### Raumluftfeuchte in Wohngebäuden Randbedingung für die Feuchteschutzbeurteilung

Hartwig M. Künzel\*

#### 1. Einleitung

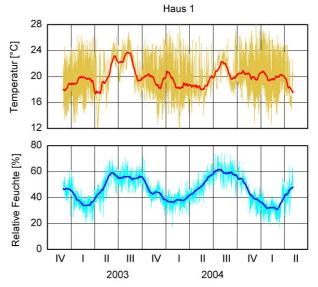
Die Feuchte in Wohnungen ist ein Dauerbrenner in der Bauphysik. Selbst in gut gedämmten Gebäuden schaffen es manche Bewohner die Feuchte so hoch zu treiben, dass Schimmelpilze an Außenwänden auftreten. Dies ist aber die Ausnahme, die es aus hygienischen Gründen zu vermeiden gilt. Die feuchtetechnische Bemessung der Gebäudehülle sollte sich jedoch am Normalfall orientieren, wobei ggf. ein entsprechender Sicherheitszuschlag vorzusehen ist. Im vorliegenden Beitrag werden Untersuchungsergebnisse zur Luftfeuchte in Wohnräumen zusammengefasst und die zum Teil daraus abgeleiteten Vorgaben in Normen und Richtlinien zur feuchtetechnischen Bemessung von Bauteilen erläutert und diskutiert.

### 2. Untersuchungsreihen in Wohnräumen

Im Rahmen einer Studie zur Beurteilung des Einflusses der Gebäudehülle auf das Raumklima [1] wurden in den Jahren 2002 bis 2005 die instationären Temperatur- und Feuchteverhältnisse in mehreren Häusern unterschiedlicher Bauart im Großraum Rosenheim kontinuierlich (im 10-Minuten-Rythmus) erfasst. Zur Verdeutlichung der Bandbreite der untersuchten Wohnräume und der dort herrschenden hygrothermischen Verhältnisse werden hier das Wohnzimmer eines Einfamilienhauses (Haus 1: 36,5 cm Mauerwerk, Baujahr 1981) mit Kachelofen (eine typische Form der Einzelofenheizung in ländlichen Gebieten Oberbayerns) und die Wohnküche eines Studentenwohnheimes (Haus 3: Betonskelettbau mit Dämmung, Baujahr 1980) mit Zentralheizung ausgewählt.

Die in Haus 1 gemessenen Temperatur- und Feuchteverläufe sind als 10-Minuten-Werte und als gleitendes Monatsmittel (dicke rote bzw. dunkelblaue Linie) über einen Zeitraum von 21/2 Jahren in Bild 1 dargestellt. Durch das periodische Befeuern des Kachelofens in Verbindung mit dem relativ niedrigen Dämmstandard des Gebäudes treten hier während der Heizperiode extreme tägliche

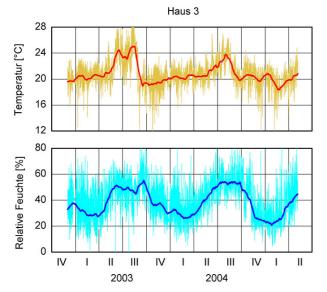
Temperaturschwankungen von bis zu 10 K auf. Die großen Temperaturunterschiede haben jedoch nicht die erwarteten Konsequenzen auf den Verlauf der relativen Feuchte im Raum. Sie bleibt vergleichsweise stabil mit tageszeitlichen Maximalausschlägen von ca. 10% r.F.. Ohne zusätzliche Einflüsse müsste eine Temperaturänderung um 10 K eine Änderung der Luftfeuchte im Raum in der Größenordnung von 50% r.F. zur Folge haben. Dass dies nicht der Fall ist, liegt an der Feuchtepufferwirkung der Raumumschließungsflächen und Möbel. Sie nehmen bei einem Anstieg der relativen Feuchte im Raum Wasserdampf auf und geben diesen wieder ab, wenn die Raumluftfeuchte sinkt. Dadurch wird eine Dämpfung der Luftfeuchteschwankungen erreicht, deren Stärke von der Wasserdampfsorptions- und -diffusionsfähigkeit (Feuchtepufferkapazität) der im Kontakt mit der Raumluft stehenden Materialien abhängt. Neben einem Bücherregal und einem Teppichboden befindet sich in dem betreffenden Wohnzimmer eine unbehandelte Holzdecke mit hoher Feuchtepufferkapazität [2]. Im Mittel (dicke Linien in Bild 1) liegt die Raumlufttemperatur im Winter etwas unter 20°C. Die mittlere relative Luftfeuchte bewegt sich zwischen 30% und 40% im Winter und zwischen 50% und 60% im Sommer.



**Bild 1:** Gemessene Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte im Wohnzimmer von Haus 1 (36,5 cm Mauerwerk, Baujahr 1981, Kachelofen) dargestellt als 10-Minuten-Werte (helle, dünne Linien) und als gleitendes Monatsmittel (dicke, dunkle Linien).

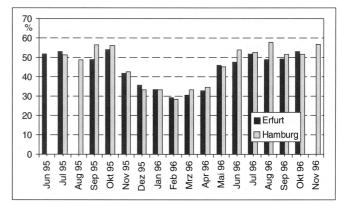
<sup>\*</sup> Dr. Hartwig M. Künzel, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen

Die Messergebnisse für die Wohnküche im Studentenwohnheim (Haus 3) sind in Bild 2 zu sehen. Durch die Zentralheizung sind hier die Temperatur-schwankungen im Winter weniger ausgeprägt als im Haus 1. Sie entsprechen eher denen im Sommer, d.h. es ist hier von einer gleichmäßigen Beheizung auszugehen. Temperaturschwankungen können demnach nicht die Ursache für die starken Fluktuationen der Raumluftfeuchte sein. Da die Feuchtepufferkapazität der Raumumschließungsflächen (PVC-Bodenbelag, verputzte Gipskartonwände) eher klein ist, machen sich hier Veränderungen in der Feuchteproduktion, z.B. durch Kochvorgänge, stark bemerkbar. Offensichtlich wird jedoch auch ausreichend gelüftet, denn die über 30 Tage gemittelte relative Feuchte in der Wohnküche von Haus 3 ist tendenziell niedriger als im Wohnzimmer von Haus 1. Trotz der beträchtlichen Unterschiede beider Wohnräume in Bezug auf Nutzung, Heizsystem und Gebäudehülle sind die mittleren Feuchteverläufe über den gesamten Untersuchungszeitraum sehr ähnlich.



**Bild 2:** Gemessene Verläufe von Temperatur und relativer Feuchte in der Wohnküche von Haus 3 (Betonskelettbau mit Dämmung, Baujahr 1980, Zentralheizung) dargestellt als 10-Minuten-Werte (helle, dünne Linien) und als gleitendes Monatsmittel (dicke, dunkle Linien).

