zur Feuchteschutzbemessung ist in Abschnitt 6 zu finden. Am Ende des Beitrags folgen in den Abschnitten 7 und 8 die Schlussfolgerungen und der Ausblick.

2 Wärme- und Feuchteverhalten von Baustoffen und Bauteilen

Wie alle Materie auf der Erde leiten und speichern auch Baustoffe und Bauteile Wärme, allerdings in unterschiedlicher Größenordnung. Die Wärmeleitfähigkeit von guten Dämmstoffen liegt etwa zwischen $0,02 \text{ W/(m K)}$ z. B. bei nanoporösen Materialien und $0,04 \text{ W/(m K)}$ bei Standarddämmstoffen im Altbau. Die Wärmeleitfähigkeit von bauüblichen Metallen wie z. B. Aluminium und Kupfer beträgt demgegenüber fast das Zehntausendfache. Bei mineralischen Baustoffen hängt die Wärmeleitfähigkeit stark von deren Dichte ab und kann bis zum Hundertfachen der Werte von Dämmstoffen betragen, was allerdings deutlich weni-

ger ist als bei Metallen. Ähnlich wie die Wärmeleitfähigkeit hängt auch die Wärmespeicherfähigkeit stark von der Materialdichte ab, sowie von der spezifischen Wärmekapazität. Letztere liegt bei vielen Baustoffen im Bereich von etwa $1 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ und bei Wasser bei $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Feuchte Baustoffe haben deshalb eine etwas höhere spezifische Wärmekapazität als Trockene. Sie haben auch eine etwas höhere Wärmeleitfähigkeit, da diese für Wasser ca. $0,6 \text{ W}/(\text{m K})$ beträgt. Im praktischen Einsatz können dazu, wie später noch vertieft wird, Wasserverdunstungs- und Kondensationsvorgänge kommen, die ebenfalls einen Einfluss auf den Wärmetransport durch Bauteile haben.

Das Feuchteverhalten ist bei porösen Baustoffen komplexer als das Wärmeverhalten, wie im nächsten Abschnitt genauer erläutert wird. Wasser kann in flüssiger und dampfförmiger Phase durch Baustoffe gespeichert und transportiert werden. Bei Frost kann es auch in Form von Eis vorliegen. Im Gegensatz zum Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt der Feuchte-austausch in der Regel deutlich langsamer. Während Gebäude innerhalb von einer Woche vollständig auskühlen können, dauert die Austrocknung von Rohbaufuchte mitunter mehrere Jahre. Die häufig propagierte Stoßlüftung zum energiesparenden Luftaustausch (weil die Wärme in den Wänden bleibt) sorgt leider auch dafür, dass die trägere Feuchte den Raum und die Bauteile oft nicht in ausreichendem Maß verlässt [1].

Interessant ist das feuchtebedingte Dehn- und Schwindverhalten von Baustoffen, das im Gegensatz zur thermischen Dilatation häufig nicht linear ist. Unter baupraktischen Bedingungen kann es bei mineralischen und biobasierten Baustoffen größere Längenänderungen bzw. Spannungen auslösen als es bei Temperaturwechsellasten der Fall ist [2]. Wasser löst bei Einwirkung auf bestimmte Materialien auch chemische Reaktionen aus, wie z. B. Korrosion, Karbonatisierung und Hydratation. Durch das Zusammenspiel von flüssigem und dampfförmigem Transport können in porösen Baustoffen auch Inhaltsstoffe (z. B. Salze) ausgewaschen oder an bestimmten Stellen aufkonzentriert werden. Wasser ist auch die Grundlage für mikrobielles Wachstum, z. B. von Bakterien Pilzen und Algen. Im folgenden Abschnitt werden allerdings nur die Grundlagen für die wesentlichen Feuchtettransfervorgänge und deren Auswirkungen auf den Wärmetransport beschrieben.

2.1 Verhalten von Baustoffen gegenüber Feuchte

Im Prinzip können nur offenporige Baustoffe Feuchte aufnehmen und weiterleiten. Allerdings können sich die Wassermoleküle bei einigen Materialien, wie beispielsweise Polymeren, selbst Durchgänge schaffen, indem sie sich zwischen die Polymerketten schieben. Bei polaren Kunststoffen wie Polyamid ist dieser Vorgang so ausgeprägt, dass eine Folie bei höherer Luftfeuchte sogar diffusionsoffen wird, während sie bei niedriger Umgebungsfeuchte diffusionshemmend ist. Solche Fo-

lien können daher als feuchtevariable Dampfbremsen eingesetzt werden [3]. Weitere Beispiele sind die Funktionsmembranen in den sogenannten monolithischen Unterdeckbahnen für Schrägdächer. Sie sind zwar offen für Wasserdampf, lassen aber selbst bei Überdruck kein flüssiges Wasser durch. Von solchen Ausnahmen abgesehen ist jedoch das vorhandene Luftporengefüge dafür verantwortlich, dass Wasser in gasförmiger oder flüssiger Form aufgenommen und transportiert werden kann.

2.1.1 Hygroskopizität und Hydrophilie

In Bezug auf das Verhalten eines Baustoffs gegenüber Wasserdampf unterscheidet man zwischen hygroskopischen und nicht hygroskopischen Materialien. Ist ein Baustoff hygroskopisch, dann nimmt er vom trockenen Zustand so lange Wasserdampf aus der Luft auf, bis er seine Ausgleichsfeuchte bei den jeweiligen Umgebungsbedingungen erreicht hat. Da die Wasserdampfsorption in erster Linie von der umgebenden relativen Luftfeuchte abhängt, während die Umgebungstemperatur einen demgegenüber geringeren Einfluss hat, wird die hygroskopische Feuchtespeicherung meist in Form von stoffspezifischen Sorptionskurven dargestellt.

Bild 1 zeigt die Verläufe solcher Sorptionskurven (auch Sorptionsisothermen genannt) für drei in ihrer Hygroskopizität sehr unterschiedliche Baustoffe. Die Sorptionsisothermen werden durch Lagerung der Baustoffproben bei verschiedenen Umgebungsbedingungen im Labor bestimmt. Die obere Grenze des Messbereichs liegt bei etwa 95% r.F., da eine höhere Luftfeuchte selbst bei gut geregelten Klimakammern zur Betauung der Proben führen kann. Darüber hinaus, bis zur

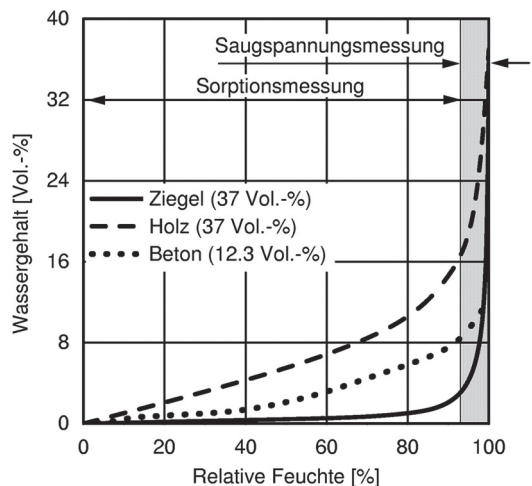


Bild 1. Typische Feuchtespeicherfunktionen für schwach (Ziegel), mäßig (Beton) und stark (Holz) hygroskopische Baustoffe. Die Werte in Klammern geben die freie Wassersättigung der einzelnen Materialien beim Eintauchen der Materialien in Wasser an.

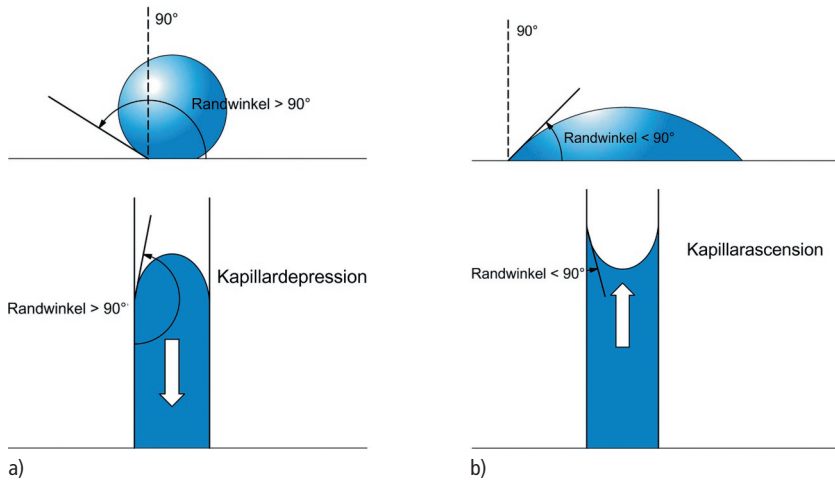


Bild 2. Unterscheidung zwischen a) hydrophoben und b) hydrophilen Baustoffen durch Messung des Winkels der sich zwischen der Oberfläche eines Wassertropfens und der Materialoberfläche einstellt. Beträgt dieser mehr als 90° wird die Oberfläche nicht benetzt und kein Wasser durch die Kapillarporen des Baustoffs aufgesaugt. Bei einem Winkel unter 90° wird die Oberfläche in den Kapillarporen benetzt und das Wasser steigt durch die sog. Kapillarkräfte in den Poren auf.

freien Wassersättigung im Kapillarwasserbereich, der auch als überhygroskopischer Feuchtebereich bezeichnet wird, muss deshalb auf die in [4] beschriebene Saugspannungsmessung zurückgegriffen werden. Die Auswertung dieser Messung ergibt eine überhygroskopische Feuchtespeicherfunktion (dargestellt im grau hinterlegten Bereich in Bild 1) die nahtlos an die klassische Sorptionsisotherme anschließt [5].

Bei grobporigen mineralischen Baustoffen, wie z. B. Ziegel, ist der überhygroskopische Wassergehaltsbereich größer als der hygroskopische, sodass für genaue Analysen eine Saugspannungsmessung vorteilhaft ist. Bei feinporigen Materialien wie Beton ist die Sorptionsfeuchte bei 93 % r.F. bereits so hoch, dass der Verlauf im überhygroskopischen Bereich bis zur freien Wassersättigung ohne nennenswerten Genauigkeitsverlust extrapolierbar ist. Holz und Holzwerkstoffe sowie andere Pflanzenfasern sorbieren ebenfalls schon im hygroskopischen Bereich große Feuchtemengen, sodass auch dort eine Extrapolation bis zur freien Wassersättigung in der Regel ausreicht. Bei nicht hygroskopischen Baustoffen, wie beispielsweise Glas, Metall oder einigen Schaumkunststoffen, lagert sich ohne Taupunktunterschreitung kein Wasser ein. Sie trocknen bei Umgebungsbedingungen unter 100 % r.F. vollständig aus.

Die Fähigkeit Wasserdampf in messbaren Mengen (durch Wiegen) aufzunehmen, hängt von der Größe der inneren Oberflächen einer Baustoffprobe ab. Diese innere Oberfläche ist bei feinporigen Materialien größer als bei solchen ohne sehr feine Poren. Dadurch ergeben sich auch entsprechende Unterschiede im praxisrelevanten Ausgleichsfeuchtegehalt bei 80 % relativer Feuchte. Diese Feuchte ist deshalb relevant, weil die

mittlere Außenluftfeuchte in Mitteleuropa etwa 80 % beträgt und die Gleichgewichtsfeuchte bei 80 % als Bezugsfeuchtegehalt für die Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstands von Baustoffen zugrunde gelegt wird. Der Vergleich von Ziegel und Holz zeigt, dass zwischen deren Ausgleichsfeuchte etwa der Faktor 10 liegt (Bild 1). Materialien, die wie Holz und andere Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen eine hohe Hygroskopizität aufweisen, werden auch als feuchtepuffernd bezeichnet, da sie in direktem Kontakt Raumluftfeuchteschwankungen ausgleichen.

Während sich der Begriff Hygroskopizität auf die Wasserdampfsorptionsfähigkeit eines Materials bezieht, wird die Aufnahmefähigkeit von flüssigem Wasser als Kapillaraktivität bezeichnet. Damit ein poröses Material Wasser kapillar aufnehmen kann, muss es jedoch hydrophil sein. Das Gegenteil von hydrophil ist hydrophob. Der Unterschied besteht in der Benetzbarkeit des Materials. Wenn die Moleküle eines Materials eine stärkere Affinität zu den Wassermolekülen haben als die Wassermoleküle untereinander, breitet sich das Wasser auf der entsprechenden Materialoberfläche (kann auch die Porenoberfläche sein) aus, d. h. das Material wird benetzt. Ist es umgekehrt, d. h. die Wassermoleküle haben eine stärkere Anziehungskraft untereinander als die Moleküle des Materials auf die Wassermoleküle, dann wird die Materialoberfläche nicht benetzt. In diesem Fall ist das Material hydrophob. Die Unterscheidung zwischen hydrophil und hydrophob erfolgt über die Messung des sich einstellenden Randwinkels zwischen einem Wassertropfen auf einer glatten, horizontalen Materialoberfläche. Wie in Bild 2 dargestellt, kann nur durch die Kapillaren von hydrophilen Materialien (Randwinkel $< 90^\circ$) Wasser gegen

die Schwerkraft hochgesaugt werden. Die meisten mineralischen Baustoffe sind hydrophil, d. h. sie nehmen beispielsweise bei Beregnung Wasser auf. Will man das verhindern, dann müssen sie mit wasserabweisenden Stoffen behandelt werden. Beispiele für solche Stoffe sind z. B. unpolare organische Substanzen, wie Wachse oder Öle sowie Silikone.

Für die Beurteilung des Feuchteverhaltens von Baustoffen ist es wichtig, zwischen den Eigenschaften Hygroskopizität und Hydrophobie genau zu unterscheiden. Ein Bündel von feinen Glasröhrchen kann nicht als hygroskopisch bezeichnet werden, aber es ist mit Sicherheit stark hydrophil und saugt Wasser rasch auf. Umgekehrt können hydrophobisierte Baustoffe durchaus hygroskopisch sein, wie die Untersuchungen in [2] zeigen. Dort wurde die Wasserdampfsorption von hydrophobierten und nicht hydrophobierten Natursteinen gemessen. Überraschenderweise war der Unterschied gering, d. h. die Hydrophobisierung hatte kaum Auswirkungen auf die Hygroskopizität. Die Gründe dafür sind einerseits, dass nur der oberflächennahe Bereich von den Hydrophobierungsmitteln erreicht wird. Andererseits wird vermutet, dass zwischen den Molekülen, die die Hydrophobie verursachen, noch ausreichend Platz auf den Porenwänden verbleibt, an dem Wasserdampfmoleküle andocken können, während flüssiges Wasser aufgrund seiner Oberflächenspannung nicht in die Kapillarporen eindringt.

Für beide Eigenschaften gilt, dass sie sich im Lauf der Zeit verändern können. Hydrophob eingestellte Bauprodukte können im Lauf der Zeit durch Verschmutzung oder Verwitterung (z. B. langsame Zersetzung oder Schwächung der Imprägnierung) hydrophiler werden. Eine besondere Gefahr für Materialien oder Systeme deren Funktion auf ihrer Hydrophobie beruht, wie beispielsweise Produkte für Regenschutz, stellen sogenannte Netzmittel wie Tenside dar. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie jeweils ein hydrophobes (unpolares) und ein hydrophiles (polares) Ende haben. Daher können sie an hydrophoben Oberflächen andocken und diese benetzbar machen. Das kann bei Unterdeckbahnen aus Spinnvlies dazu führen, dass sie durchlässig für Regenwasser werden und dadurch ihre Schutzfunktion verlieren. Umgekehrt hat sich gezeigt, dass die Wasseraufnahmefähigkeit (w-Wert) von hydrophilen Baustoffen durch die Bewitterung im Lauf der Zeit nachlassen kann. Die Gründe dafür können chemische Umwandlungen der Oberflächenschicht bei Außenputzen sein oder auch kaum wahrnehmbares mikrobielles Wachstum im Oberflächenbereich von Verblendern aus Naturstein, Ziegel oder anderen Baustoffen. Die Hygroskopizität kann sich ebenfalls verändern, z. B. durch den Eintrag von hygroskopischen Salzen oder anderen Verschmutzungen.

Dabei ist der Einfluss von hygroskopischen Salzen auf die Sorptionsisotherme von porösen Baustoffen besonders groß. Bild 3 zeigt die Abhängigkeit der Sorptionskurven von Vollziegel in Abhängigkeit vom Gehalt an Kochsalz (Natriumchlorid). Neben Nitraten aus der Tierhaltung ist Kochsalz eine häufige Verunreinigung

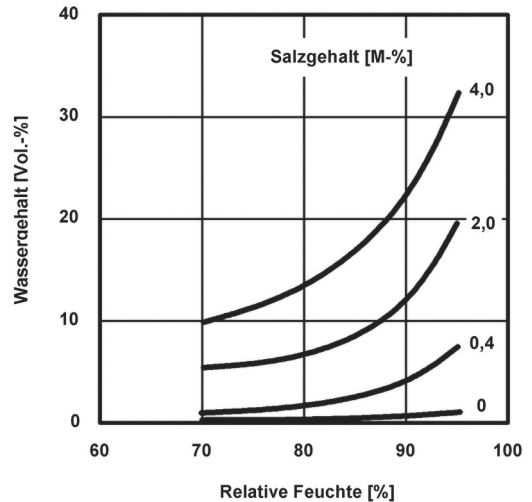


Bild 3. Messung der Sorptionsfeuchte von kochsalzgetränkten Vollziegelsteinen nach der Trocknung [6]

bei alten Wandbaustoffen (Meersalz oder Tausalz). Da sich durch die Anwesenheit von Salzen nicht nur die Wasserdampfsorption, sondern auch die Diffusionseigenschaften verändern, stellt die Simulation von versalztem Mauerwerk eine Herausforderung dar [6]. Rechenergebnisse für Baustoffe mit einem nicht vernachlässigbaren Salzgehalt sollten daher experimentell überprüft werden.

2.1.2 Feuchtetransport in porösen Medien

Die wesentlichen Feuchtetransportmechanismen in porösen Baustoffen stellen die Dampfdiffusion, die Oberflächendiffusion und die Kapillarleitung dar. In Materialien die kein festes Porengefüge besitzen, wie z. B. Kunststoffe, findet die sogenannte Lösungsdiffusion statt. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass diese Art der Diffusion am ehesten durch den Dampfdiffusionsansatz beschreibbar ist, wobei der Diffusionswiderstand im Gegensatz zur normalen Dampfdiffusion von der Umgebungsfeuchte abhängt. Andere Transportphänomene, wie Sickerströmung durch Gravitation im nicht wassergesättigten Porenraum oder Wanderung von Wassermolekülen durch elektrische Felder oder osmotischen Druck sind bislang nur unzureichend beschreibbar bzw. spielen nur in Ausnahmefällen eine Rolle. Sie werden deshalb hier nicht betrachtet.

Nicht zu vernachlässigen ist der Feuchtetransport/-eintrag durch Luftströmungen. Dieses Phänomen findet allerdings meist nicht wie die Dampfdiffusion vollflächig statt, sondern eher durch lokale Fehlstellen, d. h. Luftundichtheiten oder Leckagen. Da weder die Größenordnung noch die Luftströmungswege aufgrund von solchen Fehlstellen bei der Planung genau bekannt sind, müssen diese Effekte abgeschätzt und in vereinfachter Form modelliert werden. Neben der Durchströmung von Bauteilen von innen nach außen oder

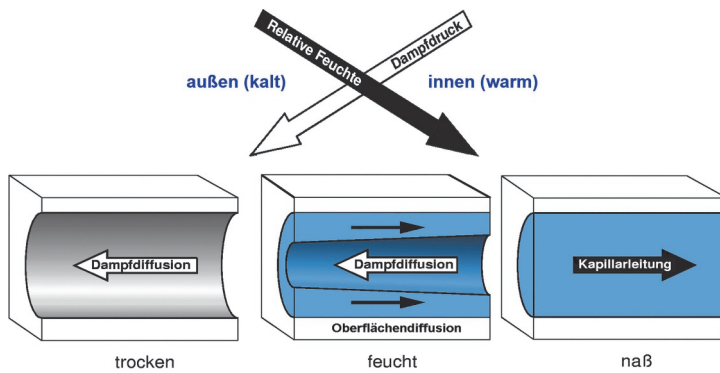


Bild 4. Feuchte- und Dampfttransportphänomene in den Baustoffporen einer massiven Außenwand im Winter bei unterschiedlichem Wassergehalt

umgekehrt, ist häufig auch die Belüftung von Bauteilebenen mit Außenluft für das hygrothermische Verhalten von Baukonstruktionen relevant. Da unterschiedliche Formen der Luftströmungen vor allem bei Leichtbauteilen eine große Rolle spielen, wurde deren Abschätzungen und Auswirkungen bereits im Bauphysik-Kalender 2022 genauer beschrieben [7] und werden daher hier nicht wiederholt.

Das Zusammenspiel der bereits genannten Feuchte-transportphänomene wird in Bild 4 anhand einer Zylinderkapillare in einem Wandausschnitt erläutert. Auf beiden Seiten der betrachteten Kapillare sollen übliche Randbedingungen herrschen, d. h. der Dampfdruck sei innen größer als außen und die relative Luftfeuchte sei außen höher als innen. Ist der Baustoff ausreichend trocken oder nicht hygroskopisch, diffundiert der Wasserdampf entsprechend dem Dampfdruckgefälle von innen nach außen. Enthält der Baustoff genügend hygroskopische Feuchte, sodass der Sorbatfilm an den Porenwänden beweglich wird (dies ist etwa ab 60 % r.F. der Fall), dann findet neben der normalen Dampfdiffusion auch die sog. Oberflächendiffusion durch sorbiertes Wasser an den Porenwänden statt. Da die Dicke bzw. Beweglichkeit der sorbierten Molekülschicht mit der relativen Feuchte zunimmt, erfolgt, wie in [4] nachgewiesen, ein Feuchte-transport im Sorbatfilm entgegen dem Dampfdruckgefälle von Bereichen höherer Konzentration in Bereiche mit geringerer Konzentration an sorbiertem Wasser.

Die treibende Kraft für die Oberflächendiffusion ist daher die relative Feuchte und nicht der Dampfdruck. Bei der Oberflächendiffusion handelt es sich also um einen Flüssigtransport und nicht um eine Diffusion in der Gasphase. Es kann zwar in Einzelfällen zweckmäßig sein, die Oberflächendiffusion der Dampfdiffusion zuzuschlagen, z. B. durch Verwendung des im Feuchtebereich ermittelten μ -Wertes. Allerdings führt dieses Vorgehen nur dann zu ähnlichen Rechenergebnissen, wie bei strikter Trennung beider Transportphänomene, wenn in der betrachteten Bauteilschicht keine großen Temperaturgradienten auftreten. Bei der feuchte-technischen Beurteilung von kapillaraktiven Innendämmsystemen würde das jedoch zu völlig falschen

Ergebnissen führen. Deshalb müssen die Materialeigenschaften für die Dampfdiffusion und die Oberflächendiffusion inklusive Kapillarleitung schon bei der messtechnischen Bestimmung getrennt erfasst werden [8].

Bei direktem Kontakt mit flüssigem Wasser, beispielsweise infolge von Schlagregen, kommt es bei hydrophilen Baustoffen zur Füllung der Poren und zum Einsetzen der sogenannten Kapillarleitung, die die schnellste Form des Feuchte-transportes darstellt. Die treibende Kraft ist hier der kapillare Unterdruck, der sich aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers im Meniskus an der Grenzfläche zwischen Porenluft und Wasser bildet. Der kapillare Unterdruck steht in einem funktionalen Zusammenhang mit der relativen Luftfeuchte über dem Meniskus, d. h. der treibenden Kraft in der flüssigen Phase kann eine bestimmte relative Luftfeuchte in der Gasphase zugeordnet werden. Alternativ zum kapillaren Unterdruck kann deshalb auch die relative Feuchte als Transportpotenzial für die Kapillarleitung verwendet werden.

Dampfdiffusion

Die Dampfdiffusion in porösen Baustoffen ist mit der Diffusion von Wasserdampf in Luft vergleichbar. Die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten und die Abhängigkeit vom Gesamtdruck sind für die Belange der Bauphysik vergleichbar. Der Wasserdampftransport durch poröse Medien wird jedoch durch das Feststoffgerüst behindert und erfolgt deshalb auf Umwegen und durch entsprechend kleinere Querschnitte. In der Regel können diese Effekte mithilfe einer für den jeweiligen Baustoff charakteristischen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl berücksichtigt werden (Gl. (1)):

$$g_v = -\delta/\mu \nabla p \quad (1)$$

mit

g_v Wasserdampfdiffusionsstromdichte [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$]

δ Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft [$\text{kg}/(\text{ms Pa})$]

μ Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [–]

p Wasserdampfpartialdruck [Pa]

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gibt das Verhältnis der Diffusionsleitkoeffizienten von Wasserdampf in Luft und im Baustoff an. Bei Folien, Beschichtungen oder anderen bahnenförmigen Bauprodukten hat sich die Angabe des Diffusionssperrwertes, auch diffusionsäquivalente Luftschichtdicke genannt (s_d -Wert), eingebürgert. Dieser Wert ist das Produkt aus der Dampfdiffusionswiderstandszahl μ und der Schichtdicke d (Gl. (2)):

$$s_d = \mu \cdot d \quad (2)$$

Der s_d -Wert ist auch als die Dicke einer ruhenden Luftschicht mit demselben Dampfdiffusionswiderstand interpretierbar. Gerade wenn die Dicke von Folien, Anstrichen oder Beschichtungen nicht exakt bestimmbar ist, erweist sich die direkte Messung des s_d -Wertes als zweckmäßig.

Lösungsdiffusion

Als Lösungsdiffusion wird der Feuchtetransport in organischen Polymeren bezeichnet, die am Bauwerk für Abdichtungen und Beschichtungen oder als Dampfbremsen verwendet werden. In diesen Materialien schafft sich das Wasser durch Anlagerung an die Makromoleküle der Polymeren diesen Porenraum selbst, wobei die Kunststoffe quellen. Die Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf hängt davon ab, ob die Makromolekülketten sowie der Weichmacher polar oder unpolar sind. Polare Moleküle haben eine wesentlich stärkere Affinität zu Wasserdampf als unpolare.

Die Lösungsdiffusion kann, wie die oben erläuterte Dampfdiffusion, mithilfe von Gl. (1) beschrieben werden. Die Diffusionswiderstandszahl μ bzw. der s_d -Wert für polymere Filme oder Membranen sind im Gegensatz zu denen von porösen Baustoffen oft feuchteabhängig. Bild 5 zeigt die Abhängigkeit des s_d -Wertes eines Polymers von der relativen Feuchte am Beispiel einer feuchtevariablen Dampfbremse aus Polyamid. Die Abnahme des Dampfdiffusionswiderstandes bei Erhöhung der relativen Luftfeuchte beträgt mehr als eine Größenordnung. Während die Folie im trockenen Zu-

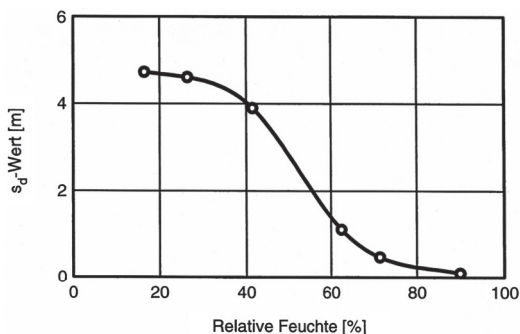


Bild 5. Abhängigkeit des Dampfdiffusionssperrwertes (s_d -Wert) einer feuchtevariablen Dampfbremsefolie aus Polyamid von der relativen Feuchte [3]

stand einen s_d -Werte von über 4 m aufweist, fällt dieser bei einer Umgebungsfeuchte von 90 % r.F. auf unter 0,1 m. Diese extreme Variation der Dampfdurchlässigkeit begründet den Einsatz dieser Folie als feuchteregulierende Dampfbremse.

Flüssigtransport

Als Flüssigtransport werden Kapillarleitung und Oberflächendiffusion bezeichnet, die meist gleichzeitig auftreten und in der Regel nicht unterscheidbar sind. Wie eingangs ausgeführt, wird als Oberflächendiffusion der Feuchtetransport in den an den Porenwänden hygroskopischer Stoffe sorbierten Wassermolekülschichten und in Mikrokapillaren bezeichnet. Im Gegensatz zur Kapillarleitung, von der man normalerweise erst bei Wassergehalten im überhygroskopischen Bereich spricht, fängt die Oberflächendiffusion bei mineralischen Baustoffen bei etwa 60 % relativer Feuchte an. Zwischen etwa 80 % und 95 % relative Feuchte geht die Oberflächendiffusion langsam in die Kapillarleitung über, die ab 95 % den Feuchtetransport dominiert.

Im Kontakt mit flüssigem Wasser kommt es bei hydrophilen porösen Baustoffen zum kapillaren Saugen. Trägt man den Wassergehalt einer von unten befeuchteten Baustoffprobe über der Wurzel der Zeit auf, dann ergibt sich meist eine Gerade, deren Steigung als Wasseraufnahmekoeffizient w (w -Wert) bezeichnet wird. Obwohl es sich bei der Kapillarleitung eigentlich um eine Strömung handelt, hat sich aufgrund der Vielfalt und der beträchtlichen Dimensionsunterschiede der einzelnen Baustoffporen der folgende diffusive Transportansatz bewährt:

$$g_w = -D_w(w) \nabla w \quad (3)$$

mit

g_w Flüssigtransportstromdichte [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})$]

w Wassergehalt [kg/m^3]

$D_w(w)$ Flüssigtransportkoeffizient (wassergehaltsabhängig) [m^2/s]

Die Temperaturabhängigkeit von D_w basiert in erster Linie auf der bekannten Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Wasser. Entscheidend ist jedoch die Abhängigkeit vom Wassergehalt. In der Regel steigt der Flüssigtransportkoeffizient annähernd exponentiell mit dem Wassergehalt an (Bild 6). Außerdem ist der Koeffizient auch davon abhängig, ob der Baustoff direkt mit Wasser in Kontakt steht (z. B. bei einer nassen Oberfläche durch Schlagregen), oder ob sich die Feuchte ohne Wasserkontakt im Inneren weiterverteilt. Der Saugprozess beim Kontakt mit Wasser verläuft sehr schnell, da hier vor allem die größten Kapillarporen beteiligt sind, die den kleinsten Strömungswiderstand besitzen.

Nach Unterbrechung der Wasserzufuhr am Ende eines Regenschauers findet auch weiterhin ein nennenswerter Flüssigtransport statt. Jetzt saugen die kleineren Kapillarporen, die sich wegen ihres höheren Strömungswiderstandes nicht mit der gleichen Ge-

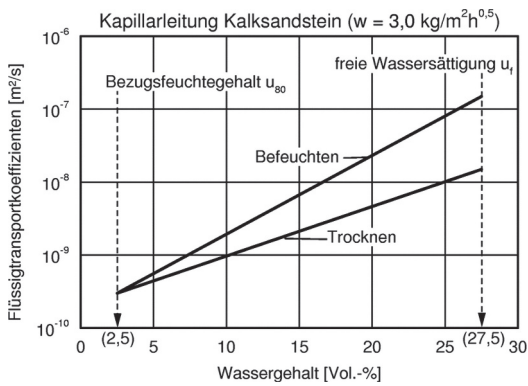


Bild 6. Flüssigtransportkoeffizienten für den Saugvorgang (Befeuchten) und die anschließende Weiterverteilung und Trocknung von Kalksandstein in Abhängigkeit vom Wassergehalt im logarithmischen Maßstab. Die feuchteabhängigen Koeffizienten wurden nach [9] approximiert und ihre Genauigkeit messtechnisch überprüft.

schwindigkeit füllen konnten, aufgrund ihrer stärkeren Kapillarwirkung (die kapillare Saugkraft ist umgekehrt proportional zum Porenradius) Wasser aus den größeren Poren und verteilen es weiter ins Innere des Bauteils und bei fortschreitender Trocknung auch wieder zurück in Richtung äußerer Oberfläche. Die Geschwindigkeit der kapillaren Umverteilung ist zwar etwa eine Zehnerpotenz kleiner als der Saugvorgang bei Kontakt mit Wasser, aber anfangs immer noch deutlich größer als die Dampfdiffusion. Das ändert sich jedoch mit abnehmendem Wassergehalt bis der Punkt erreicht wird, bei dem der Flüssigtransportstrom auf eine ähnliche Größenordnung schrumpft wie der Dampfdiffusionsstrom und der Trocknungsvorgang schließlich nur noch durch Dampfdiffusion erfolgt.

Die Dampfdiffusion ist zwar deutlich langsamer als der Kapillartransport bei einem hohen Wassergehalt. Da sie aber längere Zeit andauert, sind zuverlässige Materialkennwerte für die Dampfdiffusion (μ -Werte) sehr wichtig für die Genauigkeit der Feuchteberechnung. Ist der Flüssigtransport bei mäßigem Wassergehalt allerdings in ähnlicher Größenordnung wie der Diffusionsstrom und diesem entgegengerichtet, wie z. B. bei kapillaraktiven Innendämmsystemen, dann müssen für diesen Feuchtebereich auch die Flüssigtransportkoeffizienten in einer höheren Genauigkeit vorliegen als es sonst erforderlich wäre. Daher wurde für die exakte Berechnung der kapillaren Rückleitung von kapillaraktiven Dämmstoffen ein spezielles Messverfahren für die Flüssigtransportkoeffizienten entwickelt (Bild 7). Bei diesem Test werden die Dämmstoffe einem für innen gedämmte Altbauwände typischen Temperatur- und Feuchtegefälle ausgesetzt. Dazu werden sie mit Ausnahme der Stirnseite abgedichtet und rückseitig gekühlt. Die Stirnseite wird in einem konstanten Klima von 23 °C und 50 % r.F. (Wohnraumklima) ausgesetzt, bis sich ein Gleichgewichtszustand, auch Beharrungszustand genannt, einstellt, bei dem sich die Dampfdiffusion aus dem Raum und die kapillare Rückleitung in entgegengesetzter Richtung die Waage halten. Danach werden die Dämmstoffproben ausgebaut und die Wasseraufnahme sowie die Feuchteprofile gemessen. Mithilfe vergleichender hygrothermischer Simulationen werden die Flüssigtransportkoeffizienten für den entsprechenden Feuchtebereich bestimmt. Diese Methode liefert im Übergangsbereich von der hygrokopischen zur überhygrokopischen Feuchte die genauesten Ergebnisse für die kapillare Rückleitung von kapillaraktiven Dämmstoffen.

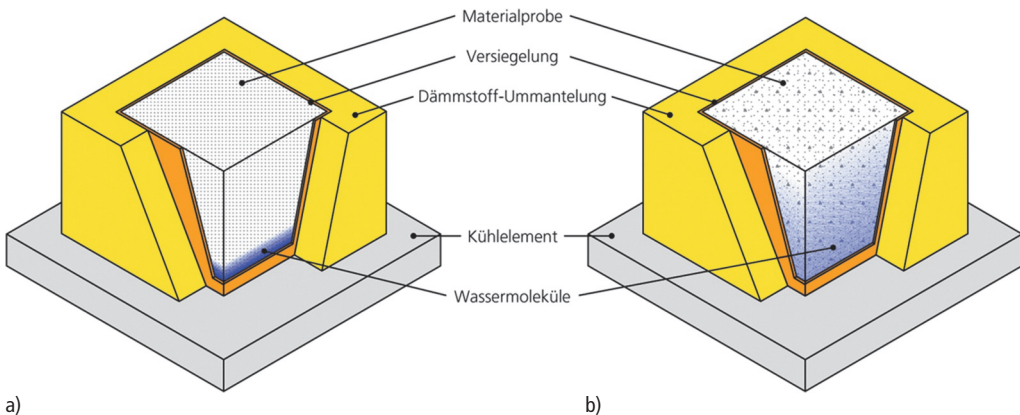


Bild 7. Feuchteverteilung beim Kapillaraktivitätstest (Kapitest) für Innendämmmaterialien am Beispiel eines Dämmstoffes, a) mit geringer kapillarer Rückleitung, b) mit hoher kapillarer Rückleitung

2.1.3 Wärmetransport in feuchten Baustoffen

Es ist allgemein bekannt, dass man in nassen Kleidern schneller friert als in trockenen. Das liegt zum einen an der schlechteren Dämmwirkung (höhere Wärmeleitfähigkeit) von feuchten Textilien und zum anderen an der Verdunstung der aufgenommenen Feuchte, die dem Körper ebenfalls Wärme entzieht. Der erste Effekt beruht auf der Erhöhung der Wärmeleitung durch das Wasser, das eine etwa zehnmal höhere Wärmeleitfähigkeit als trockene Kleidung besitzt. Der zweite, sogenannte Latentwärmeeffekt, beruht auf der Verdunstung von Wasser aus der Kleidung in der Nähe der Hautoberfläche, die dadurch gekühlt wird. Dieser Vorgang hält allerdings nur so lange an, bis das Textilgewebe wieder trocken ist. Das setzt voraus, dass die Kleidung so dampfdurchlässig ist, dass ein nennenswerter Dampftransport an die Umgebungsluft stattfinden kann. Die gleichen Vorgänge finden auch in Baustoffen statt, wobei sie desto stärker zum Tragen kommen, je wärmedämmender das Material ist.

