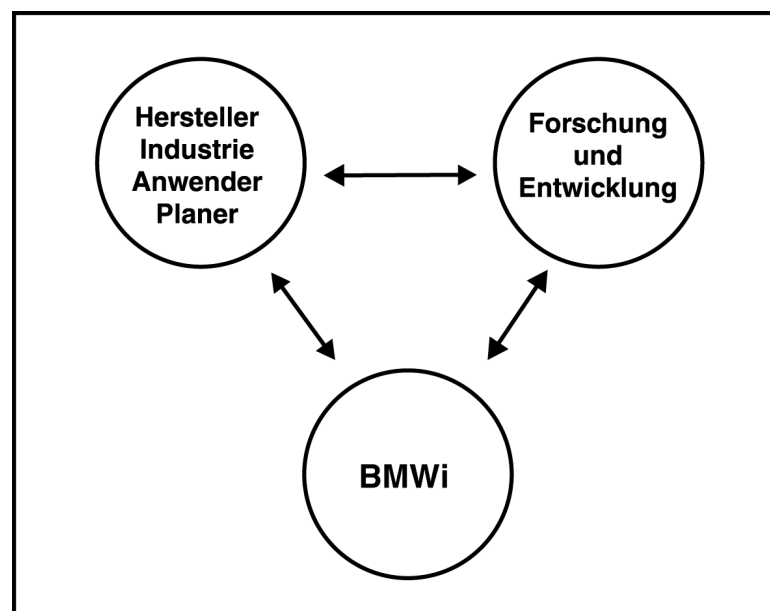


Energieoptimiertes Bauen; Beurteilung der instationären hygrothermischen Vorgänge in Gebäuden - Deutsche Beteiligung an IEA-ECBXS-Annex 41: Whole building heat, air and moisture response "Moist-Eng"

Schlussbericht
zum BMWi-Projekt 0329663E



Forschungsbericht

**Energieoptimiertes Bauen; Beurteilung der instationären hygrothermischen Vorgänge in Gebäuden – Deutsche Beteiligung an IEA-ECBXS-Annex 41:
Whole building heat, air and moisture response "Moist-Eng"
Abschlussbericht des Verbundprojektes**

Veröffentlicht im Rahmen des:

FIA-Projekt – Forschungs-Informations-Austausch
unterstützt durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

im Fachverband Gebäude-Klima e.V.
Danziger Straße 20
74321 Bietigheim-Bissingen
Tel.: 07142/7888990
www.fgk.de

Projekt: Fraunhofer Institut für Bauphysik
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Autoren: Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld
Dr.-Ing. Andreas Holm

Veröffentlicht im Juni 2011, Best.-Nr.: 186

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile
und Bauarten
Forschung, Entwicklung, Demonstra-
tion und Beratung auf den Gebieten
der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht RKB 10/2009/292

Energieoptimiertes Bauen; Beurteilung der in- stationären hygrothermischen Vorgänge in Ge- bäuden - Deutsche Beteiligung an IEA-ECBXS- Annex 41: Whole building heat, air and mois- ture response "Moist-Eng"

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 0329663E, BMWI gefördert. Die Verant-
wortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Durchgeführt im Auftrag
BMW
Der Bericht umfasst
184 Seiten Text
20 Tabellen
118 Abbildungen

Dipl.-Ing. (FH) Kristin Lengsfeld
Dr.-Ing. Andreas Holm

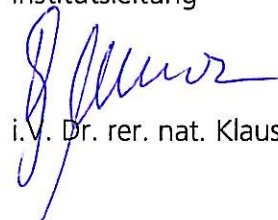
Holzkirchen, 01. September.2009

Abteilungsleiter



Dr.-Ing.
A. Holm

Institutsleitung



i. V. Dr. rer. nat. Klaus Breuer

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Methodische Vorgehensweise im Vorhaben	4
3	Subtask 1: Modeling and common exercises	5
3.1	Grundlagen des hygrothermischen Raumklimamodells (MOB1)	5
3.1.1	Ableitung des hygrothermischen Raumklimamodells	6
3.1.2	Wärmebilanz des Raumes	7
3.1.3	Opake Bauteile	9
3.1.4	Transparente Bauteile (Verglasung)	10
3.1.5	Feuchtebilanz des Raumes	11
3.1.6	CO ₂ -Bilanz des Raumes	11
3.1.7	Umsetzung des Raumklimamodells	12
3.2	Validierung des hygrothermischen Raumklimamodells (MOB 2) /CE 3-Report	13
3.2.1	Validierung und Ergebnisse	13
3.2.2	Statistische Analyse der Ergebnisse der Validierungsberechnungen	16
4	Subtask 2: Experimental verification	18
4.1	Experimentelle Untersuchung des Feuchtepufferverhaltens von Gipskartonplatten unter realen Bedingungen (Montreal 2005)	18
4.2	Untersuchungen zum kurzfristigen Sorptionsverhalten von Innenraummaterialien	33
4.2.1	Hintergrund und Zielsetzung	33
4.2.2	Projektdurchführung	33
4.2.3	Ergebnisse	36
4.2.4	Zusammenfassung und Ausblick	54
5	Subtask 3: Boundary conditions	57
5.1	Innenraumklima in deutschen Häusern (Montreal 2005)	57
5.2	Akzeptable Feuchtelast (MOB 3)	87
5.2.1	Gesundheit und Behaglichkeit	87
5.2.2	Substantielle Schädigungen	102
5.2.3	Maßnahmen zum Schutz der Baukonstruktion	110
5.2.4	Energieeinsparung	138
5.3	Auswirkungen der Randbedingungen auf die Gesamtgebäudesituation (MOB 5)	71
5.3.1	Auswirkung der Wetterdaten verschiedener Jahre	71

5.3.2	Der Einfluss von Innenraum-Randbedingungen auf das hygrothermische Verhalten von Gebäuden – vereinfachte Ansätze kontra hydr	76
5.3.3	Schlussfolgerung	86
6	Subtask 4: Applications	87
6.1	Raumklimaregelung (MOB 4)	145
6.1.1	Schlussfolgerung	160
7	Zusammenfassung und Ausblick	161
	Literaturverzeichnis	164
	Anhang	172
	Bildverzeichnis	173
	Tabellenverzeichnis	183

1 Einleitung

Während auf dem Gebiet des hygrothermischen Bauteilverhaltens dank des IEA-Projektes Annex 24 "HAMTIE" große Fortschritte erzielt wurden und daraus auch praxisgerechte Werkzeuge entstanden sind, fehlen für die Beschreibung der Vorgänge in den Gebäuden noch viele grundlegende Erkenntnisse. Ziel des neuen Annexes 41 ist es, genaue Kenntnisse über den Wärme-, Feuchte und Lufthaushalt im Gebäude bzw. Gebäudehülle und dessen Auswirkungen auf Innenraumklima, Energieverbrauch (für Heizen, Kühlen, Luftbefeuchtung, Trocknung) und Dauerhaftigkeit der Gebäudehülle zu erhalten.

Im Rahmen des Projektes sollen neue Erkenntnisse über das Feuchteverhalten von verschiedenen Innenraummaterialien erarbeitet werden und des weiteren ist ein wesentlicher Punkt die Weiterentwicklung eines Softwaretools zur Simulation des Innenraumklimas unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen Gebäudehülle und Raumklima durch Feuchte-, Temperatur- und Lufttransportvorgänge.

2 Methodische Vorgehensweise im Vorhaben

Die methodische Vorgehensweise und Erarbeitung neuer Fragestellungen ergibt sich anhand des Projektaufbaus des internationalen IEA Annex 41-Projektes. Dieses Projekt teilt sich in vier Themengebiete auf, in denen verschiedenen Schwerpunkte gesetzt und untersucht werden. Die nachfolgende Aufstellung zeigt die Aufgaben- bzw. Themenverteilung:

Subtask 1: Modeling and common exercises

- Entwicklung von Softwaretools zur Simulation von Innenraumklimata, unter Berücksichtigung von hygrothermischen Randbedingungen.
- Validierung der entwickelten Softwaretools anhand von vorgegebenen Aufgabenstellungen bzw. Nachrechnung von durchgeführten Experimenten.

Subtask 2: Experimental verification

- Durchführung von Ringversuchen zur Ermittlung der feuchtetechnischen Kennwerte von Innenraummaterialien.
- Zusammentragen von vorhandenen Materialkennwerten
- Entwicklung von Messverfahren zur Bestimmung des Feuchtepufferverhaltens von Innenraummaterialien.

Subtask 3: Boundary conditions

- Ermittlung von typischen Innenraumklimaverhältnissen, in Abhängigkeit von verschiedenen Klimazonen.
- Untersuchungen zur korrekten Ermittlung von Schlagregendaten

Subtask 4: Applications

- Anwendung der ermittelten Erkenntnisse und Softwaretools bei bauphysikalischen Fragestellungen.

Im Rahmen des Projektes wurden am IBP für die verschiedenen Themenschwerpunkte Weiterentwicklungen, neuartige Messverfahren und die Umsetzung der erarbeiteten Ergebnisse in verschiedenen Forschungsarbeiten ermittelt.

3 Subtask 1: Modeling and common exercises

3.1 Grundlagen des hygrothermischen Raumklimamodells WUFI-Plus

Wie stark muss beim Erstbezug eines Hauses gelüftet werden? Reicht täglich mehrmaliges Stosslüften zur Beseitigung der Baufeuchte? Sind feuchteundurchlässige Fliesen oder wasserdampfsorbierende Putzoberflächen im Badezimmer günstiger? Sollten Schlafzimmer nachts oder tagsüber gelüftet werden? Warum kann der Einbau neuer Fenster bei Altbauwohnungen Schimmelpilzwachstum zur Folge haben? Wie muss ein energetisch optimiertes Oberflächen-Temperiersystem in historischen Gebäuden ausgelegt sein? Solche und ähnliche Fragestellungen sind nur durch eine genaue Betrachtung der hygrothermischen Wechselwirkungen zwischen den äußeren Klimabedingungen und dem Raum mit seinen Bauteilen und Inneneinrichtungen zu beantworten. In der Vergangenheit sind eine Reihe von experimentellen Untersuchungen zu diesen Themen erfolgt [73], [74]. Neuerdings wird auch versucht, die komplexen Zusammenhänge mit instationären Rechenverfahren zu erfassen [114], [90], [88].

Eine rechnerische Analyse der hygrothermischen Verhältnisse in Räumen kann realistische Ergebnisse liefern, wenn alle instationären Einflussfaktoren berücksichtigt werden [38], [101]. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Modelle zur Berechnung des thermischen Verhaltens von Gebäuden entwickelt, die inzwischen bei der Gebäudeplanung routinemäßig Verwendung finden. Als Beispiele für solche Programme sind ESP-r [39] TRNSYS [105], DOE-2 [10] und EnergyPlus [36] zu nennen. Eine gute Übersicht solcher Programme findet sich auf den Internetseiten des U.S. Department of Energy [17]. Neben der energetischen Raumbilanzierung ist eine Verknüpfung mit den feuchtetechnischen Prozessen in den Umschließungsflächen für die o.g. Fragestellungen erforderlich. Die bereits erwähnten Berechnungsmodelle enthalten bisher jedoch nur relativ vereinfachte Ansätze zum Feuchteverhalten [114], [90]. Die kombinierten Effekte der instationären Sorptions-, Diffusions und Kapillarleitungsvorgänge in den Umschließungsflächen werden nicht oder nur unvollständig berücksichtigt. Letztere spielen insbesondere während der Austrocknungsphase von Bauteilen

eine große Rolle. Baufeuchte bzw. durch Niederschlag oder Grundwasser erhöhte Materialfeuchte führen zu vermehrten Transmissions- und Latentwärmeverlusten und zu einer Steigerung der erforderlichen Lüftungsrate mit entsprechend erhöhten Lüftungswärmeverlusten. Die feuchtebedingten Wärmeverluste haben nicht nur höhere Kosten, sondern gelegentlich auch eine Beeinträchtigung der Behaglichkeit zur Folge, wenn der zusätzliche Wärme- bzw. Lüftungsbedarf bei der Auslegung von Heizung und RLT-Anlage nicht berücksichtigt wurde. Darüber hinaus erscheint es aufgrund der zunehmenden Schimmelpilzbildung in Wohnräumen wesentlich, konkrete Lüftungsanforderungen in Abhängigkeit von den instationären Feuchtelasten zu definieren.

3.1.1 Ableitung des hygrothermischen Raumklimamodells

Der Energiehaushalt eines Gebäudes wird von einer Reihe von Größen beeinflusst, die sich in vier Gruppen zusammenfassen lassen:

- Klimatische Verhältnisse der Umwelt
- Raumklima und Raumnutzung
- Baukonzept
- Energetische Konzeption

Alle vier Gruppen wirken gemeinsam auf den Energiehaushalt ein. Die klimatischen Verhältnisse der Umwelt werden durch folgende einzelne Einflussgrößen beschrieben:

- Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit, Druck, Reinheit der Außenluft
- Sonneneinstrahlung
- Niederschlag

Mit Hilfe der instationären Bilanz ist es möglich, Gebäude hinsichtlich ihrer Hülle aber auch hinsichtlich ihrer Raumkondition zu optimieren. Im Allgemeinen ist die Zielsetzung die Kosten möglichst gering zu halten und ein Minimum an Energiebedarf- bzw. -verbrauch zu erreichen.

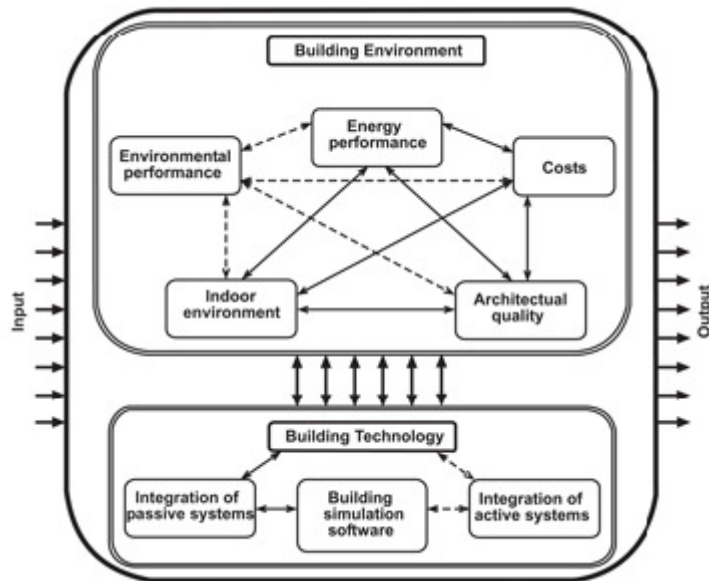


Bild 1:
Die Wechselwirkung zwischen Gebäudetechnologie und bebauter Umwelt.

Es gibt eine Vielzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen, die sich mit dem instationären thermischen Verhalten von Gebäuden befassen. Bei genauer Betrachtung dieser Arbeiten zeigt sich, dass sich bisher nur Wenige mit den gekoppelten Wärme- und Feuchtemechanismen befassen. Zur genauen Vorhersage des Raumklimas und des hygrothermischen Verhaltens der Gebäudehülle sind alle relevanten Einflussgrößen, wie z.B. Bauweise, Außenklima, Raumklima, Raumnutzung sowie Art und Regelung der Heizungs- und Klimaanlage zu berücksichtigen. Bild 1 zeigt hierzu eine schematische Skizze der Wechselwirkungen zwischen Gebäudetechnologie und der bebauten Umgebung, die auf das Gebäude einwirken und bei hygrothermischen Berechnungsmodellen möglichst realistisch abgebildet werden müssen.

3.1.2 Wärmebilanz des Raumes

Ein Raum besteht aus wärme- und feuchtespeichernden Raumumschließungsflächen, nicht speichernden, z.T. transparenten Raumumschließungsflächen, der Raumluft und inneren Speichermassen (z.B. Zwischenwänden, -decken, Einrichtungsgegenständen).

Bestimmung der Heiz- und Kühllast

Hierunter ist in Anlehnung an die VDI 2087 die thermische Leistung zu verstehen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt einem Raum zugeführt, bzw. aus einem Raum abgeführt werden muss, um eine vorgegebene Lufttemperatur im Raum einhalten zu können. Die Heiz- und Kühllast ergibt sich aus der für einen Raum benötigten Heiz- und Kühlleistung.

Sie ist, unter weitgehender Ausschaltung systemspezifischer Einflüsse, durch Außenklima, Raumklima, Baukörper, innere Wärmequellen und Nutzungsan-

forderungen bedingt. Ist die Heiz- bzw. Kühllast des Raumes entweder durch eine Vorgabe oder aber durch ein Kriterium innerhalb des Berechnungsganges begrenzt, wird die Lufttemperatur im Raum berechnet.

Aufgrund der breiten Anwendung von energetischen Berechnungsprogrammen wird hier nur kurz auf die Aufstellung der Energiebilanz eingegangen. Grundlage der Berechnung der Raumlufttemperatur θ_i ist die Bilanz der Wärmeströme im Raum. Diese ist abhängig vom Wärmeeintrag über die Raumumschließungsflächen (Transmission und Sonneneinstrahlung), dem direkten Lüftungsaustausch durch natürliche Lüftung und raumlufttechnischen Anlagen sowie von den internen Wärmelasten.

Formel 1:
$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d\theta_i}{d\tau} = \sum_j A_j \alpha_j (\theta_j - \theta_i) + \dot{Q}_{Sol} + \dot{Q}_{IWQ} + n \cdot V \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_e - \theta_i) + \dot{Q}_{RLT}$$

mit:

ρ [kg/m³] Dichte der Raumluft

j [W/m²K] Wärmeübergangskoeffizient

θ_e [°C] Außenraumtemperatur

θ_i [°C] Innenraumtemperatur

θ_j [°C] Raumumschließungsflächentemperatur

τ [s] Zeit

A_j [m²] Raumumschließungsflächen

c [J/kgK] spezifische Wärmekapazität der Luft

n [1/h] Luftwechsel

Q_{Sol} [W] Kurzweiliger Sonneneinstrahlung die direkt die zu einer Erwärmung der Innenluft bzw. Inneneinrichtungsgegenstände führen

Q_{IWQ} [W] Wärmegewinne durch Personen, Beleuchtung und Maschinen

Q_{RLT} [W] Wärmestrom der durch raumlufttechnische Anlagen (RLT) zu- bzw. abgeführt wird

V [m³] Raumvolumen

3.1.3 Opake Bauteile

Die jeweiligen Oberflächentemperaturen und –feuchten bzw. Wärme- und Feuchteströme über die Raumschließungsflächen werden mit Hilfe der unten stehenden Transportgleichungen für opake Bauteile bestimmt.

Der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport in den raumschließenden Bauteilen kann mit Hilfe folgender partieller Differentialgleichungen beschrieben werden [76]:

Wärmetransport im Bauteil

Formel 2:
$$\frac{\partial H}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p_D}{\partial x} \right)$$

Feuchtetransport im Bauteil

Formel 3:
$$\rho_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p_D}{\partial x} \right)$$

mit:

D_w [m²/s] Flüssigtransportkoeffizient

H [J/m³] Enthalpie des feuchten Baustoffs

h_v [J/kg] Verdunstungsenthalpie des Wassers

p_D [Pa] Wasserdampfpartialdruck

w [m³/m³] Wassergehalt

$\bar{\delta}$ [kg/msPa] Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft

θ [°C] Temperatur

λ [W/mK] Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs

μ [-] Dampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs

ρ_w [kg/m³] Dichte des Wassers

φ [-] Relative Feuchte

3.1.4 Transparente Bauteile (Verglasung)

Der Energietransport durch Glasflächen in Räume setzt sich zusammen aus dem eigentlichen momentanen Strahlungsdurchgang (primäre Einstrahlung) und aus einer zusätzlichen, sekundären Wärmelieferung, die von der strahlungsbedingten Temperaturänderung der Scheiben herrührt. Der momentane Strahlungsdurchgang und die sekundäre Wärmelieferung sind von den strahlungsphysikalischen Daten des Glases und der Zustrahlung selbst abhängig, die ihrerseits wiederum nicht nur von den klimatologischen Einflußgrößen, wie z.B. der Jahres- und Tageszeit, der geographischen Länge, der Meereshöhe und der Trübung abhängt, sondern in ganz entscheidendem Maße auch von Beschattungsvorgängen, insbesondere dem Zeitgang der Beschattung.

Die Wärmestromdichte q durch Verglasungen ergibt sich zu

Formel 4:

$$q = U \cdot \left(\theta_i - \theta_e - \frac{A_e \cdot I + A_i \cdot I}{\alpha_e} - \frac{A_i \cdot I}{\lambda} \right) - T \cdot I$$

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) - g \cdot I$$

$$g = T + U \cdot \left(\frac{A_e + A_i}{\alpha_e} + A_i \cdot \frac{1}{\lambda} \right)$$

mit

g [-] wirksamer Energiedurchlassgrad

θ_i, θ_e [°C] Lufttemperatur innen und außen

I [W/m²] Strahlungsintensität

U [W/m²K] Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung

T [-] Transmissionsgrad

A_e, A_i [-] Absorptionsgrad der äußeren und inneren Scheibe

$1/\lambda$ [m²K/W] Wärmedurchlasswiderstand der Verglasung

3.1.5 Feuchtebilanz des Raumes

Die Feuchtebilanz eines Raumes ergibt sich aus den Feuchteströmen durch die inneren Bauteiloberflächen, der nutzungsbedingten Feuchteproduktionsrate und der Feuchtezufuhr bzw. -abfuhr durch die RLT-Anlage, oder durch den natürlichen Luftaustausch mit der Außenluft. Um das instationäre, hygrothermische Verhalten eines Gebäudes berechnen zu können, müssen die RLT-Anlagen mit den zur Verfügung stehenden Leistungen, die hygrothermischen Sollwerte, die internen Wärme- und Feuchtelasten sowie die Regelungsstrategien vorgegeben werden. Der Eingriff der Nutzer in das Lüftungsgeschehen durch Öffnen von Fenstern und Türen ist durch eine entsprechende Variation des Luftwechsels zu berücksichtigen. Für die Wärmebilanz eines Raumes gilt Formel 5. Sie beschreibt die dynamische Enthalpie-Schwankung der Raumluft infolge der Summe aus zu- und abfließenden instationären Wärmeströmen.

Formel 5:
$$V \cdot \frac{dc_i}{d\tau} = \sum_j A_j g_{wj} + n \cdot V (c_a - c_i) + \dot{W}_{IFQ} + \dot{W}_{RLT}$$

mit:

c_a [kg/m³] Absolute Feuchte der Außenluft

c_i [kg/m³] Absolute Feuchte der Raumluft

g_{wj} [kg/(sm³)] Feuchtestrom Wandinnenoberfläche – Raumluft

W_{IFQ} [kg/h] Feuchteproduktion im Raum

W_{RLT} [kg/h] Feuchtezu- bzw. abfuhr durch RLT

3.1.6 CO₂-Bilanz des Raumes

Als Grundlage der Beurteilung der Raumluftqualität wird häufig der CO₂-Gehalt der Luft als Indikator verwendet. Dieser lässt sich anhand der folgenden Bilanzgleichung ermitteln:

Formel 6:
$$V_i \cdot \frac{dC_{CO_2,i}}{dt} = -n \cdot V \cdot C_{CO_2,i} + n \cdot V \cdot C_{CO_2,e} + S$$

mit:

$C_{\text{CO}_2, e}$ [ppm,v] CO_2 -Konzentration der Außenluft

$C_{\text{CO}_2, i}$ [ppm,v] CO_2 -Konzentration der Raumluft

S [l/h] Quellen: z.B. Atemluft

Vereinfacht angenommen wird dabei, dass in den Raumumschließungsflächen keinerlei Wechselwirkung mit dem CO_2 stattfindet. Das bedeutet, dass CO_2 nur durch Lüftung aus dem Raum abgeführt werden kann. Bei der Bilanzierung besonders wichtig ist CO_2 -Produktionsrate S . Für Menschen hängt die CO_2 -Freisetzung stark von dessen Aktivität ab (s. Tabelle 1).

Tabelle 1:
 CO_2 -Produktionsrate in Abhängigkeit der Aktivität

Aktivität	Aktivität [met]	CO_2 -Freisetzung [l/h]
Sitzend	1,0	17
Stehend	1,2	20,4
Lehrer	1,6	27,2
Hausarbeit	2,2	34

3.1.7 Umsetzung des Raumklimamodells

Die gekoppelten Transportgleichungen müssen für jedes Bauteil separat gelöst werden. Dazu ist neben der Vorgabe der inneren und äußeren Randbedingungen eine genaue Definition des jeweiligen Bauteilaufbaus mit den entsprechenden Materialparametern erforderlich. Die äußeren Klimabedingungen werden in der Regel nicht nennenswert durch das Gebäude oder seine Bauteile beeinflusst. Das Raumklima wird jedoch in erheblichem Maße durch die hygrothermischen bzw. strahlungstechnischen Eigenschaften der transparenten und opaken Umschließungsflächen mitbestimmt. Deshalb muss für eine realitätsnahe Erfassung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Raum der Schritt „von der Wand zum Raum“ gemacht werden.

Die dazu erforderlichen raumseitigen Randbedingungen stammen aus der Lösung der Raumbilanzgleichungen. Die Kopplung der Gleichungssysteme erfolgt iterativ mit Hilfe adaptiver Unterrelaxationsalgorithmen. Durch implizite Formulierungen bei der Diskretisierung der Transport- und der Raumbilanzgleichungen wird die numerische Stabilität des Lösungsverfahrens auch für größere Zeitschritte sichergestellt. Das Ablaufschema in Bild 2 erläutert die Vorgehensweise von WUFI-Plus.

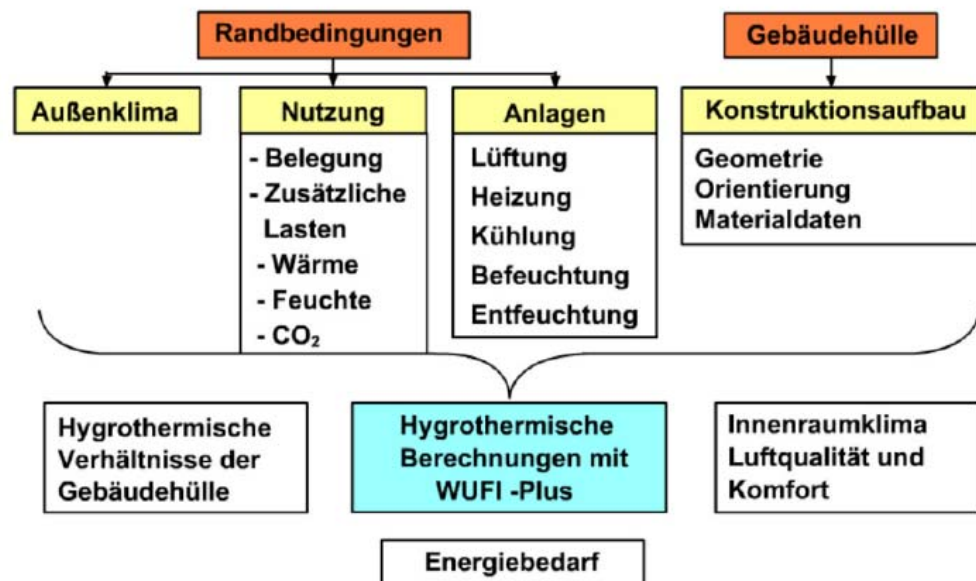


Bild 2:
 Ablaufschema, wie Berechnungen mit dem Rechenprogramm WUFI-Plus vorgenommen werden. Man legt (links im Bild) die Randbedingungen fest und gibt die Materialdaten (rechts) vor. WUFI-Plus berechnet daraus die thermo-hygrischen Raumklimagrößen und den Heizenergiebedarf.

3.2 Validierung des hygrothermischen Raumklimamodells

Der experimentelle Nachweis wird durch die beschriebenen Untersuchungen in Kapitel 4.1 erbracht.

3.2.1 Validierung und Ergebnisse

Validierung

Für eine erfolgreiche Durchführung von Validierungsberechnungen ist eine genaue Kenntnis aller erforderlichen Konstruktionsdetails und Randbedingungen während den Versuchen erforderlich. Da bei der experimentellen Versuchsdurchführung alle wichtigen Klimadaten messtechnisch erfasst wurden sowie die Aufbauten der Umschließungsflächen bekannt sind, sind die wesentlichen Voraussetzungen gegeben. Alle Daten über den Konstruktionsaufbau, den Luftwechsel, die Feuchteproduktion und die Klimadaten, der angrenzenden Räume sowie die Außenklimabedingungen wurden allen Teilnehmern des „common exercise“ zur Verfügung gestellt. Bevor die Validierungsberechnungen beginnen können ist es notwendig, alle vorhandenen und notwendigen Daten in das Programm zu implementieren.

Das Ziel dieser Validierungsberechnungen liegt darin, die Verläufe der relativen Raumluftfeuchten realistisch mit entsprechende Softwaretools abzubilden, deshalb werden im weiteren Verlauf nur die Verläufe der relativen Feuchten aus Messung und Berechnungen dargestellt. Die relative Raumluftfeuchte wird an-

hand der Messstelle in der Mitte der Versuchsräume ausgegeben. Die Temperatur in den Räumen wird auf 20 °C geregelt und alle Berechnungsergebnisse zeigen hier gute Übereinstimmungen, so dass nachfolgend die relativen Feuchten ohne Probleme betrachtet werden können.

Im Rahmen vom IEA-Annex 41 Projekt werden die Steps 1, 2 und 4 für Validierungsrechnungen herangezogen. Der Step 3 mit gestrichenen Gipskartonplatten ist nicht Bestandteil des Projektes, wird aber für eine weitere Validierungsberechnung mit WUFI®-Plus verwendet.

Ergebnisse der Validierungsberechnungen

Während der ersten Versuchsphase von Step 1, in der im Testraum nur Aluminiumfolie an den Wänden und der Decke angebracht ist, ist kein Sorptionsverhalten möglich. Ziel dieser Variante ist die Innenraumverhältnisse ohne sorptive Materialien und nur anhand der bekannten Luftwechselrate zu berechnen. Die Ergebnisse der Messungen und der Berechnungen mit dreizehn verschiedenen Simulationstools aus Step 1 sind in Bild 3 für zwei beispielhafte Tage dargestellt. Der größte Einfluss auf das Innenraumklima entsteht in diesem Fall durch die Luftwechselrate von $0,66 \text{ h}^{-1}$ im Testraum. Im Vergleich der berechneten Feuchten mit der gemessenen liegen die Ergebnisse in einem tolerierbaren Bereich und es kommt zu einer guten Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnungen.

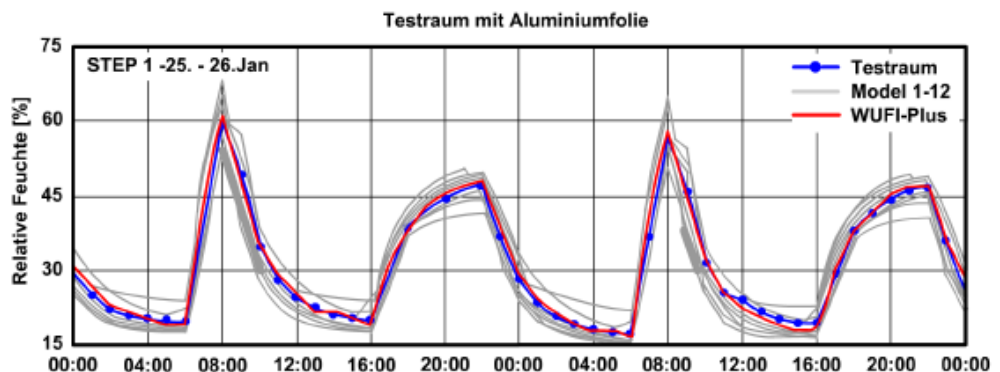


Bild 3:
Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumlufffeuchten im Testraum mit Aluminiumfolie an den Wänden und der Decke.

Step 2 wird mit ungestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden im Testraum durchgeführt. Die Fläche der sorptiven Oberfläche beträgt circa 45 m^2 . Bei dieser Variante wird das Feuchtepufferverhalten im Verlauf der Raumlufffeuchte im Vergleich zu Step 1 deutlich. Die Ergebnisse aus Messung und Berechnungen sind in Bild 4 dargestellt.

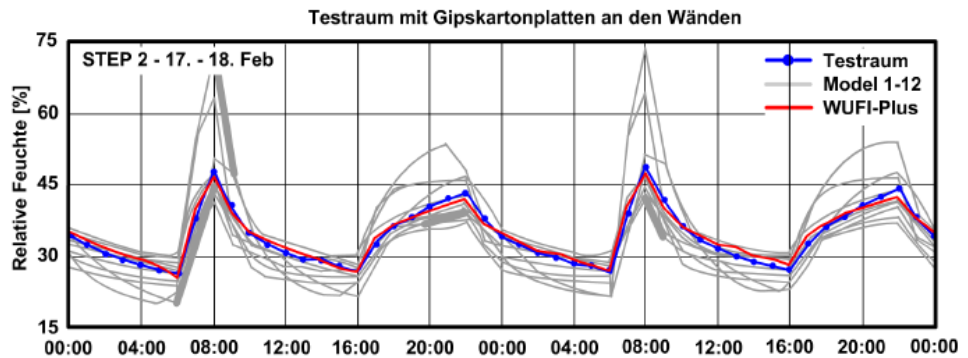


Bild 4:
Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumlufffeuchten im Testraum mit ungestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden.

Die Streuung der Ergebnisse ist hier sehr hoch. Während den zwei Befeuchtungsphasen liegen bei Step 2 die Feuchten zwischen -5 bis + 30 % r.F. entfernt von den Messergebnissen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass einige Modell Probleme haben, das Feuchtepufferverhalten der Gipskartonplatten realistisch nachzubilden. Die Berechnungen mit WUFI®-Plus zeigen respektable Ergebnisse auf. Die Ergebnisse von WUFI®-Plus zeigen, dass die Feuchtespitzen sehr gut abgebildet werden können.

Da Gipskartonplatten in Räumen normalerweise nicht ungestrichen zum Einsatz kommen, wurde ein weiterer Versuch mit gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden durchgeführt. Die angewendete Farbe weist einen s_d -Wert von 0,34 m auf. Die Ergebnisse der Messung werden nur für eine weitere Validierung von WUFI®-Plus eingesetzt (Bild 5), da Step 3 kein Bestandteil vom „common exercise“ des IEA-Annex 41 Projektes ist.

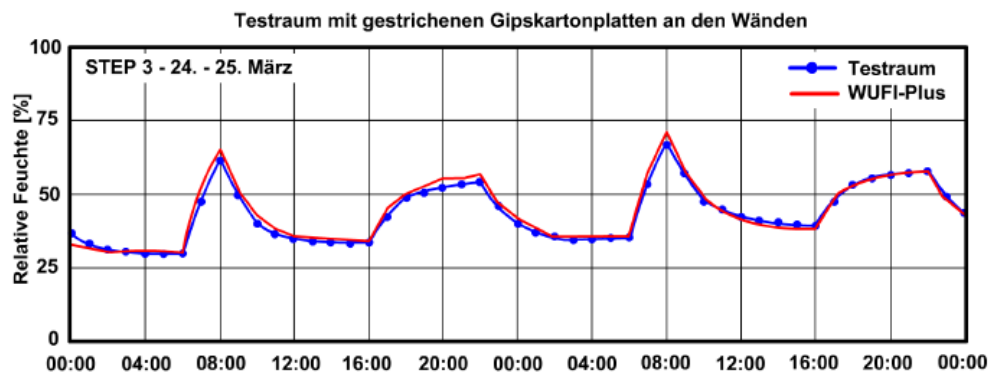


Bild 5:
Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumlufffeuchten im Testraum mit gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden.

Die Untersuchungen mit einem zusätzlichen Anstrich auf der Oberfläche, zeigen den Einfluss auf das Feuchtepufferverhalten des darunter liegenden Materials. Die Ergebnisse der Berechnungen mit WUFI®-Plus zeigen in diesem Step gute Übereinstimmungen mit den Messungen.

Im Zusammenhang mit dem durchgeführten „common exercise“ erfolgt der letzte Schritt der Validierungsberechnungen. Bei dieser Variante wird der Verlauf der relativen Luftfeuchte im Referenzraum mit gestrichenem Gipsputz an den Wänden und der Decke ermittelt. Der eingesetzte Anstrich hat einen s_d -Wert von 0,15 m. Die Ergebnisse der Berechnungen mit dreizehn Simulationstools sind in Bild 6 dargestellt.

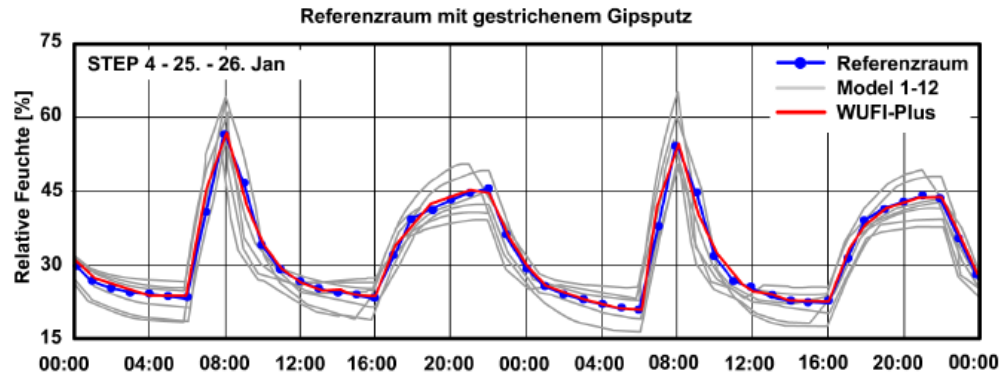


Bild 6:
Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumlufffeuchten im Referenzraum mit gestrichenem Gipsputz an den Wänden und der Decke.

In Bild 6 ist deutlich zu sehen, dass die meisten Simulationstools keine großen Schwierigkeiten aufweisen, um den Verlauf der relativen Luftfeuchte realistisch abzubilden. Die Streuung der Ergebnisse liegt im Bereich von $\pm 5\%$ r.F. zur Messung.

3.2.2 Statistische Analyse der Ergebnisse der Validierungsberechnungen

Anhand der Ergebnisse der Validierungsberechnungen wird eine statistische Analyse auf Basis der deskriptiven Statistik erstellt. In den nachfolgenden Grafiken sind Box-Whisker-Plots aller Ergebnisse, in denen jeweils der Mittelwert, Median, 25 % - und 75 % -Perzentile sowie die Min- und Max-Werte, dargestellt sind. Die Analyse umfasst jeweils den gesamten Mess- bzw. Berechnungszeitraum der einzelnen Varianten.

In Bild 7 sind die Ergebnisse der statistischen Analyse von Step 1 (Testraum mit Aluminiumfolie) dargestellt. Der auswertbare Zeitraum umfasst 16 Tage. Die Ergebnisse für diese Variante zeigen großteils gute Resultate. Die Median-Werte liegen bis auf ein paar Ausnahmen alle um die 30 % r.F., auch 25 – 75 % aller Werte weisen eine ähnliche Schwankungsbreite auf.

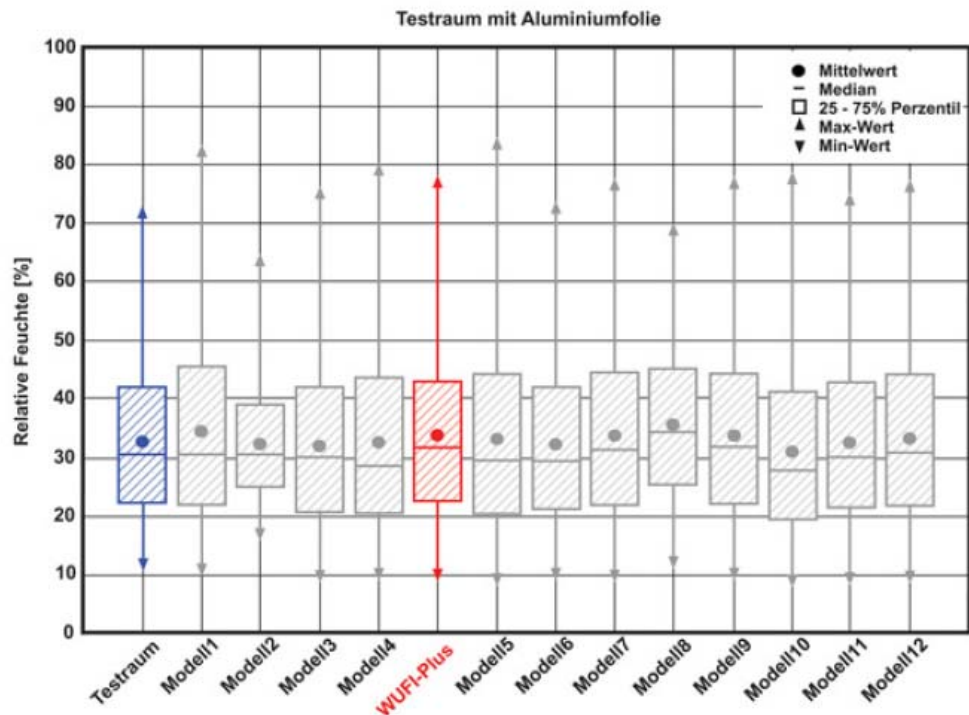


Bild 7:
Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse von Step 1.

Die statistische Auswertung für Step 2 mit ungestrichenen Gipskartonplatten zeigt in Bild 8, dass die Streuung der Ergebnisse und die Extremwerte im Vergleich zur ersten Variante teilweise deutlich abweichen. In Step 2 zeigen drei Modelle eine starke Abweichung zu den Messwerten.

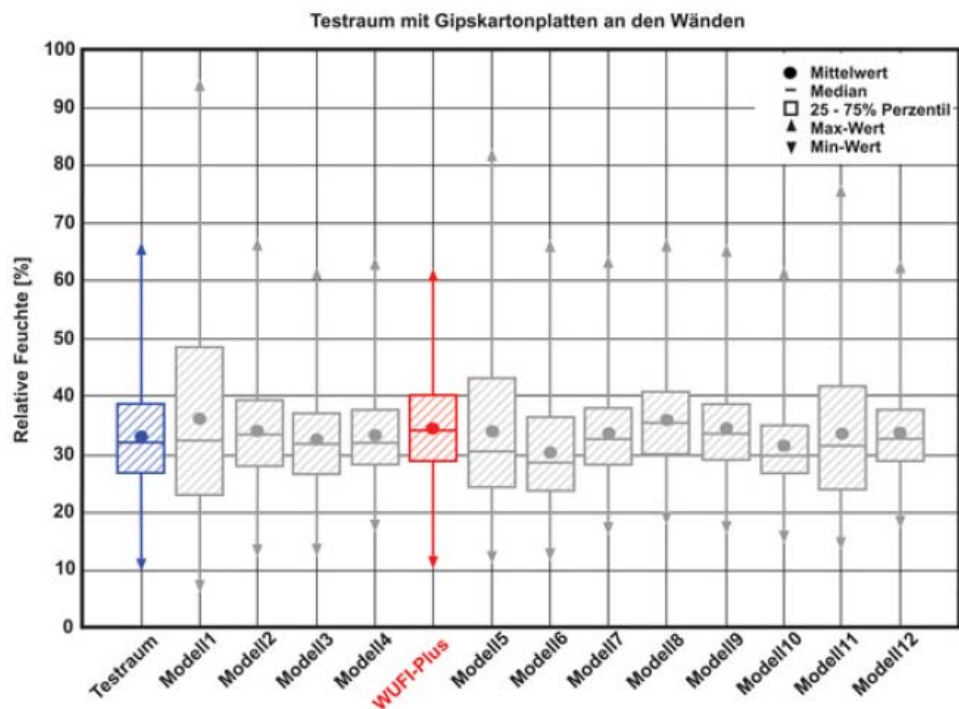


Bild 8:
Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse von Step 2.

Das nachfolgende Bild 9 zeigt die Statistische Auswertung der Ergebnisse, die für den Step 4 über eine Periode von 16 Tagen ermittelt wurden. Die Schwankungen liegen teilweise wieder in einem akzeptablen Bereich. Bei den Ergebnissen von WUFI-Plus zeigt sich hier eine fast 100%-ige Übereinstimmung.

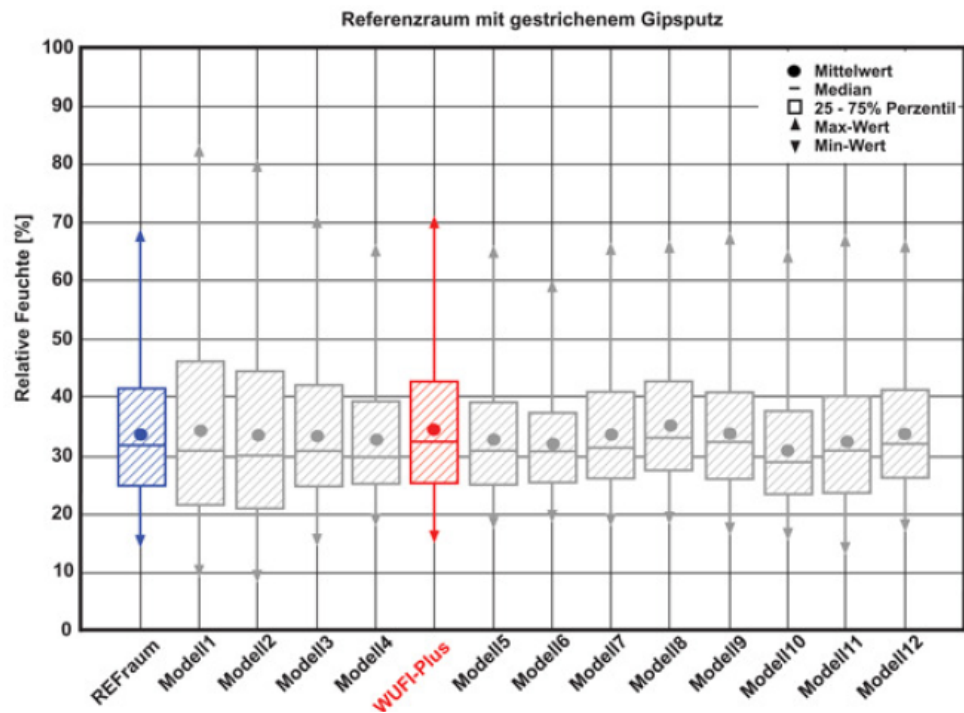


Bild 9:
Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse des Referenzraumes.