Fasst man die Ergebnisse aller 10 untersuchten Häuser aus dem Rosenheimer Raum [1] und die Ergebnisse von ähnlichen Untersuchungen an weiteren zehn Wohngebäuden im Umkreis von Holzkirchen aus dem Jahr 1996 [3] zusammen, lässt für diese Region (Alpenvorland) folgendes feststellen: In den kalten Wintermonaten liegt die mittlere relative Feuchte in Wohnräumen in der Regel deutlich unter 40%. In den Sommermonaten liegen die höchsten Werte für die mittlere Raumluftfeuchte knapp unter 60%. Dieses Ergebnis lässt sich offensichtlich auch auf andere Regionen Deutschlands übertragen, wie die in [4] publizierten Jahresgänge aus Untersuchungen an über 400 Wohnungen in Hamburg und Erfurt (reproduziert in Bild 3) belegen.



**Bild 3:** Jahresgang der relativen Feuchte in Wohnräumen ermittelt im Rahmen einer Fall-Kontroll-Studie an je ca. 200 Wohnungen in Hamburg und Erfurt aus [4].

#### 3. Einflussfaktoren für die Raumluftfeuchte

Die Feuchtebilanz eines Wohnraumes lässt sich bei Vernachlässigung des Luftaustausches mit Nachbarräumen nach [5] wie folgt beschreiben:

$$V \cdot \frac{dc_i}{d\tau} = \sum_j A_j g_{w_j}^{\bullet} + n \cdot V(c_a - c_i) + W_{IFQ} + W_{RLT}$$
 (1)

mit

 $V [m^3]$ Raumvolumen  $[m^2]$ Raumumschließungsflächen Wasserdampfkonzentration (absolute [kg/m<sup>3</sup>] Feuchte) der Raumluft [kg/m<sup>3</sup>] Wasserdampfkonzentration (absolute Feuchte) der Außenluft  $g_{w_j}[\text{kg/(m}^2\text{h})]$  Feuchteaustausch zwischen Gebäude hüllflächen und Raumluft [1/h]Luftwechsel (Austausch der Raumluft durch Außenluft) W IFQ [kg/h] Feuchteproduktion im Raum durch interne Feuchtequellen  $W_{_{RLT}}\;[kg\!/h]$ Feuchtezu- bzw. -abfuhr durch raumlufttechnische Anlagen.

Der stationäre Feuchteaustausch durch die Raumumschließungsflächen, d.h. die Diffusion von Wasserdampf durch Wände, Decken und Fußböden hindurch ist im Vergleich zum natürlichen Luftwechsel vernachlässigbar klein. Anders sieht es mit dem instationären Feuchteaustausch aus, der durch Sorptionsvorgänge im oberflächennahen Bereich geprägt ist. Dieser Effekt, der auch als Feuchtepufferung bezeichnet wird, hat nur bei kurzfristigen (tageszeitlichen) Feuchteänderungen eine spürbare Bedeutung indem er der Änderung entgegen wirkt. Die Stärke dieser Dämpfung hängt in erster Linie von den Wasserdampfsorptions- und -diffusionseigenschaften der raumseitigen Oberflächenmaterialien ab. Bauteilschichten, die mehr als 10 mm unter der Oberflächen liegen spielen in der Regel keine Rolle mehr, da sie von den täglichen Raumluftfeuchteschwankungen nicht mehr erreicht werden [6, 7].

D.h. sie bekommen sozusagen nur die mittlere Feuchte im Raum zu spüren. Für die Feuchteschutzbeurteilung sind deshalb nur die Tages- oder sogar Monatsmittel der Raumluftfeuchte ausschlaggebend.

Für die weiteren Betrachtungen ist der Feuchteausstausch mit den Raumumschließungsflächen daher vernachlässigbar. Da raumlufttechnische Anlagen, die die Raumluft befeuchten oder trocknen in Wohnungen eher zur Ausnahme gehören, bleibt auch der letzte Term in Gleichung (1) zunächst unberücksichtigt. Für quasistationäre Verhältnisse (d.h. es werden Tages- oder besser Monatsmittel für die interne Feuchteproduktion und den Luftwechsel zugrunde gelegt) ergibt sich der folgende einfache Zusammenhang:

$$c_i = c_a + \dot{W}_{IFQ}/(n \cdot V) = c_a + \Delta c$$
 (2)

wobei der Quotient aus volumenbezogener Feuchteproduktion und Luftwechsel  $\Delta c$  auch als Feuchtelast bezeichnet wird. Sind der Luftwechsel und die mittlere Feuchteproduktion im Raum bekannt, kann so die Raumluftfeuchte aus den Klimaverhältnissen am Standort ermittelt werden.

# 3.1 Feuchteproduktion und Luftwechsel in Wohnungen

Zur Größenordnung der Feuchteproduktion in Wohnungen wurden im Rahmen des IEA-Vorhabens Annex 14 [8] die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zusammengefasst, wobei sich in Abhängigkeit von der Haushaltsgröße die in Tabelle 1 aufgelisteten täglichen Feuchtemengen ergaben. Dieselben Angaben findet man auch in der ASHRAE Norm zur feuchtetechnischen Auslegung von Gebäuden [9], wobei dort bei mehr als 5 Personen pro zusätzliche Person 1 kg/d dazu addiert wird. Außerdem wird bei mehr als 2 Personen vorausgesetzt, dass jede Person ein eigenes Schlafzimmer besitzt.

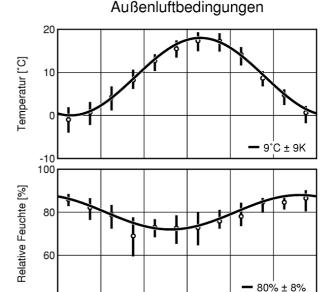
Haushaltsgröße	Personenzahl	Feuchteproduktion
ohne Kinder	2	8 kg/d
mit einem Kind	3	12 kg/d
mit zwei Kindern	4	14 kg/d
mit drei und mehr Kindern	≥ 5	15 kg/d

**Tabelle 1:** Angaben zur mittleren Feuchteproduktion in Wohnungen in [8].

Da für die Berechnung der Raumluftfeuchte nach Gleichung (2) die Feuchteproduktion auf das Wohnraumvolumen bezogen werden muss, bedeuten mehr Personen hier nicht gleichzeitig eine Verschlechterung der Feuchteverhältnisse. Umgerechnet auf die durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf in den USA von 62 qm ergibt sich für 2 und 3-Personenhaushalte (Raumhöhe 2,5 m) eine mittlere Feuchteproduktionsrate von ca. 1,0 g/m³h. Für deutsche Verhältnisse mit 38 - 46 qm Wohnfläche pro Person würde man 1,4 - 1,8 g/m³h erhalten. Die Tagesproduktion von 12 kg Feuchte in einem 3-Personenhaushalt ist jedoch nach neueren Untersuchungen in [10] sehr hoch angesetzt. Dort werden für eine 3-Personen-Modellwohnung

nur 5,6 bis 7,8 kg ermittelt je nach dem ob in der Wohnung Wäsche aufgehängt wird oder nicht. Legt man diese Zahlen zugrunde kommt man auch für deutsche Verhältnisse auf eine mittlere Feuchteproduktionsrate in Wohnräumen von etwa 1,0 g/m³h.

