

Einfluss feuchtepuffernder Materialien auf das Raumklima

Dr. Helmut Künzel zum 80. Geburtstag gewidmet

Hartwig M. Künzel,
Andreas Holm, Klaus Sedlbauer*

1. Einleitung

Über die klimaregulierende Wirkung bzw. Feuchtepufferung von Baustoffen wird viel spekuliert. Von interessierten Kreisen wird meist nur historischen Baustoffen wie Lehm oder Kalkputz eine solche Wirkung nachgesagt. Doch auch in modernen Gebäuden hätten feuchtepuffernde Materialien gewisse Vorteile. Durch die erhöhten Anforderungen an den Energieverbrauch werden Gebäude heute zunehmend besser gedämmt und luftdichter ausgeführt. Der vor allem durch die dichtere Gebäudehülle verringerte Infiltrations-Luftwechsel reicht jedoch in der Regel zur Aufrechterhaltung hygienischer Verhältnisse nicht aus. Um einer zu hohen Raumluftfeuchte und damit der Gefahr von Schimmelpilzbildung vorzubeugen, sind daher zusätzliche Lüftungsmaßnahmen erforderlich. Während mechanische Lüftungsanlagen normalerweise kontinuierlich Frischluft zuführen, ist dies bei der manuellen Fensterlüftung meist nicht gegeben. Damit sind in Wohnungen, die keine RLT-Anlage besitzen, sowohl die Feuchteproduktion (z.B. Duschen, Kochen) als auch die Feuchteabfuhr durch Lüften starken tageszeitlichen Schwankungen unterworfen, die zudem auch noch zeitversetzt auftreten können (z.B. abends duschen, morgens lüften). Unter diesen Bedingungen kann nur durch eine entsprechende Feuchtepufferung der Gebäudehülle oder von Einrichtungsgegenständen ein relativ gleichmäßiges Raumklima erreicht werden.

Deshalb ist das Feuchtepufferungsverhalten von Baustoffen seit über 40 Jahren ein immer wiederkehrendes Thema in der Bauphysik. Während früher jedoch experimentelle Untersuchungen vorherrschten, wird neuerdings versucht, diese Thematik auch durch hygrothermische Simulationen in den Griff zu bekommen. Die Hintergründe dieser Simulationen und ihrer Validierung werden in einem weiteren Beitrag desselben Heftes genauer beleuchtet. Der vorliegende Beitrag befasst sich ausschließlich mit den Grundlagen der Feuchtepufferung und neueren experimentellen Untersuchungen. Diese wurden jedoch so geplant,

dass sie zur Validierung rechnerischer Simulationen dienen können. Ausgehend von den Erfahrungen älterer Untersuchungen werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse von vergleichenden Freilandversuchen an Bekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen zusammengefasst.

2. Grundlagen und frühere Untersuchungen zur Feuchtepufferung

Bereits seit den Untersuchungen von Künzel [1, 2] zu Beginn der 60er Jahre ist bekannt, dass sowohl die Raumschließungsflächen als auch die Möblierung in der Lage sind, bei einer Befeuchtung der Raumluft größere Mengen an Wasserdampf aufzunehmen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abzugeben. Schon früh hat sich abgezeichnet, dass Hölzer und Holzwerkstoffe, wie beispielsweise Weichfaserplatten eine vergleichsweise hohe Feuchtepufferkapazität aufweisen. Ebenfalls untersucht wurde dabei der Einfluss von Oberflächenbehandlungen, wie Grundieren, Beizen und Wachsen auf die instationäre Feuchteaufnahme der Hölzer. Einige Jahre später wurden von Künzel [3] weitere Untersuchungen zur Bedeutung der Feuchtepufferwirkung von Innenoberflächenmaterialien auf das Raumklima durchgeführt. Dazu wurden zwei gleich große Versuchsräume erstellt, von denen einer mit Aluminiumplatten ausgekleidet war und der andere Wände aus tapezierten Gipskartonplatten hatte. In beiden Räumen erfolgte eine kontinuierliche Erfassung der Raumluftfeuchte, während bei einem relativ kleinen Luftwechsel eine bestimmte Menge an Wasser (100 - 300 g/h) verdunstet wurde. Der Unterschied der gemessenen Feuchtespitzen in beiden Räumen von fast 50 % r.F. ist ein überzeugender Beleg für die Bedeutung der Feuchtepufferwirkung von Innenraum-Bekleidungen für ein behagliches Raumklima.

Bei der Feuchtepufferung handelt es sich um eine Wechselbeziehung des Umgebungsklimas mit einem porösen Material. Eine Änderung des Umgebungsklimas bewirkt eine Veränderung des Dampfdruckunterschiedes zwischen den Poren in der oberflächennahen Schicht des Materials und der Umgebungsluft. Als Reaktion auf diesen Wechsel

* Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel, Dr.-Ing. Andreas Holm, Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen

nimmt der Stoff entweder Wasserdampf auf oder er gibt diesen an die Umgebung ab. Bei einer Erhöhung der relativen Feuchte nimmt der Stoff Umgebungsfeuchte auf (Absorption) und transportiert einen Teil durch Diffusion in tiefer liegende trockenere Bereiche. Bei einer Verringerung der Umgebungsfeuchte wird Feuchte aus dem Inneren des Körpers wieder an die umgebende Luft abgeführt (Desorption). Bei instationären Innenrandbedingungen ändert das Material folglich ständig seinen Zustand bezüglich Temperatur und Feuchte. Die Geschwindigkeit des Feuchteausgleichs im Material hängt neben dessen Sorptionsfähigkeit auch von den Wasserdampfdiffusionseigenschaften ab. Beides zusammen bestimmt die Feuchtepufferung eines Materials.

Zur Quantifizierung der Feuchtepufferung wurde von Künzel [4] ein Wasserdampf-Absorptionskoeffizient vorgeschlagen. Er beruht auf Laborversuchen bei denen Probekörper nach einer Lagerung bei 20°C und 40% r. F. schlagartig einer Feuchte von 80% ausgesetzt werden. Dabei wird, wie in Bild 1 gezeigt, die Feuchtaufnahme der einseitig offenen Proben durch periodisches Wiegen bestimmt. Trägt man die Gewichtszunahme der Proben, ähnlich wie bei der Bestimmung des Wasserabsorptionkoeffizienten (w -Wert), über der Zeit im Wurzelmaßstab auf, erhält man jeweils eine Gerade (Bild 1 unten). Die Steigung der Gerade ergibt den Wasserdampf-Absorptionskoeffizient d , der ein Maß für die Feuchtepufferung des betreffenden Materials darstellt. In Tabelle 1 ist dieser Absorptionskoeffizient für unterschiedliche Baustoffe zusammengestellt.

Materialien für den Innenausbau	Wasserdampf-Absorptionskoeffizient [g/m ² ·√h]
Mineralische Baustoffe:	
Beton	8
Kalkzementputz	15
Weißkalkputz	9
Holzbaustoffe:	
Buche	19
Eiche	15
Fichte	17
Kiefer	20
Teak	12
Hartfaserplatte	16
Weichfaserplatte	40
Teppiche:	
Kokosfaser	31
Sisalfaser	33
Wolle	29
Synthetische Faser	17

Tabelle 1: Wasserdampf-Absorptionskoeffizient verschiedener Baustoffe bestimmt bei einem Feuchtesprung von 40% auf 80% r.F. nach [2].

