

A Allgemeines und Normung
**A 1 Feuchteschutz im Holzbau – Hintergründe und
aktuelle Regeln der Technik**

Hartwig Künzel, Daniel Zirkelbach und Daniel Kehl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3		
2	Relevante hygrothermische Beanspruchungen und deren Auswirkungen	3		
2.1	Ursachen für hygrothermische Beanspruchungen	3		
2.1.1	Raumseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen	4		
2.1.2	Außenseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen	4		
2.1.3	Solare Einstrahlung	5		
2.1.4	Schlagregen	6		
2.1.5	Umkehrdiffusion durch Sonneneinstrahlung nach Regen (Solar Vapour Drive)	7		
2.1.6	Dampfkonvektion durch Undichtheiten in Außenbauteilen infolge von Luftdruckdifferenzen	8		
2.1.7	Anfangsfeuchte	8		
2.1.8	Leitungswasserschäden	9		
2.2	Auswirkungen von Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen	9		
2.2.1	Feuchtebedingte Erhöhung des Wärmedurchgangs	9		
2.2.2	Schimmel und holzerstörende Pilze	10		
2.2.3	Korrosion von metallischen Verbindungen und Befestigungsmitteln	11		
2.2.4	Hygrothermisch verursachtes Quell- und Schwindverhalten	12		
3	Feuchteschutzbemessung anhand von Normen und Richtlinien	12		
3.1	Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018-10	13		
3.1.1	Nachweisfreie Konstruktionen	13		
3.1.1.1	Holzfachwerkwände	13		
3.1.1.2	Dächer in Holzbauweise	13		
3.1.2	Nachweis mithilfe des Periodenbilanzverfahrens nach Glaser	14		
3.1.3	Feuchteschutznachweis durch hygrothermische Simulation	16		
3.2	Grundlagen, Normen und Richtlinien zur hygrothermischen Simulation	18		
3.2.1	Materialkennwerte für Holz und Holzwerkstoffe	18		
3.2.1.1	Feuchtespeicherung	19		
3.2.1.2	Feuchtetransport dampfförmig und flüssig	20		
3.2.1.3	Diffusionswiderstand	20		
3.2.1.4	Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität	21		
3.2.1.5	Generische Datensätze für Holzwerkstoffe	21		
3.2.2	Rand- und Anfangsbedingungen	23		
3.2.2.1	Außenklimabedingungen	23		
3.2.2.2	Raumklima	25		
3.2.2.3	Anfangsbedingungen	26		
3.2.3	Wärme- und Feuchteübergang	26		
3.2.4	Hilfsmodelle zur vereinfachten Berücksichtigung spezieller hygrothermischer Effekte	27		
3.2.4.1	Berücksichtigung von Konvektionseffekten	28		
3.2.4.2	Berücksichtigung von Regenwasserpenetration	29		
3.2.5	Simulationsergebnisse und deren Interpretation	30		
3.2.5.1	Feuchtebilanz	30		
3.2.5.2	Relevante Bewertungskriterien für den Holzbau	30		
3.2.5.3	Feuchteverhältnisse an den Oberflächen	31		
3.2.5.4	Holzfeuchte	31		
3.2.5.5	Holzwerkstofffeuchte	31		
3.2.5.6	Tauwasserbildung innerhalb des Bauteils	32		
3.2.5.7	Wassergehaltsgrenzwerte für mineralische Baustoffe	32		
3.3	Feuchteschutz nach Holzschutznorm DIN 68800-2	32		
3.3.1	Berücksichtigung und Gründe für eine Trocknungsreserve	33		
3.3.2	Hygrothermische Simulation für außen dampfdichte Bauteile	33		
3.4	Regeln für die hygrothermische Simulation von Holzbauteilen nach WTA	34		
3.4.1	Verschattung	34		
3.4.2	Bewertung von Holz durch die Porenluft- und Holzfeuchte	35		
3.4.3	Bewertung von Holzwerkstoffen durch Materialfeuchte	37		
4	Schlussfolgerungen und Ausblick	38		
5	Literatur	39		

1 Einleitung

Der Feuchteschutz dient neben der Hygiene für die Nutzer vor allem der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Konstruktionen. Durch die Notwendigkeit, die CO₂-Emissionen im Bausektor wirksam zu reduzieren, ist dessen Bedeutung weiter gewachsen, denn mit der Verbesserung von Wärmedämmung und Gebäudedichtheit sind auch die Feuchtelasten gestiegen. Das liegt einerseits an der tendenziell höheren Raumluftfeuchte in dichten Gebäuden, andererseits nimmt durch die größeren Temperaturunterschiede zwischen innerer und äußerer Bauteiloberfläche die Gefahr von Tauwasserbildung zu. Da weniger Wärme aus dem Raum in der Gebäudehülle ankommt, kann weniger Wasser verdunsten, sodass unplanmäßig eingedrungene Feuchte, wie z. B. Tauwasser durch Luftkonvektion oder Baufeuchte, zu einem Schadensrisiko werden kann.

Weiterhin sollten in möglichst vielen Gebäuden nachwachsende Rohstoffe Anwendung finden, da bei Baukonstruktionen aus nachwachsenden Rohstoffen das gebundene CO₂ aus der Wachstumsphase im Gebäude gespeichert bleibt. Da viele neue Gebäude während der Nutzungsphase kaum mehr Energie verbrauchen oder zum Teil sogar produzieren, steigt der Anteil der grauen Energie am gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks enorm an. Hier kommt dem Holzbau in Zukunft eine besondere Bedeutung zu, denn in Bezug auf den Carbon Footprint bei der Produktion von Baumaterialien und der Erstellung eines Gebäudes ist er dem Massivbau überlegen. Das gilt allerdings nur, wenn die Lebensdauer des Gebäudes vergleichbar lang ist. Deshalb ist es wichtig, dass die Aspekte des Feuchteschutzes angemessen berücksichtigt werden, denn nur langlebige Bauteile speichern das CO₂ auch dauerhaft und sparen zudem Reparatur- und Sanierungskosten.

Nicht nur beim Holzbau kommt es also auf eine solide Feuchteschutzplanung und eine fachlich einwandfreie Ausführung an. Dass dies bisher nicht immer berücksichtigt wird, zeigen die nach wie vor hohen Summen, die jedes Jahr für die Sanierung von Bauschäden ausgegeben werden müssen. Das Institut für Bauforschung hat für den Zeitraum von 2002 bis 2016 eine Steigerung der Bauschadensfälle von deutlich über 300 % festgestellt. Auch die Schadenssummen haben sich gesteigert und liegen inzwischen bei jährlich deutlich über 10 Milliarden Euro [1]. In 2015 und 2016 wurden jeweils über 13 Milliarden Euro erreicht, was einem Fehlerkostenanteil von gut 13 % am Gesamtumsatz der Branche entsprach – ein im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen wahrscheinlich einsamer Spitzenwert.

Erfreulicherweise hat sich gerade im Holzbau in Punkto Feuchteschutz während der letzten zwei Jahrzehnte viel getan. Dort hat man früher als in anderen Sektoren erkannt, dass feuchtetolerante Konstruktionen erforderlich sind. Dazu gehört auch, dass man zunehmend auf die zuverlässigste Beurteilungsmethode, die hygrothermische Simulation setzt, selbst wenn das mit einem

Mehraufwand verbunden ist. Dies hat der Markt sehr positiv aufgenommen und honoriert die Anstrengungen mit stetig steigenden Wachstumsraten. Dass der Holzbau bei der Energieeffizienz ganz vorne mitspielt, wird niemand bestreiten. Dass er auch beim Feuchteschutz die Nase vorne hat, wird durch diesen Beitrag verdeutlicht.

Nach der Vorstellung und Diskussion der hygrothermischen Beanspruchungen von Gebäudehüllbauteilen und deren Ursachen, werden im Anschluss die für den Holzbau relevanten Auswirkungen der hygrothermischen Beanspruchungen, wie z. B. die Schimmelpilzbildung oder die feuchtebedingte Erhöhung der Transmissionswärmeverluste, erläutert. Der Abschnitt 3 befasst sich ausführlich mit der feuchtetechnischen Bemessung von Holzkonstruktionen auf der Basis der derzeit geltenden Normen und Richtlinien. In den Schlussfolgerungen nehmen die Autoren Stellung zur derzeitigen Situation der Feuchteschutzplanung im Holzbau und versuchen abschließend, einen Ausblick auf wünschenswerte Verbesserungen und Weiterentwicklungen zu geben.

2 Relevante hygrothermische Beanspruchungen und deren Auswirkungen

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. Während den meisten Planern bewusst ist, dass eine Konstruktion in den Tropen anderen wärme- und feuchtetechnischen Belastungen ausgesetzt ist als in Mitteleuropa, ist die Wahrnehmung klimatischer Unterschiede innerhalb eines Landes oder einer Region häufig zu gering. Besonders verschattete Gebäude oder solche in Hochlagen, deren Oberflächen sich auch im Sommer nicht ausreichend erwärmen, sind besonderen Risiken ausgesetzt.

2.1 Ursachen für hygrothermische Beanspruchungen

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 Was-

serdampfdiffusion 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 gesamtdruckgetriebenen 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 [2] 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 inzwischen auch entsprechende Schadensvermeidungsstrategien entwickelt. Deshalb lohnt auch für deutsche Holzbauer ein Blick über den Atlantik.

Im Folgenden werden die wesentlichen hygrothermischen Beanspruchungen im Holzbau anhand von Bild 1 aus dem ASHRAE Handbook of Fundamentals erläutert. Da aufsteigende Grundfeuchte im Holzbau einen Sonderfall darstellt, der in der Regel durch konstruktive Maßnahmen zu verhindern ist, wird dieser Fall hier nicht betrachtet. Dafür wird auf das Thema der Anfangsfeuchte eingegangen, das auch im Holzbau eine Rolle spielt. Zwar spricht man im Holzbau im Allgemeinen nicht von der Baufeuchte wie beim Massivbau, trotzdem gibt es Situationen in denen die Anfangsfeuchte im Bauteil oder den angrenzenden Bauteilen so hoch sein kann, dass Probleme zu befürchten sind.

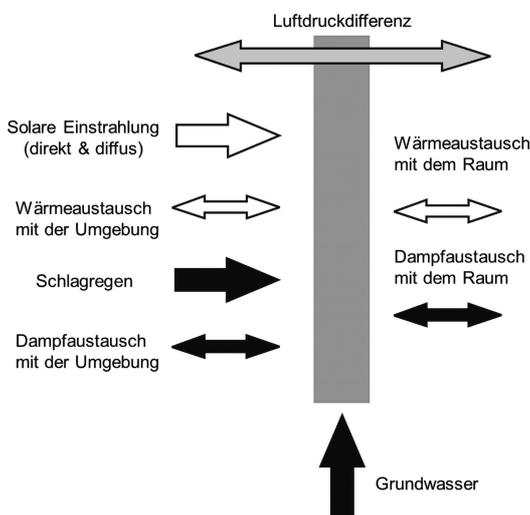


Bild 1. Hygrothermische Beanspruchungen der Gebäudehülle am Beispiel einer Außenwand in Anlehnung an [2]

2.1.1 Raumseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen

An der Innenoberfläche findet ein Wärme- und Feuchte-austausch 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 langwellige 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 Feuchte-austausch 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 Raumlufte und der Oberfläche ab.

Während im Raum häufig eine heizungsbedingte Temperaturschichtung vorhanden ist, kann beim Dampfdruck in der Regel von einer relativ homogenen Verteilung im Raum ausgegangen werden. Für die Analyse des Wärme- und Feuchte-austausches auf der Bauteilinnenseite sind demnach die Raumlufte-temperatur und der Dampfdruck die wesentlichen Parameter. Statt des Dampfdrucks wird allerdings meist die relative Luftfeuchte verwendet, da sie leichter messtechnisch zu bestimmen ist und der Dampfdruck aus ihr und der Raumlufte-temperatur errechnet werden kann. Bei Gebäuden mit stark schwankenden Raumlufte-temperaturen sollte der Dampfdruck jedoch nicht aus einer zeitlich gemittelten Temperatur berechnet werden, da hier die Gefahr besteht, den wahren Dampfdruck, wegen des exponentiellen Anstiegs des Sättigungsdampfdrucks mit der Temperatur, zu unterschätzen.

2.1.2 Außenseitige Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen

Der Wärme- und Feuchte-austausch 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. Auf die Ergebnisse von hygrothermischen Simulationsrechnungen bezüglich des langfristigen Bauteilverhaltens hat die Verwendung von angepassten Konstanten im Vergleich zur Verwendung von windabhängigen Übergangskoeffizienten in der Regel keinen spürbaren

Einfluss, da die Wärme- und Feuchteübergangswiderstände an den Oberflächen deutlich kleiner sind als die entsprechenden Durchlasswiderstände im Bauteil. Das ändert sich allerdings, wenn auch der langwellige Strahlungsaustausch in Form eines Wärmeübergangskoeffizienten zum konvektiven Übergang addiert wird, so, wie das raumseitig üblich ist. Im Gegensatz zur raumseitigen Oberfläche können die konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeströme an der Außenoberfläche entgegengesetzt sein, sodass eine Addition hier völlig falsch wäre. Dies ist vor allem bei gut gedämmten Wänden und noch stärker bei Dächern insbesondere nachts der Fall und führt in der Praxis zu einer Unterkühlung der Außenoberfläche, die nicht mithilfe eines Summenkoeffizienten abgebildet werden kann. Hier sollten deshalb konvektiver und strahlungsbedingter Wärmeaustausch strikt getrennt betrachtet und berechnet werden, zumindest dann, wenn die Oberflächenunterkühlung zu einer relevanten Befeuchtung mit der Folge von Algenwachstum bei Wänden [3] oder Tauwasser und erhöhter Sparrenfeuchte in der Belüftungsebene von Dächern führen kann [4].

2.1.3 Solare Einstrahlung

Unabhängig vom Wärme- und Feuchtaustausch zwischen Oberfläche und Außenluft bzw. im Fall des langwelligen Strahlungsaustausches auch mit der Umgebung, stellt die kurzwellige Einstrahlung durch die Sonne eine ganz 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 gegebenenfalls Verschattungsmodelle voraus. Ganz wesentlich für die strahlungsbedingte Wärmequelle ist der kurzwellige Strahlungsabsorptionsgrad der Außenoberfläche. Unter kurzwelliger Einstrahlung versteht man den ultravioletten, den sichtbaren und den sogenannten 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 Abdichtungen 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 sogenannten „Cool

Roofs“ wurden zur Kühlenergieeinsparung in warmen Ländern entwickelt. Vor ihrem Einsatz unter deutschen Klimaverhältnissen sollte allerdings überprüft werden, ob die resultierende niedrigere Oberflächentemperatur nicht auch feuchtetechnische Probleme nach sich ziehen kann [5]. Eine weitere Neuentwicklung betrifft die „Cool Colors“ für Fassaden. Sie sind im sichtbaren Bereich oft farbig, im Nahinfrarotbereich (NIR) aber stark reflektierend. Dadurch wird ein größerer Teil der solaren Einstrahlung reflektiert als die optisch sichtbare Farbe vermuten lässt. Diese NIR-reflektierenden Anstriche dienen dazu, die solare Aufheizung der Fassade zu reduzieren, nicht nur um den sommerlichen Wärmeschutz zu verbessern, sondern auch, um dem urbanen Hitzeinseleffekt entgegenzuwirken. Sie dürfen jedoch nicht mit den im thermischen Bereich infrarotreflektierenden Beschichtungen verwechselt werden, die dazu dienen, die langwellige Emission von Fassaden zu reduzieren. Diese Anstriche sorgen für eine Verminderung der nächtlichen Unterkühlung und damit zu einer geringeren Tauwasserbildung auf gut gedämmten Fassaden und sollen so die Algenbildung verhindern; im Gegensatz zu den NIR-reflektierenden Anstrichen erhöhen sie dadurch die mittlere Fassadentemperatur [6].

Ein ähnlicher Effekt der Temperaturerhöhung tritt bei unbeschichteten Blecheindeckungen oder Bekleidungen 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.

Bei den feuchtetechnischen Auswirkungen hoher Temperaturen denkt man zunächst an den meist positiven Effekt der Austrocknung. Ist diese allerdings zu stark, kann sie zu starkem Schwinden hygroskopischer Materialien und damit zusammenhängenden Schädigungen führen. Besonders beachtet werden sollte allerdings die Frage, wohin die rasch austrocknende Feuchte entweichen kann. Das Beispiel eines unbelüfteten Blechdaches in Bild 2 zeigt, dass das Aufheizen der Dachoberfläche an anderer Stelle eine deutliche Feuchteerhöhung zur Folge haben kann [7]. Durch die solare Einstrahlung steigt die Oberflächentemperatur auf der Südseite des 50° geneigten Daches an einem Wintertag mit Dauerfrostbedingungen von -15 °C am Morgen auf knapp 70 °C am frühen Nachmittag. Parallel dazu steigt die relative Luftfeuchte weiter innen,

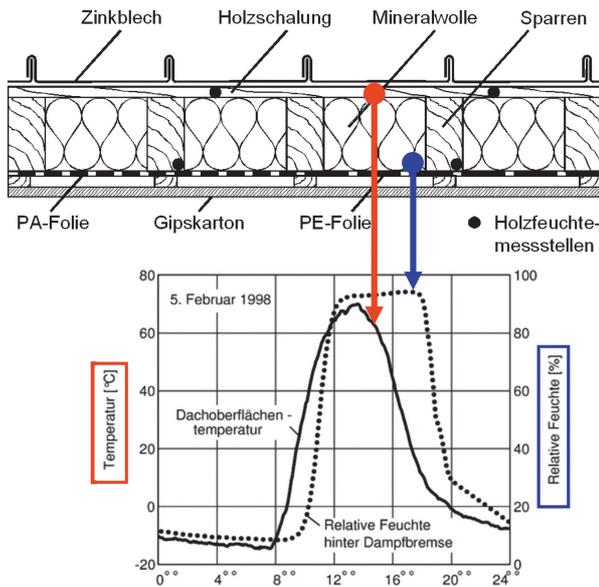


Bild 2. Gemessene Verläufe der Oberflächentemperatur eines Blechdaches sowie der relativen Luftfeuchte zwischen Wärmedämmung und Dampfbremse während eines sonnigen Wintertags

zwischen der Mineralwollendämmung und der Dampfbremse, von 10% auf über 90% r. F. Gegen Abend, wenn die Sonne untergeht, fällt auch die relative Luftfeuchte an dieser Stelle wieder langsam auf ihren Ausgangspunkt zurück. Die solare Einstrahlung führt also offensichtlich zu einer Pendelbewegung der Feuchte im Dach zwischen Schalung und Dampfbremse. Inwieweit diese regelmäßige Feuchteumverteilung ein Risiko darstellt, hängt sowohl vom Gesamtfeuchteniveau als auch von möglichen Schadensmechanismen, wie z. B. Korrosionsgefahr, Schimmelpilzbildung etc. an den besonders stark betroffenen Stellen im Bauteil ab und ist durch eine genauere Analyse zu klären.

Die Pendelbewegung der Feuchte ist auch mit einem erhöhten Wärmetransport durch den sogenannten Latentwärmeeffekt verbunden, d. h. zusätzlich zum normalen Wärmedurchgang kommt noch eine dampfdiffusionsbedingte Komponente. Da die Feuchte jeweils auf der warmen Seite verdunstet bzw. vom sorbieren in den dampfförmigen Zustand übergeht, entsteht dort eine Wärmesenke durch die Verdampfungs- bzw. Desorptionenthalpie. Nach der Diffusion durch die Dämmschicht kondensiert der Dampf wieder auf der kälteren Seite oder wird dort von einem hygroskopischen Material absorbiert. Dadurch wird die zuvor auf der Warmseite abgeführte Wärmeenthalpie auf der kalten Seite wieder zugeführt. Dieser Effekt kann schon bei geringen Feuchtegehalten im Dämmstoff (1 Vol.-%) den Gesamtwärmedurchgang durch die Dämmschicht kurzfristig mehr als verdoppeln [8]. Über einen Tag integriert, wird aus diesem Latentwärmeeffekt allerdings ein Nullsummenspiel, denn die Verluste durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel in der Nacht werden durch entsprechende Wärmegewinne am Tag nahezu kompensiert. Trotzdem kann ein

energetischer Nachteil entstehen, wenn die Wärmegewinne am Tag wegen Überheizung nicht nutzbar sind, bzw. durch verstärktes Lüften abgeführt werden, während die Verluste in der Nacht uneingeschränkt zum Tragen kommen.

2.1.4 Schlagregen

Die Bedeutung des Schlagregens als Schadensursache bei Gebäuden wird heutzutage meist unterschätzt. Früher wurden ganze 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.

Im Folgenden werden die unmittelbaren Auswirkungen der Schlagregenbeanspruchung, wie z. B. die kapillare Wasseraufnahme und das Eindringen von Niederschlagswasser kurz skizziert und danach wird in einem eigenen Abschnitt auf die mittelbare Auswirkung des Schlagregens eingegangen, die im englischen als „Solar Vapour Drive“ bezeichnet wird, was so viel bedeutet, wie sonnengetriebene Dampfbelastung.

Die Schlagregenbeanspruchung einer Fassade kann mithilfe von stündlichen Wetterdaten relativ zuverlässig aus dem Niederschlag auf eine horizontale Fläche (Normalregen) und der gleichzeitig gemessenen vektoriellen Windgeschwindigkeit (Betrag und Richtung) berechnet werden [9]. Diese Vorgehensweise ist allerdings nur für die Beurteilung mittels hygrothermischer Simulation praktikabel. Zur Einstufung der regionalen Schlagregenbeanspruchung für vereinfachte Feuchteschutzbeurteilungsmethoden kann auf die Klassifizierung in der DIN 4108-3 [31] zurückgegriffen werden. Dort sind drei Beanspruchungsgruppen definiert, die aus einer Deutschlandkarte zu entnehmen und entsprechend der Exposition des betrachteten Gebäudes weiter anzupassen sind. Es ist offensichtlich, dass mit steigender Schlagregenbeanspruchung bei der Planung auch dem Schlagregenschutz eine größere Bedeutung zukommt. Das gilt insbesondere bei der Sanierung von alten Holzkonstruktionen wie z. B. Fachwerkhäusern [10]. Abgesehen von Fachwerkhäusern weisen traditionelle Holzkonstruktionen durch die Bekleidung mit Schindeln oder Holzschalungen in der Regel einen guten Schlagregenschutz auf. Dies ist der Belüftung des äußeren Wetterschutzes und vor allem dessen Drainageverhalten zu verdanken [11].

Anders sieht es aus, wenn das Holzhaus möglichst wie ein Massivbau aussehen soll und deshalb außen verputzt wird oder ein Wärmedämm-Verbundsystem (WDVS) aufgebracht wird. In diesen Fällen wird häufig auf eine Drainage der äußeren Bekleidung verzichtet (nach heutigen Zulassungen für WDVS auf Holzkonstruktionen wird eine sichere Wasserableitung gefordert). Wenn dann Schlagregenwasser im Bereich von Fensteranschlüssen hinter die Bekleidung läuft, kann das fatale Folgen haben. Selbst sorgfältig ausgeführte Wandkonstruktionen sind nicht vor kleineren Regenwasserleckagen gefeit. In Nordamerika wurden viele Holzkonstruktionen insbesondere mit WDVS aus dampfbremsender Dämmung wie EPS durch diesen Effekt großflächig geschädigt. Selbst Firmen aus Europa mit jahrzehntelangen Erfahrungen auf dem Gebiet der Außendämmung mit WDVS sind anfangs mit ihren Systemen gescheitert. Das Schlagregenproblem mit WDVS auf Holzkonstruktionen hat vor einiger Zeit auch Europa erreicht [12]. Auch die Lösungen dazu, wie z. B. eine zweite Abdichtungsebene unter Fensterbänken (Unterfensterbank) [13] und/oder der Einsatz diffusionsoffener Dämmstoffe zur Verbesserung des Trocknungspotenzials, sind bei uns vielen bekannt. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass der Schlagregenschutz bei Holzkonstruktionen mit WDVS heute kein Problem mehr darstellt.

Beim Mauerwerks- oder Betonbau, dem Haupteinsatzbereich für WDVS, dringt, wie man inzwischen weiß, ebenfalls Regenwasser bei den Fensteranschlüssen ein. Da Mauerwerk und Beton jedoch deutlich weniger feuchteempfindlich sind als Holz und Holzwerkstoffe, wird das selten bemerkt. Das bedeutet jedoch nicht, dass dadurch keine Probleme entstehen können. Ne-

ben einer lokalen Aufweitung der Dämmung wurde hier vereinzelt auch Insektenbefall (Ameisen) hinter den Dämmplatten beobachtet. Deshalb wäre auch der Massivbau gut beraten die Detaillösungen des Holzbaus genauer zu studieren.

2.1.5 Umkehrdiffusion durch Sonneneinstrahlung nach Regen (Solar Vapour Drive)

Die Dampfdiffusion findet bekanntermaßen von Zonen mit hohem Dampfdruck zu solchen mit niedrigerem Dampfdruck statt. Da in Räumen Feuchte produziert wird, zeigt die Diffusionsrichtung bei unserem Klima meist von innen nach außen. Dreht sich die Diffusionsrichtung um, dann spricht man von Umkehrdiffusion. Dass dies zum Beispiel bei Kühlräumen der Fall ist, muss sicher nicht erwähnt werden. Weniger offensichtlich ist hier schon die Situation bei unbeheizten Räumen. Auch die sind im Sommer meist kühler als die Außenluft, vor allen Dingen, wenn der Raum keine Fenster besitzt (Lagerraum) oder wenn das Gebäude eine hohe Wärmespeicherfähigkeit aufweist. Hier wird der Einfluss der Umkehrdiffusion oft unterschätzt, da die Temperaturdifferenz zwischen außen und innen kleiner ist, als im Winter. Die Dampfdruckdifferenz kann aber durchaus größer sein, da diese mit dem Temperaturniveau deutlich ansteigt. Ein Beispiel dazu ist in [15] zu finden. Es zeigt, dass bei einer unbeheizten Kartoffellagerhalle, eine innen angebrachte Dampfsperre zu Schäden führt.

Besonders groß wird der Umkehrdiffusionsstrom wenn hohe Temperatur und Feuchte zusammenkommen, wie bei einer besonnten, regenfeuchten Vorsatzschale aus Mauerwerk, dargestellt in Bild 3. Da solche Situationen allerdings meist nur von kurzer Dauer sind, werden sie kaum beachtet. Das mag auch mit den positiven Erfahrungen mit zweischaligem Mauerwerk zusammenhängen. Hier sind durch Umkehrdiffusion im Sommer

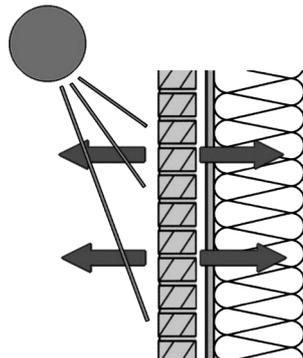


Bild 3. Bei Besonnung einer regenfeuchten Mauerwerksvorsatzschale entsteht durch die Erwärmung des Mauerwerks ein Dampfdruckgefälle in beiden Richtungen, das dazu führt, dass während der Austrocknung ein starker Dampfdiffusionsstrom auch in die Holzkonstruktion stattfindet. [2]

normalerweise keine Probleme zu erwarten, auch wenn keine Belüftung vorgesehen wurde [16]. Handelt es sich bei der tragenden Wand allerdings um eine Holzbauponstruktion, sieht die Sache anders aus. Schäden haben gezeigt, dass durch die sonnengetriebene Umkehrdiffusion bei häufigerem Auftreten trotz meist kurzer Dauer eine zu hohe Feuchtebelastung der Holzbauteile auftreten kann [2]. Eine Belüftung der Vormauerschale bringt hier eine deutliche Verbesserung der Situation, da die feuchte und warme Luft in der Belüftungsebene relativ rasch durch die Auftriebsströmung im Spalt abgeführt wird [17, 18].