Bild 8 zeigt den aus gemessenen Wärmeströmen ermittelten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von drei verschiedenen dämmenden Baustoffen in Abhängigkeit vom Wassergehalt nach [10]. Während die Wärmeleitung von wärmedämmendem Mauerwerk, wie bei dem hier dargestellte Porenbeton linear mit dem Wassergehalt ansteigt, ist der Anstieg bei Polystyrol-Hartschaum leicht progressiv. Ungewöhnlich ist der starke Anstieg der gemessenen Wärmeleitfähigkeit von Mineralwolle schon bei geringem Wassergehalt. Dies ist auf die Feuchteverlagerung durch Dampfdiffusion im Dämmstoff nach Anlegen eines Temperaturgradienten zurückzuführen. Hier handelt es sich um den bereits erläuterten Latentwärmeeffekt, der bedingt durch die

Phasenwechsel der Materialfeuchte während der Messung im Plattenapparat auftritt.

Diese Latentwärmeeffekte sind in der Regel kurzfristiger Natur und haben nichts mit der realen Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes zu tun. Dabei kommt es auch nicht nur auf die Feuchte im Material, sondern auch auf den Wassergehalt der angrenzenden Bauteilschichten an. D. h. der Wärmetransport durch Diffusion und Phasenwechsel ist keine Stoffeigenschaft, sondern eine „Bauteileigenschaft“ [11]. Die Darstellung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit für die Mineralwolle in Bild 8 ist daher als Stoffeigenschaftsfunktion für die Ermittlung des stationären Wärmedurchgangs nicht geeignet. Durch entsprechende Vorkehrungen bei der Messung im Plattenapparat bzw. durch vergleichende hygrothermische Simulationen [12], lässt sich jedoch die wahre Wärmeleitfähigkeit der Mineralwolle ermitteln. Ergebnisse aus solchen Untersuchungen zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit der Mineralwolle ohne Latentwärmeeffekte eine ähnliche Feuchteabhängigkeit zeigt, wie die von Polystyrol-Hartschaum in Bild 8. Ähnliches gilt auch für andere diffusionsoffene Dämmstoffe.

Das heißt jedoch nicht, dass die Latentwärmeeffekte aufgrund von Dampfdiffusion und Phasenwechsel grundsätzlich vernachlässigbar wären. Sie werden bei der hygrothermischen Simulation auch automatisch mitberechnet. Sie dürfen aber nicht als Feuchtezuschlag auf die Wärmeleitfähigkeit eines Materials berücksichtigt werden. Sie ergeben sich vielmehr aus den Dampfdiffusionsvorgängen im gesamten Bauteil und den entsprechenden Phasenwechseln auf der Warm- und Kaltseite. Bei diffusionshemmenden Dämmstoffen, wie z. B. Polystyrol-Hartschaum, ist der Latentwärmeeffekt in der Regel unbedeutend, da die Diffusion hier sehr langsam verläuft. In kapillaraktiven Dämmstoffen oder dämmenden Wandbildnern mit Dampfdiffusionswiderständen (μ -Werten) bis etwa 10, kann der sogenannte Heat-pipe-Effekt auftreten, d. h. die Feuchte diffundiert von der Warm- zur Kaltseite und verursacht dadurch einen Latentwärmeeffekt, der jedoch nicht durch Trocknung nach gewisser Zeit endet, sondern aufgrund der kapillaren Rückleitung langfristig aufrecht erhalten bleibt. Die Wärmeverluste durch diesen Effekt sind allerdings gemäß [13] meist kleiner als 10 %.

Abschließend ist festzuhalten, dass Feuchte einen beträchtlichen Einfluss auf das thermische Verhalten von Baustoffen und Gebäuden ausübt. Beispielsweise kann die Baufeuchte den Heizenergieverbrauch in der ersten Heizperiode im Vergleich zum errechneten Bedarf verdoppeln [14]. Schlagregen erhöht bei zweischaligen Wänden den Wärmedurchgang um etwa 10 Prozent und begrünte Dächer bleiben oft deutlich kühler als normale Flachdächer. Das muss nicht immer ein Nachteil sein. Um den Hitzeinseleffekt in unseren Städten abzumildern, werden mehr Grünflächen und wasser-rückhaltende Systeme als Teil einer „Schwammstadt“ propagiert. Für die Quantifizierung der Wirkung sol-

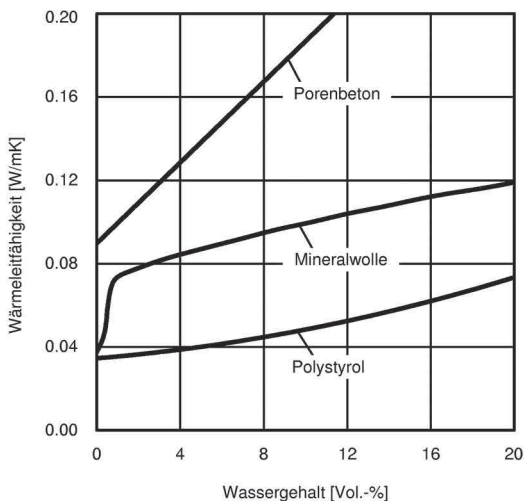


Bild 8. Aus gemessenen Wärmestromdichten von feuchten Baustoffen im Temperaturgefälle ermittelte Anstiege der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt im Material [10]

cher Systeme sowie für die Planung und Umsetzung kann die hygrothermische Simulation in Verbindung mit der Stadtklimasimulation [15] wertvolle Dienste leisten.

2.2 Außen- und raumklimatische Einflüsse

Vor der Auswahl geeigneter Feuchteschutzmaßnahmen ist eine Analyse der klimatischen Bauteilbeanspruchungen erforderlich. Weicht das Raumklima von den üblichen Verhältnissen in Wohn- oder Bürogebäuden ab, hat das häufig große Auswirkungen auf das Feuchteverhalten einer Konstruktion. Standardlösungen, wie sie in Normen, Verbandsrichtlinien oder Produktbeschreibungen zu finden sind, können hier Probleme bereiten, da sie für solche Belastungen nicht vorgesehen sind. Das gleiche gilt für Außenklimaverhältnisse, die vom bekannten Standardklima abweichen. Besonders verschattete Gebäude oder solche in Hochlagen, deren Oberflächen sich auch im Sommer nicht ausreichend erwärmen, sind besonderen Risiken ausgesetzt.

Feuchte kann als flüssiges Wasser und als Dampf in Bauteile eindringen, tut dies aber nur, wenn eine treibende Kraft dahintersteht. Im Fall von Regen sind es Schwerkraft und Winddruck sowie die Kapillarkräfte poröser Baustoffe, die dazu führen, dass ankommendes Regenwasser aufgesaugt wird. Die Wasserdampfdiffusion wird durch Partialdruckgefälle angetrieben. Im Fall von luftdurchlässigen Bauteilen – es gibt so gut wie keine Bauteile, die absolut luftdicht sind – wird der Wasserdampf auch als Teil einer gesamtgedruckgetriebenen Strömung in und durch das Bauteil transportiert. Ausschlaggebend für den Feuchtetransport sind daher die hygrothermischen Bedingungen im Bauteil selbst und in dessen Umgebung. Im nordamerikanischen ASHRAE Handbook of Fundamentals [16] sind die wesentlichen hygrothermischen Randbedingungen und Beanspruchungen zusammengefasst und werden dort eingehend behandelt. Als Region, in der der Holzbau dominiert, haben die Nordamerikaner in den letzten Jahrzehnten viele Erfahrungen mit Feuchteschäden gemacht und auch entsprechende Schadensvermeidungsstrategien entwickelt. Inzwischen haben sich viele dieser Feuchteschutzstrategien auch bei uns etabliert [7]. Im Folgenden werden die wesentlichen hygrothermischen Beanspruchungen, denen die Gebäudehülle ausgesetzt ist, kurz zusammengefasst.

2.2.1 Raumseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen

An der Innenoberfläche findet ein Wärme- und Feuchteausgleich mit dem Raum statt. Der Wärmeübergang vom Bauteil in den Raum und umgekehrt (Sommerfall/Winterfall) erfolgt sowohl durch Raumluftkonvektion als auch durch den langwelligen Strahlungsaustausch mit allen Raumumschließungsflächen, auch Zwischenwänden, Decken und Fußböden. Der lang-

wellige Strahlungsaustausch ist in der Regel größer als der Wärmeaustausch durch die Raumluftkonvektion; sein Anteil wird dennoch meist in Form eines gemeinsamen konstanten Übergangskoeffizienten dem Konvektionsansatz zugeschlagen. Dies führt bei einer Strahlungsheizung bzw. -kühlung im Raum zu einer Unterschätzung des Wärmeübergangs; bei gegenüberliegenden Außenbauteilen (z. B. bei einem Gebäude ohne Zwischenwände) jedoch zu einer Überschätzung. Der Feuchteausgleich zwischen der Bauteiloberfläche und dem Raum erfolgt analog zum konvektiven Wärmeübergang (ohne Strahlungsanteil!). Er hängt vom ebenfalls meist konstant angenommenen Feuchteübergangskoeffizienten und von der Dampfdruckdifferenz zwischen der Raumluft und der Oberfläche ab.

Während im Raum häufig eine heizungsbedingte Ungleichverteilung der Temperatur vorhanden ist, kann beim Dampfdruck in der Regel von homogenen Verhältnissen im Raum ausgegangen werden. Ist der Dampfdruck bekannt, kann die relative Feuchte in Abhängigkeit von der Temperaturverteilung berechnet werden. Bei Gebäuden mit schwankenden Raumlufthtemperaturen kommt es meist auch zu Veränderungen beim Dampfdruck. Die temperaturbedingte Änderung der relativen Luftfeuchte bewirkt Sorptions- bzw. Desorptionsprozesse in den Oberflächenmaterialien, was den Dampfdruck im Raum entsprechend senkt bzw. ansteigen lässt. Dieses Phänomen, das auch als Feuchtepufferung bezeichnet wird, sorgt dafür, dass der Dampfdruck bei einer Erhöhung der Raumtemperatur ebenfalls ansteigt. Deshalb ist es günstig, beim Hochheizen kalter Räume gleichzeitig zu lüften, um die aus den Umschließungsflächen desorbierte Feuchte abzuführen.

2.2.2 Außenseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen

Der Wärme- und Feuchteausgleich zwischen Außenluft und Bauteiloberfläche erfolgt ganz ähnlich wie an der raumseitigen Oberfläche. Allerdings variiert der konvektive Wärmeübergangskoeffizient stark mit der Luftströmung am Gebäude, die sowohl wind- als auch auftriebsinduziert sein kann. Trotzdem wird auch hier häufig ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient verwendet, der im besten Fall an die mittlere Windgeschwindigkeit am betrachteten Standort angepasst ist. Im Gegensatz zur raumseitigen Oberfläche können die konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeströme an der Außenoberfläche entgegengesetzt sein. Dies ist vor allem bei gut gedämmten Wänden und noch stärker bei Dächern in klaren Nächten der Fall und führt in der Praxis zu einer Unterkühlung der Außenoberfläche. Grund ist hier der langwellige Strahlungsaustausch zwischen der Bauteiloberfläche und dem Nachthimmel, dessen Temperatur meist deutlich niedriger liegt. Zur Berücksichtigung dieses Strahlungseffektes sollten deshalb konvektiver und strahlungsbedingter Wärmeaustausch strikt getrennt betrachtet und be-

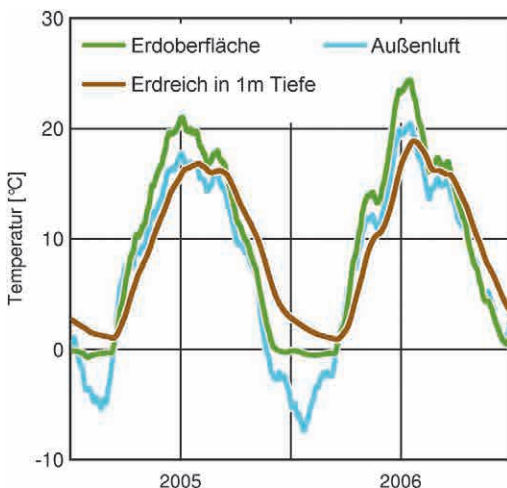
rechnet werden, zumindest dann, wenn die Oberflächenunterkühlung zu einer relevanten Befeuchtung mit der Folge von Algenwachstum bei Wänden [17] oder unerwünschtem Tauwasser in der Belüftungsebene von Dächern und belüfteten Fassaden führen kann [18]. Das Phänomen der strahlungsbedingten Oberflächenunterkühlung beschränkt sich jedoch nicht nur auf die nächtliche Abstrahlung, sondern findet auch im Zusammenhang mit anderen kalten Objekten statt, wie beispielsweise bei Eis- oder Schneeflächen in Wintersportstadien. Aus diesem Grund gibt es häufiger Probleme mit dem raumseitigen Teil des Daches solcher Konstruktionen, da dieser durch den langwelligen Strahlungsaustausch meist kälter ist als die Luft im Stadion.

2.2.3 Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen im Erdreich

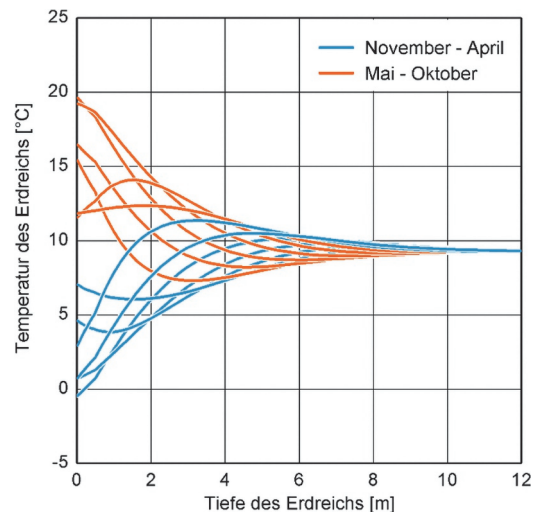
Bauteile, die an das Erdreich angrenzen, wie z. B. Kellerwände, unterliegen anderen Randbedingungen als oberirdische Außenbauteile. Das Raumklima hängt noch stärker von der Nutzung ab (Lagerraum (kalt) oder Heizungskeller (warm)), wobei sich die Bewohner in den Kellerräumen meist weniger häufig aufhalten. Trotzdem können dort in Einzelfällen hohe Luftfeuchten auftreten, z. B. in Räumen in denen Wäsche getrocknet wird oder wenn die Räume im Sommer zu stark gelüftet werden (Feuchteintrag durch höheren Taupunkt der Außenluft). Selbst gut wärmedämmte Kellerräume sind oft kühler und weisen geringere Tagestemperaturschwankungen auf als oberirdische Wohnräume, da der Fensterflächenanteil und damit

auch der solare Energieeintrag in der Regel deutlich kleiner ist.

Die äußeren Temperaturrandbedingungen sind im Gegensatz zur Situation bei Außenwänden nicht nur höhenabhängig, sondern werden auch durch die Beheizung und das Wärmedämmniveau des Kellers beeinflusst. Durch die Wärmespeicherefähigkeit und den Wärmedurchlasswiderstand des Erdreichs werden die Wärmetransportprozesse aus dem Innenraum verlangsamt und phasenverschoben. Die Wärmeverluste durch Kellerwände sind deshalb meist geringer als bei oberirdischen Außenwänden gleichen Dämmniveaus. Im ungestörten Bereich, also ohne den Einfluss eines angrenzenden Gebäudes, folgen die Erdreichtemperaturen der Temperatur der Außenluft mit einer Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung, die beide mit der Tiefe zunehmen. Bild 9a zeigt die auf dem Freilandversuchsgelände in Holzkirchen gemessenen Temperaturen der Erdoberflächenschicht und in einem Meter Tiefe im Vergleich zur Außenlufttemperatur. Zwischen Außenluft und Erdoberfläche ist keine Phasenverschiebung erkennbar aber die Maxima und Minima unterscheiden sich etwas. Durch die Absorption der Sonnenstrahlung ist die Erdoberfläche im Sommer etwas wärmer als die Außenluft. Auch im Winter ist sie bis zu 7 K wärmer, was aber offensichtlich mit der Schneebedeckung (Erdoberflächentemperatur sinkt nicht unter 0 °C) der Fühlerposition zu tun hat. Die Grafik im Bild 9b zeigt die monatlichen Temperaturtiefenprofile im Erdreich für einen durchschnittlichen Standort in Deutschland. Mit zunehmender Tiefe fällt die Temperaturamplitude bei steigender Phasenverschiebung. Ab etwas acht Metern Tiefe bleibt die Temperatur über



a)



b)

Bild 9. a) gemessene Temperaturen der Erdoberfläche und des Erdreichs in einem Meter Tiefe über einen Zeitraum von zwei Jahren in Holzkirchen im Vergleich zum gleitenden Monatsmittel der Außenlufttemperatur, b) berechnete monatliche Temperaturprofile für Deutschland in Abhängigkeit von der Erdreichtiefe

das ganze Jahr konstant, wobei sie ohne die Einflüsse von Sonneneinstrahlung und Schnee ziemlich genau beim Jahresmittelwert der Außenlufttemperatur liegt. Wie bereits erwähnt, können beheizte Gebäude aber auch Erdschichtwärmetauscher zum Betrieb von Wärmepumpen die Erdschichttemperaturen beeinflussen. Bis sich allerdings im Erdreich ein eingeschwungener Zustand einstellt, z. B. nach der Errichtung eines größeren Gebäudes, kann es viele Jahre dauern.

Die relative Feuchte im Erdreich beträgt in der Regel annähernd 100%, selbst wenn kein Grund- oder Druckwasser vorhanden ist. Pflanzen können über ihr Wurzelwerk dem Boden bis zu einem kapillaren Unterdruck von ca. 15 bar Wasser entziehen. Darüber fangen sie an zu vertrocknen. Bei einem Unterdruck von 15 bar sind nur noch Poren mit einem Radius von weniger als $0,1\text{ }\mu\text{m}$ mit Wasser gefüllt. Über solchen Kapillarporen stellt sich eine relative Luftfeuchte von 99% ein. Da hierzulande fast überall Pflanzenwachstum auf unversiegelten Böden stattfindet ist davon auszugehen, dass die Bodenfeuchte im Mittel über der Gleichgewichtsfeuchte bei 99% r.F. liegt. Damit ist für die äußere Randbedingung bei erdberührten Bauteilen eine relative Feuchte zwischen 99% und 100% anzusetzen. Dies gilt im Übrigen auch für begrünte Dächer, wie messtechnische Untersuchungen in [19] gezeigt haben.

2.2.4 Solare Einstrahlung

Unabhängig vom Wärme- und Feuchtaustausch zwischen Oberfläche und Außenluft, bzw. im Fall des langwelligeren Strahlungsaustausches auch mit der Umgebung, stellt die kurzwellige Einstrahlung durch die Sonne eine wesentliche Wärmequelle dar. Im Gegensatz zu den vorgenannten Austauschvorgängen handelt es sich hier um eine stark gerichtete Wärmebeanspruchung. Deshalb ist deren Berücksichtigung deutlich komplexer und setzt nicht nur entsprechende Informationen zu Orientierung und Neigung für das betreffende Bauteil, sondern auch exakte Einstrahlungsdaten und ggf. Verschattungsmodelle voraus. Ganz wesentlich für die strahlungsbedingte Wärmequelle ist der kurzwellige Strahlungsabsorptionsgrad der Außenoberfläche. Unter kurzwelliger Einstrahlung versteht man den ultraviolethen, den sichtbaren und den sog. nahinfraroten Anteil des Sonnenspektrums. Während der UV-Anteil bei uns energetisch gesehen nur etwa 6% ausmacht, ist der sichtbare Bereich mit 52% am größten. Ebenfalls nicht zu vernachlässigen ist mit ca. 42% der infrarote (nicht sichtbare) Spektralbereich.

Bei den Oberflächen unterscheidet man zwischen stark reflektierenden, meist hellen (Absorptionsgrad $a_s \leq 0,3$) und stark absorbierenden, dunklen ($a_s \geq 0,6$) Oberflächen sowie dem dazwischenliegenden Bereich der durchschnittlich reflektierenden Oberflächen ($0,3 < a_s < 0,6$), der für die Oberflächen der meisten Außenwände charakteristisch ist. Dacheindeckungen und Ab-

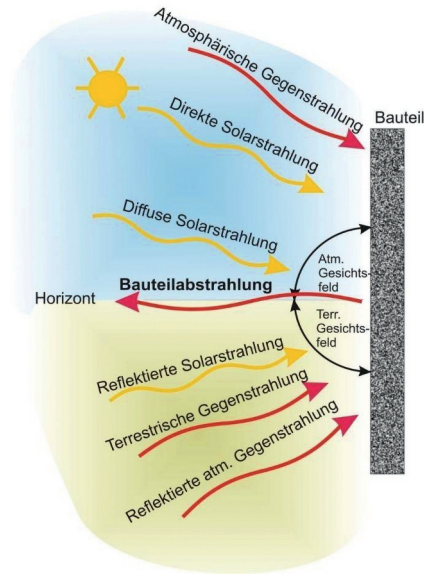


Bild 10. Strahlungsaustausch zwischen Bauteiloberfläche und Umgebung. Die kurzwellige solare Einstrahlung wirkt nur am Tag, während der langwellige (thermische) Strahlungsaustausch rund um die Uhr vorhanden ist [22].

dichtungen sind häufig stark strahlungsabsorbierend. Bei uns eher noch eine Ausnahme bilden reflektierende Dachbahnen oder spezielle Beschichtungen, die zumindest im Neuzustand einen Strahlungsabsorptionsgrad um 0,3 aufweisen. Diese sog. „Cool Roofs“ wurden zur Kühlenergieeinsparung in warmen Ländern entwickelt. Von ihrem Einsatz unter deutschen Klimaverhältnissen sollte bei außen dampfdichten Dächern überprüft werden, ob die resultierende niedrigere Oberflächentemperatur das erforderliche sommerliche Austrocknungspotenzial der darunterliegenden Konstruktion ausreichend sicherstellt [20].

Der Gegenspieler der solaren (kurzwelligen) Einstrahlung ist die langwellige Abstrahlung. Sie hängt von der Temperatur (in der vierten Potenz) und vom langwelligen Emissionsgrad der Bauteiloberfläche ab. Ihr entgegen wirkt, wie in Bild 10 skizziert, die Abstrahlung der Umgebung und der Atmosphäre. Da die atmosphärische Gegenstrahlung eine geringere Leistung hat, als die Abstrahlung von der Bauteiloberfläche, stellt der langwellige Strahlungsaustausch in der Regel eine Wärmesenke für das Bauteil dar. Durch Anstriche oder Beschichtungen mit einem niedrigen langwelligen Emissionsgrad ($\epsilon \ll 0,9$) wird diese Wärmesenke reduziert. In der Nacht führt dies zu einer geringeren Oberflächenunterkühlung und in der Folge zu keiner oder weniger Oberflächentauwasserbildung [21]. Bei Sonneneinstrahlung wird die Oberfläche entsprechend wärmer.

Ein ähnlicher Effekt der Temperaturerhöhung tritt bei unbeschichteten Blecheindeckungen oder Bekleidun-

gen auf. Da der langwellige Emissionsgrad von Metallen meist deutlich unter dem Emissionsgrad nichtmetallischer Materialien liegt, ist bei blanken Metalloberflächen die Wärmeabgabe durch langwellige Abstrahlung stark vermindert. Im Vergleich zu einer nichtmetallischen Oberfläche mit ähnlichem kurzwelligem Absorptionsgrad erhöht sich dadurch die Temperatur bei Sonneneinstrahlung spürbar. An Blechdächern wurden deshalb auch in Holzkirchen schon Oberflächentemperaturen bis zu 90 °C gemessen. Solch hohe Temperaturen können nicht nur die Dauerhaftigkeit von darunterliegenden Materialschichten beeinträchtigen (Kunststoffe verzeichnen häufig eine beschleunigte Alterung bei hohen Temperaturen), sie führen auch zu einer ausgeprägten thermischen Ausdehnung der Eindeckung, die bei der Planung zu berücksichtigen ist.

2.2.5 Niederschlag

Die Bedeutung des Niederschlags als Schadensursache bei Gebäuden wird heutzutage meist unterschätzt. Zum Schutz vor Schlagregen wurden früher Bauernhöfe so orientiert, dass der Eingang zum Wohnhaus auf der Ostseite und die Stallungen auf der Westseite (Wetterseite) lagen. Wohngebäude mit einschaligen Wänden in exponierten Lagen hatten auf der Wetterseite oft einen zusätzlichen Schlagregenschutz in Form von Schindeln, Schiefer- oder später auch Faserzementplatten. In einigen Regionen wurden die Dächer weit heruntergezogen oder entsprechende Dachüberstände vorgesehen, alles mit dem Ziel, das Eindringen von Regenwasser in Außenwände oder ins Gebäude durch die Fenster zu verhindern. Heute bevorzugen die Planer eine kubische Architektur mit sehr geringen Dachüberständen und überlassen den Schlagregenschutz den modernen Fenstern und wasserabweisenden Putz- und Anstrichsystemen. Dies erhöht allerdings die Feuchtebeanspruchung der Fassade, sowohl durch Schlagregen als auch durch nächtliche Tauwasserbildung.

Gegen den Niederschlag von oben (im Fachjargon wird die Niederschlagsmenge, die auf eine horizontale Fläche fällt, Normalregen genannt) schützen Dächer und Regenwasserableitungs- und Versickerungssysteme. Im Fall von Leckagen sollte rasch Abhilfe erfolgen. Bestimmte Dachdämmsysteme, wie z. B. die klassischen Umkehrdächer leiten das Regenwasser unterhalb der Dämmung ab, wobei in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge Wärmeverluste entstehen, die berücksichtigt werden müssen [23]. Heutzutage wird die Dämmung dieser Dächer meist mit einer diffusionsoffenen Trennlage versehen, die den Großteil des Regenwassers über der Dämmung ableitet, sodass kaum noch niederschlagsbedingte Wärmeverluste entstehen. Trotzdem bleibt es aber auch unter den Dämmplatten noch feucht.

Regenfeuchte, die von Dacheindeckungen aufgenommen wurde, kann bei Sonneneinstrahlung auch zum

Innenraum hin austrocknen und das Bauteil stark befeuchten. Dieses Phänomen, das im Englischen als „solar vapour drive“ bezeichnet wird, kann unter ungünstigen Umständen wie z. B. bei vermörtelten Dachziegeln die Unterkonstruktionen schädigen. Der Niederschlag kann aber auch positive Wirkungen besitzen, indem er zur Abkühlung von Bauteilen im Sommer beiträgt und Pflanzenwachstum ermöglicht. Beispielsweise benötigen Dachbegrünungen bei ausreichendem Niederschlag keine zusätzliche Bewässerung.

Schlagregen

Die Schlagregenbeanspruchung eines Gebäudes hängt von verschiedenen Faktoren ab. Der wichtigste Parameter ist die Orientierung. Schlagregennmessungen an einem Versuchsgebäude in der Mitte des Freilandversuchsgeländes in Holzkirchen auf 680 m im Alpenvorland haben gezeigt, dass die jährliche Schlagregenbeanspruchung auf der Westseite bis über 500 Liter pro Quadratmeter betragen kann. Demgegenüber sind die Beanspruchungen auf die anderen Orientierungen fast zu vernachlässigen. Im Vergleich zur Westseite liegen sie im einstelligen Prozentbereich (Süden 8 %, Norden 4 %, Osten 2 %). Die Schlagregenbeanspruchung variiert auch mit der Gebäudehöhe und -exposition. Bei hohen Gebäuden kann der Unterschied der Beanspruchung mit der Höhe schon mal mehr als den Faktor 4 betragen, allerdings ist dann die Beanspruchung in den unteren Fassadenbereichen geringer als in der derselben Höhe eines kleineren Gebäudes [24]. Weitere Einflussfaktoren sind die Geländetopografie und die umgebende Bebauung, die meist eine Reduktion der Schlagregebeanspruchung zur Folge haben. Die Ergebnisse von hygrothermischen Simulationen, die normalerweise mit Klimadaten von freistehenden Wetterstationen arbeiten und diese auf Fassadenorientierung und Gebäudehöhe umrechnen, liegen daher in der Regel auf der sicheren Seite.

Die Schlagregenbeanspruchung einer Fassade kann mithilfe von stündlichen Wetterdaten zuverlässig aus dem Normalregen und der gleichzeitig gemessenen vektoriellen Windgeschwindigkeit (Betrag und Richtung) berechnet werden [24]. Es ist offensichtlich, dass mit steigender Schlagregenbeanspruchung dem Schlagregenschutz bei der Planung auch eine größere Bedeutung zukommt. Das Eindringen von Schlagregen in ein Bauteil sollte wirksam verhindert oder zumindest begrenzt werden. Das kann durch eine äußere belüftete Bekleidung erfolgen, die kein oder nur wenig Regenwasser aufnimmt und den Rest durch Drainage abführt. Auch eine Vormauerschale, die das Wasser speichert, aber das Wandinnere vor Feuchte schützt, ist geeignet. Hier muss man allerdings auf die Art der Unterkonstruktion achten. Bei zweischaligem Mauerwerk kann man auf eine Belüftung verzichten, bei einer Holzkonstruktion mit gemauerter Vorsatzschale ist eine Hinterlüftung derselben jedoch zu empfehlen [25]. In allen Fällen ist darauf zu achten, dass die Wand luftdicht oder besser winddicht ausgeführt ist. Ist das nicht

der Fall, kann der Staudruck des Windes das Regenwasser durch Spalten oder Risse in die Konstruktion treiben. Bei einschaligem Mauerwerk bedeutet dies, es sollte auf mindesten einer Seite verputzt sein, da unverputztes Mauerwerk in der Praxis selten ausreichend luftdicht ist. Das Aufbringen eines Wärmedämm-Verbundsystems allein macht eine Außenwand nicht luftdicht.

Der Außenputz auf Mauerwerk macht das Mauerwerk zwar winddicht, aber er schützt nur unter bestimmten Voraussetzungen vor der kapillaren Wasseraufnahme und der damit verbundenen Erhöhung der Mauerwerksfeuchte. In Regionen mit mittlerer oder starker Schlagregenbeanspruchung sind deshalb gemäß DIN 4108-3 [26] wasserabweisende Außenputzsysteme zu applizieren. Mithilfe der hygrothermischen Simulation wurden die auf Messungen aus den 80er Jahren beruhenden Grenzwerte für die Wasseraufnahme und den Diffusionswiderstand überprüft [27]. Dabei hat sich gezeigt, dass die damals definierten Anforderungen im Prinzip richtig sind. Allerdings sollten sie für den heutigen Wärmedämmstandard etwas angepasst werden, sodass sich folgende Grenzwerte für die Putzschicht ergeben: Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert) $\leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \sqrt{\text{h}})$ und Diffusionswiderstand (s_d -Wert) $\leq 1,0 \text{ m}$. Für Wärmedämm-Verbundsysteme mit Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen könnten noch strengere Anforderungen sinnvoll sein. Solche speziellen Anforderungen können bei Bedarf auf der Basis von hygrothermischen Simulationsstudien entwickelt werden.

Ablauf- und Spritzwasser

Die Erfahrungen aus 70 Jahren Freilandversuchen zeigen, dass die Fassaden der Versuchsgebäude auf der Wetterseite mit Abstand am stärksten verwittert sind. An Fassaden mit Schäden aufgrund der Schlagregenbeanspruchung waren die unteren Bereiche oft stärker betroffen als die oberen, obwohl in den oberen Bereichen aufgrund der Gebäudeumströmungsverhältnisse die Schlagregenbeanspruchung am größten ist. Dieses Phänomen lässt sich durch das Abfließen des Regenwassers auf der Fassade und die geringere Windtrocknung in den unteren Wandbereichen erklären. Für die hygrothermische Simulation bedeutet das, dass eine höhenbedingte Differenzierung der Schlagregenbeanspruchung für eine bestimmte Fassade nur dann Sinn macht, wenn das Wasser von den stark beanspruchten höher gelegenen Bereichen z. B. durch Regenrinnen separat abgeleitet wird.

Die Schlagregenmenge wird normalerweise mit einem Regenschirm bestimmt, dessen Öffnung zweckmäßigerweise in die vertikal ausgerichtete Fassade integriert ist. Hängt der Regenschirm vor der Fassade, dann steigt die empfangene Regenmenge, je nach Abstand, zwischen 10 % und 20 % an [24]. Wird die Empfangsöffnung nur geringfügig aus der Vertikalen nach oben gedreht, kann sich die gemessene Wassermenge vervierfachen. Bild 11b zeigt die Wassermengen, die an einer Fassade mit zwei identischen Schlagregenschirmen bestimmt wurden. Einer dieser Schlagregenschirme war vertikal in die Fassade integriert, die Öffnung des anderen wurde um nur 5° aus der Fas-

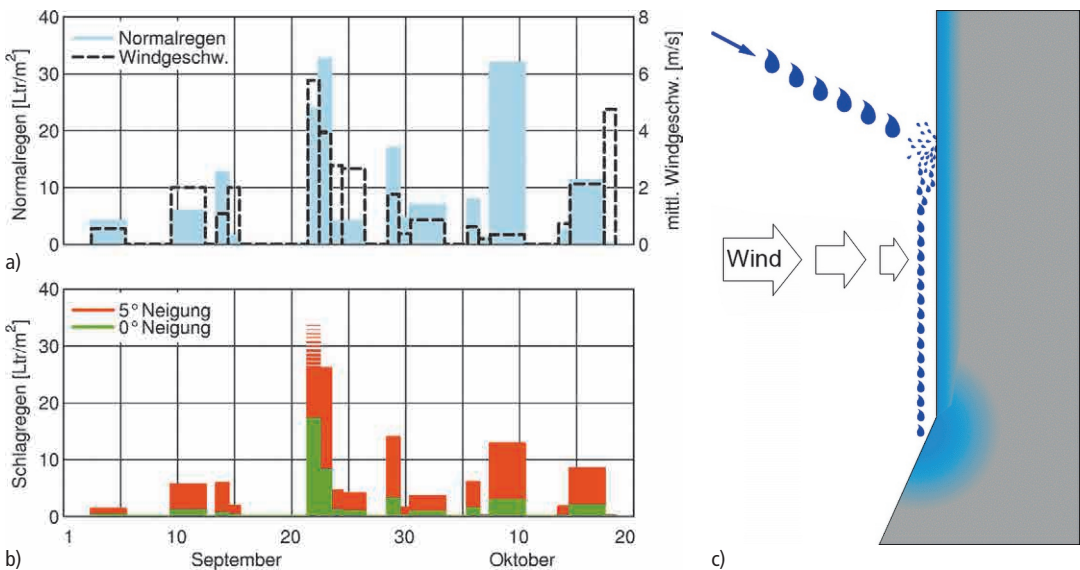


Bild 11. Schlagregenbelastung (b) gemessen als Tagessummen (bzw. 3-Tagessummen am Wochenende) in der Mitte einer 4 m hohen nach Westen orientierten Versuchshalle an vertikalen und um 5° gegenüber der Vertikalen geneigten Fassadenelementen (c) im Vergleich zum Niederschlag auf eine horizontale Fläche und zur Geschwindigkeit der Westwindkomponente (a) [29]

sade nach oben geneigt. Die Unterschiede in den gemessenen Schlagregenmengen waren erstaunlich groß. Der Grund dafür ist in Bild 11c skizziert. Durch frühere Untersuchungen ist bekannt, dass beim Auftreffen der Regentropfen auf die Fassade nur etwa 70 % der ankommenden Wassermenge an der Fassade verbleiben und entweder ablaufen oder aufgesaugt werden, während ca. 30 % des Wassers zurückspritzen [28]. Dieses Spritzwasser wird jedoch vom Wind daran gehindert die Staudruckzone zu verlassen, sodass es nahe an der Fassade zu Boden fällt. Dieses Phänomen kann bei Schlagregen am Boden des Gebäudes in Form eines dünnen nassen Streifens parallel zur Fassade beobachtet werden. Ragt ein Teil der Fassade heraus, so wie der um 5° gedrehte Schlagregenschirm, dann wird ein Großteil des herabfallenden Spritzwassers dort aufgefangen. Das erklärt auch die häufig zu beobachtende Schädigung im Sockelbereich von unten verstärktem Mauerwerk. Soll das Feuchteverhalten von Außenwänden, die aus der Vertikalen nach vorne geneigt sind, berechnet werden, dann sollte die Schlagregenbeanspruchung entsprechend vergrößert werden. In solchen Fällen können manchmal auch bewährte wasserabweisende Putze keinen ausreichenden mehr Schutz bieten.