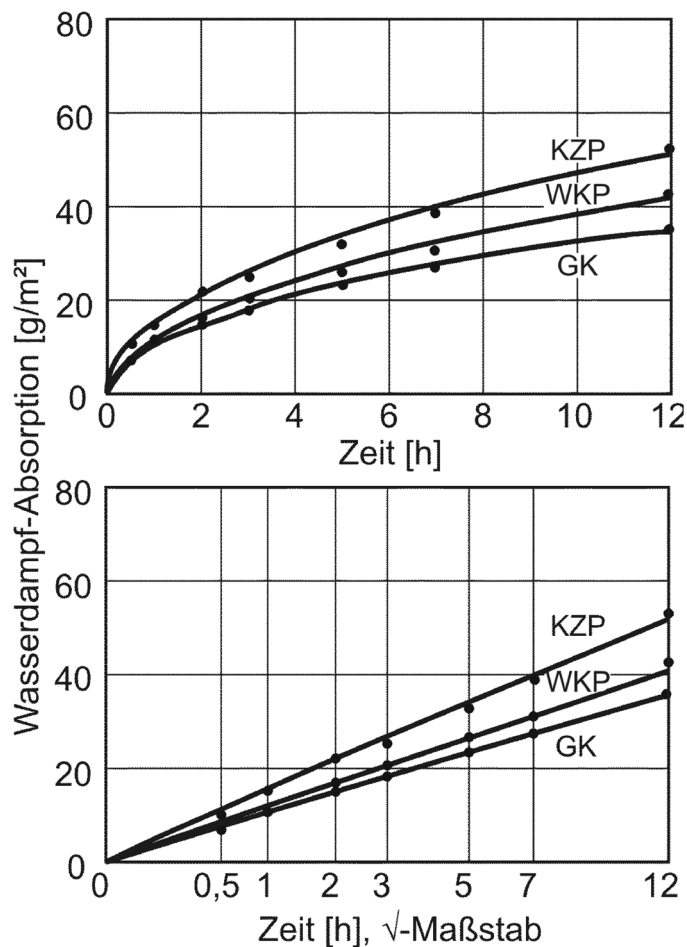


Bild 1: Wasserdampf-Absorption von Innenputzen in Abhängigkeit von der Zeit (oben) und von der Quadratwurzel der Zeit (unten) bei Erhöhung der Umgebungsfeuchte von 40% auf 80% r.F. unter konstanten Temperaturbedingungen (20°C) nach [4].
KZP: Kalkzementputz
WKP: Weißkalkputz
GK: Gipskarton

Allerdings gelten diese Werte nur für einen Feuchtesprung von 40% auf 80% r.F., bei anderen Feuchteverhältnissen können sich davon Abweichungen ergeben. Deshalb ist es sinnvoll, den Wasserdampf-Absorptionskoeffizienten genauer abzuleiten. Eine solche Ableitung wurde in [5] unternommen und soll hier wegen des mathematischen Aufwandes nicht wiederholt werden. Interessant ist jedoch der in Gleichung (1) aufgezeigte Zusammenhang zwischen dem Absorptionskoeffizienten d und anderen allgemein bekannten hygrischen Stoffeigenschaften.

$$d \propto \frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{1}{\mu} \quad (1)$$

Wobei $dw/d\varphi$ die Steigung der Sorptionsisotherme im betreffenden Feuchtebereich und μ die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Materials darstellt. Während die Steigung der Sorptionsisotherme bei höherer Umgebungsfeuchte größer wird, ist beim Diffusionswiderstand eher das Gegenteil der Fall (von 0% - 60% r.F. ist er bei mineralischen Baustoffen näherungsweise konstant). Daraus folgt, dass der Wasserdampf-Absorptionskoeffizient, wenn er in einem anderen Feuchtebereich bestimmt würde, wahrscheinlich einen etwas anderen Wert hätte. D.h., wegen des normalerweise S-förmigen Isothermen-Verlaufs wird die Feuchtepufferung ausgehend

von 50% r.F. sowohl zur trockenen als auch zur feuchten Seite hin größer.

Weiterhin ist Gleichung (1) zu entnehmen, dass die größte Feuchtepufferung von diffusionsoffenen Baustoffen mit gleichzeitig ausgeprägter Sorptionsfähigkeit zu erwarten ist. Das erklärt auch den hohen Wasserdampf-Absorptionskoeffizienten für Weichfaserplatten in Tabelle 1. Wird allerdings die Diffusionsoffenheit eines Baustoffes durch eine Beschichtung vermindert, kann die Feuchtepufferwirkung zum Teil erheblich herabgesetzt werden, wie die Ergebnisse aus [4] in Bild 2 zeigen. Bereits das Aufbringen einer Beschichtung mit einem s_d -Wert von 0,3 m reduziert die Wasserdampfabsorption auf etwa die Hälfte. Eine noch dichtere Beschichtung ($s_d = 2,0$ m) bringt den Feuchteaustausch zwischen der Raumluft und dem Material fast völlig zum Erliegen. Für die Beschichtung von Holz und Holzwerkstoffen gibt es analoge Ergebnisse aus Finnland, wo die Feuchteabsorption und -desorption von unbeschichteten und beschichteten Laborproben miteinander verglichen wurde [6].

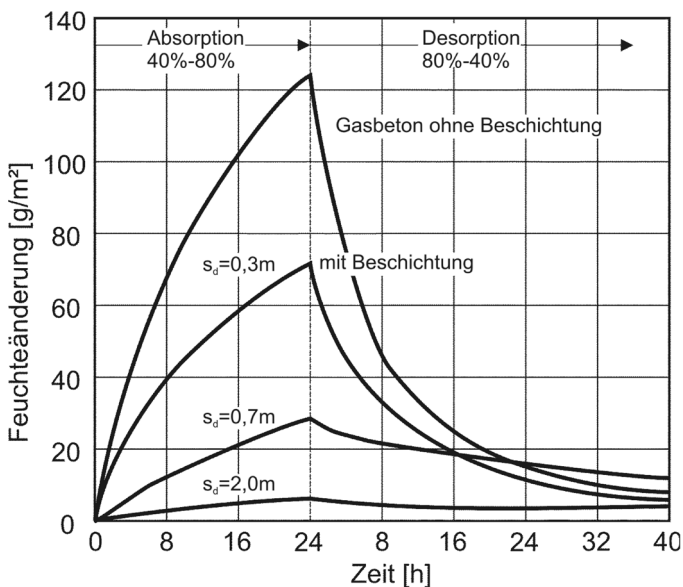


Bild 2: Wasserdampfabsorption von Porenbeton ohne Beschichtung (oberste Kurve) und mit unterschiedlich diffusionsoffenen Beschichtungen (s_d -Werte zwischen 0,3 m und 2,0 m) bei einer Änderung der Umgebungsfeuchte von 40% auf 80% r.F. und anschließende Desorption bei Absenken der relativen Luftfeuchte auf den Ausgangszustand (40%) nach [4].

Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden: Die Feuchteaufnahme bzw. -abgabe von porösen Materialien im Raum wirkt jeder Änderung der Luftfeuchte entgegen, was zu einer Dämpfung der Feuchteschwankungen bei einem Feuchteastwechsel (d.h. Änderung der Feuchteproduktion oder der Lüftungsrate) führt. Die Stärke der Dämpfung ist abhängig von den Wasserdampf-Absorptionskoeffizienten der Materialien im Raum, ihrer Kontaktflächen zur Raumluft (Dimensionen und eventuelle Oberflächenbeschichtungen) und den Wasserdampfübergangsbedingungen zwischen den Oberflächen und dem Hauptvolumen der Raumluft. Das Hauptvolumen der Raumluft stellt den ideal vermischten Teil dar ohne Grenzschichten oder Toträume (Räume, die

nicht von der natürlichen Luftzirkulation im Raum erfasst werden, z.B. in Schränken oder hinter langen Vorhängen). Außerdem - und das macht die Sache nicht einfacher - ist die Feuchtedämpfung eine zeitabhängige Größe. Je länger beispielsweise die Feuchteproduktion im Raum anhält umso weiter wird der Diffusionsweg zu den noch nicht erschöpften (gesättigten) Materialbereichen. Es ist daher offensichtlich, dass das Phänomen der Feuchtepufferung weder durch einfache Laborversuche noch durch eine simple Raumbilanzierung ausreichend genau beschreibbar ist. Wie bereits in [7] nachgewiesen sind dazu entweder kombinierte hydrothermische Raum- und Bauteilsimulationen notwendig, oder experimentelle Untersuchungen in realen Aufenthaltsräumen mit realistischen Randbedingungen.

3. Neue Freilandversuche zur Feuchtepufferung

Ausgehend von Skandinavien ist seit den 90er Jahren ein wachsendes Interesse an gesunden Raumklimaverhältnissen zu beobachten. Deshalb wurden in Finnland um die Jahrtausendwende rechnerische [8] und experimentelle [9] Studien zur Feuchtepufferwirkung verschiedener Innenbekleidungen im Auftrag der Holz verarbeitenden Industrie durchgeführt. Aufgrund der guten Kontakte des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) zum finnischen Bauforschungsinstitut VTT wurde das IBP im Jahr 2002 von der finnischen Industrie beauftragt, begleitende Freilandversuche durchzuführen, um die Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen überprüfen zu können. Dabei ging es vor allem um einen Vergleich der Feuchtepufferwirkung von zum Teil innovativen Bekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen mit einer in Deutschland üblichen Bekleidung im Wohnungsbau, dem maschinell verarbeitbaren Kalk-Gipsputz. Da die Raumluftbedingungen u.a. auch von den Außenklimabedingungen abhängen, sind für einen direkten Vergleich Parallelmessungen in zwei identischen Räumen erforderlich, wo der einzige Unterschied in der raumseitigen Bekleidung liegt. Die Planung, Durchführung und Auswertung dieser Versuche sind detailliert in [10] beschrieben. Die wesentlichen Punkte daraus werden im Folgenden zusammengefasst.