Bei einem zweischaligen Mauerwerk ohne Belüftung tritt zwar eine ähnliche Feuchtebeanspruchung durch diese Umkehrdiffusion auf, aber sie kann problemlos von der Tragschale gepuffert werden. D. h. im Sommer nimmt der Wassergehalt im Außenbereich der Tragschale etwas zu, allerdings wird diese Feuchte im Winter wieder abgegeben, ohne dass es jemals zu kritischen Feuchtezuständen kommt. Deshalb ist eine Hinterlüftung der Vorsatzschale hier nicht notwendig, sondern aus energetischer Sicht eher kontraproduktiv. Auch bei einer zweischaligen Außenwand mit tragender Holzbauponstruktion wird der Wärmedurchlasswiderstand durch Hinterlüftung der Vorsatzschale im Winter etwas verringert. Deshalb sollte die Belüftung nur so stark wie notwendig ausgeführt werden oder die sommerliche Auffeuchtung der Holzkonstruktion durch andere Maßnahmen begrenzt werden.

2.1.6 Dampfkonvektion durch Undichtheiten in Außenbauteilen infolge von Luftdruckdifferenzen

Bild 1 zeigt bei den hygrothermischen Beanspruchungen von Bauteilen auch einen nach beiden Seiten gerichteten grauen Pfeil zur Luftdruckdifferenz auf. Dieser Pfeil soll die Möglichkeit von Luftströmungen durch ein Bauteil darstellen. Da jedes Außenbauteil luftdicht sein sollte, wird dieser Effekt bei der Feuchteschutzplanung oft nicht beachtet, obwohl bekannt ist, dass durch Luftströmungen u. U. sehr viel mehr Feuchte eingetragen werden kann als durch Dampfdiffusion. Entsprechend häufig kam es in der Vergangenheit zu konvektionsbedingten Schäden vor allem bei beidseitig diffusionshemmend ausgeführten Holzkonstruktionen mit geringem Rücktrocknungspotenzial. Ein Problem entsteht meist nur dann, wenn der Taupunkt der einströmenden Luft (meist handelt es sich um kaum spürbare Kriechströmungen) über der niedrigsten Temperatur im Bauteil liegt. In unserem Klima ist das bei ungekühlten Gebäuden hauptsächlich im Winter der Fall. Deshalb ist das Einströmen von Raumluft in das Bauteil nur während der Heizperiode ein Problem. Das Einströmen von Außenluft führt bei unseren Klimaverhältnissen dagegen eher zu einer Trocknung des Bauteils.

Da die Raumluft im Winter häufig deutlich mehr Feuchte enthält als die Luft im Bauteil, spricht man

beim Durchströmen eines Bauteils aufgrund von Gesamtdruckunterschieden, in Analogie zur Dampfdiffusion, auch von Dampfkonvektion. Damit wird auch ausgedrückt, dass sich die Schadensbilder bei beiden Vorgängen in der Praxis häufig ähneln. Wie in [19] gezeigt, verteilt sich die durch eine kleine Fehlstelle auf der Warmseite konvektiv eingedrungene Feuchte ähnlich wie bei der Dampfdiffusion relativ gleichmäßig über eine größere Fläche auf der Kaltseite. Die Dampfkonvektion kann in der Baupraxis nicht vollständig unterbunden werden. Selbst bei sorgfältigster Ausführung unter Vermeidung aller Leckagen in Anschlussbereichen z. B. durch Überkleben 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 [19] eindeutig nachgewiesen.

Zwar wird die Haft- und Schälhaftigkeit von solchen Klebebändern gemäß DIN 4108-11 [20] in Bezug auf ihre Dauerhaftigkeit getestet. Allerdings wird dabei bislang nicht die Luftdichtheit der Klebeverbindung überprüft. Für die Luftdichtheit der Gebäudehülle aus energetischer Sicht spielt die in [19] ermittelte Restundichtheit von Klebeverbindungen keine Rolle. Aus feuchtetechnischer Sicht kann sie jedoch bei wenig feuchtetoleranten Konstruktionen Probleme verursachen. Deshalb muss bei der Feuchteschutzbemessung von Holzkonstruktionen grundsätzlich von einem gewissen Feuchteeintrag durch Dampfkonvektion ausgegangen werden. Entsprechende Ansätze dazu werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschrieben.

2.1.7 Anfangsfeuchte

In den 80er Jahren wurden oft noch Dachsparren aus grünem (nicht vorgetrocknetem) Holz eingebaut. Deshalb wurde damals in den Dachdeckerrichtlinien eine Belüftung der Ebene zwischen der Dämmschicht und dem Unterdach gefordert. Heute wird auch für Dächer nur noch getrocknetes Holz verwendet. Leider lässt das nicht darauf schließen, dass die Anfangsfeuchte im Holzbau (= Trockenbau) keine Sorgen mehr bereitet. Kommt es zum Einbau von feuchten Baustoffen kann die Anfangsfeuchte nach wie vor zu Problemen führen, wenn die Konstruktion nicht ausreichend diffusionsoffen ist. Ein kritischer Anfangsfeuchtegehalt ist oftmals der Situation während der Bauphase geschuldet. Baufeuchte mineralischer Baustoffe, wie z. B. ein frischer Estrich oder ein frisches Mauerwerk, geben erhebliche Wassermengen ab und können dadurch Holzbauteile auffeuchten. Das Gleiche gilt für Niederschlagsereignisse vor der Abdichtung, ein häufiges Problem bei Flachdächern. In solchen Fällen ist eine technische Trocknung des Holzbauteils 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 im Holzbau die Anfangsbedingungen berücksichtigt werden. Wenn man diese nicht genauer kennt und eine erhöhte Angangsfeuchte ausschließen kann, ist es zweckmäßig, für alle Bauteilschichten deren Gleichgewichtsfeuchte bei 80% relativer Luftfeuchte anzusetzen. Das entspricht der Feuchte, die Baustoffe aufweisen, die regengeschützt unter Außenluftbedingungen gelagert wurden. Sorptive Dämmstoffe, die trocken gelagert wurden, haben meist jedoch einen geringeren Ausgleichsfeuchtegehalt. Hier kann als Anfangsfeuchte bei Bedarf die Gleichgewichtsfeuchte bei 50% r. F. angesetzt werden, da höhere Werte eine zusätzliche Feuchtelast bedeuten würde. Dies wäre nur gerechtfertigt, wenn davon auszugehen ist, dass sie tatsächlich mit einer höheren Anfangsfeuchte eingebaut wurden.

2.1.8 Leitungswasserschäden

In Deutschland ereignen sich jedes Jahr mehr als eine Million Leitungswasserschäden in Gebäuden, d. h. jeder Einwohner ist statistisch gesehen mindestens einmal im Leben von einem Leitungswasserschaden betroffen. Deshalb ist die Reaktion von Baukonstruktionen und -materialien auf Leitungswasser und die Rücktrocknungsmöglichkeit auch ein Feuchteschutzthema. Im Gegensatz zu Leitungswasserschäden, die bevorzugt durch technische Trocknung behoben werden, ist bei Überschwemmungsschäden aufgrund von Verunreinigungen oft ein Austausch der betroffenen Materialien erforderlich. Da Leitungswasserschäden deutlich häufiger vorkommen als Überschwemmungsschäden, wurden deren Auswirkungen und die Effizienz von Methoden der technischen Trocknung an Fußbodenaufbauten, Wänden und Deckenkonstruktionen wissenschaftlich untersucht [21]. Wenn die Holzbauteile zwischen den Beplankungen gut durchströmbar sind, können sie mithilfe getrockneter oder erwärmter Luft rasch getrocknet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass auch das Wasser am Fußpunkt von Wänden ausreichend entfernt wird. Wichtig ist in allen Fällen, dass die Trocknungsmaßnahmen schnell nach dem Schadensereignis beginnen, da es ansonsten zur Schimmelpilzbildung auf den feuchten Materialien kommen kann.

2.2 Auswirkungen von Temperatur- und Feuchtebeanspruchungen

Die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit sowie das energetische Verhalten von Holzkonstruktionen werden durch das Zusammenspiel der beschriebenen hygrothermischen Beanspruchungen bestimmt. Für die Beurteilung und Quantifizierung der Auswirkungen ist die Kenntnis der lokalen Mikroklimabedingungen im Bauteil und das Verständnis für die physikalischen, chemischen und biologischen Veränderungs-

prozesse von Bedeutung. Im Holzbau spielen die folgenden Feuchtwirkungen mit ansteigender Relevanz eine Rolle und sollten genauer betrachtet werden:

- Feuchtebedingte Erhöhung des Heizenergieverbrauchs,
- Schäden durch chemische Reaktionen, z. B. Korrosion,
- Alterung oder Entfestigung durch Feuchtwechsel- (Quell- und Schwindvorgänge) sowie hygrothermische Verformungsprozesse,
- Schäden durch mikrobielles Wachstum, z. B. Schimmelpilze, Holzfäule.

In Normen und Richtlinien zum Feuchteschutz wird auf diese Vorgänge meist nicht eingegangen, sondern es werden stattdessen Grenzwerte für den maximalen Feuchtegehalt bzw. die maximale Änderung des Feuchtegehalts oder für die maximale fiktive Tauwasserbildung, z. B. beim Feuchteschnitznachweis nach *Glaser*, festgelegt. Auf die Sinnhaftigkeit solcher Grenzwerte wird später noch eingegangen. Das Ziel der Grenzwerte ist es jedenfalls, die gerade genannten Schadensprozesse zu verhindern. Da die Beurteilungsmethoden, für die die meisten dieser Grenzwerte entwickelt wurden, ausschließlich die Dampfdiffusion aus dem Raum in das Bauteil betrachten und alle anderen hygrothermischen Beanspruchungen neglizieren, ist deren Aussagen mit Vorsicht zu begegnen. Daher muss die Beurteilung der unterschiedlichen Schadens- oder Alterungsprozesse in Zukunft eingehender untersucht werden. Erste Ansätze, die in der Regel eine hygrothermische Simulation oder detaillierte Messungen erfordern gibt es bereits. Auf sie wird im Folgenden kurz eingegangen und deren normative Umsetzung im Abschnitt 3 beschrieben.

2.2.1 Feuchtebedingte Erhöhung des Wärmedurchgangs

Wie bereits erwähnt, kann die Pendelbewegung von Feuchte in exponierten Außenbauteilen, wie z. B. bei Dächern, zu einem Latentwärmetransport führen, der kurzzeitig größer sein kann als der Wärmedurchgang durch Wärmeleitung. Über 24 Stunden betrachtet, ist der Effekt durch die Latentwärme allerdings deutlich kleiner und die energetische Auswirkung nur in Ausnahmefällen von Relevanz. Eine spürbare Erhöhung des langfristigen Wärmedurchgangs wäre nur gegeben, wenn der Transport in einer Richtung immer als Dampf und in der anderen als flüssiges Wasser erfolgen würde (Heatpipe-Effekt). So etwas könnte beispielsweise in einem Flachdach passieren, wenn das Tauwasser von der Kaltseite regelmäßig zur Warmseite zurücktropft. Bei einer ordentlich ausgeführten Konstruktion ist dies jedoch sehr unwahrscheinlich.

Im Gegensatz zum Massivbau, spielt beim Holzbau die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch stationäre Feuchte in den Materialien eine geringe Rolle, da hohe Feuchtegehalte schon zum Schutz der Konstruktion vermieden werden müssen. Bei Dämmstoffen aus

nachwachsenden Rohstoffen, wie z. B. Holz-, Zellulose- oder Hanffasern, führt die Sorptionsfeuchte bei Messungen im Plattenapparat zu einer Erhöhung des Wärmestroms. Dieser Effekt ist allerdings nach [23] in erster Linie auf den bereits erwähnten Latentwärmetransport zurückzuführen und resultiert so gut wie nicht aus einer feuchtebedingten Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Deshalb sollte für hygrothermische Simulationen für die Wärmeleitfähigkeit von diffusions-offenen Dämmstoffen entweder der Trockenwert oder ein um den Latentwärmeanteil bereinigter Feuchtwert verwendet werden. Die feuchtebedingte Erhöhung des Wärmedurchgangs ist daher im Holzbau nur dann ein Thema, wenn entweder geschlossenzellige Dämmstoffe wie z. B. Schaumkunststoffe als Perimeter- oder Umkehrdachdämmung oder kapillaraktive mineralische Baustoffe in Teilbereichen zum Einsatz kommen.

2.2.2 Schimmel und holzerstörende Pilze

Im Gegensatz zur Holzfäule stellt das Schimmelpilzwachstum keine Gefährdung der Tragfähigkeit einer Konstruktion dar. Da manche Schimmelpilze die Gesundheit beeinträchtigen können, muss aber sichergestellt sein, dass die Emissionen der Schimmelpilze (MVOCs = Microbial Volatile Organic Compounds oder Schimmelpilzsporen) nicht in die Raumluft oder auf die raumseitigen Oberflächen gelangen können. Dies wird deshalb hier betont, da eine vollständige Schimmelpilzfreiheit im äußeren Bereich von Holzbauteilen, z. B. auf der äußeren Schalung, häufig nicht gewährleistet werden kann und i. d. R. auch kein Problem darstellt. Raumseitig der Dämmebene und an den Innenoberflächen ist der Befall durch Schimmelpilze allerdings aus hygienischen Gründen nicht akzeptabel. Zur Abschätzung unter welchen Bedingungen Schimmelpilzwachstum überhaupt möglich ist, wurden in [24] Grenzkurven für die Auskeimung von Schimmelpilzsporen, sogenannte LIMs (Lowest Isoleth for Mould), entwickelt, die alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze berücksichtigen. Bild 4 zeigt den Verlauf dieser Grenzkurven für verschiedene Substrate, d. h. Oberflächenmaterialien. Die unterste Kurve zeigt die Abhängigkeit der Auskeimungsgrenze von den Temperatur- und Feuchteverhältnissen im Substrat für ein ideales Nährmedium. Unterhalb dieser Kurve können keine baurelevanten Schimmelpilze wachsen. Diese als LIM 0 bezeichnete Kurve repräsentiert für den Baubereich eigentlich nicht relevante, optimale Nährstoffverhältnisse, die allenfalls bei stark verschmutzten Oberflächen auftreten könnten. Die darüber liegende Grenzkurve LIM I gilt für Oberflächen aus biologisch verwertbaren Baustoffen wie z. B. Holzwerkstoffen, Tapeten, Gipskarton oder leicht verschmutzten anderen Oberflächen. Die oberste Grenzkurve LIM II wird u. a. für mineralische Baustoffe und Kunststoffe verwendet, die nicht biologisch verwertbar sind. Da diese Einteilung relativ grob ist, besteht die Möglichkeit diese Grenzkurven für einzelne Materialien gesondert zu bestimmen [22, 25].

Vergleicht man die an einer Materialoberfläche gemessenen oder für diese Oberfläche instationär berechneten Verläufe der Temperatur- und Feuchtekonzidenzen, lässt sich das Schimmelpilzwachstumsrisiko abschätzen. Bleiben die Werte stets unterhalb der materialspezifischen Grenzkurven, lässt sich Schimmelpilzbildung mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen. Kürzere Überschreitungen der Grenzkurven stellen meist noch kein Problem dar, da die für die Sporenauskeimung günstigen Wachstumsbedingungen eine Weile anhalten müssen, bevor das Schimmelpilzwachstum beginnt. Um in solchen Fällen das Wachstumsrisiko genauer bestimmen zu können, kann das für raumseitige Oberflächen validierte Wachstumsmodell von *Sedlbauer* [24] eingesetzt werden. Es berechnet ein hypothetisches Hyphenwachstum in Abhängigkeit von den wechselnden hygrothermischen Randbedingungen an der Baustoffoberfläche. Eine Alternative zu diesem physikalisch-biologisch begründeten biohygrothermischen Modell, ist das mathematisch-empirische Schimmelpilzwachstumsmodell von *Viitanen* [26]. Dort wurde ein sechsstufiger Mould Index (Schimmelpilzindex) definiert, der sich an der Ausbreitung von Schimmelpilzen auf Baustoffoberflächen (ursprünglich ausschließlich Holz, später auch andere Materialien) orientiert. Dessen Spektrum reicht von vereinzelt Kolonien, die nur unter dem Mikroskop sichtbar sind, bis hin zum sofort erkennbaren vollflächigen Bewuchs. Ein Vergleich beider Modelle in [27] hat gezeigt, dass die Ergebnisse für die raumseitige Oberfläche meist recht gut übereinstimmen und die Wachstumslänge

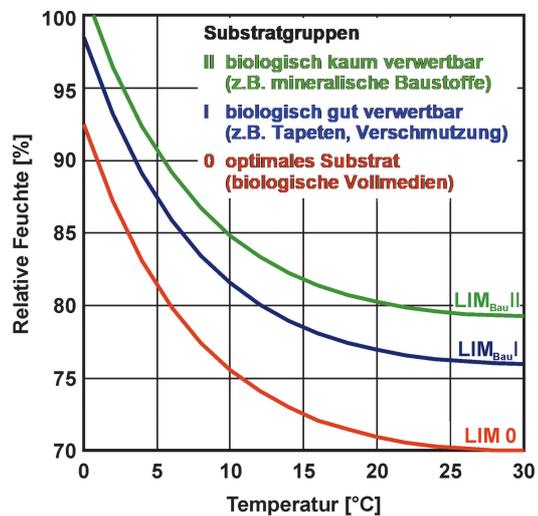


Bild 4. Grenzkurven für das Auskeimen von Schimmelpilzsporen (Isolethen) für unterschiedliche Substrate. Unterhalb dieser Grenzkurven (LIM = Lowest Isoleth for Mould), die eine einhüllende Funktion für alle baurelevanten Schimmelpilzspezies darstellt, findet keine Sporenauskeimung und damit auch kein Schimmelpilzwachstum statt.

der hypothetischen Hypothese des biohygrothermischen Modells gut in den Mould Index von *Viitanen* überführt werden kann.

Für die Feuchteschutzbemessung von Bauteilen ist jedoch nicht nur die Beurteilung des raumseitigen Schimmelpilzwachstumsrisikos interessant, sondern auch das Risiko innerhalb des Bauteils, z. B. auf Beplankungen, Dampfbremsen, Witterungsschutzbahnen, Dämmstoffoberflächen. Die Untersuchungen von *Viitanen* haben dabei gezeigt, dass in den Bauteilaußenbereichen nicht nur Bedingungen vorherrschen können, die Schimmelpilzwachstum fördern, sondern zeitweise auch solche, die den Schimmelpilzen schaden und zu einem partiellen Absterben führen. Deshalb hat er in sein Modell einen sogenannten Decline-Ansatz integriert, der den in der Realität zu beobachtenden Rückgang der Schimmelpilzausbreitung auf der Oberfläche berücksichtigt. Ein solcher Ansatz fehlt bislang im biohygrothermischen Modell von *Sedlbauer*, d. h. die Ergebnisse sind für Oberflächen, die sich außerhalb der Dämmschicht befinden und dort stark schwankenden Bedingungen ausgesetzt sind, eher zu konservativ. Während das Wachstum von Schimmelpilzen i. d. R. nur ein hygienisches Problem darstellt, das allerdings bei einigen Schimmelpilzarten eine Gesundheitsgefährdung darstellen kann, besteht bei holzerstörenden Pilzen eine Gefahr für die Substanz der Konstruktion. Vergleicht man die Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze mit denen für holzerstörende Pilze in Bild 5, wird deutlich, dass für die Holzfäule deutlich höhere Feuchtebedingungen notwendig sind,

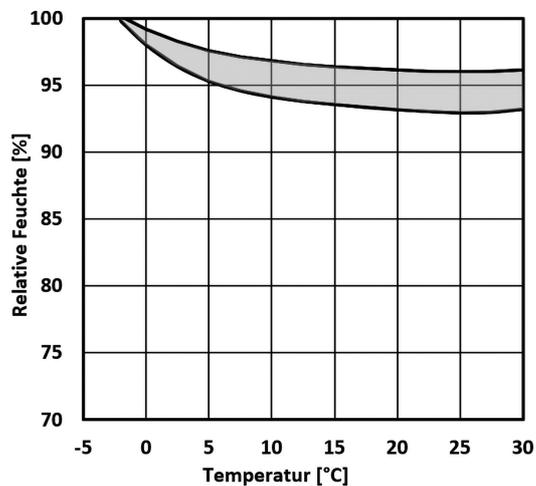


Bild 5. Analog zu den Grenzkurven für Schimmelpilze in Bild 4 wurde auch für holzerstörende Pilze ein ähnliches System entwickelt [28]. Im Vergleich zu den Schimmelpilzgrenzkurven sind für die Holzzerstörungsprozesse deutlich höhere Feuchtebedingungen notwendig. Die graue Fläche stellt momentan noch einen Grenzbereich dar. Die Kurven wurden aus Messungen des IBP und der Literatur ermittelt.

als für das Schimmelpilzwachstum. Solche Bedingungen treten entweder im Zusammenhang mit Niederschlagsbeanspruchungen auf, wie z. B. bei Holzbalkenköpfen im Mauerwerk auf der Wetterseite oder in bauphysikalisch falsch konzipierten und zu dichten Konstruktionen. Zu letzteren zählen beispielsweise außen und innen diffusionsdichte ($s_d > 10$ m) Flachdächer. Hier kann durch Dampfkongvektion oder in ungünstigen Fällen, z. B. bei geringem Trocknungspotenzial aufgrund niedriger Temperaturen, auch allein durch Dampfdiffusion eine langfristige Feuchtezunahme stattfinden. In jedem Fall verläuft der Holzabbauprozess relativ langsam, d. h. ein rasches mechanisches Versagen des betroffenen Bauteils ist nicht zu erwarten. Da die Kosten und der Aufwand für die Schadensbehebung in der Regel jedoch beträchtlich sind, ist die Holzfäule auf alle Fälle zu verhindern. Zur Schadensprognose durch holzerstörende Pilze können ähnlich wie zur Bestimmung des Schimmelpilzwachstumsrisikos Modelle wie in [28] vorgestellt, eingesetzt werden. Allerdings sind diese noch nicht so umfangreich validiert worden, wie die derzeitigen Schimmelpilzwachstumsmodelle. Deshalb wird hier empfohlen, zunächst noch die im Abschnitt 3.4 beschriebenen Ansätze zu verwenden.

2.2.3 Korrosion von metallischen Verbindungen und Befestigungsmitteln

In der Holzbaupraxis in Deutschland kommen Korrosionsprobleme bei ansonsten funktionsfähigen Bauteilen nur äußerst selten vor und spielen in der Planungspraxis dementsprechend auch fast keine Rolle. Dies liegt vor allem daran, dass die Bauteile so ausgelegt werden, dass kein chemischer Holzschutz erforderlich wird – also Massivholz im Wesentlichen unter 20 und tragende Holzwerkstoffe unter 18 M.-% Feuchtegehalt bleiben. Zudem werden zur Verhinderung von Korrosion häufig Buntmetalle oder nichtrostende Stähle eingesetzt. Das ist allerdings teuer und geht auch zu Lasten der mechanischen Festigkeit.

Unter 80% r. F. bzw. etwa 15 M.-% Holzfeuchte im Massivholz findet in der Regel gar keine Korrosion statt, während normaler Karbonstahl laut [30] ab 20 M.-% zu rosten beginnt. Allerdings ist z. B. aus [29] bekannt, dass der Korrosionsfortschritt von Eisenankern mit Mörtelummantelung nicht nur von der Feuchte, sondern auch deutlich von der Temperatur abhängt. Auch wenn für metallische Verbindungsmittel in Holz hierzu keine expliziten Untersuchungen vorliegen, ist davon auszugehen, dass diese Zusammenhänge hier in ähnlicher Weise gültig sind. Und da sich höhere Feuchten in Holzbauteilen vor allem im Winter auf der Außenseite einstellen, scheint die Einhaltung der genannten Bedingungen zur Vermeidung des chemischen Holzschutzes dazu zu führen, dass Korrosion entweder gar nicht auftritt oder gegenüber der Schädigung der Hölzer oder Holzwerkstoffe zweitrangig bleibt.

Auf zwei Aspekte soll hier aber hingewiesen werden. Zum einen sieht es in Ländern, in denen chemischer Holzschutz noch häufiger zum Einsatz kommt, etwas anders aus: Hier werden als Konsequenz häufig höhere Feuchtegehalte toleriert und die Holzschutzmittel führen auch oft zu stärker korrosiven Bedingungen im Porenwasser an den Befestigungsmitteln. Beides zusammen hat zur Folge, dass Korrosion bei solchen Konstruktionen ein deutlich präsenteres Problem darstellt [30]. Zum anderen erlauben die neuen Grenzwerte nach WTA sowie künftige instationäre Bewertungsmodelle u. U. deutlich höhere Feuchtegehalte als die zuvor genannten 20 M.-%. Ob Korrosionsprobleme bei solchen Randbedingungen wieder stärker berücksichtigt werden müssen, ist bisher nur schwer einzuschätzen.

2.2.4 Hygrothermisch verursachtes Quell- und Schwindverhalten

Holz zeigt bereits unterhalb der Fasersättigung ein ausgeprägtes Quell- und Schwindverhalten. In Faserrichtung (0,01 % Formänderung pro 1 M.-% Feuchteänderung) ist das Verhalten im Bauwesen weitestgehend zu vernachlässigen; quer zur Faser (Nadelhölzer: im Mittel 0,25 % Formänderung pro 1 M.-% Feuchteänderung) sollte es allerdings Berücksichtigung finden. Während große Schwindverformungen Rissbildungen und Setzungen zur Folge haben können, kann es beim Quellverhalten zu Zwängungen und Verformungen kommen. Aus diesen Gründen sollten die Holzbauteile mit der Holzfeuchte eingebaut werden, bei der sich auch später die mittlere Holzfeuchte einstellt. In der Praxis ist dies bei Innenbauteilen (6–9 M.-%) allerdings oftmals nicht zu erreichen, da im Bauwesen technisch getrocknete Hölzer mit ca. 18 M.-% ausgeliefert werden. Bauteile wie beispielsweise Holzschalungen unter Dächern schwanken üblicherweise zwischen 9 und 24 M.-%. Diese Schwankungen verursachen bei Schalungen in der Regel kein Problem, da aufgrund der Kleinteiligkeit und dem damit verbundenen hohen Fugenteil ausreichend Platz für die Bewegungen vorhanden ist.

Holzwerkstoffe zeigen im Vergleich zu Holz je nach Werkstoff ein anderes Quellverhalten. Bei größeren Schwankungen können bei Holzwerkstoffen Zwängungen auftreten. Daher empfehlen die Hersteller in ihren Verlegeanleitungen zwischen den Platten ausreichend Fugen zu lassen. Das Quell- und Schwindverhalten bzw. die resultierenden Spannungen bei Behinderung der Formänderung sind ein komplexes mechanisches Problemfeld, das von vielen Parametern, z. B. Abmessung des betrachteten Bauteils, lokale Festigkeiten, Vorspannungen, Kerbwirkungen etc. abhängt. Die konkreten Auswirkungen von hygrothermischen Wechselbeanspruchungen sind daher i. d. R. nur abschätzbar, aber nicht exakt berechenbar. Eine Kopplung von mechanischen und hygrothermischen Modellen könnte hier in Zukunft bessere Aussagegenauigkeit

ermöglichen. Allerdings sollte es bereits jetzt möglich sein, durch hygrothermische Simulationen die Auswirkungen unterschiedlicher Beanspruchungen zu vergleichen.

3 Feuchteschutzbemessung anhand von Normen und Richtlinien

Die Entwicklung der Normen und Richtlinien zum Feuchteschutz hat gerade im Holzbau in den letzten Jahrzehnten eine große Dynamik entwickelt. Ursprünglich wurde ausschließlich die Dampfdiffusion aus dem Raum betrachtet und daraus die bauphysikalische Grundregel abgeleitet: „innen immer dampfdichter als außen“. Im Fall von Dächern mit äußerer Abdichtung oder diffusionshemmendem Unterdach wurden deshalb innen Dampfsperren aus Aluminium angebracht oder die Dachdämmung hinterlüftet. In der Folge gab es bei dampfdichten, unbelüfteten Dächern häufig Schäden, da auch keine Feuchte austrocknen konnte, die auf anderen Wegen eingedrungen war. Etwa zeitgleich kam die Belüftung ins Kreuzfeuer, da sie durch die zunehmenden Dämmstärken nicht nur zu einer Entfeuchtung, sondern auch zu einer Befeuchtung aufgrund von nächtlicher Unterkühlung beitrug [4]. Außerdem machte die Belüftung eine Behandlung der tragenden Holzbauteile mit Holzschutzmitteln gegen Insekten notwendig. Die Lösung brachten auf der einen Seite nicht belüftete diffusionsoffene Konstruktionen und bei außen dampfdichten Flachdächern der Einsatz von moderaten oder feuchtevariablen Dampfbremsen.