Regenwasserpenetration

An der Fassade ablaufendes Regenwasser kann bei Winddruck durch die äußere Wandbekleidung dringen. Bei vorgehängten Fassaden ist das in der Regel kein Problem, da das Wasser auch rückseitig ablaufen und schnell wieder trocknen kann. Anders sieht es bei Wänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen aus. Solche Systeme sind, wie bereits erwähnt, nicht luftdicht, sodass im Bereich von Fensteranschlüssen oder Durchdringungen Wasser hinter die Wärmedämmung laufen kann. Ohne spezielle Vorkehrungen, wie beispielsweise Drainagemöglichkeiten und ein hohes Austrocknungspotenzial, besteht daher für feuchteempfindliche Wände ein Schadensrisiko, das in Nordamerika und Skandinavien enorme Kosten verursacht hat. Mithilfe der hygrothermischen Simulation konnte gezeigt werden, welche Konstruktionen ein hohes Risiko tragen und welche meist robust genug sind, um kleinere Regenwasserleckagen verkraften zu können [30]. Dazu wurde der in den USA entwickelte und in die europäische Normung DIN EN 15026 [31] übernommene Vorschlag, ein Prozent der auf die Fassadenoberfläche auftreffenden Schlagregenmenge als Feuchtequelle an einer ausgewählten Stelle im Bauteil zu berücksichtigen, verwendet.

Falls der Niederschlag entweder als Normalregen oder Schlagregen für die Bemessung eines Bauteils eine Rolle spielt, sollte bei der Auswahl der Klimadaten für die hygrothermische Simulation darauf geachtet werden, dass die Regen- und Winddaten (Geschwindigkeit und Richtung) eine kritisch repräsentative Situation am Standort des Gebäudes darstellen, d. h. sie sollen die Niederschlagsbeanspruchung so abbilden, dass

sie für die Bemessung auf der sicheren Seite liegt, ohne jedoch eine Extremsituation zu repräsentieren, die nur in Ausnahmejahren vorkommt. Dazu müssen die Daten, wie alle anderen Klimaparameter für die Simulation mindestens als Stundenwerte vorhanden sein.

2.2.6 Luftströmungen in und durch Außenbauteile mit Auswirkungen auf den Wärme- und Feuchtetransfer

In Außenbauteilen können beabsichtigte und ungewollte Luftströmungen mit signifikantem Einfluss auf deren Temperatur- und Feuchteverhalten auftreten. Zu den beabsichtigten Luftströmungen gehört z. B. die Hinterlüftung von äußeren Bekleidungen bei Wänden oder Eindeckungen bei Dächern. Ungewollt ist dagegen in der Regel die Durchströmung von Bauteilen von innen nach außen oder umgekehrt. Das gleiche gilt für die Eigenkonvektion bzw. das Durchströmen (Windwashing) und das Umströmen (Airlooping) von Dämmschichten. Airlooping ist ebenfalls eine Art Eigenkonvektion, die durch Luftspalte auf beiden Seiten der Dämmschicht bedingt ist, die über Undichtheiten in den Kopf- und Fußbereichen in Verbindung stehen. Eigenkonvektion in Dämmstoffen kann bei Faser- oder Schüttdämmstoffen auftreten, wenn deren Strömungswiderstand zu gering ist, um den Auftriebskräften standzuhalten. Im Folgenden werden die einzelnen Strömungsphänomene und deren Auswirkungen auf den Wärme- und Feuchtetransfer beschrieben. Außerdem werden die einfachen mathematischen Ansätze erläutert, die eine Berücksichtigung dieser Strömungsphänomene auch bei eindimensionaler Betrachtung erlauben.

Hinterlüftung

Bild 12 zeigt drei Beispiele für Luftströmungen, die nicht nur in Leichtkonstruktionen auftreten können. Die wichtigste und in der Regel gewollte Konvektion betrifft die Hinterlüftung der äußeren Schalung. Sie soll der Austrocknung von Feuchte dienen, die entweder aus dem Raum oder durch Niederschlag in die Belüftungsebene eingedrungen ist. Allerdings kann bei hochgedämmten Bauteilen durch die Hinterlüftung nicht nur eine Trocknung, sondern auch eine zusätzliche Befeuchtung durch nächtliche Unterkühlung stattfinden. Welcher Effekt zu welcher Jahreszeit überwiegt, hängt von vielen Faktoren ab und kann nicht ohne genauere Analyse, z. B. mittels hygrothermischer Simulation, vorhergesagt werden. Deshalb ist es mehr als wünschenswert die Auswirkung einer Hinterlüftung mit einem entsprechenden Modell zu erfassen. Die DIN EN 15026 von 2023 [31] gibt hierfür im normativen Anhang E Ziffer 2 ein einfaches Modell vor, dass von einem konstanten Luftwechsel und von einer idealen Durchmischung der Außenluft mit der Luft im Spalt ausgeht. Dieses Modell liefert im Vergleich zu Messungen am Objekt recht zuverlässige Ergebnisse [32,33]. Die Konvektion im Luftspalt ist zwar abhän-

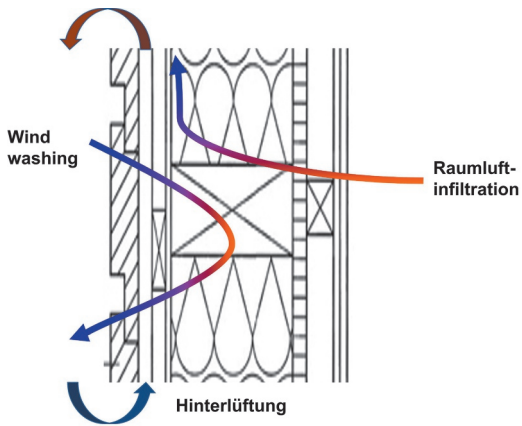


Bild 12. Beispiele für Konvektionsphänomene bei denen Raum- oder Außenluft in das Bauteil strömt

gig von der Windanströmung und der Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Spalt und der Außenluft, dennoch werden mit der Annahme eines konstanten Luftwechsels im Spalt, der dem mittleren Luftwechsel über das Jahr entspricht, meist recht gute Ergebnisse erzielt.

Windwashing

Die Luftkonvektion von außen durch die Wärmedämmung und manchmal bis hin zur inneren Beplankung, das sogenannte Windwashing, führt während der Heizperiode nicht zu einer Befeuchtung der Konstruktion, sondern wegen der geringen absoluten Feuchte der Außenluft eher zu einer Trocknung. Wird der Effekt jedoch so stark, dass die raumseitige Oberfläche dadurch bis zum Taupunkt der Raumluft abkühlt, dann führt das zu einer akuten Schimmelpilzgefahr im raumseitigen Bereich des Bauteils. Bei Konstruktionen, die nach dem Stand der Technik ausgeführt wurden, sollte das allerdings nicht vorkommen. In der Regel hat dieser Effekt in erster Linie energetische Konsequenzen (Hinweise darauf in [34, 35]), die jedoch häufig nicht mehr zu vernachlässigen sind.

Beispielsweise hilft ein luftbremsendes Vlies auf der Mineralwollendämmung hinter einer vorgehängten Fassade den Wärmestrom durch die Wand zu reduzieren [36]. Bei Dächern sollte der Sparrenzwischenraum vollgedämmt werden und die Bahnen der Unterdeckbahnen untereinander verklebt und an den Anschlüssen befestigt werden. Das verbessert die Winddichtheit, reicht aber allein meist nicht aus, um die geforderte Luftdichtheit des gesamten Bauteilaufbaus zu gewährleisten [37]. Die Luftdichtheit ist ein Maß für den Strömungswiderstand der Gebäudehülle gegenüber Luftströmungen vom Raum nach außen oder umgekehrt. Sie wird meist mithilfe der Blowerdoor-Methode bestimmt. Im Gegensatz dazu kann die Winddichtheit nicht direkt bestimmt werden, da die Strömung nicht zwingend durch das ganze Bauteil hindurchgeht, sondern nur durch Teile der Dämmebene erfolgt. Der bes-

te Indikator für die Winddichtheit ist daher die Differenz des Wärmestroms durch das Bauteil bei Wind und bei Windstille. Feuchtetechnische Nachteile sind durch Windwashing in unserer Klimazone außer bei gekühlten Gebäuden kaum zu befürchten. Daher finden sich zu diesem Phänomen bisher keine Modellansätze in unseren Feuchteschutzrichtlinien.

Bei der hygrothermischen Simulation eines Bauteils unter realen Bedingungen wird der mögliche Windwashingeffekt bisher nicht berücksichtigt. Das kann zu Abweichungen sowohl beim Wärmestrom als auch bei der Bauteilfeuchte im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen führen. Solche Abweichungen können auch genutzt werden, um den energetischen Einfluss des Windwashing-Effekts zu quantifizieren. Die Quantifizierung dieses Effekts kann auch durch Laborversuche erfolgen, z. B. durch Hotbox-Messungen bei definierter Luftanströmung des betrachteten Bauteils.

Raumluftinfiltration

Als Raumluftinfiltration bezeichnet man den Fall, in dem feuchte Luft aus dem Raum durch kleine Undichtheiten in die Konstruktion eindringt und an einer anderen Stelle wieder austritt. Besonders ungünstig sind dabei Kriechströmungen, die nicht durch gerade Spalten von innen nach außen verlaufen, sondern verschlungene Pfade nehmen, in denen es zur Abkühlung der Luft unter den Taupunkt kommt. Diese Strömungswege physikalisch korrekt, d. h. in ihrer dreidimensionalen Struktur zu erfassen, würde einen extremen Aufwand bedeuten. Außerdem müsste das Bauteil mit seinen Fehlstellen zuvor genau vermessen werden. Es liegt auf der Hand, dass dies praktisch nicht durchführbar ist. Deshalb werden hier folgende Modellannahmen getroffen: Die wesentlichste Vereinfachung ist die Überführung eines komplexen dreidimensionalen Luftströmungsphänomens in ein eindimensionales Kondensationsmodell. Dabei wird ähnlich wie bei der Dampfdiffusion davon ausgegangen, dass die Tauwasserbildung gleichmäßig über die gesamte Kaltseite des Bauteils stattfindet. Diese Annahme hat sich aufgrund der Ergebnisse in [38] als durchaus realistisch erwiesen.

Die strömungsbedingte Tauwassermenge errechnet sich für jeden Zeitschritt aus dem eindringenden Dampfkonzentrationsstrom und der Dampfkonzentrationsdifferenz zwischen der Raumluft und der Sättigungsdampfkonzentration unter den Taupunktbedingungen auf der Innenoberfläche der Kaltseite des Bauteils, also z. B. an der äußeren Beplankung. Der Dampfkonzentrationsstrom wird wiederum aus der Luftdurchlässigkeit des Bauteils und der Luftdruckdifferenz zwischen dem Raum und der Außenluft bestimmt. Die normativen Angaben zur Luftdurchlässigkeit gehen davon aus, dass das Bauteil nach dem Stand der Technik (best practice) installiert und abgedichtet wurde. Es handelt sich bei diesen Strömungen deshalb um kaum wahrnehmbare Kriechströmungen. Selbst bei sorgfältigster Ausführung unter Vermeidung aller Leckagen in Anschlussbereichen z. B. durch Überkle-

ben von Tackernadeln oder beim Verbinden einzelner Bahnen mithilfe von dafür vorgesehenen Klebebändern wird in der Regel keine vollständige und dauerhafte Luftdichtheit erreicht. Dies wurde durch die Versuche in [38] eindeutig nachgewiesen.

Luftdruckdifferenzen zwischen dem Inneren des Gebäudes und der äußeren Bauteilhülle treten entweder im Winter durch die Beheizung (thermischer Auftrieb) oder durch Windanströmung auf. Letztere wirkt häufig nur kurzzeitig ein und ist stark von der Geometrie und Exposition des Gebäudes abhängig. Es gibt meist auch keine großen Unterschiede zwischen Sommer und Winter. Das ist bei der auftriebsbedingten Strömung anders. Hier wirkt im Winter eine näherungsweise gleichbleibende Druckdifferenz, die im Sommer aufgrund der Temperaturangleichung zwischen innen und außen zum Erliegen kommt. Neben der einfach zu bestimmenden Druckdifferenz durch thermischen Auftrieb im Winter können auch noch, mechanisch induzierte Druckdifferenzen z. B. durch eine Lüftungsanlage auf die Gebäudehülle wirken. Diese sollten ebenfalls berücksichtigt werden. Das Modell zur Berücksichtigung der Durchströmung von Bauteilen von innen nach außen ist im Anhang E unter Ziffer 3 der DIN EN 15026 beschrieben.

Im Gegensatz zur Luftkonvektion durch thermischen Auftrieb sind die Luftdruckdifferenzen durch Wind bei uns das ganze Jahr über im Monatsmittel ähnlich groß, d. h. es gibt hier keinen ausgeprägten saisonalen Effekt. Das bedeutet, dass die Differenzdrücke durch Wind sowohl zu einer Befuchtung im Winter als auch zur Trocknung im Sommer beitragen können. Es gibt Hinweise darauf, dass die windinduzierte Austrocknung im Sommer und zum Teil auch in den Übergangszeiten den auftriebsbedingten winterlichen Feuchteintrag reduzieren können. Deshalb ist das derzeitige Infiltrationsmodell (ohne Windeinfluss) als konservativ zu betrachten. Zur Weiterentwicklung des Modells – in Hinblick auf die konvektive Austrocknung – sind allerdings weitere Forschungsanstrengungen notwendig.

Umströmung der Dämmschicht und Eigenkonvektion im Dämmstoff

Die Umströmung der Dämmschicht von der Warm- zur Kaltseite, auch als Airlooping bezeichnet, setzt einen durchgängigen Strömungspfad voraus, der konstruktiv bedingt sein kann. Dieses Phänomen kommt eher bei harten Dämmstoffplatten vor als bei weichen Klemmfilzen. Untersuchungen an zweischaligem Mauerwerk mit XPS-Dämmplatten als Kerndämmung in [39] haben gezeigt, dass sich der U-Wert der Wand durch diesen Effekt stark erhöhen kann. Für den Feuchtetransport durch die Dämmschicht folgt daraus ebenfalls eine entsprechende Steigerung, die vor allem bei diffusionshemmenden Dämmstoffen von Bedeutung ist. Schon aus energetischen Erwägungen ist eine Umströmung daher zu verhindern, z. B. indem die Dämmplatten vollflächig mit der Tragschale verklebt werden. Eine hygrothermische Simulation der Umströmung erübrigt sich hier in der Regel.

Etwas anders sieht es bei der thermischen Eigenkonvektion im Dämmstoff aus. Davon sind fast ausschließlich Faser- oder Schüttdämmstoffe bei entsprechend hohen Temperaturgradienten betroffen. Bei manchen alternativen Dämmstoffen, wie z. B. Strohballen kommt die Eigenkonvektion allerdings schon bei normalen Temperaturgradienten zum Tragen [40]. Noch wesentlich stärker ist der Eigenkonvektionseffekt bei einer Perimeterdämmung mit Schaumglasschotter [41]. Da Faser- und Schüttdämmstoffe meist diffusionsoffen sind, bleibt der Einfluss auf den Feuchtetransport durch die Dämmschicht in der Regel gering. Will man die thermische Eigenkonvektion für eine eindimensionale Simulation modellieren, dann bietet sich die Verwendung einer effektiven Wärmeleitfähigkeit bzw. eines effektiven Dampfdiffusionswiderstands an. Auf diese Weise wird beispielsweise auch die Eigenkonvektion bei der Modellierung von Luftschichten in Bauteilen berücksichtigt.

2.3 Anfangsfeuchte

Früher sprach man bei Neubauten vom Trockenwohnen und es wurde der Spruch geprägt, dass man im ersten Jahr seinen Feind und im zweiten Jahr seinen Freund drin wohnen lassen sollte, bevor man im dritten Jahr selbst einzieht. Aufgrund der früher verbreiteten Einzelofenheizung, die oft nur intermittierend genutzt wurde, war die Austrocknungszeit für die Baufeuchte wahrscheinlich noch etwas länger als das heute der Fall ist. Außerdem wurde beim Mauern mehr Mörtel verwendet als das bei den jetzigen, großformatigen Bausteinen, die meist nur noch im Bereich der Lagerfuge geklebt werden. Trotzdem gehen auch heute noch zahlreiche Bauschäden auf das Konto der Rohbaufeuchte. Ein kritischer Anfangsfeuchtegehalt ist oftmals den Einbaubedingungen, der Materialverarbeitung sowie der Witterung während der Bauphase geschuldet. Neue mineralische Bauteile wie ein frischer Estrich, Betondecken oder frisch aufgemauerte Wände geben erhebliche Wassermengen ab und können dadurch Holzbauteile oder auch Leichtbauzwischenwände mit Gipskartonplatten befeuchten. Aber auch die Mauerwerkswände selbst können nach intensiver Beregnung geschädigt werden, z. B. durch Frosteinwirkung wie in Bild 13 zu sehen.

Auch nach dem Ende der Bauphase können Schäden aufgrund der noch vorhandenen Rohbaufeuchte in Beton oder Mauerwerk entstehen, wenn diese während der Austrocknung in Bereiche mit feuchteempfindlichen Baustoffen wandert. Beispiele sind Feuchtwanderungen vom Mauerwerk in das Dach [42] oder von der tragenden Wand in die Wärmedämmung und den Außenputz, der dabei geschädigt wird [43, 44]. In den hier genannten Fällen konnte die Rohbaufeuchte als Ursache für die Schäden mithilfe der hygrothermischen Simulation bestätigt werden. Um Schäden durch Rohbaufeuchte vorzubeugen, enthält die Einleitung der DIN 4108-3 [26] vom März 2024 folgenden Passus:



Bild 13. Frostbedingte Abplatzungen an nassem Ziegelmauerwerk während der Bauphase

„Die Anforderungen und Hinweise beziehen sich auf Bauteile nach Abgabe der Rohbaufeuchte. In der Phase der Bauaustrocknung können Verhältnisse auftreten, die besonders berücksichtigt werden und zusätzliche Maßnahmen erforderlich machen können. Dies gilt insbesondere für Bauwerke, die kurz vor oder während der Heizperiode fertiggestellt werden sowie bei starken Niederschlägen während der Bauphase. In solchen Fällen sind gegebenenfalls technische Trocknungsmaßnahmen und eine gezielte Lüftung erforderlich, um möglichen Schäden durch die Rohbaufeuchte vorzubeugen. Zur Beurteilung können auch hygrothermische Simulationsverfahren verwendet werden.“

Neben der Rohbaufeuchte stellen auch Niederschlagsereignisse vor der Abdichtung des Gebäudes ein häufiges Problem dar. Bei Flachdächern ist in solchen Fällen eine technische Trocknung des Dachs oder eine genaue Verfolgung der natürlichen Austrocknung mithilfe von Sensoren vor der Inbetriebnahme empfehlenswert. Selbst wenn alle Baustoffe lufttrocken eingebaut wurden, ist eine gewisse Anfangsfeuchte vorhanden, die sich bei Inbetriebnahme des Gebäudes umverteilen und stellenweise erhöhte Feuchtegehalte verursachen kann. Deshalb sollten bei der Feuchteschutzbemessung immer auch die Anfangsbedingungen berücksichtigt werden. Wenn man diese nicht genauer kennt und eine erhöhte Anfangsfeuchte ausschließen kann, ist es zweckmäßig, für alle Bauteilschichten deren Gleichgewichtsfeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte anzusetzen. Dies entspricht der Feuchte, die Baustoffe aufweisen, die regengeschützt unter Außenluftbedingungen gelagert wurden.

3 Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports

Nachdem die wesentlichen Aspekte des Wärme- und Feuchteverhalten von Baustoffen bereits erläutert wurden, soll im Folgenden kurz auf die Historie und die Grundlagen der hygrothermischen Simulation eingegangen sowie die erforderlichen Eingaben vorgestellt werden.

3.1 Grundlagen

Die Bauphysik, die heute die Grundlage für eine höhere Energieeffizienz im Gebäudebereich darstellt, hat sich aus experimentellen Untersuchungen und empirischen Erfahrungen entwickelt. Während numerische Rechenverfahren auf den Gebieten der Tragwerksplanung und der Energieoptimierung bereits seit langem zum Standardrepertoire von Bauingenieuren gehörten, stehen Simulationsverfahren zur Beurteilung des feuchtetechnischen Verhaltens von Baukonstruktionen dem Praktiker erst seit etwa 30 Jahren zur Verfügung. Eine wesentliche Voraussetzung zur Entwicklung neuer Rechenmodelle ist deren Validierung mithilfe von gut dokumentierten und realitätsnahen experimentellen Ergebnissen. Das seit mehr als 70 Jahre bestehende Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) bietet in diesem Zusammenhang nicht nur einen wertvollen Pool an Messergebnissen zur Überprüfung der Rechenmodelle, sondern auch die notwendigen Eingabedaten für die Simulation in Form von meteorologischen Datensätzen, gemessenen Übergangsbedingungen und praxisgerechten Materialkennwerten.

Aus den in [28] beschriebenen physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports lässt sich ein geschlossenes Differentialgleichungssystem entwickeln, mit dem man das hygrothermische Verhalten mehrschichtiger Hüllkonstruktionen unter den vorgegebenen Klimarandbedingungen berechnen kann. Folgende Transportmechanismen sind wesentlich für die Abbildung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse in porösen Stoffen und daraus zusammengesetzten Systemen:

- Dampfdiffusion, beruht auf den thermischen Eigenbewegungen der Moleküle im gasförmigen Zustand.
- Oberflächendiffusion stellt den Flüssigtransport im Sorbatfilm hygroskopischer Stoffe dar.
- Lösungsdiffusion findet nur in nichtporösen Stoffen, z. B. organischen Polymeren statt. Der Wassertransport erfolgt durch An- und Einlagern von Wassermolekülen in die Makromoleküle der Polymere auf der feuchten Seite. Durch Quellvorgänge werden dabei neue Porenräume für die Wassermoleküle geschaffen, in denen sie zur trockneren Seite wandern.
- Kapillarleitung stellt den Flüssigwassertransport in kapillarporösen Baustoffen dar.

In [28] wird dargelegt, warum zur Berechnung des nicht isothermen Feuchtetransports in porösen Stoffen

fen zwei unabhängige treibende Potenziale erforderlich sind. Einfache und physikalisch plausible Transportkoeffizienten ergeben sich bei der Wahl der echten Feuchtetriebskräfte „Dampfdruck“ und „Kapillardruck“. Der schwer messbare Kapillardruck lässt sich über die Kelvin-Beziehung in die relative Feuchte umwandeln. Der Dampfdruck und die relative Feuchte stellen somit zwei physikalisch begründete Feuchtetransportpotenziale dar, die allgemein bekannt und einfach zu messen sind. Das resultierende gekoppelte Gleichungssystem ist mittels bekannter Iterationsverfahren numerisch lösbar.

3.2 Klimatische Randbedingungen

Die Auswahl geeigneter klimatischer Randbedingungen hängt von vielen Faktoren ab. Handelt es sich um ein bewittertes Außenbauteil mit normalem Raumklima auf der Innenseite, sollte ein repräsentativer Wetterdatensatz für die entsprechende Region herangezogen werden. Die aktuelle DIN 4108-3 verweist dazu im Anhang D auf die hygrothermischen Referenzjahre aus [45]. Liegt das Gebäude anders als der zugehörige Referenzort an einem Gewässer, in der Stadt, in einer Senke oder auf einem Berg kann es zweckmäßig sein, die Außenklimaverhältnisse an die Lagesituation anzupassen, da einzelne Schadensmechanismen unter Umständen stark von solchen Einflussfaktoren abhängen. Gleiches gilt bei abweichenden Niederschlagsmengen, Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten mit entsprechendem Einfluss auf die Schlagregenbelastung. Eine Anpassung auf die lokalen Verhältnisse ist z. B. mithilfe des in [46] beschriebenen Lokalklimagenerators [47] möglich. Auch bei erdberührten Bauteilen oder solchen in Kontakt mit Grund- oder Oberflächenwasser können die äußeren Randbedingungen vom normalen Außenklima abweichen.

Bei klimatisierten Gebäuden wird das Raumklima von den geplanten Temperatur- und Feuchte-Sollwerten bestimmt. Für nicht klimatisierte Wohngebäude gibt es in den Regelwerken unterschiedliche Ansätze zur Berechnung des Raumklimas aus den Außenklimabedingungen [31, 48]. Unbeheizte Nebenräume lassen sich mit diesen Ansätzen jedoch nicht abbilden. Hierzu gibt es in [45, 49] und [50] sogenannte Nebenraumklimamodelle, die z. B. für die Bestimmung des Raumklimas in Tiefgaragen oder nicht beheizten Kellern und Dachräumen geeignet sind. Gemessene Raumklimadaten aus ähnlich gelagerten Fällen sind meist auch gut geeignete Eingabedaten. Bei Unsicherheit in Bezug auf die Qualität oder Angemessenheit der Raumklimadaten bietet es sich an, die Temperaturverläufe zu variieren, beispielsweise indem jeweils 2 K addiert bzw. abgezogen werden. Das zeigt den Einfluss des Raumklimas auf die Simulationsergebnisse und damit auch wie entscheidend die genaue Kenntnis dieser Daten im vorliegenden Fall ist. Wenn auch die Feuchte variiert werden soll, ist es sinnvoll, dies an der absoluten und nicht an der relativen Feuchte festzumachen, da die relative Feuchte keine unabhängige Größe darstellt.

Als Randbedingungen für die hygrothermische Simulation von erdberührten Bauteilen empfiehlt der Anhang D der DIN 4108-3 [26] einen sinusförmigen Verlauf der Erdreichtemperatur mit einem Mittelwert von 9 °C und einer Amplitude von 8 K mit einem Temperaturmaximum Anfang August. Dieser Temperaturverlauf entspricht dem langjährigen Durchschnitt in einem Meter Tiefe am Standort Holzkirchen, der für Deutschland als kritisch repräsentativ gilt. Bei Bauteilen die weniger als einen Meter in die Erde reichen, sind die Außenluftbedingungen anzusetzen. Für genauere Berechnungen der Temperaturverläufe an der erdberührten Bauteiloberfläche, können die tiefenabhängigen Temperaturen im ungestörten Bereich in einiger Entfernung zum Bauteil als Randbedingungen angesetzt werden und so das Erdreich mit seinen thermischen Eigenschaften in die Simulation eingebunden werden, wie das z. B. für die Auslegung einer Kellerwandinnendämmung in [51] umgesetzt wurde. Da die meisten erdberührten Bauteile eine äußere Abdichtung aufweisen, kommt den feuchtetechnischen Randbedingungen meist weniger Bedeutung zu. Daher rät der Anhang D zur sicheren Seite, das heißt konstant 100 % relative Luftfeuchte im Erdreich.

3.3 Durchführung der Simulation

Die Durchführung einer hygrothermischen Simulation inklusive der notwendigen Eingabedaten, der Diskretisierung und numerischen Lösung der Transportgleichungen sowie die experimentelle Validierung der Simulationsergebnisse ist ausführlich in [28] beschrieben. Eine Zusammenstellung der für eine Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauprodukten mit dem Programm WUFI® erforderlichen Datensätze zeigt Tabelle 1. Folgende Informationen sind für eine Simulation erforderlich:

- der Aufbau des zu berechnenden Bauteils und dessen Exposition, d. h. Orientierung und Neigung sowie eventuelle Verschattung,
- die hygrothermischen Stoffkennwerte und -funktionen der am Aufbau beteiligten Materialien; d. h. die Rohdichte, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit, die feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl sowie bei hygroskopischen, kapillaraktiven Stoffen auch die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung,
- die inneren und äußeren klimatischen Randbedingungen sowie die Vorgabe der Zeitschritte, die von den Klimadaten und der geforderten Rechengenauigkeit abhängt. Als außenseitige Klimaparameter dienen Stundenmittelwerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte sowie der solaren Einstrahlung, des Normalregens und der Windrichtung und -geschwindigkeit. Das Innenklima wird entsprechend der Planung vorgegeben oder gemäß DIN 4108-3 [26] unter Berücksichtigung der Bele-

Tabelle 1. Zusammenstellung der für WUFI®-Berechnungen erforderlichen Eingabedaten

Eingabeparameter	erforderliche Datensätze oder Angaben
Bauteildefinition	Aufbau des zu berechnenden Bauteils
	Exposition (Orientierung, Neigung)
Thermische und hygrische Stoffkennwerte sowie -funktionen	Rohdichte und Porosität
	spezifische Wärmekapazität
	feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
	evtl. Feuchtespeicherfunktion
Klimaparameter	evtl. richtungsabhängige Flüssigkeitsfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung
	Temperatur
	relative Luftfeuchte
	kurz- und langwellig Strahlung
Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen	Niederschlag, Wind (Richtung und Geschwindigkeit)
	Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient
	Strahlungsabsorptions- und -emissionsgrad
	Regenabsorptionsfaktor

gungsdichte aus den Außenlufttemperaturverhältnissen errechnet.

- die Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen an den Bauteilgrenzen. Zu den Übergangsbedingungen gehören der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient sowie die Strahlungsabsorptions- und -emissionsgrade und der Regenwasserbeanspruchungsfaktor.

Als Rechenergebnisse werden die stündlichen Veränderungen der Temperatur- und Feuchtefelder sowie der Wärme- und Feuchteströme über die Bauteilgrenzen ausgegeben. Aus diesen Ergebnissen können sowohl die langzeitlichen Verläufe der hygrothermischen Parameter (Temperatur, relative Feuchte, Wassergehalt) an verschiedenen Positionen im Bauteil als auch deren örtliche Verteilungen (Profile) zu bestimmten Zeitpunkten ermittelt werden. Eine zweckmäßige und anschauliche Art der Ergebnisdarstellung ist die filmähnliche Abfolge der instationären Feuchte- und Temperaturprofile. Bild 14 zeigt beispielhaft einen Schnappschuss aus einem solchen Ergebnisfilm, der bei der Simulation des hygrothermischen Verhaltens einer zweischaligen Wand entstanden ist.

Die Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse der hygrothermischen Simulation, auch mithilfe weiterer Modelle, z. B. zur Bestimmung des Schimmelpilzwachstumsrisikos, wird unter Ziffer 5 eingehend behandelt. Da die Beurteilung nicht nur Erfahrungen

im Umgang mit Simulationsmodellen erfordert, sondern zur richtigen Einordnung auch praktische Erfahrungen und eine entsprechende Plausibilitätskontrolle wünschenswert sind, wird dieser Teil in einem eigenen Abschnitt vertieft.

Im vorliegenden Abschnitt wurde zwar auf das Aufstellen und die Diskussion der Transportgleichungen verzichtet, aber ein paar wesentliche Aspekte, die sich aus den beiden partiellen Differentialgleichungen für den Wärme- und Feuchtetransport ergeben, sind auch für die Praxis von Bedeutung. Der erste Aspekt betrifft die Kopplung beider Gleichungssysteme, die gegenseitige Beeinflussung von Wärme- und Feuchtetransport. Der Einfluss der Temperatur auf den Kapillartransport ist oberhalb des Gefrierpunkts nur von mäßiger Bedeutung. Er resultiert von der Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Wasser, die zwischen 0 °C und 40 °C auf etwa ein Drittel abfällt und dadurch den Flüssigkeitstransport beschleunigt. Unter 0 °C gefriert das flüssige Wasser im Porenraum und damit endet der Kapillartransport, sodass nur die Dampfdiffusion verbleibt. Wesentlicher als beim Flüssigkeitstransport ist der Einfluss der Temperatur auf die Dampfdiffusion. Bei Anwesenheit von flüssigem Wasser im Porenraum beträgt der Dampfdruck (Sättigungsdampfdruck) bei 0 °C 611 Pa und bei 40 °C 7378 Pa. Das heißt, die treibende Kraft für die Dampfdiffusion steigt auf das Zwölfwache. Die Erhöhung des Dampfdiffusionskoeffizienten im selben Temperaturbereich ist demgegenüber mit etwa 12 % von untergeordneter Bedeutung.

Umgekehrt hat auch die Feuchte einen Einfluss auf den Wärmetransport, da das Wasser nicht nur die Wärmeleitung im Baustoff erhöht, sondern bei diffusionsoffenen Materialien auch ein Enthalpietransport stattfindet, der aus der Dampfdiffusion von der warmen zur kalten Seite mit einhergehender Verdunstung und Kondensation resultiert. Dieses bereits anfangs beschriebene Phänomen (oft auch Latentwärmeeffekt genannt) kann ausschließlich mit hygrothermischen Simulationsmodellen erfasst werden. Energetische oder rein thermische Simulationsverfahren reichen hierfür nicht aus. Die Abweichungen der Ergebnisse von thermischen und hygrothermischen Modellen sind immer dann relativ groß, wenn Regenwasser im Spiel ist, das vom Bauteil aufgenommen wird und hinterher wieder verdunstet, wie z. B. bei Gründächern oder bei Fassaden aus saugfähigem Material, wie beispielsweise eine Ziegelmauerung. Aber auch bei der Beurteilung einer Aufheizsituation von Bauteilen mit hygroroskopischen Materialien kann es zu Abweichungen kommen, da die Verdunstung der Feuchte die Erwärmung reduziert. Das ist ein Grund für die oft begrenzte Genauigkeit von in-situ U-Wert-Messungen mithilfe der sog. Co-Heating-Methode, bei der ein Bauteil von innen erwärmt und der dabei resultierende Wärmestrom ausgewertet wird.

Bei der Beurteilung des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen oder ganzen Gebäuden kommt es also auf das Zusammenspiel von Wärme- und Feuchte-

Klimaort: Holzkirchen; IBP, Feuchtereferenzjahr; 0.0 °C;

WUFI®

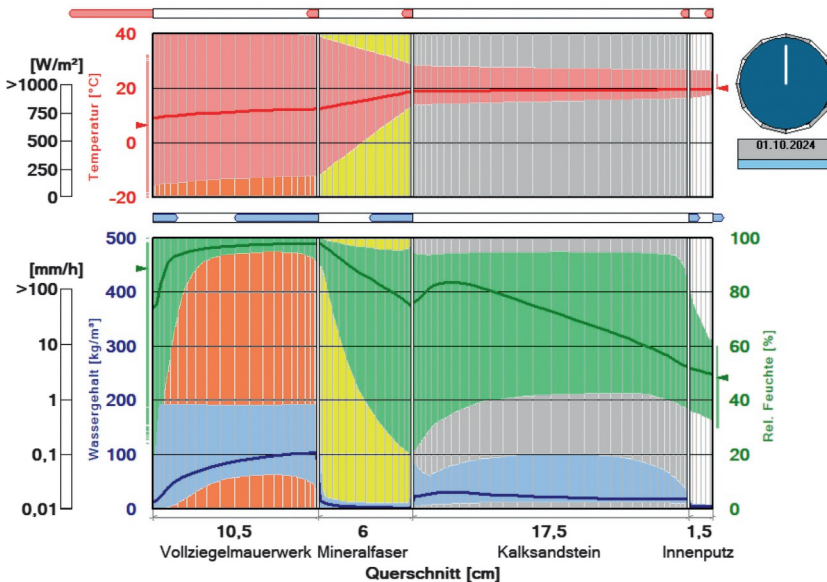


Bild 14. Momentaufnahme der Filmdarstellung der instationären Temperatur- und Feuchteverteilung (Bereiche und Mittelwerte) in einer zweischaligen, nach Westen orientierten Außenwand mit Kerndämmung im Verlauf des Monats August. Temperaturschwankungen finden praktisch nur in der Außenschale statt. Der Wassergehalt in der Außenschale erreicht niederschlagsbedingt hohe Werte bis hin zur freien Wassersättigung des Mauerwerks (obere Begrenzung des Bereichs).

verhältnissen an. Betrachtet man das Verhalten einer Außenwand über den Zeitraum eines Jahres, wie am Beispiel eines Natursteinmauerwerks in Bild 15 dargestellt, dann fallen sofort zwei große Unterschiede zwischen den Temperatur- und Feuchteverteilungen auf. In den Grafiken von Bild 15 sind jeweils die maximalen und minimalen Verteilungen sowie die Werte dazwischen auf der Basis von Stundenwerten in Form von eingefärbten Flächen eingezeichnet. Auf die Außenseite der Wand wirken die klimatische Beanspruchung gemessen an der Westseite einer Fassade bei Holzkirchner Klimabedingungen ein. Das Raumklima auf der Innenseite liegt konstant bei 20 °C und 50 % relative Luftfeuchte. Es ist klar zu erkennen, dass die jährlichen Temperaturunterschiede an der Außenoberfläche sich in abgeschwächter Form bis zur raumseitigen Oberfläche fortsetzen. Im Gegensatz dazu, wirken sich die Einflüsse des Außenklimas inklusive Sonneneinstrahlung und Schlagregen bei der Materialfeuchte nur bis in eine Wandtiefe von ca. 20 cm aus. Darunter bleibt der Wassergehalt über das ganze Jahr konstant. Die minimalen Feuchteschwankungen im Bereich der Innenoberfläche sind auf temperaturbedingte Sorptions- und Desorptionseffekte zurückzuführen. Die unterschiedliche Einwirkungstiefe von Temperatur und Feuchte liegt an der größeren Trägheit der Feuchte im Vergleich zur Wärme, die in erster Linie durch die höhere Feuchtespeicherfähigkeit von Baustoffen bedingt ist. Deshalb kann ein Gebäude zwar innerhalb einer Woche aus-

kühlen, während die Austrocknung der Baufeuchte oft einige Jahre in Anspruch nimmt.