Auffällig bei der statistischen Auswertung ist, dass einige der Modelle bei der Simulation des Innenraumklimas mit stark sorptiven Materialien, wie den ungestrichenen Gipskarton, Probleme haben die Extremwerte optimal zu berechnen. Bei den meisten Modellen liegen 25 - 75 % der Ergebnisse etwa mit den der Messung überein.

4 Subtask 2: Experimental verification

4.1 Experimentelle Untersuchung des Feuchtepufferverhaltens von Gipskartonplatten unter realen Bedingungen

Ein geeignetes Raumklima ist für Menschen und zur Vermeidung von Schimmelpilzen wichtig, in beiden Fällen spielt die relative Luftfeuchte eine wesentliche Rolle. In Hinblick auf die Behaglichkeit in Räumen wird häufig über die Temperaturverhältnisse im Raum diskutiert, aber um ein behagliches Raumklima zu bekommen, ist es wichtig, die relative Luftfeuchte mit zu betrachten. In diesem Zusammenhang wird oft von zu hohen Feuchtegehalten geredet, bei denen es zu Schimmelpilzwachstum kommen kann, die einen negativen Einfluss auf die Gesundheit haben können. Aber auch zu niedrige Feuchtigkeiten

können zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen, wie trockene Schleimhäute und trockene Augen.

Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen sollen Materialien in Hinblick auf das Feuchtepufferverhalten unter realen Bedingungen betrachtet werden. Materialien haben verschiedene Feuchtespeicherfähigkeiten, d.h. die Eigenschaft Feuchteschwankungen im Raum zu puffern, und können somit einen wesentlichen Einfluss auf die Raumluftfeuchte haben. Das Feuchtepuffervermögen von Materialien bewirkt, dass bei auftretenden Feuchtespitzen (z.B. durch Duschen, Kochen und Waschen) Feuchtigkeit vom Material aufgenommen und in Zeiten, in denen keine bzw. wenig Feuchtigkeit produziert wird, wieder an die Umgebungsluft abgegeben wird. Dieses Verhalten hat zur Folge, dass der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in Räumen geringere Schwankungen aufweisen kann. Bei den nachfolgenden Untersuchungen wurden Gipskartonplatten in Hinblick auf das Feuchtepufferverhalten unter realen Bedingungen an der Freilandversuchsstelle Holzkirchen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik betrachtet.

Hintergrund und Vorgehensweise

Durch die immer höher werdenden Ansprüche an Energieeinsparung, Luftdichtigkeit von Gebäuden und Änderung der Lebensgewohnheiten der Bewohner kommt es in Innenräumen vermehrt zu Schimmelpilzbewuchs. Eine wesentliche Ursache dafür liegt in der verringerten Luftwechselrate z.B. durch den Einbau von dichteren Fenstern oder durch verändertes Lüftungsverhalten bedingt durch höhere Abwesenheitszeiten der Bewohner. Um dem Risiko von Feuchteschäden in Gebäuden entgegenwirken zu können, werden Untersuchungen zum Feuchtepufferverhalten verschiedener Materialien durchgeführt. Durch das Feuchtepufferverhalten von Materialien können Feuchtespitzen reduziert werden. Je nach eingesetztem Material variiert das Pufferverhalten. Die Pufferwirkung hängt vom Zusammenspiel der Sorptionsfähigkeit und der Diffusionsoffenheit des Materials ab. Einen deutlichen Einfluss hat hierbei auch die Ausprägung der Hysterese zwischen Ad- und Desorption.

Bei den Experimenten ist es sehr wichtig, äußere Einflüsse durch Temperatur- und Feuchteschwankungen bzw. Luftwechsel der Räume und die Feuchteproduktion im Raum zu kennen bzw. zu reduzieren. Für die Durchführung der Versuche wurden verschiedenste Maßnahmen getroffen, um Einflüsse von außen zu vermeiden. Um diese Wechselbeziehung zwischen Raumluft und Oberflächenmaterial der Wände zu untersuchen, werden Versuche in zwei identischen Räumen durchgeführt. Damit kann der Einfluss der jeweiligen Materialien direkt miteinander verglichen werden. Einer der beiden Versuchsräume wurde als Referenzraum eingesetzt, in dem die Randbedingungen bis auf das Außenklima immer die gleichen sind. Das Ziel der Untersuchungen ist, die Materialien in Hinblick auf das Feuchtepufferverhalten zu bewerten und Möglichkeiten zur Reduzierung von Schäden durch zu hohe relative Luftfeuchten aufzeigen zu können. Im Rahmen der hier dargestellten Versuche werden Gipskartonplatten mit und ohne Anstrich untersucht.

Versuchseinrichtung und –aufbau

Bei den beiden Versuchsräumen handelt es sich um zwei identische Räume in einem Versuchsgebäude, das in den 80er Jahren erbaut wurde, die Ausrichtung ist genau West-Ost und die beiden Räume liegen auf der Südseite des Hauses. In Bild 10 ist der Grundriss der beiden Räume dargestellt.

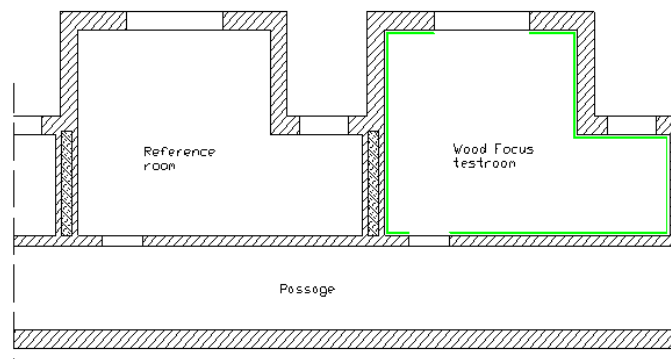


Bild 10:
Grundriss der beiden Versuchsräume [72].

Die Außenwände der Räume sind aus 24 cm Ziegel und 10 cm Polystyrol-Außendämmung aufgebaut, der U-Wert der Wände beträgt $0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$. Auf der Südseite ist jeweils ein Fenster eingebaut, mit einem U-Wert von $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem g-Wert von 0,6. Die Innenwände zu den angrenzenden Räumen sind durch ihren Konstruktionsaufbau thermisch entkoppelt. Dadurch werden die Versuchsräume nicht von den umliegenden Randbedingungen im Gebäude beeinflusst [72].

Im Folgenden wird als Referenzraum der Raum bezeichnet, der einen herkömmlichen gestrichenen Innenputz als Wandoberfläche hat. Der Testraum ist in Geometrie und Dimension mit dem Referenzraum identisch. Der Unterschied zum Referenzraum besteht darin, dass die Wand- und Deckenoberflächen mit Aluminiumfolie beklebt wurden, um das Sorptionsvermögen der Oberflächen zu verhindern. Die Dampfsperre garantiert, dass vom ursprünglichen Putz unter der Aluminiumfolie kein Einfluss auf den Feuchtehaushalt des Raumes zu erwarten ist. Es wird also ausschließlich die Wirkung der neu eingebrachten Bekleidungen bestimmt. Der Fußboden besitzt in beiden Räumen einen PVC-Belag, der ebenfalls als feuchtetechnisch inert anzusehen ist. Jeder der Räume hat ein Volumen von etwa 50 m^3 und eine Raumbofläche (ohne Fußboden, Fenster und Tür) von etwa 67 m^2 .

Die Raumlufttemperatur in den Versuchsräumen wird auf konstant 20 °C geregelt. Einen wesentlichen Einfluss kann der Raumluftwechsel durch Infiltration über Fugen und sonstige Undichtigkeiten haben. Die natürliche Luftwechselrate wurde in beiden Versuchsräumen durch Abkleben von Fehlstellen reduziert. Die Luftwechselrate wurde in beiden Räumen mittels Blower-Door-Messverfahren ermittelt und ergab bezogen auf mittlere Druckdifferenzen für den Referenzraum einen Luftwechsel von $n = 0,04 \text{ h}^{-1}$ und für den Testraum $n = 0,03 \text{ h}^{-1}$. In beiden Versuchsräumen befindet sich eine Lüftungsanlage, die für einen konstanten Luftwechsel sorgt. (Nach DIN 4108-2 [27] muss bei einer mechanische Belüftung von Wohnräumen ein Mindestluftwechsel von $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$ vorliegen.)

Der Luftwechsel wird mithilfe eines Volumenstromreglers in der Lüftungsanlage winddruckabhängig geregelt. Damit ist ein konstanter Luftwechsel gewährleistet. Die Luftwechselraten bei Betrieb der Lüftungsanlagen wurden durch Tracer-Gas-Messungen erfasst und liegen im Referenzraum bei $n = 0,63 \text{ h}^{-1}$ und im Testraum bei $n = 0,66 \text{ h}^{-1}$.

Zur realitätsnahen Beurteilung des Verlaufs der relativen Raumlufffeuchte in Hinblick auf das Feuchtepufferverhalten wird täglich jeweils eine Feuchtemenge von 2,4 kg in die Räume eingebracht, die eine normale Nutzung in einem 3-Personen-Haushalt [48] simuliert. Für die Differenzierung der kurz- und längerfristigen Feuchtepufferung der Raumumschließenden Flächen wird ein möglichst praxisnaher, täglich sich wiederholender Feuchteproduktionszyklus gewählt, dessen Spitzen eine kurze aber hohe Intensität am Morgen und eine etwas längere und mäßige Intensität am Abend besitzen. Das Feuchteprofil [34] (Bild 3) weist somit zwei Feuchtespitzen auf, morgens von 6 - 8 Uhr und nachmittags von 16 - 22 Uhr. Diese Spitzen simulieren Duschen, Waschen, Kochen und die Anwesenheit von Menschen. Die Feuchtigkeit wird durch den Einsatz von Ultraschallverdampfern, die mit einer Zeitschaltuhr geregelt werden, nach dem angegebenen Feuchteprofil in Bild 11 produziert.

Zur Erfassung der raumklimatischen Verhältnisse sind in den Versuchsräumen Temperatur- und Feuchtesensoren angebracht. Messtechnisch erfasst werden Oberflächentemperaturen der Wände, Temperaturschichtungen in der Mitte der Räume sowie die relative Raumlufffeuchte. Der Energieverbrauch der Heizungen wird durch Leistungsmesser erfasst. Für die Versuchsauswertung wird nachfolgend die Temperatur- und Feuchte in Raummitte betrachtet. Die Messdaten werden mithilfe des IMEDAS® Messdatenerfassungssystem kontinuierlich aufgezeichnet und in einer Datenbank gespeichert und anschließend ausgewertet.

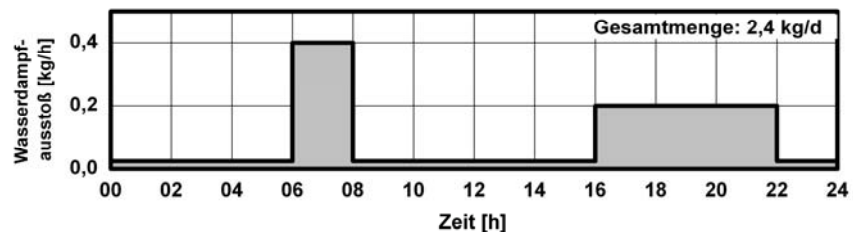


Bild 11:
Verlauf der täglichen Feuchteproduktion in den zwei Versuchsräumen [34].

Experimentelle Untersuchungen

Bevor das Testmaterial in den Testraum eingebracht werden kann, wird das Material vorkonditioniert, um einen definierten Ausgangszustand für die Versuche zu gewährleisten. Die untersuchten Gipskartonplatten werden dazu über einen Zeitraum von mehreren Wochen bei einem Klima von 20 °C und 50 % r.F. gelagert. Nach der erfolgten Akklimatisation kann mit der Untersuchung begonnen werden.

Die Abfolge der durchgeführten Experimente ist in Tabelle 2 aufgelistet. Der erste Messzyklus mit einem leeren Testraum, d.h. mit Aluminiumfolie an Wänden und Decke, dient zur Kontrolle. Im weiteren Verlauf werden unbehandelte Gipskartonplatten erst an den Wänden und danach an Wänden und Decke angebracht. Des Weiteren erfolgen Tests mit gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden.

Tabelle 2:
Auflistung der durchgeführten Versuchsschritte.

Variante	Material in Testraum	Projizierte Fläche [m ²]
Step 1	Aluminiumfolie - Wände u. Decke	67
Step 2	Gipskartonplatten - Wände	45
Step 3	Gipskartonplatten - Wände u. Decke	67
Step 4	Gestrichene Gipskartonplatten - Wände	45
Referenzraum (parallel zu Step 1-4)	Gestrichener Gipsputz - Wände u. Decke	67

Ergebnisse

Bei den folgenden Versuchen werden in den leeren Testraum nacheinander verschiedene Varianten mit Gipskartonplatten eingebaut und deren Einfluss auf die Raumluftheuchte jeweils im Vergleich zur Situation im Referenzraum (mit gestrichenem Innenputz) bestimmt.

Step 1

Im ersten Versuchsschritt werden die Verhältnisse im Testraum ermittelt indem die Umschließungsflächen nur mit Aluminiumfolie an den Wänden und der Decke verkleidet sind. Aufgrund der fehlenden Sorptionsfähigkeit kann der eingestellte Raumlftwechsel durch einen einfachen rechnerischen Ansatz nachgerechnet und kontrolliert werden. Dieser Kontrollschritt dient zur Überprüfung der angenommenen Randparameter, wie Luftwechsel und Einschränkung der Sorption. Der Vergleich zwischen gemessener absoluter Raumlftfeuchte und berechneter Feuchte im Testraum ist in Bild 12 exemplarisch für zwei Versuchstage dargestellt. Die Verläufe in Bild 12 zeigen eine gute Übereinstimmung auf, nur in den Nachmittagstunden während der etwas niedrigeren Feuchteproduktion liegen die Kurven nicht exakt übereinander. Diese Abweichung kann in geringfügigen Schwankungen in der Feuchteproduktion durch die Ultraschallverdampfer begründet sein. Anhand der Übereinstimmung kann der angegebene Luftwechsel durch die Lüftungsanlage mit $n = 0,66 \text{ h}^{-1}$ bestätigt werden.

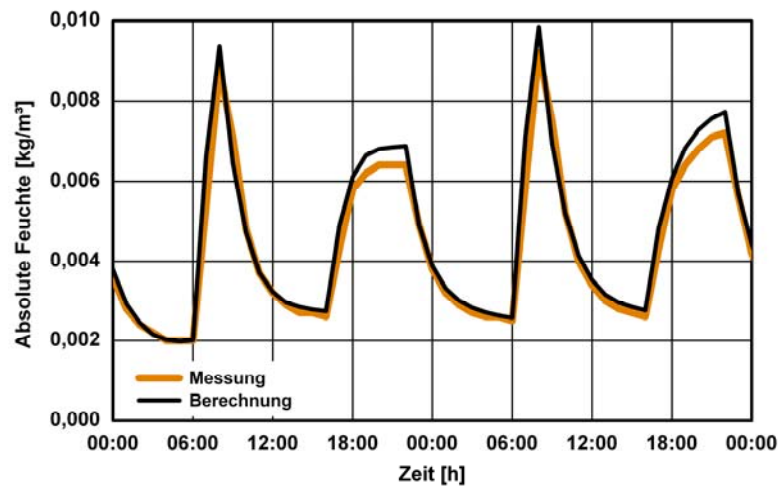


Bild 12:
Vergleich der Verläufe der relativen Raumluftheuchte zwischen Messung und Berechnung.

Im Rahmen der Untersuchungen liegt das Hauptaugenmerk auf dem Feuchtepufferverhalten von verschiedenen Materialien. Um vergleichbare Aussagen treffen zu können, werden nachfolgend die Messergebnisse der Versuche aus dem Referenzraum mit dem Testraum verglichen. In Bild 13 sind die Verläufe der relativen Luftfeuchte in den beiden Versuchsräumen dargestellt.

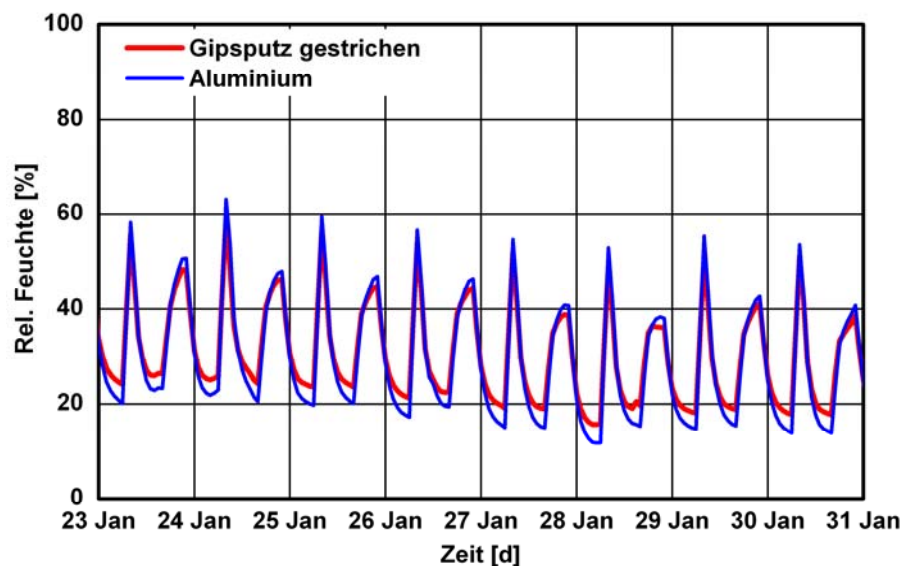


Bild 13:
Verlauf der relativen Raumluftheuchte im Referenzraum mit gestrichenem Gipsputz im Vergleich zum Testraum mit Aluminiumfolie an Wänden und Decke, im Zeitraum vom 23. – 31. Januar.

Dieser Versuch zeigt, welches Feuchtepuffervermögen der gestrichene Gipsputz im Vergleich zu einem Raum ohne sorptionsfähige Oberflächen aufweist. Das Niveau der relativen Feuchte steigt zu Zeiten der hohen Feuchteproduktion im Referenzraum nicht ganz so hoch, wie im Testraum. Zugleich sieht man auch den Effekt des Pufferverhaltens, denn in Zeiten einer geringen Feuchteproduk-

tion liegt die Feuchte im Referenzraum etwas höher als im Testraum. In diesen Zeiträumen wird die absorbierte Feuchte vom Gipsputz wieder an die Umgebung abgegeben, was einen Anstieg der Raumluftfeuchte zur Folge hat. Für eine quantitative Beurteilung des Pufferverhaltens werden die Feuchteamplituden, d.h. der Anstieg der Feuchte während der Befeuchtung morgens und nachmittags, bestimmt. Die Vorgehensweise ist in Bild 14 erläutert. Die erste Amplitude gibt den Anstieg der relativen Feuchte zwischen 6 – 8 Uhr morgens an. In diesem Zeitraum werden 400 g/h Feuchtigkeit eingebracht. Die Amplitude am Nachmittag wird aus dem Anfangswert um 16 Uhr und dem Endwert um 22 Uhr ermittelt, während einer Feuchteproduktion von 200g/h. Aufgrund des Einflusses der Außenklimarandbedingungen können sich die Amplituden von einem zum anderen Tag leicht verändern. Erwartungsgemäß führt die kurze aber intensive Feuchteproduktion am Morgen zu einem stärkeren Ausschlag der Raumluftfeuchte als die länger andauernde aber nur halb so starke Feuchteproduktion am Abend.

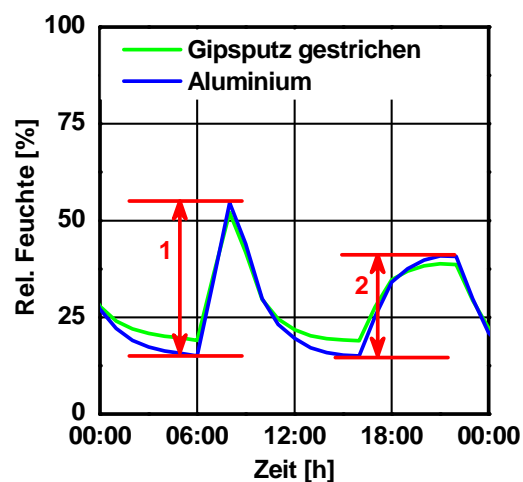


Bild 14:
Bestimmung der Feuchteamplituden durch die Feuchteveränderungen der Raumluft als Folge der Feuchteproduktion.

1: Feuchtespitze von 6-8 Uhr.

2: Feuchtespitze von 16–22 Uhr.

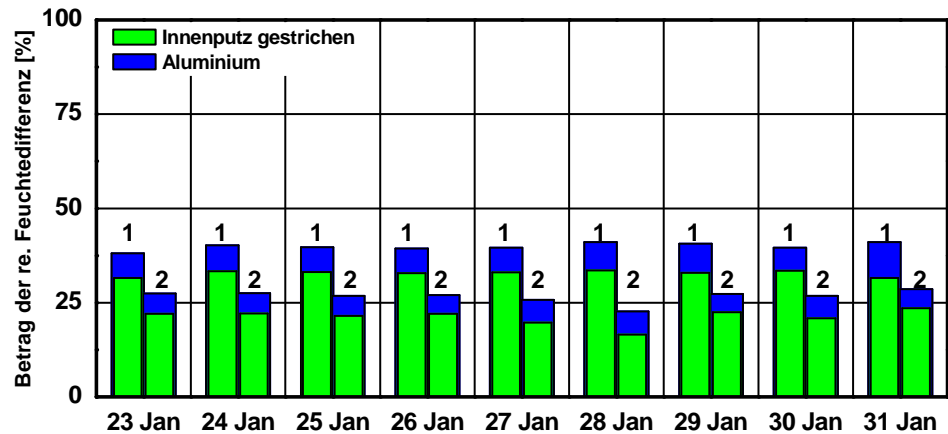


Bild 15: Feuchteamplituden in den beiden Versuchsräumen während des Untersuchungszeitraumes vom 23. – 31. Januar, jeweils für die Feuchtespitze morgens und nachmittags.

Für den ersten Messzeitraum der Versuchsräume mit einem leeren Testraum (mit Aluminiumfolie an den Wänden und der Decke) und dem Referenzraum zeigt Bild 15 anhand der Feuchteamplituden die Feuchtepufferwirkung des gestrichenen Gipsputzes über den gesamten Messzeitraum. Für eine einfachere Vergleichbarkeit der einzelnen Untersuchungsschritte werden die zwei täglich auftretenden Feuchteamplituden über den gesamten Messzeitraum gemittelt und die Werte des Referenzraumes normiert. Durch diese Normierung können mehrere Versuchsreihen auf einfache Weise verglichen werden. In Bild 16 links sind zu den mittleren Feuchteamplituden für Step 1 rechts die dazugehörigen normierten Amplituden dargestellt. Anhand der normierten Amplitudenhöhen ist einfach zu erkennen, dass durchschnittlich die Feuchteamplituden am morgen und am Nachmittag im Testraum etwa 20 % höher liegen als im Referenzraum mit sorptionsfähigen Umschließungsflächen.

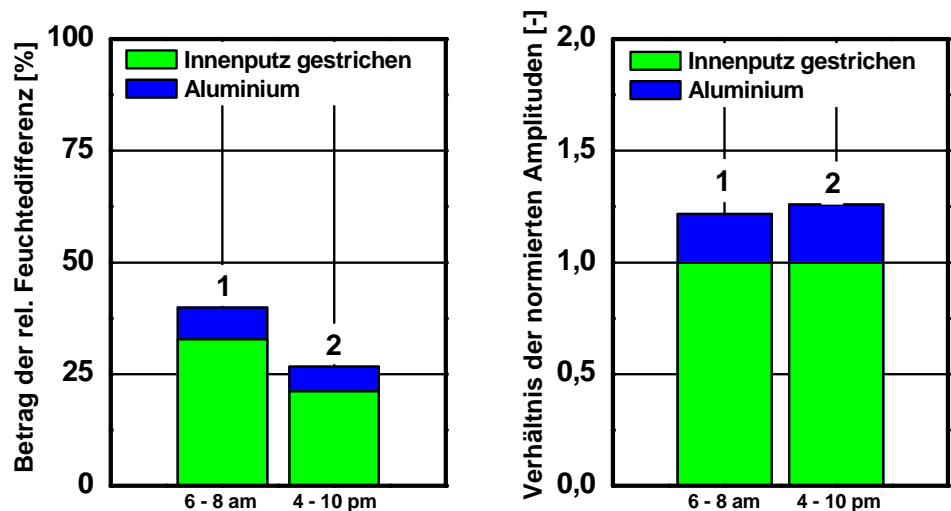


Bild 16: links: Durchschnittliche Feuchteamplituden des 9-tägigen Versuchszeitraums der ersten Untersuchungen.

rechts: Darstellung der normierten Feuchteamplituden.

Step 2

Während der zweiten Versuchsphase werden ca. 45 m² unbehandelte Gipskartonplatten in den Testraum an die Wände angebracht. Zur Sicherstellung, dass ein Sorptionsverhalten des Materials nur über die zur Rauminnenseite liegende Oberfläche auftreten kann, sind die Platten auf der Rückseite mit dampfdichter Aluminiumfolie beklebt. Die Verläufe der Luftfeuchten in den Versuchsräumen sind in Bild 17 über einen Messzeitraum von sechs Tagen dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die unbehandelten Gipskartonplatten im Testraum zu einer Reduzierung der Feuchtespitzen im Vergleich zum Referenzraum führen. Die Feuchteamplituden für die täglich auftretenden Feuchtespitzen sind in Bild 18 für den gesamten Messzeitraum und in Bild 19 links der Mittelwert der Amplituden dargestellt. Die normierten Amplituden sind in Bild 19 rechts zu sehen. Eine Fläche von etwa 45 m² ungestrichenen Gipskartonplatten führt zu einer Reduzierung der Feuchtespitzen am Morgen von etwa 35 % und am Nachmittag etwa 25 % im Vergleich zu einem gestrichenen Gipsputz.

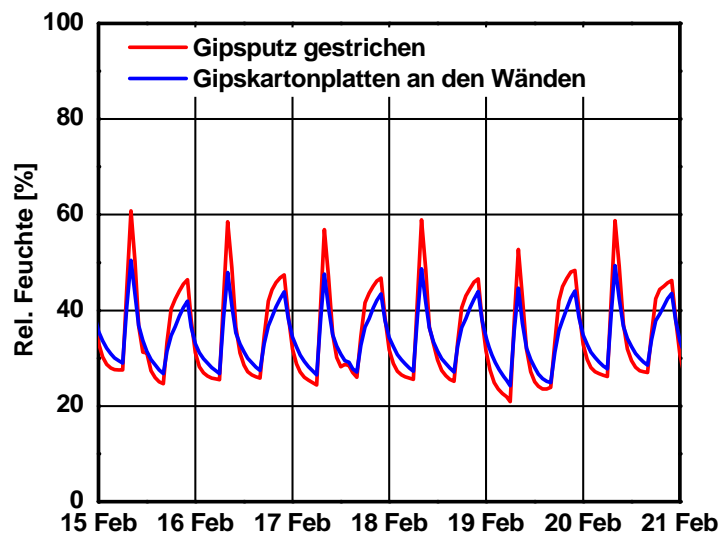


Bild 17:
Verläufe der relativen Raumluftfeuchten in den beiden Versuchsräumen im Zeitraum vom 16. – 24. Februar. Im Testraum sind ca. 45 m² Gipskartonplatten eingebracht.

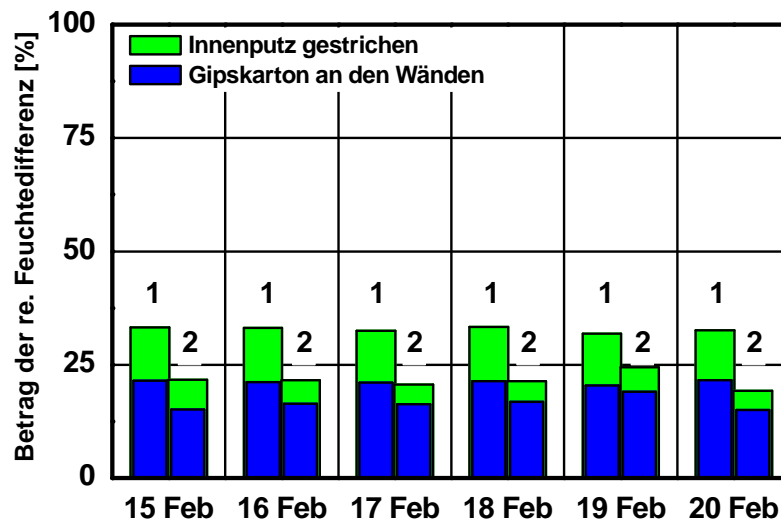


Bild 18:
Feuchteamplituden in den beiden Versuchsräumen während des Untersuchungszeitraumes vom 15. – 20. Februar, jeweils für die Feuchtespitze morgens und nachmittags.

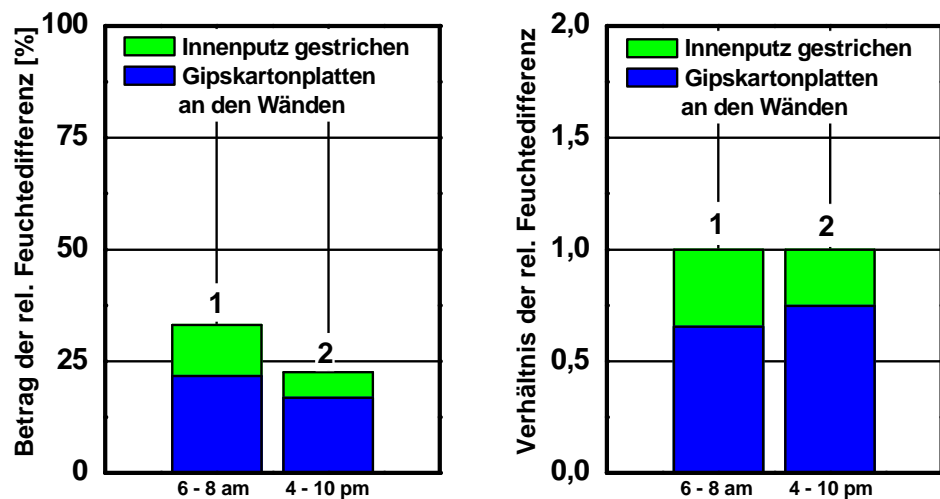


Bild 19:
links: Durchschnittliche Feuchteamplituden des 6-tägigen Versuchszeitraumes der Untersuchungen mit Gipskartonplatten an den Wänden im Testraum.

rechts: Darstellung der normierten Feuchteamplituden.

Step 3

Der direkte Vergleich des Feuchtepufferverhaltens bezogen auf die gleiche sorptionsfähige Oberfläche der Materialien erfolgt in Step 3. Bei diesem Versuch werden zusätzlich zur Wandfläche Gipskartonplatten für die Decke in den Testraum eingebracht.

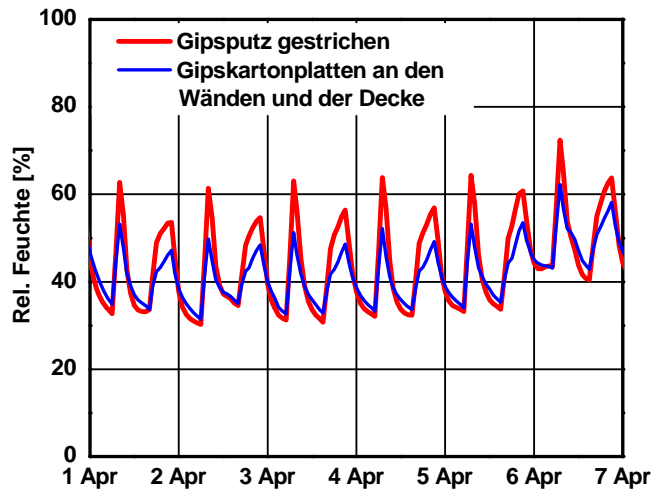


Bild 20: Verläufe der relativen Raumluftfeuchten in den beiden Versuchsräumen im Zeitraum vom 01. – 07. April. Im Testraum sind ca. 67 m² Gipskartonplatten eingebracht.

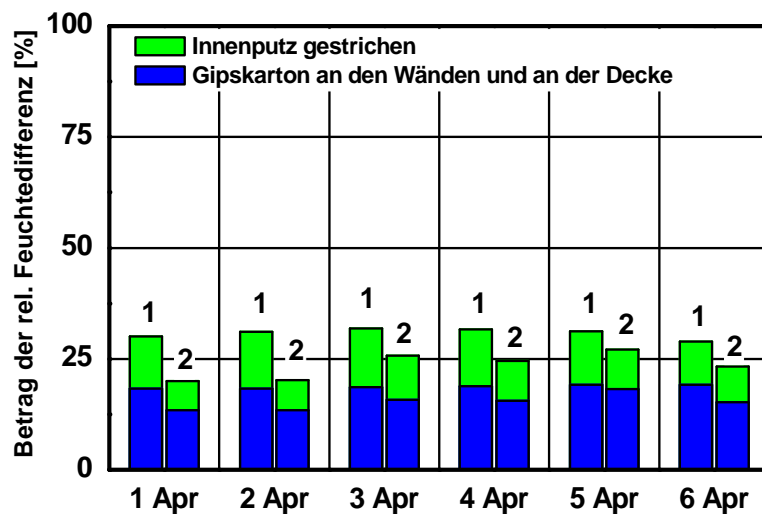


Bild 21: Feuchteamplituden in den beiden Versuchsräumen während des Untersuchungszeitraumes vom 01. – 07. April, jeweils für die Feuchtespitze morgens und nachmittags.

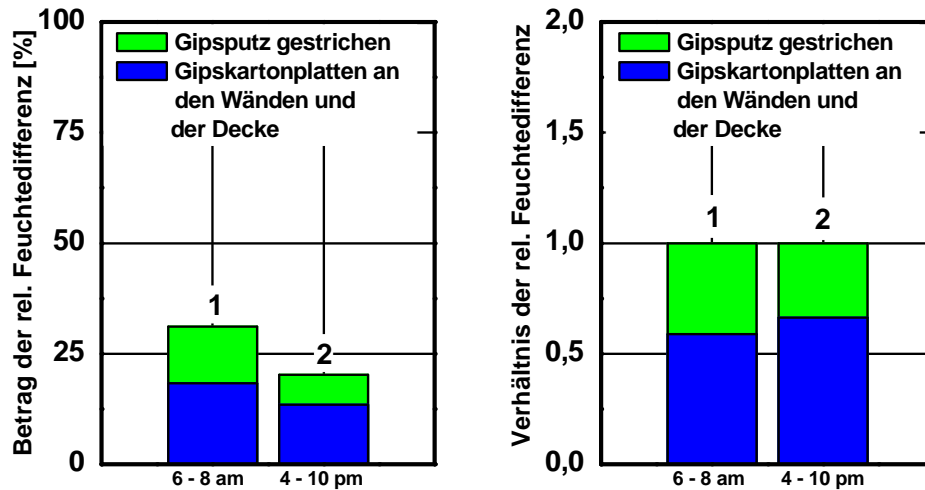


Bild 22:

links: Durchschnittliche Feuchteamplituden des 6-tägigen Versuchszeitraums der Untersuchungen mit Gipskartonplatten an den Wänden und an der Decke im Testraum. rechts: Darstellung der normierten Feuchteamplituden.

Bild 20 zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchten in den zwei Versuchsräumen. Bei diesem Versuch ist das Pufferverhalten der Gipskartonplatten etwas höher ausgeprägt als in Step 2, was mit der Erhöhung der sorptiven Fläche im Testraum zusammenhängt. In Bild 21 sind die täglichen und in Bild 22 links die mittleren Feuchteamplituden für den Messzeitraum vom 01. – 07. April dargestellt. Die normierten Amplitudenhöhen zeigt Bild 22 rechts. Durch die größere sorptive Fläche im Testraum wird der Effekt der Pufferung nochmals größer im Vergleich zum Referenzraum. Die Feuchtespitze am Morgen wird um ca. 40 % und nachmittags ca. 35 % reduziert im Vergleich zum gestrichenen Gipsputz.

Step 4

Da in den meisten Fällen Wandbekleidungen im Innenraum gestrichen werden, folgt nach der Messung des Pufferverhaltens der unbehandelten Gipskartonplatten ein Versuch mit gestrichenen. In diesem Fall werden auf die Platten ein Grundierungs- und ein Acrylanstrich aufgetragen. Das Anstrichsystem weist einen s_d -Wert von 0,34 m auf. Nachfolgend sind in Bild 23, Bild 24 und Bild 25 die Verläufe der relativen Raumluftfeuchte und die Amplitudenhöhen der beiden Räume dargestellt. In Bild 23 ist deutlich zu sehen, dass das Feuchtepufferverhalten der gestrichenen Gipskartonplatten mit dem des gestrichenen Gipsputzes annähernd übereinstimmt. Die mittlere normierte Amplitudenhöhe der beiden Feuchtespitzen zeigt aber, dass die Pufferung im Testraum trotz Anstrichsystem mit s_d -Wert von 0,34 m ca. 10 % größer ist als im Referenzraum.

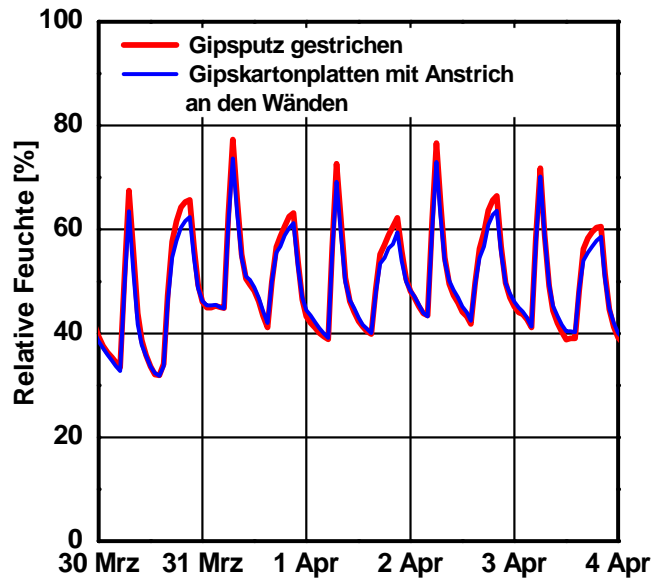


Bild 23:
Verlauf der relativen Raumluftfeuchte in den beiden Versuchsräumen im Zeitraum vom 30. März – 04. April. Im Testraum sind ca. 45 m² gestrichene Gipskartonplatten an den Wänden angebracht.

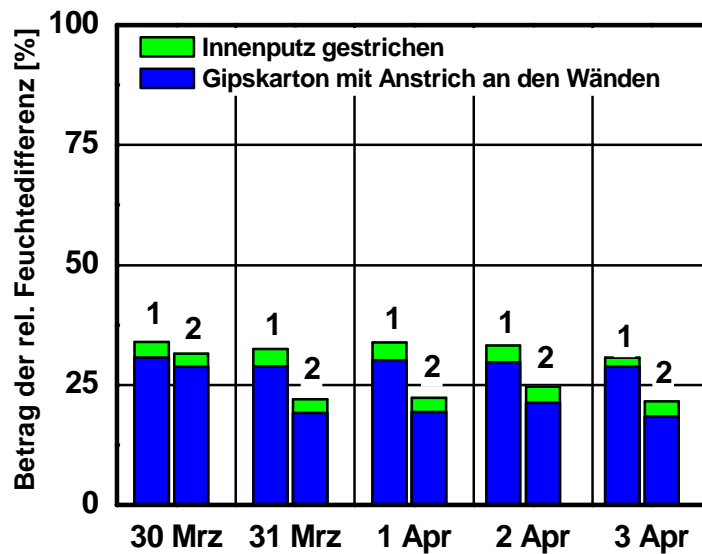


Bild 24:
Feuchteamplituden in den beiden Versuchsräumen während des Untersuchungszeitraumes vom 30. März – 04. April, jeweils für die Feuchtespitze morgens und nachmittags.

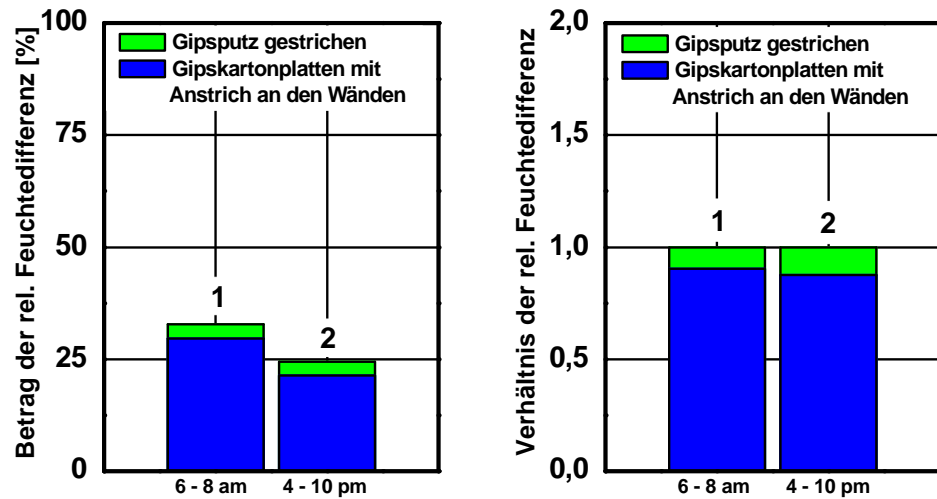


Bild 25:
links: Durchschnittliche Feuchteamplituden des 5-tägigen Versuchszeitraums der Untersuchungen mit gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden im Testraum.

rechts: Darstellung der normierten Feuchteamplituden.

Vergleich der einzelnen Untersuchungen

Die Reduktion der feuchteproduktionsbedingten Ausschläge der Raumluftfeuchte im Testraum in Relation zur Situation im verputzten Referenzraum ist ein Maß für die Feuchtepufferwirkung der im Testraum eingebrachten Materialien. In Bild 26 sind die Ergebnisse der normierten Amplitudenhöhen der verschiedenen Experimente nochmals zusammengefasst. Da der unbedeckte Testraum so gut wie keine hygroskopische Feuchtepufferkapazität besitzt, sind dort die Feuchteamplituden größer als im verputzten Referenzraum. Allen untersuchten Bekleidungen ist gemeinsam, dass sie eine größere Feuchtepufferung besitzen als der gestrichene Innenputz, auch wenn die eingebrachte Testfläche teilweise kleiner ist als im Referenzraum. Anhand der Feuchteamplituden der beiden Varianten mit ungestrichenen Gipskartonplatten wird der Einfluss einer größeren Sorptionsfläche deutlich. Ein interessanter Effekt zeigt sich beim Vergleich der Ergebnisse des gestrichenen mit den ungestrichenen Gipskartonplatten. Erwartungsgemäß wird durch den Diffusionswiderstand des Anstriches die Feuchtepufferwirkung deutlich reduziert. Dies ist aber bei der kurzfristigen hohen Feuchtebelastung wesentlich ausgeprägter als bei der längerfristigen geringeren Belastung. Bei den gestrichenen Gipskartonplatten ist deshalb bei der nachmittäglichen Feuchtelast im Vergleich zum Referenzraum eine stärkere Absenkung der Amplitude (rechter Balken) als bei der morgendlichen Feuchtelast (linker Balken) zu beobachten. Beim unbehandelten Gipskarton verhält es sich gerade anders herum.

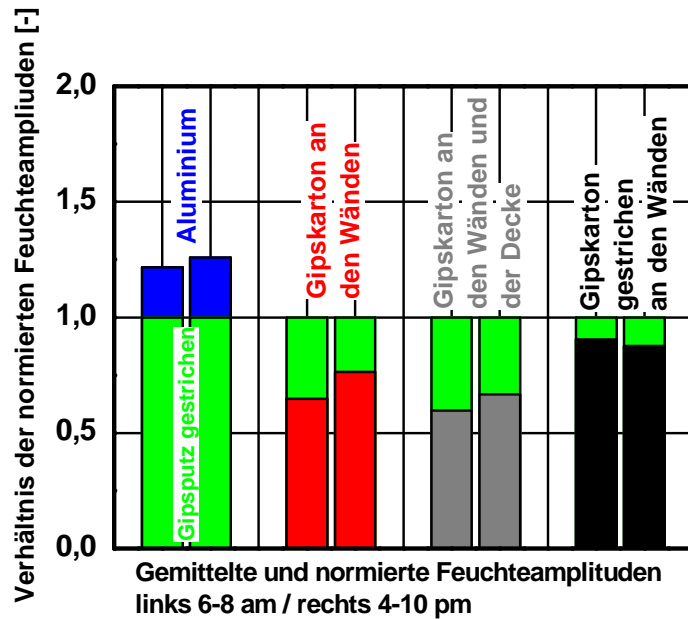


Bild 26:

Zusammenstellung der gemittelten und normierten Feuchteamplituden der verschiedenen Versuchsvarianten bezogen auf die Verhältnisse im Referenzraum.