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 Freiland- und Laborversuche sowie umfangreiche hygrothermische Simulationen durchgeführt. Als Pionier bei der Umsetzung des neuen Paradigmas hat sich die deutsche Holzschutznorm erwiesen. Ihr ist es zu verdanken, dass die Holzkonstruktionen deutlich feuchtetoleranter und damit weniger schadensanfällig sowie dauerhafter geworden sind. Die deutsche Norm zum klimabedingten Feuchteschutz DIN 4108-3 stellte damals leider das Schlusslicht dar. Das lag unter anderem an der Überbetonung der stationären Feuchteschutzbeurteilung nach *Glaser*, bei der das Prinzip „dicht und dichter“ immer zu guten Ergebnissen führt. Inzwischen hat diese Norm nachgezogen, weshalb ihre Inhalte im Folgenden eingehender beleuchtet werden.

3.1 Klimabedingter Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018-10

Die DIN 4103-3 vom Oktober 2018 [31] beschreibt zum ersten Mal explizit das dreistufige Verfahren zur Feuchteschutzbeurteilung von Baukonstruktionen. Der Nachweis der feuchtetechnischen Unbedenklichkeit von Baukonstruktionen kann mittels geeigneter Vorgehensweisen unterschiedlicher Komplexität (Stufen) durchgeführt werden. Die erste Stufe stellt die Auswahl 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 zweite Stufe betrifft den stationären Dampfdiffusionsnachweis nach *Glaser* mithilfe des beschriebenen Periodenbilanzverfahrens für dafür geeignete Bauteile und bei Wänden zusätzlich die Erfüllung von Kriterien zum Schlagregenschutz. Die dritte Stufe verkörpert den etwas aufwendigeren Nachweis durch hygrothermische Simulation. Damit wird klar ausgedrückt, dass grundsätzlich die Möglichkeit besteht, eine nachweisfreie Konstruktion zu wählen, das Periodenbilanzverfahren (Glaserverfahren mit den Randbedingungen von 2014) zu verwenden oder die Beurteilung durch hygrothermische Simulation nach Anhang D durchzuführen, sofern für den jeweiligen Fall keine Einschränkungen in Hinblick auf die Anwendbarkeit gelten.

Diese Einschränkungen betreffen Bauteile und Randbedingungen, die von den jeweiligen Berechnungsverfahren entweder nicht oder nicht genau genug beurteilt werden können, bzw. für die keine ausreichenden Erfahrungen bestehen, um sie für die fragliche Anwendung in die Liste der nachweisfreien Konstruktionen aufnehmen zu können. Beispielsweise können die ersten beiden Stufen nur zur Beurteilung von Bauteilen für nicht klimatisierte Wohn- oder wohnähnlich genutzte Gebäude verwendet werden. D. h., Bauteile für gekühlte Gebäude oder solche deren Raumklima von den normalen Wohnraumbedingungen abweicht, können nicht freigegeben werden. Weitere Einschränkungen beziehen sich auf spezielle Bauteile, wie z. B. begrünte oder bekieste Dachkonstruktionen, erdbeberührte Bauteile, Bauteile die an unbeheizte Räume angrenzen etc. Für solche Fälle ist eine hygrothermische Simulation die einzige Möglichkeit, den Feuchteschutznachweis zu erbringen.

3.1.1 Nachweisfreie Konstruktionen

Für den Holzbau sind in der DIN 4108-3 [31] folgende nachweisfreie Konstruktionen aufgeführt:

- Wände in Holzbauart nach DIN 68800-2 [33],
- Holzfachwerkwände mit raumseitiger Luftdichtheitsschicht,
- belüftete und nicht belüftete Dächer mit Dachdeckung oder Dachabdichtung.

3.1.1.1 Holzfachwerkwände

Für Holzfachwerkwände mit raumseitiger Luftdichtheitsschicht sind Beispiele für drei Arten der Wärmedämmung aufgeführt. Für den Einsatz einer wärmedämmenden Ausfachungsmaterialien gilt für den Dampfdiffusionswiderstand der raumseitigen Bekleidung ein enger Bereich: $1 \text{ m} \leq s_{\text{di}} \leq 2 \text{ m}$. Diese Einschränkung soll auf der einen Seite einen gewissen Schutz vor der winterlichen Tauwasserbildung gewährleisten. Auf der anderen Seite soll eventuell durch die Fugen zwischen Fachwerk und Ausfachung eingedrungenes Regenwasser auch zur Raumseite hin austrocknen können.

Das Anbringen einer Innendämmung über Fachwerk und Gefach ist gemäß Stufe 1 (nachweisfreie Bauteile) nur zulässig, wenn keinerlei Schlagregenbeanspruchung vorliegt. Da eine Innendämmung die Austrocknung sowohl nach außen (Temperaturabsenkung) als auch nach innen verringert, soll durch diese Maßgabe eine Schädigung der Konstruktion durch die Innendämmung ausgeschlossen werden. Zum Schutz vor winterlichem Tauwasser wird außerdem der zulässige Wärmedurchlasswiderstand der Innendämmung auf $0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ begrenzt bzw. auf $1,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, sofern für den Dampfdiffusionswiderstand des Innendämmsystems gleichzeitig dieselbe Bereichseinschränkung wie bei der vorher genannten Bekleidung gilt.

Zusätzlich wird betont, dass das Einströmen von Raumluft in bzw. hinter die Innendämmung durch geeignete Maßnahmen zu unterbinden ist. Dies wird deshalb besonders erwähnt, da hier eine Zirkulation von Raumluft hinter der Innendämmung vom Decken- zum Fußbodenbereich eine Gefahr darstellt. Eine vollflächige Verklebung der Innendämmung und gleichzeitig eine dauerhaft luftdichte Ausführung der Anschlussbereiche zwischen Decke bzw. Fußboden und dem Innendämmsystem würde hier zwar Abhilfe schaffen, bei Fachwerkkonstruktionen stellt dies aber meist eine besondere Herausforderung dar. Die günstigste aber gleichzeitig durch die Kaschierung der Fachwerkfassade die umstrittenste Art der Wärmedämmung ist die Außendämmung. Hier kann sowohl ein genormtes Wärmedämm-Verbundsystem als auch ein Wärmedämmputz verwendet werden, wobei der Dampfdiffusionswiderstand den s_{de} -Wert von 2 m nicht überschreiten darf. Als Alternative ist auch eine hinterlüftete Außenwandbekleidung zulässig.

3.1.1.2 Dächer in Holzbauweise

Auf belüftete Dächer wird hier nicht eingegangen, da sich in diesem Bereich seit Jahrzehnten kaum etwas verändert hat und solche Konstruktionen aufgrund von Insektenzugänglichkeit und dem damit verbundenen meist notwendigen chemischen Holzschutz zu vermeiden sind. Bei den unbelüfteten Dächern entsprechen die nachweisfreien Konstruktionen inzwischen weitgehend jenen, die auch für die Gebrauchsklasse GK 0 der DIN 68800-2 [33] zusammengestellt sind und

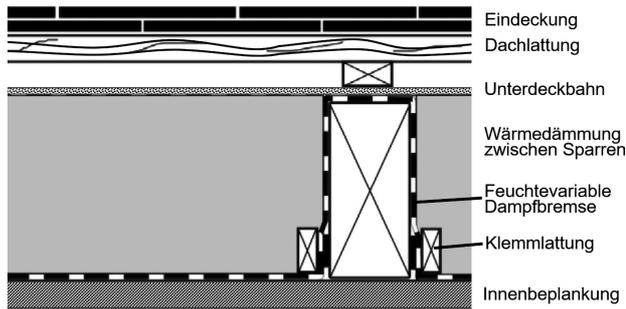


Bild 6. Beispiel für eine Schrägdachsanierung von außen mit einer Umschlaufung der Sparren durch eine feuchtevariable Dampfbremse, die gleichzeitig als Luftdichtheitsebene dient und einer diffusionsoffenen Unterdeckbahn über der Dämmschicht

auf die auch explizit verwiesen wird. Deshalb werden diese Konstruktionen im Abschnitt 3.3 eingehender behandelt. Im Vergleich zur Version von 2014 wurden in [31] außerdem Dämmmaßnahmen von bestehenden Dachkonstruktionen von außen aufgenommen, bei denen die inneren Schichten (z. B. Holzwolle-Leichtbauplatten mit Putz) erhalten bleiben können. Dabei erfolgt, wie in Bild 6 zu sehen, eine Umschlaufung der Sparren durch eine Bahn mit variablem s_d -Wert. Diese Bahn dient einerseits der Luftdichtheit, andererseits der Regulierung der Dampfdiffusion. Deshalb muss sie unter trockenen Bedingungen (Umgebungsfeuchte von 25% r. F.) einen Diffusionswiderstand von $s_d \geq 2$ m und unter feuchten Bedingungen (90% relative Feuchte) einen s_d -Wert $\leq 0,5$ m aufweisen. Weitere Details zu diesen nachweisfreien Dächern in Bezug auf die Anforderungen an die äußeren Schichten sowie Aufsparren-Dämmsystemen sind [31] zu entnehmen. Dieses Beispiel zeigt, wie eine neue Sanierungsvariante, deren feuchtetechnische Funktionsfähigkeit ursprünglich nur durch eine zweidimensionale hygrothermische Simulation nachgewiesen werden konnte [34], im Lauf der Zeit durch positive Praxiserfahrungen zu einer nachweisfreien Konstruktion geworden ist.

Dieser Weg vom hygrothermischen Simulationsnachweis zur nachweisfreien Konstruktion im Sinn der DIN 4108-3 wurde in letzter Zeit für eine ganze Reihe von Bauteilen erfolgreich durchgeführt. Es sei aber darauf hingewiesen, dass bei Abweichungen zu den Normvorgaben wieder eine hygrothermische Simulation durchzuführen ist.

Ein verbleibender Unterschied zwischen den Konstruktionen der GK 0 in der DIN 68800-2 und den nachweisfreien Konstruktionen in der DIN 4108-3 war die oberste Grenze für den äußeren s_{de} -Wert von diffusionsoffenen Holzkonstruktionen ohne äußere Zusatzdämmung. Die Normen haben sich mittlerweile aber angeglichen. In der Holzschutznorm ist jetzt nur noch eine Erweiterung enthalten, die an bestimmte Bedingungen geknüpft ist (siehe Abschnitt 3.3).

3.1.2 Nachweis mithilfe des Periodenbilanzverfahrens nach Glaser

Die Bauphysik hat sich im Wesentlichen aus experimentellen Untersuchungen und empirischen Erfah-

rungen entwickelt. Während numerische Rechenverfahren auf den Gebieten der Tragwerksplanung und der Energieoptimierung bereits seit langem zum Standardrepertoire von Bauingenieuren gehören, setzen viele Planer nach wie vor auf die in den 50er Jahren von Glaser entwickelte [35] stationäre Dampfdiffusionsberechnungsmethode, um ihren Feuchteschutznachweis zu erbringen. Deshalb ist dieser vereinfachte Diffusionsnachweis auch noch ein Teil der DIN 4108-3 geblieben und wird dort als Stufe 2 bezeichnet, die allerdings mit einigen wesentlichen Einschränkungen bei der Anwendung versehen wurde. Das sogenannte Glaser-Verfahren betrachtet ausschließlich die Tauwassergefahr durch Diffusion unter winterlichen Bedingungen, also nur einen Bruchteil der unter 2.1 beschriebenen Feuchtebeanspruchungen. Es arbeitet vereinfacht mit stationären Randbedingungen für Temperatur und Luftfeuchte und vernachlässigt alle wärme- und feuchtetechnischen Speicherphänomene sowie den Feuchte-transport durch Kapillarleitung, die bei vielen Situationen eine wichtige Rolle spielen. Aus den genannten Gründen stellt die DIN 4108-3 auch im Anwendungsbereich der Norm klar, dass die vereinfachte Diffusionsbilanz nicht die realen physikalischen Vorgänge in ihrer tatsächlichen zeitlichen Abfolge abbildet.

Da der Schlagregenschutz nicht mithilfe der stationären Dampfdiffusionsbetrachtung beurteilt werden kann, gibt es in der DIN 4108-3 einen gesonderten Abschnitt, der entsprechende Vorgaben macht, die eine Außenwandkonstruktion einzuhalten hat. Da sie jedoch seit Jahrzehnten nicht angepasst wurden und nur durch Fußnoten auf eventuelle Problemfelder verwiesen wird, ist allerdings fraglich, inwieweit die Einhaltung dieser Anforderungen einen sicheren Schlagregenschutz gewährleistet. Im Übrigen wurde der Abschnitt zum Schlagregenschutz bisher als einziger Abschnitt der Norm nicht bauaufsichtlich eingeführt.

In der Fassung der DIN 4108-3 von 2014 wurden gegenüber früher neue Randbedingungen für die Tau- und für die Verdunstungsperiode festgelegt. Da die alten Randbedingungen allerdings über mehrere Jahrzehnte Bestand hatten, bilden sie oft noch die Basis für Ansätze und Empfehlungen in anderen Normen und Richtlinien. Die neuen Randbedingungen wurden kreiert, um die Vorgaben der „Euroglasernorm“ DIN

EN ISO 13788 [36] zu erfüllen (zumindest soweit der Normungsausschuss das als erforderlich ansah). Dabei ging man davon aus, dass für die Tauwasserbildung und die anschließende Verdunstung in erster Linie die Winter- bzw. Sommermonate eine Rolle spielen, während die Übergangszeiten von untergeordneter Bedeutung sind. Deshalb werden die Diffusionsberechnungen nicht, wie in der europäischen Vorlage, auf der Basis von Monatsmittelwerten durchgeführt. Stattdessen werden die Wintermonate zu einer 90-tägigen Tauperiode (Außenluftbedingungen $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 80 % r. F.; Raumluftbedingungen $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 % r. F.) und die Sommermonate zu einer 90-tägigen Verdunstungsperiode (Dampfdruck von Raum- und Außenluft 1200 Pa) zusammengefasst. Dadurch ist es gelungen, das neue Verfahren, das jetzt Periodenbilanzverfahren heißt, ähnlich aussehen zu lassen, wie das alte Verfahren.

Der Vergleich mit den früheren Blockrandbedingungen zeigt nur bei der Außenlufttemperatur eine leichte Anhebung von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Allerdings ist die Tauperiode bei den neuen Randbedingungen um 50 % länger. Bei der Verdunstungsperiode wird darauf verzichtet, die Temperaturen und relativen Luftfeuchten anzugeben. Hier werden nur noch die Wasserdampfpartialdrücke als Randbedingungen definiert. Das hat den Vorteil, dass es auf dem Papier nicht mehr zu einer Überschneidung von Dampfdruck und Sättigungsdampfdruck kommen kann. Die inneren und äußeren Wasserdampfpartialdrücke sind wie bisher gleich groß. Sie wurden jedoch von 982 Pa auf 1200 Pa angehoben, was beispielsweise bei einer Luftfeuchte von 70 % einer Temperatur von ca. $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ entspricht. Ebenfalls angepasst wurden die Partialdrücke in den Tauwasserebenen für Wände und Dächer (1700 Pa bzw. 2000 Pa), wobei für verschattete oder die Sonnenstrahlung reflektierende Dächer die Randbedingungen für Wände anzusetzen sind. Vergleichsuntersuchungen mit alten und neuen Randbedingungen in [37] haben für verschiedene Wand- und Dachkonstruktionen im Großen und Ganzen ähnliche Beurteilungen ergeben. Allerdings gibt es auch Beispiele für unterschiedliche Ergebnisse. Wenn beispielsweise in einer Konstruktion erst bei Außentemperaturen unter $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tauwasser ausfällt, dann sind die alten Randbedingungen kritischer. Fällt Tauwasser über $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ aus, dann können die neuen Randbedingungen etwas kritischer sein, weil die Tauperiode länger andauert. Eine Anpassung dieser Randbedingungen an andere Gebäudenutzungs- oder Außenklimabedingungen ist unzulässig, da es sich beim Periodenbilanzverfahren um ein modellhaftes Nachweis- und Bewertungsverfahren handelt, das nicht die realen physikalischen Vorgänge und hygrothermischen Beanspruchungen abbildet.

Die DIN 4108-3 hat in ihrer aktuellen Form vom Oktober 2018 die Vorgaben für die Glaserberechnung in der DIN EN 13788 nur in stark abgewandelter Form umgesetzt. Ein Grund war die bisherige Bewertungsmethode, die eine Tauwassermenge und eine Verdunstungsmenge ausweist. Der einfache Nachweis besteht

darin, die beiden Größen miteinander zu vergleichen. Dabei sollte die Verdunstungsmenge die Tauwassermenge möglichst deutlich überschreiten. Das zeigt, dass die errechnete Verdunstungsmenge einen theoretischen Wert darstellt, der physikalisch nicht begründbar ist. Es ist schlichtweg ausgeschlossen, dass aus einer anfangs völlig trockenen Konstruktion mehr Wasser verdunstet als vorher in Form von Tauwasser dort angefallen ist. Deshalb wird in der DIN EN ISO 13788 anders vorgegangen. Dort wird für jeden Monat untersucht, ob es irgendwo in der Konstruktion Tauwasserbildung gibt und deren Menge berechnet. Wenn es zwei oder mehr Tauwasserebenen gibt, ist jede individuell zu bilanzieren. Im nächsten Monat werden die Dampfdrücke in den Tauwasserebenen des Vormonats auf den dort geltenden Sättigungsdampfdruck gesetzt. Falls es jetzt in einer Tauwasserebene zu einer Verdunstung kommt, wird genau berechnet, wohin dieses Wasser diffundiert. Trocknet das Wasser in der betrachteten Tauwasserzone während des Monats aus, muss bestimmt werden, wann dies passiert und der Monat wird unterteilt in eine Periode mit Tauwasser in der betrachteten Ebene (Dampfdruck = Sättigungsdampfdruck) und eine Periode ohne Tauwasser in dieser Ebene. Es kann natürlich sein, dass sich in derselben Konstruktion in einer Tauwasserebene weiteres Tauwasser bildet, während in einer anderen Tauwasserebene bereits Verdunstung stattfindet. Es kann auch sein, dass das Wasser in einer Ebene schneller austrocknet als in einer anderen Ebene. In diesem Fall muss der Monatsschritt weiter unterteilt werden und der beschriebene Vorgang für beide Ebenen angepasst werden. Diese etwas komplizierte Prozedur muss für alle Monate durchgeführt werden und am Ende sind die akkumulierten Mengen zu erfassen und mit den vorgegebenen Grenzwerten zu vergleichen. Außerdem ist der Monat zu ermitteln, indem das Bauteil wieder vollständig austrocknet.

In Anbetracht der Tatsache, dass viele der Einschränkungen auch für die Dampfdiffusion gemäß DIN EN ISO 13788 gelten, ist dieser Aufwand eigentlich nicht zu rechtfertigen. Daher kann man die Weiterentwicklung zum sogenannten Periodenbilanzverfahren aus praktischen Gründen zwar begrüßen. Die andere Alternative, das Glaserverfahren ganz aufzugeben, hätte allerdings auch Vorteile gehabt, wenn man sich die Anwendungseinschränkungen dieser Nachweismethode genauer anschaut. Beispielsweise wurden neben Flachdächern mit Begrünung auch solche mit Bekiesung, Plattenbelägen oder Holzrostern vom Feuchtenachweis mithilfe des Periodenbilanzverfahrens ausgeschlossen. Dasselbe gilt für Holzdachkonstruktionen mit Metalldeckung oder ähnlich dichten Eindeckungen ohne Hinterlüftung der Eindeckung. Außerdem wurden zahlreiche Warnhinweise für Bauteile aufgenommen die durch Schichten mit $s_{d,e} > 2\text{ m}$ begrenzt sind.

Das größte Problem des Periodenbilanzverfahrens nach Glaser ist jedoch die Tatsache, dass die Ergebnisse nicht immer auf der sicheren Seite liegen. Dies gilt

vor allem für Konstruktionen, die ein geringes Trocknungspotenzial besitzen. Wie in Abschnitt 2.1.6 dargestellt, ist es unmöglich, eine Holzkonstruktion vollständig luftdicht auszuführen, d. h. eine gewisse Menge an Feuchte gelangt durch die sogenannte Dampfkongvektion immer in ein Außenbauteil. Deshalb wird seit 2012 in der DIN 68800-2 [33] die Berücksichtigung einer Trocknungsreserve gefordert. Das ist die Menge an Feuchte von der vermutet wird, dass sie während der Tauperiode über Konvektion zusätzlich zur Feuchte aufgrund von Dampfdiffusion eindringt. Die Trocknungsreserve dient dazu, kleine Feuchteinträge durch Kriechströmungen sowie die Auswirkungen der Anfangsfeuchte von Holzbauteilen abzubilden. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Bauteil gemäß dem Stand der Technik handwerklich sorgfältig ausgeführt wurde. Für Außenwände und Decken setzt die DIN 68800-2 eine Trocknungsreserve von 100 g/m^2 und für Dächer von 250 g/m^2 an. Diese Trocknungsreserve wird zur Tauwassermenge durch Dampfdiffusion addiert und die Summe aus beiden mit der Verdunstungsmenge verglichen. Bleibt die Verdunstungsmenge größer, ist das Bauteil in Ordnung. Ist sie kleiner als die Summe aus Tauwassermenge und Trocknungsreserve, fällt die Konstruktion durch (siehe Abschnitt 3.3).

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt auch die „Eurogläsernorm“ DIN EN ISO 13788 [36]. Dort heißt es in Abschnitt 1-7 „Berechnung des Trocknungsvorgangs von Bauteilen“: *Dieser Abschnitt enthält ein Verfahren zur Bestimmung des Trocknungspotenzials von Bauteilen, insbesondere solchen, die durch Schichten mit hohem Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand wie Folien, Membranen oder Beschichtungen mit $s_d > 2 \text{ m}$ begrenzt sind.* In der Anmerkung wird erklärt: *Materialschichten können durch Rohbaufeuchte, während der Bauphase gefallenen Regen, eine Undichtheit in den Versorgungsleitungen, einen Schaden an einer wetterfesten Schicht oder ein inzwischen behobenes früheres Problem mit Tauwasserbildung im Bauteilinneren befeuchtet worden sein.* Die Dampfkongvektion wird hier zwar nicht explizit erwähnt, aber das Ziel, die Feuchtetoleranz einer Konstruktion abschätzen, bzw. besonders empfindliche Aufbauten identifizieren zu können, ist klar erkennbar. Dementsprechend wird vorgeschlagen, eine Feuchtemenge von 1 kg/m^2 in die Mitte einer festgelegten Schicht einzubringen und danach die Berechnung mit denselben Randbedingungen, wie beim Tauwasserschutz nachweis, über einen Zeitraum von maximal 10 Jahren fortzusetzen. Als Ergebnis ist anzugeben, wie lange es dauert bis das Bauteil wieder trocken ist, bzw. welche Risiken mit der höheren Feuchte verbunden sein können.

Trotz dieser Maßgabe in der DIN EN ISO 13788 und der Einführung einer Trocknungsreserve für die Glaser-Berechnung in der DIN 68800-2 wurde in der DIN 4108-3 auf einen ähnlichen Ansatz verzichtet. Da die Trocknungsreserve aus dem Holzbau kam, wurde die

Übertragbarkeit auf andere Konstruktionsarten bezweifelt. Es ist zwar richtig, dass es in diesem Zusammenhang wenig Erkenntnisse mit einer solchen Reserve bei anderen Konstruktionen gibt. Allerdings ist davon auszugehen, dass Fehlstellen auch hier die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen können. Für den Holzbau hat sich das Verfahren der Trocknungsreserve jedenfalls in den letzten 20 Jahren bewährt und ist seit 10 Jahren in der Holzschutznorm verankert. Die Alternative wäre direkt zur hygrothermischen Simulation überzugehen. Da dies sicher nicht für alle Planer eine gangbare Option darstellt, ist der Normenausschuss bestrebt, die Liste der nachweisfreien Konstruktionen (Stufe 1) beständig zu erweitern.

3.1.3 Feuchteschutz nachweis durch hygrothermische Simulation

Bei der hygrothermischen Simulation wird das dynamische Temperatur- und Feuchtverhalten von Baukonstruktionen in Abhängigkeit von den wechselnden Randbedingungen realitätsnah abgebildet. Das hat den Vorteil, dass alle vorher genannten Wärme- und Feuchtetransportphänomene sowie eventuelle Quellen und Senken in ihren Auswirkungen berücksichtigt werden können. Die Durchführung einer hygrothermischen Simulation ist allerdings komplizierter als eine Glaser-Berechnung und erfordert mehr Eingangsdaten, die nicht immer alle vorhanden sind. Außerdem sollte der Anwender eine gewisse Erfahrung im Umgang mit numerischen Berechnungsmethoden mitbringen. Die Möglichkeiten und Grenzen der hygrothermischen Simulation sowie ihre Anwendung zur Feuchteschutzbeurteilung sind Gegenstand der DIN EN 15026 „Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation“ [38]. Sie basiert auf den Inhalten des WTA-Merkblatts 6-2 „Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse“ von 2001 (aktualisierte Fassung Dez. 2014 [39]).

Eingaben, Durchführung der hygrothermischen Simulation und Ergebnisbewertungen sind im normativen Anhang D der DIN 4108-3 beschrieben. Der Inhalt dieses Anhangs umfasst:

- Allgemeines,
- Klimadatensätze, raumseitige Randbedingungen und Oberflächenübergang,
- Anfangsbedingungen, z. B. Rohbaufeuchte,
- Feuchtequellen aufgrund von Luftkongvektion oder Schlagregenpenetration durch Leckagen,
- Beurteilung der Simulationsergebnisse,
- Wahl geeigneter Simulationsverfahren, Fehlerkontrolle, Dokumentation.

Am Anfang wird darauf hingewiesen, dass die Auswahl der Eingabedaten und die Beurteilung der Berechnungsergebnisse entsprechende Fachkenntnis und Erfahrung erfordern. Ungeübte Anwender sollten daher

zunächst versuchen, den Nachweis über die beiden anderen Nachweisstufen zu erbringen und sich, falls diese nicht anwendbar sind oder zu ungenügenden bzw. unwirtschaftlichen Ergebnissen führen, möglichst genau die Vorgaben des Anhang D zu befolgen. Es wird außerdem empfohlen, die physikalischen Modellansätze und Lösungsverfahren für Simulationswerkzeuge im WTA-Merkblatt 6-2 [39] zu verwenden.

In begründeten Fällen sind Abweichungen von den Randbedingungen des Anhangs D zulässig. Diese sind so zu dokumentieren, dass die Simulation von Fachleuten nachvollzogen werden kann. Das bedeutet zweierlei: Erstens können erfahrene Anwender von den Vorgaben in Anhang D abweichen, wenn sie darlegen können, dass die Randbedingungen oder/und das Bewertungsschema für den vorliegenden Fall zu konservativ sind, d. h. zu weit auf der sicheren Seite liegen. Zweitens ist der Anwender frei in der Wahl der Anfangs- und Randbedingungen in Fällen, in denen Nutzung oder Betrieb des Gebäudes nicht durch die Vorgaben in Anhang D abgebildet werden können. Auch in diesem Fall muss die Auswahl der Eingabeparameter allerdings angemessen und gut nachvollziehbar sein.

Der Anhang D ist normativ und wurde 2020 zusammen mit den anderen Teilen der DIN 4108-3, mit Ausnahme des Abschnitts 6 zum Schlagregenschutz von Wänden, vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) bauaufsichtlich eingeführt. Damit kann nun der öffentlich-rechtliche Feuchteschutznachweis für alle Bau- und Gebäudearten geführt werden. Zuvor war dies für viele nachhaltige oder innovative Konstruktionen nicht möglich, wenn sie weder in der Liste der nachweisfreien Konstruktionen enthalten waren, noch mithilfe des Periodenbilanzverfahrens wegen dessen Anwendungseinschränkungen nachweisbar waren. Dazu gehörten z. B. Gründächer, Konstruktionen mit feuchtevariablen Dampfbremsen, kapillaraktive Innendämmsysteme etc. Außerdem konnten keine Bauteile für klimatisierte Gebäude nachgewiesen werden, da sowohl die Liste der nachweisfreien Konstruktionen als auch das Periodenbilanzverfahren nach *Glaser* ausschließlich für nicht klimatisierte Wohn- und wohnähnlich genutzte Gebäude gilt.