3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Für die experimentellen Untersuchungen standen zwei identische Versuchsräume eines Testgebäudes (Bild 3) auf dem Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen zur Verfügung, die es gestatten, durch parallele Untersuchungen an einem Referenzraum und einem mit dem zu untersuchenden Material ausgestatteten Testraum auch für wechselnde Außenklimabedingungen den Feuchtepufferungseffekt zu ermitteln. Die Messungen erfolgten im Zeitraum von Dezember 2002 bis Februar 2004. Die Außenklimabedingungen wurden während des gesamten Zeitraumes routinemäßig von der IBP-eigenen Wetterstation registriert.

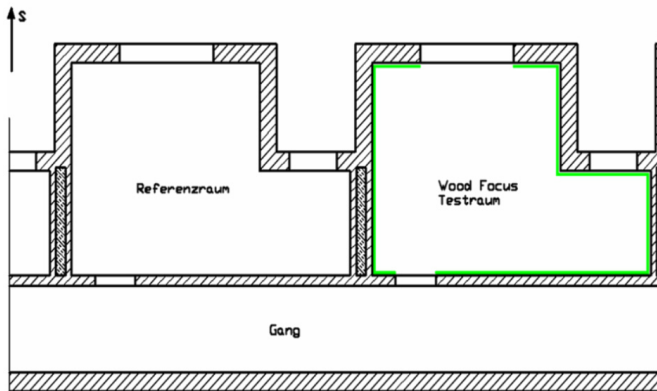


Bild 3: Raumklima-Testgebäude auf dem Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen mit Angabe von Grundriss und Lage der Räume für die Vergleichsmessungen.

3.1.1 Versuchseinrichtung und technische Installationen

Die Versuchsräume befinden sich in einem Gebäude, das in den 80er Jahren für vergleichende Wärmedurchgangsmessungen an unterschiedlichen Wandkonstruktionen errichtet [11] und später für Raumklimauntersuchungen modifiziert wurde. Der Grundriss der beiden geometrisch identischen Räume ist in Bild 3 dargestellt. Die Außenwände der Räume haben einen U-Wert von $0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. In den angrenzenden Räumen herrscht eine konstante Temperatur von 20°C , was Wärmeströme durch die Innenwände praktisch ausschließt. Im Folgenden wird als Referenzraum der Raum bezeichnet, dessen Wände und Zimmerdecke mit einem herkömmlichen Kalk-Gipsputz bekleidet sind. Der Testraum ist in Geometrie und Dimension mit dem Referenzraum identisch. Im Unterschied zum Referenzraum wurden jedoch seine Wandflächen und die Decke mit Aluminiumfolie beklebt. Da auch der Fußboden in beiden Räumen einen PVC-Belag besitzt, ist der Testraum praktisch hygri-sch inert, d.h. seine Umschließungsflächen können so gut wie keine Feuchte speichern. Damit ist sicher gestellt, dass die in den nachfolgenden Versuchen ermittelte Feuchtepufferwirkung allein auf die im Testraum zu untersuchenden Bekleidungs-materialien zurückzuführen ist.

Jeder der Räume hat ein Volumen von 50 m^3 und eine Innenoberfläche (ohne Fußboden) von $65,7 \text{ m}^2$. Der Referenzraum wurde nach ersten Tastversuchen mit einem handels-

üblichen weißen Innenanstrich versehen, da dies auch in der Praxis üblich ist, um den grauen Farbton des Putzes aufzuhellen. Die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke ($s_{d\text{-Wert}}$) des Anstrichs, im wet-cup- und dry-cup-Verfahren nach DIN 52 615 gemessen, liegt bei $0,15 \text{ m}$ bzw. $0,24 \text{ m}$ (Auftragsmenge $150 \text{ ml}/\text{m}^2$ gemäß Verarbeitungsrichtlinie des Herstellers). Die Innenansicht des Testraumes ist in Bild 4 oben und die des Referenzraumes im gleichen Bild darunter dargestellt. In der unteren Aufnahme sind auch die verschiedenen RLT-Geräte bezeichnet, die bei den Untersuchungen verwendet wurden. Zur Steuerung der Außenluftzufuhr wurden in die Gebläse der beiden Räume Volumenstromregler eingebaut, die in der Lage sind, in einem Differenzdruckbereich bis 240 Pa einen kontinuierlichen Volumenstrom zu erzeugen. Die Genauigkeit der Volumenstromregelung liegt bei $\pm 15\%$. Damit ergibt sich bei einer Voreinstellung von $0,5 \text{ h}^{-1}$, ein realer Luftwechsel der Räume zwischen $0,43$ und $0,57 \text{ h}^{-1}$.

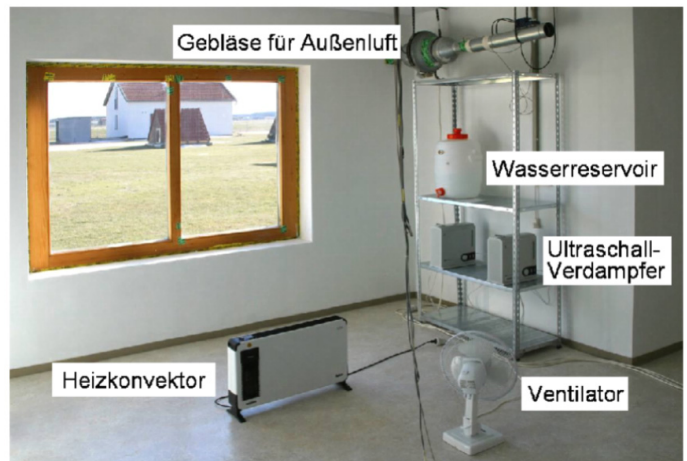


Bild 4: Innenansicht des Testraums (oben) sowie des Referenzraums (unten).

Die Feuchteproduktion wird mit Hilfe von Ultraschallverdampfern realisiert. Dies sind handelsübliche Luftbefeuchter, die kalten Nebel erzeugen. Der große Vorteil dieses Einbringverfahrens ist der damit verbundene, geringe Energieeintrag (50 W) in die Versuchsräume. Dadurch wird eine zusätzliche undefinierte Wärmequelle, wie sie zum Beispiel eine Heizplatte darstellt, ausgeschlossen. Bei der Ultraschallverdampfung versetzt eine kleine Metallmembrane das Wasser in hochfrequente Schwingung und zerstäubt es dadurch. Eine kontinuierliche Steuerung der

Verdampfungsrate der Geräte ist allerdings systembedingt nicht möglich. Aus diesem Grund wurde eine „Digitalisierung“ der Verdampfung vorgenommen, d.h. die Steuerung der Geräte erfolgte über eine Zeitschaltuhr. Zur gleichmäßigen Verteilung der produzierten Feuchte und zur Vermeidung einer Temperaturschichtung im Raum läuft in jedem Raum während des Versuchs ein schwenkbarer Ventilator.

In den Versuchsräumen sind Sensoren zur kontinuierlichen Erfassung folgender Messgrößen installiert: Temperatur an den Wandoberflächen und in Raummitte mit Höhenprofil, relative Feuchte in Raummitte, Wärmefluss durch Außen- und Zwischenwände sowie Energieverbrauch der Elektroheizung. Für die weitere Versuchsauswertung werden hier jedoch lediglich die Messgrößen Temperatur und relativ Feuchte betrachtet. Die Temperatur in den Räumen wird mittels SPS-Steuerung, die einen Heizkonvektor regelt, auf 20°C gehalten. Die relative Feuchte wird mit Hilfe von kapazitiven Feuchtefühlern in Raummitte (Höhe: 1,30 m) sowie zusätzlich in der Zuleitung der Lüftungsgebläse gemessen. Die Registrierung der elektrischen Signale von den Temperatur- und Feuchtefühlern erfolgt durch ein Messdatenerfassungssystem, das die Möglichkeit bietet, Messwerte direkt in eine Datenbank zu übernehmen und grafisch darzustellen. Die erfassten Daten werden online visualisiert (Bild 5), so dass die Entwicklung einer Versuchsreihe mitverfolgt werden kann und eventuelle Störungen sofort feststellbar sind.