Zusammenfassung

Zur Bestimmung der Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Gipskartonplatten mit und ohne Anstrich im Vergleich zu einem handelsüblichen gestrichenen Innenputz werden experimentelle Untersuchungen auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen durchgeführt. In zwei identischen Versuchsräumen werden bei definierten Randbedingungen die Einflüsse des Materials in Hinblick auf das Pufferverhalten beurteilt. Der Referenzraum wird mit einem herkömmlichen Innenputz auf Kalk-Gips-Basis und einem diffusionsoffenen Anstrich versehen. Der Testraum wird vollständig mit Aluminiumfolie ausgekleidet, um Sorptionseinflüsse über die Wandoberfläche zu vermeiden. Die Böden hatten in beiden Versuchsräumen einen dampfdichten PVC-Belag. Mit Hilfe von Ultraschallbefeuchtern wird in beiden Räumen eine typische tägliche Wohnraumfeuchte eingebracht. Durch Luftfeuchte- und Temperatursensoren wird das Raumklima in beiden Versuchsräumen kontinuierlich erfasst und mit Hilfe eines Datenerfassungssystems aufgezeichnet. Wegen des Einflusses des Außenklimas auf das Feuchteniveau im Raum wurden alle Messungen stets parallel bei gleicher Lüftung und Befeuchtung im Testraum und im Referenzraum durchgeführt. Zur Erfassung der Feuchtepufferung unterschiedlicher Innenraumbekleidungen wurde der feuchte-technisch inerte Testraum nacheinander mit unbehandelten Gipskartonplatten an den Wänden, an den Wänden und an der Decke sowie mit gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden ausgekleidet. Durch den Vergleich der Raumluftfeuchteauschläge während einer Feuchteproduktionspitze im bekleideten Testraum und im verputzten Referenzraum kann die Feuchtepufferkapazität der untersuchten Bekleidungsvarianten quantifiziert werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass alle untersuchten Varianten mit Gipskartonplatten eine bessere Feuchtepufferwirkung aufweisen als der herkömmliche gestrichene Innenputz. Während die unbehandelten Gipskartonplatten an den Wänden bzw. an den Wänden und der Decke die auftretenden Feuchtespitzen bis zu 40% dämpfen können, erreichen die gestrichenen Gipskartonplatten, die an den Wänden montiert sind lediglich eine Reduzierung der Feuchtespitzen um 10 - 15%, als die Dämpfung durch einen Innenputz. Dies liegt daran, dass durch das aufbringen eines Anstrichsystems ein zusätzlicher Schicht, mit einem s_d -Wert von 0,34 m, die Sorptionseigenschaften der darunterliegenden Gipskartonplatten beeinträchtigt werden.

Durch die Dämpfung der Feuchtespitzen wird erreicht, dass das Raumklima häufiger in für den Bewohner als behaglich empfundenen Bereich liegt. Gegebenenfalls führt die Absenkung des Feuchtemaximums auch zu einer Reduktion der Gefahr von Schimmelpilzbildung.

Der Vergleich des Feuchtepufferverhaltens zwischen unbehandelten und gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden macht aber auch den Einfluss eines Anstrichs deutlich. Hier müssen weitere Untersuchungen zeigen, ob geeignete diffusionsoffene Anstrichsysteme die Situation verbessern können.

4.2 Untersuchungen zum kurzfristigen Sorptionsverhalten von Innenraummaterialien

4.2.1 Hintergrund und Zielsetzung

Neben den beiden offensichtlichen Größen Raumtemperatur und Strahlungsbilanz ist die Raumluftfeuchte von entscheidender, aber häufig unterschätzter Bedeutung für die Behaglichkeit in Räumen. Durch die immer besser gedämmte und dichtere Bauweise kommt es vermehrt zu unzureichender Lüftung und damit zu einer erhöhten Luftfeuchtigkeit in Innenräumen. Durch Duschen, Kochen, Waschen etc. wird viel Feuchtigkeit produziert. Bei der früheren, undichteren Bauweise wurde die produzierte Feuchtigkeitsmenge meist durch die natürliche Infiltration abgeführt. Durch den geringeren Luftwechsel bei der heutigen, dichteren Bauweise wird diese Feuchtigkeit, sofern nicht zusätzlich gelüftet wird, nicht immer ausreichend abgeführt. Ist die Luftfeuchtigkeit zu lange auf hohem Niveau, besteht die Gefahr von Schimmelpilzbildung, und es kann zu Gesundheitsproblemen kommen. Da aber nicht nur zu hohe Feuchte zu Problemen führen kann, ist es ebenso wichtig, ein nicht zu trockenes Klima zu erreichen, denn dies kann zu trockenen Schleimhäuten in Nase und Augen führen [20].

Grundziel des Projektes ist die Untersuchung und Beurteilung des Feuchtepufferungsverhaltens, um den Einfluss auf das Raumklima hinsichtlich der relativen Raumluftfeuchte aufzuzeigen. Des Weiteren soll das Feuchtepufferverhalten und deren Auswirkungen auf das Raumklima mittels Simulationsrechnungen aufgezeigt werden. Am Ende des Projektes soll eine Definition zur Klassifizierung unterschiedlicher Produkte und -kombinationen entstehen.

4.2.2 Projektdurchführung

Die geplanten Untersuchungen sollen zeigen, welches Pufferverhalten sich bei verschiedenen Materialvarianten einstellt und wie sich dieses auf das Raum-

klima auswirkt. Die ermittelten Messdaten werden für die weitere Validierung eines Softwaretools und für Simulationsrechnungen verwendet. Die Ergebnisse der Produkte und -gruppen werden in Hinblick auf das Feuchtepufferverhalten geordnet und eine Klassifizierung für die Bewertung des Pufferverhaltens vorgenommen.

Die Untersuchungen lassen sich in drei aufeinander folgende Schritte einteilen. Zunächst werden für die einbezogenen Materialien die zwei grundlegenden hygrothermischen Kennwerte, die Sorption und die Diffusionswiderstandszahl, ermittelt. Durch einen geeigneten, neuentwickelten Laborversuch wird das Verhalten des Materials in Hinblick auf die Feuchtepufferung messtechnisch erfasst. Die so ermittelten Verläufe der Gewichtsänderungen des Materials werden zunächst durch Berechnungen mit dem hygrothermischen Berechnungsprogramm WUFI-Pro [76] validiert. Abschließend werden vergleichende Berechnungen mit dem hygrothermischen Softwaretool WUFI®-Plus [77] durchgeführt, um die Feuchtepufferwirkung unter gleichen Randbedingungen von verschiedenen Materialien aufzeigen zu können.

Untersucht werden im Zuge dieser Arbeit unterschiedliche Materialien, zum Teil mit verschiedenen Anstrichen. Als Wandmaterial werden neben einer Gipskartonplatte, zwei Kalkputze mit unterschiedlichen Oberflächenausbildungen, Lehmputz und Fliesen untersucht. Die eingesetzten Oberflächenbeschichtungen eines Kalkputzes sind Kalkglätte, Silikatfarbe, Dispersionsfarbe und gestrichene Raufasertapete.

Labortechnische Kennwerte

Als Grundlage werden zunächst die wichtigsten hygrothermischen Materialkennwerte im Labor ermittelt; diese dienen der besseren Charakterisierung der einzelnen Materialien. Das Feuchtepufferverhalten hängt unter anderem von der Sorptionsfähigkeit und der Diffusionsoffenheit der Materialien ab. Diese Eigenschaften werden durch die Sorptionsisotherme und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gekennzeichnet.

Laborversuch zum Sorptionsverhalten

Wesentlich für die Beurteilung des Feuchtepufferverhaltens ist die Verwendung geeigneter Materialkennwerte. Dabei ist der so genannte Moisture-Buffer-Value (MBV) [95] ein bereits weit verbreiteter Kennwert. Dieser gibt an, wie viel Feuchtigkeit bezogen auf die Änderung der Luftfeuchte und die Fläche aufgenommen wird. Zur Bestimmung dieses Kennwertes wird das Material einer periodisch wechselnden Luftfeuchte mit 16 h bei 33 % und 8 h bei 75 % ausgesetzt. Die Feuchtepufferwirkung eines Materials hängt neben dessen Sorptivität maßgeblich von seiner Diffusionsoffenheit ab. Aus diesem Grund wirkt sich die Dauer der Feuchtebelastung wesentlich auf die erzielten Aufnahmemengen aus.

Für die Beschreibung des Feuchtepuffervermögens eines Materials ist es deshalb erforderlich, eine Testprozedur zu entwickeln, die einem typischen realistischen Tagesgang der Feuchtebelastung nahe kommt. Am Morgen entsteht z.B.

durch das Duschen eine sehr hohe Feuchtebelastung. Während des Tages wird dagegen nur wenig Wasserdampf produziert, z. B. durch Pflanzen, Haustiere und anwesende Personen. Die Luftfeuchte im Raum sinkt. Gegen Abend erhöht sich die Feuchteproduktion erneut durch Kochen, Waschen oder ähnliche Tätigkeiten, bevor sie nachts wieder geringer wird.

Diese Vorgänge werden durch einen Feuchtezyklus in einem Klimaschrank nachvollzogen. Das idealisierte Profil zeigt Bild 27. Während der meisten Zeit liegt die Feuchtigkeit bei 40 % r. F. Am Morgen wird ein kurzzeitiger hoher Feuchteanstieg auf 90 % r. F. erzeugt und am Abend erfolgt ein etwas länger andauernder Anstieg auf 75 % r. F. Die Temperatur bleibt die ganze Zeit konstant bei 23 °C.

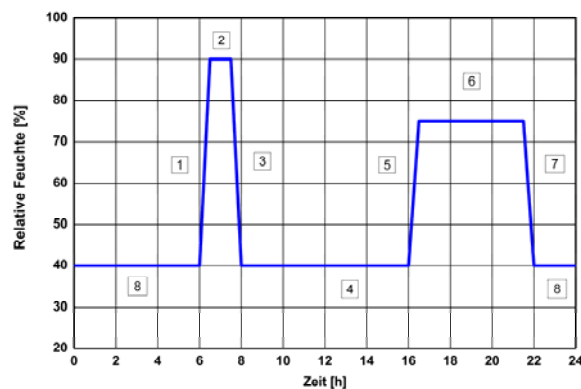


Bild 27:
Idealisierter Verlauf der relativen Feuchte des Test-Zyklus im Klimaschrank.

Für den Versuch werden jeweils drei Proben des gleichen Materials an fünf Seiten mit Aluminiumfolie abgeklebt, um die Sorptionsvorgänge auf die Oberfläche zu beschränken und bei ca. 40 % r. F. vorkonditioniert. Während des Versuches wird kontinuierlich die Gewichtsveränderung der Proben erfasst.

Validierung und Beurteilung des Feuchtepufferverhaltens

Im Anschluss an den Laborversuch bei einem idealisierten Raumklima werden die gemessenen Verläufe mit dem Simulationstool WUFI-Pro nachgerechnet. Diese Berechnungen sollen aufzeigen, dass das Sorptionsverhalten der Materialien rechnerisch abgebildet werden kann. Dies dient dazu, nachfolgend durch den Einsatz des hygrothermischen Raumklimamodells WUFI-Plus die Wirkung der untersuchten Materialien auf das Innenklima in einem realen Raum in Hinblick auf das Feuchtepufferverhalten bewerten zu können, um direkten Einfluss von Oberflächenbeschichtungen bzw. verschiedenen Materialtypen aufzuzeigen.

4.2.3 Ergebnisse

Labortechnische Kennwerte

Bei der Feuchtepufferung spielt die Feuchtespeicherfunktion der Materialien die wesentliche Rolle. Für die Untersuchungen wurden die Sorptionseigenschaften bei verschiedenen Feuchtebereichen und die Diffusionswiderstandszahl im Feucht- und Trockenbereich ermittelt.

Die Sorption wurde bei relativen Feuchten von 50 %, 80 % und 93 % bei einer Temperatur von 23 °C gemessen. Die Ergebnisse der Sorptionsmessungen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Sorptionsmessung wurde jeweils an drei Proben eines Materials durchgeführt und die entsprechenden Mittelwerte sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3:
Sorptionswassergehalte der untersuchten Materialien.

Materialbezeichnung	23 °C/50 % r.F. [kg/m ³]	23 °C/80 % r.F. [kg/m ³]	23 °C/93 % r.F. [kg/m ³]
Kalkputz gefilzt	6,6	14,9	27,0
Kalkputz + Kalkglätte	5,4	12,5	23,1
Kalkputz + Edelputz	5,3	11,0	23,4
Lehmputz	3,9	8,8	18,0
Kalkputz 2	6,0	8,9	13,4
Gipskarton	1,6	9,5	9,9

Die Wasserdampfdiffusion wird für alle eingesetzten Materialien in Anlehnung an die DIN EN ISO 12572 gemessen. Die ermittelten Messwerte im dry- und wet-cup-Verfahren sind in den

Tabelle 4 und Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 4:

Materialbezeichnung	Dry-cup (23°-3/50%)	wet-cup (23°-3/50%)
Kalkputz gefilzt	8,9	8,5
Kalkputz + Kalkglätte	8,9	9,1
Kalkputz + Edelputz	8,9	8,5
Kalkputz + Kalkglätte	8,9	9,1
Lehmputz	16,1	12,1
Kalkputz + Edelputz	9,2	9,4
Kalkputz 2	5,3	4,9
Lehmputz	16,1	12,1
Gipskarton	7,4	8,3
Kalkputz 2	5,3	4,9
Gipskarton	7,4	8,3

Diffusionswiderstandszahlen der untersuchten Innenbekleidungen.

Tabelle 5:
Wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke der Innenwandfarben bzw. einer Raufasertapete mit Anstrich.

	sd-Wert dry-cup [m]	sd-Wert wet-cup [m]
Silikatfarbe		0,01
Dispersionsfarbe		0,01
Raufasertapete mit Dispersions- farbe	0,02	

Messergebnisse des Laborversuchs zum Sorptionsverhalten

Die Messung des Sorptionsverhaltens wurde an verschiedenen Putzen und Putzen mit unterschiedlicher Oberflächenbeschichtung sowie an handelsüblichen Fliesen durchgeführt. Die untersuchten Materialien und die jeweilige Materialdicke sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6:
Untersuchte Materialien

Material	Dicke [mm]
Kalkputz mit gefilterter Oberfläche	12
Kalkputz mit Kalkglätte	11
Kalkputz mit Kalkglätte und Anstrich mit Silikatfarbe	11
Kalkputz mit Kalkglätte und Raufasertapete mit Dispersionsfarbanstrich	12
Kalkputz mit strukturiertem Edelputz	13,5
Kalkputz mit gefilterter Oberfläche und Anstrich mit Silikatfarbe	11
Lehmputz	20
Kalkputz mit erhöhtem Anteil an Luftporen	20
Gipskarton	12,5
Fliesen (10x10 cm ²) inkl. Fugenteil	7

Alle Probenmaterialien wurden vor den Untersuchungen bei einem Klima von 23 °C und ca. 40 % r. F. vorkonditioniert, um gleiche Ausgangssituationen zu schaffen. Für die Versuchsphase werden jeweils drei Proben für eine Woche im Klimaschrank gelagert und der Feuchtezyklus wird täglich wiederholt. In Bild 28 ist der zeitliche Verlauf des Klimas während des Versuchs und die Gewichtsänderung der Materialproben des gefilterten Kalkputzes exemplarisch dargestellt.

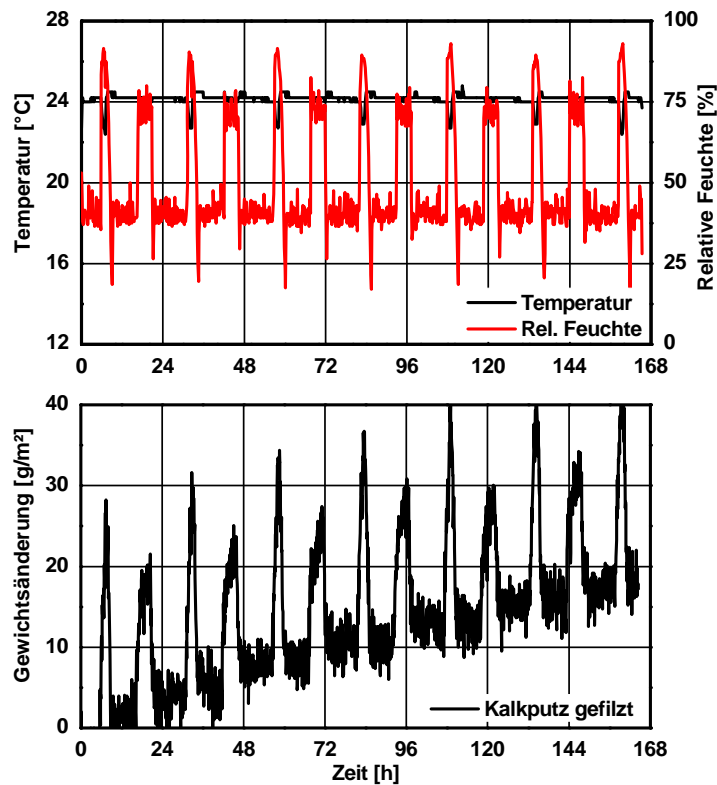


Bild 28:
oben: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte im Klimaschrank während des Sorptionsversuchs vom gefilzten Kalkputz.

unten: Zeitlicher Verlauf der mittleren Gewichtsänderung des gefilzten Kalkputzes.

Nachfolgenden sind in Bild 29 bis Bild 38 die Verläufe der Gewichtsänderung der einzelnen Prüfmaterialien über einen Zeitraum von 24 Stunden dargestellt, wobei jeweils der 5. Tag des Messzeitraums ausgewertet wurde. Die Messkurve stellt die Mittelwertskurve der drei Materialproben eines Materials dar. Die rote Linie ist eine geglättete Funktionslinie der Messkurve, um kurzfristige Schwankungen auszugleichen. Die in Bild 29 zu erkennenden kurzfristigen Schwankungen des Gewichtsverlaufes sind in der Qualität der Klimaregelung begründet.

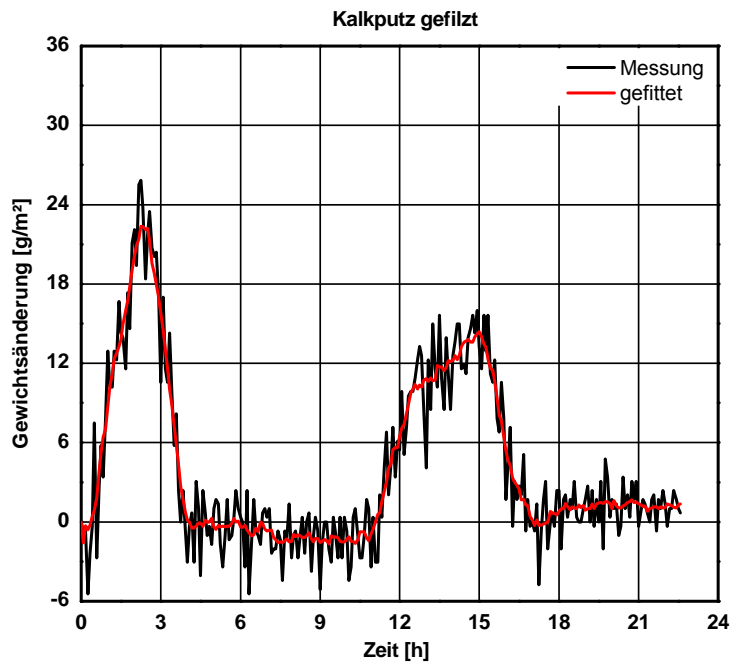


Bild 29:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einem Kalkputz mit Kalkglätte.

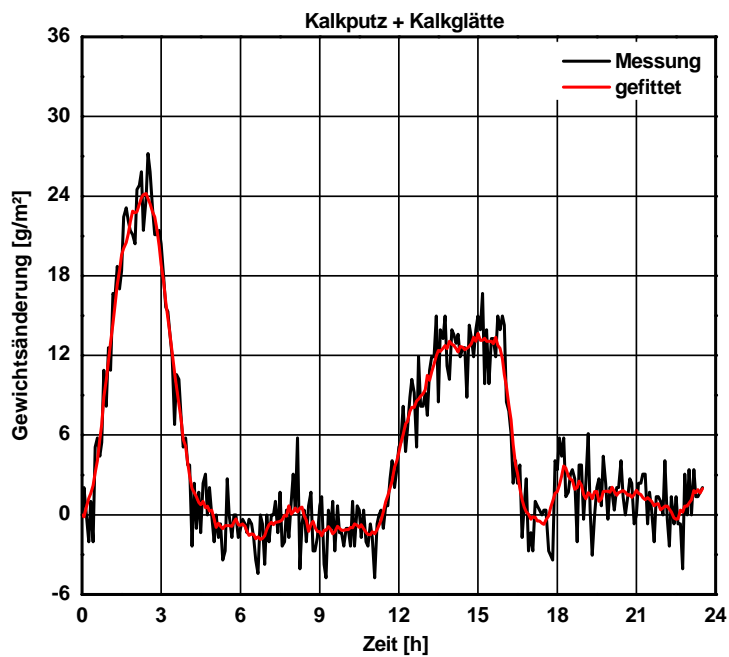


Bild 30:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einem Kalkputz mit Kalkglätte.

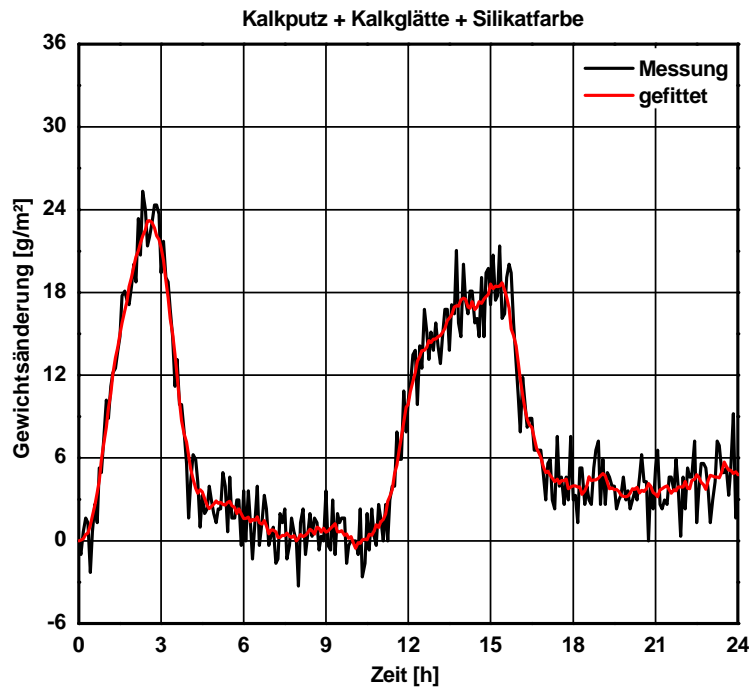


Bild 31:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einem Kalkputz mit Kalkglätte und einem Anstrich mit Silikatfarbe.

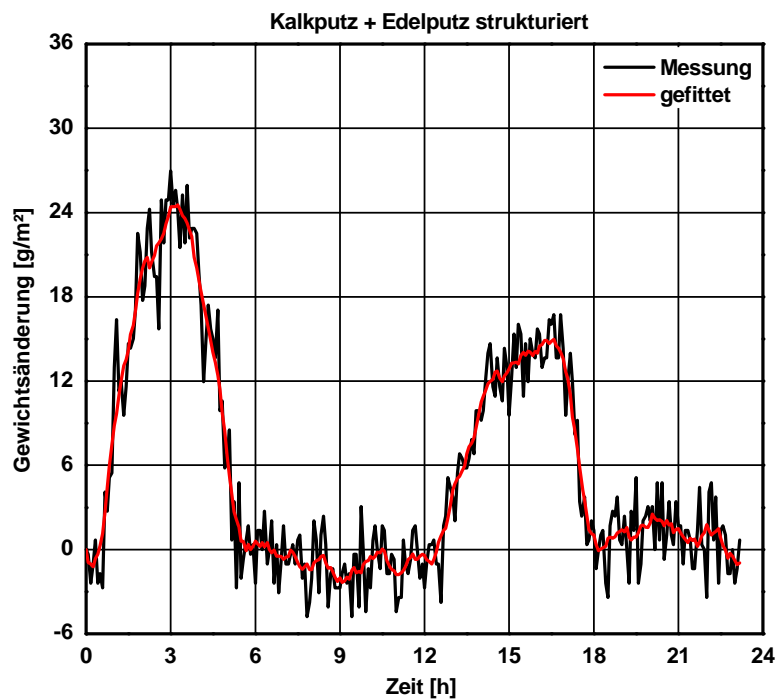


Bild 32:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einem Kalkputz mit strukturiertem Edelputz.

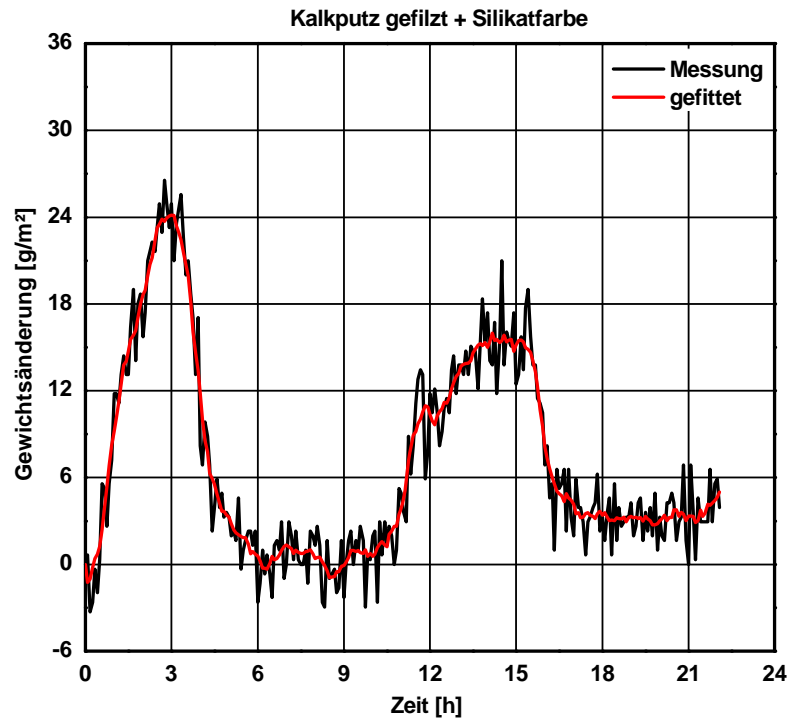


Bild 33:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einem Kalkputz mit gefilterter Oberfläche und Silikatfarbanstrich.

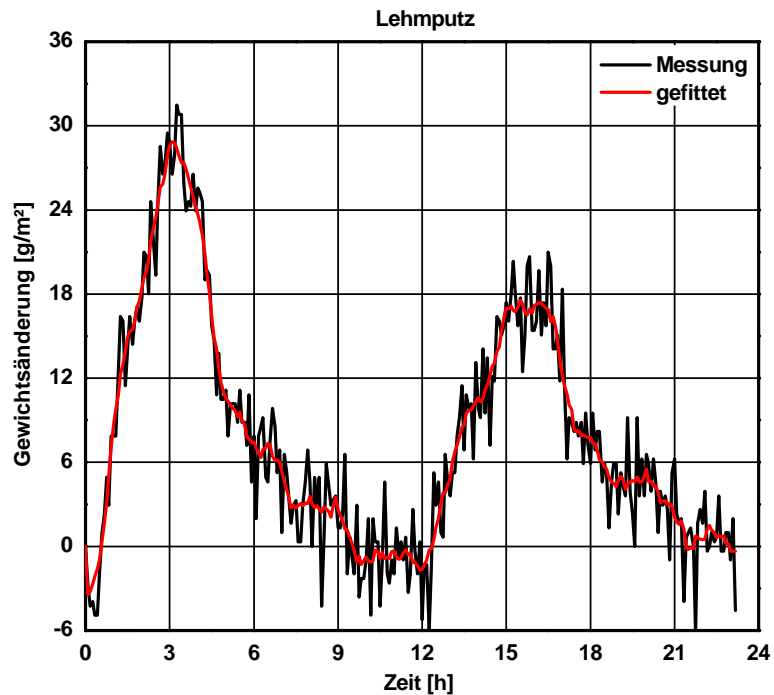


Bild 34:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einem Lehmputz.

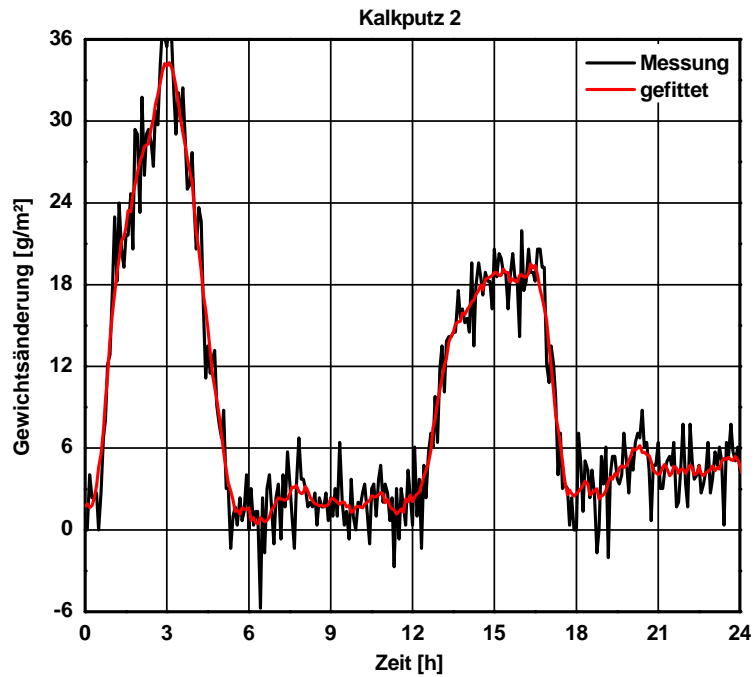


Bild 35:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einem Kalkputz mit erhöhtem Anteil an Luftporen.

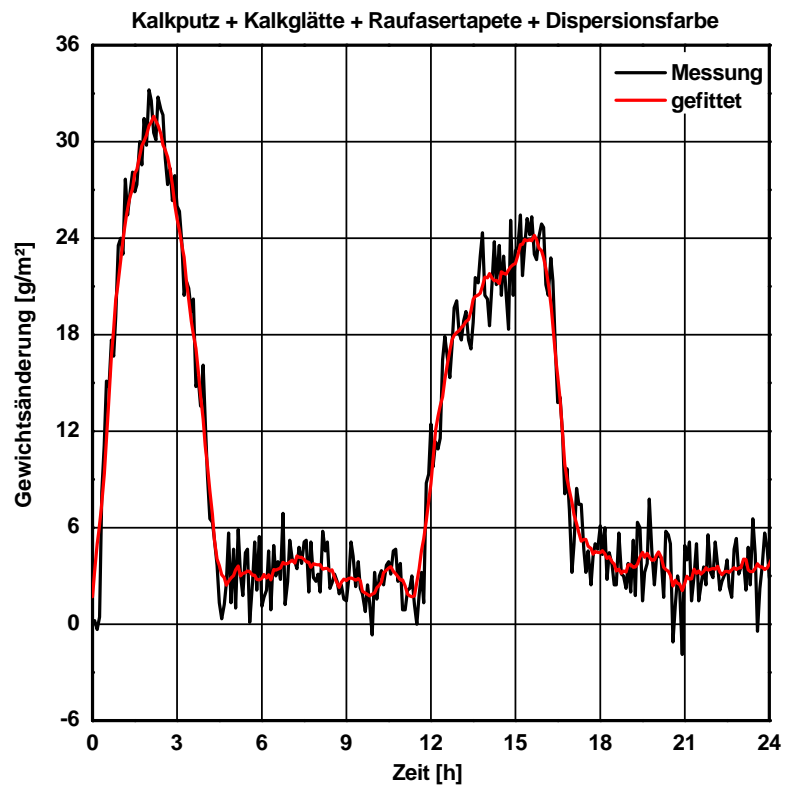


Bild 36:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einem Kalkputz mit Kalkglätte und einer gestrichenen Raufasertapete mit Dispersionsfarbe.

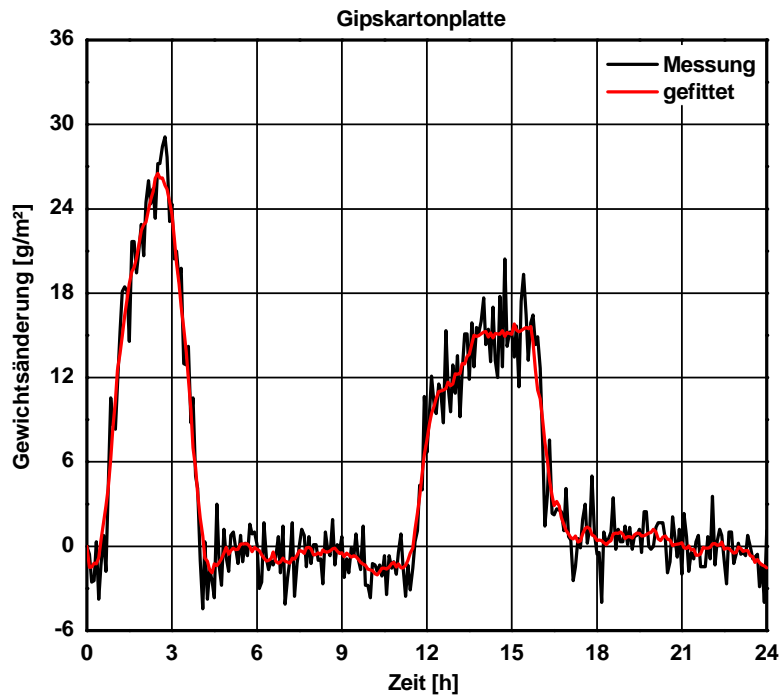


Bild 37:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von einer Gipskartonplatte.

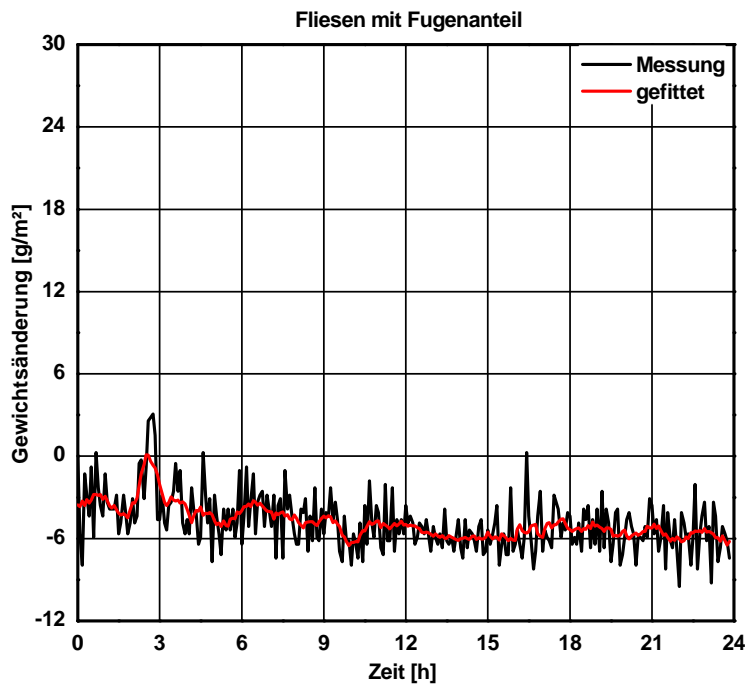


Bild 38:
Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zyklus von Fliesen mit Fugenanteil.

Tabelle 7:
 Auflistung der Gewichtsänderung während den Befeuchtungsphasen

Material	morgens [g/m ²]	abends [g/m ²]
Kalkputz gefilzt	22	14
Kalkputz mit Kalkglätte	24	13
Kalkputz mit Kalkglätte und Anstrich mit Silikatfarbe	23	18
Kalkputz mit Kalkglätte und Raufasertapete mit Dispersionsfarbanstrich	32	24
Kalkputz mit strukturiertem Edelputz	24	15
Kalkputz mit gefilterter Oberfläche und Anstrich mit Silikatfarbe	24	16
Lehmputz	28	18
Kalkputz mit erhöhtem Anteil an Luftporen	34	19
Gipskarton	26	15
Fliesen (10x10 cm ²) inkl. Fugenanteil	nicht messbar	nicht messbar

Die Vergleiche der Sorptionskurven zeigen bei den verschiedenen Oberflächenbeschichtungen bzw. -behandlungen deutliche Unterschiede. Anhand der Verläufe in Bild 29 und Bild 30 ist zu erkennen, dass kein wesentlicher Einfluss der Oberflächenbehandlung (gefilzt) zu einer Kalkglätte festgestellt werden kann. Sobald der gefilterte Kalkputz (Bild 29) mit einem Edelputz (Bild 32) beschichtet wird, verändert sich die Sorptionsfähigkeit während der nachmittäglichen, länger andauernden Feuchtebelastung. Hier kommt es im Vergleich zu Bild 29 und Bild 30 zu einer etwas höheren Feuchtaufnahme. Durch den Einsatz einer Silikatfarbe kommt es im Vergleich zwischen Bild 30 und Bild 31 sowie den Bild 29 und Bild 33 ebenfalls zu einer etwas erhöhten Feuchtaufnahme bei der längeranhaltenden Befeuchtung im Klimaraum, dies kann mit der Sorptionsfähigkeit der Silikatfarbe zusammenhängen.

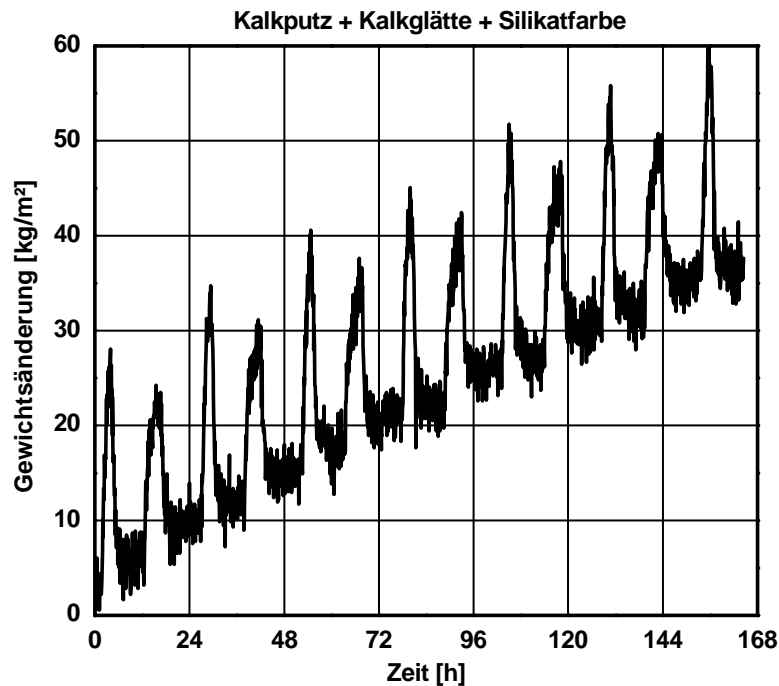


Bild 39:
Verlauf der Gewichtsänderung bei einem Kalkputz mit Kalkglätte und Silikatfarbanstrich.

In Bild 39 ist Gewichtsveränderung der Materialprobe eines Kalkputzes mit Kalkglätte und Silikatfarbanstrich dargestellt. Auffällig beim Einsatz einer Silikatfarbe ist, dass das Erreichen eines Gleichgewichtverhaltens durch die Befeuchtungszyklen wesentlich länger dauert, als ohne Farbanstrich.

Stark beeinflusst wird die Sorptionsfähigkeit auch durch den Einsatz einer Raufasertapete mit Dispersionsfarbanstrich. Trotz der eingesetzten Dispersionsfarbe zeigt sich, dass die Sorption während den beiden Befeuchtungsphasen deutlich zunimmt. Dieses Verhalten kann durch die guten Sorptionseigenschaften der Holzspäne und der Zellulosefasern in der Tapete erklärt werden.

Einen deutlichen Unterschied gibt es zwischen den beiden eingesetzten Kalkputzen. Hier zeigt sich durch den Vergleich von Bild 29 und Bild 35, dass der Kalkputz 2 trotz niedriger Sorptionskennwerte bei 80 % und 93 % relativer Luftfeuchte eine höhere Feuchtaufnahme während den Befeuchtungsphasen aufweist als der untersuchte Kalkputz mit gefilterter Oberfläche. Der Lehmputz weist, wie in Bild 34 ersichtlich ein anderes Verhalten auf als die untersuchten Kalkputze mit und ohne Oberflächenbeschichtung. Die Feuchtaufnahme während den Befeuchtungsphasen ist etwas ausgeprägter und während der Desorption zeigt sich ein gänzlich anderer Verlauf. Sobald die Raumfeuchte auf ein niedriges Level heruntergefahren wird, desorbiert der Lehmputz anfänglich ebenfalls schnell, aber nach ca. zwei Stunden verlangsamt sich die Gewichtsabgabe des Lehmputzes deutlich. Eine Eigenschaft, die bei keinem der anderen betrachteten Materialien bzw. –kombinationen aufgetreten ist. Eine Ursache des ausgeprägteren Sorptionsverhalten liegt bei dem Kalkputz 2 und dem Lehmputz kann an der Materialdicke liegen. Diese beiden Materialien haben eine typische Materialdicke von 2 cm und sind somit doppelt so dick wie der her-

kömmliche Kalkputz oder die Gipskartonplatte, was zu einer erhöhten Feuchteaufnahme-fähigkeit beiträgt.

Ein sehr typisches und ähnliches Sorptionsverhalten wie die Kalkputzkombinationen weist die untersuchte Gipskartonplatte auf. Bei diesem Material sind das Absorptions- und das Desorptionsverhalten nur etwas ausgeprägter als bei den Kalkputzen.

Abschließend wird das Sorptionsverhalten von Fliesen mit Fugenanteil noch betrachtet. Wie erwartet, zeigt sich bei dieser Materialkombination nahezu keine Sorption während den Befeuchtungsphasen. Da dieses Material in Hinblick auf das Sorptionsverhalten nicht aussagekräftig ist, wird es bei der weiteren Bewertung herausgenommen.

Berechnung mittels hygrothermischen Simulationstools

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit und Vergleichbarkeit der ermittelten Verläufe der Änderung des Wassergehaltes in den Materialien wird der durchgeführte Laborversuch zunächst mittels einer eindimensionalen hygrothermischen Berechnung mit WUFI-Pro nachgebildet. Durch diese Berechnungen soll untersucht werden, ob das gemessene Sorptionsverhalten der Materialien realistisch abgebildet werden kann. Im Anschluss daran wird mit dem hygrothermischen Simulationstool WUFI-Plus der Einfluss der Materialien auf das Innenraumklima bei einer typischen Nutzung aufgezeigt, um die Feuchtepufferwirkung beurteilen zu können.

Validierungsberechnung mit WUFI-Pro (eindimensional)

Zunächst werden die Materialkennwerte der untersuchten Materialien in das Berechnungsprogramm eingegeben inklusive des vorherrschenden Klimas während des Laborversuchs. Die Berechnungsergebnisse werden dann mit den Messdaten verglichen. Die Ergebnisse der Validierungsberechnungen für die untersuchten Materialien sind nachfolgend exemplarisch für einen Tageszyklus von Bild 40 bis Bild 48 dargestellt.

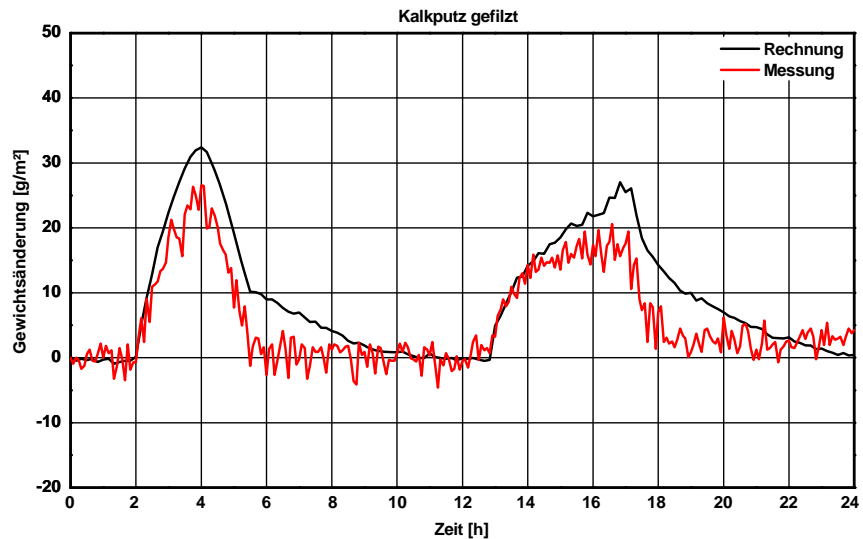


Bild 40:
 Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit gefilterter Oberfläche über einen Zeitraum von 24 Stunden.