Noch schlimmer als einen öffentlich-rechtlichen Feuchteschutznachweis nicht führen zu können ist es jedoch, wenn dieser Nachweis ein unzuverlässiges Ergebnis liefert und hinterher ein Schaden zu beklagen ist. In diesem Fall nützt es dem Planer wenig, wenn er seine *Glaser*-Diagramme vorzeigen kann, die der Konstruktion eine feuchtetechnische Unbedenklichkeit attestieren. Ist es aus dem Stand der Technik bekannt, dass ebendiese Konstruktion als schadensanfällig betrachtet wird, kann es sein, dass der Planer dennoch haften muss. Solche Situationen entstehen meist dadurch, dass beim Normberechnungsverfahren nach *Glaser* ausschließlich die Dampfdiffusion betrachtet wird, während andere relevante Vorgänge, wie z. B. die

in Abschnitt 2.1.6 erwähnte Dampfkonvektion, unberücksichtigt bleiben. Dieses Problem hat allerdings auch die hygrothermische Simulation nach DIN EN 15026. Ein Ausweg aus diesem Dilemma zeigen die neuen Ansätze in WTA 6-2 und WTA 6-8 auf die noch eingegangen wird.

Zum Abschluss des Abschnitts zur DIN 4108-3 wird mithilfe von Bild 7 die Auswahl der jeweils geeigneten Verfahrensstufe für den Feuchteschutznachweis verdeutlicht. Im einfachsten Fall erfüllt das geplante Bauteil für ein Wohn- oder wohnähnlich genutztes Gebäude die Kriterien für eine nachweisfreie Konstruktion, dann ist der Feuchteschutznachweis erfolgreich erledigt und die Schlagregenschutzanforderungen sind damit ebenfalls erfüllt. Falls das Bauteil nicht nachweisfrei ist und das Periodenbilanzverfahren für dieses Bauteil angewendet werden darf, ist der Weg frei für die Stufe 2. Bei einem positiven Ergebnis ist dann nur noch sicherzustellen, dass auch die Schlagregenschutzkriterien erfüllt sind, dann ist auch hier der Unbedenklichkeitsnachweis erbracht. Fällt das Bauteil allerdings beim Periodenbilanzverfahren durch oder werden die Schlagregenschutzkriterien nicht erfüllt, kann immer noch ein Nachweis durch hygrothermische Simulation erfolgen. In diesem Fall sollte jedoch überprüft werden, ob die unterschiedlichen Ergebnisse auf Unzulänglichkeiten der Beurteilungsverfahren der Stufe 2 zurückzuführen sind, oder sich das feuchtetechnische Verhalten des Bauteils im kritischen Grenzbereich befindet und deshalb die letzte Hürde gerade so genommen hat.

Aus dem Flussdiagramm in Bild 7 wird auch deutlich, dass die Stufe 3, die hygrothermische Simulation, in allen Fällen anwendbar ist. Das hat den Vorteil, dass sich versierte Planer von vorneherein darauf konzentrieren können ohne sich mit den Spezifikationen und Einschränkungen der anderen beiden Stufen auseinandersetzen zu müssen. Außerdem besteht in der Stufe 3 auch die Möglichkeit, die Auswirkungen der Baufeuchte und die Feuchtetoleranz von Bauteilen bei Vorhandensein kleiner Fehlstellen analysieren zu können. Letzteres ist gerade im Holzbau von unschätzbarem Wert, denn in einem Schadensfall wird es immer darum gehen, ob die Planung oder die Ausführung die größeren Mängel zu verantworten hat. Aufgrund der gestiegenen Bedeutung der hygrothermischen Simulation für den Feuchteschutznachweis beschäftigt sich der folgende Abschnitt mit der Frage nach dem Hintergrund der Simulationsmodelle und nach der Auswahl geeigneter Inputparameter sowie der Interpretation und der Beurteilung der Ergebnisse.

DIN 4108-3 (2018)

Feuchtetechnische Prüfverfahren

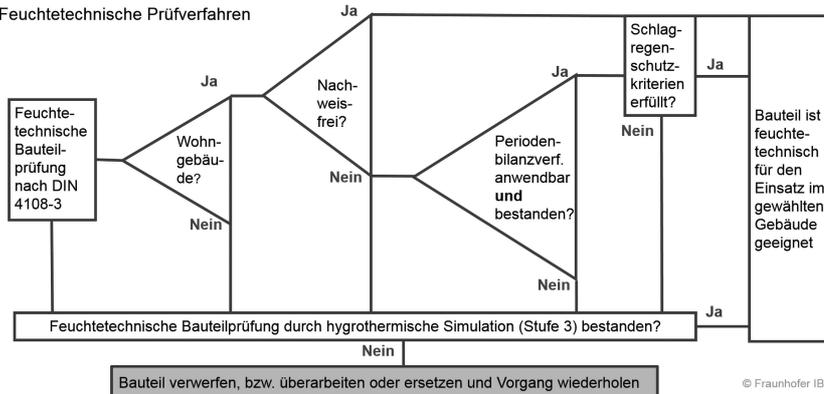


Bild 7. Flussdiagramm zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei der Stufenauswahl zur Feuchteschutzbemessung von Außenbauteilen

3.2 Grundlagen, Normen und Richtlinien zur hydrothermischen Simulation

Die wesentlichen Grundlagen der hydrothermischen Simulation und die erforderlichen Inputparameter sind in der DIN EN 15026 zu finden. Sie schreibt die Berücksichtigung folgender Transfermechanismen zur Abbildung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse in porösen Stoffen und daraus zusammengesetzten Systemen vor:

- Wärmespeicherung des trockenen Baustoffes und des absorbierten Wassers,
- Wärmetransport durch feuchteabhängige Wärmeleitung,
- Wärmeübertragung durch Dampfdiffusion (mit Phasenwechsel, d. h. Verdunstung und Kondensation),
- Feuchtespeicherung durch Wasserdampfsorption und Kapillarkräfte,
- Feuchtetransport durch Dampfdiffusion,
- Flüssigtransport durch Oberflächendiffusion und Kapillarleitung.

Zusätzlich zu den in DIN EN 15026 aufgeführten Transportmechanismen berücksichtigen die heutigen Simulationsmodelle auch die sogenannten Lösungsdiffusion in polymeren Materialien, wie z. B. in feuchtevariablen Dampfbremsen. Sie wird der Dampfdiffusion zugeschlagen und mithilfe eines feuchteabhängigen Diffusionswiderstands berücksichtigt. Da hydrothermische Simulationsmodelle häufig auch zur Berechnung des Feuchteinflusses auf den Wärmedurchgang verwendet werden, sollte auch die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit einbezogen werden. Außerdem ist es zweckmäßig, auch die Eisbildung in feuchten Baustoffen bei Temperaturen unter 0 °C sowie die damit verbundenen Schmelzwärmeeffekte zu berücksichtigen.

Wenn man sich Bild 1 aus dem ASHRAE Handbook of Fundamentals [2] vor Augen führt, dann fällt auf, dass auch der konvektive Dampftransport in der Liste fehlt. Da die Auswirkungen dieses Effekts, wie bereits erläutert, erheblich sein können, ist geplant, dieses Phänomen bei der Neufassung der Norm in vereinfachter Form aufzunehmen. Außerdem kann auch das Eindringen von Regenwasser durch Leckagen in der Gebäudehülle große Auswirkungen haben, sodass es sinnvoll ist, auch diesen Vorgang in irgendeiner Weise zu berücksichtigen. Dabei sollen die Ansätze aus WTA 6-2 [39] als Grundlage dienen, auf die sich bereits der Anhang D der DIN 4108-3 in seinem Teil 6 bezieht. Diese im WTA-Merkblatt als „Hilfsmodelle zur vereinfachten Berücksichtigung spezieller Effekte“ bezeichneten Ansätze werden im folgenden Abschnitt kurz beschrieben, da sie besonders für die Planung feuchtetoleranter Konstruktionen im Holzbau relevant sind. Die erforderlichen Daten und Eingaben zur Durchführung einer numerischen Simulation sind am Beispiel des Programms WUFI® [40] in Tabelle 1 zusammengefasst. Für das Programm Delphin [41] gelten bei den Randbedingungen dieselben Voraussetzungen, bei den erforderlichen Materialkennwerten gibt es gewisse Unterschiede bei den Speicher- und Flüssigtransportfunktionen. An einer Umrechnungsmöglichkeit wird derzeit gearbeitet.

3.2.1 Materialkennwerte für Holz und Holzwerkstoffe

Die erforderlichen hydrothermischen Materialdaten sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt. Hier sollten möglichst die mit dem Simulationswerkzeug mitgelieferten Stoffkennwerte verwendet werden. Falls das gewünschte Material nicht in der Datenbank vorhanden ist, kann man bei ausreichender Erfahrung und Vorhandensein der entsprechenden Messwerte selbst einen Materialdatensatz erstellen. Manchmal bietet es sich

Tabelle 1. Zusammenstellung der für hygrothermische Simulationen mithilfe von WUFI® erforderlichen Eingabedaten

Eingabeparameter	Erforderliche Datensätze oder Angaben
Geometrie	Aufbau des zu berechnenden Bauteils
	numerisches Gitter
Thermische und hygrische Stoffkennwerte sowie -funktionen	Rohdichte ρ und Porosität ϵ
	spezifische Wärmekapazität c
	feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit $\lambda = f(w)$
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ
	evtl. Feuchtespeicherfunktion $dw/d\phi$
Klimaparameter	Lufttemperatur θ
	relative Luftfeuchte ϕ
	kurzwellige Einstrahlung (nur außen) langwellige Gegenstrahlung (nur außen)
	Niederschlag (nur außen)
	Windgeschwindigkeit und -richtung für die Schlagregenberechnung (nur außen)
Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen	Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient
	Strahlungsabsorptionsgrad
	Regenabsorptionsfaktor (nur außen)
Steuerparameter	Anfangsbedingungen (Feuchte- und Temperaturprofil)
	Zeitschritte, Berechnungszeitraum
	Rechengenauigkeit

auch an, einzelne, nicht genau bekannte Kennwerte in einem Materialdatensatz gezielt zu variieren, um die Auswirkungen der Veränderungen auf das Simulationsergebnis zu ermitteln. Eine solche Parameterstudie kann dabei helfen, den Einfluss der Messgenauigkeit oder der natürlichen Materialschwankungen einzelner Komponenten auf das feuchteteknische Verhalten eines ganzen Bauteils zu analysieren und dadurch die wesentlichsten Materialparameter zu identifizieren.

3.2.1.1 Feuchtespeicherung

Holz und Holzwerkstoffe weisen im unbehandelten Zustand eine besonders hohe Hygroskopizität auf, d. h. sie können Feuchte in ihrer Poren- und Faserstruktur bei steigender Umgebungsluftfeuchte speichern und später wieder abgeben. Bild 8 zeigt die Feuchtespeicherfähigkeit von Holz im Vergleich zu Beton und Ziegel – die Kurve für Holz liegt dabei fast über den gesamten Feuchtebereich deutlich über denen der beiden mineralischen Baustoffe. Dies belegt, dass Holz als feuchtepufferndes Material besonders gut geeignet ist und somit auch für ein besonders gutes und feuchtestabiles Raumklima sorgt [42].

Die Sorptionsfeuchte von Holz und Holzwerkstoffen kann in der Klimakammer bei verschiedenen Stufen

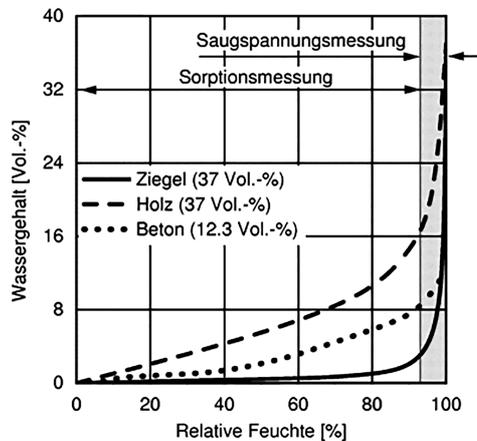


Bild 8. Gleichgewichtsfeuchtegehalt (Sorptionsfeuchte) von Ziegel, Beton und Holz in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte

gemessen und die Feuchtespeicherfunktion entsprechend durch diese Stützpunkte gelegt werden. Dabei sind Messwerte bis etwa 90 % r. F. möglich. Bei höheren Werten wie z. B. 93, 95 oder 97 % r. F. kann die

Sorptionsfeuchte noch im Exsikkator über einer gesättigten Salzlösung bestimmt werden, über der sich die jeweils zu untersuchenden relativen Luftfeuchten meist sehr genau einstellen. Da im Bereich zwischen 95 und 97% r. F. holzerstörende Pilze im Holz zu wachsen beginnen und dieses ggf. auch abbauen können, ist es wichtig, Messwerte auch bis zu diesem kritischen Feuchteniveau zu ermitteln, um eine möglichst zuverlässige Bewertung der Materialien zu ermöglichen.

Schwierig wird die Messung der Feuchtespeicherung von Holz und Holzwerkstoffen bei noch höheren Feuchtehalten, da diese nur noch durch Kontakt der Materialien mit flüssigem Wasser ermittelt werden können. Hier treten jedoch häufig Quellvorgänge sowie u. U. auch Schimmel und Pilzwachstum im Labor auf, wodurch die Messungen unzuverlässig und die Definitionen der Parameter, z. B. durch eine Veränderung des Bezugsvolumens, ungenau werden. Hier ist auf der einen Seite eine entsprechend große Erfahrung sowie eine genaue Kenntnis der Materialmodelle erforderlich, um zuverlässige Datensätze erstellen zu können. Auf der anderen Seite können gewissen Ungenauigkeiten jenseits der Gleichgewichtsfeuchtegehalte von 97% r. F. aber toleriert werden, da diese für die eingesetzten Materialien sowieso nicht längere Zeit überschritten werden sollen.

Die Feuchtespeicherfunktion hängt bei ähnlich gebundenen und hydrophobierten Materialien im Wesentlichen an der Rohdichte des Materials. Liegt bei doppelter Rohdichte die doppelte Menge an sorptionsfähigem Material vor, steigt auch die volumenbezogene Sorptionsfeuchte analog auf den doppelten Wert. Lediglich nahe der freien Sättigung geht dieser Zusammenhang verloren, da dann ggf. auch Hohlräume zwischen den Fasern mit Wasser gefüllt werden und damit die Porosität des Materials an Einfluss gewinnt. Bis in den relevanten Bereich von etwa 97% r. F. ist dementsprechend aber eine Umrechnung der Sorptionsfeuchte anhand der Rohdichte innerhalb eines Materialtyps möglich.

3.2.1.2 Feuchtetransport dampfförmig und flüssig

Holz selbst weist vor allem in Faserrichtung einen gewissen Flüssigtransport auf, der in Einzelfällen relevant für das Feuchteverhalten, besonders bei Anschlussdetails wie z. B. bei ins Mauerwerk einbindendem Balken, werden kann. Meist liegen in den Simulationsmodellen Datensätze für die üblichen Holzarten, vor allem Weichholz wie Kiefer oder Fichte, mit richtungsabhängigen Parametern vor, die für solche Spezialfälle herangezogen werden können. Bei den meisten normalen Einbausituationen spielt der Flüssigtransport im massiven Holz aber nur eine untergeordnete Rolle, da der Regenschutz i. d. R. konstruktiv gelöst wird, der Diffusionswiderstand im Holz selbst so hoch ist, dass es kaum zu Feuchteanreicherungen kommt und allgemein der Feuchtegehalt auf ein Niveau begrenzt werden sollte, bei dem der Flüssigtransport noch eher schwach ist.

Bei Plattenwerkstoffen macht sich der Flüssigtransport bei einigen Materialien indirekt dadurch bemerkbar, dass er im höheren Feuchtebereich den Dampfdiffusionstransport überlagert und die Materialien dadurch vermeintlich dampfdurchlässiger werden. In Holzwerkstoffen kann je nach Art des Bindemittels und eventuell vorhandener Zusatzstoffe der Flüssigtransport stärker (wie z. B. bei kapillaraktiven Innendämmplatten) oder auch schwächer als bei Holz (wie bei den meisten hydrophobierten Holzfaserdämmstoffen oder Werkstoffplatten mit Leimbindung) ausfallen. Wie bei der Feuchtespeicherfähigkeit besteht ein gewisser Zusammenhang mit der Rohdichte, da diese u. a. mit der Masse der für den Flüssigtransport zur Verfügung stehenden Holzfasern korreliert.

Ohne direkten Kontakt mit Wasser wirkt sich der Flüssigtransport in Holzbauteilen i. d. R. günstig auf das hygrothermische Verhalten der Materialien aus, da Wasser aus den Bereichen, an denen es sich z. B. durch Diffusionsprozesse und Tauwasserbildung anreichern würde, wieder zurückgeleitet werden kann. Liegen gemessene Daten für ein spezifisches Material vor, können diese entsprechend verwendet werden. Ist dies nicht der Fall, sollte der Flüssigtransport im Zweifel vernachlässigt werden, was bei der Bemessung zu Ergebnissen führt, die auf der sicheren Seite liegen. Ausnahmen stellen frei bewitterte Bauteile, wie z. B. WDVS mit Holzfaser-Putzträgerplatten dar. In diesen Bereichen sollten aber ausschließlich Materialien eingesetzt werden, die allenfalls einen sehr schwachen Flüssigtransport aufweisen sowie besonders feuchteunempfindlich und damit für diesen Anwendungsbereich geeignet und zugelassen sind. Im hohen Feuchtebereich ergeben sich für die Messung der Flüssigtransporteigenschaften im Übrigen die gleichen Schwierigkeiten wie bei der Messung der Feuchtespeicherfunktion: Klare Messvorschriften und einheitliche Definitionen gibt es noch nicht und Quellvorgänge sowie eventuell auftretender mikrobieller Bewuchs beeinträchtigen die Genauigkeit.

3.2.1.3 Diffusionswiderstand

Der Diffusionswiderstand wird üblicherweise im Dry-Cup-Verfahren in der Klimakammer gemessen. Dabei herrscht am Prüfkörper ein Differenzklima zwischen der Klimakammer mit üblicherweise 50% r. F. bei etwa 20 bis 23 °C und fast trockenen Bedingungen bei 0 bis 5% r. F. über dem Trocknungsmittel im Prüfgefäß (daher der Name). Bei diesen Bedingungen stellt sich ein Feuchtestrom aus der Klimakammer durch den Probekörper in das trockene Gefäß ein, der über Diffusionsfläche und Dicke des Probekörpers in den Diffusionswiderstand des Materials umgerechnet werden kann. Da bei Holz und Holzwerkstoffen der Flüssigtransport bereits bei vergleichsweise niedrigen Feuchtegehalten von etwa 60 bis 70% r. F. einsetzt, überlagert er bei Plattenwerkstoffen (bei denen i. d. R. kein nennenswertes Temperaturgefälle auftritt) den Diffu-

sionstransport im Feuchtbereich. Aufgrund dieses Effekts werden Holz und Holzwerkstoffplatten oft auch als Materialien mit feuchtevariablem Diffusionswiderstand angesehen. Auch wenn dies im engeren Sinne nicht ganz korrekt ist, bietet es sich an, dieses Verhalten auch bei den hygrothermischen Materialkennwerten nicht explizit über den Flüssigtransport, sondern vereinfacht über einen variablen Dampfdiffusionswiderstand zu berücksichtigen. Dementsprechend sollte hier neben der Dry-Cup-Messung zusätzlich auch eine Wet-Cup-Messung durchgeführt werden. Diese ermittelt den Diffusionswiderstand im Feuchtbereich bei wiederum 50 % r. F. in der Klimakammer, nun aber etwa 95 % r. F. über einer gesättigten Salzlösung im Prüfgefäß.

Nicht sinnvoll ist diese Vorgehensweise bei Materialien, die üblicherweise eine Dämmfunktion übernehmen und auch in größeren Schichtdicken eingebaut werden. Im Unterschied zu dünnen Plattenwerkstoffen, bei denen ohne Temperaturgradient Dampf- und Flüssigtransport gleichgerichtet sind, verlaufen die beiden Transportvorgänge mit Temperaturgradient einander entgegengesetzt. Der Flüssigtransport würde durch diese vereinfachte Vorgehensweise z. B. bei einer kapillaraktiven Innendämmung die Feuchteanreicherung im Dämmstoff nicht durch Rückleitung bremsen oder kompensieren, sondern im Gegenteil sogar noch verstärken. Dementsprechend muss bei dickeren, dämmenden Materialien auf eine separate Berücksichtigung der beiden Transportvorgänge geachtet werden.

3.2.1.4 Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

Auf die wärmetechnischen Materialparameter soll hier nur kurz insoweit eingegangen werden, als diese durch die Feuchte ebenfalls und u. U. auch maßgeblich mit beeinflusst werden können.

Die Wärmeleitfähigkeit ist für Holz- und Holzwerkstoffe in der Regel bekannt und die Parameter sind in den Materialdatenbanken bzw. den Datenblättern der Hersteller angegeben. Zu den reinen Labormesswerten kommen in Deutschland allerdings Zuschläge hinzu, die die durch Feuchtwechsel bedingten Latentwärmeeffekte berücksichtigen bzw. kompensieren sollen. Durch die reine Messung im Labor ist es bei diffusionsoffenen Materialien aber schwierig bis unmöglich, zwischen der reinen Wärmeleitung und dem parallel auftretenden Wärmetransport durch Dampftransport mit Phasenwechsel (also Verdunstung und Kondensation) zu unterscheiden. Da die Materialien bei der Messung üblicherweise einfach bei Raumklima konditioniert werden, sind die Latentwärmeeffekte bei der nur vermeintlich trockenen Labormessung bereits enthalten. Anstatt den Messwert aber entsprechend abzumindern, wird der Feuchteeinfluss in Form des Zuschlags nochmals aufgeschlagen. Diese Vorgehensweise führt oft zu ungerechtfertigt hohen Wärmeleitfähigkeiten solcher Produkte [23]. Diese Thematik wird derzeit im Rahmen eines Forschungsprojekts der

Holzforchung Austria und des Fraunhofer IBP nochmals in Labor und Freiland überprüft. Ziel ist, möglichst realistische Bemessungswerte für die Wärmeleitfähigkeit von Naturfasermaterialien zu ermitteln und überhöhte Zuschlagswerte abzubauen.

Während sich die Latentwärmeeffekte bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit negativ auswirken, führen sie bei Messung der Wärmekapazität zu einer positiven Erhöhung der Werte sorptionsfähiger Dämmstoffe. Die höhere Wärmekapazität von Naturfaserdämmstoffen wird immer wieder als Vorteil gegenüber konventionellen Dämmstoffen wie Hartschaum oder Mineralwolledämmung angeführt. Begründung: Die höhere thermische Trägheit der Materialien wirkt einer schnellen Erwärmung oder Abkühlung, also dem sogenannten Barackenklima, entgegen und verbessert damit das Raumklima. Im Prinzip stimmt diese Aussage – allerdings ist dabei darauf zu achten, dass die Wärmekapazität von vollständig trockenem Holz im Bereich von etwa 1400 J/(kg K) liegt – früher angegebene mitunter deutlich höhere Werte (in Einzelfällen bis zu 2000 J/(kg K)) wurden an Materialien ohne Vortrocknung oder sogar mit erhöhten Feuchtegehalten ermittelt, sodass nicht nur die Wärmekapazität des Materials sondern zusätzlich die Latentwärmeeffekte, in diesem Fall die Verdunstungskühlung beim Desorbieren der Feuchte von den Fasern, mitgemessen und fälschlicherweise der Wärmekapazität zugeschlagen wurden. Zwar findet dieser Effekt auch im Einbauzustand bei Erwärmung in gewissem Umfang statt. Allerdings wird er bei hygrothermischen Simulationen sowieso mitberücksichtigt und darf daher nicht durch ungenaue Messdaten gedoppelt oder sogar ausgehend von zu feuchten Materialien überhöht in die Ergebnisse eingehen. Von daher ist es wesentlich, bei solchen Messungen möglichst genau zwischen trockener Wärmekapazität und durch Feuchtwechsel beeinflusster Latentwärme zu unterscheiden.

Weiterhin ist zu beachten, dass die ersten Holzfaserdämmstoffe noch vergleichsweise hohe Rohdichten aufwiesen, sodass nicht nur die Wärmekapazität selbst, sondern auch die Masse der Dämmstoffe i. d. R. deutlich höher als bei konventionellen Dämmstoffen lag. Beides zusammen konnte die thermische Trägheit von Konstruktionen, die mit solchen Materialien gedämmt waren, durchaus positiv beeinflussen. Die Rohdichten der Materialien haben allerdings inzwischen weiter abgenommen und Untersuchungen [44] haben gezeigt, dass der diesbezügliche Vorteil des Einsatzes solcher Materialien in realistischen Einbausituation oft nur geringfügig ist.

3.2.1.5 Generische Datensätze für Holzwerkstoffe

Die beschriebenen Materialeigenschaften liegen für zahlreiche Hölzer und Holzwerk- bzw. Naturfaserdämmstoffe in den Datenbanken der Simulationswerkzeuge vor. Aber es gibt natürlich immer noch viele Produkte, für die die hygrothermischen Materialeigen-

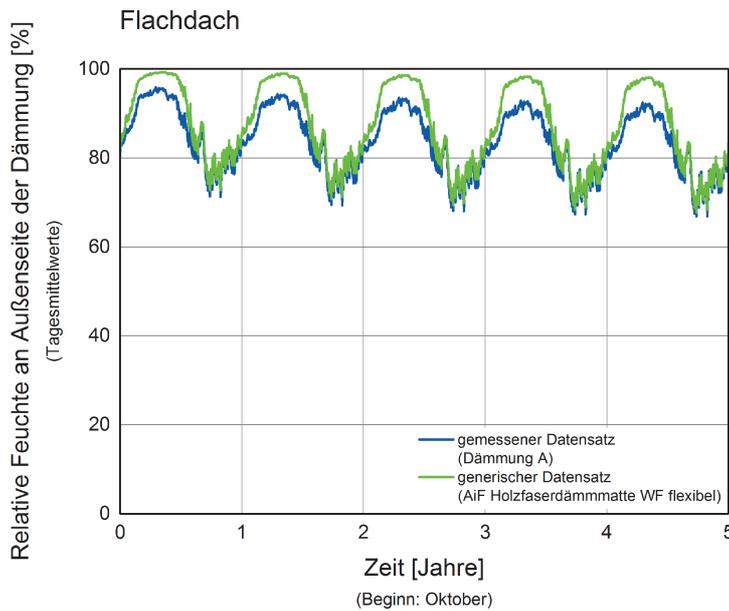


Bild 9. Simulierte Feuchteverhältnisse bei Verwendung des generischen AiF-Datensatzes für eine flexible Holzfaserdämmmatte mit einem exemplarischen produktspezifischen Datensatz „Dämmung A“ für den Einsatz im diffusionsdichten Flachdach. Im unkritischen Feuchtebereich führen die Datensätze zu nahezu deckungsgleichen Ergebnissen, bei höheren Feuchten können die Ergebnisse dagegen etwas stärker divergieren.

schaften nicht oder nicht in vollem Umfang zur Verfügung stehen. Erschwerend kommt hinzu, dass Holz selber als Naturprodukt inhomogen und natürlich je nach Herkunft, Alter und Wachstumsbedingungen gewissen Schwankungen der Eigenschaften unterworfen ist. Auch bei den Holzwerkstoffen macht sich dieser Einfluss noch bemerkbar – außerdem werden hier die Rezepturen immer wieder geändert, was zwar eine Kontrolle der mechanischen, in der Regel aber nicht der bauphysikalischen Parameter nach sich zieht. Da zudem konkrete Produkte in der Planungsphase oft noch gar nicht feststehen, wird eine allgemeingültige Bemessung u. U. schwierig.

Ziel eines AiF-Forschungsvorhabens [77, 78] war es daher zum einen, auf Basis von zahlreichen Labormessungen an Materialien aus den verschiedenen Holzwerkstoff-Produktgruppen, funktionale Zusammenhänge zwischen typischerweise bekannten Größen wie der Rohdichte oder der Partikelgröße des Werkstoffs und seinen bauphysikalischen Eigenschaften herzustellen. Auf diese Weise wird den Herstellern eine einfachere Optimierung ihrer Produkte ermöglicht. Zum anderen sollten repräsentative Datensätze für die verschiedenen Produktgruppen erstellt werden, mithilfe derer eine Bemessung von Bauteilen durchgeführt werden kann. Nur im Einzelfall oder bei besonderen Anforderungen an die Eigenschaften ist es erforderlich, im Anschluss noch eine produktspezifische Bemessung durchzuführen.