Zusammen mit dem Mindestluftwechsel für die Heizperiode nach DIN 4108 [11] von 0,5 h<sup>-1</sup> ergibt sich gemäß Gleichung (2) eine durchschnittliche Feuchtelast in Wohnräumen von 2,0 g/m3. Jetzt ist nur noch die Wasserdampfkonzentration der Außenluft zu ermitteln um die mittlere Raumluftfeuchte während der Heizperiode bestimmen zu können. Dazu sind örtlich repräsentative meteorologische Daten zu Temperatur und relativer Luftfeuchte erforderlich. Solche Daten sind beispielsweise in den deutschen Test-Referenz-Jahren [12] in Form von Stundenmittelwerten enthalten. Die Temperatur- und Feuchteverläufe entsprechen den langjährigen Monatsmittelwerten in den jeweiligen Regionen. Sie sind für alle Klimaregionen in den alten Bundesländern (analoge Daten für die neuen Bundesländer waren zum Zeitpunkt dieser Auswertung noch nicht vorhanden) in Bild 4 dargestellt. Die Balken zeigen die regionalen Schwankungsbreite und die Kreise die über alle Datensätze gemittelten Monatswerte. Sowohl der mittlere Jahresgang der Temperatur, als auch der der Feuchte lassen sich gut durch Sinusfunktionen annähern. Die mittlere Temperatur für Deutschland beträgt demnach 9°C mit einer saisonalen Schwankungsbreite in gleicher Größe (± 9 K) und die relative Feuchte  $80\% \pm 8\%$ .

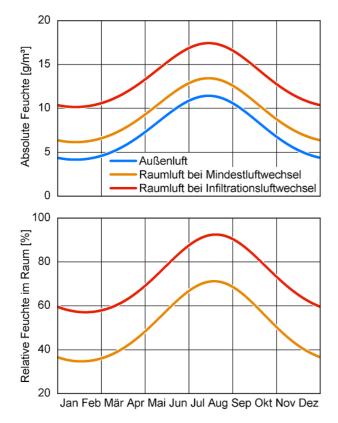


**Bild 4:** Aus den deutschen Test-Referenz-Jahren [12] ermittelte Bereiche der Monatsmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte für die unterschiedlichen Klimaregionen in den alten Bundesländern (Balken) und deren Durchschnittswerte (Hohlkreise). Diese Durchschnittswerte können durch die dargestellten Sinusfunktionen (durchgezogene Linien) approximiert werden.

Jan Feb Mär Apr Mai Jun Jul Aug Sep Okt Nov Dez

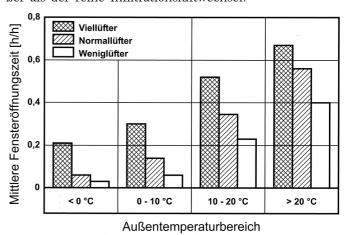
Dieselben Randbedingungen für das Außenklima sind auch im WTA-Merkblatt 6-2-01 [13] enthalten. Mit Hilfe von Gleichung (2) ergibt sich beispielsweise für den Januar (4,3 g/m³) bei einer Feuchtelast von 2,0 g/m³ eine Raumluftfeuchte von 6,3 g/m³. Bei einer Temperatur von 20°C entspricht dies einer relativen Luftfeuchte von ca. 35%. Dieser Wert entspricht ziemlich genau dem Mittelwert für die Raumluftfeuchte im Januar 1996 in den ca. 400 untersuchten Wohnungen in Hamburg und Erfurt (siehe Bild 3). Die getroffenen Annahmen sind also realistisch. Sie bilden jedoch nur die mittleren Verhältnisse ab und zeigen nicht die mögliche Bandbreite auf.

Wenn beispielsweise eine Wohnung nicht gelüftet wird, stellt sich statt des hygienischen Mindestluftwechsels nur der durch Undichtheiten in der Gebäudehülle hervorgerufene Infiltrationsluftwechsel ein. Er beträgt bei modernen Gebäuden meist weniger als 0,2 h<sup>-1</sup>. Die Feuchtelast könnte damit auf bis zu 6 g/m³ ansteigen. Wie in Bild 5 zu sehen, würde sich dabei aber im Winter eine Raumluftfeuchte von fast 60% einstellen und im Sommer könnte es unter diesen Bedingungen zu großflächigem Schimmelpilzwachstum kommen (Raumluftfeuchte > 90% r.F.). Deshalb kommt der Betrieb eines Wohngebäudes auch in den Übergangszeiten und im Sommer nicht ohne zusätzlich Lüftung, z.B. durch Fensteröffnen oder durch Einbau und Betrieb einer mechanischen Lüftungsanlage aus.



**Bild 5:** Aus den Außenluftbedingungen in Bild 4 ermittelte absolute (oben) und relative (unten) Luftfeuchteverläufe für ein Wohngebäude (Feuchteproduktion = 1,0 g/m³h), in dem der mittlere Luftaustausch durch Außenluft das ganze Jahr über entweder dem Mindestluftwechsel nach [11] von 0,5 h¹ ( $\Delta$ c = 2 g/m³) oder dem Infiltrationsluftwechsel (n < 0,2 h¹,  $\Delta$ c = 6 g/m³) entspricht. Für die Berechnung der relativen Feuchte wurde die Raumtemperatur gemäß [13] zwischen 20°C im Winter und 22°C im Sommer variiert.

Während eine Lüftungsanlage so eingestellt werden kann, dass sie den Mindestluftwechsel gewährleistet, ist dies bei der Fensterlüftung nicht so einfach. Untersuchungen zu Fensteröffnungszeiten bei Niedrigenergie- bzw. Passivhäusern in [14, 15] haben gezeigt, dass die Bewohner bei wärmerem Wetter deutlich häufiger die Fenster öffnen als bei Temperaturen um den Gefrierpunkt. Bei einer der umfangreichsten Studien zur Fensterlüftung an insgesamt 67 Wohnungen in [16] wurden die Nutzer zusätzlich gemäß ihrem Fensteröffnungsverhalten in drei Kategorien (Weniglüfter, Normallüfter und Viellüfter) eingeteilt. Aus den in Bild 6 dargestellten Ergebnissen lässt sich eine klare Steigerung der Fensteröffnungszeiten bei höheren Außenlufttemperaturen erkennen. Dies gilt für alle Nutzerkategorien gleichermaßen. Auch unter 0°C werden noch die Fenster geöffnet, wenn zum Teil auch nur kurz. D.h. der tatsächliche Luftwechsel in Wohnungen ist auch unter winterlichen Verhältnissen in der Regel deutlich größer als der reine Infiltrationsluftwechsel.



**Bild 6:** Mittlere Fensteröffnungszeiten bei Wohnungen ohne Lüftungsanlage in Abhängigkeit vom Außenlufttemperaturbereich für drei Nutzerkategorien aus [16].

Es ist nicht zu erwarten, dass die Feuchteproduktion durch menschliche Aktivitäten, wie z.B. Kochen und Duschen, witterungsbedingten Einflüssen unterliegt. Daher ist das Herauslüften der Feuchte im Sommer genauso wichtig, wie im Winter. Hierbei ist jedoch die geringere Feuchteaufnahmekapazität der wärmeren Außenluft zu berücksichtigen, die nur durch einen entsprechend höheren Luftwechsel kompensiert werden kann. Wie die Analysen von Lüftungsgewohnheiten und Raumluftbedingungen in Deutschland gezeigt haben wird dies offensichtlich durch das intensivere Fensteröffnen der Bewohner bei höheren Außentemperaturen erreicht.