3.1.2 Vorbereitung der Versuchsräume und Bekleidungen

Der Luftwechsel wird während der Versuche nicht erfasst. Für die Validierung von Simulationsrechnungen ist diese Größe jedoch ein wesentlicher Faktor. Daher ist es wichtig, dass zum voreingestellten Luftaustausch durch die kalibrierten Gebläse kein nennenswerter Infiltrationsluftwechsel kommt. Deshalb wurde großer Wert auf die Dichtheit der Versuchsräume (Abkleben von Fenster- und Türanschlüssen) gelegt. Eine anschließende Blower-Door Messung mit einem Differenzdruck von 50 Pa ergab für den Referenzraum $n_{50} = 0,56 \text{ h}^{-1}$ und für den Testraum $n_{50} = 0,43 \text{ h}^{-1}$. Umgerechnet auf den Luftwechsel durch Infiltration unter normalen Druckbedingungen ergibt sich daraus $n = 0,03 \text{ h}^{-1}$ für den Testraum und $n = 0,04 \text{ h}^{-1}$ für den Referenzraum (Multiplikation des ermittelten $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ Wertes mit dem Faktor 0,07). Im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit der Lüftungssteuerung sind dies akzeptable Werte für die Luftdichtheit der Räume.

Die nacheinander im Testraum installierten und untersuchten Bekleidungen sind in den Bildern 6 bis 10 dargestellt. Begonnen wurde mit einer Nut- und Feder-schalung aus unbehandeltem Fichtenholz. Danach wurden die in Bild 7 gezeigten Elemente aus gelöcherten Birkenfurnierplatten mit dahinter liegenden Weichfaserplatten montiert. Sie werden hier als Akustik-elemente bezeichnet, da sie so konzipiert sind, dass sie sowohl die Raumakustik als auch die Feuchtepufferung verbessern helfen. Außerdem wurden Elemente mit ei-

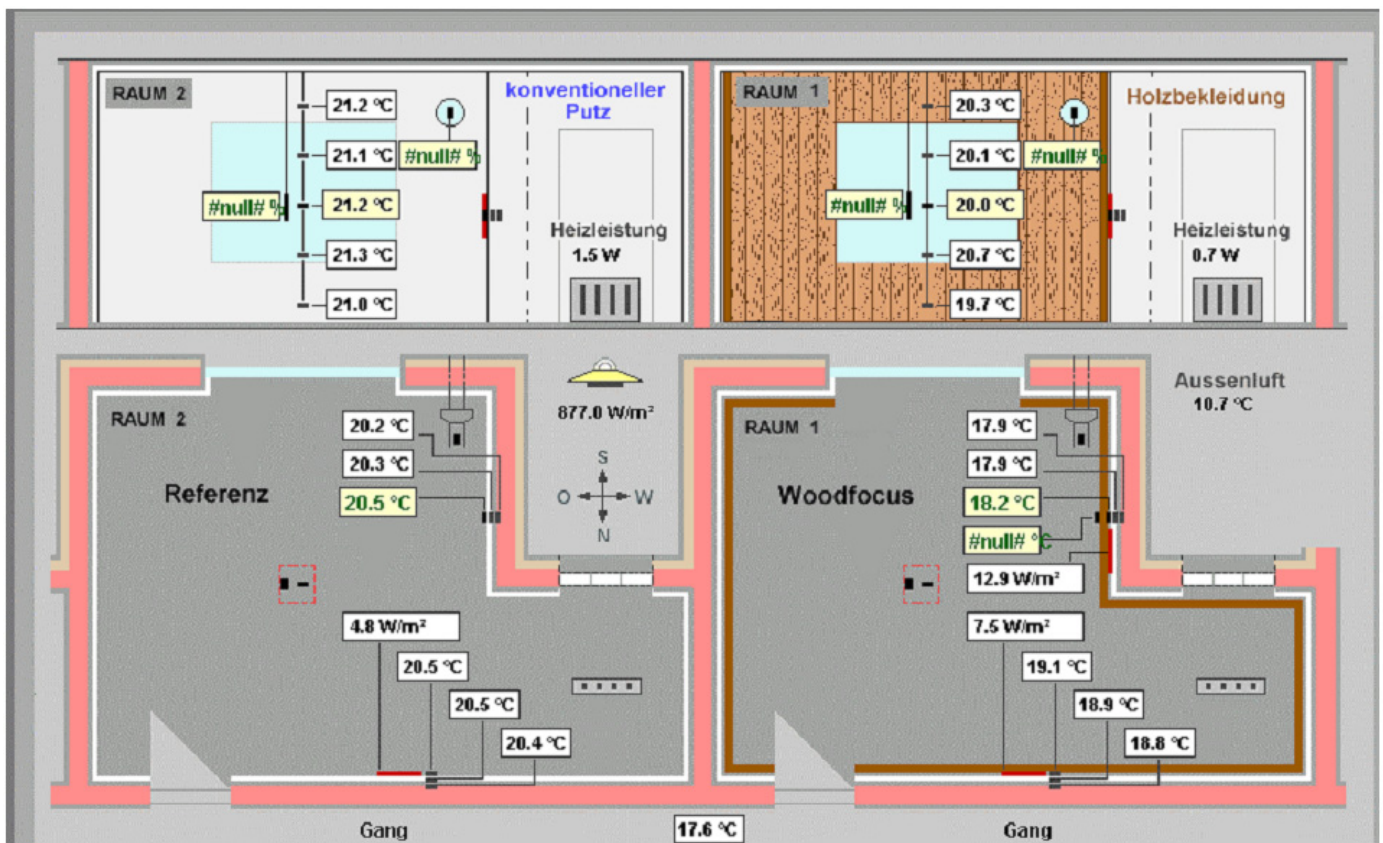


Bild 5: Visualisierung der Versuchsräume und online Messwertdarstellung mit Hilfe des am IBP entwickelten IMEDAS®-Systems.

ner zusätzlichen Zellulosefaserdämmung zwischen einer Gipskarton- und einer rückseitigen Furnierholzplatte (Bild 8), Wandelemente aus Rundholzbohlen (Bild 9) und Holzweichfaserplatten (Bild 10) untersucht. Da bei den Rundholzbohlen aus Kiefernholz (*Pinus Sylvestris*) ein Einfluss der offenen Stirnholzseiten auf die Feuchtepufferung zu vermuten ist, wurden die Untersuchungen mit und ohne Abdichtung dieser Flächen durchgeführt.



Bild 6: Fotografische Aufnahme der Bekleidungs-elemente aus Nut- und Federbrettern.



Bild 8: Fotografische Aufnahme der Bekleidungs-elemente mit Zellulosefaserdämmung.

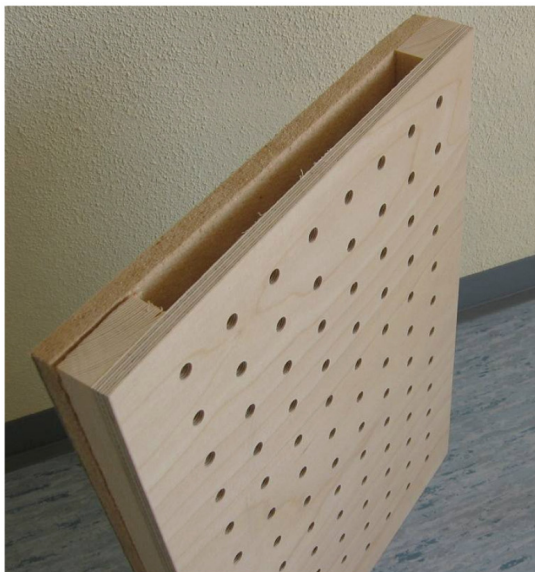


Bild 9: Fotografische Aufnahme der Rundbohlen-Wandelemente mit dampfdicht versiegelter Stirnseite. Diese Wandelemente wurden auch ohne Stirnseitenversiegelung untersucht.

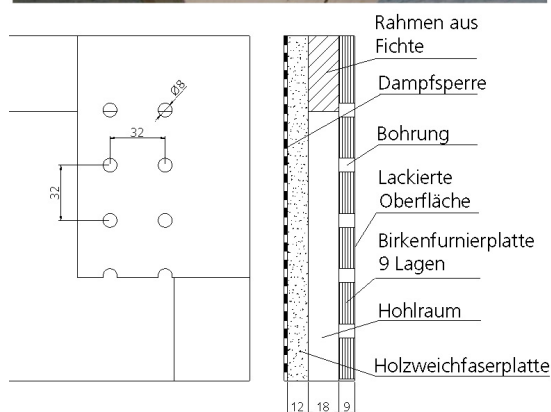


Bild 7: Fotografische Aufnahme und Detailzeichnung zum Aufbau der Akustikelemente.