Im Zuge des Forschungsvorhabens wurden generische Datensätze für acht Produktgruppen von Holzwerk- und Faserdämmstoffen erstellt, die bei der Beurteilung kritischer Konstruktionen im Vergleich zur Verwendung produktspezifischer Datensätze jeweils etwas auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse erzeugen. Die Materialien können jedoch je nach Einbausitua-

tion, wie z. B. innen oder außen in der Konstruktion, unterschiedlich kritische Parameter aufweisen. Bei der Anwendung im geneigten, nach außen diffusionsoffenen Dach, resultiert die Feuchte in den Materialien vor allem aus dem hohen Luftfeuchteniveau des Außenklimas im Winter, d. h. der Feuchtegehalt wird höher, wenn das Niveau der Sorptionsisotherme steigt. Bei Flachdächern dringt die Feuchte dagegen durch die Dampfbremse vom Innenraum her ein – die eindiffundierende Menge ändert sich kaum mit den Eigenschaften der Materialien oberhalb der Dampfbremse. Das beim belüfteten Dach leicht günstigere hohe Niveau der Sorptionsisotherme führt beim generischen Datensatz dazu, dass die gleiche Feuchtemenge zu einem höheren Anstieg der relativen Feuchte im Außenbereich des Bauteils führt. Relevante Diskrepanzen treten allerdings vor allem dann auf, wenn in den Konstruktionen kritische Feuchtegehalte erreicht werden. Für Produktgruppen mit größerer Streuung der Materialeigenschaften werden jeweils zwei Datensätze zur Verfügung gestellt, die die kritischen Bandbreiten am oberen und unteren Rand repräsentieren. Im hygrothermisch günstigen Bereich können die generischen Datensätze das Verhalten der Bauteile i. d. R. gut repräsentieren (Bild 9).

Die AiF-Datensätze ermöglichen damit also eine einfache und allgemeingültige Bemessung „funktionierender Bauteile“. Bei hygrothermisch günstigen Bedingungen ist von einer guten Übereinstimmung zwischen den generischen und produktspezifischen Materialdaten auszugehen. Dies wurde anhand von zahlreichen Vergleichsberechnungen in [77] belegt. Wenn bei der Simulation mit den AiF-Datensätzen kritische Grenzen überschritten werden, bedeutet dies, dass sich die Konstruktion nicht besonders gutmütig verhält und zumindest keine freie Auswahl bezüglich der Materialien aus

der verwendeten Produktgruppe besteht. Es kann aber mit produktspezifischen Datensätzen überprüft werden, ob mit speziellen Materialien die Funktionsfähigkeit trotzdem sichergestellt werden kann. Für die Analyse von Schadensfällen sind die AIF-Datensätze aufgrund des beschriebenen Verhaltens nur bedingt geeignet.

3.2.2 Rand- und Anfangsbedingungen

3.2.2.1 Außenklimabedingungen

Die Klimadaten sollten als Stundenwerte vorliegen, da eine Mittelwertbildung über längere Zeiträume, vor allem bei den äußeren Klimaparametern, zu ungenauen Ergebnissen führen kann. Die Auswahl der äußeren Klimadatensätze hängt vom Standort des Gebäudes und den erwarteten hygrothermischen Beanspruchungen auf das zu bemessende Bauteil ab. Dabei können auch lokale Besonderheiten berücksichtigt werden, wie z. B. die Nähe zu einem Gewässer, Lage im Tal oder auf dem Berg etc. Die meteorologischen Datensätze sollten alle erforderlichen Klimaparameter enthalten, wobei nicht für jedes Bauteil alle Klimaparameter vorhanden sein müssen. Z. B. braucht man für die Bemessung von Flachdächern mit normaler Abdichtung keine Regendaten, für Gründächer aber schon. Für die Langzeitbeurteilung von Baukonstruktionen sollten keine Daten von extremen Jahren (besonders kalte oder warme Jahre) verwendet werden, da eine Folge extremer Witterungsbedingungen über mehrere Jahre in der Realität nicht auftritt. Hier besteht außerdem die Gefahr, dass bewährte Konstruktionen bei der rechnerischen Beurteilung durchfallen. Will man den Einfluss extremer Witterungsverhältnisse berücksichtigen, dann sollte ein entsprechender Jahresdatensatz in die Reihe durchschnittlicher Datensätze integriert werden.

Hygrothermische Referenzjahre und Lokalklimaanpassung

Für die Außenklimabedingungen werden Klimadaten herangezogen, die die erforderlichen Klimaelemente in für den jeweiligen Standort oder die Region repräsentativer Form enthalten. Dabei sind die sogenannten Testreferenzjahre TRY des Deutschen Wetterdienstes DWD für eine hygrothermische Bemessung nur bedingt geeignet, da sie vor allem auf Basis thermisch typischer Verhältnisse erstellt bzw. ausgewählt wurden, bei denen Luftfeuchte und Regenbelastung nur eine untergeordnete Rolle spielen. Für die hygrothermische Bauteilsimulation werden daher im Anhang D der DIN 4108 [31] die hygrothermischen Referenzjahre HRY des Fraunhofer IBP empfohlen [71, 72], die alle erforderlichen Klimaelemente in geeigneter und repräsentativer Form enthalten. Die regionale Einteilung Deutschlands orientiert sich an der Einteilung des DWD für die TRY-Regionen – die Anzahl der Regionen wurde jedoch gegenüber den TRY auf 11 reduziert werden. Im Gegenzug kann eine weitere Differenzierung, falls im Einzelfall erforderlich, mithilfe von Anpassungen des regionalen Klimadatensatzes

auf die lokalen Verhältnisse erfolgen [72, 73]. Auf diese Weise können vor allem die auch innerhalb der Regionen u. U. sehr unterschiedliche Niederschlags- bzw. Schlagregenbelastung auf Basis der langjährigen Messdaten, die in entsprechenden Klimadaten z. B. seitens des DWD zur Verfügung stehen, aber auch spezifische Einflüsse, die z. B. aus der Lage in einer Stadt oder auf dem Berg resultieren, einfach berücksichtigt werden. Die Einflussfaktoren der Lage sowie die Bandbreite der Veränderung der einzelnen Klimaelemente sind exemplarisch in Bild 10 zusammengestellt. Die Werkzeuge sind im frei verfügbaren Lokalklimagenerator gebündelt, der auch die HRY enthält, die als Grundlage für die Anpassungen dienen [75].

Mikroklima am Bauteil

Während einige der Klimaelemente wie die Lufttemperatur und die Luftfeuchte direkt angesetzt werden, müssen andere wie die Sonnenstrahlung, der Wind oder der Niederschlag auf die Neigung und Orientierung des zu simulierenden Bauteils umgerechnet werden. Diese Umrechnung erfolgt aber in den Simulationsprogrammen selbst, sodass der Planer dies nicht selber durchführen muss. Gegebenenfalls ist auch die Verschattung eines Bauteils durch Bäume, Häuser oder andere größere Gegenstände in der Umgebung zu berücksichtigen. Dazu können noch gebäudespezifische Effekte kommen, wie z. B. eine Attika, die bei einem Flachdach zu einer stärkeren Oberflächenunterkühlung durch die Bildung eines „Kaltluftsees“ führen kann. Die Schlagregenbeanspruchung wird z. T. durch Dachüberstände reduziert, sodass der Ansatz ohne diesen Effekt zu Ergebnissen auf der sicheren Seite führt. Das Gegenteil ist der Fall, wenn die Ausrichtung einer Fassade insgesamt oder in Teilbereichen ein paar Grad von der Vertikalen abweicht. Dies ist manchmal bei älteren Gebäuden oder bei Mauerwerk, das sich nach oben verjüngt, der Fall. Hier erhöht sich die Schlagregenbeanspruchung deutlich [3]. Auf den ersten Blick erscheint dies für den Holzbau, mit Ausnahme des Fachwerkbaus, irrelevant zu sein. Die moderne Architektur lebt jedoch auch von Formen, die nicht immer streng orthogonal ausgeführt werden.

Erdberührte Bauteile und Begrünungen

Bei Bauteilen, die nicht direkt mit dem Außenklima in Kontakt stehen, sind ggf. andere Ansätze erforderlich. Bei erdberührten Bauteilen wie Fundamenten, Kellerwänden oder Bodenplatten, kann z. B. auf gemessene Daten oder Modelle für die Erdreichbedingungen zurückgegriffen werden. Auch bei einem begrünten Dach dürfen nicht einfach die Außenklimabedingungen angesetzt werden, sondern die Begrünung sollte mit dem zu bewerteten Bauteil in geeigneter Weise mitsimuliert werden. Ansätze dafür sind u. a. in [74] beschrieben. Eine Besonderheit der erdberührten Bauteile stellt der vertikale Temperaturgradient dar, d. h. ein Wandbauteil ist im oberen Teil der Außenoberfläche einer anderen Temperatur ausgesetzt als im unteren Bereich. Dies kann innerhalb des Bauteils zur diffusions- oder kon-

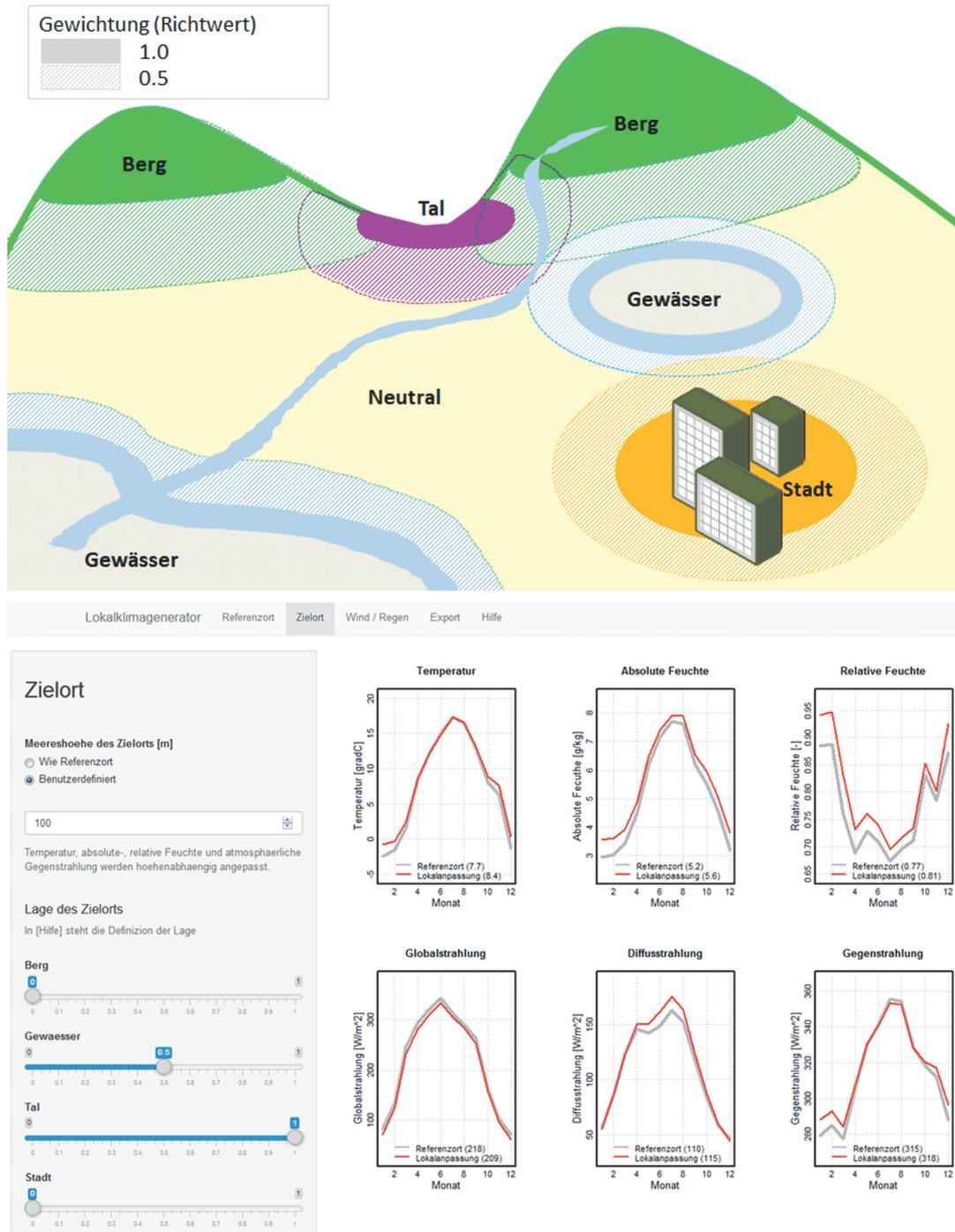


Bild 10. Anpassung Klimaverhältnisse auf die lokalen Bedingungen auf Basis des regionalen Referenzklimadatensatzes mithilfe des Lokalklimagenerators gem. [72, 73]

vektionsbedingten vertikalen Umverteilung der Feuchte vom wärmeren in den kälteren Bereich führen, was gegebenenfalls zu berücksichtigen ist.

3.2.2.2 Raumklima

Die Auswahl der Randbedingungen für das Raumklima hängen von Art und Betrieb des Gebäudes ab. Im Gegensatz zur Feuchteschutzbemessung nach Stufe 1 und 2 gilt hier keine Einschränkung auf Wohn- oder wohnähnlich genutzte Gebäude. Besonders einfach ist die Sache bei ganzjährig klimatisierten Gebäuden, deren Raumklimabedingungen genau festgelegt sind. Selbstverständlich gibt es auch für Wohngebäude entsprechende Ansätze, mit denen das Bemessungsraumklima aus den Außenklimabedingungen in Abhängigkeit von der erwarteten Belegungsdichte errechnet werden kann. Für besondere Gebäude oder Situationen können auch gemessene Klimabedingungen von ähnlichen Fällen herangezogen werden. Genauso können die zu erwartenden Raumklimaverhältnisse auch mithilfe einer hygrothermischen Gebäudesimulation bestimmt werden [43]. Hierbei lassen sich auch saisonal unterschiedliche Nutzungen, ein intermittierender Betrieb oder der Einfluss von Sondersituationen (z. B. feuchter Estrich nach Umbaumaßnahme, Wasserschäden, längerer Lehrstand usw.) berücksichtigen.

Wohn- und Büroraum oder ähnliche Nutzung

Für das Innenraumklima sind in DIN 4108-3 [31] Modelle beschrieben, die die Bedingungen im Raum für

Büro- und Wohngebäude mit verschiedenen Belegungen aber ohne Klimatisierung aus dem Außenklima, genauer der Außenlufttemperatur, ableiten. Auf diese Modelle kann für die meisten Fragestellungen einfach zurückgegriffen werden. Für die Bemessung ist gemäß DIN 4108-3 Anhang D [31] normalerweise das Raumklima mit normaler Belegung + 5% r. F. anzusetzen. Wie bei den meisten Vorgaben in der Norm darf jedoch mit Begründung von den Standardvorgaben abgewichen werden, was z. B. bei gering belegten oder nur temporär genutzten Räumen möglich wäre.

Unbeheizte Nebenräume

Im Kontext des bereits zuvor zitierten Forschungsprojekts [72] konnten auch Modelle für wenig genutzte und meist nicht direkt beheizte Nebenräume wie Dachböden, Kriechkeller oder Treppenhäuser entwickelt werden. Dies war erforderlich, da sich an diese Bereiche angrenzende Bauteile u. U. deutlich anders verhalten als solche, die normalen Wohnraum vom Außenklima abgrenzen. Zur Verwendung eines solchen Nebenraumklimas muss der Planer angeben, welches Dämm- und Luftdichtheitsniveau bei den Bauteilen zum Außenklima vorhanden ist – auf dieser Basis können dann die Raumklimabedingungen ähnlich wie bei den genannten normalen Raumklimamodellen vereinfacht aus dem Außenklima abgeleitet werden.

Exemplarisch zeigt Bild 11 die Ableitungskurven für unbeheizte Dachräume. Diese werden nach Dämm- und Luftdichtheitsniveau der Dachfläche nach außen unterschieden.

Steildach-aufbau	Dachraum-klasse	+ K	+K	+ c
		-5°C	+20°C	g/m ³
A) gedämmt, luftdicht	Klasse A1 +10	+10	+4	0
	Klasse A2 --- +8	+8	+4	0
B) ungedämmt, luftundicht	Klasse B1 +3	+3	+2	0,5
	Klasse B2 - - - 0	0	+2	0,5

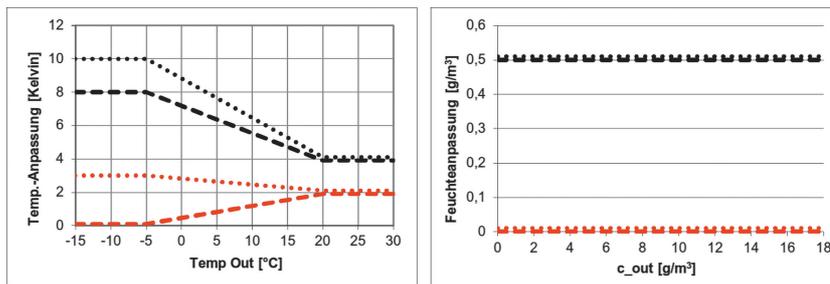


Bild 11. Ableitungskurven für Temperatur und Luftfeuchte in unbeheizten Dachräumen aus dem Außenklima für folgende bauliche Bedingungen:

- Klasse A1: mit Schalung, Unterspannbahn, Dampfbremse, gedämmt mit U-Wert $\leq 0,7$ ($>$ ca. 10 cm WD); winddicht.
- Klasse A2: mit Schalung, Unterspannbahn, gedämmt mit U-Wert $\leq 2,5$ W/(m² K), ($>$ ca. 4 cm WD), mäßig winddicht
- Klasse B1: mit Schalung und ggf. Unterdeckung, ungedämmt, (U-Wert $>$ 2,5 W/(m² K), mäßig winddicht
- Klasse B2: nur Eindeckung, Lüfterziegel, ungedämmt, (U-Wert $>$ 2,5 W/(m² K), nicht winddicht

Das resultierende Innenklima bezieht sich auf die Verhältnisse, die sich nach der Sanierung einstellen, da in der Regel nur zu sanierende oder neu zu errichtende Bauteile bemessen werden. Wenn eine Einordnung in die vier Klassen nicht eindeutig möglich ist, sollte die jeweils ungünstigere Klasse gewählt werden. Die in [76] dargestellten Berechnungen zeigen dabei, dass auch die Annahme von nur geringfügig wärmeren Bedingungen im Dachraum im Vergleich zum Außenklima bereits eine deutliche Verbesserung der Feuchteverhältnisse in der Decke zum Dachraum bewirkt und somit die Anforderungen z. B. an den Einbau einer Dampfbremse deutlich reduziert.

Weitere für den Holzbau vermutlich weniger relevante Raumklimamodelle sind in [72] beschrieben.

Andere Nutzungen

Wird das Gebäude anders genutzt, sind die zuvor genannten Raumklimamodelle nicht geeignet. Stattdessen sollte auf Messdaten vergleichbarer Objekte, Raumklimasimulationen oder, falls verfügbar, auf die geplante Konditionierung des Gebäudes zurückgegriffen und diese für die Simulation angesetzt werden. Auch die Euro-Glaser-Norm [36] enthält Modelle für Nutzungen von der Lagerung trockener Güter bis hin zu Wäschereien oder Schwimmbädern. Nachteilig ist hier jedoch, dass die Raumtemperatur das ganze Jahr über mit konstant 20 °C angenommen wird und die Feuchtlast entsprechend der *Glaser-Philosophie* meist etwas weiter auf der sicheren Seite liegt. Falls mit diesen Daten eine Bemessung möglich ist, stellt dies natürlich kein Problem dar, falls nicht, bleibt immer noch eine genauere Annäherung an das tatsächliche Raumklima.

3.2.2.3 Anfangsbedingungen

Die Anfangsbedingungen in Holzbauteilen werden nach den Vorgaben der DIN 4108 in der Regel mit der Gleichgewichtsfeuchte der Materialien bei 80 % r. F. angenommen, was in etwa der mittleren Außenluftfeuchte in Deutschland bzw. bei Konstruktionsholz dem Mittelwert der Einbaufeuchte nach DIN 68800 [33] von 15 ± 3 M.-% entspricht. Ein solcher Feuchtegehalt stellt sich bei einer längerfristigen Lagerung der Materialien im Freien mit Schutz vor Beregnung ein und liegt gegenüber dem tatsächlichen trockenen Einbauzustand eher etwas auf der sicheren Seite. Wenn die Materialien vor oder während dem Einbau beregnet wurden, sollte dies bei der Simulation natürlich berücksichtigt werden. Gleiches gilt, wenn die Materialien noch Produktionsfeuchte enthalten oder nicht ausreichend getrocknet wurden. Für berechnete Schaltungen kann vereinfacht ein erhöhter Einbaufeuchtegehalt von 25 M.-% angesetzt werden – dieses Feuchteniveau wurde u. a. bei Messungen an solchen Einbausituationen im IBP Freigelände ermittelt und stellt eine gute erste Näherung dar. Umgekehrt kann für üblicherweise trockener eingebaute Materialien ein ent-

sprechend niedrigerer Wert angesetzt werden, der allerdings vom Hersteller gewährleistet oder bei Einbau nochmal durch Messung abgesichert werden sollte. Für die Einbaufeuchte einiger besonders sorptionsfähiger Materialien haben einzelne Hersteller in den Datenbanken der Simulationsprogramme auch entsprechend niedrigere Einbaufeuchten hinterlegen lassen.

3.2.3 Wärme- und Feuchteübergang

Der Wärme- und Feuchteübergang an den inneren und äußeren Bauteiloberflächen wurde schon in Abschnitt 2.1.1 kurz betrachtet. In der DIN EN 15026 werden für die Außenoberfläche windabhängige konvektive Übergangskoeffizienten definiert. Für den Wärmeübergang wird zum konvektiven oft noch vereinfacht ein strahlungsbedingter Übergangskoeffizient addiert. Letzteres ist, wie bereits angesprochen, nur in Ausnahmefällen sinnvoll, da in der Nacht der konvektive und der strahlungsbedingte Wärmestrom an der Außenoberfläche häufig in gegensätzliche Richtung zeigen. Auch die Windabhängigkeit täuscht eine vermeintlich höhere Genauigkeit vor, da die Windgeschwindigkeit in der Nähe der Oberfläche als Grundlage für die beschriebene Berechnungsformel dient. Da dieser Wert so gut wie nie vorhanden ist, wird er meist durch die Windgeschwindigkeit im meteorologischen Datensatz ersetzt. Dieser wurde jedoch in einer Höhe von 10 m im freien Feld gemessen. Er weicht also deutlich von Verhältnissen an der Bauteiloberfläche ab. Da die Wärmeübergangswiderstände beim heutigen Dämmstandard im Vergleich zum Wärmedurchlasswiderstand der Gebäudehülle keine große Rolle spielen, reicht es in der Regel aus, für den Wärme- und den Feuchteübergang konstante Übergangskoeffizienten bzw. Übergangswiderstände zu verwenden. Eine genauere Betrachtung kann aber zur Beurteilung der kurzfristigen Wärme- und Feuchteverhältnisse an den Bauteiloberflächen oder bei besonders exponierten oder windgeschützten Standorten erforderlich werden.

Dasselbe gilt auch für die konvektiven Dampfübergangswiderstände, die in der Regel deutlich kleiner sind als der Dampfdiffusionswiderstand des gesamten Bauteils. Anhang D der DIN 4108-3 gibt dafür die in Tabelle 2 gelisteten Werte an. Beim Feuchteübergang wird häufig mit einem zusätzlichen s_d -Wert gearbeitet, der zum konvektiven Feuchteübergangswiderstand addiert wird. Dieser s_d -Wert soll beispielsweise den Widerstand eines dünnen Farbanstrichs auf der Oberfläche repräsentieren, der wärmetechnisch keine Rolle spielt. Dabei ist jedoch Vorsicht geboten, denn dieser zusätzliche Diffusionswiderstand reduziert ausschließlich den Dampftransport und nicht die flüssige Wasseraufnahme bei Regen oder Betauung. Deshalb müsste in diesem Fall auch die Wasseraufnahme der Außenoberfläche so angepasst werden, dass sie der Funktion des Farbanstrichs – der meist auch wasserabweisend eingestellt ist – entspricht. Diese Vorgehensweise funk-

Tabelle 2. Übergangskoeffizienten für Wärme und Wasserdampf gemäß DIN 4108-2, Anhang D

Position	Wärmeübergang (nur Konvektion) h_c [W/(m ² K)]	Wärmeübergang (Konvektion und langwellige Strahlung) h [W/(m ² K)]	Wasserdampfübergang b [kg/(m ² s Pa)]
außen	12	17	75×10^{-9}
innen	–	8	25×10^{-9}

tioniert allerdings nur im Fall der Berechnung. Soll eine Betauung von außen berücksichtigt werden – z. B. um das Risiko von mikrobiellem Wachstum ermitteln zu können – muss der äußere Farbanstrich als eigene Materialschicht eingegeben werden. Die Vereinfachung mittels zusätzlichem s_d -Wert führt hier zu falschen Ergebnissen.

Die raumseitigen Oberflächenübergangskoeffizienten bzw. -widerstände werden in der DIN EN 15026 (Tabelle 2) richtungsabhängig angegeben. Für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten beim Wärmestrom in horizontaler Richtung wird ein mittlerer Wert von $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ vorgegeben. Für den Wärmestrom nach oben verdoppelt sich dieser Koeffizient und nach unten beträgt er nicht einmal ein Drittel des horizontalen Wertes. Solche im Labor gemessenen Koeffizienten haben allerdings mit der Realität am Bau wenig zu tun. Erstens reduziert sich der vermeintlich große Unterschied, wenn man den Strahlungsaustausch dazu berücksichtigt und zweitens tritt in beheizten Räumen häufig eine gewisse Temperaturschichtung auf, die eine größere Auswirkung auf die lokale Oberflächentemperatur hat als die Unterschiede in den richtungsabhängigen Übergangskoeffizienten. In Ecken und Kanten gelten außerdem wieder andere Randbedingungen, die gegebenenfalls bei einer mehrdimensionalen Analyse zu berücksichtigen sind. Aus diesen Gründen und auch aus rechentechnischen Erwägungen (es müsste für jeden Zeitschritt abgefragt werden in welcher Richtung die aktuellen Wärme- und Feuchteströme weisen – was bei beiden auch unterschiedlich sein kann – um den „richtigen“ Wert ansetzen zu können) wurden im Anhang D der DIN 4108-3 auch für die raumseitigen Übergangskoeffizienten einheitlich konstante Werte festgelegt (Tabelle 2).

3.2.4 Hilfsmodelle zur vereinfachten Berücksichtigung spezieller hygrothermischer Effekte

Wir sind von unseren Fahrzeugen gewöhnt, dass bei geschlossenen Fenstern und Türen auch beim stärksten Unwetter kein Wasser in die Fahrgastzelle gelangt – zumindest dann, wenn sie relativ neu sind. Das gleiche gilt für ungewollte Luftströmungen durch die Fahrzeughülle. Gebäude sind jedoch keine Fahrzeuge. Die Gebäudehülle ist weniger maßhaltig, die Qualitätsüberwachung ist weniger ausgefeilt, die Materialien und ihre Verarbeitung sind kostengünstiger. Trotzdem erwarten wir von unseren Gebäuden eine deutlich höhere

Lebensdauer, eine größere Zuverlässigkeit und mehr Komfort bei gleichzeitig weniger Pflege und größeren Wartungsintervallen. In den meisten Punkten werden diese Erwartungen dennoch erfüllt, allerdings müssen wir lernen, gewisse Abstriche bei der absoluten Wasser- und Luftdichtheit der Gebäudehülle zu machen. Dieselbe Dichtheit wie bei Fahrzeugen ist hier schlicht und einfach unmöglich, wie schon in den Abschnitten 2.1.4 und 2.1.6 diskutiert. Das liegt jedoch nicht am ungeeigneten Material oder unmotivierten Bauhandwerkern. Im Gegenteil, hier können wir große Fortschritte verzeichnen. Es liegt in der Natur der Sache, dass Klebeverbindungen am Bau nie vollständig luftdicht sein können und Fensteranschlüsse selten völlig wasserdicht. Selbst wenn es gelingen würde, zu Beginn eine perfekte Dichtheit herzustellen, dann bedeutet dies leider nicht, dass dieser Idealzustand von langer Dauer sein muss. Das zeigen die Erfahrungen aus 70 Jahren bauphysikalischen Freilandversuchen.