# 3.2 Außentemperaturabhängige Feuchtelast in Wohnungen

Für die Lösung von Gleichung (2) kann also nicht von einem konstanten Luftwechsel ausgegangen werden. Vielmehr muss hier ein funktionaler Zusammenhang zwischen Luftwechsel und Außenlufttemperatur gefunden werden. Mit Hilfe der Fensteröffnungszeiten allein lässt sich der

Luftwechsel jedoch nicht quantifizieren, da Lage und Dimension der Fenster und des betrachteten Raumes sowie die Druckverhältnisse am Gebäude infolge von Windanströmung oder Auftriebskräften wesentliche Einflussparameter darstellen. Deshalb ist es zweckmäßiger, die Feuchtelast im Raum direkt zu bestimmen und nicht den Umweg über den Luftwechsel zu gehen. Solche Untersuchungen, bei denen entweder die Differenzen der Wasserdampfddrücke oder Wasserdampfkonzentrationen zwischen Raum- und Außenluft ermittelt und über der Außenlufttemperatur aufgetragen werden, sind beispielsweise für Wohnungen in Belgien, Großbritannien und Italien im Rahmen des IEA-Projektes Annex 24 [17] zusammengetragen und analysiert worden.

Beispielhaft für deutsche Verhältnisse wurden zehn Wohnungen in der Umgebung der meteorologischen Station der Holzkirchner Freilandversuchstelle des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) untersucht [18]. Dazu wurden über den Zeitraum eines Jahres in den jeweiligen Wohnungen Thermohygrographen aufgestellt, die einmal im Monat (beim Austausch der Schreibstreifen) mit Hilfe von Aspirationspsychrometern kalibriert wurden. Aus den eingescannten Temperatur- und Feuchteverläufen wurden die Wasserdampfkonzentrationen in den Wohnräumen bestimmt und mit den Messwerten der meteorologi-

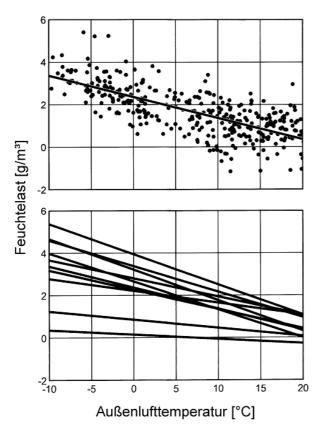


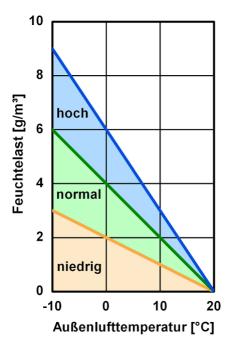
Bild 7: oben: Tagesmittelwerte der gemessenen Feuchtelast (Differenz aus Wasserdampfkonzentration im Raum und außen) für einen Wohnraum, dargestellt in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur und Auswertung durch lineare Regression.

**unten:** Zusammenstellung der Regressionsgeraden für alle untersuchten Wohnräume.

schen Station verglichen. Die Tagesmittelwerte für die Feuchtelast (Differenz zwischen der Wasserdampfkonzentration im Raum und der Außenluft) sind in Bild 7 oben exemplarisch für eine Wohnung in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt. Da sich in der Tendenz ein linearer Zusammenhang zwischen der Feuchtelast und der Außentemperatur ergibt, ist in derselben Grafik auch die aus den Einzelwerten bestimmte Regressionsgerade eingezeichnet. In Bild 7 unten sind die analog ermittelten Regressionsgeraden aller untersuchten Wohnräume zusammengefasst.

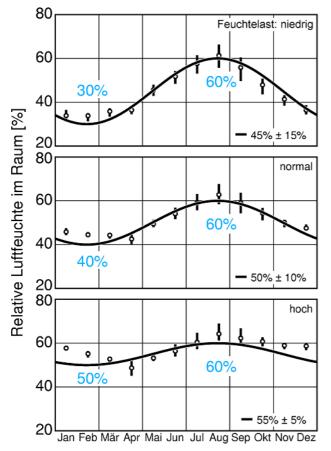
Bei acht von zehn Räumen beträgt die mittlere Feuchtelast bei einer Außenlufttemperatur von 0°C (Mittelwert für die Wintermonate gemäß Bild 4) zwischen 2,0 g/m³ und 4,0 g/m³. Setzt man eine mittlere Feuchteproduktionsrate von 1,0 g/m³h voraus (siehe oben), dann ergeben sich mit Hilfe von Gleichung (2) durchaus realistische Werte für den mittlerer Luftwechsel in den untersuchten Wohnräume von 0,25 h⁻¹ bis 0,5 h⁻¹ unter winterlichen Verhältnissen. Da mit steigender Außentemperatur die Fenster, wie bereits gezeigt, häufiger geöffnet werden, steigt auch der Luftwechsel. Dies führt offensichtlich zu einer nahezu linearen Abnahme der Feuchtelast, die bei sommerlichen 20°C fast auf Null sinkt.

Aus den Untersuchungen in [18] wurden daher der in Bild 8 grün dargestellte normale Feuchtelastbereich abgeleitet, dessen Gültigkeit sich auch durch spätere Untersuchungen [1] bestätigen ließ. Er repräsentiert die Situation in normal genutzten Wohnräumen einschließlich der sog. Feuchträume wie Küche und Bad. Dabei stellt der höchste gemessene Wert (oberste Regressionsgerade) die dunkler eingezeichnete Grenze des normalen Feuchtelastbereichs dar. Die untere Grenze dieses Bereichs ist zugleich die Obergrenze des Bereichs in dem eine niedrige Feuchtelast herrscht (in Bild 8 hellbraun dargestellt). Dieser Bereich repräsentiert Wohnräume mit geringer Feuchteproduktion bzw. guter Lüftung oder auch Büroräume. Der Bereich für eine hohe Feuchtelast (in Bild 8 blau eingezeichnet) repräsentiert Wohnräume mit einer ungewöhnlich großen Feuchteproduktion bzw. nicht vorhandener Lüftung. Dazu zählen Räume mit einer sehr hohen Belegungsdichte oder mit zusätzlichen Feuchtequellen im Raum (z.B. Luftbefeuchter). Zusätzliche Feuchtequellen können auch zu Beginn der Gebäudenutzung (Baufeuchte) oder nach einem Wasserschaden auftreten. Bei mangelhaftem Regenschutz der Außenwände kann auch die nach innen austrocknende Schlagregenfeuchte eine zusätzliche Feuchtequelle darstellen. Da kaum verwertbare Messergebnisse aus Wohnräumen vorlagen, die eine hohe Feuchtelast aufweisen, wurde die Obergrenze dieses Bereichs willkürlich durch einen Aufschlag von 50% auf die obere Grenze für die normale Feuchtelast festgelegt.