Bild 10: Fotografische Aufnahme der Weichfaserplatten mit dampfdicht versiegelter Rückseite.

3.1.3 Durchführung der Vergleichsmessungen

Zur Einstellung eines genau definierten hygrischen Ausgangszustands werden die Innenbekleidungen vor den Versuchen für mindestens vier Wochen in einem klimatisierten Raum bei 20°C und 50 % relativer Feuchte luftumspült gelagert. Anschließend erfolgt, wie in Bild 11 am Beispiel der Nut- und Federschalung zu sehen, der Einbau in den Testraum. Dabei wird die jeweilige Bekleidung vollflächig an den Wänden und der Decke des Testraumes befestigt (aktive Oberfläche 67 m²). Eine Ausnahme stellen hier die Rundbohlenwandelemente dar, die aufgrund ihrer Dimensionen nicht an die Testraumwände angepasst werden konnten. In diesem Fall wurden die Elemente parallel im Raum aufgestellt. Im Gegensatz zu den anderen Bekleidungen beträgt ihre aktive Oberfläche (ohne Berücksichtigung der Rundungen) nur etwa 60% der gesamten Innenraumoberfläche.



Bild 11: Testraum mit Bekleidung aus unbehandelter Nut- und Federschalung.

Das Ziel der Versuche ist die Beurteilung der Feuchtepufferung durch die eingebauten Bekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen im Vergleich zur Situation mit herkömmlich verputzten Innenoberflächen. Um quantifizierbare Ergebnisse zu erhalten sollten möglichst viele Parameter unverändert bleiben. Deshalb werden alle Versuche bei konstanter Raumlufttemperatur (20°C) mit einem konstanten Luftwechsel (0,5 h⁻¹) durchgeführt. Eine Ausnahme bilden einige warme Tage im Sommer, an denen die voreingestellte Temperatur wegen hoher Sonneneinstrahlung stundenweise überschritten wurde. Neben dem Außenklima ist die Feuchteproduktion in den Räumen die einzige variable Größe. Allerdings wurde auch hier ein ganz bestimmtes Tagesprofil ausgewählt, das alle 24 Stunden wiederholt wird.

Als repräsentativer Wert für die Feuchteabgabe in Wohnräumen sind nach neueren Untersuchungen in [12] 5,6 bis 7,8 Liter pro Tag für einen 3-Personenhaushalt (60 -70 qm) anzunehmen. Das entspricht umgerechnet 0,12 kg verdunstetes Wasser pro qm Wohnfläche in 24 Stunden. Für die Versuchsräume bedeutet das, es sind täglich jeweils 2,4 kg Wasser mit Hilfe von Luftbefeuchtern einzubringen. In der Realität ist diese Feuchteproduktion jedoch nicht gleichförmig über den ganzen Tag verteilt, sondern weist ausgeprägte Spitzen auf. Bild 12 oben zeigt das für die Versuche gewählte Feuchteproduktionsprofil. Die permanent vorhandene Grundproduktion, z.B. bedingt durch das Ausatmen von Wasserdampf oder die stetige Feuchteabgabe von Pflanzen, beträgt 25 g/h. Am Morgen zwischen 6⁰⁰ und 8⁰⁰ Uhr steigt die Feuchteproduktion auf 400 g/h um zu dieser Zeit übliche Aktivitäten, wie z.B. Duschen und Waschen zu simulieren. Danach fällt die Feuchteproduktion wieder auf die Grundproduktion ab, bevor sie vom späten Nachmittag bis abends (16⁰⁰ bis 22⁰⁰ Uhr) wieder verstärkt und diesmal auch länger anhaltend einsetzt. Damit soll das Nutzerverhalten nach Feierabend berücksichtigt werden, das Aktivitäten wie Kochen, Putzen und Wäsche waschen einschließt. Die Steuerung der kalibrierten Ultraschall-Verdampfer erfolgt durch eine Zeitschaltuhr (Bild 12 Mitte), was zu einer "Digitalisierung" der Feuchteproduktion führt. Deshalb entwickeln sich auch die Verläufe der relativen Feuchte in den Versuchsräumen leicht sägezahnartig (Bild 12 unten).

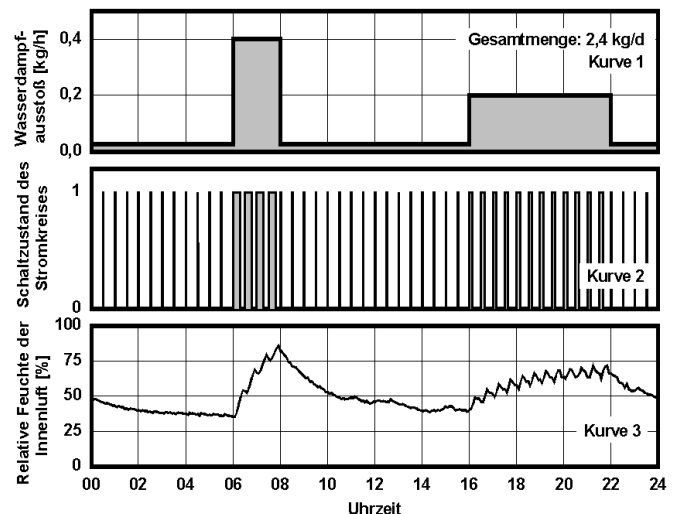


Bild 12: Sollwerte, Realisierung und beispielhafte Auswirkung des gewählten Tagesprofils für die Feuchteproduktion in den Räumen.

Oben: Angestrebtes Tagesprofil

Mitte: Durch Zeitschaltuhr digitalisiertes Profil mit identischen Periodenmitteln

Unten: Resultierender Verlauf der relativen Feuchte im Raum.

3.2 Versuchsergebnisse

Nach der messtechnischen Ausstattung und Kalibrierung der Versuchsräume im Herbst 2002 wurden die Untersuchungen von Dezember 2002 bis Februar 2004 durchgeführt. Einen groben Überblick über alle Ergebnisse erlaubt

Bild 13. Dort sind die Dekadenmittel der Außenluftverhältnisse und die in beiden Versuchsräumen gemessenen Fluktuationen der Raumluftfeuchte aufgezeichnet. Aufgrund der höheren Außenlufttemperaturen ($> 5^{\circ}\text{C}$) bei den Untersuchungen im Mai und Juni sind die Ergebnisse für die Bekleidungen aus Akustikplatten bzw. Dämmelementen nur bedingt mit denen des restlichen Versuchszeitraumes vergleichbar. Da der Luftwechsel in den Räumen für winterliche Verhältnisse definiert wurde, liegen die Ergebnisse für die Raumluftfeuchte in diesen Monaten auch deutlich über den Bedingungen in der Praxis. Dies ist bei der Auswertung bzw. Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

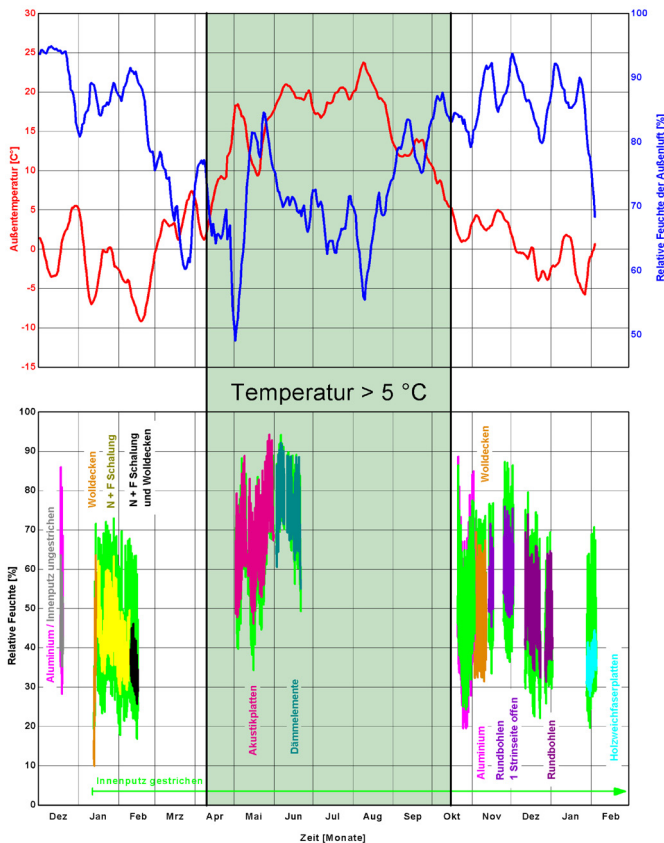


Bild 13: Gesamtübersicht über den Versuchszeitraum. Das obere Diagramm zeigt die während der Untersuchungen herrschenden Außenklimabedingungen in Form von Dekadenmittelwerten. Die sich im Testraum jeweils mit den unterschiedlichen Bekleidungen einstellende relative Feuchte ist im Vergleich zur Raumluftfeuchte im Referenzraum (grün eingezeichnet) im unteren Diagramm dargestellt.