Beurteilungsmodelle, die davon ausgehen, dass die Gebäudehülle perfekt luft- und wasserdicht ausgeführt ist, sind daher realitätsfern. Dass sie in der Vergangenheit trotzdem oft zuverlässige Ergebnisse geliefert haben, hat vor allem zwei Gründe: Erstens weisen viele Bauteile ein ausreichendes Trocknungspotenzial auf, sodass durch kleinere Fehlstellen noch keine Schäden entstehen. Zweitens bewirken manche Leckagen nicht nur eine zusätzliche Befeuchtung, sondern ermöglichen auch eine verbesserte Trocknung. Raumluftinfiltration, die im Winter zu Tauwasserbildung führt, kann bei höheren Temperaturen im Sommer auch die Rücktrocknung beschleunigen. Dennoch erscheint es etwas fahrlässig, davon auszugehen, dass schon alles gut gehen wird. Das zeigen die zahlreichen Feuchteschäden, die von Sachverständigen gerne dokumentiert und veröffentlicht werden. Dabei scheinen einige Konstruktionen, wie z. B. unbelüftete Flachdächer in Holzbauweise besonders betroffen zu sein [45] oder Holzbauwände mit Wärmedämm-Verbundsystemen [46]. Schäden an diesen Konstruktionen haben dazu geführt, nicht nur praktische Lösungen für diese Konstruktionen zu erarbeiten, sondern auch die feuchtetechnischen Beurteilungsmethoden zu verbessern. D. h. es wurde versucht, neue Ansätze in die vorhandenen Feuchteschutzbemessungsmodelle zu integrieren, die eine Berücksichtigung der feuchtetechnischen Auswirkungen von unvermeidbaren Fehlstellen zulassen.

3.2.4.1 Berücksichtigung von Konvektionseffekten

Bild 12 zeigt drei Beispiele für Luftkonvektionen, die in Holzbaukonstruktionen 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 vorhergesagt werden. Deshalb ist es mehr als wünschenswert die Auswirkung einer Hinterlüftung mit einem entsprechenden Modell zu erfassen. WTA 6-2 [39] schlägt hierfür im Abschnitt 5.1 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 [11, 47].

Die Luftkonvektion von außen durch die Wärmedämmung bis hin zur inneren Beplankung, das sogenannte Wind-washing, führt im Winter in der Regel nicht zu einer Befeuchtung der Konstruktion, sondern wegen der geringen absoluten Feuchte der Außenluft eher zu einer Austrocknung. Wird der Effekt jedoch so stark, dass die raumseitige Oberfläche dadurch bis zum Taupunkt der Raumluft abkühlt, dann können durchaus Probleme entstehen. Bei nach dem Stand der Technik ausgeführten Konstruktionen sollte das allerdings nicht vorkommen. Allerdings hat dieser Effekt eventuell energetische Konsequenzen (Hinweise darauf z. B. in [48]), die unerwünscht sind und einer Abhilfe z. B. durch eine Winddichtheitsebene bedürfen. Feuchtetechnische Nachteile sind in unserer Klimazone, außer bei gekühlten Gebäuden, in der Regel jedoch nicht zu befürchten. Daher finden sich zu diesem Phänomen bisher keine Modellansätze in unseren Feuchteschutzrichtlinien. Der umgekehrte Fall, wenn feuchte Luft aus dem Raum durch kleine Undichtheiten in die Konstruktion eindringt und an einer anderen Stelle wieder austritt, ist

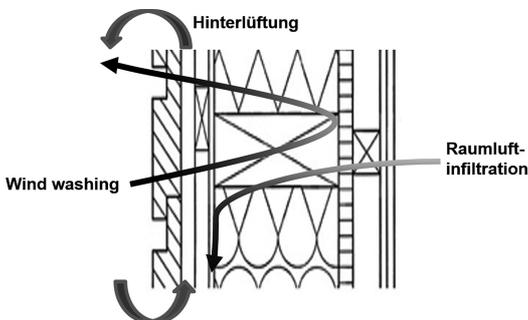


Bild 12. Luftströmungsphänomene in Leichtbaukonstruktionen

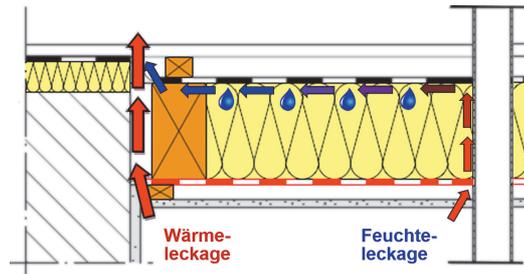


Bild 13. Verschiedene Strömungswege am Beispiel eines Flachdachs. Bei direkter Durchströmung des Bauteils, z. B. im Randanschlussbereich, könnte es sein, dass durch die Luftströmung der Strömungsweg erwärmt und es daher nicht oder nur zu einem geringen Tauwasseranfall kommt (Wärmeleakage). Bei einem längeren Strömungsweg durch das Bauteil wird sich die Luft jedoch auf der Kaltseite ausreichend abkühlen, sodass größere Mengen Tauwasser anfallen können (Feuchteleakage).

feuchtetechnisch jedoch von großer Bedeutung. Bild 13 zeigt am Beispiel eines unbelüfteten Flachdachs, dass die realen Verhältnisse in Bezug auf Undichtheiten und mögliche Luftströmungswege sehr komplex sind. Sie physikalisch korrekt, d. h. in ihrer dreidimensionalen Struktur zu erfassen, würde einen extremen Aufwand bedeuten. Außerdem müssten die Strömungswege zuvor messtechnisch genau identifiziert werden. Es liegt auf der Hand, dass dies praktisch nicht durchführbar ist. Deshalb müssen hier einige Modellannahmen getroffen werden. 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 [19] als durchaus realistisch erwiesen.

Wie in [49] dargelegt, wird die Tauwassermenge für jeden Rechenschritt 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, bestimmt. Der Dampfkonzentrationsstrom wiederum errechnet sich aus der Luftdurchlässigkeit des Bauteils und der Luftdruckdifferenz zwischen dem Raum und der Außenluft. Solche Luftdruckdifferenzen treten entweder im Winter durch die Beheizung von Gebäuden auf oder durch Windanströmung. Letztere wirkt meist 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 Druckdif-

ferenz, die im Sommer aufgrund der Temperaturangleichung zwischen innen und außen zum Erliegen kommt. Neben der relativ einfach zu bestimmenden Druckdifferenz durch thermischen Auftrieb im Winter können auch noch z. B. durch eine Lüftungsanlage mechanisch induzierte Druckdifferenzen auftreten. Diese sollten ebenfalls berücksichtigt werden.

Wenn man aus den genannten Gründen den Windeinfluss vernachlässigt, bleibt als einzige Unbekannte die Luftdurchlässigkeit des Bauteils übrig. Dabei sind die in Bild 13 dargestellten Feuchteleckagen maßgeblich. Bei professionell abgedichteten Konstruktionen sind in der Regel alle verbleibenden Undichtheiten dieser Kategorie zuzuordnen, d. h. die Luftdurchlässigkeit des Bauteils könnte mit einer entsprechenden bauteilbezogenen Differenzdruckanlage direkt gemessen werden. Bei Wohngebäuden liegt sie etwa bei 5 % bis 10 % der gesamten Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle. Das Dampfkonvektionsmodell im Abschnitt 5.2 des WTA-Merkblatts 6-2 [39] schlägt hier einen Wert vor, der bei Flachdächern von Einfamilienhäusern eine konvektive Tauwasserbildung zur Folge hat, die der Trocknungsreserve für Dächer von 250 g/m^2 in der DIN 68800-2 entspricht. Alternativ kann die Luftdurchlässigkeit des Bauteils auch auf Basis der Summe einzelner kleiner Undichtheiten, wie in [50] beschrieben, ermittelt werden.

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 Befeuchtung 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 kompensieren können. Deshalb ist das derzeitige Infiltrationsmodell (ohne Windeinfluss) als konservativ zu betrachten. Zur Weiterentwicklung des Infiltrationsmodells sind allerdings weitere Forschungsanstrengungen notwendig.

3.2.4.2 Berücksichtigung von Regenwasserpenetration

Weit verbreitete und zum Teil erhebliche Feuchteschäden in den 90er Jahren an Holzwänden mit Wärmedämm-Verbundsystemen in Nordamerika haben die Fachwelt wachgerüttelt und nach den Ursachen suchen lassen. Dabei wurde relativ schnell klar, dass die Gründe nur in sehr geringem Umfang mit der Dampfkonvektion zu tun hatten. Vielmehr waren die Schäden auf Regenwasserpenetration im Bereich der Fensteranschlüsse (meist am Fensterbrett) zurückzuführen [51]. Deshalb wurden auch die hygrothermischen Modelle zur Feuchteschutzbeurteilung von Außenwandkonstruktionen entsprechend angepasst. In der ASHRAE Norm 160 [52] zur Feuchteschutzbeurteilung durch hy-

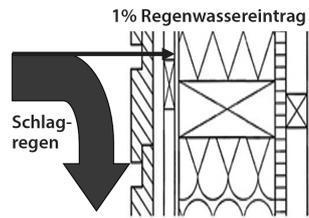


Bild 14. In der ASHRAE Norm zur Feuchteschutzbeurteilung von Baukonstruktionen durch hygrothermische Simulation [52] wird empfohlen, den Schlagregeneinfluss bei Außenwänden zu berücksichtigen, indem man eine kleine Menge (1 %) des auf die Fassade auftreffenden Schlagregens auf die nächstliegende Bauteilschicht hinter der äußeren Wetterschutzschale aufbringt.

grothermische Simulationsmodelle wird daher folgendes empfohlen: Wie in Bild 14 dargestellt, soll bei Außenwandkonstruktionen ein kleiner Teil des Schlagregens auf die Oberfläche der nächsten Bauteilschicht hinter der äußeren Bekleidung aufgebracht werden. Das ist in der Regel die äußere Witterungsschutzbahn, im Fall eines WDVS ohne Dränage wäre das jedoch die Oberfläche der Unterkonstruktion, d. h. die äußere Bepankung. Falls keine Versuchsergebnisse zur Schlagregendichtheit der äußeren Bekleidung vorliegen, soll die aufgebrauchte Wassermenge einem Prozent des an der Fassade ankommenden Schlagregens entsprechen. Neue Lösungen, wie eine spezielle Abdichtungstechnik im Fensteranschlussbereich, bringen eine deutliche Verbesserung aber ein geringer Eintrag von Schlagregengeuchte kann dennoch nie zu 100 Prozent ausgeschlossen werden. Allerdings liegt der Feuchteintrag hier deutlich unter den genannten ein Prozent des auftreffenden Schlagregens, was auch durch Beregnungsversuche nachgewiesen werden kann.

Da nach den großen Schadensereignissen in Nordamerika auch in Europa und anderen Teilen der Welt ähnliche Probleme mit der Schlagregenpenetration von gedämmten Außenwänden aufgetreten sind, wurde der amerikanische Ansatz in den Abschnitt 5.3 des WTA-Merkblatts 6-2 [39] übernommen. Eine Literaturstudie über Regenwasserpenetrationsuntersuchungen für Mauerwerksvorsatzschalen in [53] hat ergeben, dass der Wert von einem Prozent des Schlagregens für solche Konstruktionen ganz gut passt. Andere Studien an Außenwänden mit hinterlüfteten Bekleidungen [54] kommen zu dem Schluss, dass der Regenwasserpenetrationsansatz in ASHRAE 160 von 1 % eher etwas konservativ ist, d. h. für diese Außenwandkonstruktionen auf der sicheren Seite liegt. Wendet man diesen Ansatz auf massive Außenwände mit WDVS in Europa an [55], zeigt sich, dass das Aufbringen von einem Prozent der Schlagregenmenge direkt auf die Oberfläche des Mauerwerks selbst bei hoher Schlagregenbeanspruchung keinerlei negative Auswirkungen auf die Feuchte im Mauerwerk hat. Sie bleibt trotz des Regenwassereintrags unter der Gleichgewichtsfeuchte des

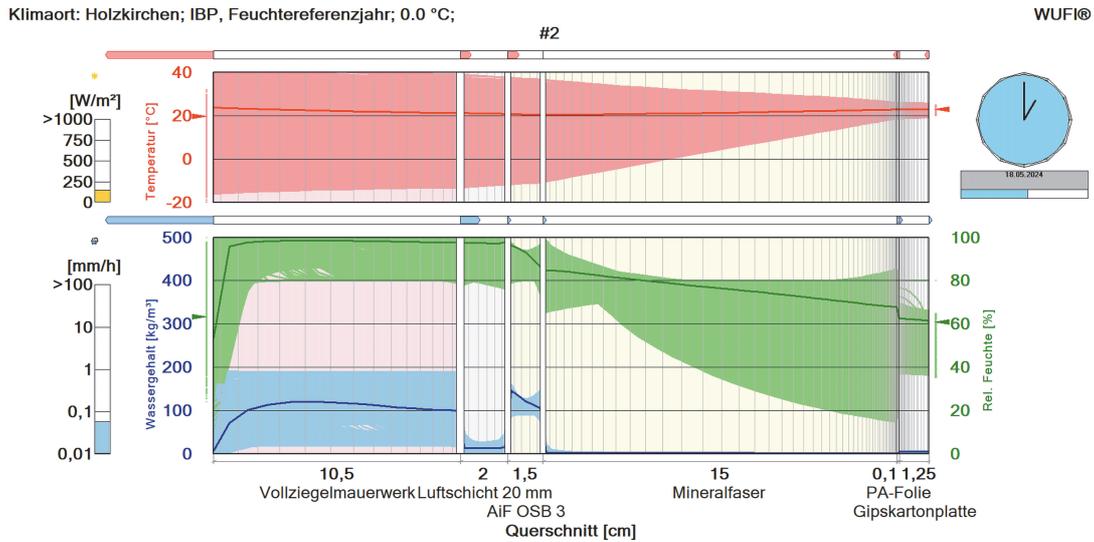


Bild 15. Momentaufnahme der Filmdarstellung der instationären Temperatur- und Feuchteverteilung (Bereiche und Mittelwerte) in einer nach Westen orientierten zweischaligen Außenwand mit Holz-Tragkonstruktion im Verlaufe des Monats Mai. Der Wassergehalt in der Außenschale erreicht niederschlagsbedingt hohe Werte bis hin zur freien Wassersättigung des Mauerwerks, was trotz Luftspalt auch zu einer entsprechenden Befeuchtung der dahinter liegenden OSB führt.

Mauerwerks bei 80% relativer Feuchte (praktischer Baufeuchtegehalt). Das erklärt auch, warum es bei außen gedämmtem Mauerwerkswänden kaum nennenswerte sichtbare Probleme gibt.

3.2.5 Simulationsergebnisse und deren Interpretation

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 langfristigen Verläufe der hygrothermischen Kenngrößen Temperatur, relative Feuchte und 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 15 zeigt beispielhaft einen Schnappschuss aus einem solchen Ergebnisfilm, der bei der Simulation des hygrothermischen Verhaltens einer zweischaligen Wand entstanden ist.

3.2.5.1 Feuchtebilanz

Die Beurteilung der Ergebnisse von hygrothermischen Simulationsberechnungen erfordert etwas Erfahrung. Ähnlich wie bei der Beurteilung nach *Glaser* kommt es darauf an, dass sich in der Konstruktion langfristig kein Wasser ansammelt. Deshalb wird zunächst der Verlauf des Gesamtwassergehalts analysiert. Wenn es

hier zu einer permanenten Akkumulation in relevantem Umfang kommt, ist das bereits ein KO-Kriterium. Wenn der Gesamtwassergehalt fällt oder von Jahr zu Jahr gleich bleibt, ist die Voraussetzung für eine weiterführende Auswertung gegeben, d. h. dann werden die hygrothermischen Verhältnisse in den einzelnen Materialschichten sowie an den Oberflächen und Materialgrenzen betrachtet.

3.2.5.2 Relevante Bewertungskriterien für den Holzbau

Für den Holzbau gibt es bereits einige Bewertungskriterien, die aus langjährigen Erfahrungen und aus der stationären Dampfdiffusionsberechnung stammen. Allerdings besteht derzeit noch eine gewisse Diskrepanz zwischen der Genauigkeit der hygrothermischen Simulation, die Temperatur- und Feuchteverhältnisse mit meist stündlicher Auflösung zur Verfügung stellt und den in der Praxis etablierten, meist stark vereinfachten stationären Grenzwerten. Diese beziehen sich z. B. bei Schimmel oder Holzfäule ausschließlich auf ein bestimmtes Feuchteniveau ohne dessen Einwirkdauer, die gleichzeitig auftretende Temperatur oder die Sensitivität des jeweiligen Materials adäquat zu berücksichtigen. Die Anwendung solcher Grenzwerte führt dann im besten Fall zu Konstruktionen mit großen Sicherheitsreserven, im ungünstigsten Fall dazu, dass gut funktionierende, gegebenenfalls sogar nachweisfreie Bauteile ausgeschlossen würden. Um dieses Problem zu lösen, wurden in den letzten Jah-

ren zahlreiche Anstrengungen unternommen, um die Bewertungskriterien analog zu den genaueren Berechnungsverfahren zu verfeinern. Anspruch und Ziel ist dabei, nicht nur die Feuchteverhältnisse, sondern auch deren Bewertung so realitätsnah wie möglich zu gestalten.

In diesem Abschnitt werden zunächst die einfachen Grenzwerte erläutert, die bei einer Bewertung natürlich immer auch berücksichtigt und wenn möglich eingehalten werden sollten. Es wird aber auch auf bereits verfügbare oder in Bearbeitung befindliche verfeinerte Bewertungsmöglichkeiten verwiesen, die in anderen Abschnitten ausführlicher behandelt werden.

Die relative Feuchte, die von Biologen auch als Wasseraktivität bezeichnet wird, ist die für die meisten Schadensmechanismen maßgebliche Feuchtegröße. Sie beschreibt, wie stark das Wasser an die Poren- oder Faserstruktur des Materials durch Sorptionskräfte gebunden ist. Unterhalb von etwa 70 bis 80 % r. F. ist diese Bindung so stark, dass das Wasser kaum für chemische oder für biologische Prozesse „genutzt“ werden kann – werden diese Feuchtwerte also nicht überschritten, können in den Konstruktionen eigentlich gar keine Schäden auftreten. Ausnahme sind hier nur Spannungen oder Risse aufgrund von Schwinden des Materials bei sehr trockenen Bedingungen. Oberhalb von etwa 95 % r. F. spricht man dann vom sogenannten Kapillarwasserbereich, bei dem die Bindungskräfte nur noch schwach sind und dementsprechend in den Poren zunehmend flüssiges Wasser vorliegt, das vergleichsweise leicht entzogen werden kann.

Der Feuchtebereich unterhalb von 80 % r. F. gilt im Baubereich als relativ sicher, da mikrobielles Wachstum, wenn überhaupt dann nur sehr langsam in Gang kommen kann. Diese Grenze kann bei geeigneter Auslegung der Konstruktion auf der Raumseite des Bauteils i. d. R. gut eingehalten werden. Praktisch unmöglich ist dies dagegen bei nahe am Außenklima liegenden Schichten, da die Außenluftfeuchte vor allem im Winter regelmäßig Werte über 90 oder sogar über 95 % r. F. erreicht. Dies führt bei längerer Einwirkdauer und diffusionsoffener Bauweise zu ebenso hohen Feuchten in den Materialien. In diesem Bereich ist eine generelle Begrenzung auf 80 % r. F. also nicht sinnvoll, unwirtschaftlich oder manchmal sogar kontraproduktiv. In einigen Ländern wie z. B. in Schweden wird eine derartige Begrenzung in den Normen trotzdem ohne geeignete Differenzierung gefordert, was den Planer vor nahezu unlösbare Aufgaben stellt oder zwingt, die Anforderung mit entsprechend guter Begründung zu umgehen. Auch in der ersten Version der ASHRAE Norm 160 [52] lag das Grenzkriterium für Oberflächen innerhalb eines Bauteils bei einem Monatsmittel von 80 % r. F. mit der Folge, dass eine Reihe von bewährten Konstruktionen die Feuchteschutzbeurteilung nicht bestanden haben. In der aktuellen Version wurde das allerdings korrigiert und durch das Schimmelpilzwachstumsmodell von *Viitanen* [26] ersetzt.

3.2.5.3 Feuchteverhältnisse an den Oberflächen

An den raumseitigen Oberflächen sowie im Bereich von Luftschichten in den wärmeren Bereichen eines Bauteils besteht die Gefahr von Schimmelpilzbildung, wenn bestimmte Temperatur- und Feuchtengrenzen überschritten werden. Bei Einhaltung von 80 % r. F. ist ein Schimmelrisiko im Winter sicher ausgeschlossen. Bei Überschreitung dieses Werts oder bei längerfristigem Auftreten von hohen relativen Feuchten in Kombination mit hohen Temperaturen kann dagegen Schimmelpilzbildung nicht mehr sicher ausgeschlossen werden – zur Überprüfung kann in diesen Fällen eine temperaturabhängige oder auch instationäre Bewertung des Wachstumsrisikos mit dem biohygrothermischen Modell nach *Sedlbauer* [24, 70] oder mit dem VTT-Modell von *Viitanen* [25, 52] erfolgen. Außerhalb der Luftdichtheitsebene bzw. auf der Kaltseite der Konstruktion ist eine Bewertung des Schimmelrisikos i. d. R. nicht erforderlich, da andere Schadensmechanismen dominant sind und die Modelle hier auch meist sehr weit auf der sicheren Seite liegen – abschätzende oder vergleichende Bewertungen sind aber auch in solchen Bereichen mit gewissen Einschränkungen möglich.

3.2.5.4 Holzfeuchte

Zur Beurteilung der Wassergehalte in den einzelnen Schichten ist ein Vergleich mit den Grenzwassergehalten für die einzelnen Baustoffe zweckmäßig, sofern diese bekannt sind. Bei Holz wird meist eine Grenze der Holzfeuchte von 20 M.-% gefordert, so z. B. in [32]. Dieser Grenzwert sollte zumindest langfristig und in nach außen diffusionshemmenden geschlossenen Konstruktionen auch möglichst eingehalten werden. Bei Bauteilen, bei denen sich z. B. die Schalung oder Latung im nahen Kontakt mit der Außenluft befindet, werden dagegen im Winter bei hohen Außenluftfeuchten auch regelmäßig Holzfeuchten von deutlich über 20 M.-% erreicht. Da diese Werte aber nur temporär und bei niedrigen Temperaturen auftreten, bleiben sie ohne negativen Effekt, da holzerstörende Pilze bei diesen Bedingungen gar nicht oder nur extrem langsam wachsen können. Werden die 20 M.-% also überschritten, ist eine genauere Bewertung zum Beispiel mit dem im WTA-Merkblatt 6-8 [62] möglich. Auf dieses Merkblatt wird auch im Anhand D der DIN 4108-3 verwiesen. Sein Inhalt wird in Abschnitt 3.4.2 genauer beschrieben.

3.2.5.5 Holzwerkstofffeuchte

Bei Holzwerkstoffen nach EN ISO 13986 [79] ist aus Festigkeitsgründen für die meisten Materialien ein niedrigerer Grenzwert der Holzwerkstofffeuchte von 18 M.-% im Feuchtbereich bzw. 21 M.-% im Außenbereich einzuhalten. In der Einleitung der DIN 68800-2 [33] steht, dass diese Vorgaben für tragende

Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen gelten, allerdings für alle anderen Bauteile ebenfalls empfohlen werden. Zumindest für Faserdämmungen oder Dämmplatten in nach außen diffusionsoffenen Konstruktionen besteht auf der Außenseite der Bauteile jedoch das gleiche Problem der hohen Umgebungsfeuchte wie zuvor für Holzbeplankungen erwähnt: Die Materialien sorbieren Feuchte aus der Außenluft und erreichen Werte, die über den zulässigen stationären Wassergehaltsgrenzen liegen. Genauere Bewertungsmodelle und Grenzwerte für verschiedene Arten von Holzwerkstoffen sind derzeit allerdings noch Gegenstand der Forschung, sodass bei Überschreiten von 18 M.-% bzw. 21 M.-% derzeit mit dem Hersteller zu klären ist, ob das Material für solche Feuchten geeignet ist und ob der Hersteller eine entsprechende Gewährleistung übernimmt.

3.2.5.6 Tauwasserbildung innerhalb des Bauteils

Für feuchteunempfindliche Faserdämmstoffe wie Mineralfaser ist zu beachten, dass Tauwasserbildung im Winter z. B. im Flachdach unter der Dachabdichtung temporär zulässig ist, die Menge aber so gering bleiben sollte, dass das Wasser nicht aus der Konstruktion ablaufen kann. In DIN EN ISO 13788 [36] wird darauf hingewiesen, dass bei Tauwasserbildung an dichten Schichten ab ca. 200 g/m^2 das Risiko für das Abfließen des Wassers besteht. Dieser Wert hat sich auch bei Laborversuchen mit Mineralfaserdämmung auf Blechuntergrund bestätigt [60]. Ob bei entsprechender Rückhaltekapazität der Faserstruktur materialabhängig auch höhere Werte akzeptabel sind und wie diese Eigenschaft im Labor gemessen werden kann, wird derzeit genauer untersucht. Solche Ergebnisse verdeutlichen, dass Grenzkriterien aus dem vereinfachten deutschen Periodenbilanzverfahren (*Glaser*) wie z. B. 500 g/m^2 an nicht wasseraufnahmefähigen Schichten nicht auf die Ergebnisinterpretation von hygrothermischen Simulationen übertragbar sind.

Falls Tauwasser bei Umkehrdiffusion im Sommer auf der Außenseite der Dampfbremse auftritt, gelten im Prinzip die gleichen Regeln – allerdings sollte hier bei hohen Temperaturen im Sommer das Feuchteniveau aufgrund des mit der Temperatur ansteigenden Schimmelpilzwachstumsrisikos deutlich niedriger bleiben.

3.2.5.7 Wassergehaltsgrenzwerte für mineralische Baustoffe

Da auch im Holzbau mineralische Baustoffe wie Putze, Gipsfaserplatten etc. eingesetzt werden bzw. Holzbauteile auch im Massivbau Anwendung finden, soll hier zum Schluss auch auf die feuchtetechnischen Grenzwerte dieser Baustoffe eingegangen werden. Für die meisten mineralischen Baustoffe gibt es bisher im Unterschied zu Holz und Holzwerkstoffen in der Regel keine vergleichbaren allgemeingültigen Grenzwerte für den maximalen Wassergehalt. Hier müssen andere Überlegungen angestellt werden, wie z. B., dass

das Wasser in potenziell frostempfindlichen Materialien nicht gefrieren soll. Basierend auf dieser Anforderung wird z. B. im WTA-Merkblatt 6-5 zur Bemessung von Innendämmssystemen auf Mauerwerk [56] für nicht frostbeständige Materialien im Bereich zwischen Dämmung und ursprünglicher Wand ein maximaler Durchfeuchtungsgrad von 30% bzw. eine maximale relative Luftfeuchte in den Poren des Materials von 95% r. F. angegeben. Wird diese Grenze nicht überschritten, gilt die Innendämmung als sicher. Falls dieser Grenzwert nicht eingehalten werden kann, müssen frost- und fäulnisbeständige Materialien eingesetzt oder bei einer genaueren Analyse der Feuchteauswirkungen z. B. die erreichten Wassergehalte mit materialspezifischen Feuchtegrenzwerten der Hersteller verglichen werden. Da die Thematik der Frostsicherheit für die Holzkonstruktionen allerdings weitgehend irrelevant ist, wird dies hier nicht weiter behandelt. Neben Kriterien zur Frostsicherheit sind bei einigen mineralischen Baustoffen, z. B. solche, die Gips oder Kalk enthalten, weitere Kriterien zu beachten. Hohe Wassergehalte können hier eine Veränderung der Kristallstruktur bewirken, wodurch sie an Festigkeit einbüßen.