**Bild 8:** Einteilung der Außentemperatur abhängigen Feuchtelast in Wohnräumen in Feuchtelastbereiche nach [18]

Bezieht man die in Bild 8 dargestellten Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Obergrenzen der Feuchtelastbereiche und der Außenlufttemperatur auf die für Deutschland repräsentativen Klimaverhältnisse in Bild 4, lassen sich die Raumluftfeuchteverläufe (Monatsmittel) in Abhängigkeit von der Feuchtelast bestimmen. Unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen Raumtemperatur von 20°C im Winter und 22°C im Sommer



**Bild 9:** Mit Hilfe der Feuchtelastbereiche in Bild 8 aus den deutschen Außenklimabedingungen (siehe Bild 4) nach Gleichung (2) ermittelte Verläufe der Raumluftfeuchte (Monatsmittelwerte) durch sinusoidale Regression.

(sinusförmige Übergänge) sind diese Ergebnisse in Bild 9 eingezeichnet. Dabei stellen die Kreise die Mittelwerte für Deutschland (West) und die Balken die maximale Bandbreite der Ergebnisse für die verschiedenen Klimaregionen dar. Aufgrund des geringen Einflusses der regionalen Klimaunterschiede können die in Bild 9 durch Sinusfunktionen approximierten mittleren Raumluftfeuchteverhältnisse (durchgezogene Linien) für ganz Deutschland als repräsentativ angesehen werden. Je nach Feuchtelast ergeben sich somit winterliche Minima von 30%, 40% und 50% relativer Feuchte, während das sommerliche Maximum wegen der bei hohen Außenlufttemperaturen zu Null gehenden Feuchtelast in allen Fällen bei 60% liegt.

Vergleicht man die Raumluftfeuchteverläufe aus Bild 9 mit den Ergebnissen der groß angelegten Studie in Bild 3, zeigt sich, dass in den meisten Wohnungen eine niedrige Feuchtelast vorherrscht. Die Annahme einer normalen Feuchtelast (Bild 9, Mitte) liegt deshalb in der Regel auf der sicheren Seite, wenn es um die Feuchteschutzbeurteilung geht. Diese Tatsache ist auf die Klassifizierung der Feuchtelast in Bild 8 zurückzuführen, die sich an den Obergrenzen der gemessenen Werte orientiert.

## 4. Angaben zur Raumluftfeuchte in Normen und Richtlinien

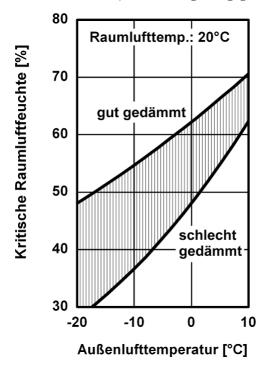
Bei der feuchtetechnischen Bemessung wird im Allgemeinen zwischen der Vermeidung von Tauwasser bzw. neuerdings auch Schimmelpilzbildung auf den raumseitigen Oberflächen von Außenbauteilen und dem Feuchteschutz der Konstruktion unterschieden. Aus hygienischen Gründen ist das Ziel der Vermeidung von Oberflächentauwasser und Schimmelpilzbildung vorrangig. Erst wenn die Konstruktion diese Bedingung (Mindestwärmeschutz) erfüllt, macht eine genauere Betrachtung des feuchtetechnischen Verhaltens Sinn. Im folgenden werden diese beiden Aspekte deshalb nacheinander behandelt.

## 4.1 Vermeidung von Oberflächentauwasser und Schimmelpilzbefall

Die aktuelle Fassung der DIN 4108-2 [11] legt den Mindestwärmeschutz von Außenbauteilen so fest, dass nicht mehr die Tauwasserbildung, sondern vielmehr die Schimmelpilzbildung auf den raumseitigen Oberflächen zu vermeiden ist. Damit ist gemeint, dass die Feuchte an diesen Oberflächen 80 % r.F. nicht überschreiten darf. Im Gegensatz zur alten Fassung [19] werden nun mildere Außenluftbedingungen (-5 °C statt -15 °C) angenommen, so dass sich die Anforderung auf den ersten Blick kaum geändert hat. Allerdings gelten diese Anforderungen jetzt auch für geometrische (z.B. Raumecken) und andere Wärmebrücken, die früher ausgenommen waren.

Daraus folgt, dass die Außenwände bestehender Gebäude zwar den alten ( $R=0.55~\rm m^2 K/W$ ) aber oft nicht mehr den neuen ( $R=1.2~\rm m^2 K/W$ ) hygienischen Mindestanforderungen genügen. Zur Definition der neuen Mindestwärmeschutzanforderungen wurde bei den Raumluftbedingungen von 50% r.F. und  $20^{\circ}$ C ausgegangen. Setzt man voraus, dass die abgeleiteten Anforderungen korrekt sind, gibt es ein Problem für ältere Gebäude, die den neuen Anforderungen nicht genügen. Dort müsste entsprechend häufig Schimmelpilzwachstum zu beobachten sein. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass die angenommen Randbedingungen in der Praxis eher selten auftreten.

D.h., die Annahme einer Raumluftfeuchte von 50% während der Heizperiode liegt sehr weit auf der sicheren Seite. Schimmelpilze lassen sich also auch in schlecht gedämmten Konstruktionen vermeiden, wenn die Raumluftfeuchte durch ein angepasstes Nutzerverhalten (siehe dazu auch [20]) entsprechend begrenzt wird. Bild 10 zeigt die zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum kritischen Grenzen für die Raumluftfeuchte in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur für schlecht und gut gedämmte Gebäude. Als schlecht gedämmt gelten hier Gebäude bei denen die Außenbauteile den alten Mindestwärmeschutz gerade erfüllen. Dabei wird angenommen, dass im Bereich der geometrischen Wärmebrücken der Temperaturfaktor  $(f_{Rsi}$ : Temperaturdifferenz zwischen Innenoberfläche und Außenluft geteilt durch Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft) bei 0,6 liegt. Dagegen werden



 $\label{eq:bild_section} \textbf{Bild} \ \ \textbf{10:} Kritischen \ Obergrenzen \ für \ die \ Raumluftfeuchte bei gut \\ (R = 1,8 \ m^2 \text{K/W} \ entspricht \ einem \ U-Wert \ von 0,5 \ W/m^2 \text{K}) \\ und \ schlecht \ (R = 0,55 \ m^2 \text{K/W}, \ U = 1,4 \ W/m^2 \text{K}) \ gedämmten \ Außenwänden zur \ Vorbeugung von Schimmelpilzbildung \\ im \ Bereich \ von \ geometrischen \ Wärmebrücken \ (wie \ z.B. \ Raumecken) \ in \ Abhängigkeit \ von \ der \ Außenlufttemperatur. \\ Für \ Gebäude \ mit \ dazwischen \ liegenden \ U-Werten \ muss entsprechend \ interpoliert \ werden$ 

Gebäude deren Außenbauteile einen U-Wert von höchstens 0,5 W/m²K aufweisen (Temperaturfaktor im Bereich der Wärmebrücken von 0,8) als gut gedämmt bezeichnet. Die Darstellung in Bild 10 macht deutlich, dass die maximal zulässige Raumluftfeuchte zur Vorbeugung von Schimmelpilzbildung stark von der Außentemperatur abhängt. Während bei gut gedämmten Wohnungen eine Raumluftfeuchte von 50% r.F. im Winter noch keine Probleme bereitet, sollte bei schlecht gedämmten Konstruktionen die Raumluftfeuchte in den kalten Monaten deutlich niedriger sein (unter 40% r.F.).