Der zweite große Unterschied zwischen dem Temperatur- und Feuchteverhalten besteht in der Form der mittleren Verteilungen (Jahresmittel im eingeschwungenen Zustand, d. h. im letzten Jahr nach mehrjähriger Simulation mit jeweils demselben Jahreswetterdatensatz) über dem Querschnitt der Wand. Wie bei linearen Transportgleichungen zu erwarten, verläuft die mittlere Temperaturkurve in einer geraden Linie von der Innen- zur Außenoberfläche. Anders bei der Feuchtekurve, dort verläuft nur der innere, dampfdiffusionsdominierte Teil zwischen 10 cm und 60 cm Tiefe annähernd linear. Im äußeren, ca. 10 cm dicken Bereich, kommt es nach der Mitte zu einem starken Abfall der mittleren Feuchtekurve in Richtung Außenoberfläche. Sie resultiert aus einem Wassergehalt, der kaum größer ist als der an der Innenoberfläche. Der im Mittel höchste Wassergehalt ist demnach nicht an der Außenoberfläche vorzufinden, sondern ein paar Zentimeter dahinter. Der Grund für diese Abweichung vom linearen Verhalten liegt im exponentiellen Anstieg der Flüssigtransportkoeffizienten mit dem Wassergehalt und deren Größenunterschied zwischen Befeuchtung und Trocknung (siehe Bild 6). Bei Schlagregen wird daher über die Oberfläche Wasser bis in eine bestimmte Tiefe aufgesogen, das anschließend zunächst kapillar wieder zurück an die Oberfläche abgegeben wird, bis bei einem geringeren Wassergehalt der Flüssigtransport zu-

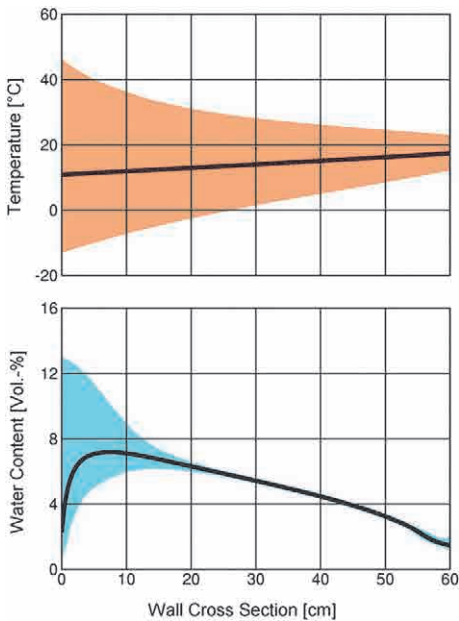


Bild 15. Darstellung der instationären Temperatur- und Feuchteverteilung über den Querschnitt einer schlagregenbeanspruchten Natursteinwand im eingeschwungenen Zustand. Die farbigen Bereiche zeigen die im Verlauf eines Jahres auftretenden Temperaturen und Wassergehalte und die dazugehörigen durchgezogenen Kurven repräsentieren die jeweiligen Jahresmittelwerte über den Wandquerschnitt.

sammenbricht und die weitere Austrocknung nur noch über die langsamere Dampfdiffusion erfolgt. D. h., der Bereich unter der Oberfläche wird bei Niederschlag zwar infolge der Kapillarleitung fast genauso schnell und stark befeuchtet wie diese selbst, trocknet anschließend aber deutlich langsamer wieder aus. Deshalb befindet sich das langfristige Feuchtemaximum bei schlagregenbeanspruchten Baustoffen nicht an der Oberfläche, sondern in einer begrenzten Zone darunter. Der Abstand dieser kritischen Zone von der Außenoberfläche hängt von den hygrothermischen Stoffkennwerten und von der klimatischen Beanspruchung ab. Als kritisch wird diese Zone bezeichnet, weil es dort gehäuft zu Schädigungen kommt, die auf den hohen Wassergehalt zurückzuführen sind. Beispiele für solche Schädigungen sind der Verlust der Zugfestigkeit und ein Mürbewerden dieser Zone, was in einem Abschalen der Oberflächenschicht resultiert, wie sie manchmal an Bauwerken aus Naturstein zu beobachten ist [52]. Bild 16 zeigt am Beispiel einer bewitterten Vollziegelmauer, wie dieser Schädigungsprozess ablaufen kann. Durch den hohen Wassergehalt ist die kritische Zone unterhalb der Außenoberfläche besonders anfällig für Frostschäden im Winter. Es muss aber nicht immer der Frost sein, der solche Schadensbilder erzeugt. Die kritische Zone kann auch eine erhöhte



Bild 16. Schalenbildung an einem berechneten Vollziegel-mauerwerk, bei dem sich in der kritischen Zone sichtbar Eiskristalle bilden, die zu einer Zerstörung der Materialfestigkeit in diesem Bereich führen

Salzkontamination aufweisen, da Salze an der Oberfläche bei Schlagregen in das Innere des Mauerwerks gesaugt werden. Dort können sie sich ansammeln und im Verlauf der Trocknung auskristallisieren und zu Gefügeschäden führen [53].

4 Einsatzbereiche und Anwendungsgrenzen der hygrothermischen Simulation

Die Einsatzbereiche der hygrothermischen Simulation sind inzwischen sehr vielfältig geworden und gehen teilweise auch über den Bausektor hinaus. Die Beispiele reichen von Verwitterungsprognosen für Gebirgsmassive [54] über den Feuchtehaushalt von Matratzen bis hin zur Wasserdampfkondensation in Flugzeugen [55], Schienenfahrzeugen und Schiffen. Weitere Einsatzbereiche werden in Zukunft sicher noch dazu kommen, da Wasser nicht nur an der Verwitterung und Alterung von Gebäuden sondern auch von vielen anderen langlebigen Gütern maßgeblich beteiligt ist. Auch der Klimawandel trägt dazu bei, die Herausforderungen in Bezug auf den globalen Wasserhaushalt in unserer Umwelt zu steigern. In den folgenden Abschnitten werden jedoch ausschließlich die Anwendungsmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen der hygrothermischen Simulation im Baubereich betrachtet.

4.1 Feuchteschutzbemessung für Neubau und Sanierung

Zählt ein gewünschter Aufbau nicht zu den nach den entsprechenden Normen (z. B. DIN 4108-3 [26] oder DIN 68800 [56]) nachweisfreien Konstruktionen, ist vor allem bei Konstruktionen mit feuchteempfindlichen Materialien eine Feuchteschutzbemessung unabdinglich. Die Feuchteschutzbemessung fördert nicht nur schadensarme Bauweisen, sondern sensibilisiert auch Planer und Architekten bezüglich einer feuchtesicheren Bauweise.

Die Feuchteschutzbemessung durch hygrothermische Simulation wurde 2018 in den Anhang D der DIN 4108-3 aufgenommen und bietet hier eine breite Unterstützung für die erforderlichen Angaben, Bewertung und Durchführung der Berechnungen in den Simulationsprogrammen. Die aktuellen Normen dazu werden unter Ziffer 6 zusammenfassend beschrieben. Im Folgenden wird insbesondere auf spezielle Merkmale bei der Bemessung der spezifischen Konstruktionen eingegangen.

Die hygrothermische Feuchteschutzbemessung von Konstruktionen wird anhand des maßgeblichen Schnittes durch die Konstruktion geführt – die Schnittführung entspricht hierbei in der Regel denen der Diffusionsberechnung des Glaserverfahrens. Der Aufbau wird dabei mit allen relevanten Schichten modelliert.

4.1.1 Bemessung von Dächern

Dächer stellen sowohl aus konstruktiver als auch aus bauphysikalischer Sicht besonders anspruchsvolle Bauteile dar. Vor allem (Holz-)Leichtbaukonstruktionen bedürfen einer sorgfältigen feuchtesicheren Planung, da diese nicht einfach luftdicht ausführbar sind, was zum ungewollten Eintrag von Feuchte führen kann, und meist feuchteempfindliche Materialien enthalten. Weiterhin ist eine Austrocknung der Konstruktion durch die erforderlichen Dampfbremsen und Abdichtungen oft nur eingeschränkt möglich. Daher müssen für die hygrothermische Betrachtung vor allem die Einflussgrößen erfasst werden, die eine Änderung der Temperatur oder einen zusätzlichen Feuchteeintrag zur Folge haben. Hier ist vor allem eine genaue Erfassung der Strahlungssituation, des Feuchteintrags durch Infiltration bei Leichtbaukonstruktionen und die Berücksichtigung von Deckschichten wichtig.

Strahlung

Die Strahlung wird in der Simulation getrennt nach kurzwelliger Strahlungsabsorption und langwelliger Strahlungsemission (Wärmestrahlung) berechnet, daher müssen für die Simulation Absorptions- und Emissionsgrad angegeben werden. Ist für die kurzwellige Strahlungsabsorption der Dachoberfläche kein Wert bekannt, gibt die DIN 4108-3 Anhang D [26] folgenden Richtwerte für die Bauteiloberfläche an:

- 0,8 für schwarze oder dunkle Farbtöne
- 0,6 für graue oder mittlere Farbtöne
- 0,4 für weiße oder helle Farbtöne

Meist liegen beim Absorptionsgrad niedrigere Werte auf der sicheren Seite, da sich die Oberfläche nicht so stark erhitzt und somit das Trocknungspotenzial verringert wird.

Dächer weisen ein großes Gesichtsfeld zum Himmel auf. Daher spielt neben der solaren Einstrahlung auch der langwellige Strahlungsaustausch eine große Rolle. Dieser kann vor allem bei Leichtbaukonstruktionen zu einer starken nächtlichen Unterkühlung der Oberfläche führen, die weiterhin einen erhöhten Diffusions-

strom vom Innenraum in die Konstruktion zur Folge hat.

Der langwellige Emissionsgrad kann unabhängig vom Material mit 0,9 angenommen werden. Dieses gilt allerdings nicht für metallische Oberflächen. Sie können deutlich geringere Emissionsgrade aufweisen. Nach Anhang D [26] sollten diese sehr niedrigen Emissionswerte nur unter Berücksichtigung einer möglichen Benetzung der Oberfläche bei Regen oder Tauwasserbildung angesetzt werden. Hierfür schlägt *Bludau* [57] einen effektiven Emissionswert von 0,5 vor.

Die maßgebliche Orientierung ist ein nördlich geneigtes Dach, da hier die geringsten Strahlungsgewinne auftreten. Je steiler das Dach, desto mehr Einfluss hat die Orientierung. Für die Freistellung der in DIN 4108-3 [26] aufgeführten, nachweisfreien Bauteile wurde zudem das Feuchtereferenzjahr Holzkirchen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, das als kritisch repräsentativ für deutsche Standorte bis in ähnliche Höhenlagen (700 m ü.N.N.) gilt, mit um 20 % abgeminderter Strahlung verwendet. Die nachweisfreien Dachkonstruktionen können auch mit Verschattung ausgeführt werden.

Verschattung

Im Rahmen der Strahlungssituation muss auch die Verschattung der Oberfläche betrachtet werden. Eine Verschattung, sei es durch PV-Anlagen, überragende Nebenbebauung, Bäume oder auch umliegende Berge haben einen maßgeblichen Einfluss auf Strahlungsgewinne der Oberfläche. In den letzten Jahren wurden einige vereinfachte Ansätze aufgestellt, mit denen die Verschattungseinflüsse auf Flachdächern über eine Abminderung des Absorptions- und Emissionsgrades der Dachoberfläche direkt in der hygrothermischen Simulation berücksichtigt werden können. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über Abminderungsfaktoren für verschiedene Verschattungssituationen und deren Quelle. Die Faktoren wurden alle für (Holz-)Leichtbauflachdächer aufgestellt, da hier das Trocknungspotenzial und somit die Oberflächentemperatur eine maßgebliche Rolle spielt.

Aufgrund der staatlichen Förderung und des Wunsches vieler Eigentümer zur Nachrüstung von Häusern mit PV-Anlagen ist es empfehlenswert, diese Maßnahme bei der Bemessung von neuen Holzdachkonstruktionen von vornherein zu berücksichtigen. Dies erspart einen zukünftigen erneuten Nachweis oder Schäden, die nach einer ungeprüften Installation entstehen können.

Feuchteintrag über Infiltration

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bemessung von Dächern ist die Berücksichtigung des Feuchteintrags durch Infiltration. Hierbei kann es, wie unter Ziffer 2.2.6 beschrieben, aufgrund ungewollter Fehlstellen und einem Druckunterschied zwischen innen und außen, zu einer Durchströmung der feuchtebeladenen Raumluft durch die Konstruktion kommen. Dies kann

Tabelle 2. Übersicht von Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung verschiedener Verschattungssituationen auf Flachdächern. Angegeben ist jeweils ein Abminderungsfaktor auf den kurzwelligen Absorptionsgrad (k_a) und den langwilligen Emissionsgrad (k_e).

Verschattungssituation	Abminderungsfaktor auf die Strahlungsparameter der Oberfläche		
	k_a	k_e	Quelle
vertikale Verschattung z. B. durch Häuser, Bäume, Balkonbrüstung, Attika	0,35	1,0	WTA 6-8 [58]
horizontale Verschattung (u. a. Terrassenbelag)	0,35	0,45	WTA 6-8 [58]
Verschattung durch aufgeständerte Holzterrassen	0,6 ^{*)}	1,0	Bludau/Kölsch [59]
Verschattung durch aufgeständerte Solarmodule	0,3	0,5	Bludau/Kölsch [59] WTA 6-8 [58]
vertikale Verschattung durch östliches oder westliches Objekt	0,6	1,0	Bludau [57]
vertikale Verschattung durch südliches Objekt	0,6	1,0	Bludau [57]

*) Hinweis: Bei der Holzterrasse wird anstelle der Absorptionseigenschaften der Abdichtungsbahn die des Holzes reduziert.

vor allem im Winter eine Tauwasserbildung in der Konstruktion zur Folge haben. Das in der hygrothermischen Simulation angewendete Modell basiert hierbei auf Untersuchungen von Zirkelbach et al. [60]. Die Forderung zur Berücksichtigung der Infiltration stammt ursprünglich aus der DIN 68800-2:2012 [56] für Holzkonstruktionen und wird seit DIN 4108-3: 2018 Anhang D [26] allgemein für Leichtbaukonstruktionen gefordert.

In der Simulation wird die Infiltration in Form einer Feuchtequelle in der Konstruktion angesetzt. Diese Feuchtequelle muss an die Position gesetzt werden, an der es im Falle einer Durchströmung zum Ausfall von Tauwasser kommt. In der Regel ist diese Position von innen gesehen vor der zweiten luftdichten bzw. konvektionsbremsenden Ebene auf der Kaltseite des Bauteils zu platzieren. Hierbei ist die Innenverkleidung mit Dampfbremse als erste luftdichte Ebene anzusehen. Handelt es sich um eine einschalige Konstruktion, stellt die Abdichtung die zweite luftdichte Ebene dar. Bei mehrschaligen Aufbauten ist dies in der Regel die dampfbremsende Ebene zwischen der unteren und oberen Dämmschicht. Direkt darunter wird die Quelle mit einer Schichtdicke von 5 mm vorgesehen (Bild 17).

Weiterhin muss für die Infiltrationsquelle die Durchströmbarkeit der Gebäudehülle angegeben werden,

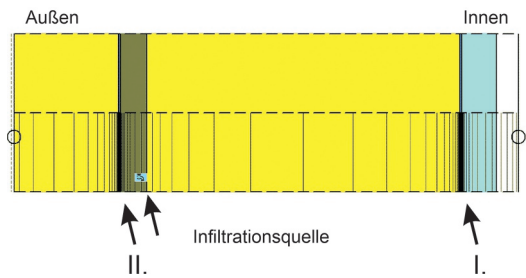


Bild 17. Position der Infiltrationsquelle am Beispiel eines zweischaligen Flachdachs mit Aufdämmung. Die Innenverkleidung und Dampfbremse stellt die erste luftdichte Ebene (I.) dar, die Dampfbremse auf der Schalung die zweite (II.).

der durch eine Luftdichtheitsprüfung des Gebäudes erfolgen kann. Bei einem gemessenem q_{s0} -Wert von $\leq 3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ kann nach DIN 4108-3 Anhang D [26] ein reduzierter Luftdurchlässigkeitskoeffizient von $1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$ bzw. $0,004 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h Pa})$ angesetzt werden, liegt keine Messung vor, ist ein Koeffizient von $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s Pa})$ bzw. $0,007 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h Pa})$ zu verwenden. In Simulationsprogrammen wie WUFI® [61] sind die Werte entsprechend hinterlegt, sodass der Benutzer diese nur entsprechend der Situation auswählen muss.

Neben der Luftdichtheit des Gebäudes ist noch die Angabe der Höhe des zusammenhängenden (geheizten) Luftraums unter der Dachkonstruktion erforderlich, da sich durch den thermischen Auftrieb in der oberen Hälfte des Gebäudes Überdruck einstellt, während es unten zu einem Unterdruckbereich kommt. Dieser Überdruck, der an der Unterseite der Dachkonstruktion am höchsten ist, führt dazu, dass die Konstruktion durchströmt werden kann. Hierbei stellt sich bei Einfamilienhäusern, die ein offenes Treppenhaus aufweisen, die Luftsäule normalerweise über alle Stockwerke ein. Bei Mehrfamilienhäusern, bei der die Wohnungen durch Wohnungstüren vom Treppenhaus abgetrennt sind, kann die Wohnungshöhe unter dem Dach als Höhe der Luftsäule angenommen werden.

Deckschichten

Wie bereits erwähnt, beeinflusst die Oberflächentemperatur eines Daches maßgeblich dessen hygrothermisches Verhalten. Aus diesem Grund müssen Deckschichten wie Grün- oder Kiesdächer entsprechend in der Simulation berücksichtigt werden. Geeignete Materialparameter für Kiesschichten wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes zu Feuchtezuschlägen bei Umkehrdächern [62] ermittelt. Auch zu den Gründächern wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt [63, 64] und Modelle für verschiedene Aufbauvarianten erstellt. Die hierbei ermittelten Kennwerte und Modelle können direkt in hygrothermischen Simulationsprogrammen angewandt werden.

Ein weiterer, nicht zu vernachlässigender Aspekt der Deckschichten ist der Einfluss des in den Schichten gespeicherten Wassers, dass dazu führt, dass es oberhalb der Dachabdichtung meist immer nass ist. Dies führt zu einem dauerhaften Dampfdruckgradienten durch die Abdichtung und kann abhängig vom Diffusionswiderstand der Abdichtung auch zu einem geringen, aber ständigem zusätzlichem Feuchteintrag in die Konstruktion führen. In der Simulation wird dieser Aspekt bei Verwendungen der entsprechenden Modelle automatisch mitberücksichtigt. Dieser Feuchteintrag kann sich vor allem bei Holzkonstruktionen negativ auswirken. Aus diesem Grund wurde in die aktuelle Fassung der DIN 4108-3:2024 bei den nachweisfreien Konstruktionen die Forderung aufgenommen, dass die Abdichtung unter Dachbegrünungen, Kies und anderen Bettungsschichten einen s_d -Wert von mindestens 100 m aufweisen soll.

Dass dies gerechtfertigt ist, zeigt ein Vergleich des Feuchtein- und -austrags bei Pfützenbildung und

verschiedenen Deckschichten bei unterschiedlichen s_d -Werten der Dachabdichtung in Bild 18 [57]. Es wurden die Situationen „kein Wasser“ (Betrachtung ohne Niederschlag), „temporäre Pfützenbildung“ (Wasser steht nur kurzzeitig nach Niederschlagsereignis auf der Abdichtung), „stehendes Wasser“ (Wasser steht dauerhaft auf der Abdichtung) mit Grün- und Kiesdach als Deckschicht betrachtet. Es zeigt sich, dass der größte Feuchtein- und -austrag jeweils bei einem s_d -Wert der Abdichtung von 20 m (entspricht z. B. einer PVC-Bahn). Die geringsten Mengen gehen durch Abdichtungen mit s_d -Wert 1500 m (z. B. Alukaschierte Bitumenbahn). Weiterhin zeigt sich, dass bei den dauerhaft feuchten Situationen (stehendes Wasser und Gründach) keine Austrocknung durch die Abdichtung mehr möglich ist. Bei stehendem Wasser ergibt sich ein zusätzlicher jährlicher Feuchteintrag bei einer Abdichtung mit einem s_d -Wert von 20 m von ca. 130 g/m² a, bei einem s_d -Wert von 100 m noch ca. 34 g/m² a. Bei dem Gründach sind die Werte aufgrund der gedämpf-

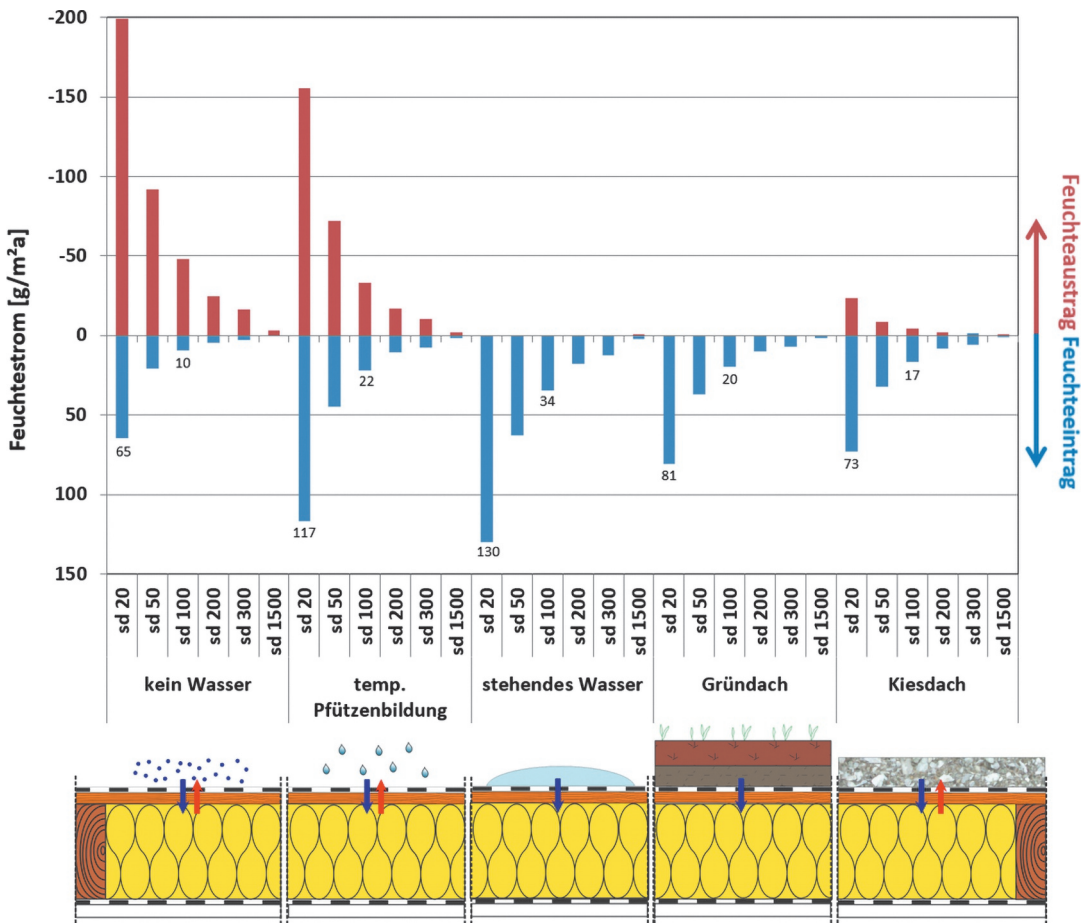


Bild 18. Feuchteintrag durch die Dachabdichtung abhängig vom s_d -Wert und Deckschicht. Orientierungswerte bei normaler Wohnraumnutzung und deutschem Klima. Bei dauerhaft nasser Oberfläche ist keine Austrocknung nach außen mehr möglich [57].

ten Temperatur etwas geringer, hier beträgt der Feuchteintrag bei einer Abdichtung mit einem s_d -Wert von 20 m ca. $81 \text{ g/m}^2 \text{ a}$, bei einem s_d -Wert von 100 m noch ca. $20 \text{ g/m}^2 \text{ a}$. Beim Kiesdach ist ein geringer Feuchteaustrag möglich. Hier ergibt sich nach Abzug des Austrags ein zusätzlicher ein jährlicher Eintrag von ca. $50 \text{ g/m}^2 \text{ a}$ (s_d -Wert von 20 m), bzw. $13 \text{ g/m}^2 \text{ a}$ (s_d -Wert von 100 m).

Luftschichten und Belüftungsöffnungen

Die Bemessung von Belüftungsöffnungen ist nur indirekt möglich. Die Belüftung wird in der hygrothermischen Simulation nur in Form vereinfachter Luftwechselmodelle berücksichtigt. Die genaue Berücksichtigung der Luftströmungen ist zwar mit CFD-Modellen möglich, allerdings benötigen diese eine Vielzahl von Eingabeparametern über Geometrie und Beschaffenheit der Belüftungswege und -öffnungen, was i. d. R. zu aufwendig für die Anwendung bei der Feuchteschutzbemessung ist. Zusätzlich ist auch der Luftwechsel, der sich in Luftquerschnitten einstellt, messtechnisch nur schwer zu erfassen.

Bei flach geneigten Dächern findet in der Regel keine vollflächige Durchströmung des gesamten Luftraums statt, d. h. es gibt Zonen, die von der Strömung kaum erreicht werden. Anforderungen wie die freie Anströmbarkeit der Lüftungsöffnungen, durchgängiger Luftquerschnitt mit gegenüberliegenden Lüftungsöffnungen etc. können in der Praxis bei Flachdächern nicht gewährleistet werden. Da sich aufgrund der flachen Neigung kaum ein thermischer Auftrieb einstellt, muss hier auf eine ausreichende Windanströmung gesetzt werden. Trotzdem wird die Belüftung bei großflächigen Dächern, wie z. B. bei Industriehallen, meist unzureichend bleiben. Aus diesem Grund und auch aus thermischen Aspekten wird heutzutage meist auf eine Belüftung bei Flachdächern verzichtet.

Wird eine belüftete Konstruktion ausgeführt, müssen die Anforderungen an den Belüftungsquerschnitt und die Be- und Entlüftungsöffnungen in Abhängigkeit der

Dachneigung und -länge nach den verschiedenen Regelwerken [65] entsprechend Tabelle 3 eingehalten werden, damit von einem ausreichenden Luftwechsel ausgegangen werden kann.

In der Bemessung werden dann verschiedene Luftwechselsituationen betrachtet. Im ersten Schritt wird die Luftschicht als nicht belüftet betrachtet. Ist die Konstruktion so positiv nachweisbar, ist davon auszugehen, dass eine gute Belüftung des Querschnittes nicht erforderlich ist. Funktioniert die Konstruktion ohne Belüftung nicht, so wird im nächsten Schritt mit einem geringen Luftwechsel gerechnet, der sich einstellen sollte, wenn die Lüftungen nach den Anforderungen ausgeführt werden (für Flachdächer Luftwechsel ca. 1 bis 5 h^{-1}). Kann auch damit die Konstruktion nicht positiv nachgewiesen werden, so ist der Aufbau zu ändern. Weiterhin ist zu beachten, dass durch eine Belüftungsebene auch ungewollt zusätzliche Feuchte eintragen kann, wie unter Ziffer 2.2.6 erläutert.

Hinterlüftete, geneigte Dächer

Bei hinterlüfteten Steildächern hat der Luftstrom in der belüfteten Ebene sowohl einen Einfluss auf das Temperaturverhalten der Konstruktion, von dem wiederum das Feuchteverhalten und das Trocknungspotenzial abhängt, als auch auf die Abfuhrmöglichkeit von Feuchte. Künzel [66] stellte fest, dass sich selbst bei Dächern ohne Konterlattung u. a. durch die Fugen zwischen den Dachziegeln ein ausreichender Luftwechsel einstellen kann, um die Feuchte im nötigen Maß abzuführen. Der effektive Luftwechsel kann durch das Modell von Kölsch [67] im Feuchteschutznachweis berücksichtigt werden. Dabei werden in der Simulation die Lattung und Dacheindeckung durch effektive Wärmeübergangs- und Strahlungsparameter ersetzt. Das Modell berücksichtigt zudem drei verschiedene Positionen des Strömungskanals (kälteste, mittlere und wärmste Stelle) und drei Belüftungssituationen (schwach, normal und stark belüftet).

Tabelle 3. Anforderungen an den Belüftungsquerschnitt und die Be- und Entlüftungsöffnungen nach verschiedenen Regelwerken in Abhängigkeit von der Dachneigung¹⁾ [65]

Dachneigung	DIN 68800-2 bis max. 15 m Belüftungsweg ²⁾		DIN4108-3 und Fachregeln des Dachdeckerhandwerks [MB WS]	
	Querschnitt	Öffnung ³⁾	Querschnitt	Öffnung ³⁾ bei $DN < 5^\circ$ bis max 10 m
$< 3^\circ$	Für Dachneigungen unter 3° wird grundsätzlich keine Belüftung empfohlen.			
$\geq 3^\circ$ und $< 5^\circ$	$\geq 80 \text{ mm}$ bzw. $\geq 150 \text{ mm}^{4)}$	$\geq 40 \%$	$\geq 50 \text{ mm}^{5)}$	Traufe und Pultdachanschluss für $DN < 5^\circ$: 2 ‰ der Dachfläche, mind. $200 \text{ cm}^2/\text{m}$ First und Grat für $DN \geq 5^\circ$: 0,5 ‰ der Dachfläche, mind. $50 \text{ cm}^2/\text{m}$
$\geq 5^\circ$ und $< 15^\circ$	$\geq 80 \text{ mm}$	$\geq 40 \%$	$(\geq 20 \text{ mm})^{5)}$	
$> 15^\circ$	$\geq 40 \text{ mm}$	$\geq 40 \%$	$(\geq 20 \text{ mm})^{5)}$	

1) Die i. d. R. maßgebenden Bedingungen der Holzschutznorm DIN 68800-2 sind zu bevorzugen.
2) Bei Sparrenlängen größer 15 m bzw. 10 m werden besondere Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Belüftungsfunktion erforderlich, z. B. der Einbau von Lüftern.
3) Bezogen auf den Lüftungsquerschnitt – Lüftungsgitter und Querschnittsverengungen sind zu berücksichtigen.
4) Angaben gültig für begrünte, flach geneigte oder geneigte Dächer nach DIN 68800-2 Anhang A Bild A.17
5) Theoretischer Wert gemäß Regelwerk, da aufwölbende Mattendämmstoffe bzw. deren Maßtoleranzen die Belüftung verhindern. Die Lüftungsquerschnitte sollten daher größer als das angegebene Mindestmaß ausfallen.

Bewertung der Simulationsergebnisse

An dieser Stelle wird kurz auf die Kriterien eingegangen, die bei der Bewertung von Dächern maßgeblich sind. Die allgemeine Bewertung von hygrothermischen Simulationsergebnissen wird in Abschnitt 5 erläutert. Im ersten Schritt wird immer der Verlauf des Gesamtwassergehalts betrachtet, um so das Feuchteverhalten der gesamten Konstruktion zu beurteilen. Kommt es hier auch langfristig zu einem Anstieg, deutet dies auf die Akkumulation von Feuchte in der Konstruktion hin. Weiterhin ist für feuchteempfindlichen Schichten wie z. B. der Schalung vor allem in der kalten Seite der Konstruktion die Einhaltung kritischer Wassergehalte zu überprüfen. Bei Konstruktionen ohne feuchteempfindliche Materialien wird stattdessen der Wassergehalt der Dämmschichten bezüglich seines Einflusses auf eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit beurteilt. Die Wärmeleitfähigkeit üblicher Dämmstoffe beginnt bei etwa 2 bis 3 Vol.-% langsam zu steigen. Bei diffusionsoffenen Dämmschichten wie Mineralwolle ist auch sicherzustellen, dass der Tauwasseranfall an den Grenzen zu diffusionsdichteren Schichten unterhalb kritischer Mengen bleibt, um ein Abfließen von Wasser zu vermeiden. In der oberen zusätzlichen Dämmschicht (Aufdämmung) kann es abhängig von der Eindeckung, Abdichtung und Einbausituation zu einer langsamen, geringfügigen Auffeuchtung kommen. Diese kann i. d. R. toleriert werden, wenn der Wassergehalt über die Standzeit des Gebäudes im Mittel nicht über 2 Vol.-% (20 kg/m^3) ansteigt oder die Dämmschicht nicht zum Erreichen des projektierten Dämmwertes erforderlich ist, wie es bei Gefälledämmungen der Fall sein kann.

4.1.2 Bemessung von Außenwänden

Bei der Bemessung der Außenwände ist bei mineralischen (saugfähigen) Oberflächen und Wandbildnern neben der Berücksichtigung der Strahlung und des konvektiven Feuchteintrags (bei Leichtbauwänden) der Schlagregen ein wichtiger Einflussfaktor. Die maßgebliche Orientierung ist hierbei die Hauptschlagregenrichtung – in Europa in der Regel West, allerdings ist es sinnvoll, diese ortsspezifisch aus der verwendeten Klimadatei zu ermitteln. Besitzt die Wand einen ausreichenden Regenschutz, kann von der Berücksichtigung des Schlagregens abgesehen werden.

Neben der Aufnahme von Schlagregen durch die Oberfläche empfiehlt die DIN 4108-3 Anhang D [26] für Bauteile mit feuchteempfindlicher Unterkonstruktion weiterhin den Einfluss einer Schlagregenpenetration zu prüfen. Diese kann z. B. auftreten, wenn Regenwasser lokal durch Fehlstellen in die Konstruktion eindringen kann. Betroffen sind hierbei oft Unterbrechungen in der Fassade, wie Fensteranschlüsse, aber auch nicht schlagregengedichte Vorsatzschalen. In der Norm wird hierbei empfohlen, diese in der Simulation durch eine Feuchtequelle mit 1 % des auf der Bauteiloberfläche auftretenden Schlagregens an der Unterkonstruktion zu berücksichtigen. Diese Feuchtequelle soll in den au-

Beneseitigen 5 mm der feuchteempfindlichen Unterkonstruktion eingebracht werden, bei dünneren Materialschichten in der ganzen Schicht. Kommt es bei dieser Überprüfung zu hohen Feuchtegehalten, so ist bei der Ausführung besonders auf eine schlagregengedichte Ausführung zu achten. Bezüglich des Einbaus von Fensterbänken hat z. B. die Österreichische Arbeitsgemeinschaft Fensterbank [68] Vorgaben für den feuchtesicheren Einbau erarbeitet.

Bei der Beurteilung von Wänden spielt das feuchte-technische Verhalten von Holzbaukonstruktionen und von Wänden mit Innendämmung die größte Rolle. Der Feuchteschutz bei Holzbauwänden wurde bereits im Bauphysik-Kalender 2022 [7] behandelt, daher werden hier im Folgenden nur die Aspekte zur Betrachtung innen gedämmter Wände erläutert.

Außenwände mit Innendämmung

Die Thematik der Innendämmung im Bestand wurde im Forschungsvorhaben „Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmsysteme (EneffID)“ [69] umfassend untersucht und im Rahmen des Projektes IN2EuroBuild [70] wurde ein europäischer Leitfaden zur Analyse von Bestandskonstruktionen und Bemessung von Innendämmung erstellt.

Zur hygrothermischen Bemessung von innenseitig gedämmten Wänden ist es erforderlich, den Wandaufbau mit den dazugehörigen Materialkennwerten möglichst detailliert abzubilden. Hierbei sind bei den Kennwerten vor allem der Diffusionswiderstand und die Flüssigkeitstransportkoeffizienten wichtig. Zur Beurteilung des Regenschutzes ist vor allem auch der Wasseraufnahmekoeffizient (w -Wert) der Außenoberfläche erforderlich. Während dieser in Neubausituationen vorliegen sollte, ist dies bei Sanierungen meist nicht der Fall. Liegt der w -Wert nicht vor, muss dieser ermittelt werden, um eine aussagekräftige Bemessung zu ermöglichen. Hierzu gibt es verschiedene in-situ Messverfahren (z. B. [70, 71]).