3.3 Feuchteschutz nach Holzschutznorm DIN 68800-2

Der Feuchte- und damit Holzschutz ist zentraler Bestandteil der beiden Regelwerke DIN 68800-1 [32] und DIN 68800-2 [33]. Das grundlegende Prinzip der Norm hat sich seit mehreren Jahrzehnten bewährt: Mit den sogenannten „grundlegenden baulichen Maßnahmen“, die immer angewendet werden müssen, und den „besonderen baulichen Maßnahmen“ wird die niedrigste Gebrauchsklasse (GK 0) angestrebt. Neben vielen organisatorischen (u. a. Schutz des Holzes in der Bauphase, max. Einbaufeuchte) und konstruktiven Maßnahmen (u. a. dauerhaft wirksamer Witterungsschutz, entsprechende Sockelausbildung) zählt der Nachweis des Feuchteschutzes zu den zentralen Elementen des Holzschutzes.

Wie in der Feuchteschutznorm, gibt es in der Holzschutznorm drei mögliche Nachweisverfahren:

- vereinfachter Nachweis mit der Einhaltung von inneren und äußeren s_d -Werten sowie bewährte Bauteilaufbauten,
- rechnerischer Nachweis nach DIN 4108-3 mittels vereinfachter Diffusionsbilanz unter Berücksichtigung der Trocknungsreserve und
- Nachweis mittels hygrothermischer Simulation nach EN 15026 bzw. DIN 4108-3 Anhang D unter Berücksichtigung aller dynamischen Effekte (Verschattung, Luftundichtheiten etc.).

Gegenüber der DIN 4108-3:2001 änderte sich in der DIN 68800-2:2012 die Art der Nachweisführung. Der Fokus bei dem vereinfachten Diffusionsnachweis (*Glaser*-Verfahren) für Holzbauteile liegt nicht mehr auf der Vermeidung von Tauwasser, sondern auf einer

möglichst hohen Trocknungsreserve. Dieser Ansatz wurde bereits 1999 in [61] veröffentlicht.

3.3.1 Berücksichtigung und Gründe für eine Trocknungsreserve

Die Trocknungsreserve ist die Differenz zwischen der Tauwassermenge (M_c) im Winter und der möglichen Trocknungsmenge im Sommer (M_{ev}). Diese muss bei der vereinfachten Diffusionsbilanz bei Wänden und Decken mindestens 100 g/m^2 und bei Dächern mindestens 250 g/m^2 betragen. Dass Decken zu unbeheizten Dachgeschossen nur 100 g/m^2 Trocknungsreserve aufweisen müssen, ist fachlich nicht begründbar. Sie sind genauso wie Dächer durch Konvektion gefährdet und bedürfen der gleichen Trocknungsreserve wie Dächer. Tritt in der vereinfachten Diffusionsbilanz nach DIN 4108-3 kein Tauwasser auf, ist zu beachten, dass dies noch keine hohe Trocknungsreserve bedeutet. Daher wird in diesem Fall die potentielle Verdunstungsmenge von der Baustoffgrenze im Bauteil berechnet, an der die Differenz zwischen Sättigungsdampfdruck und Wasserdampfteildruck am geringsten ist. In der Regel ist dies auf der kalten Seite der Dämmung der Fall. Dies wird seit 2016 im WTA-Merkblatt 6-8 [62] gefordert, ist aber bisher nur in wenigen Softwareprogrammen umgesetzt.

Den Sinn der Trocknungsreserve verdeutlichen die Ergebnisse in Tabelle 3. Alle Aufbauten sind innen dichter als außen (Verhältnis $s_{d,i}/s_{d,e} \sim 7$ – siehe Bild 16) und wären nach der alten Fassung der DIN 4108-03 von 2001 zulässig. Hiernach wurden in der Vergangenheit vielfach „Dicht-Dicht-Bauteile“ freigegeben, die nur wenige Gramm pro Quadratmeter Trocknungsreserve aufwiesen. Mit fatalen Folgen, wie viele Schadensfälle bis heute belegen. Mit zunehmenden s_d -Werten sinkt die Trocknungsreserve. Während die ersten beiden Aufbauten hohe Trocknungsreserven aufweisen und damit als „robust“ bezeichnet werden können, werden die Aufbauten in Zeile 3 und 4 zu dicht, sodass die geforderte Trocknungsreserve nicht erreicht wird. Sie sind mit der vereinfachten Diffusionsbilanz nicht nachweisbar und damit nicht mehr zulässig.

Tabelle 3. Einfacher Dachaufbau mit 240 mm Mineralfaser; hier als verschattetes Dach (wie Wand) gerechnet

$s_{d,i}$ [m]	$s_{d,e}$ [m]	Tauwassermenge ^{a)} [g/m ²]	Verdunstungsmenge [g/m ²]	Trocknungsreserve ^{b)} [g/m ²]	Zulässig
2,0	0,3	86 (192)	2939 (2293)	2853 (2101)	Ja
10,0	1,5	27 (46)	594 (464)	567 (418)	Ja
30,0	4,0	6 (14)	220 (172)	214 (158)	Nein
140,0	20,0	3 (2)	35 (44)	32 (42)	Nein

a) zulässige Tauwassermenge: 500 g/m^2
 b) min. zulässige Trocknungsreserve 250 g/m^2
 (Klammerwerte: Ergebnis mit Blockklima DIN 4108-3:2001)

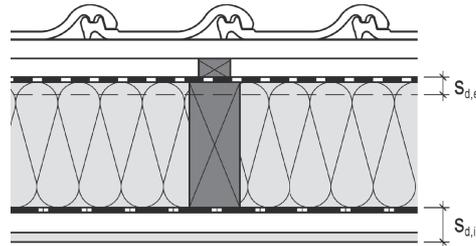


Bild 16. Definition der inneren ($s_{d,i}$) und äußeren ($s_{d,e}$) wasserdampffäquivalenten Luftschichtdicken (s_d -Wert); gestrichelte Linie: unter der Unterdeckbahn kann sich bspw. noch eine Holzschalung befinden

Tabelle 4. Anforderungen an wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicken (s_d -Werte) bei Verzicht auf einen rechnerischen Nachweis

Zeile	s_d -Wert außen ($s_{d,e}$)	s_d -Wert innen ($s_{d,i}$)
1	$\leq 0,1 \text{ m}$	$\geq 1,0 \text{ m}$
2	$0,1 \text{ m} \leq s_d \leq 0,3 \text{ m}$	$\geq 2,0 \text{ m}$
3	$0,3 \text{ m} \leq s_d \leq 2,0 \text{ m}$	$6 \times s_{d,e}$
4	$2,0 \text{ m} \leq s_d \leq 4,0 \text{ m}^a)$	$6 \times s_{d,e}^a)$

a) Nur bei beidseitig bekleideten oder beplankten, werkseitig hergestellten Elementen oder bei einer nachgewiesenen Luftdichtheit (inkl. Leckageortung) von $q_{50} \leq 1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$

Die hier dargestellten Ergebnisse des Daches berücksichtigen die Neuerung in der Norm, dass bei hellen Außenoberflächen und/oder Verschattungen von Dächern, die ungünstigeren Klimarandbedingungen von Wänden anzusetzen sind. Damit reduziert sich die Trocknung des Bauteils im Sommer. Auch eine über 20 Jahre alte Forderung [61], die nun umgesetzt wurde.

Einfach zusammengefasst bedeutet die Beachtung der Trocknungsreserve: „So diffusionsdicht wie nötig (zur Begrenzung des Tauwasserausfalls) und so diffusionsoffen wie möglich (zur Erzielung eines hohen Verdunstungspotentials)“ [57]

Das Ziel, auf der Außenseite möglichst diffusionsoffene Bauteile mit einem hohen Trocknungspotenzial zu erreichen, ist auch in der Holzschutznorm [33] festgelegt. Die Tabelle 4 kann für die sogenannten „nachweisfreien Bauteile“ herangezogen werden und wird in der nächsten Überarbeitung (voraussichtlich Dez. 2021) so oder ähnlich erscheinen und damit eine Angleichung an die DIN 4108-3 von 2018 [31] herstellen.

3.3.2 Hygrothermische Simulation für außen dampfdichte Bauteile

Aufgrund vermehrter Schäden bei außen dampfdichten Dächern (Metall und Flachdächer) wird seit 2012 in der Holzschutznorm für solche Dächer eine hygrothermische Simulation gefordert. Dort steht unter dem

Absatz 7.5: „Flach geneigte oder geneigte, voll gedämmte, nicht belüftete Dachkonstruktionen mit Metalleindeckung oder mit Abdichtung auf Schalung oder Beplankung sind zulässig, sofern der Tauwasserschutz nach DIN EN 15026 nachgewiesen wird und nach 5.2.4 für den Gesamtquerschnitt gegeben ist. Individuelle Gegebenheiten, wie Standort, Farbe der Eindeckung und Verschattung sind im Nachweis zu berücksichtigen. ... Zusätzliche äußere Deckschichten (Bekiesung oder Begrünung), Dämmschichten oberhalb der Beplankung oder Schalung sowie raumseitige Bekleidungen sind zulässig, sofern sie im Einzelnachweis auf Basis von DIN EN 15026 mitberücksichtigt werden.“ [33]

Um auch bei der hygrothermischen Simulation die Konvektion durch Luftundichtheiten zu berücksichtigen, ist der konvektive Feuchteeintrag entsprechend der geplanten Luftdurchlässigkeit mit dem q_{50} -Wert nach DIN 4108-7 mit der dazugehörigen Gebäudehöhe in Rechnung gestellt. Dabei handelt es sich aber nicht um die 250 g/m^2 , wie in der vereinfachten Diffusionsbilanz nach Glaser [64], sondern um einen dynamischen Feuchteeintrag [49]. Der Feuchteeintrag hängt sowohl von dem Bauteilaufbau als auch den Randbedingungen ab und kann mehr oder weniger als die 250 g/m^2 ergeben. Während beispielsweise eine Überdämmung zu einer geringeren konvektiven Feuchtequelle führt, können durch große Gebäudehöhen oder Überdruck durch eine Lüftungsanlage auch höhere Feuchteinträge hervorgerufen werden.

3.4 Regeln für die hygrothermische Simulation von Holzbauteilen nach WTA

Das WTA-Merkblatt 6-8 zur hygrothermischen Bemessung von Holzbauteilen [62] entstand im Nachgang zur Holzschutznorm. Planer(innen), die bis dahin hygrothermische Simulationen betrieben, mussten viele eigene Annahmen treffen, die sie aus der vorhandenen Literatur entnehmen konnten. Ein einheitliches Vorgehen gab es in Teilbereichen noch nicht. Daher wurde die international, zusammengesetzte WTA-Gruppe „Hygrothermische Bemessung von Holzkonstruktionen“ gegründet, um einen einheitlichen Standard zu schaffen. Dabei flossen die Erfahrungen der Expert(innen) aus der Schweiz, Österreich und Deutschland ein. So entstand die Überarbeitung des WTA-Merkblatts 6-2 [39] und das neue WTA-Merk-

blatt-6-8 [62]. Es werden im Folgenden nur die beiden Teilbereiche „Verschattung“ und „Bewertung“ herausgegriffen und ausführlich erläutert.

3.4.1 Verschattung

Bei der Berechnung von Bauteilen, in der Regel bei Flachdächern, kommt es immer wieder vor, dass die Verschattung berücksichtigt werden muss. Diese verursacht niedrigere Oberflächentemperaturen und damit eine geringe Rücktrocknung des Bauteilaufbaus. Die Verschattung kann man durch entsprechende Werkzeuge [58, 59] detailliert oder nach WTA-Merkblatt 6-8 [62] mit einem pauschalen Ansatz berücksichtigen.

Bei der detaillierten Betrachtung erhält man eine Klimadatei, die die reduzierte Diffus- und Direktstrahlung enthält. Bei dem vereinfachten Ansatz, werden hingegen die Strahlungsparameter der Oberfläche (Absorptionskoeffizient und Emissionskoeffizient) durch Verschattungsfaktoren angepasst, je nachdem ob nur eine vertikale (nebenstehendes Gebäude, Bäume usw.) oder horizontale Verschattung (z. B. geschlossener Terrassenbelag) vorliegt (Tabelle 5). Das Resultat beider Ansätze ist eine reduzierte Oberflächentemperatur.

Im Fall der vertikalen Verschattung wird die kurzwellige Einstrahlung (Absorption) reduziert, die langwellige Abstrahlung (Emission) allerdings kaum verändert, da die Oberfläche trotz eines nebenstehenden Gebäudes weitestgehend mit dem Himmel im Strahlungsaustausch steht.

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Merkblatts lagen zur Größenordnung der Verschattungsfaktoren kaum Messungen vor, sodass ein ingenieurmäßiger Ansatz gesucht werden musste. Dabei bot sich an, die eintreffende Strahlung auf die Nordseite eines Gebäudes (weitestgehend diffuse Strahlung) ins Verhältnis zur Gesamtstrahlung auf eine horizontale Fläche (diffuse und direkte Strahlung) zu setzen. Dabei ist festzustellen, dass die Verhältniszahl bei vielen Standorten im deutschsprachigen Raum bei ca. 0,4 (0,37–0,41) liegt. Der Wert wurde abgerundet und somit die auftreffende Gesamtstrahlung auf 35% reduziert.

Bei einer horizontalen Verschattung durch einen geschlossenen Terrassenbelag wird hingegen davon ausgegangen, dass die Oberfläche der Abdichtung bei der nächtlichen Abstrahlung nicht so stark unterkühlt wie der darüber liegende Belag. Auch staut sich ggf. die Wärme unter dem Belag. Daher wird der Emissions-

Tabelle 5. Vorschläge effektiver Strahlungsparameter für die Berücksichtigung von verschatteten Flachdächern in hygrothermischen Simulationen nach WTA 6-8

	Effektiver kurzwelliger Absorptionsgrad (a_e)	Effektiver langwelliger Emissionsgrad (ϵ_e)
vertikale Verschattung: z. B. durch Häuser, Bäume, Balkonbrüstung, Attika	$0,35 \cdot a_{\text{Abdichtung}}$	$1,00 \cdot \epsilon_{\text{Abdichtung}}$
Verschattung durch aufgeständerte PV-Module	$0,30 \cdot a_{\text{Abdichtung}}$	$0,50 \cdot \epsilon_{\text{Abdichtung}}$
Horizontale Verschattung (u. a. Terrassenbelag)	$0,35 \cdot a_{\text{Belag}}$	$0,45 \cdot \epsilon_{\text{Abdichtung}}$

koeffizient auf 45 % reduziert, sodass die Abstrahlung in den freien Himmel geringer ausfällt. Messungen und Nachberechnungen [63] zeigen auch weitere Ansätze. Hier wird im Gegensatz zur WTA-Annahme der Absorptionskoeffizient auf 60 % reduziert, wohingegen der Emissionskoeffizient unverändert bleibt. Beide Ansätze kommen zu ähnlichen Ergebnissen.

3.4.2 Bewertung von Holz durch die Porenluft- und Holzfeuchte

Holz ist in geschlossenen Bauteilen im Wesentlichen durch entsprechende holzerstörende Pilze gefährdet. Damit es in Holzbauteilen nicht zu Holzabbau durch Pilze kommt, hält die Holzschutznormung seit Jahrzehnten einen respektvollen Sicherheitsabstand bei der Beurteilung der Holzfeuchte. In der aktuellen DIN 68800-1 [32] steht: „Unabhängig von dem tatsächlichen Feuchteanspruch Holz zerstörender Pilze sowie der Fasersättigungsfeuchte der verschiedenen Holzarten wird ... einer ausreichenden Sicherheit ein Wert von 20 % Holzfeuchte als Obergrenze für das Vermeiden eines Pilzbefalls angesetzt.“ Die genannten 20 M.-% sind folglich eine mit Sicherheit behaftete Größe. Der Bereich zwischen 20 M.-% und Fasersättigungsfeuchte (bei heimischen Nadelhölzern ca. 30 M.-%) ist letztendlich unscharf und ungeeignet für die Auswertung von hygrothermischen Berechnungen. Daher war es für das WTA-Merkblatt erforderlich, eine Bewertung für hygrothermische Berechnungen zu erarbeiten.

In einem Großteil der Literatur über holzerstörende Pilze wird allerdings kein Zusammenhang zwischen Temperatur, massebezogener Holzfeuchte bzw. relativer Luftfeuchte und der Einwirkungszeit des Klimas hergestellt. Lediglich *Viitanen* und *Ritschkoff* entwickelte vor der Jahrhundertwende aus Laborversuchen ein Bewertungsmodell [65, 66], das zum einen alle Einflüsse berücksichtigt und zum anderen für die dynamische Auswertung geeignet ist. 1991 stellen *Viitanen* und *Ritschkoff* bei Laborversuchen fest, dass holzerstörende Pilze (Braunfäule wie Echter Hausschwamm, Kellerschwamm etc.) eine „Aktivierungsfeuchte“ benötigen, die sich bei mind. 95 % rel. Luftfeuchte einstellt (Bild 17). Umgerechnet in Holzfeuchte bedeutet dies bei einheimischen Bauhölzern ca. 25–28 M.-%. Die Aktivierungsfeuchte, die auch eine gewisse Zeit vorhanden sein muss, kann damit erklärt werden, dass eine erhöhte Feuchte zur Auskeimung der Pilzsporen erforderlich ist. Je nach Temperatur dauert es unterschiedlich lang (Bild 17). So beginnt das Auskeimen bei bspw. 10 °C und 95 % rel. Luftfeuchte erst nach knapp 85 Tagen. Bei höheren Temperaturen (20 °C) halbiert sich die Zeit bis zur Auskeimung (40 Tage). Somit ist die Gefährdung für das Holz im Winter aufgrund der Temperaturen geringer als im Sommer. Im Sommer hingegen können schon wenige Wochen bei hohen Feuchten, genügen, um den Pilz keimen zu lassen. Nach der „Aktivierung/Auskeimung der Pilzsporen“ sind die Feuchteansprüche der Pilze geringer. Auch

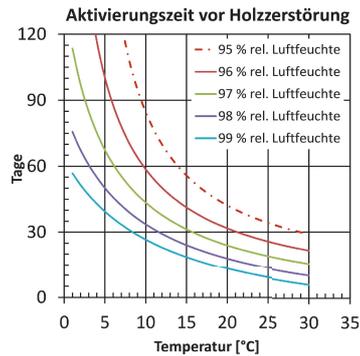


Bild 17. Zusammenhang zwischen Temperatur, rel. Luftfeuchte und der „kritische“ Zeit, ab der die Holzerstörung beginnt, der sogenannten „Aktivierung“ (aus Laborversuchen [65] entwickelte Kurven). Unter 95 % rel. Luftfeuchte kommt es nicht zum Auskeimen der Sporen von Braunfäulepilzen.

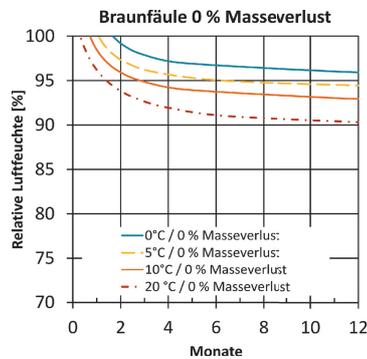


Bild 18. Zusammenhang zwischen Temperatur, rel. Luftfeuchte und der Zeit: Nach der „Aktivierung“ (Bild 17) können sich die Pilze weiterentwickeln und das Holz abbauen.

hier hängen das Wachstum und der Abbau der Holzsubstanz im Wesentlichen von der Temperatur und der rel. Luftfeuchte ab. Nach dem Modell von *Viitanen* entstehen entsprechende Kurven in Bild 18. Wählt man beispielsweise die Grenzbedingung bei 20 °C (rot-Strich-Punkte Kurve) und 92 % r. F., würde vier Monate kein Holzabbau stattfinden. Erst wenn solche Bedingungen länger vorherrschen, kommt es zum Abbau der Holzsubstanz. Den Kurven sind Gleichungen hinterlegt, die es ermöglichen, dass man nicht nur solche statischen Betrachtungen durchführen, sondern auch dynamische Prozesse auswerten kann [67].

Eine entsprechende Betrachtung schien zunächst für die hygrothermische Simulation zu komplex und sie enthielt keine Sicherheiten. Daher wurde die Bewertung stark vereinfacht [68]: Abgeleitet aus Bild 18 und dem Betrachtungszeitraum von > 12 Monaten entstand die Grenzkurve aus Temperatur und rel. Porenluftfeuchte, die im WTA-Merkblatt hinterlegt ist (Bild 19; unterste durchgezogene Linie). Ergänzt wird hier die Abbildung mit zusätzlichen Kurven, die ande-

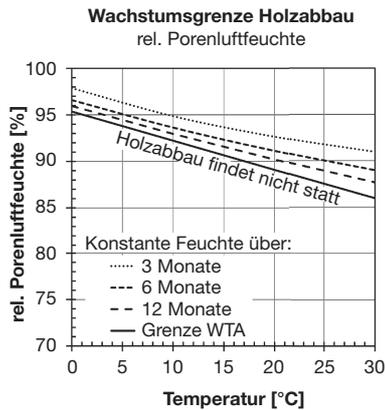


Bild 19. Möglichkeit der temperaturabhängigen Bewertung Simulationsergebnissen anhand der rel. Luftfeuchte im Holz, der sogenannten Porenluftfeuchte. Die unterste Kurve entspricht der Grenze nach WTA [62].

re Zeiträume (3, 6 und 12 Monate) betrachten. Daraus wird ersichtlich, dass die WTA-Kurve mit Sicherheitsmargen behaftet ist, da in der Regel dynamischen Prozesse nicht 12 Monate oder sogar noch länger andauern. Für die aus der Berechnung stammenden Tagesmittelwerte wurde dementsprechend im WTA-Merkblatt ergänzt: „In begründeten Ausnahmefällen können einzelne kurzfristige Überschreitungen akzeptiert werden.“ [62] Die erstellte Grenzkurve wurde innerhalb der WTA-Arbeitsgruppe an rund 200 Berechnungen ausführlich getestet und zeigt für die untersuchten Bauteile plausible Ergebnisse, die mit Erfahrungen aus der Praxis abgeglichen wurden. Nach nun über fünf Jahren Erfahrung mit der Grenzkurve und den neusten Erkenntnissen [28] wird in der WTA-Arbeitsgruppe aktuell eine veränderte Grenzziehung besprochen. Dabei werden

auch verschiedene Sicherheitsstufen diskutiert. Neben der bauphysikalischen Anforderung ist noch eine weitere Materialgrenze für Holz zu beachten. Handelt es sich bei dem Holzbauteil um ein tragendes Bauteil, sind die Nutzungsklassen aus der Tragwerksplanung (Eurocode 5) zu beachten. Die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit bei Holz hängen ebenfalls von der Umgebungs- und damit von der Holzfeuchte ab. Sind die Feuchten zu hoch, werden in der Statik Abminderungsfaktoren berücksichtigt. Dabei wird die mittlere Feuchte im gesamten Holzquerschnitt betrachtet. In der Nutzungsklasse 2 sind maximale Holzfeuchten von 20 M.-% zulässig. Die Bauphase wird in der Regel nicht separat betrachtet. Es ist folglich die Feuchte im eingeschwungenen Zustand zu beachten.

Beispiel Altbaudach

Anhand des folgenden Altbaudaches (Bild 20) wird exemplarisch aufgezeigt, dass die Grenzziehung der Holzfeuchte für die hygrothermische Bemessung geeignet ist. Bei älteren Dächern befindet sich unterhalb der hinterlüfteten Dachziegel oder unter einer Verblechung oder Verschieferung häufig eine Bitumenbahn auf einer Holzschalung, die als Unterdach dient. Will man solche Dächer energetisch von innen sanieren und den Sparrenzwischenraum dämmen, entsteht eine außen dampfdichte Konstruktion. Wird auf der Innenseite eine Dampfbremse mit einem hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand eingebaut (bspw. $s_d = 10$ m), haben diese sogenannten „Dicht-Dicht-Konstruktionen“ keine Austrocknungsmöglichkeiten und damit ein hohes Schadenspotenzial. Da immer bei der Luftdichtheit mit Restleckagen zu rechnen ist, feuchten solche Konstruktionen auf. Sie sind daher nicht mehr Stand der Technik. Erst wenn der innere s_d -Wert reduziert oder mit einer feuchtevariablen Dampfbremse gearbeitet wird, besteht zum Innenraum hin ein gewisses Austrocknungspotenzial durch sommerliche Umkehr-

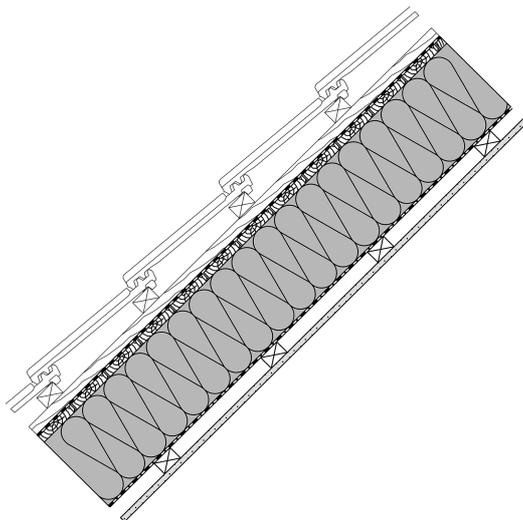


Bild 20. Saniertes Altbaudach

Aufbau von außen nach innen:

1. Ziegel mit Lattung
2. Bitumenbahn
3. Holzschalung 20 mm
4. Zellulosedämmung 200 mm
5. feuchtevariable Dampfbremse
6. Installationsebene mit GKB-Platte

Randbedingungen für die Simulation:

Klima Holzkirchen: Ø-Temp. 6,6 °C
 Dachneigung: 40°; nordorientiert
 Luftdichtheit $q_{50} = 3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$
 normale Feuchtelast nach WTA MB 6-2.
 Start: 20 °C / 80 % rel. Luftfeuchte

01.10. Startfeuchte Zellulose: 5,45 kg/m³

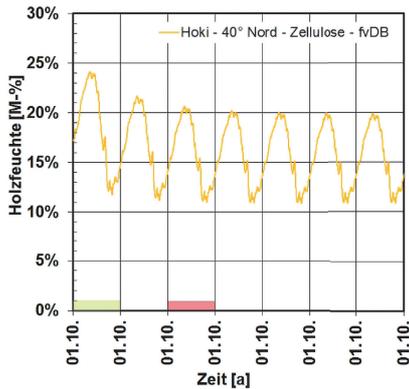


Bild 21. Die Auswertung der Holzfeuchte in der Schalung. Durch den fehlenden Temperaturbezug kann das Schadensrisiko nicht beurteilt werden. Der grüne und rote Balken zeigt die Zeiträume an, die in Bild 22a und b beispielhaft ausgewertet werden.

diffusion. Damit die eingedrungene Feuchte aus dem Winter im Sommer überhaupt rücktrocknet, ist aber die Erwärmung der Dachfläche erforderlich. Demzufolge sind besonders nordorientierte Dächer, die sich in Folge einer geringen Sonneneinstrahlung kaum erwärmen, besonders gefährdet. Das untersuchte Dach hat daher eine nach Norden orientierte 40° geneigte Dachfläche. Die Dampfbremse auf der Unterseite des Daches ist feuchtevariabel und als Dämmung kommt Zellulosefaser zum Einsatz.

Die Holzfeuchte der Schalung steigt im ersten Winter auf 24 M.-% und trocknet dann innerhalb von 4 Jahren im Maximum des Jahreszyklus auf 20 M.-% (Bild 21). Ob die Konstruktion durch Holz zerstörende Pilze gefährdet ist, ist aus dieser Darstellung aber nicht ersichtlich. Die anfänglichen 24 M.-% erscheinen zunächst als hoch. Eine vereinfachte Grenzziehung bei 20 M.-% würde die Konstruktion als nicht funktionsfähig ausweisen. Aus der Praxis sind aber ausreichende Erfahrungen vorhanden, dass diese Konstruktion funktioniert. Betrachtet man hingegen Bild 22a, so ist gut zu erkennen, dass zum einen die Grenzkurve im ersten

Jahr nicht überschritten wird, da die anfänglichen hohen Feuchten auf Grund der zu dieser Zeit herrschenden niedrigeren Temperaturen kein Problem darstellen. Zum anderen nehmen die Feuchten immer weiter ab (Bild 22b). Durch die jährliche Reduktion zeigt die Konstruktion ein ausreichendes Trocknungspotenzial.