Bezogen auf die bisherigen Betrachtungen bedeutet dies, dass aus hygienischen Gründen in ungedämmten Bestandsgebäuden eine normale, jedoch keine hohe Feuchtelast zulässig ist. Diese Situation lässt sich zwar durch eine zusätzliche Außendämmung, in der Regel jedoch nicht durch eine Innendämmung der Wände verbessern. Beim Einbau einer Innendämmung lassen sich Wärmebrücken durch Zwischenwände und -decken kaum vermeiden. Dies sollte bei ihrer feuchtetechnischen Auslegung entsprechend berücksichtigt werden.

# 4.2 Feuchtetechnische Beurteilung der Gebäudehülle

### 4.2.1 Randbedingungen für die Diffusionsberechnung nach Glaser

In der Vergangenheit hat sich die feuchtetechnische Beurteilung von Bauteilen meist auf stationäre Dampfdiffusionsbetrachtungen unter winterliche Bedingungen sog. Glaser-Berechnungen beschränkt. Andere Feuchtequellen wie z.B. Niederschlagswasser oder Baufeuchte konnten bei dieser Berechnung nicht erfasst werden und wurden deshalb vernachlässigt. Das gleiche gilt für wesentliche Materialeigenschaften, wie z.B. Wärme- und Feuchtespeicherung oder Kapillartransport. Wegen der dadurch bedingten Unsicherheiten wird bei diesen Rechenverfahren versucht, durch ein Überhöhen der klimatischen Randbedingungen dennoch praxisverwertbare Ergebnisse zu erzielen, die weit genug auf der sicheren Seite liegen.

So erklären sich die Glaser-Randbedingungen für Wohnräume in der DIN 4108-3 [21], die sich aus einer 60-tägigen Tau- und einer 90-tägigen Verdunstungsperiode zusammensetzen. Für die Tauperiode werden außen -10°C / 80% r.F. und auf der Raumseite 20°C / 50% r.F. angenommen. Während der Verdunstungsperiode herrschen auf beiden Seiten 12°C / 70% r.F.. Diese Randbedingungen basieren nicht auf Untersuchungen sondern wurden für die ausschließliche Verwendung im Zusammenhang mit der Glaserberechnung gegriffen [22] und zwar recht gut, wie sich im Laufe des praktischen Einsatzes herausgestellt hat.

Beim europäische Glaserverfahren in der DIN EN ISO 13788 [23] werden für das Außenklima durchschnittliche Temperatur- und Feuchteverhältnisse (Monatsmittelwerte) für die jeweilige Klimaregion verwendet. Um auch hier mit den Rechenergebnissen auf der sicheren Seite zu sein, müssen deshalb entsprechend extreme Raumklimabedingungen angesetzt werden. In Bild 11 sind die in [23] vorgeschlagenen Feuchtelastklassen dargestellt. Die Einteilung ist analog zu den Feuchtelastbereichen in Bild 8 mit dem Unterschied, dass die Feuchtelast unter 0°C nicht mehr zunimmt. Da die Ermittlung der Raumluftfeuchte aus den Außenluftbedingungen und der Feuchtelast auf der Basis von Monatsmittelwerten vorgenommen wird, hat das "Abknicken" der Feuchtelastgeraden für deutsche Klimaverhältnisse so gut wie keinen Einfluss.

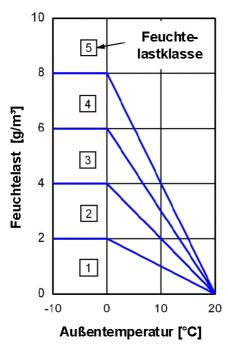


Bild 11:Feuchtelastklassen nach DIN EN ISO 13788 [23]

Klasse 1: Lager

Klasse 2: Büros, Geschäfte

Klasse 3: Wohnhäuser mit geringer Belegung

Klasse 4: Wohnhäuser mit hoher Belegung, Sporthallen, Küchen, Kantinen, Gebäude mit Gasöfen ohne Schornsteinanschluss

Klasse 5: Besondere Gebäude, z.B. Wäschereien, Brauereien, Schwimmbäder

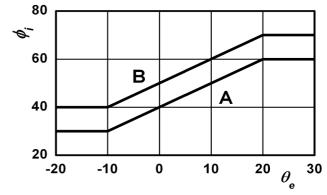
Ein großer Unterschied besteht jedoch bei der Klassenzuordnung. Die Klasse 3 in [23] für Wohngebäude mit geringer Belegung entspricht dem hohen Feuchtelastbereich in Bild 8, während die Klasse 2 für Büros und Geschäfte dem normalen Feuchtelastbereich entspricht. Es ist also eine Verschiebung um mindestens eine ganze Klasse festzustellen. Ziemlich extrem wird die Situation bereits bei Anwendung der Klasse 4 (Wohngebäude mit hoher Belegung). Dort tritt im Winter (Außenlufttemperatur 0°C) nach Gleichung (2) eine Raumluftfeuchte von fast 70 % r.F. auf. Unter diesen Bedingungen können sogar in modernen Gebäuden Schimmelpilzprobleme bzw. Tauwasser an den Fenstern entstehen. Bezeichnender-

weise wird für die Beispielberechnungen in [23] die Klasse 3 (Wohngebäude mit geringer Belegung) verwendet. Die Raumluftfeuchtebestimmung mit Hilfe der Feuchtelastklassen in der DIN EN ISO 13788 [23] ist daher selbst für Glaserberechnungen als fragwürdig zu bezeichnen. Für hygrothermische Simulationsrechnungen, die die Realität abbilden sollen, ist eine derartige Überhöhung der raumseitigen Randbedingungen ungeeignet.

## 4.2.2 Randbedingungen für die hygrothermische Bauteilsimulation

Die oben genannten Nachteile der Glaser-Berechnung sind schon lange bekannt. Wegen der Komplexität hygrothermischer Simulationsverfahren und anfänglich mangelnder Verfügbarkeit hygrothermischer Materialdaten konnte jedoch erst langsam ein Ersatz geschaffen werden. Inzwischen hat sich die hygrothermische Bauteilsimulation in der Praxis so verbreitet, dass bereits Normen und Richtlinien für ihre Anwendung entstanden sind [13, 24]. Selbst in der DIN 4108-3 [21] wird für die feuchtetechnische Beurteilung von Gründächern oder die Berechnung der Austrocknung von Rohbaufeuchte auf hygrothermische Simulationsverfahren verwiesen. Da solche Simulationen das instationäre Temperatur- und Feuchteverhalten der Gebäudehülle möglichst realitätsnah beschreiben sollen, müssen sie mit zuverlässigen Randbedingungen gefüttert werden. Für das Außenklima werden deshalb meist gemessene oder aus der langjährigen Datenerfassung erzeugte Stundenmittelwerte des zu betrachtenden Standortes verwendet.