Zur genaueren Analyse der Messergebnisse zeigt Bild 14 beispielhaft einen 3-wöchigen Ausschnitt aus dem Untersuchungszeitraum während dessen die Nut- und Feder-schalung im Testraum eingebaut war. Die Feuchtespitzen, die durch die täglichen Intensitätssteigerungen der Feuchteproduktion in den Räumen verursacht werden, sind gut zu erkennen. Auch der Einfluss der Außenlufttemperatur (ein Maß für die absolute Feuchte der Zuluft) zeigt sich deutlich durch eine Verschiebung des Raumluftfeuchteniveaus. Für die vergleichende Ermittlung der Feuchtepufferwirkung sind hier jedoch vor allem die Unterschiede der maximalen Feuchteauschläge in den Versuchsräumen von Interesse. Wie in Bild 15 zu sehen, werden dazu die einzelnen Ausschläge vermessen und zwar jeweils für die

2-stündige sehr intensive Feuchteproduktion am Morgen und die 6-stündige etwas weniger intensive Feuchteproduktion am Abend. Die jeweiligen Ergebnisse sind in Bild 16 zusammen gestellt. Obwohl am Abend eineinhalbmal soviel Feuchte produziert wird wie am Morgen (Bild 12), ist der Anstieg der Raumluftfeuchte in beiden Versuchsräumen etwa jeweils halb so groß. Dieses Phänomen lässt sich durch die Sorptions- und Diffusionskinetik in den Materialien erklären. Wenn die Feuchteproduktion länger anhält bleibt mehr Zeit für Dampfdiffusionsvorgänge in den oberflächennahen Schichten der Bekleidungen.

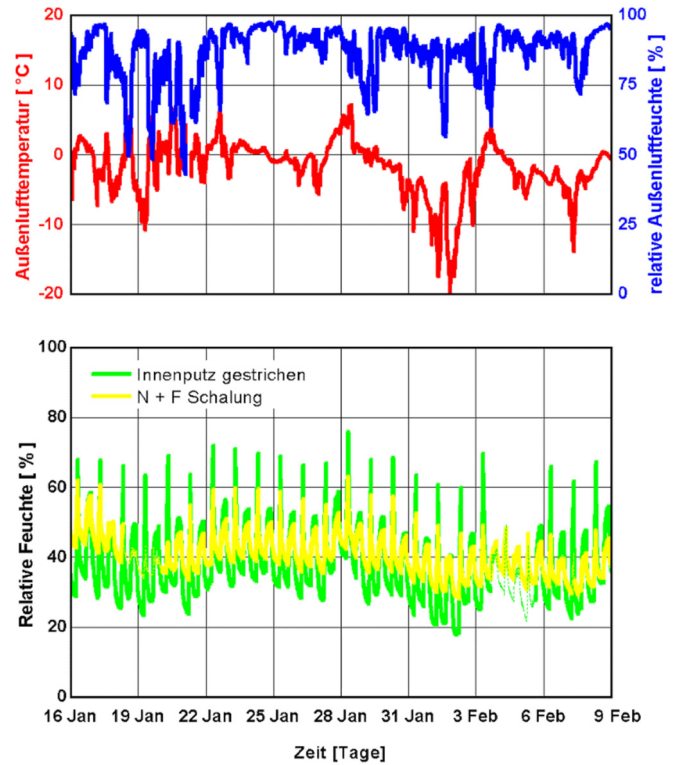


Bild 14: Verläufe der Außenklimarandbedingungen und der relativen Feuchte in den Versuchsräumen während des Messzeitraumes. Am 18. und 19. Januar sowie 4. und 5. Februar waren Befeuchterausfälle zu verzeichnen.

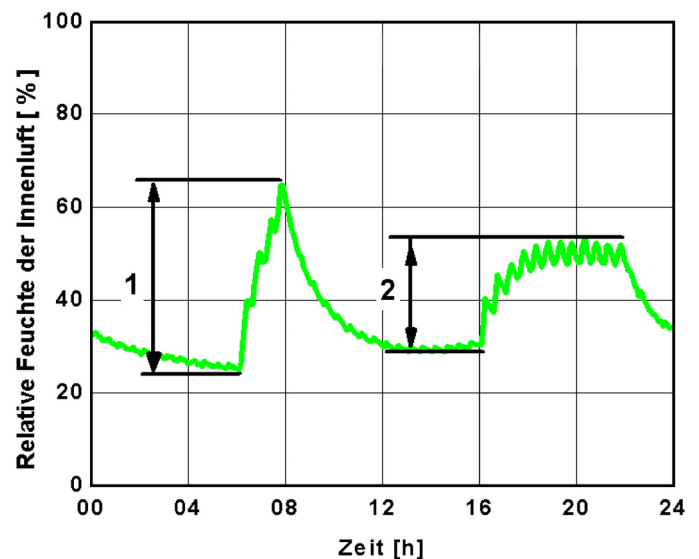


Bild 15: Feuchteveränderungen der Raumluft in der Variante Innenputz gestrichen als Folge der Feuchteproduktion und Angabe der in die Auswertung einfließenden Ausschlagsgröße;
1. Feuchteauschlag von 6° - 8° Uhr
2. Feuchteauschlag von 16° - 22° Uhr

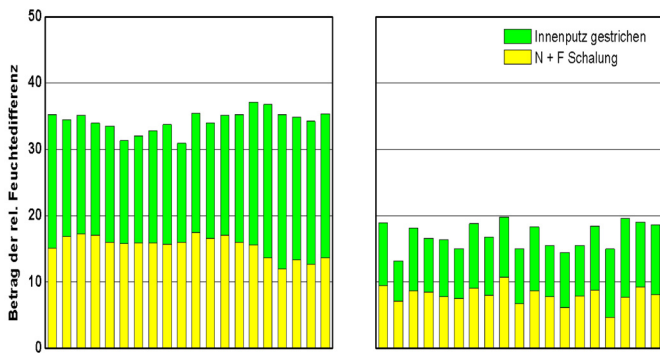


Bild 16: Raumluftheuchteauschläge an den einzelnen Versuchstagen im Testraum mit Nut- und Federschalung bzw. im Referenzraum mit Innenputz während der Feuchteproduktionspitzen am Morgen (links) und am Abend (rechts).

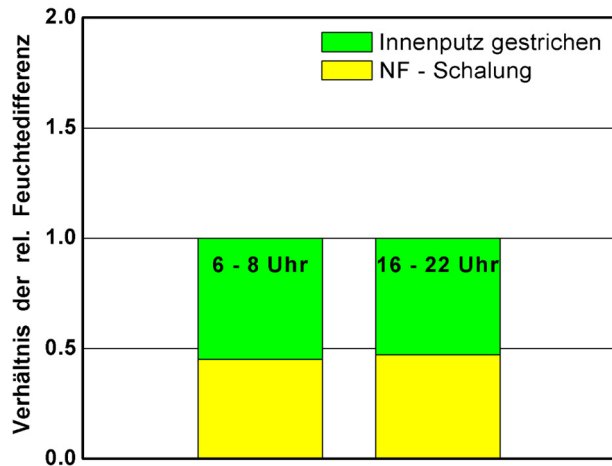


Bild 17: Aus den Ergebnissen in Bild 16 ermittelter Durchschnitt der Raumluftheuchteauschläge im Testraum, bezogen auf die Verhältnisse im Referenzraum, für die beiden Feuchteproduktionsperioden.