3.4.3 Bewertung von Holzwerkstoffen durch Materialfeuchte

Grundsätzlich muss bei Holz und Holzwerkstoffen zwischen den jeweils relevanten Schadensmechanismen unterschieden werden. Während bei Holz die entsprechenden holzerstörenden Pilze maßgeblich sind für die Begrenzung der Feuchtegehalte, ist es bei den tragenden Holzwerkstoffen wie OSB- oder Spanplatten die Schädigung des Klebefüges, die bereits relevant ist, bevor holzerstörende Pilze wachsen können. Die sogenannte Delaminierung, welche durch das Quellverhalten der Holzstreifen (strands)/Holzspäne (particle) hervorgerufen wird, bewirkt einen Verlust der Tragfähigkeit. Das relevante Feuchteniveau ist im Vergleich zur Holzerstörung dabei sogar noch etwas niedriger.

Die DIN EN 13986 [79] legt die Anforderungen an Holzwerkstoffe fest. Dabei unterscheidet die Norm drei Feuchtebereiche: Trocken-, Feucht- und Außenbereich. Je nach Bereich und Holzwerkstoff müssen entsprechende Produktprüfungen bestanden werden. DIN 68800-2 verbindet die drei Bereiche mit entsprechenden maximal zulässigen Holzfeuchten (Tabelle 6). Die zulässige Feuchte von 18 M.-% im Feuchtbereich darf bei hygrothermischen Simulationen nach Norm geringfügig bis 20 M.-% überschritten werden, bei einer maximalen Überschreitungsdauer von 3 Monaten. Unklar bleibt, ob dies jährlich oder nur in den Anfangsjahren geschehen darf. In der Praxis wird meist von letzterem ausgegangen.

Es ist also festzustellen, dass bei statisch relevanten Holzwerkstoffen häufig die mechanischen Eigenschaften und nicht das Holzfäule-Risiko maßgeblich für den maximal zulässigen Feuchtegehalt sind.

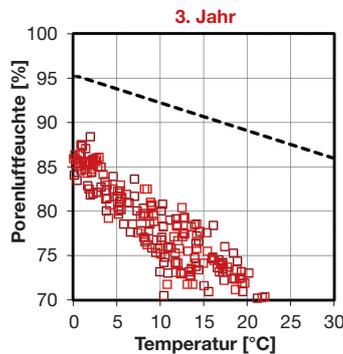
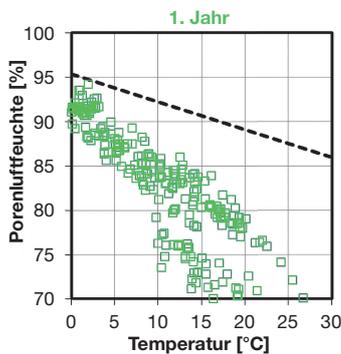


Bild 22. Die Porenluftfeuchte in der Schalung wird als Tagesmittel über die Temperatur aufgetragen. Die im ersten Jahr (a) vorhandenen, hohen Feuchten stellen aufgrund der niedrigen Temperaturen kein Problem dar. Im dritten Jahr (b) hat sich die Feuchte weiter reduziert und zeigt mit dem starken Abfall zwischen dem ersten und dritten Jahr ein ausreichendes Trocknungspotenzial.

Tabelle 6. Zuordnung der Feuchtebeständigkeitsbereich der DIN EN 13986 zu der zulässigen Holzfeuchte nach DIN 68800-2 und Nutzungsklasse nach DIN EN 1995

Feuchtebeständigkeitsbereich nach DIN EN 13986	zulässige Feuchte u_{zul} der Holzwerkstoffe in der GK 0 %	Nutzungsklasse nach DIN EN 1995-1-1
Trockenbereich	15	1
Feuchtbereich	18 ^{a)}	2
Außenbereich	21	3

a) Bei einem Nachweis mittels hygrothermischer Simulation nach DIN 4108-3, Anhang D kann eine vorübergehende Überschreitung bis zu 20 M.-% toleriert werden, wenn sie nicht länger als 3 Monate andauert.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Robuste Bauteile mit hohem Trocknungsreserven sind im Holzbau inzwischen weit verbreitet. Die Regelwerke und die Fachliteratur haben sich ebenfalls positiv weiterentwickelt und fördern feuchterobuste Bauteile. Hingegen fällt immer wieder auf, dass der Feuchteschutz und der damit verbundene bauphysikalische und konstruktive Holzschutz gerne in der Planung vernachlässigt werden oder es zu Fehlplanungen kommt. Neben Brandschutz- und Schallschutzkonzepten sind vollständige Feuchte- und Holzschutzkonzepte selten zu finden. Wie die Erfahrung zeigt, wird die Holzbau- und Bauphysikkompetenz in allen Disziplinen oft zu spät in den Planungsprozess eingebunden, wohingegen eine frühzeitige Berücksichtigung in vielen Fällen deutlich effektiver und kostengünstiger wäre. Aufgrund der feuchtetechnischen Anforderungen kann sich ein Bauteil u. U. stark gegenüber der ersten Entwurfsplanung ändern, so z. B. bezüglich Lage und Art der Dämmung, der Dampfbremse oder der Eindeckung. Erfolgt die Ermittlung dieser Anforderungen erst gegen Ende des Planungsprozesses, werden teure Umplanungen oder sogar Umbauten erforderlich.

Die Feuchte- und Holzschutzthematik erfährt aktuell einen weiteren Bedeutungsschub: Aufgrund der geänderten Bauordnungen und der entstandenen Kompetenz hat sich der Holzbau in den letzten Jahren immer stärker vom Einfamilienhaus oder eingeschossigen zum mehrgeschossigen Holzbau weiterentwickelt. Damit sind längere Bauphasen mit einem steigenden Risiko der Beregnung während der Bauphase und mit höheren Beanspruchungen z. B. durch Schlagregen im normalen Betrieb verbunden. Der Holzbau ist angehalten, auf diese erhöhten Anforderungen und Beanspruchungen zu reagieren und sich so weiter zu entwickeln, dass Schäden in diesen Bereichen nicht zunehmen, sondern frühzeitig vermieden werden können. Bei allen verbesserten Planungs- und Nachweisverfahren und einer deutlichen Ausweitung der Anwendungsbereiche in den vergangenen Jahren sollte aber eines nicht in Vergessenheit geraten: Holz und Holzwerkstoffe bleiben natürliche Materialien, die bei zu hoher Feuchtebelastung auch biologisch zersetzt werden können. Sie dürfen daher nicht in Bereichen eingesetzt

werden, in denen sie langfristig oder sogar dauerhaft hohen Feuchten ausgesetzt sind. Während die Anwendungsgrenzen für Massivholz inzwischen schon recht genau erforscht sind, fehlen bei den vielen verschiedenen Arten von Holzwerkstoffen und Faserdämmungen noch verlässliche Anwendungsgrenzen. Etliche Werkstoffe erweisen sich als weniger feuchteresistent als Holz, während andere sogar eine höhere Beständigkeit zeigen. Hier sind neben den Forschungseinrichtungen auch die Hersteller gefordert, entsprechende Informationen über ihre Produkte und deren Anwendungsgebiete und -grenzen zur Verfügung zu stellen. Ein allzu forsches Vordringen in kritische Bereiche ohne eine entsprechende Absicherung birgt das Risiko, den guten Ruf der Robustheit des Holzbaus wieder aufs Spiel zu setzen. Gerade bei der Anwendung von Holzwerkstoffen und -faserdämmungen in Nischenbereichen, die allenfalls wenige Prozent des Gesamtmarkts abdecken, wird hier manchmal ein hohes Risiko bei eher zweifelhaftem Nutzen eingegangen.

Insgesamt gilt aber: Der Holzbau ist klimafreundlich und ressourcenschonend. Es ist daher keine Überraschung, dass sein Marktanteil im deutschen Wohnungs- und Nichtwohnungsbau stetig wächst und 2020 die Marke von 20% überschreiten konnte. Die deutschen Regelwerke zum Feuchteschutz haben sehr wahrscheinlich zu dieser erfreulichen Entwicklung beigetragen, da der Holzbau aufgrund der Zunahme von feuchtetoleranten Konstruktionsweisen inzwischen als robust und dauerhaft gilt. Das ist nicht zuletzt der Einführung der Trocknungsreserve bei der Feuchteschutzbeurteilung zu verdanken. Sie ist dafür verantwortlich, dass der Fokus heute nicht mehr auf der möglichst hohen Feuchtedichtheit von Bauteilen liegt, sondern auf einem ausgewogenen Feuchtemanagement. Das bedeutet, es wird generell ein hohes Austrocknungspotenzial bei gleichzeitiger Begrenzung des Feuchteintrags angestrebt. Eine handwerklich einwandfreie Ausführung ist selbstverständlich weiterhin von größter Bedeutung, allerdings wird auch zur Kenntnis genommen, dass kleine Fehlstellen nie völlig vermeidbar sind. Das liegt aber nicht an einer vermeintlich mangelhaften Ausführung, sondern an den Gegebenheiten in der Baupraxis und auch an den Eigenschaften der eingesetzten Materialien.

Die Planung feuchtetoleranter Holzkonstruktionen erfordert Verständnis für die hygrothermischen Beanspruchungen und die damit verbundenen periodischen Befeuchtungs- und Trocknungszyklen, denen Außenbauteile ausgesetzt sind. Herkömmliche Feuchteschutzbemessungsmethoden, wie z. B. das stationäre Dampfdiffusionsverfahren nach *Glaser*, können in Einzelfällen zwar weiterhin zum Einsatz kommen, die Zukunft gehört aber wahrscheinlich der hygrothermischen Simulation, mit der eine detaillierte Feuchtebilanzierung für unterschiedliche Klima- und Nutzungsbedingungen ermöglicht wird. Letzteres eröffnet auch die Option für eine Gesamtplanung, in der die Feuchteschutzbemessung einen integralen Bestandteil der holistischen Gebäudeplanung repräsentiert.

Bisher sind die einzelnen Planungsschritte meist noch recht unabhängig voneinander. Auf der einen Seite stehen die Tragwerksplanung sowie die energetische, brand- und schallschutztechnische Auslegung. Die Feuchteschutzbemessung ist dabei, wie oben bereits erwähnt, meist einer der letzten Schritte. Auf der anderen Seite stehen die Planung der Heizung, der Lüftung und Sanitäreinrichtungen bis hin zur regenerativen Energiegewinnung und eventuell auch der Gebäudekühlung. Im Regelfall basieren alle Planungsschritte auf stationären Methoden, sodass die Gebäudedynamik weitgehend unberücksichtigt bleibt. Das Gleiche gilt für Fragen der Ökologie und grauen Energie. Die weltweiten Fortschritte beim BIM (Building Information Modeling) – Deutschland gehört hier leider nicht zu den Vorreitern – werden in Zukunft eine verbesserte Gesamtplanung mit einem intensiven Datenaustausch unter Anbindung der einzelnen Planungswerkzeuge erforderlich machen. Stationäre Verfahren werden dabei Zug um Zug von dynamischen Modellen abgelöst. Da sowohl die regenerative Energieerzeugung als auch die Nutzung der Gebäude immer größeren Schwankungen unterliegen werden, kommt der Wärme- und Feuchtespeicherung in Zukunft eine größere Bedeutung zu. In vielen Fällen wird auch das Zusammenspiel zwischen den Planungen von Gebäudehülle und Anlagentechnik wesentlich enger werden müssen, da beide Eigenschaften häufiger als heute auch innerhalb der Bauteile integriert sein werden. Dazu gehören z. B. thermische aktivierbare Bauteile, ins Bauteil integrierte Heiz- und Kühlsysteme, sowie energieerzeugende Bauteile. Jedes Bauteil, das ein Teil des Gebäudeheiz- oder kühlsystems darstellt, ist hygrothermischen Beanspruchungen ausgesetzt und sollte deshalb auch feuchte-technisch bemessen werden. Die Modelle dazu sind in Form von hygrothermischen Gebäudesimulationsverfahren bereits vorhanden.

Zum Abschluss noch ein Hinweis zur Weiterentwicklung von Feuchteschutzstrategien im Holzbau. Die Zunahme von Naturkatastrophen wie Starkregen, Stürmen oder Hagel, mit der Folge von Stromausfällen oder Wasser- und Sturmschäden erfordern eine stärkere Fokussierung auf die Resilienz von Gebäuden. Das bedeutet einerseits die Resistenz der Gebäudehül-

le gegen akute Einwirkungen und andererseits schnelle und kostengünstige Reparaturoptionen im Schadensfall. Letzteres bedeutet, dass Schäden an Bauteilen leicht auszubessern sind und diese ggf. auch ausreichend rasch getrocknet werden können. Der Holzbau ist dafür recht gut gerüstet. Wichtig ist es hier jedoch, die aufgetretenen Schäden schnell zu erkennen. Dabei können eingebaute Sensoren helfen, die z. B. erhöhte Feuchtegehalte an kritischen Stellen anzeigen. Dieselben Sensoren wären auch für die routinemäßige Gebäudeüberwachung von großem Wert, da sie einen Handlungsbedarf lange vor dem Eintreten des eigentlichen Schadens anzeigen würden. Damit würden Holzkonstruktionen noch sicherer gegenüber Feuchteschäden und damit auch noch dauerhafter werden als das bisher schon der Fall ist.

5 Literatur

- [1] IFB Bauforschung: *Analyse der Entwicklung der Bauschäden und der Bauschadenskosten – Update 2018*, IFB – 18555 Abschlussbericht: 30.09.2018. Gemeinschaftsprojekt Bauherren-Schutzbund e. V., AIA AG und Institut für Bauforschung e. V.
- [2] 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.
- [3] Künzel, H.M.; Künzel, H.; Sedlbauer, K. (2006) *Hygrothermische Beanspruchung und Lebensdauer von Wärmedämm-Verbundsystemen* in: Bauphysik 28 (2006), H. 3, S. 153–163.
- [4] Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2001) *Steildächer* in: Cziesielski, E. [Hrsg.] *Bauphysik Kalender 2001*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 461–482.
- [5] Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2007) *Reflektierende Flachdächer – sommerlicher Wärmeschutz kontra Feuchteschutz* in: IBP-Mitteilung 34 (2007), Nr. 482.
- [6] Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2007) *Langwelliger Strahlungsaustausch bei Gebäuden – Welches Verbesserungspotenzial bieten IR-reflektierende Schichten?* WTA-Journal 5 (2007), H. 2, S. 181–203.
- [7] Künzel, H.M.; Großkinsky, T. (1998) *Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an!* in: wksb 43, H. 42, S. 22–27.
- [8] Hedlin, C.P. (1988) *Heat Transfer in a Wet Porous Thermal Insulation in a Flat Roof* in: Journal of Thermal Insulation, vol. 11, pp. 165–188.
- [9] Künzel H.M. (1994) *Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassadenflächen* in: IBP-Mitteilung 21, Nr. 263.
- [10] WTA-Merkblatt 8-1 bis WTA-Merkblatt 8-7: *Fachwerkinstandsetzung nach WTA*. Wissenschaftlich Tech-

- nische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.]. IRB-Verlag.
- [11] Kehl, D.; Hauswirth, S.; Weber, H. (2010) *Ist die Hinterlüftung von Holzfassaden ein Muss?* in: Bauphysik 32 (3), S. 144–148.
- [12] Künzel, H.M.; Zirkelbach, D. (2007) *Feuchteverhalten von Holzständerkonstruktionen mit WDVS – Sind die Erfahrungen aus amerikanischen Schadensfällen auf Europa übertragbar?* in: wksb 52, H. 58, S. 50–57.
- [13] Polleres, S. (2011) *Herausforderung Fensterbankanschluss* in: Beitrag zum 2. Internationalen Holz[Bau]Physik-Kongress. Eigenverlag 2011 (zu beziehen über www.holzbauphysik.de).
- [14] Richtlinie Fensterbank für deren Einbau in WDVS- und Putzfassaden in vorgehängten Fassaden sowie für Innenfensterbänke, Österreichische Arbeitsgemeinschaft Fensterbank [Hrsg.] Eigenverlag 2020.
- [15] Künzel, H. (2003) *Dach einer Kartoffel-Lagerhalle – Feuchteschaden infolge von Konstruktionsfehlern* in: Zimmermann, G.; Schumacher, R. [Hrsg.] Bauschadensfälle, Band 3, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [16] Künzel, H. (1991) *Wärme- und Feuchteschutz von zweischaligem Mauerwerk mit Kerndämmung* in: Bauphysik 13, H. 6, S. 631–633.
- [17] Künzel, H.M.; Kehrner, M. (2008) *Einfluss der Hinterlüftung auf das Feuchteverhalten von Holzbauwänden* in: Festschrift „Umweltbewusstes Bauen“ zum 60. Geburtstag von G. Hauser. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. S. 543–552.
- [18] Straube, J., van Straaten, R.; Burnett, E. (2004) *Field Studies of Ventilation Drying* in: Proceedings Buildings X Conference. ASHRAE Atlanta.
- [19] Kölsch, Ph.; Künzel, H.M.; Zirkelbach, D. (2019) *Konvektiver Feuchteintrag in Leichtbaukonstruktionen – Leckagearten, Tauwasserverteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis* in: Bauphysik 41, H. 5, S. 269–278.
- [20] DIN 4108-11:2018-11 (2018) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 11: Mindestanforderungen an die Dauerhaftigkeit von Klebeverbindungen mit Klebebandern und Klebemassen zur Herstellung von luftdichten Schichten*. Beuth, Berlin.
- [21] Zegowitz, A. et al. (2017) *Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Fußbodenaufbauten und angrenzenden Wänden sowie von Deckenaufbauten mit natürlicher und mech anischer Trocknung nach einem Wasserschaden*. IBP-Prüfbericht P17-027.1/2017 [online] <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/projekte-referenzen/technische-bautrocknung-am-ibp.html>
- [22] *Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen – Teilvorhaben 2: Entwicklung einer Methode zur Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen*. (2008) FNR Abschlussbericht [online] <https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22008905.pdf>
- [23] Kehrner, M.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K. (2001) *Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen – ist der Feuchtezuschlag für die Wärmeleitfähigkeit gerechtfertigt?* in: IBP-Mitteilung 28, Nr. 390.
- [24] Sedlbauer, K. (2001) *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [25] Hofbauer, W. et al. (2005) *Vergleichende Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Baustoffoberflächen – materialspezifische Wachstumsisoplethen* in: IBP Mitteilung 32, Nr. 457.
- [26] Viitanen, H.; Ojanen, T. (2007) *Improved model to predict mould growth in building materials* in: Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X 2009.
- [27] Krus, M.; Seidler, C.; Sedlbauer, K. (2011) *Übertragung des Mould-Indexes auf das biohygrothermische Modell zur Schimmelpilzvorhersage* in: IBP Mitteilung 38, Nr. 513.
- [28] Projektträger Jülich (2017) *Abschlussbericht EnOB – Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken*. Forschungsprojekt-Nr. 0329663N/P/O. Eigenverlag.
- [29] Marra, E.; Zirkelbach, D.; Künzel, H.M. (2015) *Prediction of Steel Corrosion in Porous Building Materials by means of a New Hygrothermal Model* in: Proc. 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015.
- [30] Zelinka, S. (2013) *Corrosion of Embedded Metals in Wood: An Overview of Recent Research with Implications for Building Moisture Design* in: ASHRAE Transactions, 119 (2013) pp. 442–449.
- [31] DIN 4108-3:2018-10 (2018) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Beuth, Berlin.
- [32] DIN 68800-1:2019-02 (2019) *Holzschutz – Teil 1: Allgemeines*. Beuth, Berlin.
- [33] DIN 68800-2 (Feb. 2012 / voraussichtlich Dez. 2021) *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Beuth, Berlin.
- [34] Holm, A.; Künzel, H.M. (2000) *Feuchtetechnisches Verhalten von Holzsparren bei einer Dachsanierung von außen* in: IBP-Mitteilung 27, Nr. 370.
- [35] Glaser, H. (1958) *Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis* in: Kältetechnik 10, H. 11, S. 358–364 und H. 12, S. 386–390.
- [36] DIN EN ISO 13788 (2013). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren*. Beuth, Berlin.
- [37] Ackermann, Th.; Kießl, K.; Grafe, M. (2013) *Systematische rechnerische Untersuchungen zur ergänzenden Ab-*

- sicherung vereinfachter nationaler Klima-Randbedingungen bei der Übernahme des Diffusionsnachweisverfahrens gemäß EN ISO 13788 in die nationale Feuchteschutznorm DIN 4108-3 in: *Bauforschung* Band T3288, IRB Verlag, Stuttgart.
- [38] DIN EN 15026:2007-07 (2007) *Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*. Beuth, Berlin.
- [39] WTA-Merkblatt 6-2:12-2014 *Simulation wärme- und feuchte-technischer Prozesse*. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.] IRB Verlag.
- [40] Künzle H.M. (1994) *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchte-transport in Bauteilen mit einfachen Kennwerten* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [41] Grunewald, J. (1997) *Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport* [Dissertation]. Technische Universität Dresden.
- [42] Künzle, H.M. et al. (2006) *Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen* in: *Bauforschung für die Praxis*, Band 75, IRB Verlag, Stuttgart.
- [43] Antretter, F.; Pazold, P.; Künzle, H.M.; Sedlbauer, K.P. (2015) *Anwendung hygrothermischer Gebäudesimulation* in: Nabil Fouad [Hrsg.] *Bauphysik-Kalender 2015*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 189–225.
- [44] Hinrichs, J.-P.; Holm, A. (2008) *Thermische Untersuchungen an einem Metaldach mit Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle und Holzfaserdämmplatten* in: *wksb 60/2008*, S. 31–36.
- [45] Borsch-Laaks, R. (2017) *Flachdachschäden und kein Ende? Ursachen, Wirkungen und das Feuchtemanagement* in: *Holzbau – die neue quadriga*, H. 5-2017, S. 27–31.
- [46] Künzle, H.M.; Zirkelbach, D. (2007) *Feuchteverhalten von Holzständerkonstruktionen mit WDVS – Sind die Erfahrungen aus amerikanischen Schadensfällen auf Europa übertragbar?* in: *wksb 52*, H. 58, S. 50–57.
- [47] Heisted, 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* in: *Tageungsband zum Nordic Symposium of Building Physics*, Tampere 2011.
- [48] Borsch-Laaks, R., Geißler, A. (2015) *Durchströmung von Dämmschichten – kommt nach der Luftdichtung jetzt auch noch die Winddichtung?* in: *Holzbau – die neue quadriga*, H. 6, S. 65–69.
- [49] Zirkelbach, D.; Künzle, H.M.; Schafaczek, B.; Borsch-Laaks, R. (2009) *Dampfkonvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen* in: *Proceedings 30. AIVC Conference*, Berlin.
- [50] Nusser, B. (2012) *Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen – Systemanalysen und neue Ansätze zur Planung hygrisch robuster flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen unter Beachtung konvektiver Feuchteinträge und temporärer Beschattungssituationen* [Dissertation]. TU Wien.
- [51] Cheple, M.; Huelman, P. (2000) *Literature Review of Exterior Insulation Finish Systems and Stucco Finishes* in: Report MNDC/RP B80-0130, University of Minnesota.
- [52] ANSI/ASHRAE Standard 160 (2016) *Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings*.
- [53] Van den Bossche, N.; Lacasse, M.; Janssens, A. (2011) *Watertightness of Masonry Walls: An Overview* in: *Proceedings 12th International Conference on the Durability of Building Materials and Components 12dbmc*, Porto 2011, 8 pp.
- [54] 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* in: *E3S Web of Conferences 17 2*, Nordic Symposium for Building Physics NSB 2020, 7 pp.
- [55] Künzle, H.M.; Zirkelbach, D. (2010) *Hygrothermal consequences of rainwater leaks investigated for different wall structures with exterior insulation* in: *Gawin, Dariusz (Ed.): Research on building physics: proceedings of the 1st Central European Symposium on Building Physics: 13-15 September 2010, Cracow – Lodz, Poland*. Lodz: Technical Univ. of Lodz, 2010, pp. 209–213.
- [56] WTA-Merkblatt 6-5: Innendämmung nach WTA II – Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren (2014) *Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege* [Hrsg.] IRB Verlag.
- [57] Borsch-Laaks, R. (1997) *Kapitel 3.5 Wärmeschutz und Feuchteschutz* in: *Das Niedrigenergiehaus*. Heidelberg: C.F. Müller Verlag.
- [58] Meteonorm (2021, Bern) *Software zur Ermittlung Standortbezogener Klimadaten inkl. Verschattungen, Meteotest* [Software]. <https://meteonorm.com>
- [59] Heidt, F.D. *Sombbrero: Software zur quantitativen Bestimmung der Verschattung*. [Software] Universität Siegen, <http://nesal.uni-siegen.de/index.htm?softlab/sombreh.htm>
- [60] Krus, M.; Rösler, D. (2011) *Hygrothermische Berechnung der Einsatzgrenzen unterschiedlicher Systeme bei der Aufdoppelung von Wärmedämmverbundsystemen* in: *Bauphysik* (33), H. 3.
- [61] Künzle, H.M. (1999) *Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis?* in: *IBP Mitteilung*. Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik, Eigenverlag.
- [62] WTA-Merkblatt 6-8: Feuchte-technische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation (2016) *Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemein-*

- schaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.] IRB Verlag.
- [63] Bludau, Ch.; Kölsch, Ph. (2014) *Verschattung von Holzflachdächern* in: Beitrag zum 5. Internationalem Holz[Bau]Physik Kongress, Leipzig (zu beziehen unter www.holzbauphysik.de).
- [64] Borsch-Laaks, R.; Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Schafaczek, B. (2009) *Trocknungsreserven schaffen – Konvektive Feuchtebelastung bei Holzbaukonstruktionen und ihre Beurteilung mittels Glaserverfahren* in: Tagungsband 30. AIVC Konferenz, Berlin.
- [65] Viitanen, H.; Ritschkoff, A.-C. (1991) *Brown rot decay in wooden constructions. Effect of temperature, humidity and moisture* in: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report no 222, Uppsala.
- [66] 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.
- [67] Kehl, D. (2011) *Pilzmodelle – Ist der Befall vorhersehbar?* in: Holzbau – die neue quadriga, Ausgabe 01-2011.
- [68] Kehl, D. (2013) *Feuchtetechnische Bemessung von Holzkonstruktionen nach WTA – Hygrothermische Auswertung der anderen Art* in: Holzbau – die neue quadriga, Ausgabe 06-2013.
- [69] Hansen, T.K.; Jensen, N.F.; Moller, E.; de Place Hansen, E.J. Peuhkuri, R. (2020) *Monitored conditions in wooden wall plates in relation to mold and wood decaying fungi* in: Nordic Symposium of Building Physics, Tallin.
- [70] *WTA-Merkblatt 6-3: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos* (2005) Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege [Hrsg.] IRB Verlag.
- [71] Schöner, T.; Zirkelbach, D. (2016) *Erstellung hygrothermischer Referenzjahre (HRY) in Deutschland* in: IBP-Mitteilung 547 [online]. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/501-550/547.pdf>
- [72] 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 hygrothermische Bauteilsimulation. Kurztitel: Klimamodelle* in: IBP-Bericht HTB-021/2016. Valley.
- [73] Tanaka, E.; Zirkelbach, D.; Schöner, T. (2017) *Lokalklima – Modelle zur Anpassung regionaler Klimadaten auf die lokalen Verhältnisse* in: IBP-Mitteilung 551 [online] <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/551-600/551.pdf>
- [74] Zirkelbach, D. (2017) *Simulation des hygrothermischen Verhaltens begrünter Dachkonstruktionen* in: Fouad, Nabil A. (Hrsg.) Bauphysikkalender 2017. Berlin: Ernst & Sohn.
- [75] Lokalklimagenerator V.2.1 (2017) [Software] <https://wufi.de/de/2017/03/31/lokalklimagenerator>
- [76] Schießl, C.; Zirkelbach, D.; Künzel, H.M. (2018) *Nebenraum-Klimamodell für unbeheizte Dachräume* in: IBP-Mitteilung 555 [online]. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/551-600/555.pdf>
- [77] Rütther, N.; Zirkelbach, D. (2016) *Entwicklung von Modellen zur Generierung hygrothermischer Kennwerte von Holzwerkstoffen zur numerischen Simulation des Bauteilverhaltens*. IGF-Vorhaben 484 ZN. Mai 2016.
- [78] Stöckl, B.; Zirkelbach, D.; Fitz, C. (2017) *Generische Materialdatensätze für Holzwerkstoffe* in: IBP-Mitteilung 552, [online]. <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/ibpmitteilungen/551-600/552.pdf>
- [79] DIN EN 13986 (2015) *Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen – Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung*. Beuth, Berlin.