Für das Raumklima empfiehlt das WTA-Merkblatt 6-2-01 [13] die bereits zuvor beschriebenen Verläufe in Bild 9. Der europäische Normentwurf prEN 15026 [24] enthält ein stärker differenziertes Auswahlverfahren für die Raumklimadaten. Die erste Wahl stellen Messwerte für ein ähnliches Gebäude in einem ähnlichen Klima bzw. beim Einsatz von Klimaanlagen deren Sollwerte dar. Als zweite Wahl gelten Ergebnisse aus wärme- und feuchte-



**Bild 12:** Diagramm zur Bestimmung der Raumluftfeuchte  $Φ_i$  in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur  $θ_e$  im Anhang B von prEN 15026 [24].

A: normale Belegung

B: hohe Belegung

technischen Gebäudesimulationen, wie z.B. [5]. Da jedoch Mess- bzw. Simulationsergebnisse für das Raumklima in der Praxis selten vorliegen, kommt der dritten Wahl in der Regel die größte Bedeutung zu. Sie betrifft die Abschätzung nach Gleichung (2), wobei zusätzlich auf den rein empirischen Zusammenhang (siehe auch [25]) in Bild 12 verwiesen wird. In diesem Diagramm ist im Gegensatz zu den Bildern 8 und 11 nicht die Feuchtelast sondern die Raumluftfeuchte selbst über der mittleren Außenlufttemperatur aufgetragen.

Der Hauptgrund für die Einführung dieser neuen empirischen Funktionen liegt in der direkten Ablesbarkeit der Raumluftfeuchte. Unplausible Ergebnisse durch die Wahl einer zu hohen Feuchtelastklasse werden weitgehend ausgeschlossen. Auch für Außenlufttemperaturen über 20°C gibt es eine klar definierte Raumluftfeuchte, was vor allem für südeuropäische Klimazonen wichtig ist. Unter -10°C und über 20°C bleibt die Raumluftfeuchte jeweils konstant auf ihrem Endwert. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass zur Aufrechterhaltung behaglicher und gesunder Raumklimaverhältnisse die Luft bis zu einem gewissen Grad konditioniert wird. D.h., in sehr kalten Regionen findet häufig eine Luftbefeuchtung statt, um statischen Aufladungen, übermäßiger Staubentwicklung und dem Austrocknen der Schleimhäute vorzubeugen. In heißen Regionen wird die Raumluft durch den Einsatz von Klimageräten entfeuchtet oder ihre Feuchte bleibt durch ein gleichzeitiges Ansteigen der Raumlufttemperatur begrenzt. Ein gewisser Nachteil der neuen Funktionen zur Raumluftfeuchtebestimmung ist die Nichtberücksichtigung der Außenluftfeuchte, deren Monatsmittel jedoch in Deutschland relativ kleine jahreszeitliche Schwankungen (± 8% r.F.) aufweisen.

Die Anwendung der empirischen Zusammenhänge (Bild 12) für die normale und hohe Belegung (damit ist die zu erwartende Bewohnerdichte gemeint) in der prEN 15026 [24] auf die mittleren Klimabedingungen in Deutschland (die Basis bilden Monatsmittelwerte der einzelnen Klimaregionen, siehe Bild 4) ergibt die in Bild 13 eingezeichneten saisonalen Verläufe der Raumluftfeuchte. In [24] werden zwar Tagesmittelwerte der Außentemperatur als Basis für die Bestimmung der Raumluftfeuchte angegeben, die Auswirkung der Mittelung auf die Simulationsergebnisse ist aber für mitteleuropäische Verhältnisse nach eigenen Untersuchungen vernachlässigbar klein. Dies gilt jedoch nur für den Vergleich von Tages- und Monatsmitteln als Basis für die Funktionen in Bild 12 sowie für Klimaregionen, wo die Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur selten unter -10°C fallen oder über 20°C ansteigen. In kälteren oder heißeren Regionen können sich aufgrund des horizontalen Verlaufs der empirischen Funktionen in diesen Bereichen abweichende Mittelwerte einstellen.

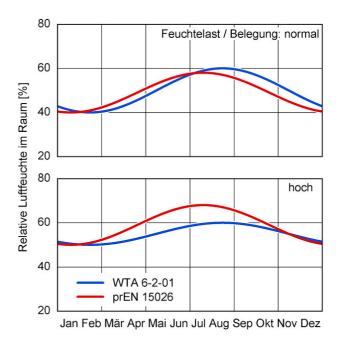


Bild 13 Vergleich der Randbedingungen für die Luftfeuchte in Wohnräumen in WTA 6-2-01 [13] und in prEN 15026 [24] unter deutschen Klimaverhältnissen.

Um die unterschiedlichen Ansätze zur Bestimmung der Raumluftfeuchte vergleichen zu können, sind in Bild 13 auch die bereits in Bild 9 gezeigten Verläufe nach WTA 6-2-01 [13] dargestellt. Für die normale Feuchtelast bzw. Belegung sind die Unterschiede in den Verläufen gering. Der leichte Jahresgang der Außenluftfeuchte (bei gleicher Temperatur ist die Luftfeuchte im Herbst höher als im Frühjahr) spiegelt sich jedoch nur bei den Raumluftfeuchteverläufen nach WTA 6-2-01 wieder, da bei deren Ableitung mit Hilfe des Feuchtelastmodells (siehe Gleichung (2) und Bild 8) auch die Außenluftfeuchte berücksichtigt wird. Bei einer hohe Feuchtelast bzw. Belegung ergeben sich für die Raumluftfeuchte nach prEN 15026 und WTA 6-2-01 im Sommerhalbjahr Differenzen von knapp 10% r.F., während die Verläufe im Winter fast identisch sind. Die höheren sommerlichen Werte nach prEN 15026 entsprechen eher den Erfahrungen in südeuropäischen Ländern.

Das vereinfachte Verfahren zur Bestimmung der Raumluftfeuchte in prEN 15026 [24] wurde mit Einschränkungen auch in den ASHRAE Normentwurf 160 [9] übernommen. Da die Klimabedingungen in Nordamerika im Vergleich zu Europa regional stärker variieren (vom extrem kalten Alaska bis zum subtropischen Florida bzw. tropischen Hawaii), wird dort aber ein genaueres Verfahren zur Bestimmung der Raumluftfeuchte favorisiert, das den Betrieb von RLT-Anlagen (HVAC) einschließt. Deshalb wird beim vereinfachten Verfahren in [9] nur die Funktion für die hohe Belegung aus Bild 12 angegeben. Fällt die feuchtetechnische Beurteilung für ein Bauteil mit diesen Randbedingungen negativ aus, ist es empfehlenswert, das genauere Verfahren zur Raumluftfeuchtebestimmung anzuwenden.

#### 5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die mittlere Raumluftfeuchte in Wohngebäuden zeigt unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen einen deutlich saisonalen Charakter. Bei Außenlufttemperaturen um den Gefrierpunkt beträgt sie im Normalfall etwa 30% r.F.; in den Übergangszeiten bewegt sie sich zwischen 40% und 50% und im Hochsommer kann sie bis zu 60% r.F. erreichen. Die Auswirkungen der täglichen Schwankungen der Luftfeuchte aufgrund von Nutzeraktivitäten bleiben auf den oberfächennahen Bereich (ca. 10 mm) der Gebäudehülle beschränkt. Darunter liegende Bauteilschichten bekommen nur das mittlere Luftfeuchteniveau "zu spüren".