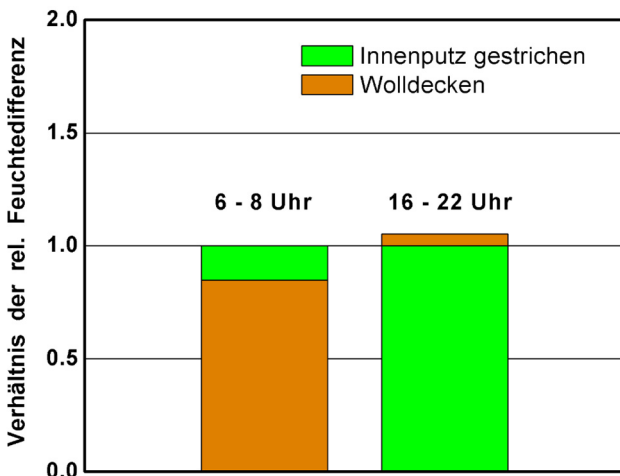


Bild 18: Mittlere Raumluftheuchteauschläge im unbekleideten Testraum mit aufgehängten Woldecken, bezogen auf die Verhältnisse im verputzten Referenzraum, während der Feuchteproduktionspitzen am Morgen und am Abend (analoge Darstellung zu Bild 17).

Zur vergleichenden Quantifizierung der Feuchtepufferung werden, wie in Bild 17 gezeigt, die mittleren Feuchteauschläge im Testraum auf die im Referenzraum bezogen. D.h. der Feuchtepufferfaktor (mittlere Größe der Raumluftheuteschwankungen) des herkömmlichen Innenputzes beträgt eins. Ein kleinerer Faktor bedeutet eine Verbesserung der Pufferwirkung gegenüber dem Kalk-Gipsputz. Bei der Nut- und Federschalung beträgt dieser Wert etwas weniger als

0,5, d.h. die Feuchteschwankungen werden hier so stark gedämpft, dass die Ausschläge nur halb so groß sind, wie im verputzten Raum. In diesem Fall gilt das sowohl für kurzzeitige, wie auch für etwas länger anhaltende Feuchtequellen. Dass dies nicht immer so sein muss, wird anhand von Bild 18 deutlich. Dort sind die Ergebnisse eines Vorversuchs dargestellt, bei dem mehrere Woldecken im unbekleideten Testraum aufgehängt wurden. Bei der kürzeren Feuchteproduktion am Morgen ist die Pufferwirkung der Woldecken etwas besser, als die des Innenputzes im Referenzraum. Dauert die Feuchteproduktion allerdings länger an, scheint sich die Sorptionsfähigkeit der Woldecken zu erschöpfen. So ist der im Vergleich zum Innenputz schlechtere Feuchtepufferfaktor der Woldecken im Fall der 6-stündigen Feuchteproduktionsperiode zu erklären.

Die Feuchtepufferfaktoren für kurzfristige und länger anhaltende Feuchteproduktionsperioden sind für alle untersuchten Bekleidungen einschließlich der Situation im leeren Testraum in Bild 19 zusammengefasst. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden hierbei die Werte für die Rundbohlenwände wegen ihrer kleineren Oberfläche im Vergleich zu den anderen Bekleidungen entsprechend korrigiert. Da der unbekleidete Testraum so gut wie keine hygrische Sorptionsfähigkeit besitzt, sind dort die Feuchteschwankungen größer als im verputzten Referenzraum.

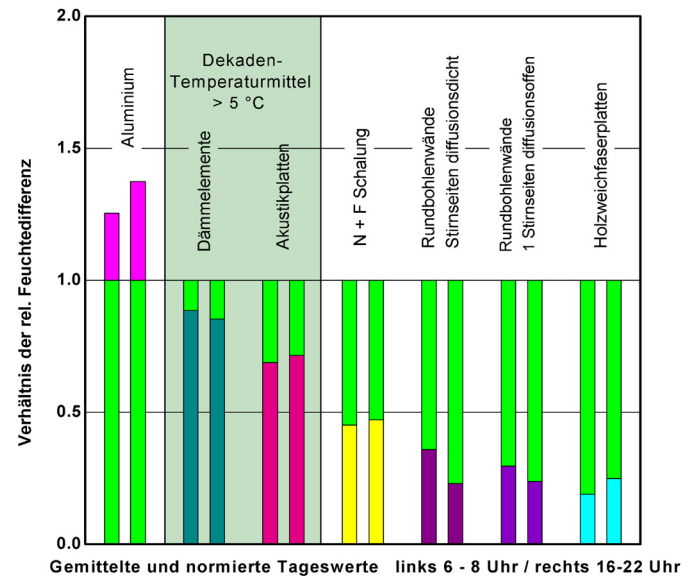


Bild 19: Zusammenstellung der Feuchtepufferfaktoren der unterschiedlichen Testraum-Bekleidungen im Vergleich zur Situation im Referenzraum.

Allen untersuchten Bekleidungen bzw. Wandbaustoffen aus Holz- oder Holzwerkstoffen ist gemeinsam, dass sie eine bessere Feuchtepufferung besitzen als der gestrichene Innenputz. Vergleicht man die Reaktion auf kurze und längere Feuchteproduktionsperioden, wird deutlich, dass die Feuchtepufferspeicher nicht bei allen Bekleidungen gleich groß sind. Beispielsweise zeigen die Rundbohlenwände Vorteile bei länger andauernden Feuchtequellen, während die anderen Bekleidungen tendenziell größere Vorteile bei kurzfristigen Feuchtespitzen im Vergleich zum Innenputz aufweisen.

3.3 Interpretation der Untersuchungsergebnisse und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass raumseitige Bekleidungen aus Holz, die Feuchtepufferung in Wohnräumen günstig beeinflussen. Durch ihren Einsatz wird u.a. erreicht, dass die Raumluftfeuchte länger im hygienisch optimalen Feuchtebereich verweilt, als das bei herkömmlich verputzten Wänden der Fall ist (siehe dazu auch Ergebnisse in [10]). Allerdings zeigen die untersuchten Innenraumbekleidungen große Unterschiede in ihrer Wirkung. Während unbehandelte Holzbohlen oder Weichfaserplatten die Raumluftfeuchteschwankungen um bis zu 70 % dämpfen können, erreichen die Dämmelemente und die Akustikelemente nur eine Feuchtedämpfung, die 15 % bis 30 % besser ist als die Dämpfung durch einen Innenputz. Dies liegt in beiden Fällen daran, dass die stark Wasserdampf sorbierenden Materialschichten dieser Elemente nicht direkt der Raumluft ausgesetzt sind. Bei den Dämmelementen muss der Wasserdampf erst durch die Gipskartonplatte hindurch diffundieren, bevor er von den Zellulosefasern absorbiert werden kann.

Bei den oberflächenlackierten Akustikelementen kann der Wasserdampf die sorbierende Schicht aus Holzweichfaserplatten nur durch kleine Löcher erreichen. Da Weichfaserplatten im direkten Kontakt mit der Raumluft eine ausgezeichnete Feuchtepufferwirkung aufweisen, stellen diese Löcher offensichtlich ein großes Hindernis dar. Hier besteht mit Sicherheit noch ein entsprechendes Verbesserungspotential, z.B. indem eine gewisse Zirkulation der Raumluft in die Akustikelemente hinein ermöglicht wird. Inwieweit das Feuchtepufferverhalten durch ein Vergrößern der Löcher in der vorderen Furnierplatte oder durch eine andere Anordnung der Öffnungen gesteigert werden kann und welche Auswirkungen solche Maßnahmen auf die akustischen Eigenschaften der Elemente haben, kann nur durch weitere F&E-Arbeiten geklärt werden. In diesem Zusammenhang muss bedacht werden, dass alle anderen Bekleidungen die hier ermittelte Feuchtepufferwirkung nur dann aufweisen, wenn sie keine Oberflächenbehandlung erfahren. Da dies in der Praxis eher die Ausnahme darstellt, sollten daher weitere Messungen beispielsweise zum Einfluss von Imprägnierungen und Beschichtungen folgen. Außerdem wäre es wünschenswert, in Zukunft die Feuchtepufferwirkung üblicher Raumausstattungen, wie Möbel, Teppiche und Vorhänge in die Untersuchungen einzubeziehen.