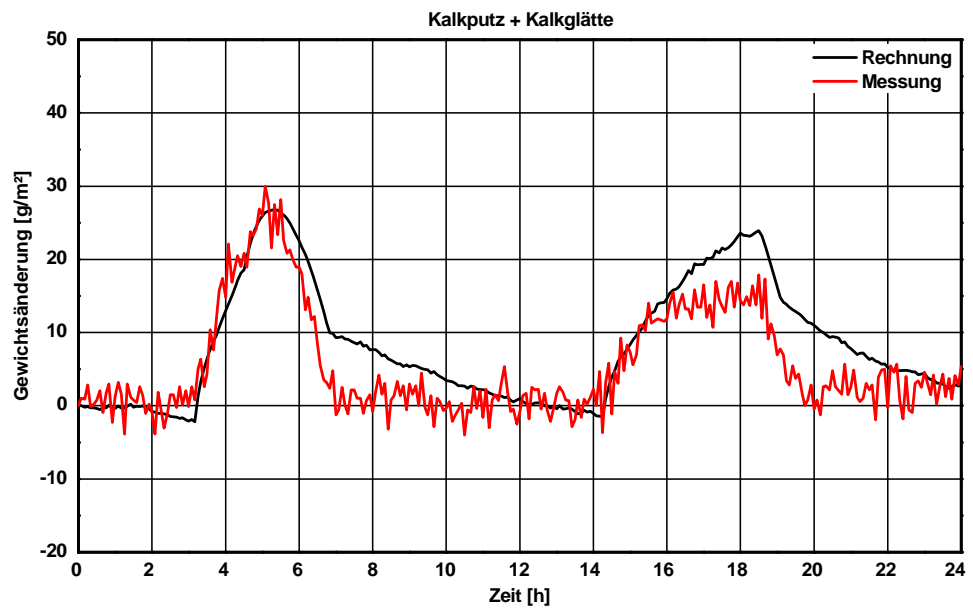


Bild 41:
 : Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkglätte über einen Zeitraum von 24 Stunden.

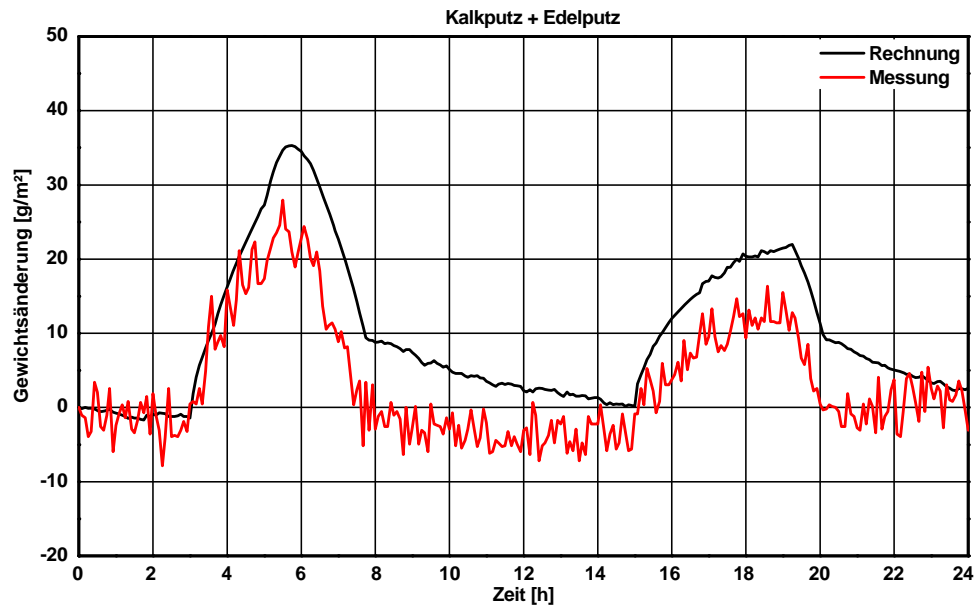


Bild 42:
 Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit Edelputz über einen Zeitraum von 24 Stunden.

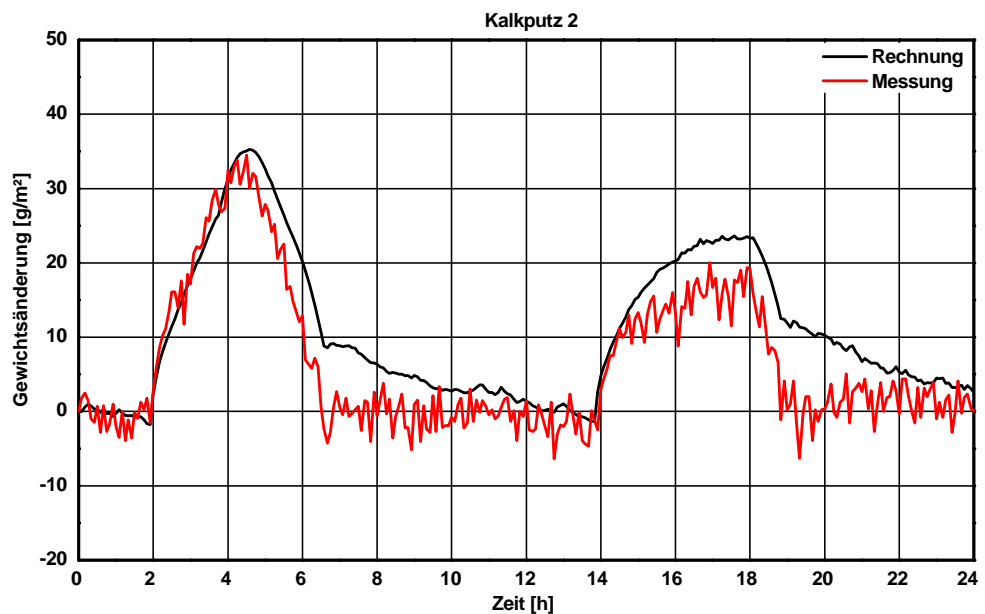


Bild 43:
 Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit erhöhtem Luftporenanteil über einen Zeitraum von 24 Stunden.

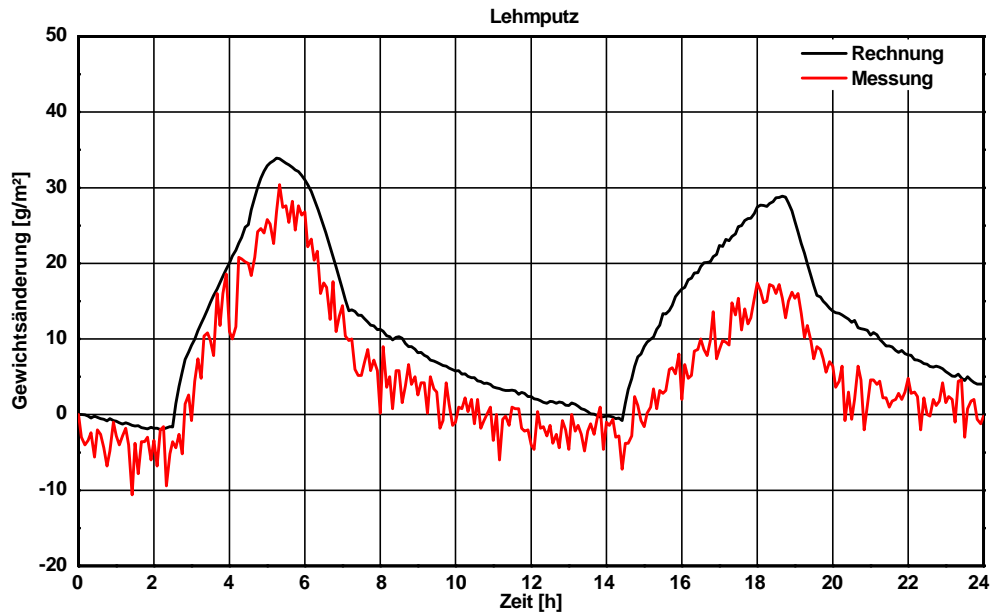


Bild 44:
Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Lehmputz über einen Zeitraum von 24 Stunden.

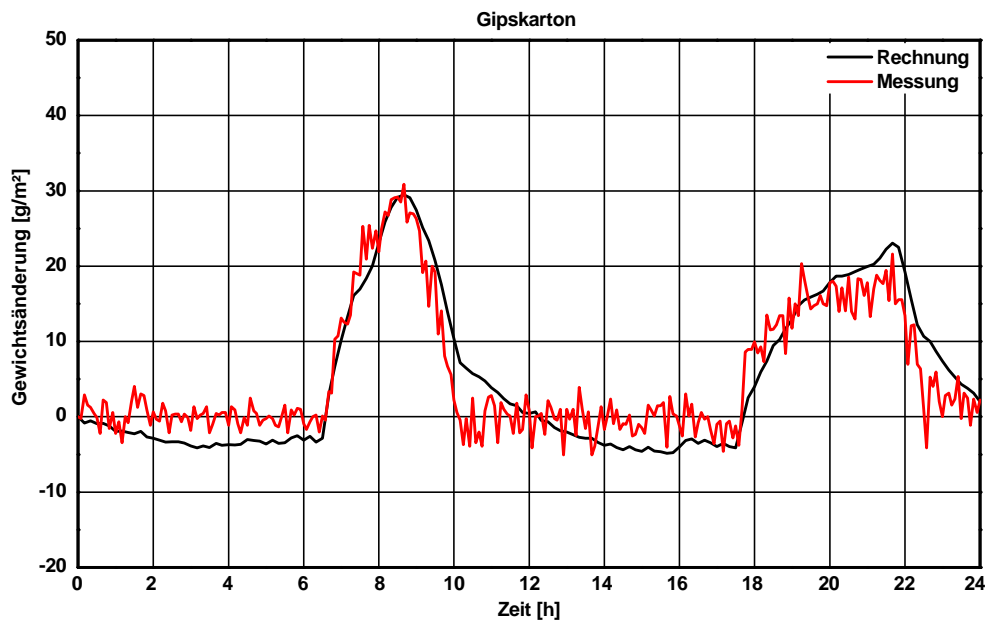


Bild 45:
Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit einer Gipskartonplatte über einen Zeitraum von 24 Stunden.

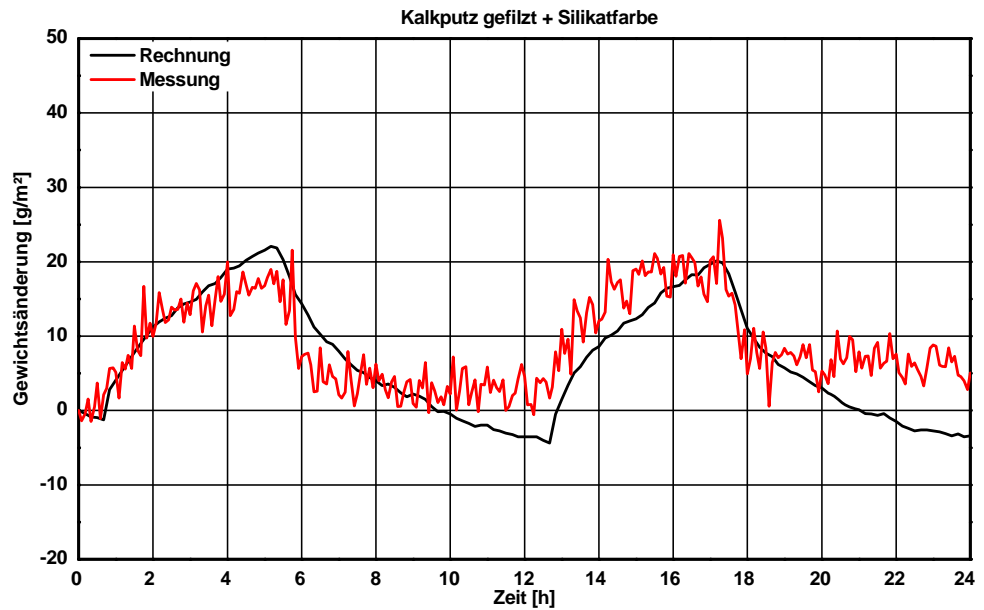


Bild 46:
 Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit gefilterter Oberfläche und Silikatfarbanstrich über einen Zeitraum von 24 Stunden.

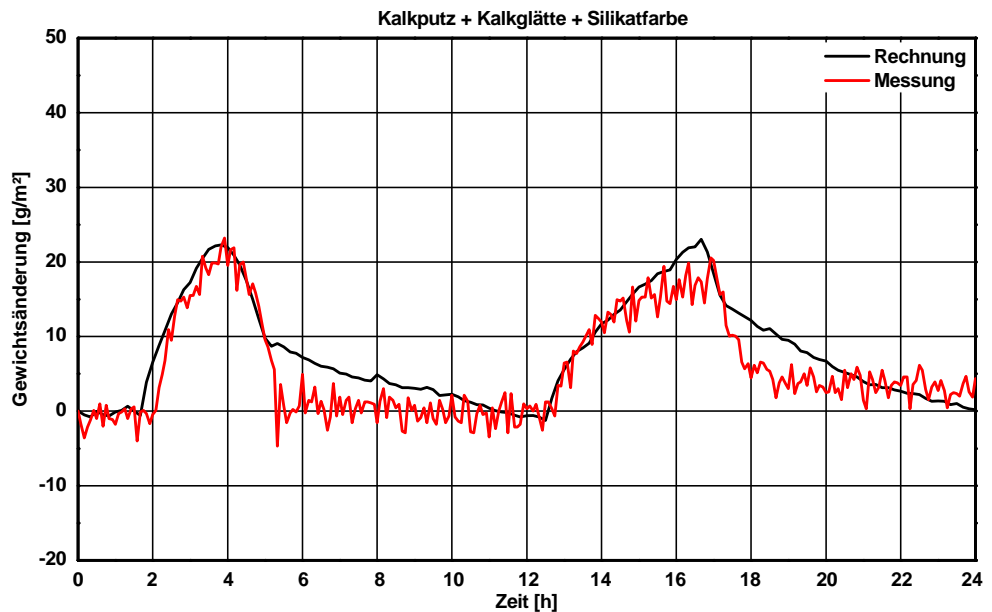


Bild 47:
 Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit Kalkglätte und Silikatfarbanstrich über einen Zeitraum von 24 Stunden.

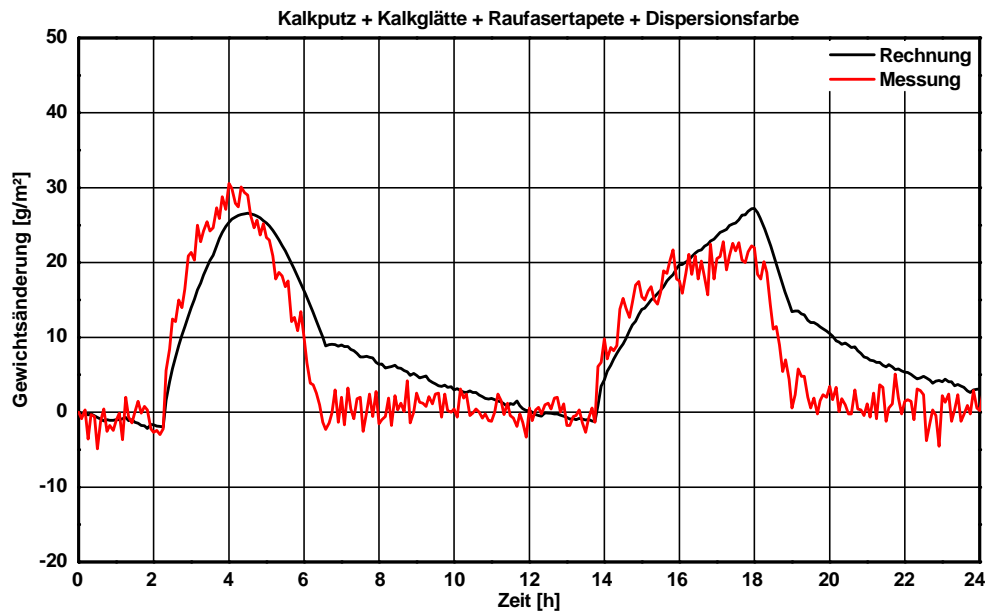


Bild 48:
Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz, Raufasertapete und Dispersionsfarbanstrich über einen Zeitraum von 24 Stunden.

Anhand von Bild 40 bis Bild 45 zeigt sich, dass es mithilfe einer eindimensionalen hydrothermischen Simulationssoftware möglich ist, das Sorptionverhalten von verschiedenen Putzen realistisch nachzubilden. Somit kann anhand der Kenntnisse der Sorptionskennwerte und der Diffusionswiderstandszahlen die Veränderung des Wassergehaltes bei auftretenden Feuchtespitzen an diesen Materialien sinnvoll berechnet werden.

Deutlich schwieriger wird es, wenn auf den Putz eine Farbschicht aufgetragen wird. Bei den Materialproben mit einem Silikatanstrich (Bild 46 und Bild 47) kommt es zu deutlichen Problemen bei der Validierungsberechnung. Die Probleme können dadurch entstehen, dass in dem Berechnungsmodell WUFI-Pro auf die Hystereseffekte bei der Sorption nicht berücksichtigt werden. Die Messungen zeigen, dass die Materialproben mit einem Silikatfarbanstrich während der Versuchsphase kontinuierlich an Gewicht zunehmen, was auf eine Hysterese des Anstriches schließen lässt. Allerdings zeigen die Berechnungen, dass die Differenz der Gewichtsänderung annähernd die gleiche ist, wie während den Messungen. Damit ist es möglich den Einfluss auf die Raumluftfeuchte trotzdem unter Vorbehalt etwa zu bestimmen.

Die Berechnung des Sorptionsverhalten bei einer Kalkputzprobe mit Raufasertapete und einem Dispersionsfarbanstrich gestaltet sich, wie in Bild 48 dargestellt, verhältnismäßig gut, da keine sichtbaren Einflüsse einer ausgeprägten Hysterese des Anstriches auftreten.

Berechnung des Feuchtepufferverhaltens mit WUFI-Plus

Anschließend an diese Validierungsberechnungen wird das Feuchtepufferverhalten der Materialien rechnerisch für einen normal genutzten Innenraum dargestellt und unter realen Klimarandbedingungen untersucht. Die Berechnungen basieren auf einem Raum mit 50 m³ Raumvolumen und einer Wandoberfläche von 47 m². Für die Berechnungen werden die untersuchten Materialien mit den ermittelten Kennwerten als Oberflächenbekleidung mit einer Schichtdicke von 1 cm eingegeben, um einen direkten Vergleich der Wirkungen aufzeigen zu können. Als Randbedingung wird definiert, dass die Innenraumtemperatur konstant bei 20 °C, die Luftwechselrate bei 0,66 h⁻¹ und die tägliche Feuchteproduktion bei 2,4 kg/d liegen. Die eingebrachte Feuchte simuliert ein tägliches Profil, das einer Nutzung eines 3-Personen-Haushaltes bezogen auf die Raumgröße entspricht. Die täglich eingebrachte Feuchtmengemenge ist in Bild 49 abgebildet. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnungen der verwendeten Materialien im Vergleich von Bild 50 bis Bild 53 dargestellt.

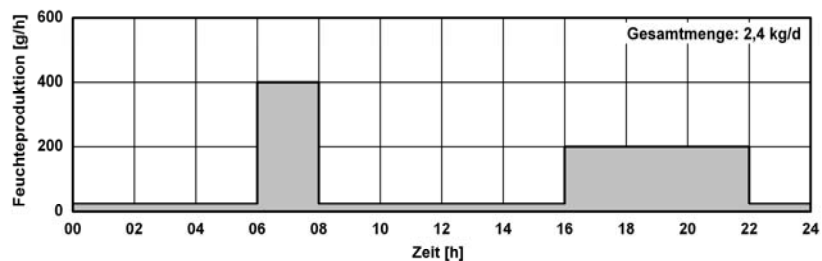


Bild 49:
Täglicher Verlauf der Feuchteproduktion im Versuchsraum.

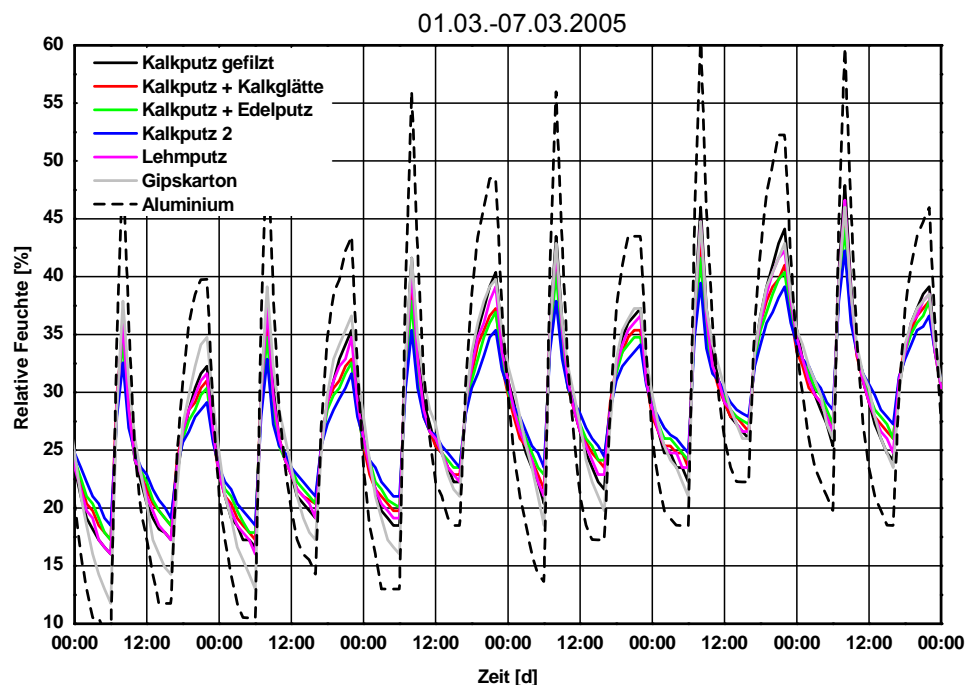


Bild 50:
Zeitlicher Verlauf der Innenraumfeuchte bei Einsatz verschiedener Putze bzw. von Gipskartonplatten.

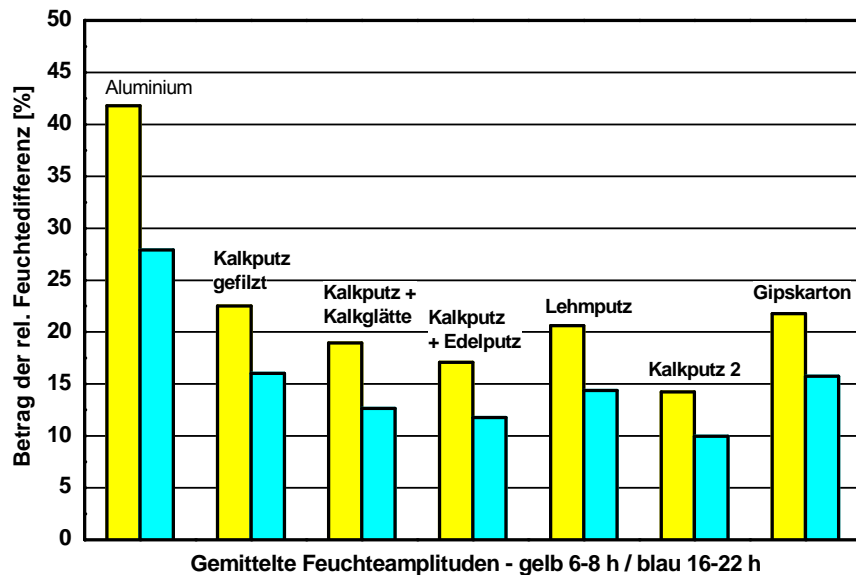


Bild 51: Vergleich der Höhe der Feuchteamplituden während den beiden Befeuchtungsphasen beim Einsatz von verschiedenen Putzen bzw. Gipskartonplatten und im Vergleich dazu mit nicht sorptiver Oberfläche (Aluminium).

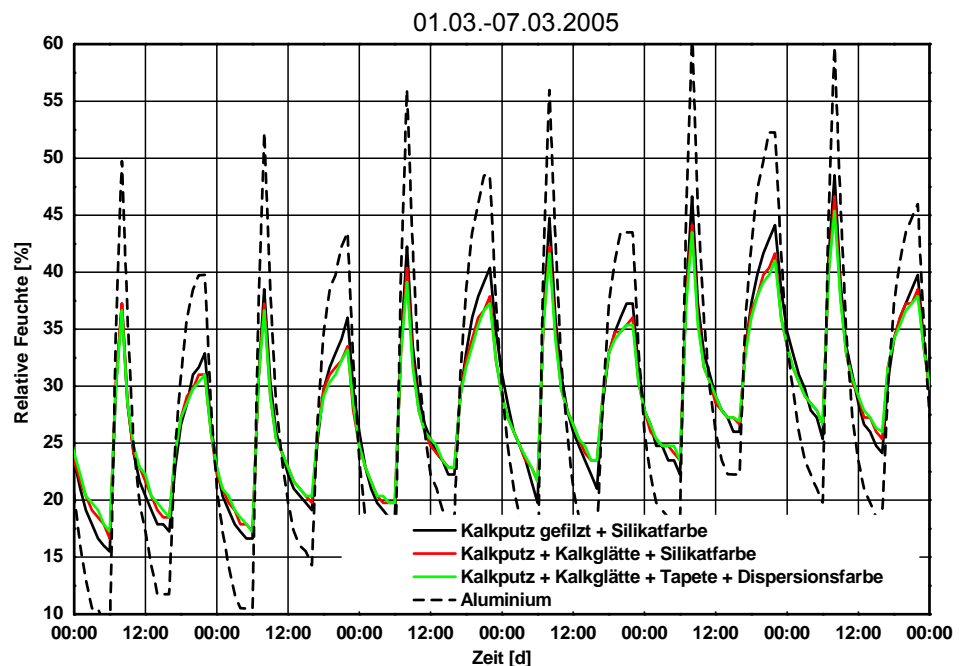


Bild 52: Zeitlicher Verlauf der Innenraumfeuchte bei Kalkputz mit verschiedenen Oberflächenbehandlung und unterschiedlichen Beschichtungen im Vergleich zu einer Aluminiumoberfläche.

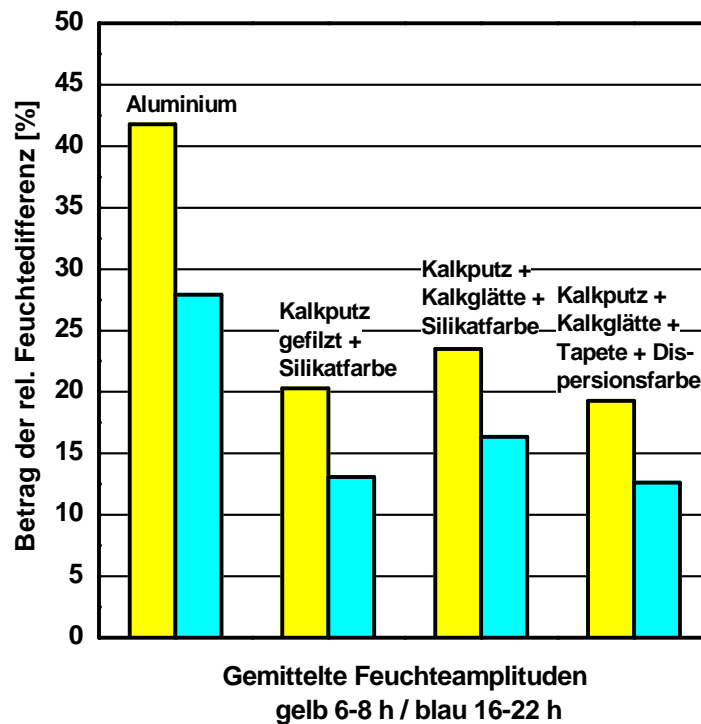


Bild 53:
 Vergleich der Höhe der Feuchteamplituden während den beiden Befeuchtungsphasen beim Einsatz von verschiedenen Putzen mit Anstrichen bzw. Raufasertapete mit Anstrich und im Vergleich dazu mit nicht sorptiver Oberfläche (Aluminium).

Die Berechnungsergebnisse mittels WUFI-Plus spiegeln die unterschiedlichen Puffereigenschaften der Materialien bei der Auswertung der Amplitudenhöhen der Befeuchtungszyklen wider, wie die Ergebnisse des Laborversuches zum Sorptionsverhalten. In Bild 50 und Bild 51 sieht man, dass der Kalkputz 2, der eine hohe Feuchtaufnahme im Laborversuch aufweist, die Feuchtespitzen im Berechnungszeitraum am besten abpuffern kann. Ebenfalls bei der Auswertung der Feuchteamplitudenhöhe der Varianten mit Farbeanstrich bzw. mit Tapete (Bild 52 und Bild 53) zeigt sich, dass z.B. die Materialkombination mit Raufasertapete und Dispersionsanstrich gute Puffereigenschaften aufweist, wie auch im Laborversuch zu sehen ist.

4.2.4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Feuchtepufferverhalten von Materialien wird durch das Zusammenspiel von Feuchtespeicherfunktion, beschrieben durch die Sorptionsisotherme, und Diffusionsoffenheit, beschrieben durch die Diffusionswiderstandszahl, bestimmt. Damit ist zu erwarten, dass sich die Materialien im Bezug auf ihre Feuchtepufferwirkung unterschiedlich verhalten, wenn kurze oder lange Befeuchtungs- bzw. Trocknungszeiten vorliegen. Für eine realistische Beurteilung des Feuchtepufferverhaltens müssen die Materialien deshalb unter praxisnahen Bedingungen getestet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Prüfverfahren, das im Labor angewendet werden kann, eingesetzt. Bei diesem Laborversuch wird näherungsweise ein Tageszyklus der produzierten Feuchte in bewohnten Räumen abgebildet. Es wird ein relativ kurzer starker Anstieg am

Morgen, der das Duschen repräsentiert, und ein längerer mittlerer Anstieg der Feuchte für den Zeitraum am Abend, wenn die ganze Familie daheim ist und kocht oder ähnliches, berücksichtigt. Die Materialien werden diesem Tageszyklus in einem Klimaraum ausgesetzt und ihr Gewicht kontinuierlich erfasst. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen soll aufgezeigt werden, ob der durchgeführte Laborversuch mithilfe von Berechnungsprogrammen realistisch nachgerechnet werden kann. Wobei hier anhand der Kenntnis der Sorptions- und Diffusionswiderstandskennwerte der eingesetzten Materialien das Feuchtepuffer- bzw. -aufnahmeverhalten abgebildet werden soll.

Bei dem Laborversuch zeigt sich, dass die Feuchteaufnahmefähigkeit eines herkömmlichen Kalkputzes mit verschiedenen Oberflächenstrukturen, einem Silikatfarbanstrich oder einem zusätzlichen Edelputzfinish während der kurzzeitigen intensiven und der länger andauernden mittleren Befeuchtungsphase jeweils ein sehr ähnliches Feuchtepufferverhalten aufweist. Durch das Aufbringen einer Raufasertapete mit einem einmaligen Dispersionsanstrich verursacht dagegen eine erhöhte Feuchteaufnahmefähigkeit, was durch die Materialeigenschaften der Tapete (Holzspäne und Zellulosefasern) erklärt werden kann. Zwei weitere Materialien, ein Lehmputz und ein Kalkputz mit erhöhtem Luftporenanteil weisen ebenfalls zu dem herkömmlichen Kalkputz und zu der untersuchten Gipskartonplatte eine deutliche Verbesserung der Feuchtepuffereigenschaften im Laborversuch auf. Die Untersuchung von Fliesen zeigte im Laborversuch, dass es zu keinerlei kurzfristigen Feuchteaufnahme während den Befeuchtungsphasen kommt.

Anschließend an die Untersuchungen des Sorptionsverhaltens im Laborversuch werden die Ergebnisse für Validierungsberechnungen mit WUFI-Pro eingesetzt, um aufzuzeigen, dass das kurzfristige Sorptionsverhalten realistisch abgebildet werden kann. In einem nächsten Schritt werden Berechnungen mit dem hygrothermischen Raumklimamodells WUFI-Plus durchzuführen, um einen direkten Bezug der ermittelten Kennwerte im Laborversuch auf das Feuchtepufferverhalten in einem Innenraum bei definierten Randbedingungen herzustellen.

Bei den Validierungsberechnungen zeigt sich, dass es bei allen Materialien und -kombinationen ist es möglich den Verlauf des Wassergehaltes realistisch abzubilden. Die Berechnungsergebnisse des Feuchtepufferverhaltens mit WUFI-Plus zeigen im Vergleich mit den Laborversuchen die gleichen Ergebnisse. Materialien, die im Laborversuch eine hohe Feuchteaufnahme aufweisen führen in dem Beispielraum zu einer Reduzierung der Feuchtespitzen. In Bild 54 sind die normierten Höhen der Feuchteamplituden bezogen auf den Versuchsraum nur mit Alufolie an den Wänden und der Decke. Die Grafik zeigt auf, um wie viel Prozent das eingebrachte Material die Feuchteamplituden reduziert. Alle Materialien und -kombinationen reduzieren die Feuchtespitzen um mindestens 40 % im Vergleich zu nicht sorptiven Oberflächen. Auffällig hierbei ist, dass der Kalkputz 2 die Feuchtespitzen am besten puffern kann, hier liegt ein Puffervermögen von ca. 65 % vor. Die Farbanstriche bewirken, wie bereits festgestellt keine wesentliche Verschlechterung der Pufferwirkung der unbeschichteten Materialien.

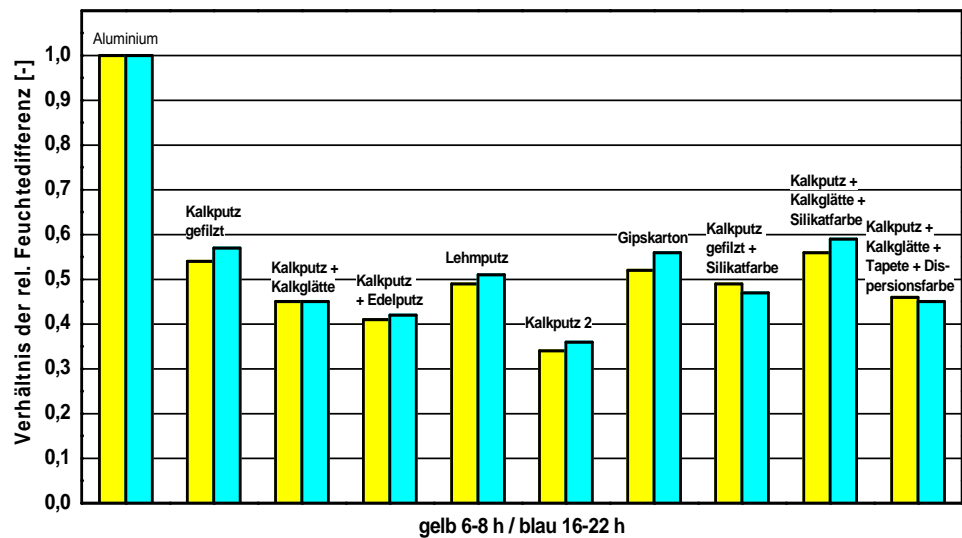


Bild 54:
Vergleich der normierten Feuchteampituden verschiedener Putze zu einer nicht sorptiven Oberfläche (Aluminium).

Anhand der durchgeführten Laborversuche und den Berechnungen in Hinblick auf eine einfache und schnelle Beurteilung der Sorptions- bzw. Feuchtepuffereigenschaften von verschiedenen Materialproben bzw. -kombinationen zeigt sich, dass mit Hilfe eines einfachen Laborversuchs die Feuchtepuffereigenschaften von Materialien beschrieben werden können. Durch die Ermittlung der Sorptionseigenschaften bei auftretenden Feuchtespitzen kann somit ein Hinweis gegeben werden, ob durch die verwendeten Materialien ein deutlicher Einfluss auf das Raumklima zu erwarten ist oder nicht.

Eine Klassifizierung des Feuchtepufferverhaltens anhand der Ergebnisse aus dem Laborversuch ist nach dem aktuellen Stand noch nicht möglich, da hierfür festgelegt werden muss was die Bezugsgröße für die Einteilung darstellen soll und in wie weit bzw. ab wann eine Feuchtepufferung in Räumen zu einem behaglicheren Raumklima führt bzw. auch Schimmelpilzprobleme reduzieren kann. Für eine Klassifizierung der hier ermittelten Sorptionseigenschaften sind somit noch weitere Untersuchungen bzw. Literaturrecherchen bezüglich des Einflusses auf die Behaglichkeit und das Schimmelpilzrisiko notwendig.

Anhand der ermittelten Kenntnisse im Rahmen der hier durchgeführten Arbeit zeigt sich, dass anhand des entwickelten Laborversuchs eine einfache Beurteilung des Sorptionsverhalten von Materialien möglich ist und die Ergebnisse auch auf das reale Feuchtepufferverhalten in Räumen übertragbar sind.

5 Subtask 3: Boundary conditions

5.1 Innenraumklima in deutschen Häusern

Um die grundlegenden Vorgänge und das Verhalten des Innenraumklimas in deutschen Wohnhäusern beurteilen und verstehen zu können werden Untersuchungen in verschiedenen deutschen Wohnhäusern, unterschiedlicher Bauarten durchgeführt. Es wird eine Feldstudie durchgeführt, bei der in mehreren Wohnhäusern die Temperatur- und Feuchteverläufe kontinuierlich gemessen werden, wobei ein Hauptaugenmerk ist, wie das Innenraumklima durch den Anteil von Holz in den Innenräumen beeinflusst wird. Einzelheiten zur Messung und Ergebnisse werden nachfolgend aufgezeigt.

Grundlagen für das Innenraumklima in deutschen Gebäuden

Um das Verhalten des Innenraumklimas in deutschen Wohnungen bzw. Gebäuden zu verstehen ist es notwendig zu wissen wie diese Gebäude funktionieren. Die Temperaturen in Gebäuden werden durch die Konstruktionen selbst mit beeinflusst, durch den möglichen Wärmestrom /-verlust über die Gebäudehülle, durch Energiegewinne bzw. -verluste über den vorhandenen Luftwechsel, durch interne Wärmequellen, wie z. B. Bewohner, elektrische Geräte und die Heizung, sowie im Sommer über die kurzweilige Wärmeeinstrahlung.

Der Wärmestrom über die Gebäudehülle wird bestimmt durch die Temperaturunterschiede zwischen drinnen und draußen, sowie über den U-Wert der Konstruktionen. In Bild 55 ist die Veränderung der U-Werte verschiedener Konstruktionstypen im Wohnungsbaubereich dargestellt.

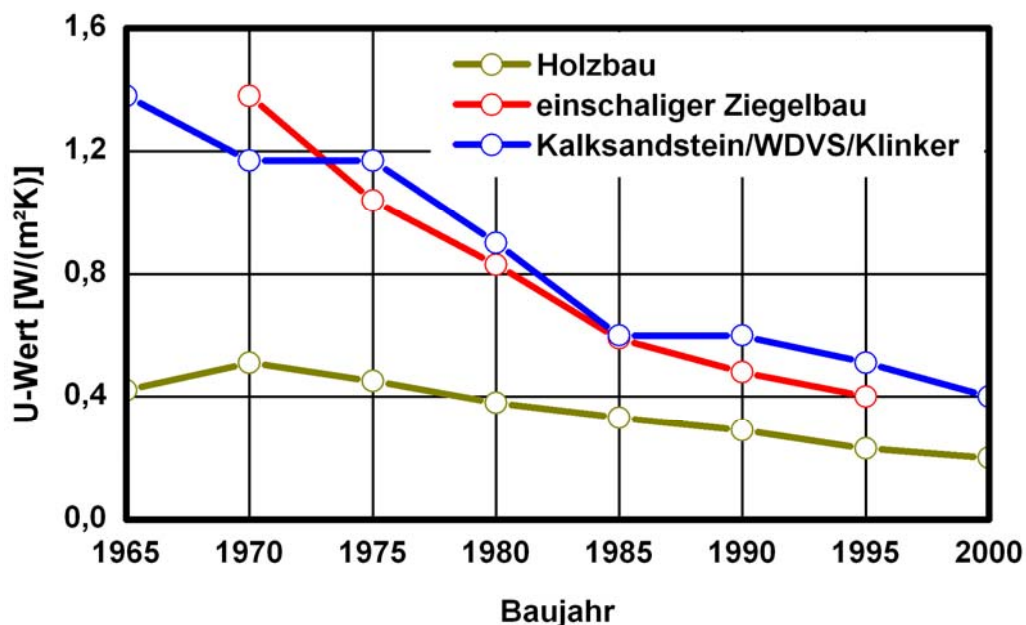


Bild 55:
Entwicklung des Wärmeschutzes von Holztafel-, Ziegel- und Kalksandsteinaußenwänden nach [112].

Interne Wärmequellen sind meistens nur von geringer Bedeutung in Hinblick auf die Innenraumtemperaturen. Allerdings sind in Deutschland sehr viele verschiedene Heizsysteme zu finden, die die Innenraumtemperatur während der Heizsaison deutlich beeinflussen. Von Einzelöfen über Flächenheizungen bis hin zur Zentralheizung existieren verschiedenste Systeme. Einzelöfen sind hauptsächlich in Einfamilien- bzw. Doppelhaushälften zu finden. Mehrfamilienhäuser werden meist über eine Zentralheizung beheizt. Die vorkommenden Lüftungsvarianten werden nachfolgend näher erläutert.

Die Luftwechselrate und die interne Feuchteproduktion durch Bewohner und Pflanzen, sowie die Nutzung des Raumes haben den größten Einfluss auf die Relative Luftfeuchte im Raum, deshalb ist es wichtig das Feuchtepufferverhalten der Raumumschließungsflächen und der Möblierung beurteilen zu können.

Wie in Bild 56 dargestellt ist, werden die meisten Wohngebäude über die manuelle Fensterlüftung der Bewohner gelüftet. Die Art der Lüftung, also zum Beispiel Stoß- oder Dauerlüftung, ist bei der manuellen Lüftung stark von den Nutzern abhängig und wird von ihnen in verschiedenster Weise kombiniert. Hier ist auch ersichtlich, dass der Luftwechsel stark von der Außentemperatur abhängig ist. Umso kälter es außen ist, umso weniger wird gelüftet [50]. Unter diesen Voraussetzungen kann davon ausgegangen werden, dass die absolute Innenraumfeuchte der absoluten Innenraumfeuchte während der Sommermonate entspricht. Während der Wintermonate differiert die absolute Feuchte zwischen innen und außen in Abhängigkeit der Nutzung des Raumes, der internen Feuchteproduktion und dem Lüftungsverhalten des Nutzers in Hinblick auf öffnen und schließen der Fenster. In [75] wird eine absolute Feuchte von 4 g/m^3 für Wohnräume genannt, wenn die Außentemperatur um den Gefrierpunkt liegt.

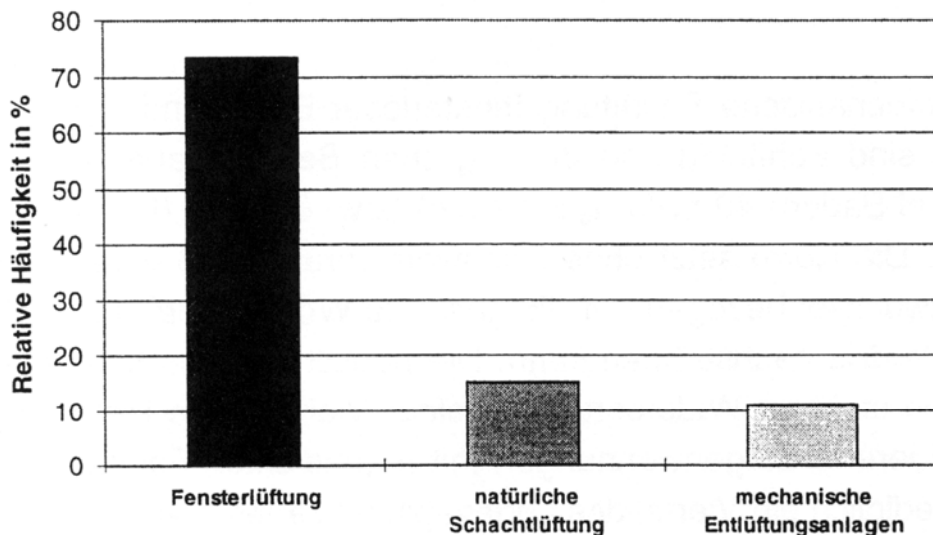


Bild 56: Anteile verschiedener Lüftungsstrategien in Deutschland nach [93].

Gerade in älteren Gebäuden ist der unkontrollierte Luftwechsel durch Undichtigkeiten sehr wichtig. Bild 57 zeigt die Entwicklung der Luftdichtheit über die Angabe der n_{50} -Werte exemplarisch von 52 Holzbauten. Die Luftdichtheit der Gebäude ist über die Jahre deutlich gestiegen, was unter anderem mit den rechtlichen Anforderungen [37] in Deutschland zusammenhängt. Ein Vergleich der Luftdichtheit von Holzrahmenbauten zu Massivbauten ist in Bild 58 dargestellt. Hier zeigt sich, dass Massivbauten wesentlich undichter gebaut werden als Holzrahmenbauten.