Da für die feuchtetechnische Bemessung bzw. Beurteilung von Bauteilen ein Ergebnis auf der "sicheren Seite" angestrebt wird, kommen dort meist nicht die mittleren Raumklimaverhältnisse sondern entsprechend überhöhte Randbedingungen zur Anwendung. Während das bei der Berechnung nach Glaser bis zu einem gewissen Grad gerechtfertigt erscheint, um die Unsicherheiten des Verfahrens zu kompensieren, ist diesbezüglich bei der hygrothermischen Bauteilsimulation große Vorsicht geboten. Da die Randbedingungen bei Simulationsrechnungen vielfältige Auswirkungen besitzen (z.B. auf die feuchteund temperaturabhängigen Materialkennwerte), sollte hier mit möglichst realistischen Klimabedingungen gearbeitet werden.

Unterstützt durch neue Normen und Richtlinien ersetzt die hygrothermische Bauteilsimulation langsam die stationäre Glaser-Berechnung als feuchtetechnische Beurteilungsmethode für Baukonstruktionen. Dementsprechend sind auch die dafür geeigneten Randbedingungen auszuwählen. Dabei kommt der Raumluftfeuchte meist eine besondere Bedeutung zu. Für Wohngebäude sollten in der Regel die WTA-Randbedingungen für eine normale Feuchtelast zur Anwendung kommen. Mit einer relativen Luftfeuchte von 40% im Winter und 60% im Sommer liegen diese Bedingungen für normale Wohnräume einschließlich der sog. Feuchträume (Küche, Bad) ausreichend weit auf der sicheren Seite. Alternativ können auch die Randbedingungen für die normale Belegung im europäischen Normentwurf prEN 15026 verwendet werden, da sie annähernd gleiche Ergebnisse liefern.

Im Gegensatz zur prEN 15026 ist im WTA-Merkblatt 6-2-01 auch die Randbedingung für eine niedrige Feuchtelast enthalten. Sie hat zwar für die feuchtetechnische Bemessung im Neubau so gut wie keine Bedeutung, wohl aber zur Planung von Umbau- oder Instandsetzungsmaßnahmen. Beispielsweise müssen bei der energetischen Sanierung älterer oder denkmalgeschützter Gebäude häufig Kompromisse zwischen dem technisch Wünschenswer-

ten und dem für das Gebäude Verträglichen gefunden werden. Deshalb kann hier die Annahme einer geringen Feuchtelast bei entsprechenden Hinweisen für die Nutzer gerechtfertigt sein.

In Gebäuden, wo besonders ungünstige Raumluftfeuchteverhältnisse vermutet werden, erscheint es sinnvoll, eine hohe Feuchtelast anzusetzen. Leider liegen für solche Fälle kaum gemessene Daten vor, so dass es schwer zu entscheiden ist, ob die entsprechende Angaben im WTA-Merkblatt 6-2-01 oder in der prEn 15026 besser geeignet sind. Dazu sind weitere Untersuchungen erforderlich. Das gleiche gilt für die Luftfeuchte in Räumen mit stark wechselnder Belegung, wie z.B. Schulen, Gaststätten, oder in Räumen mit diskontinuierlicher Nutzung, wie Kirchen und Versammlungsstätten. Hier könnten in Zukunft neben Messungen auch hygrothermische Gebäudesimultionsrechnungen weiterhelfen.

#### 6. Literatur

- [1] Antretter, F. et al.: Interior climate in German living spaces and impact of interior linings on moisture performance. Unveröffentlichte Studie des Fraunhofer-IBP.
- [2] Künzel, et al.: Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen. Bauforschung für die Praxis, Bands 75, IRB-Verlag Stuttgart 2006.
- [3] Künzel, H.M.: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen. IBP-Mitteilung 24 (1997) Nr. 314.
- [4] Heilemann, K.-J., Heinrich, J., Wichmann, H.-E. & Bischof, W.: Raumklimatische Bedingungen in Wohnräumen - ein Vergleich zwischen Hamburg und Erfurt. Gesundheits- Ingenieur 120 (1999), H. 5, S. 239-245.
- [5] Holm, A., Radon, J., Künzel H.M. & Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA-Schriftenreihe Heft 24 (2004), S. 81-94.
- [6] Künzel, H.M. & Kießl, K.: Berechnung des Einflusses der Wasserdampfsorption von Oberfklächenmaterialien auf das Feuchteverhalten von Wohnräumen. Gesundheitsingenieur 111 (1990), H. 5, S. 217-221.
- [7] Simonson, C., Salonvaara, M & Ojanen, T.: Improving Indoor Climate and Comfort with Wooden Structures. VTT Publications 431, Espoo (Finland) 2001.
- [8] International Energy Agency (IEA) Annex 14: Condensation and Energy. Final report vol. 1, KU Leuven 1991.

- [9] ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Standard 160: Design Criteria for Moisture Control in Buildings. Working draft May 2006.
- [10] Hartmann T., Reichel, D. und Richter, W.: Feuchteabgabe in Wohnungen - alles gesagt? Gesundheits-Ingenieur 122 (2001), H. 4, S. 189-195.
- [11] DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden - Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Juli 2003.
- [12] Blümel, K. et al.: Die Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland. Bericht des Bundes-ministeriums für Forschung und Technologie BMFT-FB-T - 86-051, 1986.
- [13] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Mai 2002.
- [14] Hausladen, G. & Oppermann, J.: Fensterlüftungsverhalten in Niedrig-energiehäusern ein Modell. HLH 53 (2002) Nr. 2, S. 56-60.
- [15] Großklos, M., Knissel, J. & Loga, T.: Fensteröffnung in Passivhäusern. Bauphysik 26 (2004), H. 2, S. 79-85.
- [16] Reiß, J., Erhorn, H. & Ohl, J.: Klassifizierung des Nutzerverhaltens bei der Fensterlüftung. HLH 52 (2001), H. 8, S. 22-26.
- [17] International Energy Agency (IEA) Annex 24: Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelop Parts - Environmental Conditions. Final report vol.

- 2, KU Leuven 1996.
- [18] Künzel, H.M.: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen. IBP-Mitteilung 24 (1997) Nr. 314.
- [19] DIN 4108-2: Wärmeschutz im Hochbau Wärmedämmung und Wärmespeicherung. August 1981.
- [20] Künzel, H. et al. : Fensterlüftung und Raumklima. Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 2006.
- [21] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Klimabedingter Feuchteschutz. Juli 2001.
- [22] Künzel, H.: Wasserdampfdiffusion. Bauphysik Geschichte und Geschichten Nr. 5, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 2002, , S. 48-52.
- [23] DIN EN ISO 13788: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren Berechnungsverfahren. November 2001.
- [24] prEn 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Oktober 2004.
- [25] Künzel, H.M., Holm, A. & Kaufmann, A.: Raumluftbedingungen für die Feuchteschutzbeurteilung von Wohngebäuden. IBP-Mitteilung 30 (2003), Nr. 427.