4. Schlussfolgerungen zu feuchtepuffernden Materialien in Räumen

Feuchtepuffernde Materialien in Räumen sind in der Lage, Wasserdampf sorptiv zu speichern. Sie können die Feuchte jedoch weder beseitigen noch kann diese in ausreichender Menge durch die Gebäudehülle nach außen transpor-

tiert werden. Deshalb ist eine angemessene Lüftung unabdingbar, um hygienische Raumluftverhältnisse zu gewährleisten. Feuchtepuffernde Materialien können jedoch in erheblichem Maß zu einem gleichmäßigen Raumklima beitragen. Das ist vor allem dann von Vorteil, wenn Feuchteproduktion und Lüftung zeitversetzt stattfinden. Ein Beispiel sind Schlafzimmer, die zwar nachts genutzt, aber nur tagsüber gelüftet werden. Dort lassen sich die Raumklima-Verhältnisse in der Nacht durch feuchtepuffernde Innenoberflächen deutlich verbessern [8]. Auch die hier beschriebenen Freilandversuche haben gezeigt, dass feuchtepuffernde Bekleidungen für ein stets behagliches und hygienisch unbedenkliches Raumklima sorgen können, selbst wenn die Feuchteproduktion im Raum stark schwankt.

Allerdings dient die Feuchtepufferung nicht nur zur Dämpfung von Spitzen in der Feuchteproduktion. Selbst wenn wenig interne Feuchtequellen vorhanden sind, hat sie eine große Bedeutung für den instationären Betrieb von Gebäuden. Als Beispiel wird hier auf Raumklimamessungen in oberbayerischen Wohngebäuden verwiesen [13]. Dabei wurden im Wohnzimmer eines älteren Einfamilienhauses mit Einzelofenheizung die in Bild 20 gezeigten Temperatur- und Feuchteverläufe registriert. Durch das intermittierende Befeuern des Kachelofens kommt es dort zu erheblichen Raumtemperaturschwankungen, die zwischen morgens und abends über 12 K betragen können. Gleichzeitig verändert sich aber die Raumluftfeuchte um weniger als 10% r.F. Ohne feuchtepuffernde Materialien, die im betrachteten Wohnzimmer reichlich vorhanden waren (Holzdecke, Teppichboden, großes Bücherregal) wären bei solchen Temperaturänderungen wesentlich stärkere Feuchteschwankungen zu erwarten.

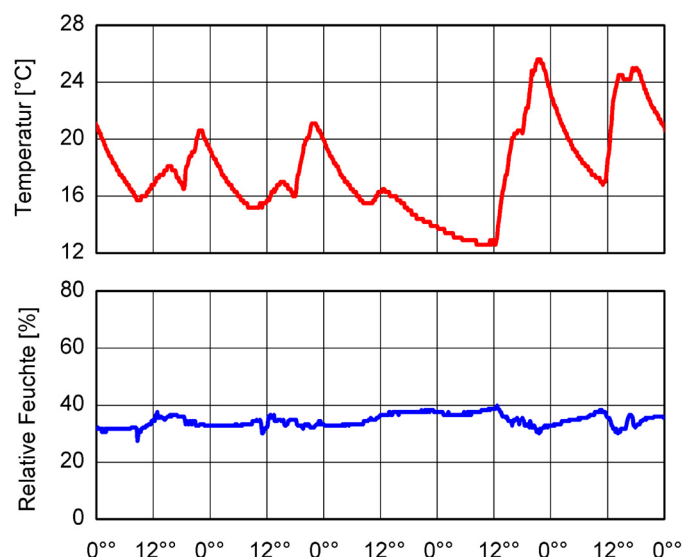


Bild 20: Im Februar 2005 innerhalb von fünf Tagen gemessene Verläufe (10-Minuten-Werte) von Temperatur und relativer Feuchte im Wohnzimmer eines älteren Einfamilienhauses mit einem intermittierend betriebenen Kachelofen.

Würde sich beispielsweise die absolute Feuchte im Raum während der Aufheizphase am vierten Tag nicht verändern (was ohne Feuchtepufferung der Fall wäre), müsste

der Wert der Raumluftfeuchte am Abend unter 20 % fallen. Ein behagliches Raumklima ist in derart betriebenen Gebäuden ohne Feuchtepufferung nicht möglich.

Interessante Aspekte ergeben sich auch für den gezielten Einsatz von feuchtepuffernden Materialien in Museen und Galerien, wo zur Erhaltung der Ausstellungsstücke ein sehr gleichmäßiges Raumklima gefordert ist. In [14] wird z.B. die Meinung vertreten, dass eine ausreichende Feuchtepufferkapazität der Gebäudehülle eine Klimaanlage ersetzen oder zumindest die Klimatisierungskosten von Museen und anderen denkmalgeschützten Gebäuden reduzieren kann. Ähnliche Überlegungen zur Möglichkeit der Klimastabilisierung in historischen Gebäuden durch feuchtepuffernde Materialien werden in [15] angestellt.

Eine ganz andere Motivation liegt einem Projekt der internationalen Energieagentur IEA Annex 41 [16] zugrunde, an dem Bauphysiker aus 20 Ländern teilnehmen. Zur Quantifizierung von Energieeinsparmöglichkeiten durch wärme- und feuchtespeichernde Bauteile und Bausysteme sollen im Rahmen dieses Projektes hygrothermische Raumsimulationsmodelle entwickelt und validiert werden (siehe dazu auch Beitrag im selben Heft). Es erscheint zwar zunächst wenig plausibel, dass die Feuchtepufferung einen Einfluss auf den Energieverbrauch haben kann. Bedenkt man jedoch, dass zur Reduktion der Feuchte im Raum in der Regel Energie zugeführt werden muss (Erwärmung der Außenluft bei der Fensterlüftung, Strom zur Entfeuchtung der Raumluft durch Klimageräte), dann wird klar, dass das Zwischenspeichern von Feuchte energetische Vorteile bieten kann. Werden beispielsweise die Fenster im Winter am Nachmittag geöffnet, wenn die Außenlufttemperatur ihr Maximum erreicht hat man geringere Lüftungswärmeverluste als zu anderen Zeitpunkten.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Künzel, H.: Die „klimaregelnde Wirkung“ von Innenputzen. Gesundheits-Ingenieur 81 (1960), Heft 7, S. 196-201.
- [2] Künzel, H.: Die Feuchtigkeitsabsorption von Innenoberflächen und Inneneinrichtungen. Berichte aus der Bauforschung Heft 42, Verlag Ernst & Sohn 1965.
- [3] Künzel, H.: Müssen Wände und Decken absorptionsfähig für Wasserdampf sein? Bauen mit Kunststoffen (1972) Heft 2, S. 93-96.
- [4] Künzel, H.: Instationärer Wärme- und Feuchteausaustausch an Gebäudeinnenoberflächen. Tagungsband Aachener Bausachverständigentage, Bauverlag 1988, S. 45-51.
- [5] Künzel, H.M. & Kießl, K.: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von mineralischen Baustoffen aus Sorptionsversuchen. Bauphysik 12 (1990), Heft 5, S. 140-144.
- [6] Koponen, S., Peltola, S. & Tukiainen, P.: Effective Moisture Capacity of Wood in Building Structures. Draft report TKK-TRT-199 of Helsinki University of Technology, Espoo 2003
- [7] Künzel, H.M. & Kießl, K.: Berechnung des Einflusses der Wasserdampfsorption von Oberflächenmaterialien auf das Feuchteverhalten von Wohnräumen. Gesundheits-Ingenieur 111 (1990), Heft 5, S. 217-221.
- [8] Simonson, C., Salonvaara, M. and Ojanen, T.: Improving Indoor Climate and Comfort with Wooden Structures; VTT-Report 2001, ISBN 951-38-5846-4.
- [9] Kalamees, T et al.: Potential effects of permeable and hygroscopic lightweight structures on thermal comfort and perceived IAQ in a cold climate - Part II Field measurements. Submitted to Indoor Air 2003.
- [10] Künzel, H.M. et al.: Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen. Bauforschung für die Praxis Band 75, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 2006.
- [11] Künzel, H.: Wärmedurchgang durch die Gebäudeumhüllung im Vergleich zum rechnerischen k-Wert in Abhängigkeit vom Wandaufbau. Zi (Ziegelindustrie International) 2/1984 S. 59-65.
- [12] Hartmann T., Reichel, D. & Richter, W.: Feuchteabgabe in Wohnungen - alles gesagt? Gesundheits-Ingenieur 122 (2001), H. 4, S. 189-195.
- [13] Antretter, F. et al.: Interior climate in German living spaces and impact of interior linings on moisture performance. Unveröffentlichte Studie des Fraunhofer-IBP.
- [14] Padfield, T.: The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity. PhD-thesis TU Denmark 1998.
- [15] Kilian, R., Sedlbauer, K. & Krus, M.: Klimaanforderungen für Kunstwerke und Ausstattungen historischer Gebäude. IBP-Mitteilung 32 (2005) Nr. 462.
- [16] IEA Annex 41: Whole Building Heat, Air and Moisture Response. 2004-2008.