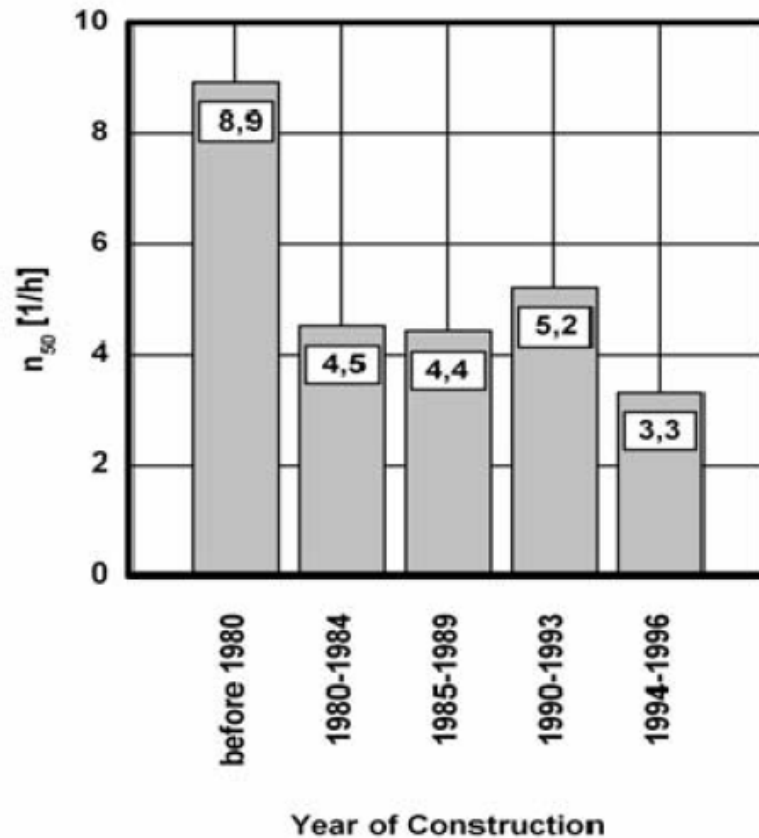


Bild 57:
Entwicklung der Luftdichtheit im Holzbau anhand von 52 Bauten [44].

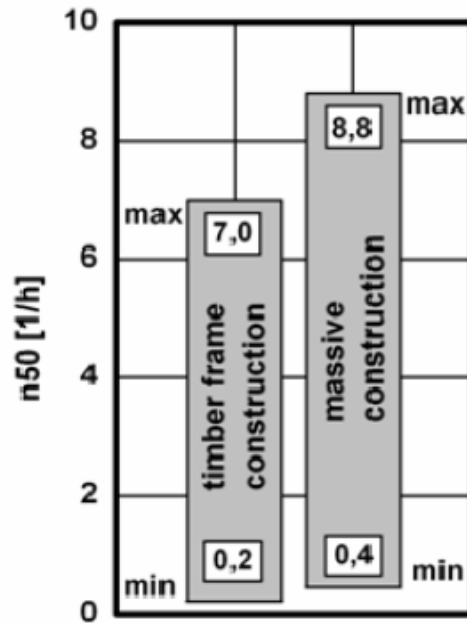


Bild 58:
Vergleich der Luftdichtheit zwischen Holz- und Massivbauweise nach [80].

Die Feuchteproduktion in Gebäuden kann nicht eindeutig definiert werden, hier gibt es wesentliche Unterschiede zwischen den Räumen. In Schlafräumen z. B. ist die Feuchteproduktion während der Nacht am höchsten und untertags am niedrigsten. In Badezimmern und Küchen treten starke Feuchteproduktionspitzen auf, was abhängig von der Benutzung ist. In [Hartmann, Reichel, Richter 3] wird von einer täglichen Feuchteproduktion von 7,8 kg/d in einer 65 m² großen und 2,5 m hohen Wohnung mit drei Bewohnern ausgegangen. Allerdings kann nicht definiert werden, wann es zu einer hohen bzw. niedrigen Feuchteproduktion während des Tages kommt. Die Auswirkungen der Feuchtepitzen hängen sehr stark von der jeweiligen Lüftungs- und Raumsituation während der Produktion der Feuchte ab. Das Feuchteverhalten in Wohnräumen ist abhängig von einer großen Auswahl von Parametern, die alle miteinander interagieren. Es ist notwendig so gut wie möglich zu wissen, wie die Außenrandbedingungen sind, um den Einfluss von Innenraummaterialien auf den Feuchtehaushalt in Räumen definieren zu können. Viele Einflussparameter, wie z.B. die individuelle Feuchteproduktion, Fensterlüftung und unkontrollierter Luftwechsel über Undichtigkeiten werden bei dem Feldversuch nicht gemessen und der Einflüsse auf die Innenraumfeuchte müssen somit abgeschätzt werden.

Vorbereitung der Test

Die Untersuchungen wurden in elf Wohngebäuden durchgeführt. Die Gebäude befinden sich alle in einem Umkreis von maximal 50 Kilometern vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen entfernt, wo auch das Außenklima kontinuierlich aufgezeichnet wird. Die Messaufzeichnungen liefen von Dezember 2002 bis Dezember 2003.

Datenlogger

Für die Messungen werden "Escort-Junior 220" Datenlogger eingesetzt. Diese Logger speichern die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in vorgegebenen Zeitintervallen ab.

Die Temperatur wird durch einen ins Messgerät integrierten NTC-Widerstand gemessen. NTC steht für Halbleiter Temperatursensor mit negativem Temperaturkoeffizienten. Dies bedeutet, dass bei steigender Temperatur der Widerstand des Sensors abnimmt. Ein Messbereich von -22 bis +60 °C kann mit einer Genauigkeit von +/- 0,3 °C abgedeckt werden.

Zur Messung der relativen Feuchte werden kapazitive Feuchtemessfühler verwendet. Bei kapazitiven Sensoren ist auf einem Glassubstrat eine feuchteempfindliche Polymerschicht zwischen 2 Metallelektroden aufgebracht. Durch Wasseraufnahme entsprechend der relativen Luftfeuchtigkeit ändern sich die Dielektrizitätskonstante und damit die Kapazität des Dünnschichtkondensators. Der Messbereich beträgt 0 bis 100 % relativer Feuchte. Die angegebene Messgenauigkeit beträgt +/- 2 % relativer Feuchte, wobei diese in sehr niedrigen oder sehr hohen Luftfeuchtebereichen auf Grund der technischen Voraussetzungen nicht eingehalten werden wird.

Zur Validierung der Datenlogger werden diese vor dem Einsatz auf die Messgenauigkeit hin überprüft. Die Logger werden in verschiedenen Klimakammern gestellt und kontrolliert. Am IBP sind hierfür Klimakammern zur Verfügung, in denen eine relative Luftfeuchte von 50 %, 70 % und 90 % herrscht.

Die oben beschriebenen Datenlogger sind in der Lage, auf einer internen Speichereinheit 8000 Messwertpaare zu speichern. Messwerte werden alle 10 Minuten aufgezeichnet. Dies führt dazu, dass die Logger nach zwei Monaten ausgelesen und neu programmiert werden müssen. Das Auslesen der gespeicherten Messwerte und die Neuprogrammierung erfolgt über ein spezielles, an den Ausleserechner angeschlossenes Interface. Über diese Schnittstelle können alle intern gespeicherten Daten auf den Rechner zur weiteren Bearbeitung und Auswertung übertragen werden. Im Anschluss daran werden die Logger sofort neu programmiert. Deshalb fällt bei der Neuprogrammierung höchstens ein Messwert aus.

Beschreibung der Gebäude

Für die Feldstudie stehen zwölf Messfühler zur Verfügung. Somit muss gut die Wahl der Objekte gut überlegt und selektiert werden. Besonders der Konstruktionsaufbau und die Innenoberflächenmaterialien der Wände waren ein wichtiges Auswahlkriterium für die Untersuchungen.

Das Gebäude selbst beeinflusst das Innenraumklima. Das Baujahr, das Baumaterial und die Luftdichtigkeit des Gebäudes beeinflussen das hygrothermische Verhalten des Gebäudes wesentlich. Aus diesem Grunde wurden mehr Holzrahmenbaugebäude verschiedenen Alters als Massivbauten untersucht. Genauso wichtig wie die Bauart ist der Typ des Gebäudes, ob es sich um ein Ein-

familien-, Doppel- oder Mehrfamilienhaus handelt. All diese Varianten wurden bei der Auswahl der Versuchshäuser berücksichtigt.

Gemessen wird in den Wohnräumen. Eine Differenzierung zwischen den Räumen wurde nicht durchgeführt aufgrund der geringen Messgeräteauswahl. Nur in einem Haus wurde zusätzlich ein Datenlogger im Badezimmer und im Schlafzimmer aufgestellt. Die Temperatur und die relative Feuchte wird in diesen Räumen durch eine Lüftungsanlage und des Weiteren durch die Größe des Raumes und der Innenoberflächenmaterialien beeinflusst. Die ausgewählten Wohnräume weisen eine große Varianz bei dem Raumvolumen, Heizungssystem und Belüftung sowie den Innenraummaterialien auf.

Um den Einfluss der Bewohner aufzeigen zu können wurden Gebäude mit verschieden vielen Bewohnern ausgewählt. Weitere Faktoren wie Haustiere, Aquarien, Pflanzen und andere Feuchteproduzenten müssen mit berücksichtigt werden.

Anhand der großen Streubreite von Bewohnern, Konstruktion, verbauten Materialien und vielen anderen Parametern werden nachfolgend die Gebäude kurz beschrieben.

Beschreibung der betrachteten Wohnräume

Es wurden zehn verschiedene Wohnräume ausgewählt. Wie oben erwähnt wurde auch in einem Bad und einem Schlafzimmer gemessen. Außerdem wurden an einem Haus mit Schimmelpilzproblemen in einer Außenwanddecke zusätzlich die in dieser Ecke vorherrschenden Verhältnisse ermittelt. Nachfolgend werden die einzelnen Häuser, in denen gemessen wurde, kurz beschrieben.

Haus 1 ist ein größeres Einfamilienhaus. Der Mauerwerksbau wird von 5 Erwachsenen bewohnt. Der nach Süden orientierte, aber durch ein großes Vordach sonnengeschützte, Messraum ist ein Wohnzimmer. Die Beheizung erfolgt über einen Kachelofen mit Luftzufuhr außerhalb des Raumes, gelüftet wird manuell nach Bedarf.

Auch Haus 2 wird von 5 Erwachsenen bewohnt. Ein südlicher Glasvorbau mit großer Fensterfläche sorgt für winterliche Energieeinsparung. Der Messraum ist ein kombinierter Wohn- und Essbereich mit Küche. Im Wohnbereich sorgt die bis oben offene und durch eine Galerie abgetrennte Raumgeometrie für ein großes Raumvolumen. Alle Raumumschließungsflächen bestehen ausschließlich aus unbehandeltem Holz, das Haus ist in Holzständerbauweise erstellt. Beheizt wird Haus 2 durch eine Wandheizung und durch einen Kachelofen. Es ist das einzige gemessene Haus mit Lüftungsanlage.

Einen Sonderfall stellt Haus 3 dar. Es handelt sich um die Wohnküche eines Studentenwohnheims. Das Gebäude ist ein Stahlbetonskelettbau mit eingehängten Dämmelementen. Die erhöhten Küchenaktivitäten bei geringem Raumvolumen zeichnen diese Messstelle aus. Die Heizung erfolgt zentral, gelüftet wird manuell nach Bedarf.

Das Mehrfamilienwohnhaus 4 wird von zwei Erwachsenen und einigen Haustieren bewohnt und diese beeinflussen hier die hygrischen Verhältnisse des

Wohnraumes. In diesem nach Westen orientierten Altbauraum des Mauerwerkshauses treten an der Außenwanddecke Schimmelpilzprobleme auf, obwohl sehr regelmäßig stoßgelüftet wird. Die Beheizung erfolgt zentral, wird aber manuell in der Nacht ausgesetzt.

Die Verhältnisse in einem anderen Einfamilienhaus werden bei Haus 5 gemessen. Hier leben eine Erwachsene und drei Kinder. Der Messraum, ein Wohn- und Aufenthaltsraum mit kleiner Kochnische, liegt unter dem Dach. Der sichtbare Dachstuhl besteht aus unbehandeltem Holz, das Gebäude an sich ist aus Mauerwerk erstellt. Die Beheizung erfolgt zentral und gelüftet wird manuell nach Bedarf.

Haus 6 ist ein weiteres Einfamilienhaus in Holzständerbauweise, das von zwei Erwachsenen und zwei Kindern bewohnt wird. Der Essraum, in dem die Verhältnisse aufgezeichnet werden, hat einen offenen Durchgang zur Küche. Der nach Westen orientierte Raum mit gefliestem Boden und sichtbarer, unbehandelter Holzbalkendecke wird durch einen Kachelofen mit Luftzuführung aus dem Raum beheizt. Die Lüftung erfolgt manuell, nach Möglichkeit durch Stoßlüftung.

Ähnlich wie Haus 6 wird das Einfamilienwohnhaus Haus 7 von zwei Erwachsenen und zwei Kindern bewohnt. Auch hier handelt es sich um ein Haus in Holzständerbauweise. Gemessen wurde im nach Süden orientierten Wohn- und Essbereich, der nur durch einen Unterzug von der Küche abgetrennt ist. Somit entsteht ein größeres Raumvolumen. In diesem Raum befindet sich unter anderem ein Kachelofen, durch den der Raum beheizt wird und die sichtbare, unbehandelte Holzbalkendecke und den ebenso unbehandelten Holzdielenboden. Auch hier erfolgt die Lüftung manuell.

Die Bauweise von Haus 8 ist eine Kombination aus dickem Mauerwerk im Untergeschoß und Holzblockbauweise im Obergeschoß. Der reine Wohnraum wird von zwei Erwachsenen und vier Kindern bewohnt. Die Decke besteht aus einer unbehandelten Kirschholzvertäfelung. Auch die Wände sind bis zu zwei Dritteln der Raumhöhe vertäfelt. Durch manuelles Lüften und einen Kachelofen wird das Raumklima geregelt.

Eine ältere Holzblockbaukonstruktion liegt bei Haus 9 vor. Ansonsten ungedämmte und dadurch auch recht undichte Holzblockbohlen umschließen das Einfamilienhaus. Es wird von zwei Erwachsenen bewohnt. Der Messraum ist eine Wohn-Essküche mit Raumumschließungsflächen aus unbehandeltem Holz. Beheizt wird er durch den Holzofen der Küche mit Luftzuführung aus dem Raum. Die Lüftung erfolgt hauptsächlich durch Undichtigkeiten des Gebäudes, ansonsten manuell.

Ein Zweifamilienwohnhaus in Mauerwerksbauweise wird mit Haus 10 gemessen. Bewohnt wird Haus 10 von zwei Erwachsenen, die sich hauptsächlich abends im Messraum, dem Wohnzimmer, aufhalten. Dieser liegt unter dem Dach und wird durch einen Kachelofen und durch Konvektorenheizung beheizt. Gelüftet kann manuell über das Dachfenster werden.

In Haus 11 befinden sich zwei Messstellen. Hier werden zum einen die Verhältnisse im Bad zum anderen die im Schlafzimmer aufgezeichnet. Bewohnt wird

Haus 11 von zwei Erwachsenen. Es handelt sich um ein Reihenhaus in Mauerwerksbauweise. Haus 11 liegt in der Mitte und ist recht schmal, dafür erstreckt sich der Wohnbereich über 4 Etagen. Das Bad ist ein sehr kleiner Raum, in dem bis auf die sichtbare, unbehandelte Holzdachkonstruktion alle Umschließungsflächen gefliest sind. Es wird durch eine Konvektorenheizung beheizt und gelüftet kann nur über ein Dachfenster werden. Das Schlafzimmer mit großem Raumvolumen liegt auch unter dem Dach. Auch hier erfolgt die Beheizung durch die von der versorgten Zentralheizung Konvektoren und die Lüftung wird manuell durch Öffnen des Dachfensters bewerkstelligt.

Außenklimabedingungen

Die äußeren Bedingungen, mit denen die Messwerte in den Häusern ausgewertet werden, werden durch die Wetterstation des Fraunhofer Instituts für Bauphysik aufgezeichnet. Alle Messstellen liegen in einer Entfernung von nicht weiter als 45 km von der Wetterstation. Zur Überprüfung der Werte der Wetterstation mit den wirklichen Bedingungen an den Messstellen wurde beim am zentralsten gelegenen Haus 4 ein weiterer Messfühler im Außenbereich angebracht. Die mit ihm aufgezeichneten Temperaturen und relativen Feuchten stimmen mit ihrer Höhe und mit ihrem zeitlichen Verlauf sehr gut mit den Werten der Wetterstation Holzkirchen überein. Somit erfolgt die weitere Auswertung mit den Werten der Wetterstation.

Das während des Messzeitraumes herrschende Außenklima wird in Bild 59 dargestellt. Der Winter war mit einer Durchschnittstemperatur zwischen Dezember und Februar von $-2,2\text{ °C}$ vergleichsweise normal. Im Sommer herrschten mit einer Durchschnittstemperatur von $19,6\text{ °C}$ zwischen Juni und August recht hohe Temperaturen.

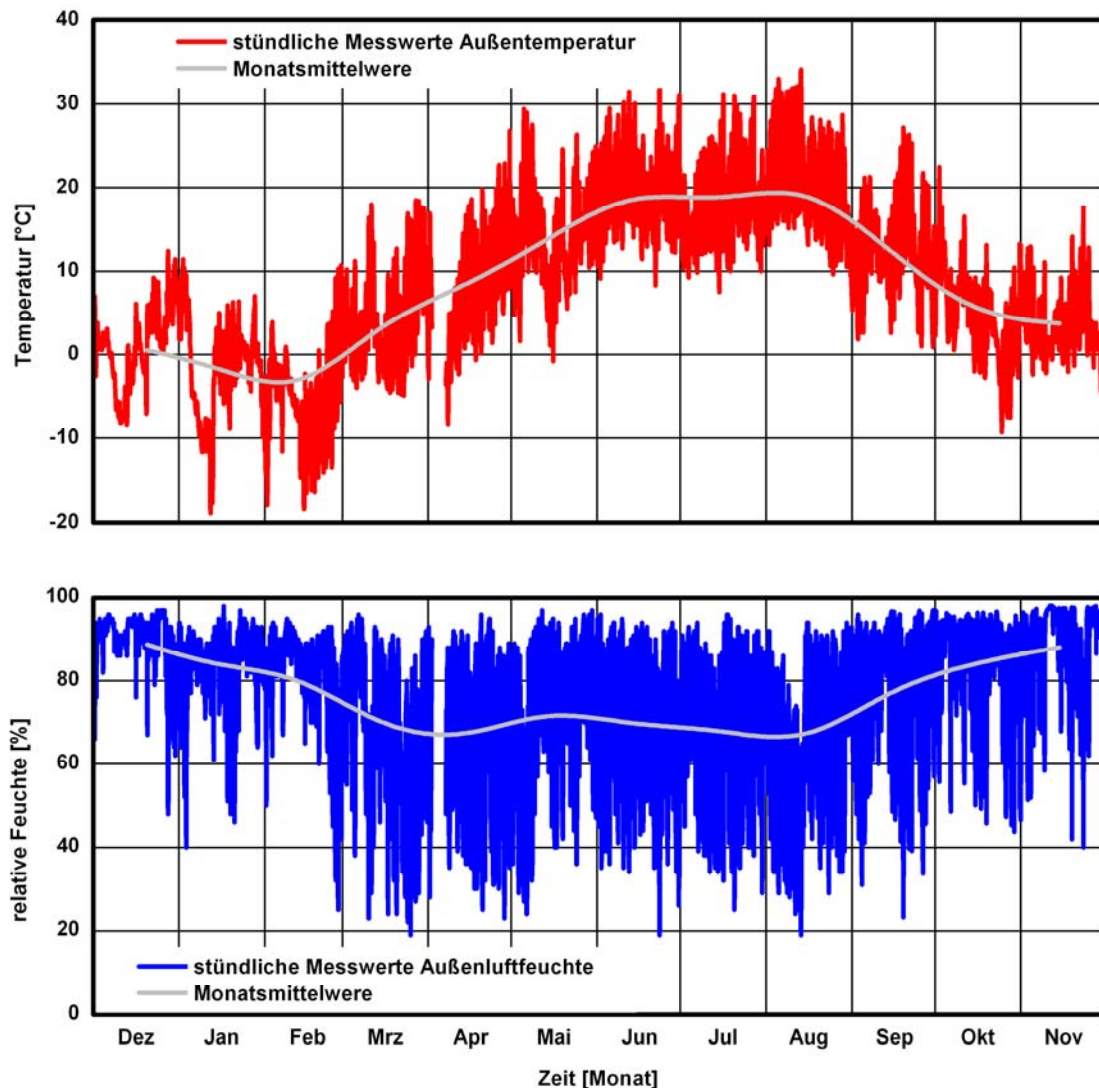


Bild 59:
Außenklimaverlauf im Messzeitraum.

Messergebnisse

Nach der Kalibrierung der Datenlogger wurden diese im November 2002 in den zu untersuchenden Gebäuden installiert und die Messung startete ab Dezember 2002 für eine Laufzeit von einem Jahr.

Beurteilung der Faktoren, die auf das Innenraumklima einwirken

Die folgenden Feststellungen können zusammenfassend aus den aufgezeichneten Messdaten unter Berücksichtigung der Einflussparameter auf das Innenraumklima abgeleitet werden. Anhand der geringen Anzahl von Messstellen können die Aussagen nicht komplett verallgemeinert werden. Aber sie geben einen Überblick über die Einflussfaktoren und deren Interaktion mit der Umgebung.

Die Messergebnisse zeigen, dass die sich einstellenden Innenraumklimaverhältnisse abhängig von den äußeren Beeinflussungsfaktoren in zwei Kategorien aufteilen lassen. Es lassen sich die Verläufe während der Heizperiode von der heizfreien Zeit abgrenzen, wobei die Unterteilung bezüglich der Temperatur mehr Sinn macht als in Hinblick auf die relative Feuchte.

Die Temperatur im Raum wird in der Heizperiode von der Heizung erzeugt. Der Mittelwert der Temperatur ist hauptsächlich von Vorlieben der Nutzer abhängig. Auch beeinflusst die Bauweise und mit ihr die Dämmung den mittleren Wert der Temperatur. Schlechter gedämmte Häuser weisen in der Regel niedrigere mittlere Temperaturen auf, da in ihnen in Zeiten, in denen nicht geheizt wird, die Temperatur weit unter den behaglichen Bereich fällt. Nur in Zeiten der Nutzung der Räume wird die Temperatur auf angenehme Werte erhöht. Auch bei kontinuierlicher Beheizung ist die Temperatur im Mittel bei schlecht gedämmten Häusern niedriger. Hier ist dies auf Energiesparmaßnahmen zurückzuführen. Die mittlere Temperatur in der Heizperiode beträgt zwischen 19 und 23 °C.

Die Schwankung der Temperatur um den Mittelwert in der Heizperiode ist hauptsächlich von der Art der Beheizung, der Dämmung des Gebäudes und den Lüftungsgewohnheiten der Bewohner abhängig. Kontinuierlich beheizte Gebäude weisen grundsätzlich geringe tägliche Schwankungen der Temperatur bis zu 4 °C auf. Hier wirkt sich die Dämmung nicht sehr stark auf den kurzfristigen Temperaturverlauf aus, da permanent Heizungsenergie zugeführt wird. Anders hingegen verhalten sich bedarfsgeheizte Räume. Vor allem bei der Beheizung mit Öfen, die in sehr kurzer Zeit große Energiemengen in den Raum einbringen können, wie zum Beispiel Kachelöfen, kann die Temperatur schnell ansteigen. Bei schlecht wärmeisolierten Gebäuden führt dies zu täglichen Temperaturschwankungen um bis zu 10 °C. Kontinuierliche Lüftung beeinflusst den Temperaturverlauf im Raum kaum, da die weggelüftete Wärmemenge in der gleichen Zeit im Raum produziert wird. Stoßlüftung hingegen kann zu Temperaturabfällen um bis zu 2 °C führen. Bild 60 zeigt die Unterschiede zwischen den täglichen Schwankungen der Höchst- und Tiefstemperaturen im Messzeitraum Februar. Unterschiede zwischen den Konstruktionen und den Heizsystemen sind zu sehen. Holzrahmenbaukonstruktionen oder Räume mit einem großen Dachanteil, der meist aus Holz besteht zeigen niedrigere Maximaltemperaturen auf als Räume mit massiven Steinwänden. Dies resultiert vom höheren Dämmstandard der Holzrahmenbauten im Vergleich zu den Massivbauten. Haus 9 ist eine Ausnahme. Hier handelt es sich um ein altes Massivholzhaus ohne zusätzliche Dämmung. Des Weiteren sind ebenfalls niedrige Temperaturunterschiede bei Gebäuden zu finden, die mit einer Zentralheizung beheizt werden. Trotzdem, dass alle Holzrahmenbaugebäude mit einem Kachelofen ausgestattet sind und teilweise damit beheizt werden weist nur ein Massivhaus, das ebenfalls einen Kachelofen hat starke tägliche Temperaturschwankungen auf.

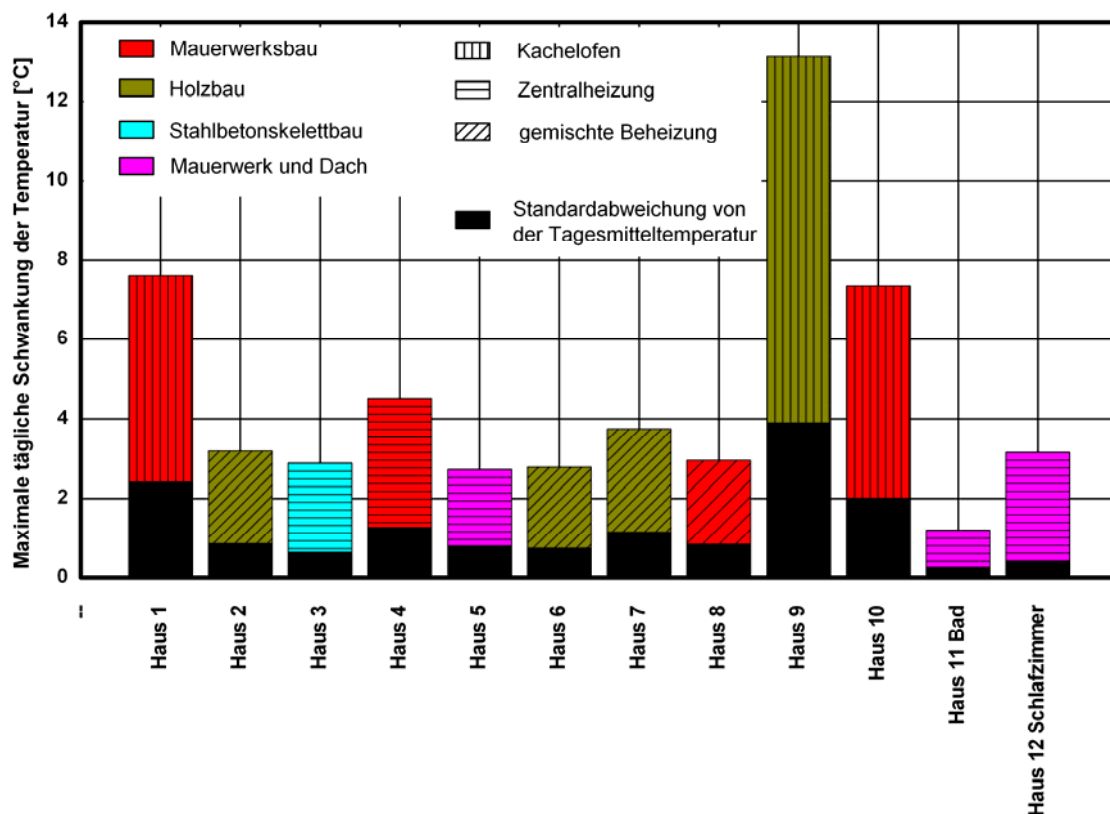


Bild 60:
Mittlere Amplituden der Temperaturen aller Messstellen im Februar.

In Zeiten in denen nicht geheizt wird, nachfolgend Sommer genannt, hängt der Mittelwert der Temperatur vom Mittelwert der Außentemperatur ab. Ab Tagesmittelwerten von 10 °C der Außentemperatur steigt die mittlere tägliche Temperatur innen abhängig von der äußeren kontinuierlich an. Die Höhe des Anstieges und der maximalen mittleren Innentemperatur ist, außer von der Außentemperatur vom Gebäude, also der Bauweise und Dämmung, von der Orientierung und Beschattung des Raumes und von seiner Lage im Gebäude (als Extreme: unter dem Dach oder im Keller) abhängig. Aus den vorliegenden Messwerten ist zu schließen, dass gut beschattete Gebäude wirklich niedrigere Innentemperaturen aufweisen. Südorientierte Räume weisen eine höhere mittlere Temperatur als nordorientierte auf. Räume im Dachgeschoß weisen in der Regel höhere mittlere Temperaturen auf, genauso wie Mauerwerksbauten im Vergleich zu Holzbauten. Allerdings ist festzustellen, dass sich die Temperaturunterschiede mit bis zu 3 °C als nicht gravierend erweisen. Die höchsten mittleren Temperaturen lagen bei den meisten Messstellen im heißen Sommer des Messjahres um die 26 °C.

Auch die Höhe der maximalen täglichen Temperaturschwankungen ist von den oben genannten Faktoren abhängig. In Mauerwerksbauten ist die tägliche Schwankung mit 2 °C noch recht gering. Bei Holzbauten kann sie 3 °C erreichen, in Messräumen unter dem Dach oder bei der Stahlbetonskelettbauweise mit eingehängten Gipskartondämmelementen erreicht sie Werte bis zu 5 °C. Die zeitliche Lage des Temperaturmaximums wird hauptsächlich von der Bau-

weise, aber auch der Orientierung des Raumes beeinflusst. Es sind allerdings keine all zu großen Unterschiede erkennbar. Tägliche Temperaturmaxima werden überall zwischen 16 und 20 Uhr erreicht. Der Tagesverlauf der Temperatur weist im Sommer in allen Messräumen annähernd einen Sinusverlauf auf.

Die relative Feuchte im Raum ist von der innen herrschenden Temperatur und der absoluten Feuchte innen abhängig. Somit wird im Folgenden nur auf die Einflüsse auf die absolute Feuchte innen eingegangen.

Hauptsächlich ist die mittlere innere absolute Feuchte auf Grund der Angleichung durch gewollten und ungewollten Luftwechsel von der absoluten Feuchte außen abhängig. In der Heizperiode, in der der gewollte Luftwechsel mit niedrigerer Außentemperatur abnimmt, wird diese Angleichung hauptsächlich durch ungewollten Luftwechsel hervorgerufen. Somit ist die absolute Feuchte innen in dieser Zeit stark von der Gebäudedichtheit abhängig. Außerdem hat die Nutzung des Raumes, zum Beispiel als Wohnraum, Küche, Abstellraum, Schlafzimmer oder Bad und somit die im Raum produzierte Feuchte großen Einfluss auf die mittlere absolute Feuchte innen. Bei dichten Gebäuden nimmt deshalb die Feuchtelast, also die Differenz zwischen äußerer und innerer absoluter Feuchte, zu. Sie kann bis zu 9 g/m^3 betragen.

Im Sommer und somit in Zeiten höherer absoluter Feuchte außen, gleicht sich die mittlere innere absolute Feuchte auf Grund des erhöhten gewollten Luftwechsels immer mehr der absoluten Feuchte außen an. Ab 9 g/m^3 absoluter Feuchte außen kann die innere absolute Feuchte annähernd als gleich betrachtet werden. Ein weiterer Einfluss auf die mittlere innere absolute Feuchte ist dann nicht mehr feststellbar.

Die kurzfristigen Schwankungen der absoluten Feuchte innen sind in der Heizperiode von der Feuchteproduktion im Raum, dem Raumvolumen, der Lüftung und der Art der Raumumschließungsflächen abhängig. Vor allem in geringvolumigen Gebäuden zeigt sich ein merklicher kurzfristiger Anstieg der absoluten Feuchte innen bei erhöhter Feuchteproduktion. Durch gezieltes Lüften zu diesen Zeiten lässt sich dieser Feuchteanstieg stark vermindern. Bei Räumen mit großem Volumen schwankt die Feuchte im Raum weniger. Die im Raum produzierte Feuchte verteilt sich auf das gesamte Raumvolumen, der Anstieg der Feuchte pro Volumeneinheit fällt somit geringer aus. Raumumschließungsflächen aber auch Interieur aus sorptionsfähigen Materialien sorgen für eine Dämpfung der Feuchtespitzen. Die produzierte Feuchte wird nicht nur von der Luft aufgenommen, sondern auch in den Materialien absorbiert. Somit stehen geringere Mengen Wasser bezogen aufs Volumen zur Erhöhung der Raumluftfeuchte zur Verfügung. Der tageszeitliche Verlauf der absoluten Feuchte innen ist somit schwer vorauszusagen. Er ist hauptsächlich nutzungsabhängig. In verschiedenen Räumen wird zu verschiedenen Zeiten unterschiedlich viel Feuchte in den Raum eingebracht. Auch das individuelle Lüftungsverhalten ist verschieden. Die verschiedenen Einflussfaktoren, die die Feuchte im Raum steuern reagieren alle gleichzeitig in einem komplexen System, aber es lassen sich trotzdem zwei Einflussfaktoren in Hinblick auf die Feuchte darstellen. In Bild 61 sind die Amplituden der Höchsten bzw. Tiefsten gemessenen relativen Feuchten die im Durchschnitt im Februar herrschten dargestellt. Alle Gebäude differieren in der Raumgröße und dem prozentualen Anteil an Holz bezogen auf die Umschließungsflächen.

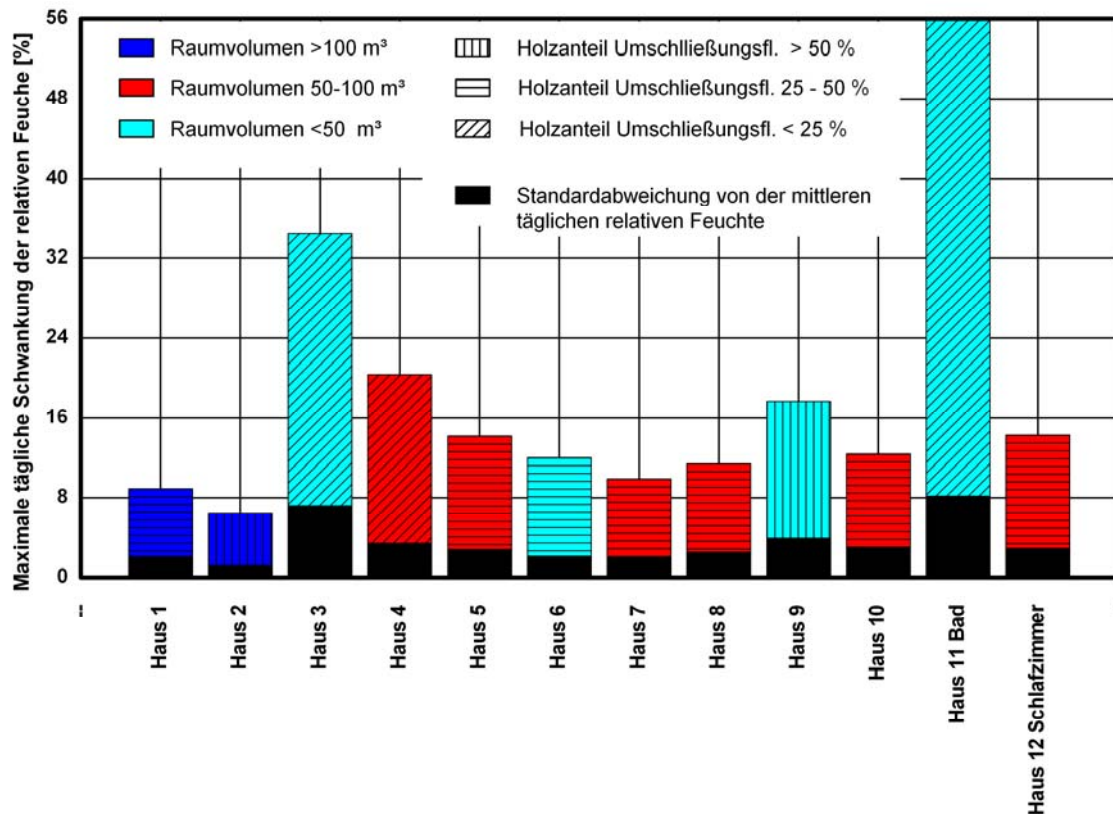


Bild 61:
Mittlere Amplituden der relativen Feuchten aller Messstellen im Februar.

Es zeigt sich, dass Gebäude mit einem großen Raumvolumen geringe Schwankungen der relativen Feuchte aufweisen. Je kleiner der Raum, desto höher sind die Feuchteschwankungen. Bei der Betrachtung von Bild 61 sollte aber berücksichtigt werden, dass es sich bei Haus 3 um eine Gemeinschaftsküche mehrere Studenten handelt und in Haus 11 es sich um ein Badezimmer handelt. Auffällig ist, dass die höchsten Feuchteschwankungen in einem Raum auftreten, der einen Holzanteil der Umschließungsflächen von unter 25 % aufweist. Die geringsten Schwankungen sind in Haus 2 zu finden, in dem aber fast alle Umschließungsflächen aus unbehandeltem Holz bestehen.

Im Sommer werden kurzfristige Schwankungen der absoluten Feuchte nur durch hohe Produktionsraten im Raum erreicht. Diese klingen jedoch durch den hohen Luftwechsel und der damit verbundenen Ablüftung der in den Raum eingebrachten Feuchte schnell wieder ab.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte experimentelle Erfassung von hygrothermischen Verhältnissen zeigt, dass die verschiedenen das Innenklima beeinflussenden Parameter in einer sehr komplexen Weise zusammenspielen. Sie zeigt auch, dass sich verschiedene Haupteinflüsse auf das Innenklima erkennen lassen. Hauptsächlich sind die hygrothermischen Verhältnisse nach Heizperiode, als Winter bezeichnet und nicht Heizperiode, als Sommer bezeichnet, zu trennen. Generelle Aussagen lassen sich sowohl über den langfristigen

mittleren Verlauf als auch über kurzfristige tägliche Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte treffen.

Der langfristige Verlauf der Temperatur wird im Winter hauptsächlich von der Heizung beeinflusst. Diese hält die Temperatur auf einem Mittelwert, welcher von individuellen Gewohnheiten für die jeweilige Nutzung des Raumes als auch von der Bauweise abhängig ist. Im Sommer beeinflusst die Höhe der Außentemperatur die Innentemperatur. Abhängig von Bauweise und Dämmung des Gebäudes, von der Lage des Messraumes im Haus und seiner Orientierung, sowie seiner Beschattung, steigt die Innentemperatur mit steigender Außentemperatur. Der kurzfristige Temperaturverlauf wird im Winter vom Außentemperaturverlauf, der Art der Beheizung und interner Wärmelasten, dem Gebäude und seiner Dämmung, sowie den Lüftungsgewohnheiten dominiert. Da hier vieles nutzerabhängig ist, lassen sich die verschiedenen Einflüsse nur schwer generalisieren. Im Sommer folgt der tageszeitliche Temperaturverlauf meist gedämpft und phasenverschoben dem Verlauf der äußeren Temperatur. Er ist somit abhängig von der Bauweise des Gebäudes und der Lage und Orientierung des Messraumes. Interne Wärmelasten spielen im Sommer kaum eine Rolle.

Der mittlere Verlauf der relativen Feuchte wird im Sommer wie im Winter hauptsächlich vom Verlauf der äußeren absoluten Feuchte und der im Raum herrschenden Temperaturen bestimmt. Sind dies im Sommer, wenn der Luftwechsel hoch ist, die einzigen Haupteinflussparameter, so spielt im Winter auch die Dichtigkeit des Gebäudes, der Luftwechsel und die Raumart, also die Nutzung und Feuchteproduktion im Raum, eine Rolle. Je dichter das Gebäude und somit je geringer der Luftwechsel, aber auch je höher die interne Feuchteproduktion, desto höher liegt die innere absolute Feuchte über der äußeren absoluten Feuchte. Der tageszeitliche Verlauf der relativen Raumluftfeuchte lässt sich kaum verallgemeinern. Er ist im Winter hauptsächlich von der Feuchteproduktion im Raum, dem Raumvolumen, den Lüftungsgewohnheiten und dem Anteil feuchtepuffernder Raumumschließungsflächen beziehungsweise Einrichtungsgegenstände, aber auch dem kurzfristigen Temperaturverlauf abhängig. Bei hohem Raumvolumen oder hohem gleichmäßigem Luftwechsel schwankt die Raumluftfeuchte kaum. Im Sommer wirkt sich auf den tageszeitlichen Luftfeuchteverlauf nur eine hohe Feuchteproduktion im Raum aus. Ansonsten schwankt die Raumluftfeuchte mit der Raumlufttemperatur.

Die ermittelten Ergebnisse bestätigen bisherige Ergebnisse, die in [72] und [98] dargestellt werden. In [72] wird der Einfluss von Holz bzw. Holzwerkstoffen in Hinblick auf die Wirkung auf das Innenraumklima experimentell untersucht und in [98] handelt es sich um numerische Untersuchungen der Feuchtepuffereigenschaften von Holz. Die neuen wie alten Untersuchungsergebnisse zeigen auf, dass der Einfluss von Holz auf die Innenraumfeuchte sehr deutlich ist. Ebenfalls zeigen die neuesten Untersuchungen, dass der Feuchtepuffereffekt von Holz bzw. Holzwerkstoffen auch unter realen Bedingungen und Nutzungen durch Bewohner nachgewiesen werden kann.

5.2 Auswirkungen der Randbedingungen auf die Gesamtgebäudesituation

5.2.1 Auswirkung der Wetterdaten verschiedener Jahre

Das hygrothermische Verhalten der Gebäudehülle beeinflusst die Gesamteffizienz eines Gebäudes. In diesem Abschnitt wird das WUFI-Plus zugrunde liegende Modell angewendet. Es berücksichtigt die Feuchtequellen und -senken in einem Raum, den Kapillartransport in der Gebäudehülle, die Diffusion, die Ad- und Desorption in Abhängigkeit der Randbedingungen sowie die Temperaturen. Als Randbedingungen werden gemessene Stundenwerte der Jahre 1990 bis 2006 verwendet und deren Einfluss auf das Raumklima und die Gebäudehülle bei den Simulationen untersucht.

Beschreibung des Gebäudes

Im Folgenden wird das hygrothermische Verhalten eines 1,5-stöckigen Gebäudes mit einer Gesamtwohnfläche von 160 m² und einem Raumvolumen von 422 m³ untersucht. Das Gebäude ist nicht unterkellert. Das Giebeldach mit einer Neigung von 50° ist nach Norden und Süden ausgerichtet. Zwischen den Sparren wird der Abstand von 160 mm mit Zellulosefaser (angenommene Rohdichte von 60 kg/m³) gedämmt.

Auf der Holzverschalung liegt eine wasserdampfdichte Bitumenbahn. Der Absorptionskoeffizient des bituminösen Dichtungsfilzstreifens beträgt im kurzwelligen Bereich 0,6. Das Wärmedämmmaterial hat eine Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/m²K und einen entsprechenden U-Wert von 0,226 W/m²K. Auf der Innenseite ist eine adaptive Dampfsperre angebracht. Zum Raum hin ist das Dach durch eine Gipskartonplatte mit einem entsprechenden sd-Wert von 0,15 m abgeschlossen. Die Fassadenelemente bestehen aus einem 1 cm dicken mineralischen Außenputz (Absorptionskoeffizient im kurzwelligen Bereich von 0,4), der auf einer 5 cm starken Holzfaserplatte aufgebracht ist, darauf eine OSB-Platte und eine 20 cm starke hydrophobe Mineralwollendämmung. Ein luftdichtes System aus Span- und Gipskartonplatten dient als innerer Raumabschluss.

In jeder Fassade sind mehrere doppelt verglaste Fenster integriert. Für die anderen Teile des Gebäudes sind in Tabelle 8 alle für die Berechnung relevanten Konstruktionsdaten aufgelistet. Sämtliche Materialeigenschaften wurden aus der WUFI-Datenbank entnommen.

Tabelle 8:
Alle wichtigen Konstruktionsdaten für die WUFI-Berechnungen.

	Fläche [m ²]	Aufbau
Außenfassaden (0,152 W/m ² K)	Süden: 15 Norden: 15 Westen: 34 Osten: 34	10 mm Mineralputz 50 mm Holzfaserplatte 20 mm OSB 200 mm Mineralwolle 16 mm Spanplatte 12,5 mm Gipskartonplatte
Fenster	Süden: 3 Norden: 3 Westen: 6 Osten: 6	Typ: reflektierende Doppelverglasung U-Wert: 2,73 W/m ² K SHGC: 0,11 Rahmen: 30 %
Giebeldach (0,226 W/m ² K)	Norden: 30 Süden: 30	Bitumenhaltige Folienbahn (s_d -Wert: 1000 m) 16 mm Holzverkleidung 160 mm Zellulosefaser Intelligente Dampfsperre 15 mm Gipskartonplatte
Fußboden zu Boden	50	100 mm Schaumglas PE-Membran 220 mm Beton
Decke	50	140 mm Weichholz 20 mm mineralische Dämmplatte 50 mm Estrich 10 mm Hartholz

Alle Simulationen beginnen Anfang April mit einem Anfangsfeuchtegehalt von 80 % r. F. Als klimatische Bedingungen dienen die stündlich in Holzkirchen während der Jahre 1990 bis 2006 gemessenen Wetterdaten. Die Regenwasserabsorption wird nur beim Dach vernachlässigt. Für die Fassaden wird die Schlagregenlast entsprechend der Ausrichtung berechnet. An den Außenoberflächen beträgt der Wärmeübergangswiderstand 0,0526 m²K/W für das Dach und 0,0588 m²K/W für die Fassaden, an den innenseitigen Oberflächen 0,0125 m²K/W. Das ideale Heiz- und Kühlsystem des Hauses mit jeweils 15 kW sollte die Raumtemperatur zwischen 20 °C und 26 °C halten können.