Wenn bei Bestandswänden die folgenden Anforderungen an wasserabweisende Putze und Anstriche für die Außenoberfläche eingehalten sind:

$$w \cdot s_d \leq 0,1 \text{ kg} / (\text{m} \sqrt{\text{h}})$$

mit

$$s_d \leq 1,0 \text{ m und } w \leq 0,2 \text{ kg} / (\text{m}^2 \sqrt{\text{h}})$$

ist ein ausreichender Schlagregenschutz für innen gedämmte Bauteile nach DIN 4108-3 [26] und WTA-Merkblatt 6-5-14 [72] vorhanden. D. h. es kann eine Innendämmmaßnahme ausgeführt werden, ohne dass die Gefahr einer Frostschädigung oder von zu hoher Feuchte auf der außenseitigen Grenzschicht der Innendämmung durch Schlagregen besteht. Ein nicht ausreichender Schlagregenschutz kann z. B. durch die Hydrophobierung der Außenoberfläche verbessert werden. Hierbei sollte nach [73] ein w -Wert $< 0,1 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{h}}$ erreicht und der s_d -Wert maximal um 50 % erhöht werden.

Auch für die Innendämmung selbst müssen die Materialkennwerte vorliegen. Bei diffusionsoffenen Faserdämmungen, die in Verbindung mit einer Dampfbremse eingesetzt werden, ist in der Regel der Diffusionswiderstand ausreichend, bei kapillaraktiven Innendämmungen müssen die Flüssigkeitstransportkoeffizienten mit dem für diese Situation entwickelten Kapi-Test [8] gemessen vorliegen, um die Feuchtesituation korrekt abzubilden. Weiterhin ist bei kapillaraktiven Innendämmungen zu beachten, dass es in der Dämmung zu einer Feuchte $>95\%$ r.F. kommen kann, die jedoch dabei hilft den kapillaren Rücktransport zu beschleunigen. Generell kann es an der Grenzschicht Innendämmung – Wand aufgrund von Taupunktunterschreitung und Niederschlagswasser von außen zu hohen Feuchten kommen. Damit es hier nicht zu Schimmelbildung kommt, müssen an dieser Stelle Hohlräume vermieden werden. Daher ist die Innendämmung immer vollflächig aufzubringen bzw. zu verkleben.

Bewertung der Simulationsergebnisse

An dieser Stelle wird kurz auf die Kriterien eingegangen, die bei der Bewertung von Wänden mit Innendämmung maßgeblich sind. Die allgemeine Bewertung von hygrothermischen Simulationsergebnissen wird in Abschnitt 5 erläutert.

Zusätzlich zu den üblichen Bewertungen wie Gesamtwassergehalt etc. wird bei innen gedämmten Wänden das Frostschadensrisiko der Materialschichten in denen Eisbildung auftreten kann (alle Schichten außen-seitig der Dämmung), vor allem aber die Grenzschicht zur Innendämmung (also alter Wandbildner oder Kleber), überprüft. Hierbei werden nach DIN 4108-3 [26] die kritischen 10 mm der betroffenen Materialschicht (bzw. bei dünneren Schichten die gesamte Schicht) betrachtet. Liegen für die jeweiligen Materialien Grenzwerte zur Vermeidung von Frostschäden vor, können diese angesetzt werden. Anderenfalls wird der Wassergehalt gegen den Sättigungsgrad des Materials von 30 % (Sättigungsgrad = Masse des Wassers/Porosität $\times 1000 \text{ kg/m}^3$) überprüft. Bleibt der Wassergehalt darunter, besteht keine Frostgefahr bzw. muss das Material nicht frostresistent sein. Höhere Sättigungsgrade sind dann zulässig, wenn die relative Feuchte von 95 % r.F. nicht überschritten wird [72]. Eine höhere relative Feuchte im Material kann bei gleichzeitigen Temperaturunterschreitungen von -5°C zur Eisbildung und damit zur Frostschädigung führen. Außerdem besteht bei höheren Feuchten die Gefahr von Fäulnis bei nicht beständigen Materialien.

Bei feuchtwarmen Außenklimata ohne Frost ist es sinnvoll, die Entwicklung der relativen Feuchte zwischen Dämmung und Wand zu prüfen und hinsichtlich der Bildung von Tauwasser zu bewerten. Diese kann die Beständigkeit des Klebers beeinträchtigen. Das Schimmelpilzrisiko auf der Kaltseite von Innendämmungen ist durch einen hinterströmungsdichten Einbau zu minimieren. Konstruktiv erfolgt dies im Optimalfall durch eine vollflächige Verklebung der Däm-

mung auf der Wand, bzw. bei Faserdämmung im Ständerwerk durch einen umlaufend dichten Anschluss der Luftdichtheitsebene an die benachbarten Bauteile. Nur wenn dies nicht gewährleistet werden kann, sollte das Schimmelrisiko gem. Ziffer 5.2.1 bewertet und hierbei ein Mould-Index von <3 eingehalten werden.

Zu hohe Feuchtegehalte an der Grenzschicht Putz/ Innendämmung können häufig durch eine Verbesserung des Schlagregenschutzes (Hydrophobierung, neuer Außenputz, Anstrich) verringert werden.

4.2 Prüfung wesentlicher oder unsicherer Einflussgrößen durch Parametervariation

Bei der Beurteilung von Bauteilen während der Planungsphase wird im einfachsten Fall eine vorgegebene Konstruktion mithilfe einer Simulation auf ihre bauphysikalische Eignung überprüft. Der Planer erhält Informationen zum vorgesehenen Bauteilaufbau, zum Standort und zur Nutzung des Gebäudes. Auf Basis dieser Informationen erstellt er das Simulationsmodell und wählt geeignete Randbedingungen. Nach der Berechnung wertet er die Ergebnisse aus und beurteilt die Konstruktion auf ihre Eignung.

Diese Vorgehensweise enthält in der Regel Unsicherheiten z. B. bei der Wahl der Materialdatensätze, des Standorts, des Raumklimas usw. Auch zeitlich veränderbare Faktoren wie Verschattungen durch noch wachsende Bäume oder eine spätere Umnutzung mit ggf. höheren Feuchtelasten im Innenraum sind u. U. zu berücksichtigen. Dabei stellt sich die Frage, inwieweit es möglich ist, für die Unsicherheiten einfache plausible Annahmen zu treffen. Eine Antwort ist mithilfe der Simulation selbst möglich: die unsicheren Eingabeparameter sollten generell in einer sinnvollen Bandbreite variiert und der Einfluss dieser Variation auf das Ergebnis beurteilt werden [9]. Ändert sich mit der Variation das Ergebnis nicht oder nur geringfügig und die Bewertung bleibt gleich, ist eine Abklärung des betreffenden Parameters nicht mit großer Genauigkeit erforderlich, sondern eine sinnvolle Annahme reicht aus. Ändert sich das Ergebnis dagegen stark, ist der Parameter offensichtlich maßgeblich für das Funktionieren des Bauteils und sollte möglichst genau geklärt werden.

Wichtig ist dies auch beim Außenklima. Die aktuelle Fassung der DIN 4108-3 verweist für die feuchteteknische Bemessung auf die in [45] vorgestellten Klimaregionen und die zugehörigen Hygrothermischen Referenzjahre. Standardmäßig sollte dementsprechend auf diese Datensätze zurückgegriffen werden. Will man die Sensitivität eines Bauteils auf das Außenklima beurteilen, kann es sinnvoll sein, neben dem für den Standort gültigen Referenzklima auch einen kritischeren Standort wie z. B. Holzkirchen zu simulieren. Führt eine solche Änderung bereits zum Versagen der Konstruktion, ist gegebenenfalls zu prüfen, ob das Bauteil generell robust genug ausgelegt ist. In der gleichen Quelle wird auch ein Modell vorgestellt, mit dem das spezifische Klima entsprechend der lokalen Verhältnisse an ei-

nem Standort vom regionalen Referenzklima abgeleitet werden kann. Dies kann zum Beispiel sinnvoll sein im Fall einer deutlich höheren Lage oder größeren Niederschlagsmengen. Auch in diesem Fall sollte eine Vergleichsberechnung mit dem Standard-Referenzklima erfolgen, um den Einfluss der Anpassungen zu erfassen und einschätzen zu können.

Solche Parametervariationen sind vor allem für den noch wenig erfahrenen Nutzer hilfreich und tragen dazu bei, die wichtigen von den weniger wichtigen Einflussparametern zu unterscheiden.

4.3 Zweidimensionale Beurteilung von Anschlussdetails

Hygrothermische Simulationen zur Beurteilung von Bauteilen werden wie das Glaser-Verfahren meist eindimensional im repräsentativen Regelquerschnitt der zu untersuchenden Konstruktionen durchgeführt. Nur in Einzelfällen ist es erforderlich, ein Bauteil zweidimensional zu beurteilen.

Im Fall von Wärmebrücken liegen die stationären Beurteilungen bezüglich der zulässigen Feuchteverhältnisse auf den Innenoberflächen in der Regel auf der sicheren Seite. Eine Simulation wäre hier für Bauteile sinnvoll, bei denen der stationäre Nachweis nicht erbracht werden kann und beispielsweise im Falle von Sanierungen eine Verbesserung des Details aus Platzgründen nicht möglich ist. Die instationäre Simulation führt oft zu einer besseren Bewertung, da kritisch niedrige Temperaturen meist nicht so lang auftreten, dass sich die bei der stationären Bemessung ermittelten Oberflächentemperaturen tatsächlich einstellen. Außerdem verzögern die Speicherfähigkeit sowie die kapillare Leitfähigkeit der Oberflächenmaterialien in der Simulation den Anstieg der relativen Feuchte gegenüber der vereinfachten stationären Betrachtung, in der diese Eigenschaften nicht berücksichtigt werden.

Beispielhaft wird im Folgenden die zweidimensionale hygrothermische Betrachtung einer Fassadendurchdringung dargestellt. Hier wird ein Stahlschwert zur Befestigung der Verschattungselemente mit Bolzen in den Bindern aus Brettschichtholz verankert und ragt durch die Glasfassade nach außen (Bild 19 – schematischer Horizontalschnitt). Bei der entstehenden Wärmebrücke stellt sich die Frage, ob es aufgrund der im Bereich der in den Binder eingebetteten Metallteile zu Feuchteproblemen im Holz kommen kann. Diese Frage ist durch eine reine Wärmebrückenberechnung nicht zu beantworten, da das Feuchteverhalten des Holzes mit einbezogen werden muss.

Im Folgenden wird eine Auswahl der Ergebnisse präsentiert. In Bild 20 ist die Temperaturverteilung am kältesten Tag des Jahres abgebildet. Es zeigt sich, dass bei außenseitigen kalten Temperaturen auch die Bereiche um das Edelstahlschwert und die Bolzen deutlich abkühlen.

Diese Darstellung entspricht weitgehend den Ergebnissen einer Wärmebrückenberechnung mit dem Unterschied, dass in der hygrothermischen Simulation die Wärmeleitfähigkeit der Materialien in Abhängigkeit der Feuchte für jeden Rechenzeitschritt mitberücksichtigt wird. Auch ist es möglich, die Transportwege der Feuchte innerhalb des gesamten Bauteils nachzuvollziehen.

Das Profil der relativen Feuchte ist in Bild 21 dargestellt. Hierbei ist die relative Feuchte als Höhe über dem Rechengitter aufgetragen. Es zeigt sich, dass sich an der Position, an der das Schwert zwischen die Holzbinder eingebettet ist, und an den äußeren Enden des äußeren Bolzens beidseitig, die höchsten relativen Feuchten im Holz einstellen. Für diese Positionen kann dann der Wassergehalt, der sich über die Zeit an dieser Position einstellt, bewertet werden.

Anhand der durchgeführten Berechnungen konnte so geklärt werden, welche Klimabedingungen im Innenraum eingehalten werden müssen, damit es aufgrund

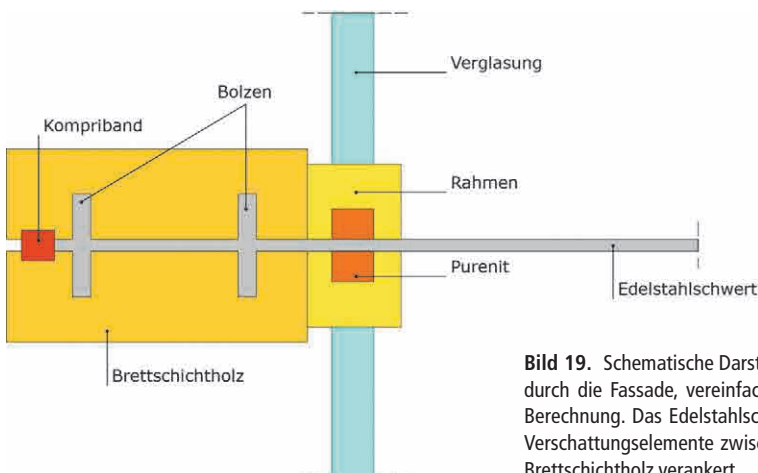


Bild 19. Schematische Darstellung des horizontalen Schnitts durch die Fassade, vereinfacht für die zweidimensionale Berechnung. Das Edelstahlschwert ist zur Befestigung äußerer Verschattungselemente zwischen den inneren Bindern aus Brettschichtholz verankert.

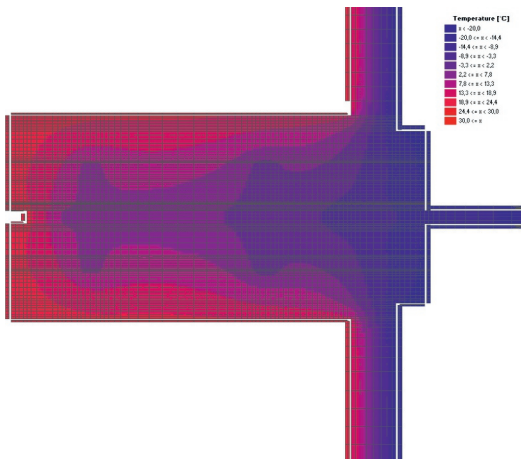


Bild 20. Temperaturverteilung über den berechneten Schnitt am kältesten Tag des Jahres, Temperaturbereich $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (blau) bis $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rot)

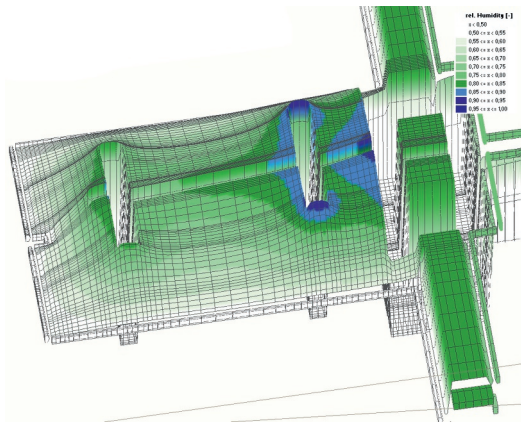


Bild 21. Verteilung der relativen Feuchte dargestellt als Höhe über dem Rechengitter am kältesten Tag des Jahres. Feuchtebereich weiß: $< 50\text{ } \%$ r.F.; grün: $50\text{ } - < 85\text{ } \%$ r.F.; blau: $85\text{ } - 100\text{ } \%$ r.F.

der Wärmebrücke nicht zu einer Schädigung im Holz kommt. Der Vergleich der Temperatur- und Feuchteverteilungen am kältesten Tag zeigt, dass die höchste Feuchte nicht zwangsläufig im Bereich der niedrigsten Temperatur auftritt, da die vorangegangenen Klimabedingungen und die Dynamik der zweidimensionalen Transportvorgänge im Bauteil die aktuelle Situation maßgeblich beeinflussen.

Andere Beispiele zum zweidimensionalen Tauwasserschutz eines Sockelpunkts bei einem Holzhaus mit Bodenplatte wurden in [74] und [75] veröffentlicht. Zweidimensionale Berechnungen zum Feuchteverhalten innen gedämmter Kellerwände sind in [51] zu finden.

4.4 Dämmung von Kaltwasserrohren und Kühlleitungen

Die Bemessung der Dämmung von Kaltwasserrohren und Kühlleitungen kann mithilfe hygrothermischer Simulationen gut durchgeführt werden. Hier eignet sich die Betrachtung in einem radialsymmetrischen System, das das Volumen einer um ein Rohr umschlossenen Dämmung genauer abbilden kann, als es im üblicherweise angewandten, kartesischen System möglich ist. Der Aufbau einer exemplarischen Rohrdämmung als radialsymmetrisches System ist mit Rohrwand, Dämmung und Dampfbremse in Bild 22 dargestellt. Auf diese Weise kann überprüft werden, ob und in welchem Maß es in Rohrdämmsystemen zu Tauwasser- oder Eisbildung kommt oder wie viel Dämmung erforderlich ist, um die Frostfreiheit von Kaltwasserleitungen z. B. in der Rohrbau- oder Sanierungsphase, wenn das System zwar befüllt, aber temporär nicht genutzt ist, zu garantieren.

Beispielsweise untersuchen Hart und Bludau [76] in einer hygrothermischen Studie, wieviel Kondenswasser und Eis in einem Kühlrohrdämmsystem, abhängig von der Art des Dämmmaterials, der Dampfsperre und den Klimabedingungen, an verschiedenen Standorten zu erwarten ist. Durch die Wahl des aus feuchteteknischer Sicht günstigsten Dämmsystems können die Betriebskosten der Anlagen gesenkt und die Nutzungsdauer verlängert werden. Eine Ammoniak-Kühlleitung mit einer konstanten Temperatur von $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurde mit einem Durchmesser von 75 mm modelliert und mit den drei verschiedenen Rohrdämmstoffen Polyethylen (PE, Stärke 115 mm), extrudiertes Polystyrol (XPS, 115 mm) und Polyisocyanurat (PIR-Stärke 76 mm) gedämmt. Die Dämmsysteme wurden sowohl mit als auch ohne Dampfsperre (s_d -Wert 175 m) betrachtet. Die Berechnungen wurden über einen Zeitraum von zehn Jahren u. a. für die US-Standorte Houston (Texas) und Los Angeles (Kalifornien) durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch die Verwendung einer Dampfbremse sowohl bei der XPS- als auch

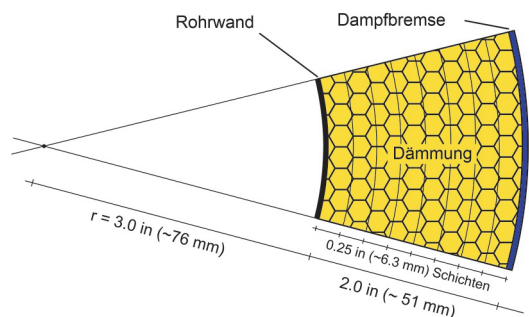


Bild 22. Exemplarischer Aufbau einer Rohrdämmung mit Rohrwand, Dämmung und Dampfbremse in radialsymmetrischer Darstellung [76]

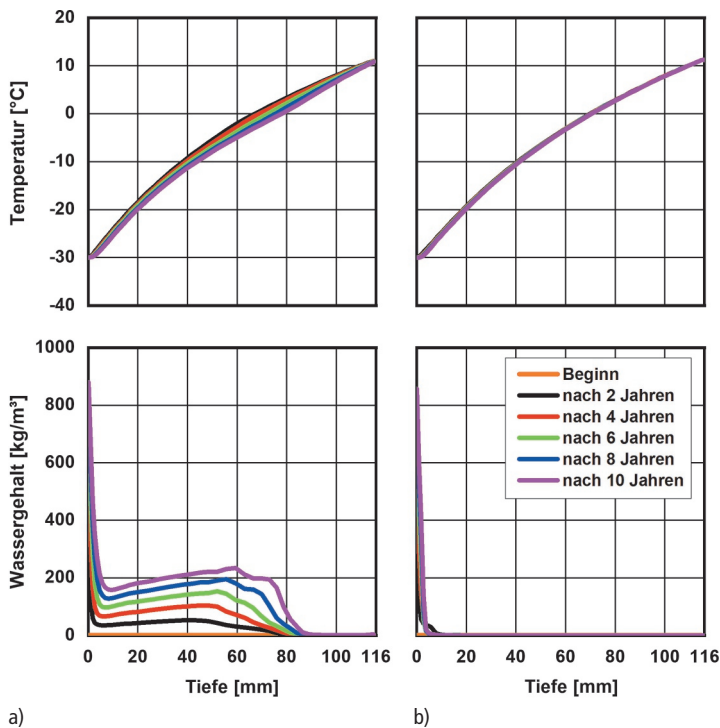


Bild 23. Profile der Temperatur und des Wassergehalts in der Dämmung (hier PIR, Standort Los Angeles) nach zwei, vier, sechs, acht und zehn Jahren. Der Anfangszustand wird nur für den Wassergehalt dargestellt;
a) Diagramme Dämmung ohne Dampfsperre, b) Diagramme Dämmung mit Dampfbremse

bei der PIR-Dämmung deutlich weniger Tauwasser in der Dämmung bildet. Ohne Dampfbremse bildeten sich in der PIR-Dämmung bis zu 88 Vol.-% über einen Zeitraum von 10 Jahren und in der XPS-Dämmung bis zu 22 Vol.-%. Mit Dampfbremse reduzierte sich dieser Wert bei beiden Dämmungen auf weniger als 2 Vol.-%. Für das Polyethylen-Dämmsystem mit der Dampfbremse lag die Wasseraufnahme unter 0,5 Vol.-% und ohne Dampfbremse unter 1 Vol.-%.

Die Profile der Temperatur und des Wassergehalts der Dämmung sind in Bild 23 dargestellt. Das Temperaturprofil ist in den oberen Diagrammen aufgrund der Radialsymmetrie des Bauteils nicht linear. In den unteren Diagrammen des Wassergehalts ist gut zu erkennen, dass die Dampfbremse (rechtes Diagramm) das Eindringen von Feuchte und die Bildung von Kondenswasser weitgehend verhindert, während der Wassergehalt (in Form einer Eisschicht) in der Dämmung ohne Dampfbremse sich von der Rohrseite über Zeit immer mehr über den Querschnitt der Dämmung ausbreitet. Weiterhin wurde die Änderung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe über die Zeit aufgrund der Bildung von Kondenswasser ausgewertet. Es zeigte sich, dass es vor allem bei den weniger diffusionshemmenden Dämmstoffen bei den Systemen ohne Dampfbremse zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit kommt (Bild 24a). Bei der XPS-Dämmung steigt diese nur

langsam im Laufe der Zeit, bei der PIR-Dämmung steigt die Wärmeleitfähigkeit so schnell, dass bereits nach 2–3 Jahren je nach Standort keine ausreichende Dämmwirkung mehr vorhanden ist. Bei den Systemen mit Dampfbremse (Bild 24b) bleibt die dämmende Wirkung über den betrachteten Zeitraum unverändert bestehen.

Die Studie zeigt, dass sich in der Dämmung der Ammoniak-Kühlleitung vor allem in den weniger diffusionshemmenden Dämmungen PIR und XPS große Mengen an Tauwasser über die Zeit sammeln können, die bei der PIR-Dämmung innerhalb weniger Jahre zu einer starken Beeinträchtigung der Dämmwirkung führen. Daher ist hier die Verwendung einer Dampfbremse notwendig, um das System langfristig und effektiv betreiben zu können. Bei der Polyethylen-Dämmung ist aufgrund des hohen Diffusionswiderstand eine Dampfbremse zwar nicht zwingend erforderlich, sollte aber trotzdem zum Schutz vor über die Stöße eindringender Feuchte eingesetzt werden.

In einem anderen Anwendungsfall sollten bei der Sanierung von Wohngebäuden Heizungs- und Kaltwasserrohre im Wärmedämmverbundsystem auf der Außenseite der Wand verlegt werden. Hierbei stellt sich die Frage, ob die jeweils vorhandene Überdämmung von ca. 10 cm im Winter ausreichend ist, das Rohr im Falle eines Heizungsausfalls frostfrei zu halten. Als kri-

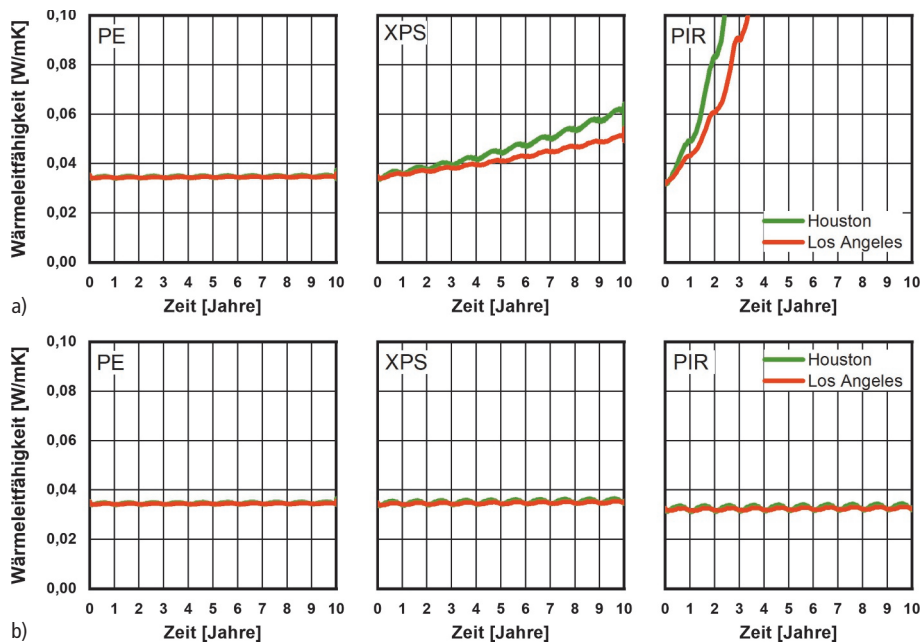


Bild 24. Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit über einen Zeitraum von 10 Jahren an den drei Standorten aufgrund der Wasseraufnahme (gleitende Monatsmittelwerte), a) die Diagramme zeigen die Systeme ohne Dampfbremse, b) Systeme mit Dampfbremse

tischer Fall wurde hierbei der Außenbereich einer temporär leerstehenden und somit unbeheizten Wohnung in Kombination mit einem 72-stündigen Ausfall der Heizung im übrigen Gebäude angenommen.

Die Untersuchungen zeigten für den betrachteten Fall, dass die Rohroberfläche nach Abfall der Temperatur im Innenraum durch den angenommenen Heizungsausfall schnell abkühlt. Nach 72 Stunden bei gleichzeitig anhaltender Kälte außen mit minimalen Temperaturen von bis zu minus 20 °C, erreichten die Rohre Temperaturen knapp unter 4 °C, wobei noch keine Frostgefahr vorliegt. Dauert der Heizungsausfall jedoch noch länger an, fällt die Temperatur weiter. Nach weiteren 72 Stunden betrug die Temperatur der Rohroberfläche nur noch ca. 1,6 °C. Somit konnte ein Einfrieren des Rohres nicht mehr sicher ausgeschlossen werden.

4.5 Bautrocknungsmaßnahmen

In der Neufassung der DIN 4108-3 vom März 2024 wird in der Einleitung darauf hingewiesen, dass sich die darin enthaltenen Anforderungen und Hinweise auf Bauteile nach Abgabe der Rohbaufeuchte beziehen und in der Phase der Bauaustrocknung Verhältnisse auftreten können, die besonders berücksichtigt werden müssen und insbesondere für Bauwerke, die kurz vor oder während der Heizperiode fertiggestellt werden sowie bei starken Niederschlägen während der Bauphase gilt. Weiter heißt es dort:

„In solchen Fällen sind gegebenenfalls technische Trocknungsmaßnahmen und eine gezielte Lüftung erforderlich, um möglichen Schäden durch die Rohbaufeuchte vorzubeugen. Zur Beurteilung können auch hygrothermische Simulationsverfahren verwendet werden.“

Neben dem Problem der Rohbaufeuchte haben Bauherren auch häufig mit Leitungswasserschäden zu kämpfen, die in Deutschland bei über einer Million im Jahr liegen und damit, statistisch gesehen, jeden Bürger einmal im Leben betreffen. Dazu kommen noch Havarien durch Überschwemmungen oder Starkregenereignisse, die mit dem Klimawandel wahrscheinlich weiter zunehmen werden. Wissenschaftliche Untersuchungen zur Unterstrichtröcknung, Wand- und Deckentrocknung haben gezeigt, dass die natürliche Austrocknung meist nicht ausreicht, um Folgeschäden zu verhindern, sondern technische Trocknungsmaßnahmen ergriffen werden müssen [77]. Bei der Auswahl und Planung geeigneter Trocknungsverfahren und deren erforderlicher Anwendungsdauer können hygrothermische Simulationsverfahren wertvolle Dienste leisten. Dabei haben Vergleiche zwischen Rechen- und Messergebnissen in [5] gezeigt, dass die hygrothermische Simulation nicht nur die Austrocknungsdauer gut prognostizieren kann, sondern auch dabei hilft, die Trocknungsmaßnahmen effizienter zu gestalten und sogar neue Trocknungsapparaturen zu entwickeln [78]. Bei dieser Apparatur handelt es sich um ein durch hygrothermische Simulation optimiertes Trocknungsmo-

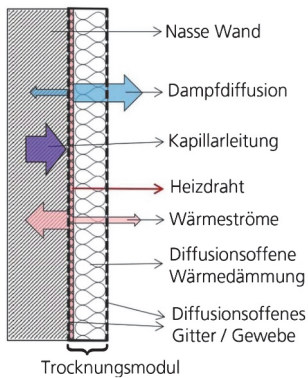


Bild 25. Prinzipskizze für ein wärmedämmtes energieeffizientes Wandtrocknungsmodul, das mithilfe von hygrothermischen Simulationen entwickelt und optimiert wurde

dul, das wie in Bild 25 dargestellt, mit der beheizbaren Seite auf die zu feuchte Wand gedrückt wird. Die Rückseite bildet eine diffusionsoffene Dämmschicht, die zwar die Abgabe der Feuchte an die Raumluft ermöglicht, gleichzeitig aber die Wärmeabgabe an den Raum durch die Wärmedämmung minimiert. Im Vergleich zu den bisher meist verwendeten Infrarotheizpaneelen verbraucht das wärmedämmte Trocknungsmodul etwa 80 % weniger elektrische Energie.

Während der Bereich der Technischen Trocknung bisher meist auf empirischen Erfahrungen beruhte, wurden in letzter Zeit vermehrt Anstrengungen unternommen, die üblichen Trocknungsmaßnahmen und deren Energieeffizienz wissenschaftlich zu untersuchen und dabei auch hygrothermische Simulationsrechnungen einzusetzen. Da nach einer Trocknungsmaßnahme gewährleistet sein muss, dass die verbleibende Restfeuchte keine weiteren Schäden anrichtet, wie z. B. hygienisch bedenkliches mikrobielles Wachstum, hat die Frage, wie lange getrocknet werden muss, an Bedeutung zugenommen. Das Thema Energieeffizienz von Trocknungsmaßnahmen ist vor allem für die Versicherungen im Fall von Wasserschäden relevant, da diese die Stromkosten bezahlen müssen, die während der technischen Trocknung entstehen und einen nicht unerheblichen Teil der gesamten Sanierungskosten ausmachen. Neben der Kosteneinsparung haben energieeffiziente Trocknungsmaßen auch den Vorteil, dass mit derselben elektrischen Anschlussleistung (Maximalleistung) größere Flächen gleichzeitig getrocknet werden können.

4.6 Entwicklung von Prüfmethoden zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit und Alterung von Bauteilen

Die Lebensdauer von Bauprodukten ist bekanntermaßen endlich. Schäden oder Funktionsstörungen können zu einem vorzeitigen Ende der Lebensdauer

er führen und einen Austausch oder zumindest Reparaturmaßnahmen notwendig machen. Deshalb sind Witterungsbeständigkeit und Funktionssicherheit wesentliche Faktoren zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Baustoffen und Bauteilen. Seit langem gibt es deshalb die unterschiedlichsten Standardprüfungen zur Qualitätssicherung von Produkten. Solche Standardprüfungen stoßen jedoch häufig an ihre Grenzen, wenn es um den Test völlig neuer Produkte oder um einen geänderten Einsatz bewährter Produkte geht. In solchen Fällen ist die Schnellbewitterung, auch Klimasimulation genannt, meist die Methode der Wahl, um Aussagen zu Eignung und Schadenspotenzial eines Produktes treffen zu können. Dabei werden in speziellen Klimakammern Beanspruchungszyklen gefahren, die den Einsatz der Bauprodukte in der Praxis labortechnisch simulieren sollen. In der Regel wird nur eine Auswahl der für das Untersuchungsziel relevanten Klimaparameter verwendet und ein- oder beidseitig unterschiedlich beaufschlagt. Im Gegensatz zur Freibewitterung hat die labortechnische Klimasimulation den Vorteil, dass beliebige Klimazyklen, unabhängig von den realen Witterungsverhältnissen vor Ort, gefahren werden können. Weder Jahreszeiten noch aktuelle Wetterbedingungen setzen möglichen Bearbeitungszeiträumen Grenzen. Zudem sind die Prüfrandbedingungen sehr gut reproduzierbar, sodass sich das Verhalten unterschiedlicher Produkte besser vergleichen lässt. Ein weiterer Vorteil ist die Anpassbarkeit der Randbedingungen auf weltweit beliebige Standorte für Bauteiltests in konkreten Bauvorhaben.

Um bei der Klimasimulation in kurzen Zeiträumen dieselbe Produktalterung zu erzielen wie nach vielen Jahren im praktischen Einsatz, wird versucht, die in der Realität ablaufenden Alterungsvorgänge durch Überhöhung einzelner Parameter (Temperatur, Bestrahlungsstärke, Änderungsgeschwindigkeit) oder durch Weglassen nicht relevanter Phasen (z. B. Nacht, Übergangsphasen) zu beschleunigen. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass durch die Überhöhung der Klimaparameter (z. B. sehr hohe Temperaturen oder Feuchten bzw. beides) keine Veränderungsprozesse ablaufen, die unter normalen Bedingungen nicht stattfinden können. Beispielsweise haben standardisierte Laborversuche an Mineralwollgedämmstoffen für Wärmedämmverbundsysteme zu einem Festigkeitsverlust geführt, der in der Praxis nicht im selben Maß beobachtet wurde. Eine Analyse mithilfe der hygrothermischen Simulation, die später durch längerfristige Freilandversuche bestätigt wurden, hat gezeigt, dass die Prüfbedingungen im Labor nicht den wahren Verhältnissen der Praxis entsprachen. Zwar waren sowohl die maximalen Temperaturen als auch die maximalen Feuchtebedingungen durchaus realistisch, aber nicht deren gleichzeitiges Auftreten [79].

Hygrothermische Simulationen können also helfen, die real auftretenden Beanspruchungsmaxima und ihre Koinzidenz zu identifizieren. Beispiele sind sommerli-

che Temperaturspitzen oder winterliche Tiefsttemperaturen. Manchmal sind aber auch mittlere Temperaturen ausschlaggebend, wenn sie mit einer hohen Feuchte einhergehen. Beispielsweise haben systematische Beobachtungen gezeigt, dass der Bewuchs von Fassaden durch Mikroorganismen hauptsächlich im Herbst stattfindet, da es wegen der höheren Luftfeuchte zu einer stärkeren Befeuchtung der Oberflächen kommt. Aus einer Aneinanderreihung von typischen Beanspruchungsmaxima, wie z. B. bei durchschnittlichen Herbsttagen oder auch heißen Sommer- bzw. kalten Wintertagen ist es möglich Beanspruchungszyklen zu generieren, die in der Klimakammer eine Beschleunigung der real auftretenden Verwitterungsphänomene hervorrufen. Diese Vorgehensweise ermöglicht ein maßgeschneidertes Schnelltestkonzept und wird daher auch Test-Tailoring genannt.

4.7 Anwendungsgrenzen der hygrothermischen Simulation

Die Anwendungsgrenzen der numerischen Simulation sind nicht leicht zu definieren. Beispielsweise geben einige Regelwerke wie z. B. EN 15026 [31] eine Temperatur über 50 °C als Grenze für die Anwendbarkeit an. Dies gilt allerdings nur, wenn an der Stelle mit solch hohen Temperaturen gleichzeitig auch Sättigungsdampfdruckbedingungen herrschen. Der Hintergrund für diese Einschränkung ist die Tatsache, dass der Sättigungsdampfdruck bei 50 °C etwas mehr als 10 Prozent des normalen Luftdrucks ausmacht und daher eine gewisse Dampfkongvektion im Porenraum verursachen kann, die in den bisherigen Modellen nicht berücksichtigt wird. Mehrere Vergleiche von Simulationsergebnissen mit Messungen bei höheren Temperaturen haben jedoch gezeigt, dass der Einfluss dieser Dampfdruck bedingten Konvektion in der Praxis wenig signifikant ist, sodass die Temperaturgrenze von 50 °C als konservativ angesehen werden kann. Im Brandfall mit Temperaturen von deutlich über 100 °C sieht das mit Sicherheit anders aus. Will man die hygrothermische Simulation auch für solche Fälle einsetzen, muss vorab eine Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Untersuchungen erfolgen und eventuell eine Anpassung des Modells oder seiner Kennwerte vorgenommen werden.