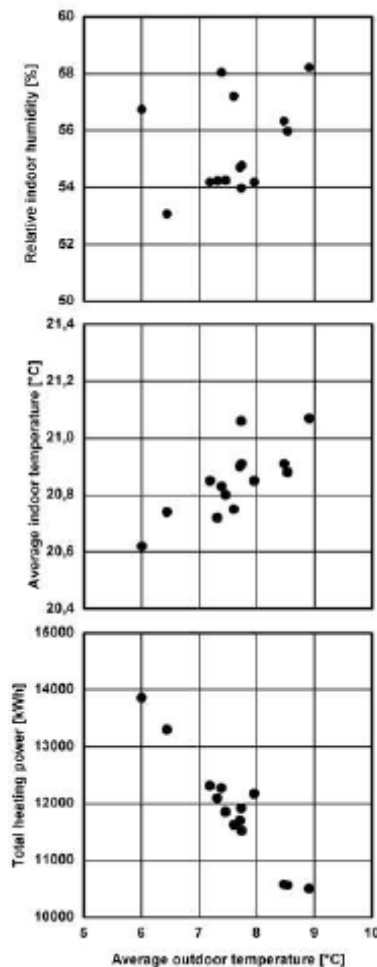


Bild 62:
Berechnete jährliche durchschnittliche relative Luftfeuchte, Temperatur und Heizenergie in Abhängigkeit von der jährlichen Durchschnittsaußentemperatur.

Resultierende Raumklimabedingungen

In Bild 62 sind die Durchschnittswerte für die relative Raumluftfeuchte und die Temperatur in Abhängigkeit von der Jahresdurchschnittsaußentemperatur dargestellt, wobei eine starke Korrelation zwischen Raum- und Außentemperatur erkennbar ist. Bei der relativen Luftfeuchte ist diese Korrelation nicht so deutlich. Weiter zeigt sich, dass der jährliche Heizbedarf mit zunehmenden Außentemperaturen abnimmt. Vom hygrothermischen Standpunkt aus ist allerdings die stündliche Entwicklung der Innenraumbedingungen interessanter. Hierfür sind die Ergebnisse der stündlich berechneten Werte der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte für die Jahre von 1990 bis 2006 in Bild 63 und Bild 64 dargestellt. Dabei liegt die Jahresdurchschnittstemperatur in Holzkirchen zwischen 6,0 °C und 8,5 °C.

Die Schaubilder verdeutlichen die Auswirkung der äußeren Wärme- und Feuchtelast. Zusätzlich ist in Tabelle 9 die Anzahl der Stunden aufgelistet mit Temperaturen über 24 °C, 25 °C und 26 °C im simulierten Raum. Dabei variiert diese Anzahl innerhalb der beobachteten Jahre sehr stark, wobei das Maximum im Jahr 2003 zu beobachten ist und das Minimum 10 Jahre zuvor.

Tabelle 9:
Berechnete Stunden mit Raumlufttemperaturen über 24 °C, 25 °C und 26 °C.

Jahr	Jahresdurchschnitts- temperatur [°C]	Stunden, in denen die Raumtemperatur höher war als		
		> 24 °C	> 25 °C	> 26 °C
1991	6,4	628	240	83
1993	7,3	353	60	0
1994	8,9	1072	831	563
1995	7,4	788	490	194
1996	6,0	266	136	24
1998	7,7	716	366	141
1999	7,6	389	111	42
2000	8,5	661	330	124
2001	7,7	724	292	88
2002	8,5	499	269	149
2003	8,0	1846	1327	712
2004	7,5	593	320	50
2005	7,2	559	359	207
2006	7,7	1145	875	514

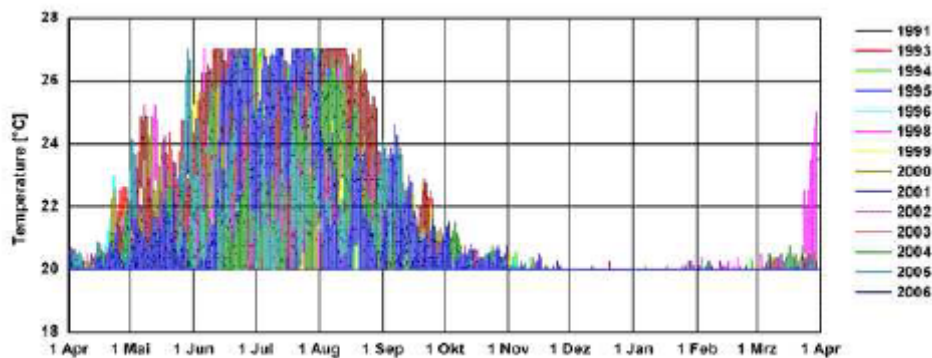


Bild 63:
Simulierte Raumlufttemperatur unter Verwendung der Wetterdaten aus ver-
schiedenen Jahren.

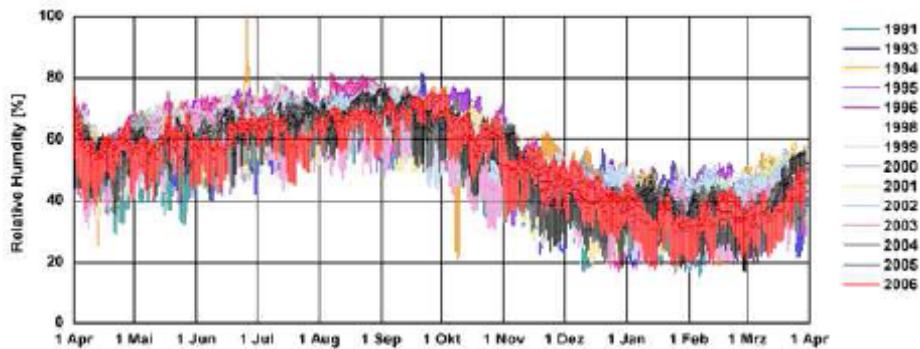


Bild 64:
 Simulierte relative Raumluftheuchte unter Verwendung der Wetterdaten aus verschiedenen Jahren.

Wichtig ist auch eine Auswertung der relativen Luftfeuchte unter Verwendung verschiedener Wetterjahre. Der Trend geht hin zu höheren Werten im Sommer und niedrigeren Werten im Winter, wobei tägliche Schwankungen von nahezu 30 % r. F. auftreten. Dies muss einen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Gebäudehülle haben. Im Bild 65 ist die jährliche Auswertung des gesamten Feuchtegehalts eines Nord-Süd-ausgerichteten Giebeldachs dargestellt, wobei die kritische Ausrichtung die nach Norden ist. Ausschließlich im Jahr 2003 mit dem sehr heißen und sehr langen Sommer ist die Feuchtebilanz "negativ", was bedeutet, dass die Konstruktion feuchtesicher ist. In allen anderen Jahren variiert die Feuchteansammlung zwischen 0,25 und 0,75 kg/m². Für die Ost- und Westfassade sind die hygrothermischen Simulationen ähnlich (Bild 66).

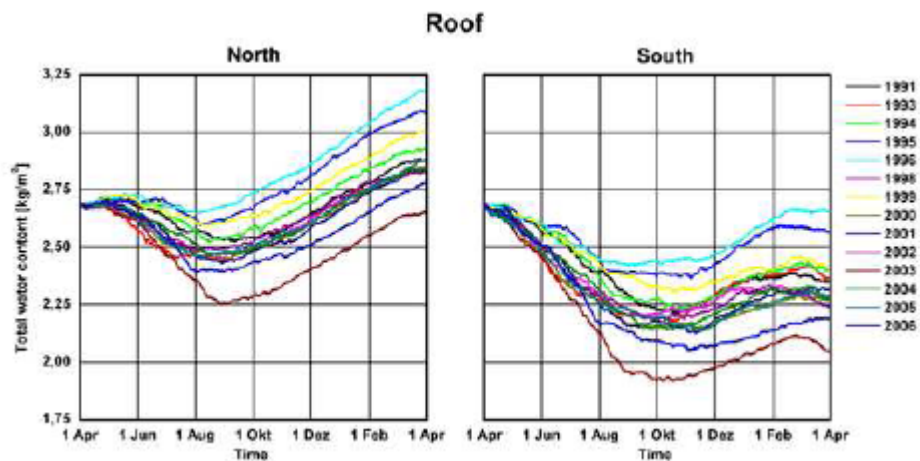


Bild 65:
 Berechneter Gesamtfeuchtegehalt eines nach Norden (links) und nach Süden (rechts) ausgerichteten Giebeldachs unter Verwendung verschiedener Wetterdaten für Holzkirchen.

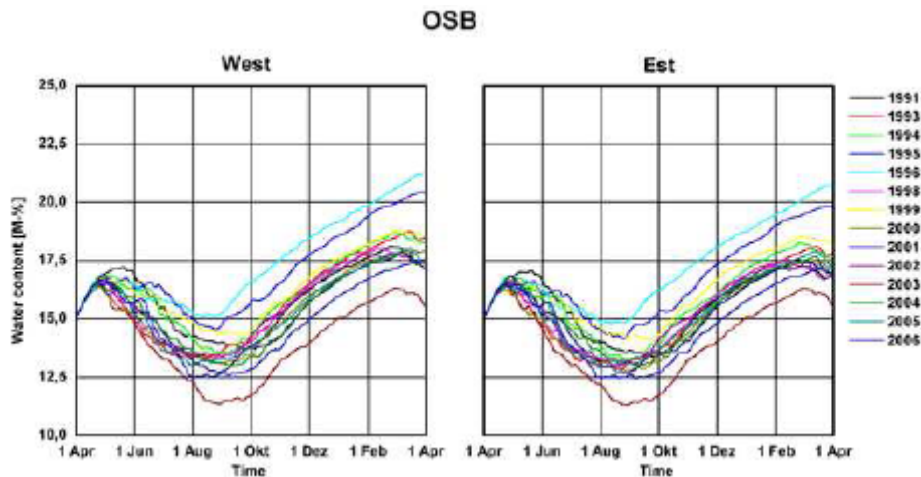


Bild 66:
Berechneter Feuchtegehalt einer OSB-Platte in einer nach Westen (links) und nach Osten (rechts) ausgerichteten Fassade unter Verwendung verschiedener Wetterdaten für Holzkirchen.

5.2.2 Der Einfluss von Innenraum-Randbedingungen auf das hygrothermische Verhalten von Gebäuden – zur Genauigkeit vereinfachter Ansätze

Das hygrothermische Verhalten von Bauteilen ist sehr wichtig aufgrund der Auswirkungen der Witterung und Bodenfeuchte sowie der verbesserten Luftdichtheit eines Gebäudes und der höheren relativen Raumluftfeuchte. Deshalb ist es wichtig, dieses Verhalten in Bezug auf den Bau von neuen Gebäuden und im Falle von Renovierungsmaßnahmen zu beurteilen. Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte müssen neben außenklimatischen Randbedingungen bekannte Größen sein, um eine hygrothermische Berechnung von Bauteilen durchzuführen. Das Ziel ist dabei, die Auswirkung von Standardrandbedingungen oder stündlich gemessenen Raumklima-Simulationswerten auf das Verhalten von Bauteilen einer Wand- oder Dachkonstruktion zu ermitteln.

Vereinfachte Ansätze

Die Innenraum-Randbedingungen für hygrothermische Bauteilsimulationen werden gegenwärtig auf verschiedene Weise gehandhabt. Im Folgenden werden verschiedene Standardrandbedingungen für hygrothermische Simulationen beschrieben und die Unterschiede diskutiert. Die Norm EN ISO 13788 [30] wurde insbesondere für die stationären Berechnungen nach Glaser entwickelt und die Norm EN 15026 für die instationären Bauteilsimulationen. Zusätzlich wurde ein Datenblatt für die hygrothermischen Bauteilsimulationen von der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) [115] herausgegeben, das insbesondere in mitteleuropäischen Ländern gültig ist.

EN ISO 13788

Die Raumluftfeuchte in Gebäuden mit natürlicher Lüftung wird aus dem monatlichen Durchschnittswert der Außentemperatur, der Raumluftfeuchte und der Feuchtelast gemäß der europäischen Norm EN ISO 13788 berechnet. Die

Korrelation von Außenlufttemperatur und Raumfeuchtelast sowie die resultierenden relativen Luftfeuchten sind in Bild 67 für ein Gebäude in Holzkirchen mit variierender Nutzung dargestellt. Die Luftfeuchten sind in 5 verschiedenen Klassen je nach Nutzung definiert:

1. Lager
2. Büros, Läden
3. Wohnungen mit geringer Belegung
4. Wohnungen mit hoher Belegung, Sporthallen, Küchen, Kantinen, Gebäude mit Gasthermen
5. spezielle Gebäude, z. B. Brauereien, Hallenbäder etc.

Die relative Raumluftfeuchte wird durch die absolute Raumluftfeuchte bei einer konstanten jährlichen Raumlufttemperatur von 20 °C bestimmt.

Das Ergebnis für die absolute Feuchte c_i ist $c_i = c_e + \Delta c$, mit c_e als absolute Außenluftfeuchte und Δc als Feuchtelast, die aus der monatlichen Außenlufttemperatur und der entsprechenden Klassifizierung 1 bis 5 resultiert.

Der in dieser Norm beschriebene Ansatz zur Berechnung von Raumklimabedingungen beruht in erster Linie auf skandinavischen Forschungsergebnissen. Die Umsetzung dieses Ansatzes auf instationäre Bedingungen hängt sehr stark vom Gebäudetyp und den Lüftungsbedingungen ab. Außerdem bleibt zu hinterfragen, ob dieser Ansatz auf andere europäische Klimazonen angewandt werden kann, insbesondere in südeuropäischen Ländern. Der Verlauf der Feuchteproduktion bei Temperaturen unter 0 °C und die Klassifizierung in Feuchteklassen ist noch immer problematisch.

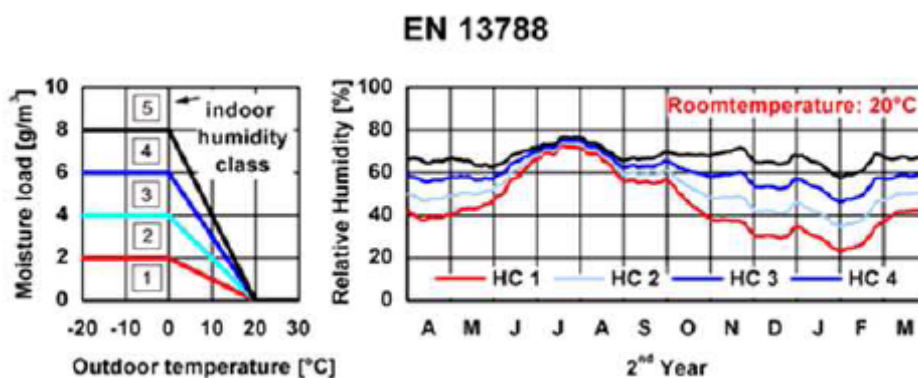


Bild 67:

Links: Bereiche der Feuchtelast in beheizten Räumen ohne Klimatisierung in Abhängigkeit von der monatlichen durchschnittlichen Außenlufttemperatur. Die Nutzung ist definiert als eine Klasse:

1: Lager

2: Büros, Läden

3: Wohnungen mit geringer Belegung

4: Wohnungen mit hoher Belegung, Sporthallen, Küchen, Kantinen, Gebäude mit Gasthermen

5: spezielle Gebäude, z. B. Brauereien, Hallenschwimmbäder etc.

Rechts: Verlauf der berechneten relativen Raumluftheuchte für den Standort Holzkirchen nach den 5 Feuchteklassen.

EN 15026

Die in der EN 15026 beschriebene Methode beruht auf Messungen, die in verschiedenen Gebäuden in Deutschland durchgeführt wurden. Der Verlauf der Raumluftheuchte und der relativen Luftfeuchte kann mit Hilfe der Transferfunktionen aus der Außenlufttemperatur bestimmt werden. In diesem Fall und im Gegensatz zur EN ISO 13788 wird ein variabler Durchschnittswert während 24-Stunden für die Außentemperatur mit dem Ziel verwendet, die täglichen Schwankungen zu simulieren. Die Transferfunktionen für die Raumluftheuchte und die relative Luftfeuchte in Abhängigkeit vom während 24 Stunden gemessenen, variablen Durchschnittswert der Außenlufttemperatur sowie die entsprechenden Raumklimabedingungen für den Standort Holzkirchen werden in Bild 68 dargestellt. Der Temperaturverlauf scheint in dieser Norm realistischer zu sein im Vergleich zur EN ISO 13788, insbesondere im Hinblick auf die Tatsache, dass die Raumluftheuchten im Sommer zwischen 20 °C und 25 °C ansteigen. Differenziert wird im Allgemeinen nur zwischen zwei Feuchteklassen, eine hohe und eine niedrige Feuchtelast.

EN 15026

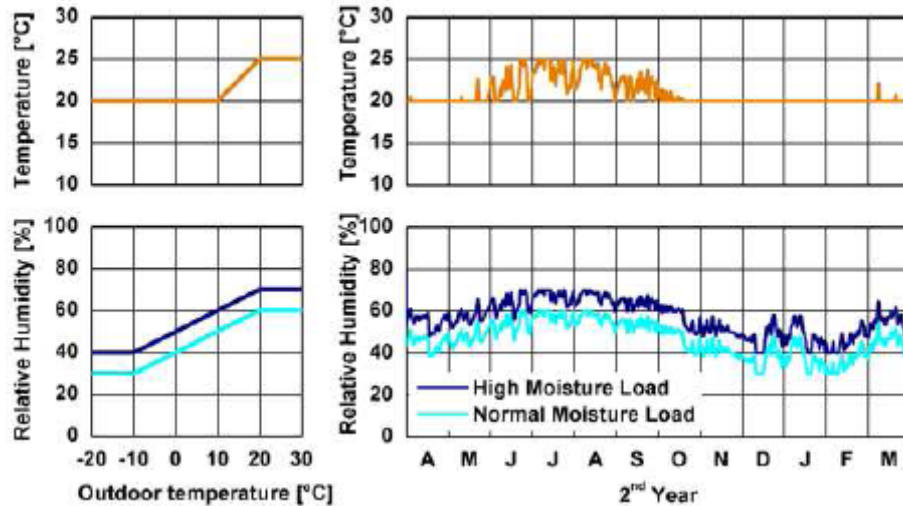


Bild 68:

Links: Transferfunktionen für die Raumlufthtemperatur und die relative Luftfeuchte in Abhängigkeit vom variablem 24-Stunden-Durchschnittswert der Außenlufttemperatur. Rechts: Verlauf der berechneten relativen Raumlufthfeuchte für den Standort Holzkirchen gemäß den 2 Feuchteklassen.

WTA - 6-2-01/E

Raumklimabedingungen werden in der WTA-Richtlinie 6-2-01 in vereinfachter Weise mit einem sinusförmig geglätteten jährlichen Verlauf dargestellt. Dieser Ansatz eignet sich ausschließlich für mitteleuropäische Klimabedingungen. Im Gegensatz zur EN ISO 13788 gibt es nur drei Feuchteklassen. Wenn die jeweilige Feuchtelast für einen Raum berechnet wird, so ist zu sehen, dass die Grenzen der jeweiligen Klassen in den beiden Normen erheblich voneinander abweichen. So ergibt sich z. B. eine maximale Feuchtelast für einen Wohnraum mit Standardbelegung bei einer monatlichen durchschnittlichen Außenlufttemperatur von 10 °C von 2 g/m³ und nach EN ISO 13788 von 3 g/m³ (also eine hohe Feuchtelast in der WTA Richtlinie). Eine mögliche Erklärung für diese Tatsache können die Unterschiede in der Konstruktion und im klimabedingten Lüftungsverhalten sein. Sie könnte als zukünftige Vorgehensweise auf der Basis einer sicheren Interpretation der Feuchteberechnung (höhere Raumlufthfeuchte bedeutet höhere Feuchte in der Konstruktion) gerechtfertigt werden. Bild 69 zeigt deutlich, dass die Tage mit Maximalwerten der relativen Luftfeuchte und der Temperatur voneinander abweichen. Der Maximalwert wird bereits im Juni erreicht im Gegensatz zum beobachteten Verlauf der Raumlufthfeuchte.

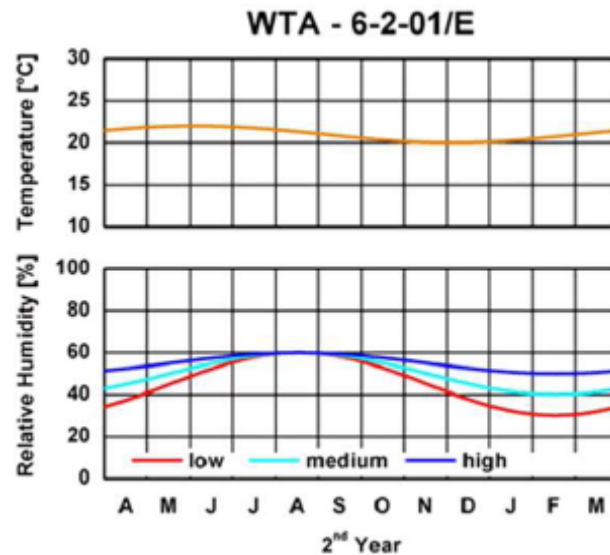


Bild 69:

Oben: Transferfunktionen für die Raumlufthtemperatur und die relative Luftfeuchte in Abhängigkeit vom variablen 24-Stunden-Durchschnittswert der Außenlufttemperatur. Unten: Verlauf der berechneten relativen Raumlufthfeuchte für den Standort Holzkirchen von 2 Feuchteklassen.

Hygrothermisches Verhalten des gesamten Gebäudes

Das hier untersuchte Gebäude ist dasselbe wie das in Kapitel 5.2.1 beschriebene. Bild 70 gibt einen Überblick über alle simulierten Szenarien für die täglichen Profile der Lüftung, der Wärme- und der Feuchtelasten. Zuerst wird das hygrothermische Verhalten eines leeren Gebäudes untersucht. Im Fall 1 wird das Gebäude nur durch Infiltration belüftet. Die stündliche Luftwechselrate beträgt aufgrund der luftdichten Fenster 0,2 h⁻¹. In den folgenden Fällen beträgt sie entsprechend den Mindestanforderungen an die Belüftung 0,5 h⁻¹. In den Fällen 3 bis 5 ist das Gebäude mit 4 Personen über 24 Stunden pro Tag belegt. Um das Nutzerverhalten zu simulieren, werden täglich zwei kurze intensive Lüftungsszenarien untersucht. Im Fall 4 sind die Fenster leicht geöffnet (Luftwechselrate = 4 h⁻¹) jeweils eine Stunde lang um 8:00 Uhr und um 18:00 Uhr. In den Fällen 5, 6 und 7 wird eine kürzere (30 Minuten) aber intensivere Lüftung (Luftwechselrate = 8 h⁻¹) simuliert. Um den Einfluss des unterschiedlichen Nutzerverhaltens während eines ganzen Tages zu untersuchen, wird in den Fällen 6 und 7 davon ausgegangen, dass das Gebäude nur zwischen 6:00 Uhr und 20:00 Uhr voll belegt ist. Während des Tages ändert sich das Wärme- und Feuchteprofil stündlich.

Doch die tägliche Summe, insbesondere der Feuchtelasten, bleibt konstant bei nahezu 12 kg/Tag. Die hygrothermischen Berechnungen beginnen im April mit einem anfänglichen Wassergehalt von um die 80 % r. F. und werden über einen Zeitraum von 2 Jahren durchgeführt. Es werden je Stunde die Klimarandbedingungen für den Standort Holzkirchen verwendet. Die Betrachtung der Auswirkungen von Schlagregen erfolgt nur für die Fassaden und anhand der Ausrichtung. Der äußere Wärmeübergangswiderstand beträgt 0,0526 für das Dach und 0,0588 m²K/W für die Fassaden. Für alle Innenoberflächen beträgt er

0,0125 m²K/W. Die minimale Raumlufttemperatur von 20 °C sollte mit einer Heizung von 15 KW aufrechterhalten werden.

Resultierende Raumklimabedingungen

Die für die Fälle 1 bis 7 mit Hilfe von WUFI-Plus berechneten Raumlufttemperaturen und relative Luftfeuchten sind in Bild 71 dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen deutlich die Auswirkung der internen Wärme- und Feuchtelast sowie das instationäre Lüftungsverhalten. Sofern im Gebäude keine zusätzlichen Wärme- und Feuchtelasten vorhanden sind, schwankt die relative Luftfeuchte zwischen 15 % im Winter und 70 % im Sommer. Der Unterschied im Luftwechsel von 0,2 und 0,5 kann fast vernachlässigt werden. In einem bewohnten Gebäude mit einer konstanten Luftwechselrate von 0,5 schwankt die relative Luftfeuchte zwischen 40 % und 70 %. Die Mindesttemperatur von 20 °C kann erhalten bleiben.

Sie steigt im Sommer auf Maximalwerte von nahezu 30 °C an. Der Grund dafür ist, dass keine zusätzliche Lüftung im Sommer zugrunde gelegt wird und auch keine zusätzlichen Maßnahmen für den Sonnenschutz ergriffen werden. Am deutlichsten ist die Auswirkung des Lüftungsverhaltens. Im Gegensatz zur Dauerlüftung verändert die Stoßlüftung die täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte um fast -10 %. Darüber hinaus ist es nicht möglich, im Winter die Raumlufttemperatur während der Lüftungsphase auf 20 °C zu halten. Der Grund ist die unzureichende Heizungsanlage. Das entspricht den Messungen.

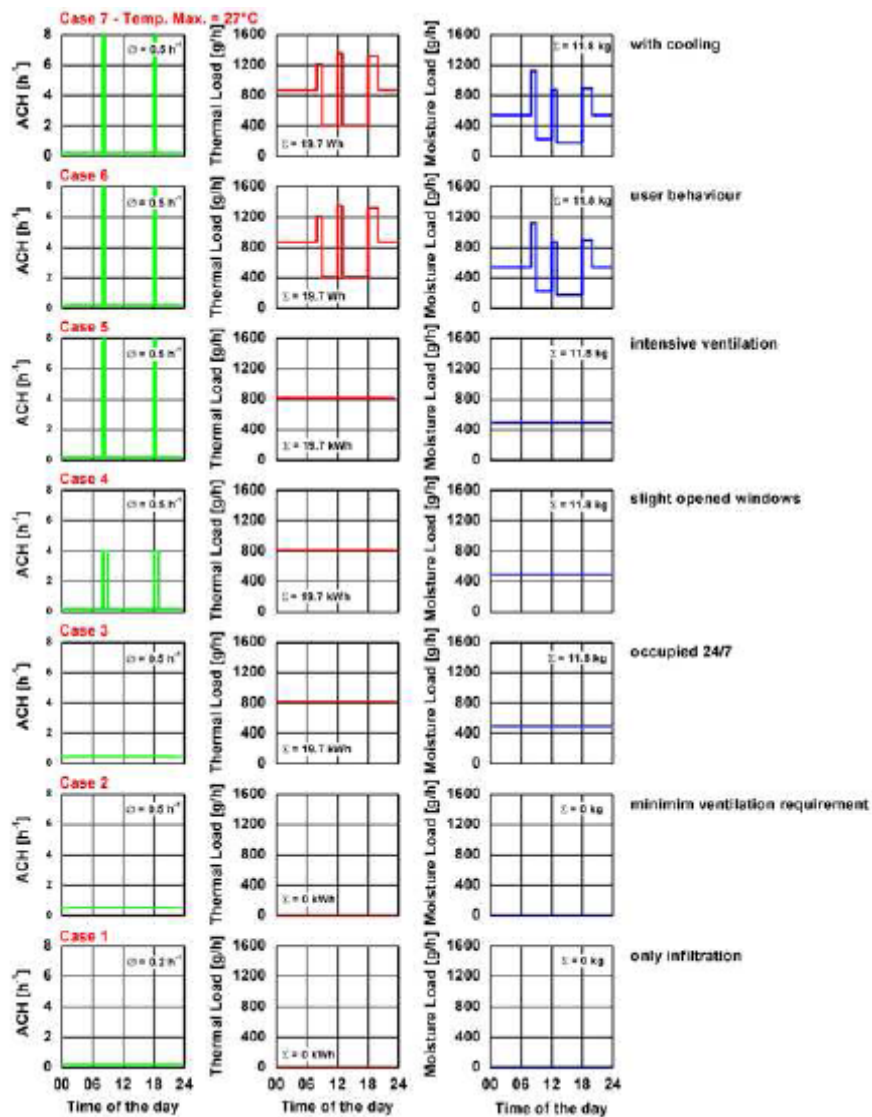


Bild 70:
Überblick über die simulierten täglichen Profile für Lüftung, Wärme- und Feuchtelasten.

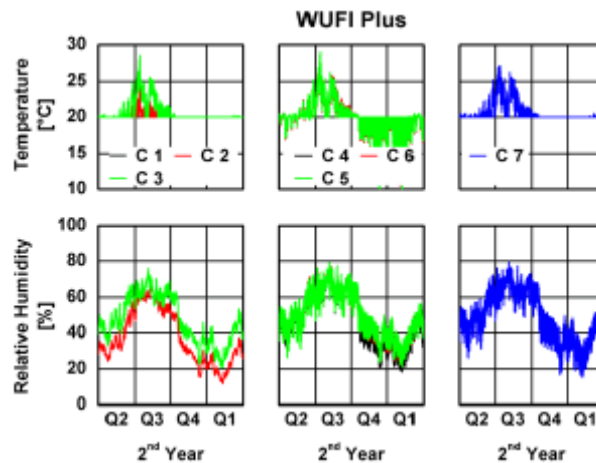


Bild 71:
Raumlufttemperatur (oben) und relative Luftfeuchte (unten) für die Fälle 1 bis 7 als Ergebnisse der WUFI-Plus-Berechnung.

Vergleich der resultierenden Raumklimabedingungen

Die resultierenden Raumlufthtemperaturen und Raumlufthfeuchten müssen statistisch ausgewertet werden. Bild 72 zeigt die so genannte Box-Plot-Darstellung. Es ist möglich, die Lage und Streuung der Verteilung zu erkennen. Neben den Durchschnittswerten sind die Mittelwerte, die Wertebereiche von 25 % und 75 % sowie die entsprechenden Standardabweichungen dargestellt. Der direkte Vergleich der Standardrandbedingungen mit den durch WUFI-Plus berechneten Verläufen zeigt klare Unterschiede. Dies kann am Beispiel einer Wohnung mit niedriger und normaler Belegung dargestellt werden. In diesem Fall und gemäß EN ISO 13788 ist die Feuchteklasse HC 3 anzuwenden. Der Durchschnittswert der relativen Luftfeuchte beträgt ca. 60 % mit Schwankungen von ca. ± 10 %. Die normale Feuchtebelastung für ein solches Gebäude kann gemäß EN 15026 verwendet werden. In diesem Fall beträgt der Durchschnittswert der relativen Luftfeuchte ca. 45 % mit Schwankungen von ca. ± 10 %. Ein ähnlicher Verlauf der relativen Luftfeuchte wird durch die Anwendung der Standardrandbedingungen gemäß der WTA-Richtlinie mit einem Durchschnittswert von ca. 50 % mit Schwankungen von ca. ± 10 % erreicht. Wird der Verlauf der relativen Luftfeuchte mit Hilfe von WUFI-Plus berechnet, liegt die relative Luftfeuchte für die beiden ersten Fälle ohne zusätzliche Wärme- oder Feuchtequellen bei Werten leicht unter 40 % mit Schwankungen leicht unter 20 % bis 60 %. Der Einfluss durch die Nutzer (Fälle 3 bis 7) wird deutlich. Die durchschnittliche relative Luftfeuchte steigt um 45 % bis 50 % für den jeweiligen Fall nur aufgrund der tatsächlichen Nutzung des Gebäudes an, was durch Wärme- und Feuchtebelastungen simuliert wird. Die relative Raumlufthfeuchte steigt um weitere 5 % durch Stoßlüftung trotz der gleichen Menge an Wärme- und Feuchtebelastung an.

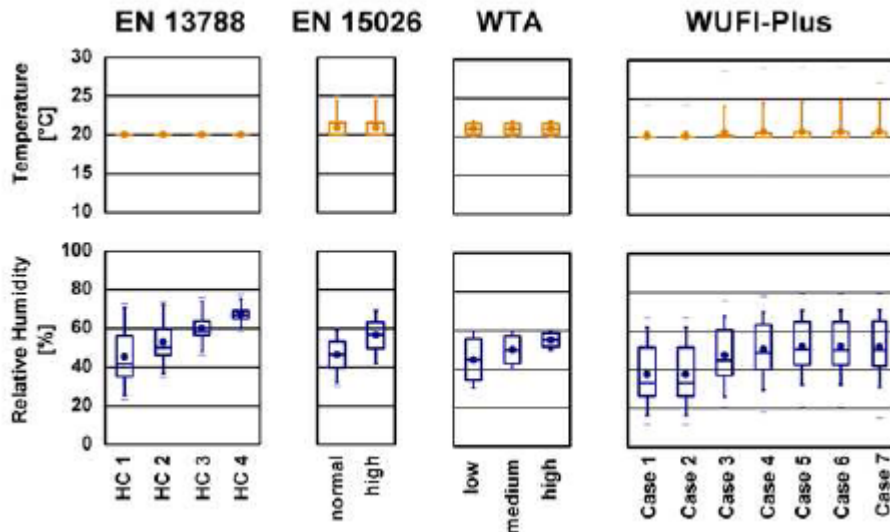


Bild 72:

Statistische Auswertung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte als Ergebnisse von genormten Verfahren und WUFI-Plus-Simulationen. Die Kästen zeigen die Durchschnittswerte (Punkte), Mittelwerte und 25 % bzw. 75 % Grenzen an. Mindest- und Maximalwerte sind ebenfalls angezeigt.

Auswirkungen auf das hygrothermische Verhalten

Im Folgenden wird untersucht, wie sich die verschiedenen, in den 3 Normen festgelegten Standardrandbedingungen und das mit Hilfe von WUFI-Plus berechnete unterschiedliche Nutzerverhalten auf das hygrothermische Verhalten eines nach Norden ausgerichteten Daches und einer nach Westen ausgerichteten Fassade auswirkt. Zum Vergleich werden der Wassergehalt der Holzkonstruktion eines Daches mit einer Neigung von 50° nach Norden sowie der gesamte Wassergehalt der Konstruktion untersucht. Als Auswertungskriterien dienen die Erfüllung der Gesamtjahresbilanz und der Feuchtegehalt in der Holzverschalung während der Beobachtungsperiode.

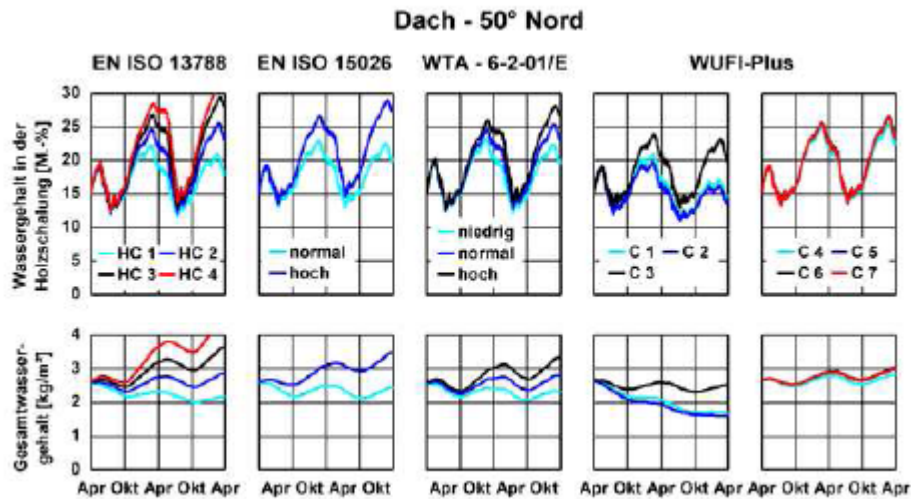


Bild 73:
 Simulierter Wassergehalt der Holzverschalung (oben) und Gesamtwassergehalt der Konstruktion (unten) basierend auf verschiedenen Raumklimadaten.

Bild 73 zeigt die Ergebnisse für das untersuchte Dach in einem Diagramm. Die Berechnungen des hygrothermischen Verhaltens mit WUFI gemäß den Randbedingungen der EN ISO 13788 zeigen, dass dieses Dach hygrothermisch nach Feuchteklasse 2 nicht mehr "sicher" ist. Die Beurteilung dieser Konstruktion nach EN 15026 stuft sie allerdings anhand der jeweiligen gebräuchlichen Randbedingungen als hygrothermisch unbedenklich ein. Gemäß der WTA-Richtlinie ist ein leichter Anstieg des Gesamtwassergehalts im Laufe des Jahres bei der Standardfeuchtebelastung zu verzeichnen. Die Berechnungen mit WUFI-Plus liefern ganz deutliche Unterschiede im hygrothermischen Verhalten. Während die Konstruktion für die Fälle C1 und C2 als hygrothermisch unbedenklich eingestuft wird, wird sie für den Fall C3 (Dauerbelegung, Dauerlüftung) als gerade noch hygrothermisch unbedenklich beurteilt. Im Falle der instationären Lüftung oder des instationären Nutzerverhaltens mit der gleichen Wärme- und Feuchtebelastung steigen allerdings der Gesamtwassergehalt sowie der Wassergehalt der Holzverschalung deutlich an. Wenn die Ergebnisse mit den jeweiligen Standardrandbedingungen verglichen werden, so wird deutlich, dass die Feuchteklasse allein durch das instationäre Verhalten um eine Kategorie verändert wird. Das bedeutet, dass die Berechnungen nach EN 15026 im Falle des instationären Verhaltens realistischere Werte für die Feuchteklasse liefern. Ähnliche Ergebnisse werden für die Westfassade (Bild 74) erreicht. Werden die mit WUFI-Plus berechneten Ergebnisse mit denen der Standardrandbedingungen verglichen, ist festzustellen, dass die Standardrandbedingungen verschiedene Auswirkungen auf das hygrothermische Verhalten haben, und dass ein eindeutiger Einfluss durch das Nutzerverhalten besteht.

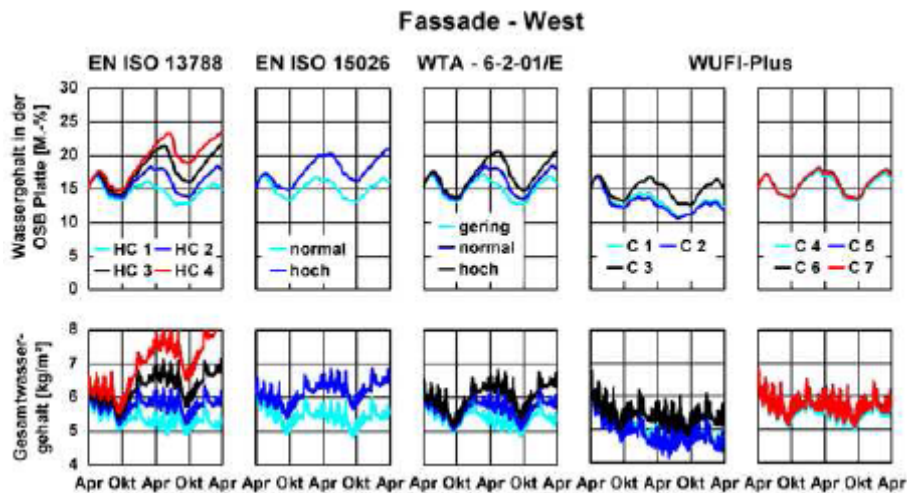


Bild 74:

Simulierter Wassergehalt der OSB-Platten (oben) und Gesamtwassergehalt der Konstruktion (unten) basierend auf verschiedenen Raumklimadaten.

Beim Vergleich der Ergebnisse aus den Raumklimasimulationen stellt sich heraus, dass die WTA-Randbedingungen für eine Standardfeuchtelast normalerweise bei Wohngebäuden angewandt werden sollten oder die entsprechenden Randbedingungen nach EN 15026. Die Anwendung dieser Randbedingungen bedeutet die Entscheidung, auf der sicheren Seite zu sein. Es erscheint vernünftig, hohe Feuchtelasten in Gebäuden anzuwenden, in denen besonders ungünstige Raumluftfeuchtebedingungen zu erwarten sind. Die Feuchteklassen entsprechend der EN ISO 13788 liefern in jedem Fall zu hohe Werte und sollten deshalb mit Vorsicht behandelt werden.

5.2.3 Schlussfolgerung

Das hygrothermische Verhalten einer Gebäudehülle hat einen wichtigen Einfluss auf die Gesamteffizienz einer Konstruktion. Experimentelle Untersuchungen sind kostspielig und für Parameteruntersuchungen nicht geeignet. Numerische Simulationen können bei der Beurteilung der Effizienz der verschiedenen Lösungen und bei der Analyse der Auswirkung der verschiedenen Parameter sehr hilfreich sein. Deshalb ist ein kombiniertes Instrument für hygrothermische Hüllberechnungen und Gesamtgebäudesimulationen entwickelt worden. Die ersten Schritte zur Validierung des Modells waren erfolgreich. Die Ergebnisse sind vielversprechend, aber weitere Validierungsbeispiele sind erforderlich, um Vertrauen in dieses neue Modell zu schaffen und seine Leistungsfähigkeit zu steigern. Da einige Baustoffe unterschiedlich reagieren, wenn sie transienten anstatt stationären Bedingungen ausgesetzt sind, müssen geeignetere hygrothermische Parameter für die hygrothermischen Gebäudeeffizienzberechnungen bestimmt werden.

Die hier vorgestellten Modelle tragen zur Verbesserung der Energiesimulationen bei, weil die latenten Wärmelasten und ihre zeitliche Anordnung exakter berechnet werden können. Damit wird die Bestimmung der Raumluft- und Raumboflächenbedingungen in einem Gebäude zuverlässiger. Das ist für die Beurteilung der Behaglichkeit und Hygiene sehr wichtig. Nachbearbeitungsmodelle zur Bestimmung von Schimmelpilzwachstum oder Korrosionsrisiken beru-

hen auf den exakten Ergebnissen der transienten Temperatur- und Feuchtebedingungen. Das Gleiche gilt für die Konzeption von Raumklimatisierungssystemen in historischen Gebäuden und Museen [47], in denen die Feuchtepufferungseigenschaft der Hülle und die Einrichtungsgegenstände zur Regulierung der Temperatur- und Feuchteschwankungen beitragen.

6 Subtask 4: Applications

6.1 Akzeptable Feuchtelast

In diesem Subtask werden akzeptable Feuchtelasten verschiedener Anforderungen für den Erhalt von Gebäuden und Kunstsammlungen, Ausstellungen, etc. und der Behaglichkeit vorgestellt. Berechnungsmodelle werden vorgestellt.

Die vier folgenden Themengebiete beeinflussen die akzeptablen Feuchtelasten:

- Gesundheit und Behaglichkeit
- Substantielle Schädigungen
- Maßnahmen zum Schutz der Baukonstruktion
- Energieeinsparung

6.1.1 Gesundheit und Behaglichkeit

Das thermische Raumklima ist eine, aus mehreren Faktoren zusammengesetzte, nicht direkt messbare Größe. Die vier wichtigsten Elemente sind:

- Lufttemperatur der Umgebung
- Strahlungstemperatur der Umgebung
- Luftgeschwindigkeit
- relative Luftfeuchte

Thermisches Behagen oder Unbehagen in Folge des Raumklimas, hängt auch von den folgenden zwei persönlichen Komponenten ab:

- körperliche Aktivität
- Bekleidung

Neben den aufgeführten sogenannten primären Einflussfaktoren gibt es weitere physikalische und physiologische Einflussfaktoren, deren Bedeutung für das subjektive Klimaempfinden aber als zweitrangig eingestuft wird. Der Mensch reagiert auf die klimatische Gesamtsituation. Ein bestimmtes thermisches Raumklima lässt sich durch unterschiedliche Kombinationen der einzelnen Parameter erzielen. Die Veränderung nur eines der Parameter kann das thermische Raumklima erheblich beeinflussen. So kann eine durch niedrige Lufttemperatur hervorgerufene Kälteempfindung durch Erhöhung der Strahlungstemperatur aufgehoben werden; Schwüleempfinden bei hoher Lufttemperatur kann sowohl durch Senken der Luftfeuchte als auch der Lufttemperatur reduziert werden; niedrige Strahlungstemperatur (z.B. kalte Raumwände) kann

durch Erhöhung der Lufttemperatur kompensiert werden, Anblasen mit kühler Luft kann hohe Wärmestrahlung kompensieren etc. Fanger [42] hat die sechs Variablen (Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit, Aktivität, Bekleidung) in komplexer Weise miteinander verknüpft und daraus die Behaglichkeitsgleichung entwickelt. Das Berechnungsverfahren beruht auf der Annahme, dass das menschliche Thermoregulationssystem die mittlere Hauttemperatur und die Schweißsekretion automatisch ändert, um das Wärmegleichgewicht zu halten. Die Gleichung berechnet somit die mehr oder weniger ausgeglichene Energiebilanz des Körpers.