Salzkontamination und Auswaschung bzw. Migration von Materialbestandteilen

Bei der Anwesenheit von Salzen oder anderen Verunreinigungen in Baustoffen, die das feuchtetechnische Verhalten beeinflussen können, ist Vorsicht geboten. Wie eingangs beschrieben, haben hygroskopische Salze einen deutlichen Einfluss auf die Feuchtespeicherfunktion eines Materials. Das Salz in den Poren beeinflusst meist auch den Feuchtetransport und zwar insbesondere die für die Trocknung wichtige Wasserdampfdiffusion, wie in Bild 26 zu sehen ist. Dort ist die Veränderung des Dampfdiffusionswiderstands von Vollziegelproben mit dem Gehalt an Natriumchlorid, bezogen

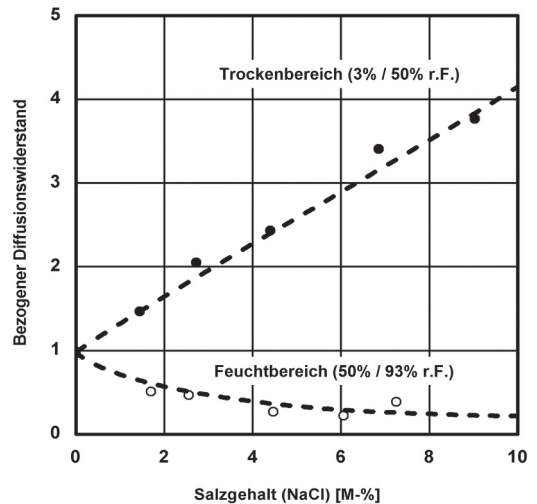


Bild 26. Veränderung des Dampfdiffusionswiderstands von Vollziegeln mit dem Gehalt an Kochsalz (NaCl) gemäß [6]. Während der Diffusionswiderstand des Materials mit dem Salzgehalt bei der Diffusionsmessung im Trockenbereich mit dem Salzgehalt deutlich ansteigt, verringert er sich im Feuchtbereich.

auf den Widerstand ohne Salzbelastung, dargestellt. Die Proben wurden zunächst mit unterschiedlich konzentrierten Kochsalzlösungen beaufschlagt und danach getrocknet und der Salzgehalt durch Wägung bestimmt. Anschließend fanden die Diffusionsmessungen gemäß DIN EN ISO 12572 [48] im Trockenbereich (3% r.F. im Cup) und Feuchtbereich (93% r.F. im Cup) in einem konstant auf 23 °C und 50% relative Luftfeuchte geregelten Klimaraum statt. Es ist auffallend, dass sich die salzbedingte Veränderung des Diffusionswiderstands im Trocken- und Feuchtbereich genau entgegengesetzt verhält. Während das Salz unter den trockenen Bedingungen den Diffusionswiderstand durch Einlagerung der Salzkristalle in das Porengefüge stark erhöht, führt das bei 75% relativer Feuchte in-Lösung-gehen des Kochsalzes zu einer Beschleunigung des Feuchtetransports. Dieses Verhalten resultiert wahrscheinlich auf der zusätzlichen Wasseraufnahme in die Poren durch das hygroskopische Salz, wenn dessen Kristallisationspunkt erreicht wird. Ob der Feuchtetransport unter diesen Umständen weiterhin als Dampfdiffusion erfolgt oder bereits Kapillareffekte dazukommen, ist mithilfe der hier beschriebenen Untersuchung nicht festzustellen. Sicher ist jedoch, dass das Salz in gelöster Form mithilfe von Flüssigtransportvorgängen fortbewegt werden kann. Inwieweit hier auch Osmoseeffekte zum Tragen kommen, ist schwer zu beantworten. Für den Einsatz der hygrothermischen Simulation bei salzbelasteten Baustoffen bedeuten diese Ergebnisse, dass mit zunehmendem Salzgehalt die Aussagekraft der Rechenergebnisse immer unsicherer wird.

Einen weiteren Unsicherheitsfaktor für die hygrothermische Simulation stellt das Auswaschen von Materialbestandteilen bzw. das Wandern beweglicher Bestandteile im Porengefüge bei natürlicher Bewitterung dar. Ein Beispiel für ein Material, bei dem diese Vorgänge eine Rolle spielen, ist Beton. Bei diesem Baustoff kann die einseitige Beaufschlagung mit flüssigem Wasser, z. B. in Kontakt mit Grund- oder mit Regenwasser zu einer Selbstabdichtung des Materials gegenüber Kapillartransportvorgängen führen. Dies wurde anhand wiederholter Feuchteverteilungsmessungen mithilfe eines NMR-Scanners an exponierten Wandprüfkörpern festgestellt [80]. Offensichtlich wird durch die Befeuchtung der Fassade bei Schlagregenereignissen das Oberflächenwasser durch Kapillarleitung nach innen gesaugt. Dabei nimmt es Feinteile im Beton im „Huckepack“-Verfahren mit. Der Rücktransport der Feuchte an die Oberfläche in einer Trockenphase findet, wie bereits besprochen, schwerpunktmäßig durch Dampfdiffusion statt, sodass die Feinteile in einer bestimmten Tiefe des Materials verbleiben und sich dort ansammeln. Dieser Vorgang führt an der entsprechenden Stelle zu einer langfristigen Abdichtung des Betons gegenüber dem kapillaren Wassertransport, sodass die Feuchte in diesem Bereich nur noch durch Dampfdiffusion erfolgen kann.

Diese Schlussfolgerung basiert auf den oben erwähnten Untersuchungen an bewitterten Betonprüfkörpern auf dem Freilandversuchsgelände in Holzkirchen. Bild 27 zeigt die Ergebnisse eines Laborversuchs an Betonprüfkörpern, die in die Westfassade einer Versuchshalle integriert waren. Wiederholte Feuchteprofilmessungen mithilfe eines NMR-Scanners während der Freilandexposition hatten gezeigt, dass sich die Feuchteverteilungen nach einer Zeit von weniger als zwei Jahren unabhängig vom Wetter kaum noch veränderten. Eine anschließende Analyse mithilfe eines Saugversuchs im Labor (Bild 27a) hat ergeben, dass der Wassergehalt im Bereich der Außenoberfläche durch die permanente Benetzung noch etwas ansteigt, im mittleren Teil des Prüfkörpers zeigte sich jedoch selbst nach über zwei Wochen gegenüber des Wassergehalts im Freiland keine Veränderung mehr. Durch das Umdrehen der Probe, sodass die Rückseite mit Wasser benetzt wurde, kam es dann innerhalb von zwei Tagen zu einer vollständigen Wassersättigung (Bild 27b).

Für die hygrothermische Simulation bedeutet dies, dass ein bewittertes oder dem Grundwasser ausgesetztes Betonbauteil in mindestens zwei Schichten aufgeteilt werden sollte; in eine äußere Schicht in der eine Kapillarleitung stattfinden kann und in eine darunterliegende Schicht, in der das nicht mehr der Fall ist und der Feuchtetransport ausschließlich durch Dampfdiffusion erfolgt. Einen ähnlichen Ansatz haben auch die Autoren von [81] aufgrund von umfangreichen Laboruntersuchungen entwickelt. Alternativ zur Aufteilung in zwei Schichten, kann auch eine kapillare Sperrschicht etwa in der Mitte der Wand angeordnet werden, durch die nur Dampfdiffusion aber kein Flüssigtransport mehr erfolgen kann.

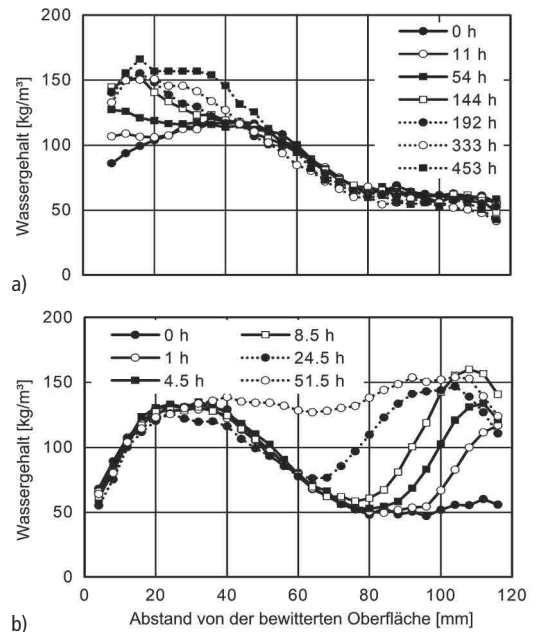


Bild 27. Messung der Wassergehaltsverteilung über den Wandquerschnitt von bewitterten Betonprüfkörpern von der Außen- zur Innenoberfläche beim Saugversuch im Labor mithilfe eines NMR-Scanners; a) beim Saugen über die bewitterte Außenoberfläche und b) beim anschließenden Saugversuch durch die Rückseite (Innenoberfläche) der Probe [80]

Veränderung der hygrothermischen Eigenschaften von Baustoffen durch Alterung oder Verwitterung

Hygrothermische Beanspruchungen und Transportvorgänge können z. B. durch das hygrische und thermische Dehnverhalten von Baustoffen eine mechanische Alterung bis hin zur Materialschädigung verursachen. Dabei ist das hygrische Quellen bei vielen mineralischen und organischen Baustoffen stärker ausgeprägt als die thermische Dilatation im baupraktischen Temperaturbereich. Beide Prozesse sind häufig entgegen gerichtet, d. h. bei einer Erwärmung würde sich der Baustoff zwar Ausdehnen, durch die gleichzeitig stattfindende Trocknung zieht er sich jedoch auch wieder zusammen. Bezüglich der Kopplung von hygrothermischen Transportansätzen und mechanischen Eigenspannungsmodellen, mit denen solche Vorgänge abbildbar wären, besteht derzeit jedoch noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Für die Anwendbarkeit der hygrothermischen Simulation spielen jedoch die mechanischen Alterungs- und Schädigungsprozesse nur dann eine Rolle, wenn dadurch auch die hygrothermischen Transporteigenschaften der betreffenden Materialien verändert würden. Im Folgenden werden daher nur Beispiele betrachtet, die eine solche Auswirkung auf die Stoffeigenschaften haben, dass ohne Anpassung der Materialdaten eine Einbuße der Aussagekraft von hygrothermischen Simulationsergebnissen zu befürchten ist.

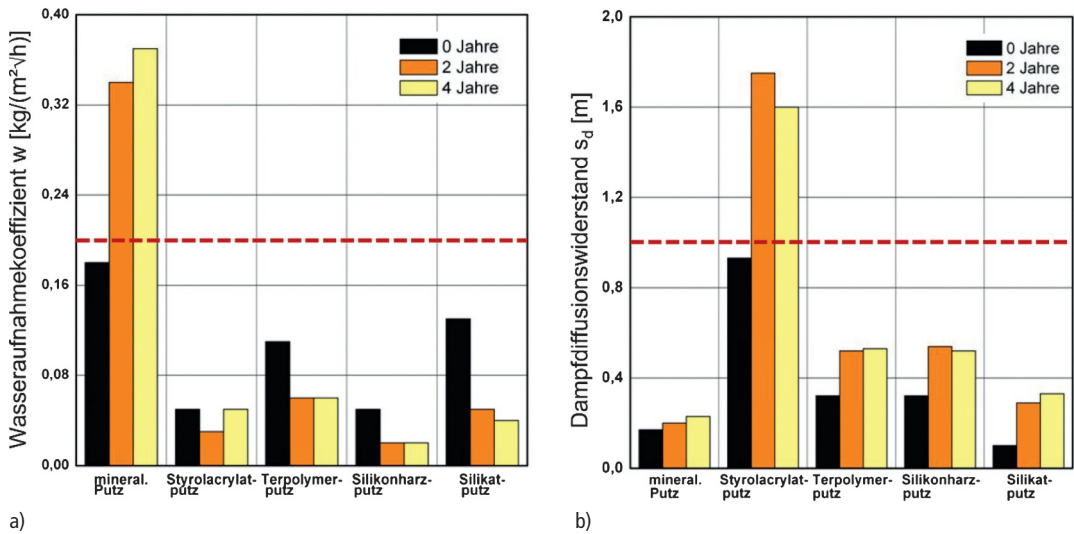


Bild 28. Messung der Wasseraufnahmekoeffizienten und der Dampfdiffusionswiderstände unterschiedlicher wasserabweisender Putzsysteme 2 bzw. 4 Jahre nach der Bewitterung im Freiland. Die gestrichelten Linien geben jeweils die Grenzen gemäß WTA 6-5 [72] an.

In der Regel handelt es sich bei solchen Bauprodukten um Funktionsschichten, wie z. B. Dampfbremsen oder Außenputze und Außenputzbeschichtungen die das Feuchteverhalten einer Konstruktion maßgeblich beeinflussen. Ein Beispiel sind die feuchtevariablen Dampfbremsen, die für den Einsatz in bestimmte Holzkonstruktionen eine Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) benötigen. Für die Langzeitfunktion der entsprechenden Konstruktionen muss gewährleistet sein, dass die feuchte-technischen Eigenschaften der zugelassenen Dampfbremsen über die projektierte Lebensdauer erhalten bleiben. Deshalb werden an diesen Dampfbremsen Alterungsuntersuchungen durchgeführt und deren feuchteabhängige Diffusionswiderstände vor und nach der Alterung bestimmt. Falls es zu einer alterungsbedingten Veränderung der Diffusionseigenschaften kommt, muss durch hygrothermische Simulation nachgewiesen werden, dass die Dampfbremse auch mit den gealterten Stoffeigenschaften die geforderte Funktion erfüllt. Ist das nicht der Fall, dann wird keine Zulassung erteilt. Das ist ein Beispiel dafür, wie die Alterung von Funktionsschichten bei der hygrothermischen Simulation berücksichtigt werden kann. Man rechnet zunächst mit den ursprünglichen Stoffkennwerten und wiederholt die Simulation anschließend mit den Kennwerten der gealterten Produkte. Bleibt das Bauteil danach immer noch feuchte-technisch sicher, dann ist es reif für die Praxis.

Ein weiteres Beispiel stellt der Schlagregenschutz durch wasserabweisende Putzsysteme gemäß DIN 4108-3 [26] dar. Dort werden für die Putzsysteme folgende Grenzwerte für den Wasseraufnahmekoeffizient w und den Dampfdiffusionswiderstand s_d angegeben: $w \leq 0,5 \text{ kg/(m}^2 \sqrt{\text{h}})$, $s_d \leq 2 \text{ m}$

und $w \cdot s_d \leq 0,2 \text{ kg/(m} \sqrt{\text{h}})$. Für die Eigenschaften des Außenputzes bei Installation einer Innendämmung gelten gemäß WTA 6-5 [72] sogar noch striktere Grenzwerte: $w \leq 0,2 \text{ kg/(m}^2 \sqrt{\text{h}})$, $s_d \leq 1 \text{ m}$ und $w \cdot s_d \leq 0,1 \text{ kg/(m} \sqrt{\text{h}})$. Während die Standardgrenzwerte für wasserabweisende Putzsysteme auf umfangreichen Freilandversuchen in den 80er Jahren basieren und deren Eignung mithilfe von hygrothermischen Simulationen weitgehend bestätigt wurden [82], haben Simulationen von Außenwänden mit Innendämmung gezeigt, dass striktere Grenzwerte bei dieser Sanierungsmaßnahme günstiger sind.

Diese sollten von den entsprechenden Putzsystemen auch nach längerer Zeit im bestimmungsgemäßen Einsatz weiter eingehalten werden. Zur Überprüfung wurden diese Eigenschaften daher an unterschiedlichen wasserabweisenden Außenputzprodukten zu Beginn und nach zwei bzw. vier Jahren Freilandbewitterung bestimmt [83]. Während sich der Wasseraufnahmekoeffizient beim mineralischen Putzsystem innerhalb von zwei Jahren verdoppelt und damit den Grenzwert für Außenwände mit Innendämmung überschreitet, sinkt die Wasseraufnahme bei den Kunstharzputzen und dem Silikatputz. Anders sieht es bei der Entwicklung der Dampfdiffusionswiderstände aus, die bei allen Putzsystemen tendenziell steigen, allerdings beim mineralischen Putz nur in geringem Maß. Ein starker Anstieg ist beim Silikat- und beim Styrolacrylatputz zu verzeichnen, wobei letzterer damit den Grenzwert nach WTA 6-5 für den Diffusionswiderstand um 60 % übersteigt. Wird der Putz nach einigen Jahren neu gestrichen, dann reduziert sich dadurch zwar meistens seine Wasseraufnahme, gleichzeitig erhöht sich aber der Diffusionswiderstand des Gesamtsystems (Bild 28).

Ob und ggf. ab wann die Alterung und das Neustreichen eines Putzsystems ein Problem für den Schlagregenschutz der Wand darstellt, kann mithilfe der hygrothermischen Simulation ermittelt werden. Als Eingangsparameter sollten dann jedoch die Stoffkennwerte nach der Alterung verwendet werden, sofern diese vorhanden sind. Während der Wasseraufnahmekoeffizient auch mithilfe einfacher Verfahren vor Ort bestimmt werden kann [84] und sich mit jedem neuen Anstrich wieder vermindert, ist die Situation beim Diffusionswiderstand deutlich ungünstiger. Hier führt sowohl die Alterung als auch ein neuer Anstrich immer zu einer Steigerung, weshalb es günstig ist, von vornherein Putzsysteme mit einem niedrigen s_d -Wert zu wählen. Risse im Putzsystem stellen ebenfalls eine Art Alterungsprozess dar, der die Wasseraufnahme bei Regen steigert. In solchen Fällen kann der Grenzwert für wasserabweisende Putzsysteme überschritten werden, sodass Handlungsbedarf besteht. Moderne Putzsysteme haben deshalb oft einen hydrophoben Grundputz, der dieses Problem stark reduziert.

Ungünstig sind in diesem Zusammenhang Anstriche, die ohne Putz direkt auf die tragende Wand aufgebracht werden. Wenn hier Risse entstehen, kann das rasch zu Frostschäden im Bereich der Risse führen, wie in [85] anhand einer beschichteten Porenbetonwand mit Frostschäden in den Rissbereichen erläutert wird. Manchmal ist es sogar besser für das Feuchteverhalten einer Wand keinen Anstrich zu verwenden, als einen, der Risse bekommen kann. Dies wurde mithilfe einer hygrothermischen Simulationsanalyse von Frostschäden an einem Kalksandsteinmauerwerk nachgewiesen [86]. Die richtige Annahme der aktuell vorhandenen hygrothermischen Eigenschaften eines Systems ist eine Herausforderung, die nur durch häufigere Probennahmen an Objekten gelöst werden kann. Da das nachhaltige Bauen großen Wert auf die Dauerhaftigkeit der Konstruktionen legt, ist in Zukunft mit genaueren Daten zur Alterung von Bausystemen zu rechnen.

5 Bewertung von Simulationsergebnissen

Ergebnis einer hygrothermischen Simulation sind die zeitlichen Verläufe der Temperatur- und Feuchteprofile bzw. die Wassergehalts- und Temperaturverläufe in den verschiedenen Materialschichten. Im Unterschied zum Glaserverfahren gibt es kein einfaches, für die gesamte Konstruktion gültiges Versagenskriterium.

Die Ergebniselemente werden einzeln ausgewertet und in Abhängigkeit von der jeweiligen Position und den dort eingesetzten Materialien beurteilt. Wie bei der Wahl der Eingabedaten sind dazu entsprechende Fachkenntnisse und Erfahrung erforderlich. Wichtige Bewertungskriterien, wann diese zu beachten sind und wann nicht sowie Besonderheiten bei einzelnen Konstruktionstypen werden im Folgenden vorgestellt.

5.1 Analyse der Wassergehaltsverläufe

Die Bewertung des Gesamtwassergehalts ist immer erforderlich, da er die Feuchtebilanz des Bauteils beschreibt. Ausgehend von der angesetzten Anfangsfeuchte steigt oder fällt dieser zunächst und erreicht in den meisten Fällen nach einiger Zeit den eingeschwungenen Zustand. Beide Entwicklungen sind möglich, eine weitergehende Bewertung sollte aber erst nach Erreichen des eingeschwungenen Zustands erfolgen. Steigt der Gesamtwassergehalt über den gesamten Berechnungszeitraum an, muss die Berechnung über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. Bleibt es bei einem permanenten Anstieg, bedeutet dies, dass die Konstruktion systematisch mehr Feuchte aufnimmt als austrocknen kann. Dies stellt in der Regel ein Versagenskriterium dar. Nur bei geringen Feuchteakkumulationen, die auch über die Lebensdauer des Bauteils keine kritischen Verhältnisse erzeugen, kann eine solche systematische Feuchteanreicherung mit entsprechender Begründung toleriert werden. Die Bewertung des Gesamtwassergehalts erfolgt qualitativ, da die absoluten Feuchtegehalte mit der Dicke des Bauteils und den Sorptionseigenschaften variieren, sodass keine sinnvollen Grenzwerte festgelegt werden können.

Ebenso werden die Feuchtegehalte in den einzelnen Materialschichten bewertet. Hier gilt, wie beim Gesamtwassergehalt, dass auf qualitativer Ebene kein permanenter Anstieg über den Berechnungszeitraum stattfinden sollte – dies ist auch bei eingeschwungenem Zustand des Gesamtwassergehalts u. U. möglich, wenn beispielsweise eine Schicht mit hoher Einbaufeuchte diese permanent an eine andere Materialschicht abgibt. Daher sollte auch hier der qualitative Verlauf mit bewertet werden.

5.2 Beurteilung von Schadensrisiken

Treten keine Feuchteakkumulationen auf, ist zu prüfen, ob die zu Beginn bzw. im eingeschwungenen Zustand erreichten Feuchtebedingungen ggf. Schäden oder Probleme verursachen können. Dabei sind neben der gesamten Materialschicht meist auch kritische Teilbereiche oder ggf. die Grenzschicht zwischen zwei Materialien zu bewerten. Dies wird bei den einzelnen Schadenskriterien im Folgenden weiter ausgeführt.

5.2.1 Schimmel

Schimmel kann sich sowohl an der Innen- als auch an der Außenoberfläche von Bauteilen bei geeigneten Bedingungen bilden. Auch innerhalb der Konstruktion oder sogar innerhalb von Materialien ist dies unter gewissen Umständen möglich. Schimmelpilze stellen, solange sie nur in begrenztem Umfang auftreten, vor allem eine optische Beeinträchtigung sowie ein hygienisches Problem dar, schädigen aber i. d. R. nicht die Bausubstanz. Ein hygienisches Problem ergibt sich, wenn durch den Stoffwechsel des Schimmels entstehen

de mikrobielle flüchtige organische Verbindungen oder dessen Sporen in die Raumluft gelangen. Dies ist vor allem der Fall, wenn Schimmel an der Innenoberfläche oder raumseitig der Luftdichtheitsebene auftritt, aber aufgrund der begrenzten Luftdichtheit bis zu einem gewissen Grad auch dann, wenn Schimmel innerhalb der Konstruktion wächst. Da Schimmel vergleichsweise häufig vorkommt, ist er von großer Relevanz in der Praxis.

Schimmelpilzbewertungskriterien liegen bereits seit vielen Jahren vor: vom einfachen Grenzwert bei 80 % r.F. als Kriterium für Innenoberflächen im Winter z.B. in DIN 4108-2 über temperaturabhängige Grenzkurven im WTA-Merkblatts-Merkblatt 6-3 [87] bis hin zu instationären Prognosemodellen wie WUFI® Bio [88] oder WUFI® VTT bzw. künftig FinMould [89].

Alle Grenzwerte und Modelle sind bisher nur für Innenoberflächen validiert und gültig. Mit Einschränkung können Sie auch innerhalb der Konstruktion verwendet werden – dort ist das Risiko aber aufgrund geringerer Nährstoff- und Sporenverfügbarkeit sowie stärker schwankender und extremerer Temperaturen reduziert. Einige Schimmelpilze, die in den Modellen berücksichtigt sind, tragen auch keinen Frost. An der Außenoberfläche kommen noch UV-Strahlung und Niederschlagseinfluss dazu, sodass wiederum viele im Innenraum wachsende Pilze an dieser Position nicht überleben. Aus diesen Gründen ist eine Schimmelpilzbewertung mit den genannten Kriterien regelmäßig an Innenoberflächen und auch an innenraumnahen Bereichen sinnvoll, jedoch nicht, bzw. eher qualitativ und vergleichend außerhalb der Luftdichtheitsebene, auf der Kaltseite der Dämmung oder an der Außenoberfläche. Die WTA-Merkblätter 6-5 zur Innendämmung und 6-8 zur Bewertung von Holzbauteilen geben beide explizit an, dass keine Bewertung des Schimmelpilzwachstumsrisikos auf der Kaltseite der Dämmung sinnvoll bzw. erforderlich ist – da dies für eine Vielzahl von funktionierenden Bauteilen mit Innendämmung oder Leichtbauteilen ein KO-Kriterium wäre. Auch mit *Glaser* wird dies Position nicht bezüglich Schimmel bewertet. Im Gegenteil lässt *Glaser* an diesen Positionen regelmäßig Tauwasserbildung über mehrere Wochen bis Monate zu, das lediglich im Sommer wieder verdunsten muss. Bei der mit Tauwasserbildung verbundenen relativen Feuchte von 100 % ist aber jeder für Schimmelwachstum verfügbare Grenzwert bereits deutlich überschritten.

Das neue WTA-Merkblatt 6-3 trägt dieser Problematik durch die Einführung verschiedener Expositionsklassen Rechnung. Die eingeschränkte Anwendbarkeit der verfügbaren Modelle für Positionen innerhalb bzw. im Außenbereich der Bauteile wird dabei durch entsprechend höhere Toleranzgrenzen bei den Ergebnissen kompensiert. Die Ergebnisse der instationären Prognosemodelle werden im sogenannten Mould Index beschrieben. MI 0 bedeutet, dass überhaupt kein Schimmelwachstum möglich ist. Ab Stufe 1 bis 2 ist

ein beginnender, mikroskopisch erkennbarer Bewuchs nicht auszuschließen. Erst ab Stufe 3 wird dieser auch für das bloße Auge erkennbar. Ergebnisse bis MI 1 sind dementsprechend immer akzeptabel – auch auf Innenoberflächen. Erstens weist die Prognose noch eine gewisse Sicherheitsreserve auf und zweitens wäre eine durch Wachstum in diesem Umfang bedingte Belastung der Raumluft vernachlässigbar gering – geringer als z. B. durch Zimmerpflanzen mit feuchtem Erdreich, reifes Obst oder Gemüse, an deren Oberflächen ebenfalls Schimmelpilzbildung teilweise sogar im sichtbaren Bereich stattfindet oder als die Sporenlast, die man mit Schuhen u. U. von draußen in den Wohnbereich einträgt. Das beginnende Wachstum bis MI 1 kann also als Anteil an der Grundlast angesehen werden, die sowohl im Außenklima als auch in vergleichbarer Weise in normalen Innenräumen vorhanden ist. Innerhalb der Konstruktion steigt der „grüne Bereich“ bis auf MI 2 an – ohne möglichen Kontakt mit dem Nutzer, also in abgeschotteten Bereichen der Konstruktion sind sogar Werte bis MI 3 akzeptabel.

Zusammenfassend gilt, dass Schimmelbildung ausgeschlossen werden kann, wenn die relative Feuchte an den Bauteiloberflächen im Winter unter 80 % bleibt. Ist das nicht der Fall, kann auf die temperaturabhängigen Grenzwertkurven aus dem WTA-Merkblatt 6-3 [87] zurückgegriffen oder eine instationäre Prognose mit einem der beiden dort ebenfalls vorgestellten Modelle durchgeführt werden. Bei letzterem wird der resultierende Mould Index anhand der Tabelle in Bild 29 bewertet. Während das biohygrothermische Modell WUFI® Bio eine Bewertung anhand der physikalisch ermittelten Keimungs- und Wachstumsgeschwindigkeit vornimmt, greift WUFI® FinMould auf mathematisch-empirisch ermittelte Gleichungen zurück. Beide Modelle liefern ähnliche Ergebnisse, die auch ineinander umgerechnet werden können, wie [90] zeigt. Bei durch das Außenklima beeinflussten Bauteilschichten hat das finnische Modell den Vorteil, dass bei ungünstigen Bedingungen, die an dieser Position sehr viel häufiger vorkommen als auf der Raumseite, auch ein „Rückgang des Risikos“ (decline), d. h. ein partielles Absterben der Schimmelpilze berücksichtigt wird, wodurch die Prognose etwas weniger weit auf der sicheren Seite liegt. Prinzipiell sind aber beide Modelle nur für die Raumseite validiert.

Innenoberfläche oder Position mit Raumluftkontakt	Oberflächen im Bauteilinneren ohne Raumluftkontakt	Kein Kontakt zum Nutzer
Bewertungszeitraum kürzer als ein Jahr ⇒ Keine Bewertung möglich bzw. sinnvoll		
MI < 1: kein oder gerade startender Bewuchs auch in Wohnräumen normal und akzeptabel (z.B. Pflanzen)	MI < 2: kein oder nicht sichtbarer, nur mikroskopisch erkennbarer Bewuchs	MI < 3: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs
$1 \leq \text{MI} < 2$: nicht sichtbarer, nur mikroskopisch erkennbarer Bewuchs	$2 \leq \text{MI} < 3$: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs	MI ≥ 3: mit bloßem Auge erkennbarer Bewuchs
MI ≥ 2: beginnender, mit bloßem Auge gerade erkennbarer Bewuchs	MI ≥ 3: mit bloßem Auge erkennbarer Bewuchs mit geringer Ausbreitung	Beurteilung im Einzelfall – aktuell nicht definiert

© Fraunhofer IBP

Bild 29. Bewertungskriterien für Schimmel in Abhängigkeit von der Auswerteposition und deren „Kontakt“ zum Nutzer bzw. zur Raumlufte. Die maßgebliche Bewertung erfolgt ganz links über die Innenoberflächen bzw. die Positionen mit Raumluftekontakt. Ohne direkten Raumluftekontakt gilt die mittlere Spalte. Ist der Kontakt zum Nutzer ausgeschlossen ist die rechte Spalte maßgeblich.

5.2.2 Holzfäule

Bei Holz soll zur Vermeidung von Holzfäule nach DIN 68800 als einfache Grenze der Wert von 20 M.-% Holzfeuchte nicht längerfristig überschritten werden. Dieser Wert beinhaltet allerdings große Sicherheiten – erst ab Fasersättigung oberhalb von etwa 25 bis 30 M.-% können die Pilze dem Holz so viel Feuchte entziehen, dass ein Abbau des Materials möglich wird. Bei Holzwerkstoffen beziehen sich die Grenzwerte nicht auf den Zerfallsbeginn, sondern auf die Festigkeitseigenschaften der Werkstoffe. Statisch relevante Holzwerkstoffe dürfen in der Regel einen Feuchtegehalt von 18 M.-% nicht überschreiten, um sicherzustellen, dass die Festigkeitseigenschaften auch wirklich der Deklaration entsprechen (vgl. DIN 68800-2 2012 [56]). Biologische Prozesse wie die Holzfäule laufen nur dann mit einer relevanten Geschwindigkeit ab, wenn auch die Temperaturen auf einem für das Pilzwachstum günstigen Niveau liegen. Das WTA-Merkblatt 6-8 [58] zur Bewertung von Holzkonstruktionen hat daher vor einigen Jahren differenziertere Grenzwerte für Massivholz vorgestellt, die nicht vom Wassergehalt in M.-% abhängen, sondern von der relativen Luftfeuchte in den Poren des Baustoffs (Bild 30). Die relative Porenluftfeuchte im Holz ist ein geeignetes Maß dafür, wie „leicht“ die Feuchtigkeit für die Pilze im Material verfügbar bzw. verwertbar ist. Diese, immer noch vorsichtige Grenzwertkurve steigt temperaturabhängig von 86 % r.F. bei 30 °C bis auf 95 % r.F. bei 0 °C und basiert hauptsächlich auf den Untersuchungen von *Viitanen* und *Kehl* [91–94].

Diese Grenzwertkurve erlaubt bei niedrigen Temperaturen deutlich höhere Feuchtegehalte als die DIN 68800-2, da der Wert von 95 % r.F., umgerechnet über eine mittlere Sorptionsisotherme für Nadelholz, einer Holzfeuchte von etwa 26 M.-% entspricht. Da die

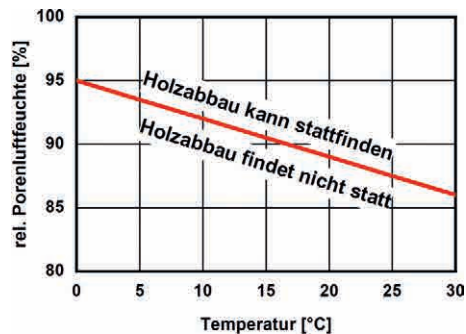


Bild 30. Grenzkurve der temperaturabhängigen relativen Luftfeuchte, die in den Poren einer 10 mm dicken Holzschicht im Tagesmittel nicht überschritten werden darf (nach [58])

hohen Feuchten vor allem auf der Außenseite der Konstruktion im Winter also bei niedrigen Temperaturen auftreten, entspricht dies einem deutlichen Anstieg des maßgeblichen Grenzwerts (vgl. Beispielauswertung einer außenliegenden Holzschalung in Bild 31).

Die Grenzkurve nach WTA 6-8 ist allerdings ebenfalls ein stationäres Bewertungskriterium, sodass kurzfristige Überschreitungen die in der Praxis unproblematisch sind, bei der Simulationsbewertung zu einem formalen Versagen führen.

Dementsprechend wurde hier in den vergangenen Jahren ebenfalls an instationären Bewertungsmodellen analog zum Schimmelmodell gearbeitet, um die Lücke zwischen den temperaturabhängigen Langzeitgrenzwerten der WTA und dem instationären Verhalten zu schließen. Auf Basis von Laborversuchen konnte in den Projekten [95] und [96] ein Modell erstellt werden, mit dem sowohl die Etablierung der holzerstörenden Pilze im Holz (Initiationsphase) als auch der

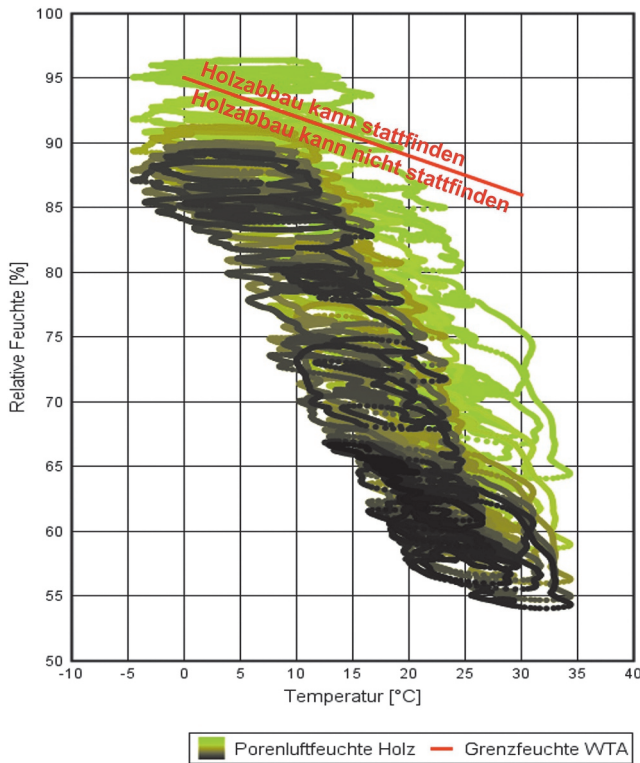


Bild 31. Auswertung der instationären hygrothermischen Verhältnisse anhand der Grenzkurve nach WTA 6-8. Ein Beispiel als Auswertungsdarstellung mit WUFI® Graph. Die Tagesmittelwerte der Temperatur und relativen Porenluftfeuchte in 10 mm Schicht eines Holzmaterials werden als Punkte geplottet. Die Farbe verläuft vom Start (grün) bis Ende (schwarz) des betrachteten Zeitraums.

eigentliche Masseabbau mit seinem zeitlichen Verlauf prognostiziert werden können. Das Modell ist in [96] beschrieben, befindet sich aktuell in der Validierungsphase und wird bei Erscheinen dieses Beitrags voraussichtlich bereits zur Verfügung stehen. Anhand der im relevanten Bereich der Konstruktion berechneten zeitlichen Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte (stundenmittelwerte in der kritischen, 10 mm dicken Schicht) kann festgestellt werden, ob bei diesen Bedingungen holzerstörende Pilze im Holz wachsen und falls ja, in welchem Umfang sie das Material abbauen können.