Wird diese physiologische Reaktion von Testpersonen in Beziehung zur Klima-beurteilung gesetzt, ergibt sich daraus der PMV-Index (Predicted Mean Vote). Die Anwendung der Behaglichkeitsgleichung in der Praxis erfolgt entweder durch iterative Lösung einer Gleichung gemäß [31] oder anhand von Behaglichkeitsdiagrammen. Ein Beispiel findet sich in Bild 75. Hier ist die thermische Behaglichkeit für einen Dämmwert der Bekleidung in Abhängigkeit der feuchten Luft-Temperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, der Luftgeschwindigkeit, der relativen Luftfeuchte sowie dem Aktivitätsgrad dargestellt. Bild 76 zeigt das häufig verwendete Behaglichkeitsfeld für das Wertepaar Raumlufttemperatur/relative Feuchte nach Leusden und Freymarck sowie in Bild 76 rechts die Schwülegrenze in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte.

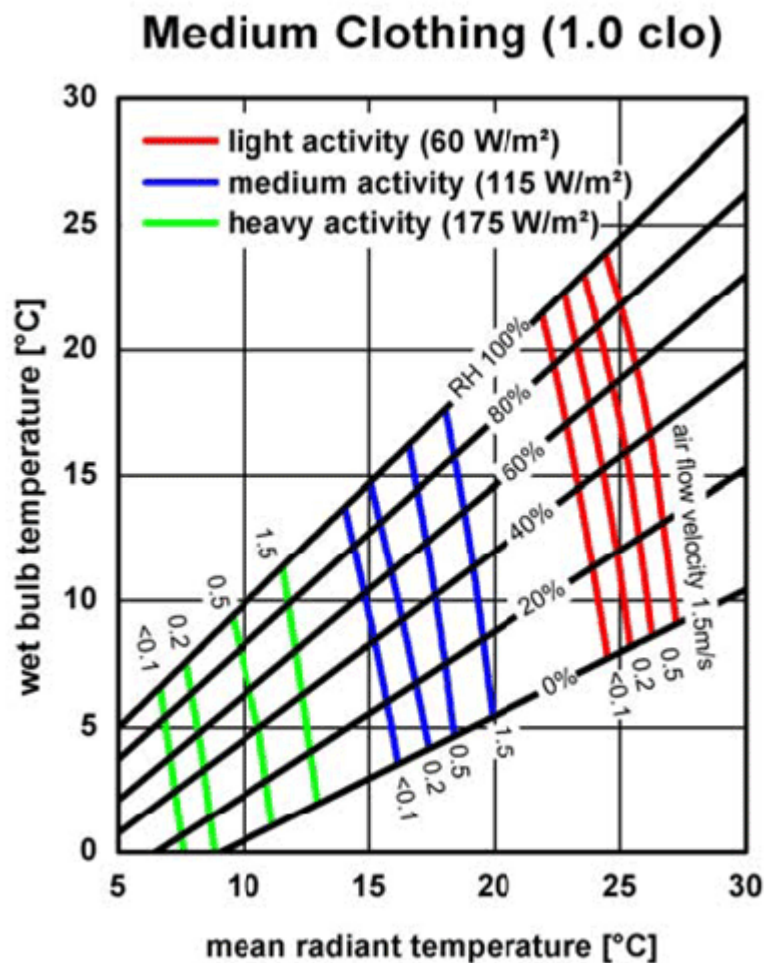


Bild 75:

Behaglichkeitsdiagramm in Abhängigkeit der feuchten Luft-Temperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, der Luftgeschwindigkeit, der relativen Luftfeuchte sowie dem Aktivitätsgrad bei normaler Bekleidung 1,0 clo. [53]

Rot: Leichte Arbeit (60 W/m²)

Blau: Mittelschwere Arbeit (115 W/m²)

Grün: Schwere Arbeit (175 W/m²)

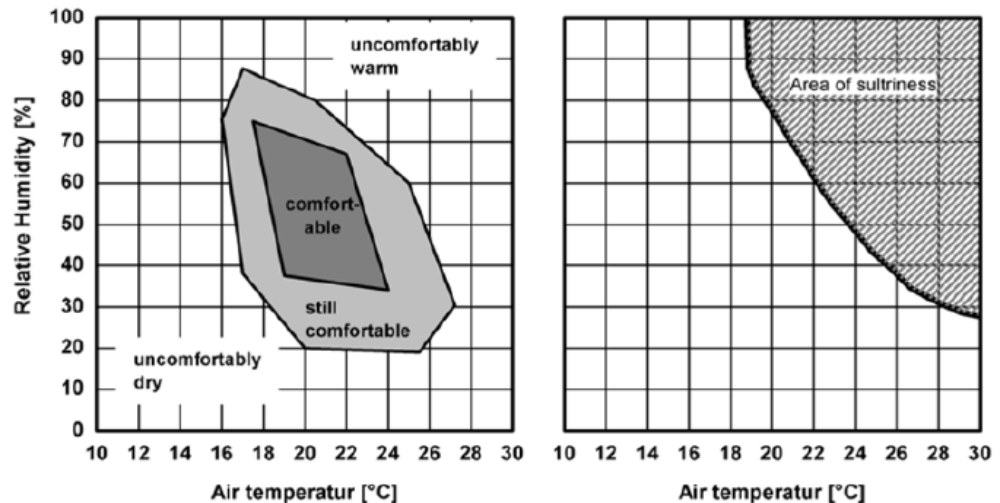


Bild 76:

Links: Behaglichkeitsfeld für das Wertepaar Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte; gültig für Raumumschließungsflächentemperaturen von 19,5 – 23 °C und Luftbewegungen von 0 – 20 cm/s (Leusden and Freymarck [78]).

Rechts: Schwülegrenze in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Feuchte nach Fiedler [43].

Die gegenwärtigen Standards und Empfehlungen für thermische Behaglichkeit erlauben einen relativ weiten Bereich für die Luftfeuchte. Bei der Ermittlung des PMV-Index nach EN ISO 7730 [31] werden die integralen Effekte aller Klimaparameter berücksichtigt, eine Anforderungen an die Luftfeuchte wird jedoch nicht gestellt.

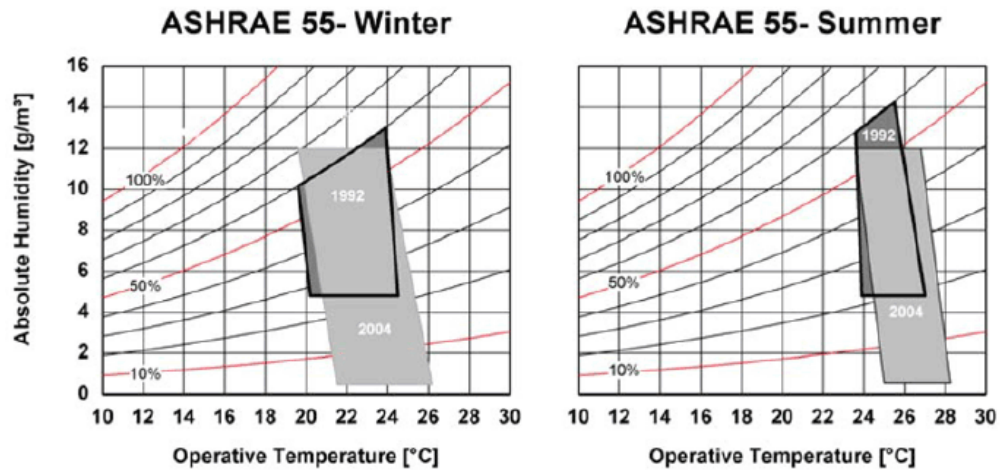


Bild 77:

Akzeptable Bereiche von Arbeitstemperatur und absoluter Feuchte für Menschen in typischer Winterkleidung (links) und Sommerkleidung (rechts) während leichten Tätigkeiten nach "ASHRAE Standard 55" der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers im Vergleich der Ausgaben 1992 und 2004.

Die "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers" (ASHRAE) definiert in Ihrer Richtlinie Nr. 55 die thermische Behaglichkeit. In der Ausgabe von 1992 [5] ist der Bereich der Arbeitstemperaturen für Bereiche, in denen Menschen leichte, zumeist sitzende Tätigkeiten ausüben ($\square = 1,2$ met) auf eine Raumbelagung von 80 % ausgelegt. Dies beruht auf dem PPD-Index der thermischen Behaglichkeit für den gesamten Körper, mit einem vorausgesagten Prozentsatz Unzufriedener von 10 %, plus weiteren 10 % an Unzufriedenen, die im Mittel durch lokale Unbehaglichkeit (Teile des Körpers) entsteht. Bild 77 zeigt den Behaglichkeitsbereich von Räumen, welche die oben erwähnten Kriterien erfüllen und in denen die Luftgeschwindigkeit nicht größer als 0,20 m/s ist. Es werden zwei Bereiche angegeben, der eine für 0,5 clo und der andere für 1,0 clo. Diese entsprechen den Dämmwerten typischer Sommer- bzw. Winterkleidung. Die oberen und unteren Grenzwerte der relativen Luftfeuchte beruhen auf Betrachtungen hinsichtlich trockener Haut, Augenentzündungen, Atemwegserkrankungen, Schimmelpilzbildung und anderen feuchtebezogenen Phänomenen. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Temperaturen der Gebäudeoberflächen und -materialien (z.B. Fenster und Luftleitungen) überwacht werden müssen, um Tauwasserbildung zu vermeiden.

In der überarbeiteten Ausgabe der ASHRAE Richtlinie Nr. 55 von 2004 [6] gibt es keine unteren Grenzwerte mehr. Der Abschnitt 5.2.2 der Richtlinie fordert, dass "Systeme zur Luftbe- und -entfeuchtung in der Lage sein sollen, ein Mischungsverhältnis von maximal 12 g/kg zu halten. Dies entspricht einem Dampfdruck von 19.100 hPa und einer relativen Luftfeuchte von ca. 60 % bei Normdruck oder einer Taupunkttemperatur von 16,8 °C. Ein unterer Feuchtegrenzwert für die thermische Behaglichkeit wird nicht mehr verlangt. Allerdings können Behaglichkeitsfaktoren nicht thermischer Natur, wie z. B. das Austrocknen der Haut, Entzündungen der Schleimhäute, trockene Augen sowie elektrostatische Aufladung eine untere Grenze für die Feuchte festlegen.

Der Grund für diese Änderung lässt sich darauf zurückführen, dass ein unterer Grenzwert der Luftfeuchte für thermische Behaglichkeit in der einschlägigen Literatur nicht zu finden ist. Beruhend auf dem gegenwärtigen Kenntnisstand erscheint lediglich ein oberer Grenzwert von 12 g/kg angebracht. Zur Erinnerung: Es geht hier nur um thermische Behaglichkeitskriterien. Die Temperatur steigt, weil die maximale Luftgeschwindigkeit von 0,22 m/s mit einbezogen wurde.

Die europäische Norm EN 15251:2006 [29] setzt Parameter für das Innenraumklima fest, die sich auf die Energieeffizienz von Gebäuden auswirken. Die Norm legt fest, wie die Eingangsparameter für die Auslegung der Systeme und die Energieeffizienzberechnungen von Gebäuden erstellt werden sollen, definiert Indikatoren zur Bewertung des Innenraumklimas aufgrund von Rechen- und Messergebnissen sowie Verfahren zur Langzeitbewertung der allgemeinen thermischen Behaglichkeitsbedingungen.

Diese Norm kann auf Wohngebäude als auch auf Nichtwohngebäude angewendet werden, bei denen die Kriterien für Innenraumklima anhand der Belegung durch die Menschen festgelegt werden und Faktoren wie z.B.: die industrielle Produktion oder andere Prozesse keine maßgebliche Auswirkung auf der Innenraumklima haben. Daher ist sie auf folgende Gebäudetypen anwendbar: Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Bürogebäude, Krankenhäuser, Hotels und Restaurants, Sportanlagen, Versorgungsgebäude für Groß- und Kleinhandelsunternehmen. Wichtig ist zu erwähnen, dass die Norm EN 15251 keine Auslegungskriterien vorschreibt, sondern wie diese bei der Anlagendimensionierung von Heizungs-, Kühlungs-, Lüftungs- und Beleuchtungssystemen erstellt und verwendet werden können.

Kriterien für das thermische Raumklima müssen unter Berücksichtigung typischer Aktivitätsniveaus und typischer Wärmedämmwerte auf Indizes der thermischen Behaglichkeit (PPD) beruhen. Die angenommenen PPD-Werte sind in Tabelle 10 aufgelistet. Die spezifizierte Raumtemperatur berücksichtigt Änderungen im Dämmwert der Kleidung über das Jahr in Abhängigkeit von der Außentemperatur bzw. Heiz- oder Kühlperiode. Für die Ausführung und Bemessung sollten weitere Kriterien für das Umgebungsklima (Zugluft, vertikale Lufttemperaturunterschiede, Fußbodentemperatur, Strahlungstemperatursymmetrie) berücksichtigt werden (siehe EN ISO 7730).

Tabelle 10:
Beispiele empfohlener Kategorien zur Auslegung von maschinell beheizter und gekühlter Gebäude.

Kategorie	Thermischer Zustand des ganzen Körpers	
	PPD [%]	PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	> 15	PMV < -0,7 oder +0,7 < PMV

Die Norm spricht auch von Fällen, in denen Luftbefeuchtung oder -entfeuchtung angewendet wird. Die in Tabelle 11 aufgeführten Werte sind empfohlene Auslegungswerte unter Auslegungsbedingungen. Im Allgemeinen ist Luftbefeuchtung oder -entfeuchtung nur in speziellen Gebäuden notwendig, beispielsweise in Museen, Einrichtungen der medizinischen Gesundheitsversorgung, Prozesskontrolle, Papierindustrie etc. .

Tabelle 11:
Empfohlene Auslegungskriterien für Luftfeuchtigkeit, wenn Befeuchtungs- oder Entfeuchtungssysteme installiert sind.

Art des Gebäudes bzw. Raumes	Kategorie	Auslegung der relativen Luftfeuchte für	
		Entfeuchtung [%]	Befeuchtung [%]
Räume, in denen Feuchte-kriterien durch die Belegung durch Personen bestimmt werden. Besondere Räume (Museen, Kirchen etc.) können andere Grenzwerte erfordern.	I	50	30
	II	60	25
	III	70	20
	IV	> 70	< 20

Eine relative Luftfeuchte zwischen 30 % und 70 % hat in der Regel nur einen geringen Einfluss auf das Wärmeempfinden des Menschen und somit auf die allgemeine thermische Behaglichkeit. Als Behaglichkeitsgrenze können - weitgehend unabhängig von der Lufttemperatur - 30 % relative Luftfeuchte gelten; gelegentliche Unterschreitungen sind vertretbar. Bei hauptsächlich kommunikativer Tätigkeit (z. B. Lehrer, Call-Center- Agenten) darf die relative Luftfeuchte 40 % nicht unterschreiten [15]. Liegen die Werte für die relative Luftfeuchte über 70%, wird das Klima als schwül empfunden.

Verschiedene Studien haben aber gezeigt, dass die Feuchte einen deutlich größeren Einfluss auf die lokale thermische Behaglichkeit hat.

Untersuchungen zur Bedeutung der Luftfeuchte für Behaglichkeit, Gesundheit und Leistungsfähigkeit

Niedrige Luftfeuchte in Innenräumen kann sowohl direkte als auch indirekte Auswirkungen auf den menschlichen Organismus haben. Die direkten Auswirkungen betreffen das thermische Empfinden und das Gefühl trockener Haut und Schleimhäute sowie, möglicherweise in Kombination mit flüchtigen organischen Verbindungen, Reizwirkungen auf Augen und Atemwege. Indirekt kann feuchte bzw. trockene Luft das Auftreten von Mikroorganismen (Pilze und Hausstaubmilben) sowie die Inidienz von Erkältungskrankheiten beeinflussen. Weitere Auswirkungen sind zurückzuführen auf die Emission organischer Verbindungen aus Einrichtungsgegenständen sowie die elektrostatische Aufladung.

Empfindung von feuchter Luft und gesundheitliche Auswirkungen

Der Zusammenhang zwischen hoher r. F. (> 50 % r. F.) bzw. feuchten Räumen und Beschwerden/Erkrankungen ist nachgewiesen. Die negativen gesundheitlichen Auswirkungen sind indirekter Natur und werden auf das verstärkte Wachstum von Mikroorganismen zurückgeführt. Im Vergleich dazu wird die Auswirkung trockener Luft (< 20 – 30 %) auf die Gesundheit wenig thematisiert. In den folgenden Ausführungen wird eine Reihe von Studien vorgestellt, die sich auch mit der Wahrnehmung und Wirkung von trockener Innenraumluft befassen. Die Untersuchungen beziehen sich auf Klimakammern, Wohnräume, klimatisierte Arbeitsräume, einige auch auf Flugzeugkabinen.

Tabelle 12:

Symptome und Beschwerden, die nach [61] mit feuchten oder schimmelpilzbelasteten Wohnräumen in Verbindung gebracht werden.

Beschwerden	Symptome
Kopfschmerzen, Müdigkeit, Konzentrationsschwäche, Gedächtnisstörungen, allgemeines Unwohlsein, Infektanfälligkeit	Brennende Augen, verstopfte oder laufende Nase, rezidivierende Sinusitis, Heiserkeit, Kratzen in der Kehle, Husten, pfeifende Atemgeräusche (Wheezing), Kurzatmigkeit, Bronchitis, Verschlechterung von Asthma

Der Mensch verfügt über keine Sensoren zur direkten Erfassung der Luftfeuchte. Die Luftfeuchte beeinflusst die thermische Behaglichkeit jedoch indirekt über die latente Wärmeabgabe. Der Wärmeverlust über den Respirationstrakt und über die Haut hängt wesentlich vom Wasserdampfpartialdruck ab. Eine höhere Feuchte bewirkt einen geringeren Wärmeverlust, die Luft wird somit als wärmer empfunden. Bei niedrigen Temperaturen wird die Luft generell als weniger trocken empfunden als bei höheren Temperaturen. Beispielhaft hierfür ist in Tabelle 12 eine epidemiologische Untersuchung von Jaakkola et. al. [60] an 329 Angestellten in einem Bürogebäude aufgeführt, in dem Beschwerden über das Innenraumklima vorlagen. Wie aus der Tabelle hervorgeht, bestand ein linearer Zusammenhang zwischen der Raumtemperatur und der Empfindung von Trockenheit. Die Luftfeuchte bei diesen Untersuchungen war mit 10 - 15 % r. F. sehr niedrig.

Tabelle 13:
Trockenheitsempfindung bei unterschiedlichen Temperaturen und einer Luftfeuchte von 10 - 15% (gekürzt aus Jaakkola et. al. [60])

Urteil [%]	Temperatur [°C]			
	□ 22	> 22 □ 23	> 23 □ 24	> 24
Zufrieden	26	22	17	5
manchmal trocken	55	40	36	35
immer trocken	19	38	48	60

In skandinavischen Ländern ist die Luft während der Wintermonate sehr trocken. Klimaanlage mit Luftbefeuchtung gehören dort auch in Büros und ähnlichen Gebäuden nicht zum Standard. In Gebäuden mit Fensterlüftung liegt die r. F. in den Wintermonaten üblicherweise zwischen 10 und 30 %. Feldstudien in finnischen Bürogebäuden haben gezeigt, dass die Aussagehäufigkeit "trockene Luft" signifikant zurückging, wenn die Raumluft künstlich befeuchtet wurde [92] und [91]. Die Unterschiede in den r. F. zwischen den Gruppen "mit Befeuchtung/ohne Befeuchtung" betragen maximal 20 bis 30 %. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam auch eine schwedische Studie in einem Krankenhaus [85]. In dem Gebäudeflügel mit Klimaanlage (40 – 45 % r. F.) sank die Wahrnehmungshäufigkeit von trockener Luft deutlich von 73 % der Befragten (zu Beginn der Studie) auf 24 % (nach vier Monaten Befeuchtung); in der Kontrollgruppe war dieser Parameter nur geringfügig verändert. Tabelle 14 gibt eine Übersicht über diese Studien.

Tabelle 14:
Feldstudien zu objektiven und subjektiven Wirkungen niedriger Luftfeuchte.

	Reinikainen, Jaakkola, Heinonen (1991)	Reinikainen, Jaakkola, Seppänen (1992)	Nordström, Norbäck, Akselsson (1994)
Zeitraum der Studie / Land	Feb. - Apr. 1988 Finnland	Jan. - Feb. 1988 Finnland	Dez. - Apr. 1992 Schweden
Studienpopulation	257 Büroangestellte	211 Büroangestellte 48 % männlich 24 - 55 Jahre alt	90 Krankenhauspersonal < 8 % männlich 36-40 Jahre alt (med. Alter/Gruppe)
Studienauslegung	Querschnittstudie; 3 Untersuchungen in 2 vergleichbaren Gebäudeteilen mit und ohne Luftbefeuchtung	Crossover-Studie; 6 Zeiträume (jeweils 1 Woche) in 2 vergleichbaren Gebäudeteilen mit und ohne Befeuchtung	Längsschnittstudie; 4 relativ neue Krankenhauseinheiten, 2 mit Befeuchtung, 2 ohne Befeuchtung für jeweils 4 Monate
Luftfeuchte (r.h.)	45 - 55 % (mit Befeuchtung) 10 - 20 % (Kontrolle, Feb.) 20 - 25 % (Kontrolle, März, April)	30 - 40 % (mit Befeuchtung) 20 - 30 % (natürliche Befeuchtung) Temp. 21 - 23 °C	35 - 45 % (Durchschnitt 40 %) vs. 28 - 38 % (Durchschnitt 31 %) Temp. 21 - 23 °C
Parameter (Fragebogen)	Auswertung von Wahrnehmung und Symptomen von Trockenheit	Auswertung von Wahrnehmung und Symptomen von Trockenheit; allergische Symptome; Luftqualität	Beurteilung des Klimas und SBS-Symptome
Ergebnisse	Gefühl von Trockenheit, trockene Haut, Hals und Nase sowie Reizungen der Nasenschleimhaut wurden in signifikanter Weise bei höherer Luftfeuchte reduziert	Gefühl von Trockenheit, Trockenheitssymptome und allergische Symptome werden durch Befeuchtung reduziert, Gefühl von schlechter Luftqualität steigt mit Befeuchtung	Gefühl von Trockenheit, Atemwegssymptome und elektrostatische Aufladung werden mit Befeuchtung reduziert, keine Veränderung mit Kontrollen

Die Befunde der zitierten Studien stehen in deutlichem Widerspruch zu einer großen Zahl von Erhebungen zum Sick-Building-Syndrom (SBS), wo zwischen dem Auftreten von SBS-Symptomen und RLT-Anlagen mit Befeuchtung ein starker Zusammenhang festgestellt wurde. Vergleichende Untersuchungen von Kröling [66] an klimatisierten Arbeitsplätzen zeigten, dass hier signifikant häufiger über trockene Luft geklagt wird als an natürlich belüfteten Arbeitsplätzen (Kontrollgebäude). Die r. F. in den klimatisierten Gebäuden lag weitgehend im empfohlenen Bereich zwischen 40 und 60 %, auf keinen Fall aber unter der in den Kontrollgebäuden. Auch in einer umfangreichen Untersuchung von Sundell [102] unter Beteiligung von über 5000 Büroangestellten korrelierte der von den Betroffenen geäußerte Eindruck von "trockener Luft" gut mit den sonstigen SBS-Symptomen, keineswegs aber mit der tatsächlich gemessenen r. F. in den Räumen.

Allerdings kann das Gefühl der Trockenheit bzw. die Empfindung von trockenen Atemwegen, Augen und Haut auch von chemischen und biologischen Luftverunreinigungen hervorgerufen werden. So wurde aus Kammeruntersuchungen mit einem Gemisch aus flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) neben Reizungen und anderen negativen gesundheitlichen Auswirkungen auch über trockene Atemwege, Augen und Haut berichtet (Rev. von Molhave [83]).

Trockene Luft und gesundheitliche Beeinträchtigungen

Unabhängig davon, ob der Mensch in der Lage ist, Unterschiede in der r. F. als solche wahrzunehmen, wird generell angenommen, dass trockene Luft negative gesundheitliche Auswirkungen hat oder zumindest haben kann. Relative Luftfeuchten von weniger als 30 % gelten als belastend für die feuchten Schleimhäute des Respirationstraktes und der Augen sowie für die Haut.

Gemäß der vielzitierten Kammeruntersuchungen aus [4] und [3] führte bei gesunden und jungen Probanden, die über einen Zeitraum von 4 Stunden trockener Luft (10 % r. F., 23 °C) ausgesetzt waren, zu keiner Beeinträchtigung des nasalen Schleimflusses. Ebenso bewirkte ein 8-stündiger Aufenthalt in feuchter Luft (68 % r. F.) keine Verbesserung dieser wichtigen Schleimhautfunktion. Diese Ergebnisse wurden in einer Folgeuntersuchung bestätigt: Die Probanden waren über drei Tage lang einer relativen Luftfeuchte von 9 % ausgesetzt [2]. Die Autoren schließen aus diesen Versuchen, dass bei reiner Nasenatmung die Anfeuchtungskapazität der Nase auch bei längerer Exposition in sehr trockener Luft noch ausreicht, um die fehlende Luftfeuchte zu kompensieren. Die Versuche wurden mit gefilterter und somit partikelfreier Kammerluft durchgeführt und können daher nicht ohne weiteres auf "normale" Umgebungsluft übertragen werden, die ja immer Verunreinigungen enthält.

Tabelle 15:
Feldstudien zu objektiven und subjektive Auswirkungen niedriger Luftfeuchte.

Autoren (Jahr)	Wyon (1992)	Norbäck, Wieslander, Nordström, Walinder, Venge (2000)
Zeitraum der Studie / Land	Feb. - März 1990	Jan. - März 1997 / Schweden
Studienpopulation	339 Krankenhauspersonal	32 Krankenhauspersonal
Studienauslegung	Experimentelle Studie	Experimentelle Studie
Luftfeuchte (r.h.)	25 % r. F. für 3 Wochen (Kontrolle) 40 % r. F. für 3 Wochen (mit Befeuchtung)	35 % r. F.; 22,5 °C (Kontrolle) 43 % r. F.; 22,5 °C (mit Dampf-befeuchtung) Dauer: 6 Wochen; nach 6 Wochen Wiederholung
Parameter (physiologische Tests, Fragebogen)	Auswertung von berichteten SBS-Symptomen; Beurteilung der Haut durch Experten etc. Tear Film Brake-up Time (BUT)	Physiologische Tests: Stabilität der Tränen, offene Nase, Biomarker bei Nasenspülung; Fragebogen zu Symptomen;
Ergebnisse	Subjektives Gefühl von Unbehaglichkeit (Augen) in Zusammenhang mit reduzierter Tear Film Brake-up Time; Befeuchtung reduzierte SBS-Symptome; Reduktion von Symptomen der trockenen Haut (berichtet und objektiv bestimmt)	Reduziertes Gefühl von Trockenheit und Verbesserung der Hautsymptome durch Befeuchtung; Keine messbaren physiologischen Veränderungen

In den Feldstudien (Tabelle 15) berichteten die Studienteilnehmer über weniger Trockenheitssymptome, wenn die ursprünglich niedrigen r. F. auf etwa 40 – 45 % r. F. angehoben werden. Signifikante Verbesserungen durch die Befeuchtung wurden für folgende Beschwerdebereiche ermittelt:

- Nasen-Rachenraum
- Auge
- Haut
- Schweregefühl im Kopf
- Allergische Symptome

Allgemeine Beschwerden wie z. B. Kopfschmerzen, Müdigkeit u. ä. wurden durch die Änderungen in der Luftfeuchte in den meisten Fällen nicht beeinflusst. In den zitierten Untersuchungen waren die Befeuchtungssysteme der Klimaanlage frei von mikrobiologischen Kontaminationen und die Schadstoffbelastung der Räume war unauffällig.

Aufschluss über den Zusammenhang zwischen trockener Luft und den oben beschriebenen Symptomen gibt eine Studie von Lindgren et. al. [79]. Bei Angestellten der Skandinavischen Fluggesellschaft wurden Unbehagen und Reizsymptome in den Wintermonaten untersucht. Die berichteten Beschwerden der Crew wurden dabei mit denen von Büroangestellten der gleichen Gesellschaft verglichen (Tabelle 16). Messungen zur Luftfeuchte wurden nicht durchgeführt,

doch ist aus anderen Untersuchungen bekannt, dass die r. F. in Flugzeugen sehr niedrig ist und im Mittel bei etwa 17 % liegt. Allgemeine Symptome (wie Müdigkeit, Kopfschmerzen u.ä.) traten bei beiden Gruppen in etwa der gleichen Häufigkeit auf, während Beschwerden des Respirationstraktes und der Haut bei der Flugzeugcrew signifikant häufiger waren. Besonders ausgeprägt waren die Symptome bei allergisch veranlagten Personen und auf Langstreckenflügen. Da bei letzteren das Rauchen erlaubt war, kann von einer Wechselwirkung zwischen trockener Luft und den Wirkungen des Passivrauchens (ETS) ausgegangen werden, da auch Exposition gegenüber ETS häufig mit Reizungen und Trockenheitsgefühlen an Augen, Haut und Atemwegen verbunden ist.

Tabelle 16:
Symptome und gesundheitliche Probleme in Flugzeugen – Vergleich zwischen Flugzeugbesatzung und Büroangestellten (Lindgren et. al.[79].)

Symptome	Flugzeugbesatzung (n=1513) in %	Büroangestellte (n=168) in %	Vergleich zwischen Flugzeugbesatzung und Büroangestellten	
			ORb	Signifikanz
Schnelle Ermüdung	21	22	0,94	n. s.
Gefühl von Schwere	7	8	0,70	n. s.
Kopfschmerzen	6	4	1,04	n. s.
Schlechte Konzentration	1	3	0,49	n. s.
Augen (Juckreiz, Brennen, etc.)	11	8	1,08	n. s.
Nase (Probleme mit der Nasenschleimhaut)	15	6	3,12	p < 0,01
Rachenraum (Heiserkeit, trockener Hals)	8	1	5,75	p < 0,05
Husten	4	0	-	-
Gesichtshaut (trocken und rot)	12	7	2,03	p < 0,05
Kopfhaut (Schuppen, Juckreiz)	8	7	1,92	n. s.
Haut der Hände (trocken, rot, Juckreiz)	12	4	3,68	p < 0,01

a: Daten zu den Symptomen während der letzten 3 Monate durch eine 3-stufige Skala (häufig/jede Woche - manchmal - nie).

b: OR = Odds Ratio, angepasst an Alter, Geschlecht, Atopie, Rauchen und psychosoziale Variablen.

n. s.: Unterschiede zwischen Flugzeugbesatzung und Büroangestellten sind nicht signifikant.

p<0,05 od. p<0,01: Die Unterschiede sind signifikant.

Indirekte Wirkungen der Luftfeuchte

Da die Luftfeuchte auf unterschiedliche Weise das Wachstum und die Verbreitung von Krankheitserregern beeinflussen kann, könnten auch indirekte Zusammenhänge zwischen trockener Luft und Erkältungskrankheiten bestehen. Zudem haben Infektionskrankheiten auch in Ländern ohne große Schwankungen der Luftfeuchte saisonale Verläufe. Nach einer Wertung in [7] über die indirekten gesundheitlichen Wirkungen trockener Luft, liegt die optimale Luftfeuchte zur Minimierung aller betrachteten Effekte zwischen 40 und 60 % r.F. Bild 78 gibt einen Überblick über die Bedeutung der Luftfeuchte für das Auftreten der verschiedenen biologischen und chemischen Faktoren.

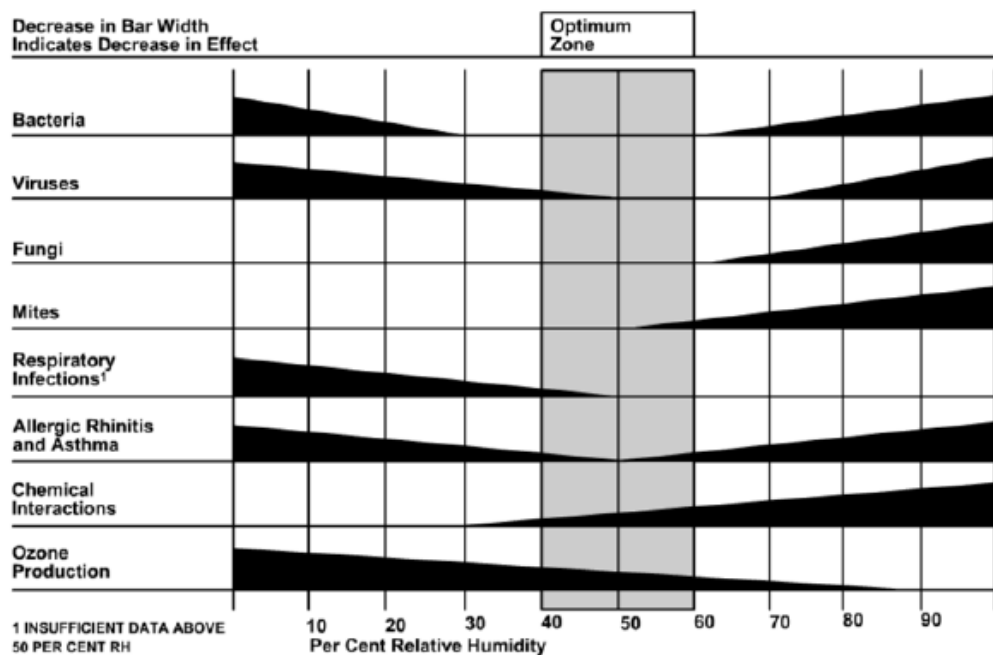


Bild 78:
Optimale relative Luftfeuchte zur Minimierung negativer gesundheitlicher Auswirkungen (aus Arundel et. al. [7])

Luftfeuchte und das Wachstum von Mikroorganismen

Wie bereits oben erwähnt, bevorzugen Bakterien und Viren, je nach Art, unterschiedliche Luftfeuchten. Die für den sog. Schnupfen häufig verantwortlichen Rhinoviren werden beispielsweise bei einer r.F. unter 50 % schnell inaktiv. Schimmelpilze benötigen zum Wachstum eine r.F. von über 80 %, Hausstaubmilben wachsen stärker bei r.F. von mindestens 60 % (Bild 78). Dem erhöhten Auftreten von Pilzen und Milben in Innenräumen mit hoher r.F. oder Tauwasserbildung wird eine Reihe von negativen gesundheitlichen Auswirkungen zugeschrieben, zu denen Atemwegsbeschwerden, Schleimhautreizungen u.ä. gehören. Einige der Symptome ähneln den direkten Auswirkungen sehr trockener Luft.

Die obere Grenze der Luftfeuchte von 70 % in den einschlägigen Regelwerken wird mit dem verstärkten Auftreten von Milben und Schimmelpilzen, also mit indirekten Wirkungen, begründet. Unterhalb der Schwülegrenze hat hohe Luftfeuchte keine negativen gesundheitlichen Wirkungen.

Luftfeuchte und empfundene Luftqualität

Menschen nehmen die Luftqualität mit zwei Sinnen wahr: Der Geruchssinn (olfaktorischer Sinn) befindet sich in der Nasenhöhle, die chemische Wahrnehmung befindet sich über den Schleimhäuten in der Nase und in den Augen. Die gemeinsame Reaktion beider Sinne bestimmt, ob die Luft als frisch und angenehm oder abgestanden, stickig und reizerzeugend empfunden wird. Die Thermorezeptoren der Nase wurden in Bezug auf die empfundene Luftqualität lange Zeit außer Acht gelassen. Neuere Studien zeigen jedoch, dass sowohl die Lufttemperatur wie auch die Luftfeuchte einen deutlichen Einfluss auf die Akzeptanz von Raumluft haben.

Unter kontrollierten Bedingungen wurde mit zunehmender Temperatur und/oder zunehmender Feuchte auch saubere Luft generell als weniger akzeptabel empfunden [13], [40], [41], [46] und [104]. Ausgehend von Kammeruntersuchungen entwickelten Berglund und Cain mit den Parametern Lufttemperatur, Taupunkt und Metabolismus eine Regressionsgleichung zur Beurteilung des Merkmals "abgestanden". Auf ähnliche Weise stellten Fang et. al. einen Zusammenhang zwischen Geruchsempfindung, Akzeptabilität und Enthalpie der Luft her (s. Bild 79). Die thermodynamische Größe Enthalpie, die hier für den Energieinhalt von Luft steht, vereinigt die kombinierten Auswirkungen von Temperatur und Feuchte. In beiden Untersuchungen nahm mit steigender Enthalpie der Luft die Empfindung "abgestanden" zu und die Akzeptanz der Kammerluft ab. Die Auswirkung der Temperatur war dabei stärker ausgeprägt als die der r.F. Den Untersuchungen lag bei Fang ein Bereich von 18 – 28 °C und 30 – 70 % r.F. mit Ganzkörperexposition zugrunde (Bild 80).

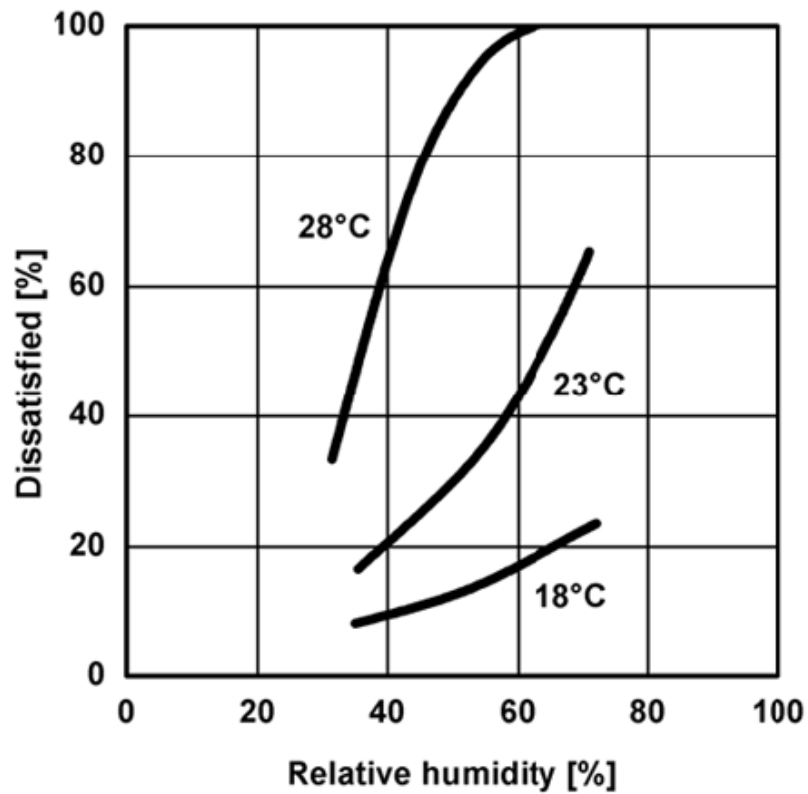


Bild 79:
Empfundene Luftqualität in Abhängigkeit von der Temperatur und Feuchtigkeit. Angepasst nach Fang et. al..

Untersuchungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik haben ergeben, dass der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die empfundene Luftqualität (Geruchswahrnehmung) in Innenräumen temperaturabhängig ist [81]. Die Zusammenhänge sind im Einzelnen in Bild 80 zusammengestellt.

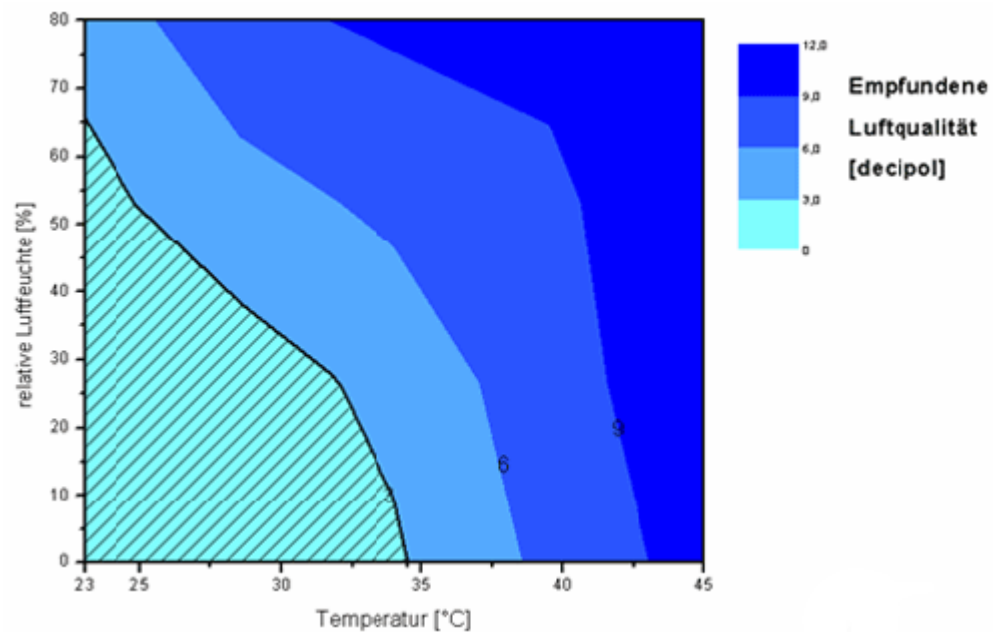


Bild 80:

Darstellung der Ergebnisse aus Versuchsreihe 1: Beurteilung reiner Luft bei unterschiedlichen Temperaturen und relativen Luftfeuchten. Die schraffierte Fläche kennzeichnet den Bereich, in dem eine empfundene Luftqualität < 3 decipol ermittelt wurde.

In Untersuchungen von Wolkoff [113] zur temperaturabhängigen Emission von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) aus verschiedenen Baumaterialien führte eine Erhöhung der r.F. von 0 auf 50 % zu einer anfänglich verstärkten Freisetzung von VOC. Nach drei Wochen Belüftung waren die Emissionen im Temperaturbereich von 23 – 35 °C weitgehend unabhängig von Temperatur und Feuchte. Nach anderen Untersuchungen war der Effekt der Luftfeuchte auf Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus Teppichen – bis auf Anilin – vernachlässigbar [100]. Eine Erhöhung der r.F. von 30 % auf 70 % (bei 22 °C) verdoppelte dagegen die Emission von Formaldehyd aus Spanplatten. Bei Ozon führt niedrige Luftfeuchte allerdings zu einer Erhöhung der Konzentrationen in Innenräumen, da unter diesen Bedingungen die Adsorption der Ozonmoleküle an Oberflächen verringert ist.

Weitere indirekte bzw. unerwünschte Auswirkungen niedriger Luftfeuchte sind eine höhere Staubbelastung der Raumluft und eine stärkere elektrostatische Aufladung von Ausstattungsmaterialien.

6.1.2 Substantielle Schädigungen

Es gibt drei verschiedene Arten der durch relative Luftfeuchte verursachten substantiellen Schädigung:

- Einfluss auf Maßhaltigkeit und Form
- Chemische Reaktion
- Biologischer Verschleiß
-

Für die Lagerung von hygroskopischen Materialien und für spezielle industrielle Prozesse können besondere Temperaturen und Luftfeuchten erforderlich sein. Dies muss den Planern vor dem Entwurf der Gebäudehülle bekannt sein, allgemein gültige Richtlinien existieren hier allerdings nicht.

Erhaltung des kulturellen Erbes

Gebäude, in denen Antiquitäten und kostbare Kunstwerke aufbewahrt werden, benötigen spezielle Feuchte- und Temperaturbedingungen. Allgemein sind hier etwas höhere relative Luftfeuchten wünschenswert. Plenderleith und Werner [89] empfehlen Grenzwerte von im Minimum 50 % r. F. bis maximal 65 % r. F. in einem Temperaturbereich von 16 °C bis 25 °C. Die Ausnahme stellen Gemäldegalerien dar, bei denen eine konstante relative Luftfeuchte von 58 % und eine Raumtemperatur von 17 °C empfohlen werden. Besonders Kunstwerke reagieren empfindlicher auf kurzzeitige Schwankungen der Temperatur und Luftfeuchte als auf absolute Werte.

Beim Vergleich der empfohlenen Raumklimabedingungen von Museen mit denen von Kirchen oder Kunstsammlungen in denkmalgeschützten Gebäuden zeigen sich erhebliche Unterschiede in den definierten Anforderungen. In Museen ist das oberste Gebot die Sammlungen zu erhalten, sodass die empfohlenen, engen Toleranzen für klimatische Schwankungen in den meisten Fällen streng eingehalten werden. Im Falle von Baudenkmalern beziehen sich die Empfehlungen zum Raumklima eher auf den tatsächlichen Zustand der Objekte. Kunstwerke, die Jahrhunderte in einer Kirche ohne Schaden überdauert haben, werden wahrscheinlich in unveränderten klimatischen Umgebungsbedingungen auch weiterhin überdauern.

Ausgehend von den seit Mitte des 20. Jahrhunderts sehr streng gesetzten Anforderungen für das Raumklima in Museen tendieren diese heutzutage im Allgemeinen zu einem differenzierteren Ansatz. Verschiedene Materialien werden in Bezug auf ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber klimatischen Schwankungen auf unterschiedliche Weise beurteilt. Schwankungsbereich und Häufigkeit von Temperaturen und Luftfeuchten gewinnen verstärkt an Bedeutung bei der Erhaltung von Kunstwerken. Durch die Anwendung von statistischen Analysen lassen sich mögliche Schäden bei unterschiedlichen Randbedingungen einschätzen. Auf diesem Gebiet besteht allerdings noch erheblicher Forschungsbedarf.

Es gibt auch grundlegende Unterschiede bei der Frage des Raumklimas. Seit Mitte des vorigen Jahrhunderts gibt es strenge Grenzwerte für Museen, wohingegen der Denkmalschutz eindeutig einen pragmatischen, oft am tatsächlichen Zustand eines Gebäudes orientierten Ansatz verfolgt. Allerdings ist es weder Museumskonservatoren noch Denkmalschützern gelungen allgemeingültige Richtlinien für das Raumklima zu etablieren. Es gibt zwar zahlreiche Empfehlungen für Raumklimabedingungen [55], der Großteil davon gründet sich jedoch auf empirischen Erfahrungen. In den folgenden Abschnitten werden die grundlegenden Ursachen der Schadensprozesse und die wichtigsten gegenwärtigen Ansätze zur Risikoeinschätzung vorgestellt.