5.2.3 Korrosion

Metallische Konstruktionsbestandteile können bei hohen Feuchten korrodieren. Dies ist neben Zug- und Mauerankern in historischen Gebäuden vor allem bei Bewehrungsstahl im Beton von Bedeutung, wenn nach der Karbonatisierung der Korrosionsschutz nicht mehr gewährleistet ist. Zur Korrosion sind in deutschen Normen und Leitfäden zur Feuchteschutzbewertung bisher keine Grenzwerte hinterlegt. Es gibt in DIN 4108-3 (2018) [26] lediglich den Hinweis, dass Materialien, die mit Tauwasser in Berührung kommen,

nicht durch Korrosion geschädigt werden dürfen, ohne dass dazu ein Grenzwert genannt wird. DIN 4108-2 (2013) [97] fordert, dass an Oberflächen von Wärmebrücken eine relative Feuchte von 60 % r.F. nicht überschritten werden soll, um Korrosionsprobleme zu vermeiden.

In [96] werden daher sowohl einfache Grenzwerte bzw. Grenzwertkurven vorgeschlagen als auch ein Bewertungsmodell für die instationäre Beurteilung der Korrosion in karbonatisiertem Beton und anderen mineralischen Umgebungsmaterialien vorgestellt. Demnach kann man vereinfacht davon ausgehen, dass Korrosion von Stahl in karbonatisiertem Beton unterhalb einer relativen Luftfeuchte in den Materialporen von 80 % gar nicht oder nur in nicht relevantem Umfang möglich ist. Dies wurde auch bereits in [98] festgestellt und vorgeschlagen. Neuere Untersuchungen u. a. in [99] haben bestätigt, dass auch bei der Korrosion zusätzlich eine Abhängigkeit von der Temperatur gegeben ist. Dementsprechend darf die relative Luftfeuchte in den Poren des Materials bei niedrigeren Temperaturen auch noch etwas höher steigen, ohne dass Korrosion zu befürchten ist. Die aus den Untersuchungen abgeleitete Grenzkurve ist in Bild 32 dargestellt.

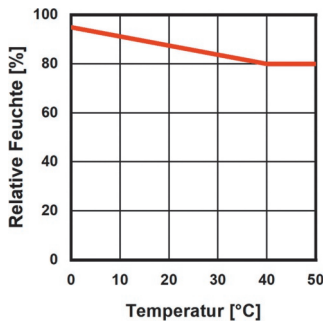


Bild 32. Grenzkurve der relativen Feuchte in den Poren des umgebenden Materials für den Beginn von Korrosion in Abhängigkeit von der gleichzeitig auftretenden Temperatur

Das in [96] vorgestellte Modell für die instationäre Korrosionsprognose erweitert den Ansatz für Eisenanker im Mörtelbett aus [99] auf karbonatisierten Beton. Hierbei wird anhand des zeitlichen Verlaufs von Temperatur und relativer Feuchte an der kritischsten Position der Bewehrung (in der Regel geringste Distanz zur bewitterten Außenoberfläche) bewertet, ob Korrosion möglich ist, und mit welchem Materialverlust zu rechnen ist. Das Ergebnis wird als Eindringtiefe der Korrosion in den Stahl in μm dargestellt. Die Bewertung der Eindringtiefen orientiert sich an den Vorgaben der internationalen Vereinigung für Stahlbeton. Dabei werden extrem geringe rechnerisch ermittelte Eindringtiefen von $\leq 30 \mu\text{m}$ während der zu erwartenden

Standzeit des Bauteils als unkritisch angesehen bzw. als „keine Korrosion“ bewertet und die Ampel bleibt dementsprechend auf grün. Bei errechneten Eindringtiefen bis $\leq 150 \mu\text{m}$ ist die Ampel auf Gelb, bei höheren Werten dann auf Rot.

Das Modell steht künftig im Postprozessor WUFI® Corr (Bild 33) zur Verfügung, wobei hier neben karbonatisiertem Beton auch auf andere Umgebungsmaterialien aus dem Denkmalschutzbereich zurückgegriffen werden kann, die bereits in [99] veröffentlicht wurden.

5.2.4 Frost

Im eingeschwungenen Zustand sind materialabhängig unterschiedliche Wassergehalte zulässig. Frostbeständige Putze, Mauerwerk oder Beton vertragen im Prinzip Wassergehalte bis hin zur freien Sättigung – hier ist allerdings zu beachten, dass starke Durchfeuchtungen das Risiko für Algen und Schimmel auf den Außenoberflächen erhöhen. Der Wassergehalt in frostempfindlichen Materialien sollte generell niedriger bleiben. Bei Kalksandstein treten Frostschäden bei den in Mitteleuropa üblichen Wintertemperaturen ab Wassergehalten von etwa 12 M.-% auf. Für viele andere Baustoffe sind jedoch keine Grenzwerte bekannt. Das WTA-Merkblatt 6-5 zur Innendämmung schlägt für nicht frostbeständige Materialien vor, einen Durchfeuchtungsgrad von 30 % bzw. eine relative Luftfeuchte in den Poren des Materials von 95 % r.F. nicht zu überschreiten. Bei diesen Verhältnissen können nach bishe-

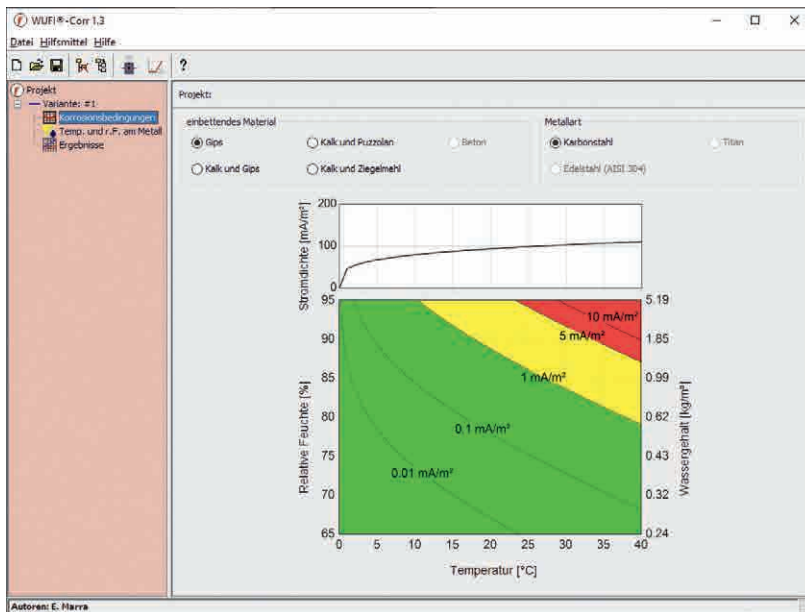
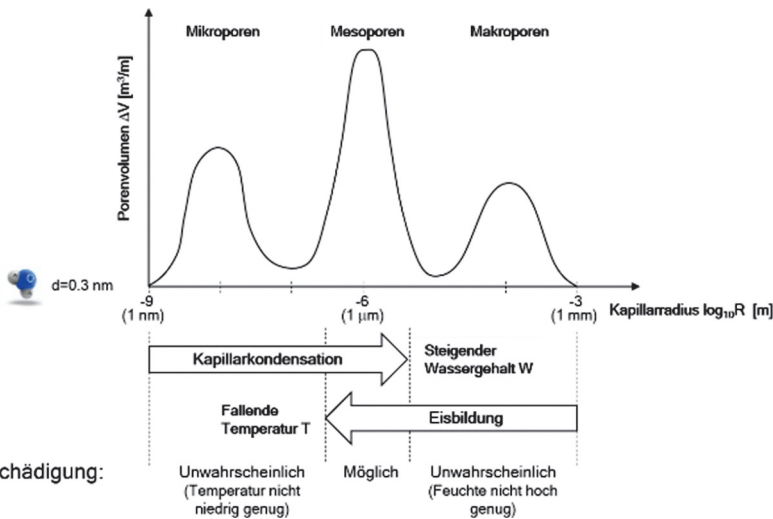


Bild 33. Temperatur- und feuchteabhängige Korrosionsmap exemplarisch für das Umgebungsmaterial Gips als Grundlage für die instationäre Prognose mit WUFI® Corr



Frostschädigung:

Bild 34. Veranschaulichung der Prozessrichtung der Kondensation und Eisbildung unter thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen an einer schematisch dargestellten differentiellen Porenvolumenverteilung aus [96]

rigen Kenntnissen auch für empfindliche Materialien Frostschäden ausgeschlossen werden.

Eine weiterreichende generische Frostrisiko-Beurteilung wurde im Rahmen von [96] entwickelt. Diese geht davon aus, dass in Bauteilen häufig die feinen Poren mit Wasser gefüllt sind und seltener die großen – umgekehrt treten häufig Temperaturen auf, bei denen Wasser bei niedrigem kapillarem Unterdruck in den großen Kapillaren einfrieren könnte und nur selten Temperaturen, bei denen das Wasser auch bei dem größeren Unterdruck in den feinen Poren einfriert (Bild 34). Daraus ergibt sich, dass das Haupt-Frost-Risiko die mittelgroßen Mesoporen betrifft, bei denen mittlere Feuchtegehalte und mittlere Frostbedingungen und damit häufiger Frost-Tauwechsel auftreten.

Das Modell kann zwar keine gesicherten Aussagen für eine Schädigung spezifischer Materialien treffen, weil dafür jeweils umfassende Voruntersuchungen erforderlich wären. Es ist aber möglich, die Anzahl der tatsächlich zu erwartenden Frost-Tauwechsel anhand der Verteilung von Feuchtegehalten und gleichzeitig auftretenden Temperaturen zu prognostizieren und anhand dieser Anzahl eine empirische Schädigungswahrscheinlichkeit anzugeben. Aktuell steht das Modell aber noch nicht in Form eines Postprozessors zur Verfügung, dieser ist aber in Planung.

5.2.5 Tauwasser in hydrophoben Faserdämmungen

Steinwolle oder Glasfaserdämmungen weisen oft nur eine geringe Feuchtespeicherung auf. Bei Feuchteeintrag über Diffusion kommt es daher auf der Kaltseite der Dämmung in manchen Fällen zu Tauwasserbildung. Bei gezielter Drainage kann dies zur Trocknung beitragen, andernfalls aber auch zu Feuchteschäden

z. B. an der Tragkonstruktion führen. Ohne Drainage sollten die Tauwassermengen daher so begrenzt werden, dass kein Abfließen des Kondensats stattfinden kann. Die DIN EN ISO 13788 [100] empfiehlt, die Tauwassermenge bei Materialien, die keine Feuchte speichern können, auf 200 g/m^2 zu begrenzen. Dieser Wert ist zwar für Oberflächen ohne anliegende Dämmung deutlich realistischer als die Grenze für die Tauwasserbildung auf nicht kapillar wasseraufnehmenden Schichten in der DIN 4108-3 von 500 g/m^2 . In beiden Fällen bezieht sich der Wert aber auf reine Dampfdiffusionsberechnungen, bei denen nicht berücksichtigt wird, dass fast alle Faserdämmungen zumindest in geringen Mengen Feuchte speichern können und das Tauwasser durch die anliegenden Fasern auch am freien Abfließen gehindert wird.

Bei der hygrothermischen Simulation stellt sich die Frage nach ablaufendem Tauwasser spezifischer als bei einer Glaser-Berechnung. In [96] wurde daher durch entsprechende Laborversuche überprüft, welche Tauwassermengen bei verschiedenen Kombinationen aus Grenzschicht- und Dämmmaterialien jeweils in der Konstruktion auftreten dürfen, bevor das Tauwasser aus diesem Bereich abläuft. Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen, dass auf glatten, hydrophoben Oberflächen ohne anliegende Dämmung geringere Mengen an der Oberfläche haften. Bei einer glatten, hydrophoben PE-Folie werden hier nur 50 g/m^2 erreicht.

Mit anliegender Dämmung erhöht sich die Feuchterückhaltung auch bei nur sehr gering sorptionsfähigen Dämmstoffen, vermutlich infolge des durch die Fasern erhöhten Fließwiderstands, pauschal um 50 g/m^2 . Somit werden im ungünstigsten Fall der PE-Folie mit hydrophober Faserdämmung nur 100 g/m^2 und lediglich bei der grob strukturierten Oberfläche die in der

Tabelle 4. Rückhaltvermögen verschiedener Oberflächen ohne und mit anliegender Dämmung

Eigenschaft Oberfläche	hydrophob glatt/unbekannt	hydrophil glatt	hydrophob fein strukturiert	hydrophob grob strukturiert
Oberflächentyp (Beispiel)	PE-Folie	Metalloberfläche	auf Vlies kaschierte Folie	mit Gewebe verstärkte Folie
Rückhaltevermögen ohne Dämmstoff [g/m ²]	50	100		150
Zuschlag mit Faser-Dämmstoff [g/m ²]	50			
Zuschlag Sorptionsfähigkeit Dämmstoff [g/m ²]	20 [m g/kg] × w ₈₀ [kg/m ³]			

Norm angegebenen 200 g/m². Dementsprechend sollte hier bei einer einfachen Bewertung der Simulationsergebnisse auf die neuen, niedrigeren Grenzwerte zurückgegriffen werden.

Da die meisten Dämmungen ein gewisses Sorptionsfeuchteniveau aufweisen, kann dieser Einfluss auf eine größere Tauwasserrückhaltung bei einer genaueren Bewertung mit herangezogen und entsprechend der untersten Zeile in Tabelle 4 als Zuschlag zusätzlich berücksichtigt werden.

Auf diese Weise kann die zulässige Rückhaltung auf Werte bis um 500 g/m² und damit deutlich über den bisherigen Wert von 200 g/m² angehoben werden.

Die neuen Untersuchungsergebnisse und die daraus abgeleiteten Grenzwerte fächern den zulässigen Bereich also deutlich weiter auf. Glatte hydrophobe Oberflächen halten nur 50 g/m² zurück, auf strukturierten Folien, die an sorptionsfähige Faserdämmstoffe angrenzen, steigt der Wert um bis zu einem Faktor 10 an. Sind die Dämmstoffe auch noch saugfähig, können die Feuchtegehalte im äußeren 10 mm dicken Bereich sogar noch höher steigen – in der Simulation werden bei diesen Bedingungen dann aber gar keine 100 % r.F. und damit auch kein Tauwasser im engeren Sinne erreicht. Dementsprechend ist in diesem Fall auch keine Bewertung des Ablaufrisikos erforderlich.

5.3 Einfluss der Feuchte auf die Dämmwirkung

Die Wärmeleitfähigkeit der meisten Materialien wird beim sogenannten Bezugsfeuchtegehalt, also dem Gleichgewichtsfeuchtegehalt bei 80 % relativer Luftfeuchte, ermittelt. D. h., der für das Bauteil ermittelte U-Wert gilt bis zu diesem mittleren Feuchtegehalt. Wird er überschritten, kann es sein, dass der angestrebte U-Wert nicht mehr eingehalten ist. Vor allem bei nur schlecht gegen Regen geschützten Bauteilen oder bei Dämmstoffen sollte daher bei höheren Feuchtegehalten überprüft werden, ob und in welchem Umfang sich eine Erhöhung der Transmissionswärmeverluste einstellt. Da die Materialien i. d. R. mit einer feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit in den Datensätzen hinterlegt sind, kann aus dem ermittelten Feuchtegehalt abgeleitet werden, ob eine solche Korrektur erforder-

lich ist. Eine solche ist darüber hinaus meist nur dann relevant, wenn der geplante U-Wert nahe an einem einzuhaltenden Grenzwert liegt.

Die meisten Dämmstoffe erhalten bei der Zulassung für den deutschen Markt einen Sicherheitszuschlag auf den Messwert der Wärmeleitfähigkeit, der neben Alterung, Messungenauigkeiten, Materialstreuung oder Ausgasung auch einen Anteil für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch die typischerweise enthaltene Feuchte beinhaltet. D. h., diese Feuchtemengen sind durch den Zuschlag bereits abgedeckt und nur untypisch hohe Feuchtegehalte sind eigens zu berücksichtigen. Grenzen dafür sind bisher allerdings in den einschlägigen Richtlinien nicht hinterlegt und auch die genaue Größenordnung des Feuchteanteils an den Zuschlägen werden im Rahmen der Zulassungen nicht explizit deklariert. Bei sorptionsfähigen Dämmstoffen kann die Korrektur ab 80 % r.F. über die Differenz der tatsächlichen Feuchte der gesamten Materialschicht und der Feuchtegehalte bei 80 % r.F. aus der Sorptionsisotherme abgeleitet werden. Bei diffusionsoffenen Dämmstoffen ist eine Überschreitung bezogen auf die gesamte Materialdicke aber unwahrscheinlich. Entweder läuft das Wasser ab oder es kommt bei Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bereits vorher zu Fäulnisrisiko. Bei nicht sorptionsfähigen Faserdämmungen werden in analoger Weise eher eine zu hohe Feuchte in den angrenzenden Beplankungsmaterialien oder ablaufendes Tauwasser ein Problem darstellen als die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Anders ist das bei diffusionshemmenden Hartschaumdämmungen, die durch erhöhte Feuchte meist nicht in ihrer Struktur geschädigt werden. Hier ist ab etwa 2 Vol.-% Feuchtegehalt davon auszugehen, dass die Wärmedämmwirkung in einer Weise beeinträchtigt ist, die durch die Zuschlagswerte nicht mehr abgedeckt ist. Höhere Feuchtegehalte sind dementsprechend zu vermeiden oder ggf. durch eine größere Dämmdicke zu kompensieren.

6 Normen und Richtlinien zur Feuchteschutzbemessung durch hygrothermische Simulation

Die Entwicklung von Normen und Richtlinien zur Feuchteschutzbeurteilung durch hygrothermische Simulation hat international stark zugenommen. Ursprünglich wurde ausschließlich die Dampfdiffusion aus dem Raum mit Tauwasserbildung im Winter betrachtet und mithilfe eines einfachen stationären Diffusionsansatzes nach *Glaser* [101] (Glaserverfahren bzw. Periodenbilanzverfahren nach DIN 4108-3 [26] genannt) berechnet. Dabei kommt es darauf an, dass das winterliche Tauwasser während der sommerlichen Verdunstungsperiode wieder vollständig austrocknet. Um Schäden vorzubeugen, darf die Tauwassermenge zusätzlich einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten. Am besten ist es natürlich, wenn im Winter gar kein Tauwasser entsteht. Dies hat zum verbreiteten Lehrsatz geführt: „innen immer dampfdichter als außen“. Im Fall von Bauteilen mit außen diffusionshemmenden Schichten kann eine Tauwasserbildung rechnerisch mithilfe von raumseitigen Dampfsperren vermieden werden. Da bei solchen Konstruktionen jedoch auch keine Feuchte austrocknen kann, die aus irgendwelchen anderen Gründen (Konvektion, Anfangsfeuchte oder Bauteilleckage) eingedrungen ist, sind diese Konstruktionen inzwischen als besonders schadensanfällig bekannt.

Die einschlägigen Normen und Richtlinien reagierten auf diese Entwicklungen durch einen Paradigmenwechsel, weg von „dicht und dichter“, hin zu: „so diffusionsoffen wie möglich und nur so dicht wie nötig“. Dabei waren jeweils die Dampfdiffusionswiderstände der äußeren (s_{da}) und inneren (s_{di}) Bauteilschichten gemeint. Zur Quantifizierung geeigneter s_{di} -Werte in Abhängigkeit von den meist vorgegebenen s_{da} -Werten wurden neben Freiland- und Laborversuche zunächst Glaserberechnungen durchgeführt, die später durch hygrothermische Simulationsrechnungen abgelöst wurden. Die Gründe für den Wechsel vom Glaserverfahren zur hygrothermischen Simulation sind vielfältig. Zum einen liegt es an den Anwendungsgrenzen der stationären Diffusionsrechnung und zum anderen an der Tatsache, dass es neben der winterlichen Tauwasserbildung noch ganz andere Feuchtequellen gibt, wie z. B. Schlagregen, Dampfdiffusion von außen (Umkehrdiffusion) oder Rohbaufeuchte, die im klassischen Glaserverfahren nicht berücksichtigt werden können. In Ländern, die sich über mehrere Klimazonen erstrecken, wie z. B. die USA, hat sich die Anwendung des Glaserverfahrens sehr bald als unzureichend erwiesen. Deshalb wird im ASHRAE Handbook of Fundamentals [102] darauf hingewiesen, dass das Glaserverfahren (dewpoint method) nicht als einzige Methode für die Bauteilplanung verwendet werden sollte, vielmehr wird dort eine hygrothermische Simulation gemäß der amerikanischen Feuchteschutznorm ANSI/ASHRAE 160 [103] empfohlen. Die weltweite

Akzeptanz der ASHRAE Normen und Richtlinien hat dazu geführt, dass diese Norm, die in ihrer ersten Fassung 2009 erschienen ist, auch in vielen anderen Ländern Anwendung findet, beispielsweise wurde sie für Australien übernommen [104].

6.1 Feuchteschutzbemessung mithilfe der hygrothermischen Simulation gemäß DIN EN 15026

In Europa ist man unabhängig von den Aktivitäten in Nordamerika einen ähnlichen Weg gegangen. Die Anwendung der hygrothermischen Simulation zur Feuchteschutzbeurteilung ist Gegenstand der 2007 erschienenen DIN EN 15026 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation“ [31]. Sie basiert auf den Inhalten des WTA-Merkblatts 6-2 „Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse“ von 2001. Dieses Merkblatt wurde 2014 aktualisiert [105], um den Einfluss einer Hinterlüftung und von Fehlstellen, die in realen Bauteilen auch bei guter Ausführung immer vorhanden sind, bei der Simulation abbilden zu können. Da diese Neuerung für die Planung von feuchtetoleranten und dauerhaften Außenbauteilen sehr wesentlich ist, wurde dieser Teil auch in den normativen Anhang E der Neufassung der DIN EN 15026 vom Dezember 2023 übernommen [31].

Die darin enthaltene Berücksichtigung der Hinterlüftung oder Belüftung sowie von geringen Luftströmungen durch ein Bauteil bzw. von kleinen Schlagregenleckagen in der Konstruktion basiert auf Ansätzen, die entsprechende Feuchtequellen im Bauteil vorsehen. Von einer Hinterlüftung wird gesprochen, wenn der Luftspalt hinter der Bekleidung unten und oben eine Öffnung nach außen hat. Bei einer Belüftung gibt es nur unten eine Öffnung nach außen, die gleichzeitig als Drainageöffnung fungiert, wobei die Belüftung auch durch Spalten in der Bekleidung erfolgt. In der Regel hilft eine Be- bzw. Hinterlüftung, die Konstruktion auszutrocknen. In einigen Fällen kann sie jedoch zu einer zusätzlichen Befeuchtung führen, wenn der belüftete Bereich kälter ist als die Außenluft, beispielsweise durch nächtliche Abstrahlung, und sich deshalb Tauwasser bildet. Die Bilanz aus Trocknung und Befeuchtung kann mithilfe des Ansatzes im Anhang E.2 durch eine hygrothermische Simulation zuverlässig ermittelt werden. Das Modell für die konvektive Feuchtequelle ist in E.3 beschrieben. Es ist eine Funktion der auftriebsbedingten Luftdruckdifferenz über dem Bauteil und der Luftdichtheit der Konstruktion. Es kommt allerdings nur zum Tragen, wenn die Temperatur im Bauteil zum Berechnungszeitpunkt unter der Taupunkttemperatur der Raumluft liegt. Die Ebene, in der das konvektionsbedingte Tauwasser ausfällt, ist vom Nutzer vor der Simulation zu definieren.

Die Schlagregenquelle gemäß E.4 befindet sich in der Regel direkt unter der äußeren Bekleidung. Sie ist

proportional zur auftretenden Schlagregenmenge und zur Leckagerate, die meist ein Prozent der stündlichen Schlagregenmenge beträgt.

Sowohl der Luftwechsel in der Be- oder Hinterlüftungsebene sowie die Luftdichtheit als auch die Leckagerate für den Schlagregen sind konstruktionsabhängige Größen. Sie sind jedoch selten im Voraus genau bekannt, sodass für die hygrothermischen Simulation repräsentative Annahmen getroffen werden müssen. Für den Fall der Be- oder Hinterlüftung gibt der Anhang E.2 für den Luftwechsel einer 30 mm dicken Luftschicht eine Bandbreite von $25\text{--}50\text{ h}^{-1}$ an. Bei genauerer Kenntnis des Verhaltens der jeweiligen Konstruktion können auch andere Werte gewählt werden, wobei noch höhere Werte für den Luftwechsel das Rechenergebnis nur noch geringfügig beeinflussen. Anders sieht es aus, wenn der Luftwechsel deutlich kleiner wird, z. B. weniger als 5 h^{-1} . Bei sehr niedrigen Luftwechselraten nimmt die Effektivität der Belüftung ab (bei einer Hinterlüftung bleibt der Luftwechsel in der Regel deutlich über diesem Wert). Für den konvektiven Feuchteeintrag gibt der Anhang E.3 der Norm eine Luftdurchlässigkeit von Bauteilen von $0,007\text{ m}^3/(\text{m}^2\text{ h Pa})$ an. Unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen entspricht das z. B. einer Feuchtequelle von 250 g/m^2 im Dach eines Einfamilienhauses während der Heizperiode. Dieser Wert ist auch in der deutschen Holzschutznorm DIN 68800-2 [56] für Holzdachkonstruktionen zu finden. Der Pauschalbetrag für den Schlagregeneintrag von einem Prozent der auftretenden Schlagregenmenge aus der ANSI/ASHRAE Norm 160 [103] wurde auch in den Anhang E.4 der DIN EN 15026 übernommen. Die Schlagregenmenge, die die äußere Bekleidung durchdringt, ist ein entscheidender Faktor für das Funktionieren einer Konstruktion. Deshalb sollte von dem angegebenen Pauschalwert bei genauerer Kenntnis der Konstruktionseigenschaften entsprechend abgewichen werden. Angaben hierzu finden sich beispielsweise in [106] oder [107].

Neben redaktionellen und inhaltlichen Anpassungen sowie der Einführung der Hilfsmodelle im Anhang E, wurden in der Fassung der EN 15026 vom Dezember 2023 weitere Ergänzungen gegenüber der Vorversion vorgenommen. Im Punkt 6 wurden Hinweise zur mehrdimensionalen Modellierung sowie zur Generierung des numerischen Gitters und der Zeitschrittweite aufgenommen. Der neue, informative Anhang A enthält Details zur Bedeutung der hygrothermischen Materialparameter und deren Bestimmung. A.1 und A.2 enthalten Informationen zu den Kenndaten für die Wärmespeicherung und den Wärmetransport sowie Hinweise auf die thermischen und feuchtetechnischen Einflussfaktoren. Die Feuchtespeicherfähigkeit von hygroskopischen und kapillaraktiven Baustoffen ist in A.4 beschrieben. A.5 befasst sich mit den Materialeigenschaften zur Berechnung der Dampfdiffusion und des Flüssigtransports. Dabei wird besonders auf die verschiedenen Bestimmungsmethoden eingegangen, die je nach Feuchtebereich und Transport-

prozess, wie z. B. beim kapillaren Saugen, Trocknen und Transport im niedrigeren Feuchtebereich (Bestimmungsmethode für kapillaraktive Innendämmstoffe) auszuwählen sind.

Der Abschnitt A.6 beschreibt baustoffbezogene Einschränkungen der hygrothermischen Transportmodelle. Damit ist gemeint, dass sich die Baustoffe mit der Zeit verändern können oder die ermittelten Materialparameter das reale Verhalten nicht vollumfänglich wiedergeben. Im Einzelnen werden dort folgende Punkte genannt:

- Die Kontaktfläche zwischen zwei Materialschichten kann eine Unterbrechung des Kapillarttransportbedingen oder einen zusätzlichen Feuchtetransportwiderstand darstellen, der ggf. zu berücksichtigen ist.
- Bei Materialien, die eine ausgeprägte Hysterese in ihrer Feuchtespeicherung aufweisen, werden reale Feuchteschwankungen in den Simulationsergebnissen nur mit einer gewissen Dämpfung nachvollzogen, d. h. die gemessenen Luftfeuchteschwankungen sind meist größer als die berechneten.
- Baustoffe mit starkem hygrischen Dehnverhalten (Quellen und Schwinden) zeigen meist Unterschiede in ihrem Feuchtetransportverhalten bei Befeuchtung und Trocknung.
- Die Alterung oder chemische Reaktionen bei Baustoffen können irreversible Veränderungen der Materialeigenschaften nach sich ziehen.

Ebenfalls informativ ist der Anhang C (in der Version von 2007 Anhang B) mit dem Titel „Feuchteauslegungsjahre“. Gemeint sind damit repräsentative meteorologische Datensätze für die Feuchteschutzbemessung. Im Vergleich zur Vorversion wird hier explizit davon abgeraten, extreme Datensätze für Simulationen über einen längeren Zeitraum zu verwenden. Solche Datensätze repräsentieren wahlweise die wärmsten oder kältesten oder die schlagregenreichsten Jahre in einer Dekade. Werden diese Datensätze bei der Simulation mehrmals durchlaufen, ergeben sich daraus klimatische Beanspruchungen, die sich mit jeder Wiederholung weiter von der Realität entfernen und zu unrealistischen Ergebnissen führen können. Eine Folge davon ist das rechnerische Versagen von bewährten Konstruktionen und eine damit verbundene, ungerechtfertigte Kostensteigerung im Bauwesen. Zur Analyse des Langzeitverhaltens von Baukonstruktionen werden daher im Anhang C Datensätze empfohlen, die zu ähnlichen Ergebnissen mit denselben Beurteilungen führen, wie eine Reihe von zehn gemessenen meteorologischen Jahren am entsprechenden Standort.

6.2 Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3 (03-2024)

Seit der Version vom Oktober 2018 beschreibt die DIN 4108-3 explizit ein dreistufiges Verfahren zur Feuchteschutzbeurteilung von Baukonstruktionen. Dabei kann der Nutzer beim Nachweis der feuchtetechnischen Unbedenklichkeit von Baukonstruktion-

nen aus verschiedenen Methoden unterschiedlicher Komplexität (Stufen) auswählen. Die 1. Stufe stellt die Übernahme einer nachweisfreien Konstruktion aus der Liste der angegebenen Bauteilaufbauten dar, die in der Norm hinsichtlich ihres Schichtenaufbaus und der hygrothermischen Eigenschaften der Materialien spezifiziert sind. Die 2. Stufe ist nur für Bauteile anzuwenden, die nicht in der Liste der nachweisfreien Konstruktionen zu finden sind. Sie besteht aus dem stationären Dampfdiffusionsnachweis nach *Glaser* mithilfe des aus der DIN EN ISO 13788 [100] abgeleiteten Periodenbilanzverfahrens sowie aus der Überprüfung der Schlagregenschutzkriterien. Die 3. Stufe, der Nachweis durch hygrothermische Simulation gemäß Anhang D, verkörpert den umfangreichsten Anwendungsbereich; sie ist allerdings mit etwas mehr Aufwand verbunden und erfordert einschlägige Sachkenntnis.

Die Einschränkungen der ersten beiden Stufen betreffen Bauteile und Randbedingungen, die mithilfe des Periodenbilanzverfahrens entweder nicht oder nicht genau genug beurteilt werden können, bzw. für die keine ausreichenden Erfahrungen oder hygrothermische Simulationsnachweise bestehen, um sie für die fragliche Anwendung in die Liste der nachweisfreien Konstruktionen aufnehmen zu können. Beispielsweise konnten die ersten beiden Stufen nur zur Bemessung von Bauteilen von nicht klimatisierten Wohn- oder wohnähnlich genutzte Gebäude angewendet werden. Bauteile für gekühlte Gebäude waren davon ausgeschlossen. Das hat sich mit der neuesten Version der DIN 4108-3 vom März 2024 etwas geändert [26]. Jetzt heißt es: „Die 1. und die 2. Stufe sind ausschließlich auf Bauteile von Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden anwendbar, die weder befeuchtet noch unter 20 °C gekühlt werden.“ Damit wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass immer mehr Wohngebäude mit Wärmepumpen betrieben werden, die im Sommer auch eine Kühlung der Räume erlauben. Werden die Räume allerdings unter 20 °C gekühlt oder die Raumluft im Winter befeuchtet, dann ist die hygrothermische Simulation die einzige Möglichkeit den Feuchteschutznachweis zu erbringen. Die zweite Stufe, das Periodenbilanzverfahren, ist außerdem nicht anwendbar bei:

- Konstruktionen von Gebäuden, die in einer Höhe von über 700 m NN liegen,
- erdberührten Bauteilen,
- Bauteilen zu unbeheizten Nebenräumen sowie Kellern,
- begrünten und bekiesten Dachkonstruktionen sowie solchen mit Plattenbelägen und Holzrosten,
- Innendämmung mit $R > 1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ mit ausgeprägten sorptiven und kapillaren Eigenschaften auf einschaligen Außenwänden,
- zur Berechnung des natürlichen Austrocknungsverhaltens, wie z. B. im Fall der Abgabe von Rohbaufeuchte oder der Aufnahme von Niederschlagswasser,
- gedämmte, nicht belüftete Holzdachkonstruktionen mit Metaldachdeckung oder mit

Abdichtung auf Schalung oder Beplankung ohne Hinterlüftung der Abdichtungs-/Deckunterlage.

In all diesen Fällen kann der Feuchteschutznachweis ausschließlich mithilfe der hygrothermischen Simulation erbracht werden. Die Vorgehensweise hierzu basiert auf der DIN EN 15026 und ist im normativen und bauaufsichtlich eingeführten Anhang D der DIN 4108-3 beschrieben. Zur Auswertung der Simulationsergebnisse in Bezug auf das Schimmelpilz-, Holzfäule- oder Frostschadensrisiko verweist der Anhang D außerdem auf die WTA-Merkblätter 6-3 [87], 6-8 [58] und 6-5 [72]. Die große Akzeptanz der hygrothermischen Simulation und das auf vielen experimentellen Validierungen beruhende allgemeine Vertrauen in die Rechenergebnisse haben dazu geführt, dass die Liste der nachweisfreien Konstruktionen (Stufe 1) in der DIN 4108-3 mit jeder neuen Ausgabe weitergewachsen ist. Das hat für den Praktiker den Vorteil, dass er nicht selbst die hygrothermischen Simulationen durchführen muss, sondern dass sich unabhängige Experten sowie Handwerksverbände und Hersteller von Bauprodukten darum kümmern.

6.3 Weitere europäische Normen und Richtlinien zum Feuchteschutz durch hygrothermische Simulation

Bereits mehrfach angesprochen wurden die Merkblätter der WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege) mit Bezug zur hygrothermischen Simulation. Die WTA wurde vor knapp 50 Jahren gegründet, um die Lücke zwischen den Regeln für den Neubau und der Praxis bei der Altbausanierung zu füllen. Dabei wurden elektro-osmotische Mauerentfeuchtungsverfahren genauso auf den Prüfstand gestellt, wie Sanierputzsysteme zum Verputzen von salzhaltigem Mauerwerk. Zur Unterstützung für die Sanierungspraxis wurden entsprechende Merkblätter erstellt und regelmäßig aktualisiert. Inzwischen gibt es über 80 Merkblätter zu den Bereichen Holzschutz, Oberflächentechnologie, Naturstein, Kunststein und Beton, sowie zur Bauphysik, zur Bauwerksabdichtung, zur Fachwerksanierung etc. Das Thema hygrothermische Simulation wurde schon recht bald in einzelnen WTA-Arbeitsgruppen diskutiert, da das genormte Glaserverfahren keine Antworten auf Fragen, wie nach der Dauer der Mauerwerkstrocknung nach einer Sanierungsmaßnahme oder nach den potenziellen Gefahren einer Umnutzung denkmalgeschützter Gebäude geben konnte. Deshalb wurde in den 90er Jahren eine Arbeitsgruppe zur instationären Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauteilen gegründet und hat umgehend ihre Arbeit aufgenommen. Schon 2002 sind der Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen WTA 6-1 [108] und das Merkblatt zur Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse WTA 6-2 [105] erschienen. Inzwischen liegt für 6-1 eine aktualisierte Fassung vom September 2023 vor [108].

Dieses Merkblatt enthält Anwenderhinweise, die beispielsweise dabei helfen sollen, die richtigen Eingabedaten auszuwählen und zu ermitteln, welche Materialdaten genau bekannt sein müssen und welche zur Not auch abgeschätzt werden können. Außerdem werden verschiedene Möglichkeiten für die Auswertung der Ergebnisse und deren erwartbare Aussagekraft beschrieben. Das WTA-Merkblatt 6-2 fungierte, wie bereits erwähnt, als Blaupause für die DIN EN 15026 von 2007 und auch die Neuerungen der Fassung von 2014 wurden in weiten Teilen in die DIN EN 15026 von 2023 [31] übernommen. Der Gelbdruck für die Neufassung von WTA 6-2 wird im Jahr 2025 erwartet. Das WTA-Merkblatt 6-3 zur „rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos“ von 2005 ist bereits als neuer Gelbdruck erschienen [87]. Ebenfalls überarbeitet werden derzeit die Merkblätter 6-5 „Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren“ von 2014, das Kriterien zur Vermeidung von Frostschäden enthält, und 6-8 „Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation“ von 2016, das eine temperaturabhängige Beurteilung des Holzfäulerisikos bei hohen Wassergehalten ermöglicht.

Die österreichische Feuchteschutznorm B 8110-2 von 2020 [109] enthält eine ähnliche Nachweisführung wie die DIN 4108-3. Sie setzt aber noch stärker als die deutsche Norm auf die hygrothermische Simulation gemäß EN 15026. Die schweizerische Feuchteschutznorm SN 520180 von 2014 [110] enthält nur einige nachweisfreie Standardkonstruktionen und verweist für den feuchtetechnischen Nachweis auf die Dampfdiffusionsbewertung nach *Glaser* sowie auf die hygrothermische Simulation gemäß EN 15026. Für außen dampfdichte Konstruktionen oder bei Anwesenheit von Baustoffen, die ihren Dampfdiffusionswiderstand mit der Feuchte stark ändern, ist der Einsatz des Glaserverfahrens unzulässig. In der Wegleitung zu dieser Norm SNG 594001 von 2022 [111] wird außerdem auch für den Nachweis von Innendämmsystemen die Anwendung der hygrothermischen Simulation empfohlen.

In Frankreich wurde 2021 eine Richtlinie zum Feuchteschutz von Wänden durch hygrothermische Simulation veröffentlicht, die auf den Inhalten des WTA-Merkblatts 6-2 basiert und für die französischen Klimazonen angepasst wurde [112]. Die Feuchteschutznorm in Großbritannien verweist für Konstruktionen, die nicht mithilfe des Glaserverfahrens beurteilt werden können, auf die hygrothermischen Simulationsnorm BS EN 15026, gibt aber ansonsten keine weiteren Anwendungshinweise dazu [24].

7 Schlussfolgerung

Die Feuchteschutzbeurteilung von Baukonstruktionen mithilfe hygrothermischer Simulation gehört bereits seit langem zum Stand der Technik. Inzwischen haben auch die Regeln der Technik in vielen Ländern nachgezogen, da die bisherigen Beurteilungsmethoden zwar deutlich einfacher sind, dafür aber wesentliche Beanspruchungsarten, wie z. B. den Schlagregen oder die Rohbaufeuchte, völlig außer Acht lassen. Außerdem erlauben die alten Beurteilungsmethoden im Wesentlichen nur Ja/Nein-Aussagen, d. h. ein Bauteil ist entweder feuchtetechnisch in Ordnung oder nicht. Eine Analyse des realen Feuchtehaushalts und der sich daraus ergebenden langfristigen Konsequenzen in Abhängigkeit von den jeweiligen Rand- und Anfangsbedingungen sind nicht möglich.

Die Vorteile der hygrothermischen Simulation liegen demgegenüber darin, die unter natürlichen Klima- und Nutzungsbedingungen auftretenden Temperatur- und Feuchteverhältnisse in Baukonstruktionen örtlich und zeitlich detailliert abbilden zu können. Die Anwendung der stationären Simulationsverfahren ist jedoch nicht allein darauf ausgerichtet alte Rechenmethoden zu ersetzen, sondern auch die Möglichkeiten des modernen Feuchteschutzes zu erweitern. Neben dem winterlichen Tauwasserschutz können damit weitere Phänomene, wie z. B. Sommerkondensation, Schlagregenpenetration, Umverteilung von Baufeuchte, die Austrocknung von Feuchte nach einem Wasserschaden etc. betrachtet und deren Auswirkungen beurteilt werden.

Das Feuchteverhalten von Baukonstruktionen wird durch zahlreiche Einflussfaktoren bestimmt, die sich selbst für erfahrene Praktiker nicht immer vollständig erschließen. Tritt ein Feuchteschaden auf, der nicht durch einen offensichtlichen Mangel hervorgerufen wurde, ist die Ursachenfindung oft schwierig. Hier kann die hygrothermische Simulation wertvolle Dienste leisten, da sie in der Lage ist, die in der Realität ablaufenden Prozesse abzubilden. Durch eine Variation der Parameter ist es meist möglich, die Einflussfaktoren zu benennen, die unter den gegebenen Voraussetzungen so große Feuchtegehalte verursachen können, dass der vorgefundene Schaden entstehen konnte. Gleichzeitig können aber auch die Faktoren ausgeschlossen werden, die nicht als Schadensursache in Frage kommen.

Herausforderungen bestehen nach wie vor bei der Verfügbarkeit von Materialdaten selten verwendeter oder lokal begrenzt eingesetzter Bauprodukte sowie bei Klimadaten für die hygrothermische Simulation außerhalb Europas und Nordamerikas. Für den Einsatz der hygrothermischen Simulation sind ausreichende Einblicke in die Details der zu bemessenden Baukonstruktionen und deren Eigenschaften sowie Erfahrungen im Umgang mit Rechenmodellen wünschenswert. Ebenso wichtig ist einschlägiges Wissen zur Beurteilung der Ergebnisse, d. h. die Kenntnis von gesicherten Beurteilungskriterien. In diesem Punkt besteht allerdings teil-

weise noch Forschungsbedarf. Während beispielsweise Schimmelpilzwachstum, Holzfäule und teilweise auch Korrosionsprozesse gut prognostiziert werden können, sind präzise Angaben zur temperatur- und feuchtebedingten Festigkeitsminderung von Bauprodukten nur in Ausnahmefällen möglich. Ganz allgemein muss festgestellt werden, dass es bislang kaum gesicherte Erkenntnisse zu den temperatur- und feuchtebedingten Alterungsprozessen von Baustoffen gibt. Solches Wissen wäre ein Vorteil für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Baukonstruktionen und zur zuverlässigen Planung der Lebensdauer und der erforderlichen Intervalle von Wartungsarbeiten.

8 Ausblick

Bisher werden die Planungsaufgaben, Energieeffizienz und Feuchteschutz der Gebäudehülle sowie deren Auswirkungen auf Raumklima und Raumhygiene meist getrennt voneinander bearbeitet. Im Zug der immer wieder geforderten integralen Planung wäre es wünschenswert, beides miteinander in einem Planungsschritt zu verbinden und noch weitere Aufgaben, wie z. B. die Auslegung der Gebäudetechnik hinzuzufügen. Dabei ist es notwendig, von der stationären Betrachtungsweise, d. h. von Monatsbilanzverfahren und Spitzenlastannahmen, zu einem dynamischen Ansatz, also zur instationären Gebäudesimulation, zu wechseln. Die Werkzeuge dazu sind bereits vorhanden, wie anhand eines hygrothermischen Gebäudesimulationsmodells in [113] beschrieben und auch die entsprechenden europäischen Normen sind dabei nachzuziehen [114].

Ein Vorteil solcher integralen Betrachtungen liegt nicht nur in einer präziseren Vorhersage der Energiebedarfe und des Raumklimas, sondern auch der Möglichkeit das Gebäude in einzelne Zonen zu unterteilen, die ggf. unterschiedlich genutzt und damit beheizt bzw. gekühlt und belüftet werden (Bild 35). Hierzu müssen auch die Innenbauteile, d. h. Zwischenwände, -decken etc. berücksichtigt werden. Außerdem beeinflussen die Gebäudehülle und die Innenbauteile auch den Betrieb der Gebäudetechnik, da die thermische und hygrische Trägheit der Konstruktion einen direkten Einfluss auf das Raumklima und dessen Regelung hat. Umgekehrt muss mithilfe der Gebäudetechnik dafür gesorgt werden, dass die Konstruktion keinen Schaden nimmt und die hygienischen Verhältnisse im Raum nicht durch Schimmelpilzbildung im Bereich von Wärmebrücken oder anderen kalten Bauteiloberflächen beeinträchtigt wird. In zunehmendem Maße werden Bauteile auch als anlagentechnische Komponenten benutzt, wie z. B. bei einer Fußboden-, Decken- oder Wandheizung sowie bei thermisch aktivierten Bauteilen, wie der Betonkernaktivierung. Solange diese Anlagenkomponenten nur zur Heizung dienen, sind keine negativen Auswirkungen zu befürchten. Im Gegenteil, durch die geringen Vorlauftemperaturen können sie, aufgrund ihrer Eignung für den Wärmepumpenbetrieb, einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Anders sieht es jedoch aus, wenn sie bei den weltweit steigenden Außenlufttemperaturen auch zum Kühlen eingesetzt werden. In solchen Fällen muss vorab geklärt werden, welche feuchtetechnischen Auswirkungen diese Maßnahme haben kann.

Eine feuchtetechnische Beurteilung von Innenbauteilen ist bei beheizten Gebäuden zwar bislang die Ausnahme, die Konstruktionsdaten und auch die hygro-

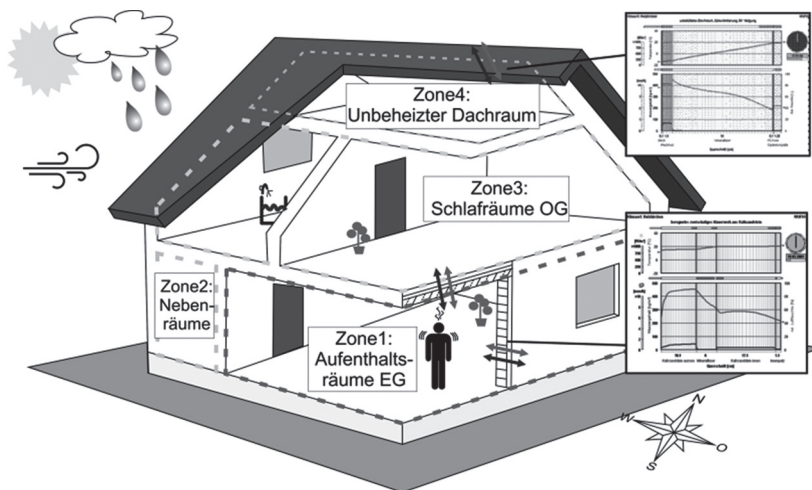


Bild 35. Beispiel für die Unterteilung eines Gebäudes in unterschiedlich beheizte oder klimatisierte Zonen mit Betrachtung der Temperatur und Feuchteverhältnisse in den an die Zonen angrenzenden Bauteilen als Basis für eine hygrothermische Gebäudesimulation gemäß [113]

thermischen Kennwerte sind aber in der Regel vorhanden. Das bedeutet jedoch nicht, dass grundsätzlich der Aufwand betrieben werden sollte, auch die Innenbauteile genauer zu analysieren. Diese Aufgabe bleibt eher der bauphysikalischen Forschung vorbehalten, z. B. um die genannte Kühlfunktion und ihren Einfluss auf das Raumklima genauer beurteilen zu können. In Zukunft könnten in diesem Zusammenhang auch Ansätze interessant werden, die es erlauben, Innenbauteile als Wärmespeichermedien zur Nutzung von Überkapazitäten bei der Stromproduktion einzusetzen. Perioden mit starkem Wind treten während der Heizperiode häufiger auf. Sie können als Wärmeenergie im Gebäude gespeichert werden und in Perioden mit geringer erneuerbarer Energieausbeute zur Gebäudeheizung genutzt werden. Wie in Pazold et al. [115] gezeigt, gibt es dafür bereits unterschiedliche Konzepte, die derzeit in der Praxis erprobt werden. Eines dieser Konzepte betrifft die Speicherung von Wärmeenergie in massiven Innenbauteilen, die dafür beidseitig gedämmt werden, sodass die gespeicherte Wärme nicht zu schnell wieder an den Raum abgegeben wird. Auch für die Entwicklung solcher Konzepte wird die hygrothermische Gebäudesimulation benutzt, da große Temperaturänderungen immer auch einen Einfluss auf die Feuchteverteilung in den betreffenden Bauteilen haben.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Nutzung von hygrothermische Simulationsverfahren im Bauwesen eher noch zunehmen wird, da die Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Gebäuden weiter zunehmen. Das betrifft nicht nur die Energieeinsparung, sondern auch den CO₂-Fußabdruck bei der Produktion der Baumaterialien und bei der Erstellung von Gebäuden. Dies ist wahrscheinlich auch mit einer vermehrten Verwendung von bio-basierten und recycelten Baustoffen verbunden, die bekanntermaßen feuchteempfindlicher sind als viele konventionellen Materialien. Hinzu kommen Bestrebungen zur Verbesserung des Stadtklimas, die einen stärkeren Fokus auf die Begrünung von städtischen Oberflächen zur Folge haben werden. Als begrünte Oberflächen dienen auch Dächer und Fassaden die entsprechend befeuchtet werden müssen, um ein Pflanzenwachstum zu ermöglichen.

Literatur

[1] Krus, M.; Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzels, H.M. (2007) *Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilzwachstum und die rechnerische Beurteilung der erforderlichen Lüftung am Beispiel einer Altbauanierung*. Schriftenreihe des Instituts für medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Band 11 (2007) „Einfluss von Klimafaktoren auf Mikroorganismen und Baumaterialien“, S. 233–255.

[2] Möller, U. (1993) *Thermo-hygrische Formänderungen und Eigenspannungen von natürlichen und künstlichen Mauersteinen* [Dissertation]. Universität Stuttgart.

[3] Künzels, H.M.; Kasper, F.-J. (1998) *Von der Idee einer feuchteadaptiven Dampfbremse bis zur Markteinführung*. Bauphysik 20, H. 6, S. 257–260.

[4] Krus, M. (1995) *Feuchtetransport- und Speichereffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken* [Dissertation]. Universität Stuttgart.

[5] Kiebl, K.; Krus, M.; Künzels, H.M. (1993) *Weiterentwickelte Meß- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen*. Bauphysik 15, H. 2, S. 61–67.

[6] Larsen, P.K. (1998) *Desalination of painted brick vaults* [Dissertation]. TU Denmark.

[7] Künzels, H.M.; Zirkelbach, D.; Kehl, D. (2022) *Feuchteschutz im Holzbau – Hintergründe und aktuelle Regeln der Technik* in: Fouad, N.A. [Hrsg.] Bauphysik-Kalender 2022, Schwerpunkt: Holzbau. Berlin: Ernst & Sohn, S. 1–42.

[8] Binder, A.; Zirkelbach, D.; Künzels, H.M.; Fitz, C. (2011) *Praxisgerechte Beurteilung und Quantifizierung der Kapillaraktivität von Innendämmmaterialien*. IBP-Mitteilung 38, Nr. 514.

[9] Holm, A. (2001) *Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels stochastischen Konzeptes* [Dissertation]. Universität Stuttgart.

[10] Cammerer, J.; Achtziger, J. (1984) *Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen*. Bericht zu BmBau Forschungsvorhaben BI 5-800883-4.

[11] Künzels, H.M. (2022) *Long-Term Thermal Performance of Insulations Under Moisture Loads* in: Kosny, J.; Yarbrough, D. [ed.] *Thermal Insulation and Radiation Control Technologies for Buildings*. Springer 2022, Ch. 2, pp. 37–53. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/publikationen/ht/long-term-thermal-performance-of-insulations-under-moisture-loads.pdf>

[12] Kehler, M.; Künzels, H.M.; Sedlbauer, K. (2001) *Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen – Ist der Feuchtezuschlag für die Wärmeleitfähigkeit gerechtfertigt?* IBP-Mitteilung 390; (28).

[13] Gawin, D.; Kosny, J.; Wilkes, K. (2004). *Thermal conductivity of moist cellular concrete – Experimental and numerical study*. Proceedings of Building IX Conference on Clearwater Beach December 5–10, 2004. ASHRAE publication Atlanta, 10 pp.

[14] Erhorn, H. et al. (1994) *Niedrigenergiehäuser*. Veröffentlichung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart.

[15] Afshari, A.; Schmidt, S. (2024) *Stadtklimamodellierung – Grundlagen und praktische Anwendung* in: Fouad, N.A. [Hrsg.] Bauphysik-Kalender 2025. Berlin: Ernst und Sohn.

- [16] ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chapter 25 "Heat, Air, and Moisture Control in Building Assemblies – Fundamentals", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [Hrsg.], Atlanta 2017.
- [17] Künzel, H.M.; Künzel, H.; Sedlbauer, K. (2006) *Hygrothermische Beanspruchung und Lebensdauer von Wärmedämm-Verbundsystemen*. Bauphysik 28, H. 3, S. 153–163.
- [18] Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2001) *Steildächer*. in: Bauphysik Kalender 2001, Verlag Ernst & Sohn, S. 461–482.
- [19] Künzel, H.M. (1997) *Sommerliche Austrocknungsmöglichkeit von Umkehrdachdämmungen bei unterschiedlichen Deckschichten*. Bauphysik 19, H. 2, S. 58–60.
- [20] Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2007) *Reflektierende Flachdächer – sommerlicher Wärmeschutz kontra Feuchteschutz*. IBP-Mitteilung 34, Nr. 482.
- [21] Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2007) *Langwelliger Strahlungsaustausch bei Gebäuden – Welches Verbesserungspotential bieten IR-reflektierende Schichten?* WTA-Journal 5, H. 2, S. 181–203.
- [22] Kehrer, M.; Schmidt, T. (2006) *Temperaturverhältnisse an Außenoberflächen unter Strahlungseinflüssen*. Proceedings BauSIM, München.
- [23] Künzel, H.M.; Kiebl, K. (1997) *Quantifizierung der niederschlagsbedingten Wärmeverluste bei Umkehrdächern*. Bauphysik 19, H. 1, S. 7–11.
- [24] Künzel H.M. (1994) *Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassadenflächen*. IBP-Mitteilung 21, Nr. 263.
- [25] Künzel, H.M.; Kehrer, M. (2008) *Einfluss der Hinterlüftung auf das Feuchteverhalten von Holzbauwänden*. Festschrift „Umweltbewusstes Bauen“ zum 60. Geburtstag von G. Hauser. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 543–552.
- [26] DIN 4108-3:2024-03 (2024) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*, Berlin: Beuth.
- [27] Künzel, H.M.; Künzel, H.; Holm, H. (2004) *Rain Protection of Stucco Facades*. Proceedings „Buildings IX“ Dec. 2004, ASHRAE, Atlanta 2004, #85(1-7).
- [28] Künzel H.M. (1994) *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchte- transports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [29] Künzel, H.M.; Fitz, C. (2006) *Bauphysikalische Eigenschaften und Beanspruchungen von Putzoberflächen und Anstrichstoffen*. WTA-Schriftenreihe Heft 28 (Sonderheft zum Hindelanger Baufachkongress 2006), S. 49–72.
- [30] Künzel, H.M.; Zirkelbach, D. (2013) *Advances in hygrothermal building component simulation – Modelling moisture sources likely to occur due to rainwater leakage*. Journal of Building Performance Simulation 6, No.5, pp. 346–353.
- [31] DIN EN 15026-2023 (2023) *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*. Berlin: Beuth.
- [32] Hägerstedt, O.; Harderup, L.-E. (2011) *Comparison of measured and calculated temperature and relative humidity with varied and constant air flow in the façade air gap*. Tagungsband, Nordic Symposium of Building Physics, Tampere 2011.
- [33] Kehl, D.; Hauswirth, S.; Weber, H. (2010) *Ist die Hinterlüftung von Holzfassaden ein Muss?* Bauphysik Jg. 32, S. 144–148.
- [34] Bachinger, J.; Teibinger, M. (2016) *Wissen, woher der Wind weht*. Holzbau – die neue quadriga, H. 4, S. 60–64, Kastner-Verlag Wolnzach.
- [35] Borsch-Laaks, R.; Geißler, A. (2015) *Durchströmung von Dämmschichten – kommt nach der Luftdichtung jetzt auch noch die Winddichtung?* Holzbau – die neue quadriga, H. 6, S. 65–69.
- [36] Sedlbauer, K.; Künzel, H.M. (1999) *Luftkonvektions-einflüsse auf den Wärmedurchgang von belüfteten Fassaden mit Mineralwolledämmung*. wksb 44 (1999), H. 43, S. 53–59.
- [37] Großkinsky, T.; Sedlbauer, K. (2002) *Höhere Luftdichtheit durch Verklebung der Überlappungen einer Unterdeckbahn?* IBP-Mitteilung 29, Nr. 396.
- [38] Kölsch, P.; Künzel, H.M.; Zirkelbach, D. (2019) *Konvektiver Feuchteeintrag in Leichtbaukonstruktionen – Leckagearten, Tauwasserverteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis*. Bauphysik 41, H. 5, S. 269–278.
- [39] Hens, H. et al. (2007) *Brick Cavity Walls: A Performance Analysis Based on Measurements*. Journal of Building Physics, vol. 31, 2.
- [40] Christian, J.; Desjarlais, A.; Stovall, T. (1998) *Straw Bale Wall Hot Box Test*. Proc. Thermal Envelopes VII, ASHRAE 1998, pp. 275–285.
- [41] Zegowitz, A.; Krus, M.; Künzel, H.M. (2018) *Wärmedämmung mit Schaumglasschotter*. IBP-Mitteilung 45 (2018), Nr. 554.
- [42] Künzel, H.M. (1996) *Tauwasserschäden im Dach aufgrund von Dampfdiffusion durch angrenzendes Mauerwerk*. wksb, H. 37, S. 34–36.
- [43] Künzel, H.M. (1997) *Bauphysik der Außenwände – Austrocknung unter WDVS*. Kongress-Handbuch 2. IBK-Jubiläumskongress Wärmedämmverbundsysteme, S. 29/1–29/9, Darmstadt.
- [44] Sedlbauer, K.; Krus, M. (2001) *Schimmelpilzbildung auf WDVS infolge „Baufehlern“?* IBP-Mitteilung 28 (2001), Nr. 391.
- [45] Zirkelbach, D.; Schöner, T.; Tanaka, E.; Stöckl, B.; Kölsch, P.; Marra, E.; Schiessl, C.; Schmidt, T.; Hevesi-Toth, T.; Flucke, Y. (2016) *Energieoptimiertes Bauen: Klima- und Oberflächenübergangsbedingungen für die hy-*

grothermische Bauteilsimulation. Kurztitel: Klimamodelle. IBP-Bericht HTB-021/2016. Valley.

[46] Tanaka, E.; Zirkelbach, D.; Schöner, T. (2017) *Lokalklima – Modelle zur Anpassung regionaler Klimadaten auf die lokalen Verhältnisse*. IBP-Mitteilung 551 [online]. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/551-600/551.pdf>

[47] Lokalklimagenerator V.2.1 (2017) [online] <https://wufi.de/de/2017/03/31/lokalklimagenerator>.

[48] DIN EN ISO 12572 (2016) *Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016*. Berlin: Beuth.

[49] Schiebl, C.; Zirkelbach, D.; Künzel, H.M. (2018) *Nebenraum-Klimamodell für unbeheizte Dachräume*. IBP-Mitteilung 555 [online]. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/551-600/555.pdf>

[50] Marra, E.; Zirkelbach, D.; Künzel, H.M. (2018) *Nebenraum-Klimamodell für unbeheizte Kellerräume*. IBP-Mitteilung 556, 45 (2018). Fraunhofer-Institut für Bauphysik [online]. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/551-600/556.pdf>

[51] Künzel, H.M.; Zirkelbach, D.; Bludau, C. (2008) *Feuchteverhalten von Kellerwänden mit Innendämmung*. wksb 53, H. 60, S. 17–24.

[52] Kiehl, K. (1998) *Bauphysikalische Einflüsse bei der Krustenbildung am Gestein alter Bauwerke*. Bauphysik 11, H. 1, S. 44–49.

[53] Hoffmann, M. (1994) *Untersuchungen zur Ursache des Salzsprengphänomens an Bausteinen* [Dissertation]. Universität Heidelberg. Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen Band 72.

[54] Sass, O. (1998) *Die Steuerung von Steinschlagmenge und -verteilung durch Mikroklima, Gesteinsfeuchte und Gesteinseigenschaften im westlichen Karwendelgebirge (Bayrische Alpen)*. Münchener Geographische Abhandlungen B 29.

[55] Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2012) *Modellierung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse in Bauteilen und Aufenthaltsräumen*. Fraunhofer-Allianz Bau: Innovationen für die Baubranche. Fraunhofer Verlag Stuttgart 2012, S. 225–231.

[56] DIN 68800-2:2012-02, DIN 68800-2:2022-02 (2012/2022) *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Berlin: Beuth.

[57] Bludau, C. (2021) *Spezielle Randbedingungen für die hygrothermische Simulation von Flachdächern in Holzbauweise*. Forschungsergebnisse aus der Bauphysik, Band 47. [Dissertation] Uni Stuttgart [online] <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-640386.html>

[58] WTA-Merkblatt 6-8 (2016) *Feuchte-technische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation*. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.] IRB-Verlag, München.

[59] Bludau, C.; Kölsch, P. (2014) *Verschattung von Holzflachdächern* [online] Beitrag zum 5. Internationalem Holz[Bau]Physik Kongress, Eigenverlag, Leipzig 2014 [online]. <https://wufi.de/literatur/Bludau,%20K%C3%B6lsch%202014%20-%20Verschattung%20von%20Holzflachd%C3%A4chern.pdf>

[60] Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Schafaczek, B.; Borsch-Laaks, R. (2009) *Dampfkongvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen*. Proceedings 30. AIVC Conference, Berlin [online]. <https://wufi.de/literatur/Zirkelbach,%20K%C3%BCnzel%20et%20al%202009%20-%20Dampfkongvektion%20wird%20berechenbar.pdf>

[61] WUFI® – Wärme und Feuchte instationäre – hygrothermische Simulationssoftware [online]. www.wufi.de

[62] Zirkelbach, D.; Stöckl, B.; Albrecht, W. (2014) *Ab-schätzung der Feuchtezu-schläge auf die Wärmeleit-fähigkeit von Umkehrdachdämmungen auf Basis von Objekt-untersuchungen und hygrothermischen Berechnungen*. Forschungsbericht ZP 52-5-5.99-1349/10 (DIBt). Bauforschung T3304. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart 2014 [online]. <https://www.irbnet.de/daten/rswb/14029012211.pdf>

[63] Zirkelbach, D.; Schafaczek, B. (2013) Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparametern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten. IBP-Bericht HTB-13/2013. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Stuttgart [online]. <https://wufi.de/literatur/Schafaczek,%20Zirkelbach%202013%20-%20Ermittlung%20von%20Materialeigenschaften%20und%20effektiven.pdf>

[64] Zirkelbach D.M. (2016) *Wärme- und Feuchteverhalten von begrünten Dachkonstruktionen* [Dissertation]. Universität Stuttgart, in: Forschungsergebnisse aus der Bauphysik, Band 26, Fraunhofer Verlag [online] <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-438832.html>

[65] Schmidt, D.; Kehl, D.; Rabold, A.; Kober, T. (2024) *Flachdächer in Holzbauweise*. Holzbau Handbuch, Reihe 3, Teil 2, Folge 1. Informationsdienst Holz, Holzbau Deutschland-Institut e. V., Berlin 2019 [online]. https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2_Holzbau_Handbuch/R03_T02_F01_Flachdaecher_2019.pdf [Zugriff am: 15.04.2024]

[66] Künzel, H. (1996) *Dachdeckung und Dachbelüftung*. Untersuchungsergebnisse und Folgerungen für die Praxis. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

- [67] Kölsch, P. (2015). *Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern*. Fraunhofer IBP.
- [68] Richtlinie Fensterbank für deren Einbau in WDVS- und Putzfassaden in vorgehängten Fassaden sowie für Innenfensterbänke. Österreichische Arbeitsgemeinschaft Fensterbank [Hrsg.] Eigenverlag 2020.
- [69] Engelhardt, M.; Kagerer, F.; Kokolsky, C.; Mader-spacher, C.; Simon, H.; Sprengard, C.; Antretter, F.; Fitz, C.; Krus, M.; Künzel, H.M.; Schöner, T.; Zirkelbach, D. (2019) *Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmsysteme – Anwendungsbereiche, Chancen und Grenzen*. Forschungsbericht Energieeffiziente Gebäude und Quartiere im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Förderkennzeichen: 03ET1248A/03ET1248B. Abschlussbericht (2019).
- [70] Zirkelbach, D.; Schöner, T.; Tanaka, E.; Sonntag, H.; Ruisinger, U.; Conrad, C.; Stöcker, E.; de Mets, T.; Vanhellemont, Y.; Deltour, J.; Rehm, M. (2022) *Einheitlicher europäischer Leitfaden für die Innendämmung von Bestandsbauten und Baudenkmälern. Leitfaden Teil 1: Bauwerksanalyse, Leitfaden Teil 2: Fassadensanierung und Innendämmung*. IGF-Project 247 EBG (2022)
- [71] Haindl, K.; Schöner, T.; Zirkelbach, D.; Fitz, C. (2016) *Was ist bei Karsten & Co. zu beachten?* Bauen im Bestand (B+B), H. 3, Rudolf Müller Verlag.
- [72] WTA-Merkblatt 6-5 (2014) *Innendämmung nach WTA II – Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren*. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.], IRB Verlag.
- [73] WTA Merkblatt 3-17 (06/2010) *Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen*. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.] IRB-Verlag.
- [74] Borsch-Laaks, R.; Zirkelbach, D. (2007) *Tauwasser-schutz zweidimensional – Teil 3: Hygrothermische Simulation beim Sockelpunkt*. Holzbau – die neue quadriga, 1-2007, S. 39–43.
- [75] Borsch-Laaks, R.; Zirkelbach, D. (2007) *Tauwasser-schutz zweidimensional – Teil IV: Sockelpunkt bei einem Holzhaus mit Bodenplatte*. Holzbau – die neue quadriga, 5-2007, S. 37–43.
- [76] Hart, G.; Bludau, Ch. (2016) *Hygrothermal Analyses of Ammonia Refrigeration Pipe Insulation Systems*. Technical Paper #4, Proceedings 2016 IIAR Industrial Refrigeration Conference & Exhibition, Orlando, FL. 20-23. March 2016 [online]. <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-385596.html>
- [77] Zegowitz, A.; Künzel, H.M.; Giglmeier, S. (2022) *Wasserschäden an Gebäuden – Neue effiziente Trocknungsmethoden*. Whitepaper Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart.
- [78] Geißer, G.; Künzel, H.M.; Zegowitz, A. (2019) *Experimentelle und rechnerische Untersuchung eines neuen Wandtrocknungssystems*. Bauphysik 41 (2019), H. 2, S. 125–132.
- [79] Zirkelbach, D.; Holm, A.; Künzel, H.M. (2005) *Influence of temperature and relative humidity on the durability of mineral wool in ETICS*. Proceedings 10DBMC, Lyon April 2005, TT2-87.
- [80] Künzel, H.M.; Holm, A.; Krus, M. (2008) *Hygrothermal Properties and Behaviour of Concrete*. WTA-Almanach 2008, pp. 161–181.
- [81] Beddoe, R.; Springenschmid, R. (1999) *Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), H. 4, S. 158–166.
- [82] Künzel, H.M. (2015) *Criteria defining rain protecting external rendering systems*. Proc. 6th International Building Physics Conference, Elsevier.
- [83] Künzel, H.M.; Fitz, C.; Krus, M. (2011) *Feuchteschutz verschiedener Fassadensysteme – Beanspruchungen, Systemanforderungen und Langzeitbeständigkeit* in: Venzmer, H. [Hrsg.] *Fassadensanierung*. Berlin: Beuth, S. 29–51.
- [84] Haindl, K.; Schöner, T.; Zirkelbach, D.; Fitz, C. (2016) *In Situ-Messverfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit – Vergleichende Untersuchungen*. IBP-Mitteilung 548, 43 (2016) Neue Forschungsergebnisse kurz gefasst. Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- [85] Sedlbauer, K.P.; Künzel, H.M. (2014) *Feuchteschutzbeurteilung durch hygrothermische Simulation* in: Fouad, N.A. [Hrsg.] *Bauphysik-Kalender 2015*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 161–187.
- [86] Sedlbauer, K.; Künzel, H.M. (1999) *Frostschäden im Winter – Analyse durch feuchtetechnische Berechnungen am Beispiel einer Kalksandsteinwand*. IBP-Mitteilung 26, Nr. 351.
- [87] WTA-Merkblatt E-6-3 (12/2023) *Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos*. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.] IRB-Verlag.
- [88] Sedlbauer, K. (2001) *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [89] Viitanen, H.; Ojanen, T. (2007) *Improved model to predict mould growth in building materials*. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X 2009.
- [90] Viitanen, H.; Krus, M.; Ojanen, T.; Eitner, V.; Zirkelbach, D. (2015) *Mold risk classification based on comparative evaluation of two established growth models*. Energy Procedia 78 (2015), pp. 1425–1430. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.165>
- [91] Kehl, D. (2011) *Pilzmodelle – Ist der Befall vorhersehbar?* Holzbau – die neue quadriga, Ausgabe 01-2011.
- [92] Kehl, D. (2013) *Feuchtetechnische Bemessung von Holzkonstruktionen nach WTA – Hygrothermische Auswer-*

tung der anderen Art. Holzbau – die neue quadriga, Ausgabe 06-2013.

- [93] Viitanen, H.; Ritschkoff, A.-C. (1991) *Brown rot decay in wooden constructions. Effect of temperature, humidity and moisture*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report no 222, Uppsala.
- [94] Viitanen, H.; Toratti, T.; Makkonen, L.; Peuhkuri, R.; Ojanen, T.; Ruokolainen, L.; Räisänen, J. (2010) *Towards modelling of decay risk of wooden materials*. European Journal of Wood and Wood Products. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- [95] IBK; IBP; BTU (2016) *Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken*. Abschlussbericht PTJ Projekt 0329663N/P/O.
- [96] Bludau, C.; Grunewald, J.; Heyn, R.; Hirsch, H.; Künzel, H.M.; Marra, E.; Petzold, H.; Tanaka, E.; Zirkelbach, D. (2023) *Erarbeitung wissenschaftlich begründeter Bewertungskriterien und Implementierung eines Nachweisverfahrens für die schadenfreie energetische Bestandsanierung und Neubauplanung (NaVe)*. Forschungsbericht EnOB: Energieoptimierte Gebäude und Quartiere – dezentrale und solare Energieversorgung Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Förderkennzeichen: 03ET1649 A/B Abschlussbericht.
- [97] DIN 4108-2:2013-02 (2013) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin: Beuth.
- [98] Marquardt, H. (1990) *Korrosionshemmung in Betonsandwichwänden durch nachträgliche Wärmedämmung* [Dissertation]. TU Berlin.
- [99] Marra, E.; Zirkelbach, D.; Künzel, H.M. (2015) *Prediction of Steel Corrosion in Porous Building Materials by means of a New Hygrothermal Model*. Proc. 6th International Building Physics Conference, IBPC.
- [100] DIN EN ISO 13788 (2013) *Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren*. Berlin: Beuth.
- [101] Glaser, H. (1958) *Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis*. Kältetechnik 10 (1958), H. 11, S. 358–364 und H. 12, S. 386–390.
- [102] ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chapter 27 “Heat, Air, and Moisture Control in Building Assemblies – Examples”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Hrsg.), Atlanta 2017.
- [103] ANSI/ASHRAE Standard 160 (2016) *Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings*.
- [104] Australian Institute of Refrigeration, Air-Conditioning & Heating (AIRAH) DA07-2020: *Criteria for Moisture Control Design Analysis*.
- [105] WTA-Merkblatt 6-2 (2014) *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.] IRB Verlag
- [106] Arce-Recatalá, M.; García-Morales, S.; van den Bossche, N. (2020) *Quantifying Wind-driven Rain Intrusion – A Comparative Study on The Water Management Features of Different Types of Rear-Ventilated Facade Systems*. E3S Web of Conferences 17 2, Nordic Symposium for Building Physics NSB 2020.
- [107] Van Linden, S. (2022) *Fourth Generation Watertightness – A Performance-Based Strategy to Control Rainwater Infiltration in Façade Systems*. PhD Thesis University Ghent.
- [108] WTA-Merkblatt 6-1-01/D (2001) *Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnung*. WTA Publications. Fraunhofer IRB Verlag. München.
- [109] ÖNORM B 8110-2 (2020-01) *Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz*. Austrian Standards International 2020.
- [110] SN 520180 (2014) *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Schweizer Norm. Schweizer Guideline. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich.
- [111] SNG 594001 (2022) *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden – Wegleitung zur Norm SIA 180:2014*. Schweizer Guideline. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich.
- [112] Guide PACTE (2021) *Détermination des hypothèses pour les simulations de transferts couplés température/humidité dans les parois de bâtiment*.
- [113] Antretter, F., Pazold, P., Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.P. (2015) *Anwendung hygrothermischer Gebäudesimulation* in: Nabil Fouad, N.A. [Hrsg.] *Bauphysik-Kalender 2015*, S. 189–225. Berlin: Ernst & Sohn.
- [114] DIN EN ISO 52000-1:2018-03 (2018) *Energieeffizienz von Gebäuden – Festlegungen zur Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Allgemeiner Rahmen und Verfahren (ISO 52000-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 52000-1:2017*. Berlin: Beuth.
- [115] Pazold, M.; Radon, J.; Kersken, M.; Künzel, H.M.; Antretter, F.; Sinnesbichler, H. (2023) *Development and Verification of Novel Building Integrated Thermal Storage System Models*. *Energies* 2023, 16, 2889. <https://doi.org/10.3390/en16062889>