Schadensursachen und Risiken

Abgesehen von der Beschädigung und Zerstörung durch Menschenhand können die meisten Schäden an Kunstgegenständen klimatischen Auswirkungen zugeschrieben werden. Eine niedrige relative Luftfeuchte lässt Materialien schrumpfen oder spröde werden, wohingegen eine hohe relative Luftfeuchte zur Wasseraufnahme und demzufolge zum Aufquellen führt. Aufgrund von Veränderungen der klimatischen Randbedingungen können Spannungen auftreten, die zu Schäden oder zur fortschreitenden Zerstörung führen. Der meist inhomogene Aufbau aus verschiedensten Materialien fördert dabei inhärente Spannungen und als Folge davon eine potentielle zunehmende Schädigung. Darüber hinaus ist der Zustand eines Kunstgegenstandes nicht nur von seinem Aufbau, sondern auch von seinem Alter abhängig. Auch die chemischen Materialeigenschaften können sich aufgrund vorhandener Feuchtigkeit verschlechtern. Als Beispiel ist hier die Oxidation von Metallen oder die Glaskorrosion zu nennen. Feuchtigkeit ist zudem eine wesentliche Voraussetzung für Schimmelpilzbildung und mikrobiellen Bewuchs.

Beim Denkmalschutz verursachen signifikante Änderungen der Raumluftfeuchte und -temperatur ebenfalls Änderung der Maßhaltigkeit. Die daraus resultierenden Spannungen in Verbundwerkstoffen führen wiederum zu Schäden. Demzufolge müssen auch hier kurzfristige Schwankungen in Luftfeuchte und Temperatur auf ein Minimum begrenzt werden (stündliche und tägliche Zyklen).

Für gewöhnlich sind Maßänderungen infolge Temperaturschwankungen deutlich geringer als die infolge schwankenden Feuchtegehalts. Aus diesem Grund werden auch Schwankungen der Temperatur als weniger kritisch angesehen. Zudem sind niedrige Temperaturen teilweise sogar förderlich für den Erhalt, da einige chemische Prozesse dann langsamer ablaufen [8]. Allerdings werden verschiedene organische Materialien bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt spröde. Es besteht dann außerdem die Gefahr von Frostschäden.

Der relativen Luftfeuchte wird demnach die größte Bedeutung in Museen und denkmalgeschützten Gebäuden beigemessen. Für den oberen Grenzwert ist dabei das Risiko des mikrobiellen Bewuchses ausschlaggebend. Grundsätzlich erfordert die Risikoabschätzung in Bezug auf Mikroorganismen eine Betrachtung der klimatischen Oberflächenbedingungen. Hier sind besonders auch Wärmebrücken mit einzubeziehen, die die thermisch schwächsten Punkte einer Konstruktion darstellen. Um zu hohe relative Luftfeuchten an kalten Bauteiloberflächen zu vermeiden wird für den Gebäudebestand für die Heizperiode eine maximale relative Luftfeuchte von 50 % empfohlen. Im Sommer gelten Werte zwischen ca. 60 % und 65 % als unkritisch. Die einschlägigen ASHRAE Richtlinien von 2003 [9] geben 60 % r. F. als Untergrenze für möglichen mikrobiellen Bewuchs an der Materialoberfläche an. Zur exakten Abschätzung des Risikos von Schimmelpilzbildung stellt Sedlbauer ein Isoplethenmodell (s. Bild 4.1) vor. Die Wachstumsbedingungen von mehr als 150, für Gebäude relevante Pilzarten, wurden hierzu zusammengetragen und analysiert [97]. Allerdings kann auch Trockenheit einen schädlichen Einfluss auf Kunstwerke haben. Werte unter 40 % r.F. werden als kritisch eingestuft, weil da die Versprödung einiger organischer Materialien einsetzt (z.B. Polymere in tierischem Leim). Sind Salze vorhanden, von denen zu befürchten ist, dass sie sich schädlich auf ein Bauwerk auswirken, muss die zulässige relative Luftfeuchte separat bestimmt werden, wobei auch Kristallisierungsprozesse in Betracht gezogen werden müssen.

Anforderungen an das Raumklima in Museen

Die für Museen lange Zeit maßgeblichen ICOM-Vorschriften [82] stammen aus einer von mehreren Institutionen durchgeführten Untersuchung. Diese war auch Grundlage für die allgemein gültigen Empfehlung eines Raumklimas bei 50 % r. F. und 20 °C mit meist geringen Abweichungen von beispielsweise ± 3 % r. F. und ± 1 K. Wie zuvor kurz erläutert, ist heutzutage der Ansatz viel differenzierter. Es wird einerseits nach Materialien unterschieden, andererseits saisonal bedingte klimatische Veränderungen im Verlauf eines Jahres berücksichtigt [19], [54], [65]. Da scheint es auch vernünftig zu sein, die klimatischen Anforderungen den jahreszeitlichen Randbedingungen anzupassen. Die für strikte Einhaltung einer r.F. von 50 bzw. 60 % und 20 °C erforderliche Raumluftbefeuchtung kann zu erheblichen Feuchteproblemen und Feuchteschäden in

denkmalgeschützten Bauwerken führen. Zu nennen sind hier beispielsweise Tauwasser oder Schimmelpilzbildung. Diese Art der Raumklimatisierung hat außerdem einen extrem hohen Energieverbrauch zur Folge.

Ein Standardwerk ist bis zum heutigen Tag "The Museum Environment" von Thomson (1986) [103]. Thomson fordert das Raumklima entsprechend der geographischen Gegebenheiten des jeweiligen Standortes zu wählen. In kalten Regionen mit sehr trockener Luft kann die Raumluftbefeuchtung besonders im Winter zu Tauwasserbildung führen. Deshalb sollte in solchen Regionen eine niedrigere relative Luftfeuchte als in tropischen Gebieten angestrebt werden. Für Museen von besonderer oder nationaler Bedeutung schlägt Thomson einen höheren Standard vor. Weniger bedeutende Museen sollten Werte zwischen 40 % und 70 % r.F. (s. Tabelle 17) anstreben und dafür besonders empfindliche Materialien gesondert in Vitrinen oder hinter Glas aufbewahren.

Tabelle 17:
Werte für Raumklimadaten nach Thomson [103] (1986).

	hochrangig	weniger bedeutend
Temperatur	Winter 19 ± 1 °C Sommer bis zu 24 ± 1 °C	Ausreichend konstant für stabile r. F.
Relative Luftfeuchte	50 oder 55 ± 5 % r. F.	40 - 70 % r. F.
Relative Luftfeuchte, heterogene Sammlungen	45 - 60 % r. F.	40 - 70 % r. F.

In deutschsprachigen Ländern wird der Veröffentlichung von Hilbert mit dem Titel "Sammlungsgut in Sicherheit" (1981, 1996, 2002) eine ähnliche Bedeutung beigemessen wie das Werk von Thomson auf internationaler Ebene. Hier werden Werte von 35 % r. F. bis 65 % r. F. für die relative Luftfeuchte angegeben. Allerdings unterscheiden sich die optimalen Bedingungen in Abhängigkeit vom Material. Erfahrungsgemäß soll Metall und Papier vorzugsweise trocken aufbewahrt werden, wohingegen für Holz und Leinwand optimale Lagerbedingungen bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 50 % und 60 % vorliegen. Für Kunstgegenstände, die aus verschiedenen Materialien bestehen, muss für den zu wählenden Sicherheitsbereich ein Kompromiss gefunden werden. Aus Rücksicht auf die Behaglichkeit der Besucher sollte die Raumtemperatur in einem Museum zwischen 18 °C und 25 °C liegen. Temperaturen um die 16 °C sind zwar einigen Materialien am zuträglichsten, doch praktisch nicht umsetzbar (s. [54]). Für das Raumklima in Gebäuden, die bauphysikalisch als kritisch eingestuft werden, werden Werte für saisonalbedingte Temperaturschwankungen von 20 °C bis 24 °C und relative Luftfeuchten von 45 % bis 55 % empfohlen. Insgesamt gesehen sind nicht die absoluten Werte der relativen Luftfeuchte entscheidend, sondern wie häufig Schwankungen auftreten. Deshalb sollten kurzzeitige Schwankungen, die durch Abweichung bei der Regelung verursacht werden, auf einem Minimum von höchstens ± 2 K für die Raumtemperatur und höchstens ± 2 % r. F. für die relative Feuchte gehalten werden. Bei Burgmester [19] wird zum ersten Mal ein Ansatz beschrieben, der die Bedeutung der Extremwerte nach der statistischen Häufigkeit des Auftretens mit einbezieht.

Im ASHRAE-Anwendungshandbuch (2003) wird in dem unter der Schirmherrschaft von Stefan Michalski (Canadian Conservation Institute) entstandenen Kapitel "Museums, Libraries, and Archives" (Museen, Bibliotheken und Archive) ein differenzierter Ansatz beschrieben. Ähnlich wie im Buch von Thomson basieren die Überlegungen auf einem Zielwert von 50 % r. F. (und einem Sollwert für die Temperatur zwischen 15 °C und 25 °C) oder einem "historischen" Jahresdurchschnitt für ständige Sammlungen. Abhängig von der betrachteten Raumklimaqualität, wird zwischen den Klassen AA und A bis einschließlich D unterschieden (s. Tabelle 18), denen verschiedene zulässige Spielräume für kurzzeitige Schwankungen, saisonalbedingte Anpassung der Raumklimaparameter und verschiedene Risikokategorien beigemessen werden.

Tabelle 18:
Spezifikationen für Temperatur und relative Luftfeuchte für Museumsgebäude,
Bibliotheken und Archive, ASHRAE (2003) [9].

Type	Set Point or Annual Average	Maximum Fluctuations and Gradients in Controlled Spaces			Collection Risks and Benefits
		Class of Control	Short Fluctuations plus Space Gradients	Seasonal Adjustments in System Set Point	
General Museums, Art Galleries, Libraries and Archives All regarding and retrieval rooms, rooms for storing chemically stable collections, especially if mechanically medium to high vulnerability.	50 % rh (or historic annual average for permanent collections) Temperature set between 15 and 25 °C Note: Rooms intended for loan exhibitions must handle set point specified in loan agreement, typically 50%rh, 21°C, but sometimes 55% or 60%rh.	AA Precision control, no seasonal changes	±5%rh ±2K	Relative humidity no change Up 5 K; down 5 K	No risk of mechanical damage to most artifacts and paintings. Some metals and minerals may degrade if 50%rh exceeds a critical relative humidity. Chemically unstable objects unusable within decades.
		A Precision control, some gradients or seasonal changes, not both	±5%rh ±2K	Up 10%rh, down 10%rh Up 5 K; down 10 K	Small risk of mechanical damage to high-vulnerability artifacts; no mechanical risk to most artifacts, paintings, photographs and books. Chemically unstable objects unusable within decades.
			±10%rh ±2K	RH no change Up 5 K; down 10 K	
		B Precision control, some gradients plus winter temperature setback	±10%rh ±5K	Up 10% down 10%rh Up 10 K, but not above 30°C Down as low as necessary to maintain RH control	Moderate risk of mechanical damage to high-vulnerability artifacts; tiny risk to most paintings, most photographs, some artifacts and most books. Chemically unstable objects unusable within decades, less if routinely at 30°C, but cold winter periods double life
		C Prevent all high risk extremes	Within 25 to 75 % rh year-round Temperature rarely over 30°C, usually below 25°C	High risk of mechanical damage to high-vulnerability artifacts; moderate risk to most paintings, most photographs, some artifacts, some books; tiny risk to many artifacts and most books. Chemically unstable objects unusable within decades, less if routinely at 30°C, but cold winter periods double life.	
D Prevent dampness	Reliably below 75% rh	High risk of sudden or cumulative mechanical damage to most artifacts and paintings because of low humidity fracture; but avoids high-humidity			

				delamination and deformations, especially in veneers, paintings, paper and photographs. Mold growth and rapid corrosion avoided. Chemically unstable objects unusable within decades, less if routinely at 30°C, but cold winter periods double life.
Archives, Libraries	Cold Store: -20°C, 40%rh	±10%rh ±2K		Chemically unstable objects usable for millennia. Relative humidity fluctuations under one month do not affect most properly packaged records at these temperatures (time out of storage becomes lifetime determinant).
	Cold Store: 10°C, 30 to 50%rh	(Even if achieved only during winter setback, this is a net advantage to such collections, as long as damp is not incurred)		Chemically unstable objects usable for a century or more. Such books and papers tend to have low mechanical vulnerability to fluctuations.
Special Metal Collections	Dry room: 0 to 30%rh	Relative humidity not to exceed some critical value, typically 30%rh		

Holmberg (2001) [56] führte Untersuchungen in einigen schwedischen Depots durch, darunter auch Skokloster Castle. Seinen Ergebnissen nach sollten für eine optimale Konservierung die empfohlenen Lagerbedingungen in einem Bereich von 40 % bis 60 % r.F. und 5 °C bis 18 °C liegen. Werte unter 30 % bis 35 % r.F. sollten vermieden werden, da dann irreversible Schäden auftreten. Ebenso sollten wegen des Schimmelpilzrisikos relative Luftfeuchten von mehr als 65 % bis 70 %, vermieden werden. Nach Holmberg sind Abweichungen von ±15 % r.F. im Verlauf von 24 Stunden für Objekte aus Holz [56] noch tolerierbar.

Anforderungen für Leihgaben in Ausstellungen

Nicht zuletzt sind es die für Leihgaben in Ausstellungen erforderlichen Raumklimabedingungen, die zu einer starken Zunahme an streng formulierten klimatischen Standards in Museen beigetragen haben. In den meisten Fällen wird im Leihgabevertrag eine detaillierte Beschreibung des Standortes angegeben, wozu auch immer die Klimatisierung der Ausstellungsräume gehört. Für gewöhnlich werden Werte zwischen 50 % und 55 % oder 60 % r. F. ± 5% r. F. bei 21 °C verlangt (Tabelle 17).

Empfehlungen zur Denkmalpflege

In den Empfehlungen des Bayerischen Landesamts für Denkmalschutz [11] zur Erhaltung von Baudenkmalern und ihren Einrichtungsgegenständen wird ein konstantes Raumklima mit einer relativen Luftfeuchte von optimal 50 % bis höchstens 65 % r. F. genannt. Dabei soll der Feuchtegehalt nicht unter 50 % r. F. fallen. Dies ist ein empirischer Wert, der aus negativen Erfahrungen beim Beheizen von Kirchen und historischen Gebäuden stammt. Hohe Luftfeuchten sollten wiederum in erster Linie wegen dem Risiko mikrobiologischen Bewuchses vermieden werden.

Räume sollten im Allgemeinen nur mäßig beheizt werden und dies, falls erforderlich, mit der gebotenen Rücksicht auf Behaglichkeit und Erhaltung. Hier wird eine Grundtemperatur von 6 °C bis 8 °C genannt. Beheizung (z.B. vor Gottesdiensten) bzw. Kühlung darf nur sehr langsam geschehen.

Das folgende Zitat spiegelt die in der aktuellen Diskussion angeführte Erfahrung von Konservatoren und Denkmalpflegern anschaulich wider: "Ein bestehendes Raumklima – ungeachtet der vorherrschenden Feuchte und Temperaturbedingungen – das sich nicht schädlich auf Einrichtungsgegenstände und Artefakte auswirkt, braucht nicht verändert werden." [12].

Vorbeugende Maßnahmen im Denkmalschutz

Zur Risikoabschätzung von Klimabedingungen gibt es eine Vielzahl von Ansätzen. Die größte Herausforderung für den Denkmalschutz in Mitteleuropa ist die häufig hohe Raumluftfeuchte in historischen Gebäuden und ein nur schwer zu erreichendes konstantes Raumklima. Aus der musealen Arbeit gibt es mehrere statistische Ansätze zur Risikoeinschätzung, die auch teilweise auf den Denkmalschutz übertragbar wären. Im Gegensatz zu Museen scheinen beim Denkmalschutz aber Lösungen für eine dezentralisierte Raumklimatisierung geeigneter. Bei dem Verständnis, welche Prozesse Schäden an verschiedenen Materialien aufgrund des Raumklimas und seiner zulässigen Schwankungen herbeiführen, bilden empirische Daten aus dem praktischen Denkmalschutz wichtige Grundlagen.

Unter dem Begriff "Präventive Konservierung" werden jegliche Maßnahmen zur Verbesserung der Aufbewahrungsbedingungen von Kunstgegenständen zusammengefasst. Hinsichtlich des Raumklimas müssen im Sinne der "Präventiven Konservierung" extreme Bedingungen vermeiden und vor allem Schwankungen minimiert werden. Da die meisten Kunstgegenstände aus unterschiedlichen Materialien bestehen, z.B. Farbschichten auf einer Grundierung und Holz als Trägermaterial, muss ein optimaler oder angemessener Bereich für alle Materialien gefunden werden. Da sich Kunstgegenstände zudem oft in ihrer Herstellungsweise unterscheiden, gilt ein so definierter Bereich oft nur für das jeweilige Stück individuell, bzw. die jeweilige Materialkombination. Für alle Zusammensetzungen gilt jedoch, dass der Gegenstand bei möglichst konstanten Bedingungen aufbewahrt optimal erhalten bleibt.

Die entscheidenden Fragen sind hierbei:

- Wie stark müssen Klimaschwankungen begrenzt werden?
- Wo genau sind Grenzwerte für eine dauerhaft schadensfreie Aufbewahrung anzusetzen?
- Welche Maßnahmen sind dabei noch wirtschaftlich vertretbar?
- Wie kann eine zufriedenstellende Behaglichkeit sichergestellt werden?

Zur Klärung dieser Fragen besteht weiterer Forschungsbedarf.

6.1.3 Maßnahmen zum Schutz der Baukonstruktion

Die für Gesundheit und Behaglichkeit des Bewohners empfohlenen Temperaturen und Luftfeuchten werden in der Regel auch gut von der Baukonstruktion getragen. Maßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilz reduzieren z.B. auch eine vorzeitige Schädigung der Raumumschließungsflächen.

Vermehrte und regelmäßige Tauwasserbildung kann Korrosion verursachen. Deshalb sollten Stahlprofile an keiner Stelle dünner als 0,5 cm sein.

Schadhafte Stellen haben eine verheerende Auswirkung auf die Lebensdauer und Haltbarkeit von Materialien. Die Haltbarkeit verhält sich gegenüber verschiedenen Substanzen unterschiedlich: Wetter, Wasser, Wärme sowie biologischer Verfall verursacht durch Schimmelpilz und Bakterien. Die Anforderung an Material und Konstruktion ist für die Raumumschließungsflächen und den Wandaufbau (Wärmedämmung) eine andere als für die Außenoberflächen bzw. den Fassadenaufbau. Die Auswirkung verschiedener Organismen auf die Lebensdauer muss sorgfältig geprüft werden.

Um Schädigungen vorherzusagen, muss zuerst einmal der Begriff selbst definiert werden. Eine Schädigung impliziert eine direkte Veränderung der Materialeigenschaften oder –strukturen. Veränderungen oder Deformationen können dabei verschiedene Ausmaße annehmen: Extreme Feuchte kann reversible oder irreversible Deformationen oder eine zunehmende Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit infolge physikalischer Veränderungen, chemischer oder biologischer Prozesse verursachen. Eine Schädigung ist z.B. erhöhter Wärmeverlust aufgrund durchfeuchteter oder luftdurchströmter Bauteile der Gebäudehülle. Andere Schädigungen sind z.B. Schimmelpilzbildung, Verfall durch mikrobiellen Bewuchs, Frost- und Tauperioden, Veränderungen der Maßhaltigkeit, Korrosion, Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), etc. Einige dieser Schädigungen sind nur optischer Natur, andere können aber auch ernste Folgen für die Gesundheit der Bewohner (Building Related Illness, verursacht durch flüchtige organische Verbindungen und Schimmelpilz) oder sogar die Standsicherheit des gesamten Gebäudes haben. [110]

Schimmelpilz

Ohne Pilze, Bakterien und andere Mikroorganismen gäbe es kein Leben auf der Erde. Diese Organismen sind für den schnellen Abbau von abgestorbenem Zellmaterial verantwortlich, welches erst durch die Aufspaltung in seine Bestandteile für einen weiteren Lebenszyklus verwertet werden kann. Deshalb sind Mikroorganismen wichtige Bestandteile unseres Ökosystems. In Gebäuden hingegen sind sie unerwünscht. Hier können günstige Wachstumsbedingungen zu einem "Befall" führen.

Die Bemühungen der letzten Jahrzehnte Transmissions- und Lüftungswärmeverluste zu reduzieren führte im Allgemeinen zu einer qualitativen Verbesserung der Bausubstanz. Trotzdem steigt die Zahl an Bauschäden durch Mikroorganismen, insbesondere durch Schimmelpilz. Laut dem dritten Bauschadensbericht der Bundesregierung [18] entstehen pro Jahr durch Schimmelpilze Schäden von über 200 Millionen Euro. Luftdichte Bauweisen zusammen mit unzureichender Raumlüftung werden als Grund für die in jüngster Zeit verstärkt auftretenden Schimmelpilzprobleme in Wohnungen genannt.

Vor der Energiekrise der 1970er Jahre waren Thermostatventile unüblich. Dementsprechend waren die Wohnungen eher überheizt. Die Temperatur wurde mittels Fensteröffnung reguliert. Die hohen Luftwechselraten, bedingt auch durch Undichtigkeiten, führten eher zu einer zu trockenen Raumluft. Die heutzutage aus energetischen Gründen übliche dichte Bauweise hingegen führt zu einer erheblichen Reduzierung der Luftwechselraten, wenn hier nicht der Nutzer "richtig" lüftet. In Folge zu geringer Luftwechselraten steigt die Raumluftfeuchte an. Dabei können Schimmelpilze nicht nur an Innenoberflächen von Außenbauteilen, sondern auch in der Konstruktion selbst auftreten, wenn diese von feucht warmer Raumluft durchströmt werden.

Die Gefahr für die Bewohner geht von den von Mikroorganismen bedingten Pathogenen (Krankheitserregern) aus.

Zur Vermeidung von Gesundheitsrisiken sind deshalb konsequente Maßnahmen erforderlich. So ist z.B. in den USA beim Verkauf eines Gebäudes der Nachweis zu erbringen, dass das Haus garantiert frei von der Schimmelpilzart *Stachybotrys atra* ist. Die Bausubstanz schädigende Wirkung des Schimmelpilzbefalls wie z.B. Bio-Korrosion oder Bio-Fäulnis ist, verglichen mit den gesundheitlichen Risiken, von geringer Bedeutung. Klagen über Schimmelpilz häufen sich besonders in gemäßigten Klimazonen. Die folgenden neun Faktoren beeinflussen die Schimmelpilzbildung:

1. Außenklima,
2. Raumlufttemperatur,
3. Feuchtebelastung,
4. Lüftung,
5. Grundriss,

6. Wärmedämmstandard der Gebäudehülle,
7. feuchtigkeitspuffernde Kapazität der Innenräume,
8. tauwassergefährdete Oberflächen,
9. Oberflächenbeschaffenheit der Raumumschließungsflächen.

Das Außenklima stellt die Randbedingung dar, wohingegen Raumlufttemperatur, Feuchtlast und Lüftung dem Einfluss des Nutzers unterliegen. Die anderen fünf genannten Faktoren sind Parameter der Planung und Ausführung.

Hens untersucht in [51] 35 Fälle von Schimmelpilzbefall. Dabei zeigt sich, dass sich mit den oben genannten neun Faktoren die Wahrscheinlichkeit für Schimmelpilzbildung ausreichend beschreiben lässt. Die zugrunde gelegte Studie wurde im Labor für Bauphysik, KU Leuven zwischen 1972 und 2002 durchgeführt. An erster Stelle der Ursachen stehen mangelnde Lüftung, große Außenwandoberflächen, niedrige Raumtemperaturen und ein schlechter Wärmedämmstandard.

In den Jahren 1998 bis 2002 wurde in Dänemark eine groß angelegte Forschungskampagne von insgesamt 13 Forschungsinstituten und 6 privaten Beratungsfirmen durchgeführt. Ziel war es aus Wissenschaft und Praxis ein möglichst breites Spektrum an Fällen von Schimmelpilzbefall und den daraus resultierenden gesundheitlichen Problemen zu erhalten [32]. Dabei sollten Grundlagen für eine sichere und kosteneffiziente Lösung zur Vermeidung von Schimmelpilzbefall während der Planung, Inbetriebnahme, Wartung und Renovierung erarbeitet werden. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Studie werden im Folgenden dargestellt:

Gesundheitliche Aspekte

Die folgenden Ergebnisse liefern klinische Tests, Befragungen an Schulen sowie Laborversuche:

- Es wurde eine klare und statistisch signifikante Korrelation zwischen der Menge an Pilzmaterial im Hausstaub und der Häufigkeit von Reizungen der Augen und oberen Atemwege zusammen mit allgemeinen Symptomen wie Kopfschmerzen, Schwindel und Konzentrationsschwierigkeiten festgestellt. Je größer die Menge an Pilzen, desto höherer die Zahl der Symptome.
- Die gefundene Korrelation, war bei Schülern mit Asthma und Heuschnupfen signifikant höher.
- Ein Zusammenhang zwischen einer starken Zunahme von Allergien der oberen Atemwege (Heuschnupfen und Asthma) sowie bestehenden Atemwegsinfektionen und der Menge an Pilz im Hausstaub wurde nicht nachgewiesen.
- Laborversuche zeigen, dass Pilze den Organismus über das Immunsystem angreifen. Eine Aktivierung des Immunsystems kann tatsächlich die in dieser Studie beobachteten Symptome hervorrufen.
- Das vermehrte Auftreten von Wasserschäden und Schimmelpilzbefall konnte weder mit der starken Zunahme der untersuchten Symptome noch mit der

Infektionsanfälligkeit, Heuschnupfen oder Asthma in Verbindung gebracht werden.

- Laboruntersuchungen sowie Feldstudien zeigen, dass die Ursache der Schimmelpilzbelastung Ablagerungen von Sporen im Hausstaub sind, die entweder durch Pilzwachstum freigesetzt oder durch Schuhwerk eingeschleppt werden. Pilz- und andere Schwebstaubpartikel können dann an die Raumluft wieder abgegeben und eingeatmet werden.
- Die Ablagerung von Hausstaub und dem darin befindlichen Schimmelpilz muss deshalb möglichst reduziert werden.

Mikrobiologische und Gebäudeaspekte

- 15 % bis 20 % der untersuchten dänischen Gebäude weisen sichtbare Feuchteschäden und Schimmelpilzbefall auf. Stichprobenuntersuchungen in von den Eigentümern selbst genutzten Wohnungen zeigten, dass 13 % von Schimmelpilz befallen waren und der Schimmelpilzbefall in den meisten Fällen zudem geringer war.
- Eine Datenerfassung hinsichtlich Feuchtigkeit und Schimmelpilz in dänischen öffentlichen Schulen ergab, dass in 9 % der untersuchten Gebäude Wasserschäden vorhanden waren. Bei 20 % gab es Anzeichen von früheren Wasserschäden. Stichproben ergaben allerdings, dass tatsächlich in der Hälfte aller Schulen Wasserschäden aufgetreten waren. Die Wasserschäden waren zumeist örtlich begrenzt und im Dachbereich zu finden.
- Dachaufbauten sind wegen mangelnder Wartung im Allgemeinen anfällig. Besonders komplizierte Dachformen sind anfällig wegen schlechter handwerklicher Ausführung oder unzureichender Planung.
- Feuchträume in Leichtbauweise, Kellerbauteile, alte Gebäude mit aufsteigender Feuchtigkeit und schlecht gewarteten Fassaden sind ebenfalls anfällig.
- Schulen oder andere Gebäude mit Wasserschäden haben nicht notwendigerweise Probleme mit Schimmelpilzen. Dies hängt von der Durchfeuchtung, der Widerstandsfähigkeit des Materials und vom Befall der Materialien vor dem Einbau ab. Bei feuchten Materialien besteht jedoch immer ein erhöhtes Schimmelpilzrisiko.

Schimmelpilz und Baumaterialien

- Holz und Holzmaterialien, Tapeten und Kleister (Stärke) bieten einem Befall den geringsten Widerstand.
- Der Anteil an organischem Material in Gips und Beton ist zwar sehr gering, sie können aber trotzdem, einen hohen Feuchtegehalt (Wasseraktivität 0,95) vorausgesetzt, von Schimmelpilz befallen werden.
- Hohe Temperaturen bis ca. 28 °C, eine raue Oberflächenbeschaffenheit und Staub begünstigen die Schimmelpilzbildung.
- Große Unterschiede zeigten sich hinsichtlich der Freisetzung und Verteilung von Sporen in der Raumluft. Freisetzung und Verteilung sind Abhängig von der Morphologie der Pilze und den physikalischen Bedingungen der Gebäude. Häufig werden vermehrt Sporen erst beim Austrocknen von pilzbefallenen Stellen abgegeben. Dies ist Teil der Überlebensstrategie der Organismen

und häufig eine Voraussetzung für die Verbreitung. Deshalb ist verständlich, warum Schimmelpilz im Staub und nicht das Ausmaß des Schimmelpilzwachstums mit den beschriebenen Symptomen in dieser Studie verglichen wurde.

- *Penicillium chrysogenum* und *Trichoderma harzianum* wurden auf Gipsplatten kultiviert. Dabei zeigten Versuche mit einer gleichmäßigen Sporenverteilung, dass auch kleinere Pilzpartikel als Sporen in der Luft freigesetzt wurden. Beim Einatmen sind diese Partikel lungengängiger als die größeren Sporen.
- Der toxische Schimmelpilz *Stachybotrys chartarum* produziert während des Wachstums Mycotoxine (Satratoxine - Pilzgifte). Bei detaillierten Untersuchungen zeigten nur 40 % der aus den Proben isolierten Pilzspezies eine Produktion dieses Giftes. Das gesamte isolierte Material produziert hingegen auch andere toxische Metabolite.

Wachstumsbedingungen für Schimmelpilz

Soll Schimmelpilz ohne Verwendung von Pestiziden vermieden werden, ist ein detailliertes Wissen um die Wachstumsvoraussetzungen notwendig. Die entscheidenden Einflussparameter dabei sind Feuchtigkeit, Temperatur [99] sowie Nährboden [94], die alle gleichzeitig über einen gewissen Zeitraum vorhanden sein müssen.

Für den Baubereich findet sich häufig in der Literatur als ausschlaggebende Bedingung für eine Schimmelpilzbildung eine relative Luftfeuchte an Bauteiloberflächen von 80 % unabhängig von der Temperatur.

Es wird aber auch eingeräumt, dass viele Arten schon bei geringerer Luftfeuchte gedeihen können (siehe z. B. [26]).

Die drei für das Wachstum erforderlichen Faktoren – Nährboden, Temperatur und Feuchte – müssen also gleichzeitig über einen bestimmten Zeitraum vorhanden sein. Die Zeit ist somit einer der wichtigsten Einflussfaktoren. Da fast immer genügend keimfähige Sporen und ausreichend guter Nährboden an Bauteiloberflächen vorhanden sind, kommt es immer dann zu Schimmelpilzwachstum, wenn die Wärme- und Feuchtebedingungen für das Wachstum gegeben sind.

Wichtige Faktoren für Schimmelpilzwachstum: Feuchtigkeit und Temperatur

Zu jeder Temperatur lässt sich die für eine gewisse Pilzaktivität einer Spezies notwendige Feuchtemenge angeben. Linien gleicher Pilzaktivität bei stationären Bedingungen werden dabei als Isoplethen bezeichnet. Das so entstehende Isoplethendiagramm [10] (siehe Bild 81) beschreibt die hygrothermischen Wachstumsvoraussetzungen eines Pilzes anhand der Sporenauskeimungszeiten und des Myzelwachstums. Unterhalb der untersten Linie (Isopleth) hört jede Pilzaktivität auf. Bei diesen ungünstigen Temperatur- und Feuchtebedingungen kann Sporenkeimung oder Wachstum ausgeschlossen werden.

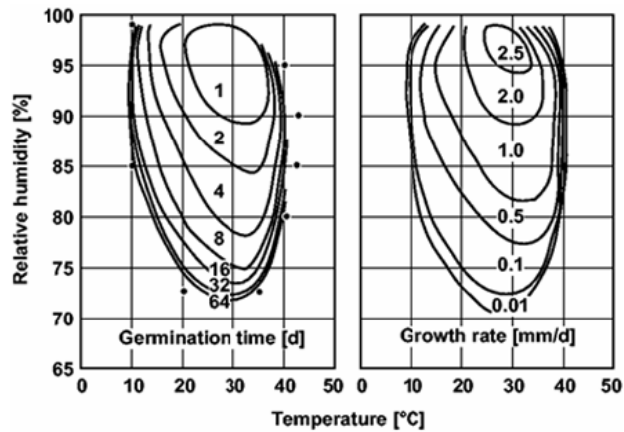


Bild 81:
 Isoplethensysteme für Sporenkeimung (links) und für Myceliumwachstum (rechts) des Schimmelpilzes *Aspergillus restrictus* nach Smith [99]. Die Isolinien zeigen in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte die Keimungszeiten in Tagen und die Wachstumsraten in mm/d (eingetragene Zahlenwerte). Die Punkte zeigen Bedingungen, unter denen nach 95 Tagen noch keine Keimung stattgefunden hatte.

Wichtige Faktoren für Schimmelpilzwachstum: Zeitabhängigkeit

Neben Feuchtigkeit und Temperatur ist, wie bereits erwähnt, die Zeit ein entscheidender Faktor. Das Wachstum kann dabei nach [24] in die in Bild 82 dargestellten verschiedene Phasen unterteilt werden. Bild 82 zeigt mikrobiologisches Wachstum bei idealen hygrothermischen Bedingungen, links in einer Flüssigkeit mit einer begrenzten Menge an zugegebener Nährlösung und rechts auf einer Materialoberfläche. Signifikant ist die Zeitverzögerung des Wachstumsbeginns. Das ist in Fällen von Wasserschaden oder Regen während der Bauphase von Bedeutung [21], [57] und [62].

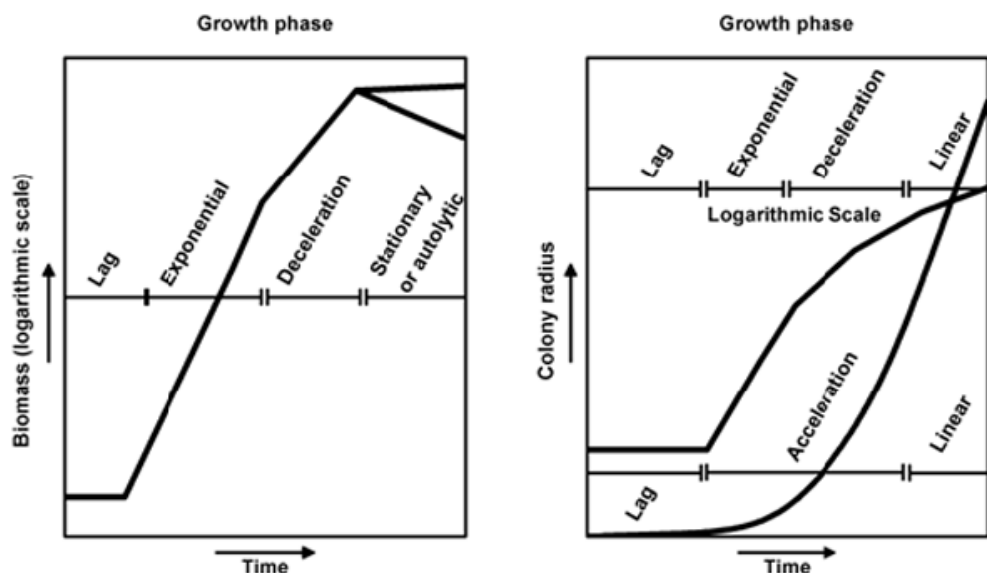


Bild 82:
 Modelle von mikrobiologischem Wachstum unter idealen hygrothermischen Bedingungen [24].

Links: Wachstum in einer Flüssigkeit mit begrenzter Menge an Nährlösung

Rechts: Wachstum auf einer Materialoberfläche

Eine umfangreiche Untersuchung des Einflusses von Feuchte, Temperatur und Einwirkdauer auf die Entwicklung von Schimmelpilz in Holz zeigte unter günstigen Wachstumsbedingungen kurze Reaktionszeiten in Kiefern-Splintholz (einige Tage bis Wochen) und lange Reaktionszeiten (einige Monate bis zu einem Jahr) unter Bedingungen nahe am Minimal- und Maximalwert der Feuchtigkeit und Temperatur [111]. Die kritischen Feuchtegehalte für Schimmelpilz nach einer bestimmten Einwirkdauer bei verschiedenen Temperaturen zeigt Bild 83.

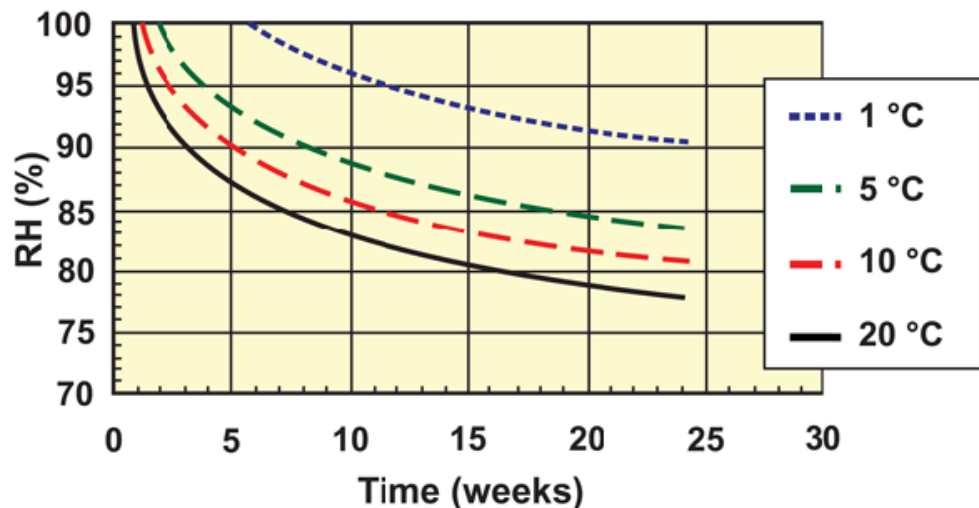


Bild 83:

Kritische Feuchte (r. F. %), Zeit (Wochen) und Temperatur notwendig für den Beginn von Schimmelpilzbildung auf Kiefern-Splintholz [108].

Bei instationären hygrischen Bedingungen wird die Gesamtreaktionszeit von der Zeitdauer hohem oder geringem Feuchteangebot sowie vom Feuchtegehalt und Temperaturniveau beeinflusst. Kurze Phasen mit hoher Feuchte bedingen kein Pilzwachstum, wenn ihnen genügend lange Phasen geringer Feuchte folgen [107]. Dauert die Phase mit hoher relativer Luftfeuchte länger als 24 Stunden an, ist die Auswirkung der gesamten Zeit bei hoher Feuchte linearer, wenn jedoch die trockenen Phasen sehr lange sind, dann kann sehr langsames oder vernachlässigbares Wachstum erwarten werden. Eine Einwirkdauer bei geringer relativer Luftfeuchte verhindert das Wachstum und wirkt sich direkt auf die gesamte zur Schimmelpilzbildung erforderliche Reaktionszeit aus.

Für die Praxis bedeutet das, dass kurze Phasen mit hoher Feuchte kein Schimmelpilzrisiko darstellen, wenn die Feuchtebelastung nicht über einen längeren Zeitraum anhält. So sind z. B. 95 % r. F. über einen Zeitraum von 2 Stunden am Tag nicht schädlich, wenn konstante Mikroklima-Bedingungen der Materialien nicht unter 75 % r. F. fallen. Wenn die relative Feuchte der Raumluft hoch ist (z. B. über 50 % im Winter), können Temperaturschwankungen Tauwasserbildung oder hohe relative Feuchte in der Nähe von Oberflächen zur Folge haben. Bei hoher relativer Luftfeuchte begünstigt das Absinken der Temperatur die

Kondensation der Feuchtigkeit auf Materialoberflächen und erzeugt damit die den mikrobiellen Bewuchs stark fördernde Feuchtigkeit.

Mathematische Modelle für die Prognose der Schimmelpilzbildung

Die Anforderungen an die Beständigkeit von Gebäuden und an die Raumluftqualität wachsen ständig. Deshalb bewegt sich der Schwerpunkt bei der wärme- und feuchtetechnischen Modellierung aller Gebäude hin zu einer Art Risiko einschätzung. Es ist eine Herausforderung, das biologische, chemische und physikalische Phänomen von Schimmelpilz in Gebäuden zu verstehen und zu modellieren. Im Folgenden werden die bereits bestehenden Modelle zur Prognose von Schimmelpilzbildung vorgestellt.

Viitanen Modell (VTT-Modell)

Die mathematische Modellierung der Schimmelpilzbildung ist seit vielen Jahren ein Forschungsthema am finnischen Zentrum für technische Forschung VTT (Valtion teknillinen tutkimuskeskus). Im Rahmen dieses Forschungsschwerpunktes gab es experimentelle Untersuchungen zur Schimmelpilzbildung auf vornehmlich Holz und auch anderen Baustoffen. Die Ergebnisse der Experimente wurden zur Entwicklung eines mathematischen Modells für Schimmelpilzbildung verwendet. Im gegenwärtigen mathematischen Modell des VTT wird auch die Verzögerung aufgrund ungünstiger Bedingungen bei der Wachstumsgeschwindigkeit berücksichtigt.

Das Modell berechnet auch das von Feuchtigkeitsschwankungen beeinflusste Wachstum. Gemäß Gleichung 4.1 berechnet sich der Schimmelpilzwachstums-Index M in Abhängigkeit der Zeit (Wochen) t , der Temperatur T , der relativen Luftfeuchte RH , der Holzsorte W ($0 =$ Kiefer und $1 =$ Fichte) und der Oberflächenbeschaffenheit OQ aus dem Trocknungsprozess. k_1 und k_2 sind Koeffizienten, die die Verzögerung in den Früh- und Spätphasen des Wachstums charakterisieren. Diese Parameter sowie das Modell selbst werden detaillierter in [86] beschrieben.

Grundlage des Modells bildet zum Teil die Dissertation von Viitanen und umfangreiche Messungen an Kiefern- und Fichtenholz. Das mathematische Modell hierzu wurde mittels Regressionsanalyse der gemessenen Daten durch Hukka und Viitanen [58] entwickelt. Der nach Tabelle 19 definierte sogenannte Schimmelpilz-Index ist abhängig davon, ob das Wachstum mit Hilfe eines Mikroskops oder visuell [111] nachgewiesen werden kann: Es können verschiedene Pilzarten auf einer Oberfläche vorhanden sein, deshalb basiert der Schimmelpilz-Index auf der Wachstumsaktivität einer Mischung verschiedener Schimmelpilzarten.

Tabelle 19:
Schimmelpilz-Index.

Index	Wachstumsgeschwindigkeit	Beschreibung
0	Kein Wachstum	Sporen nicht aktiviert
1	Geringe Mengen an Schimmelpilz auf der Oberfläche (Mikroskop)	Anfangsstadium des Wachstums
2	<10% der Oberfläche von Schimmelpilz bedeckt (Mikroskop)	
3	10-30 % der Oberfläche von Schimmelpilz bedeckt (visuell)	Neue Sporen produziert
4	30-70 % der Oberfläche von Schimmelpilz bedeckt (visuell)	Gemäßigtes Wachstum
5	>70 % der Oberfläche von Schimmelpilz bedeckt (visuell)	Starkes Wachstum
6	Sehr starker und dichter Bewuchs	Befallene Fläche rund 100 %

Die für die Sporenauskeimung günstigen Bedingungen und die temperaturabhängige, kritische, im Modell verwendete relative Luftfeuchte sind in Bild 84 dargestellt. Bild 85 zeigt die vorhergesagte Schimmelpilzbildung für konstante Bedingungen mit einer charakteristischen Kurve in Abhängigkeit von der Zeit [108].

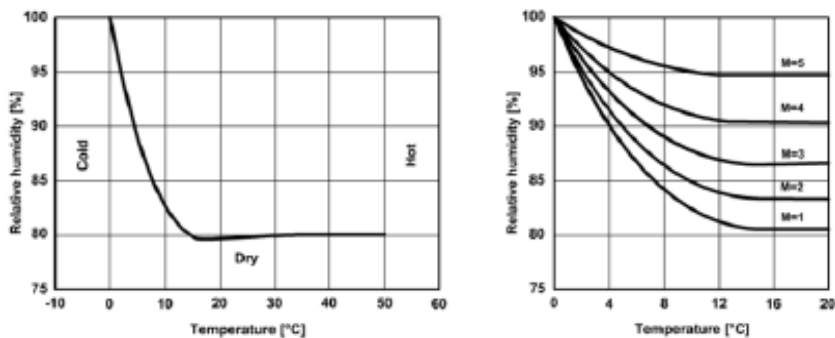


Bild 84:
Bedingungen, die für den Wachstumsbeginn von Schimmelpilz auf Holzmaterialien günstig sind (links) und temperaturabhängige kritische relative Luftfeuchte, die für Schimmelpilzbildung erforderlich ist bei verschiedenen Werten des Schimmelpilz-Indexes (rechts) nach Hukka und Viitanen (1999).

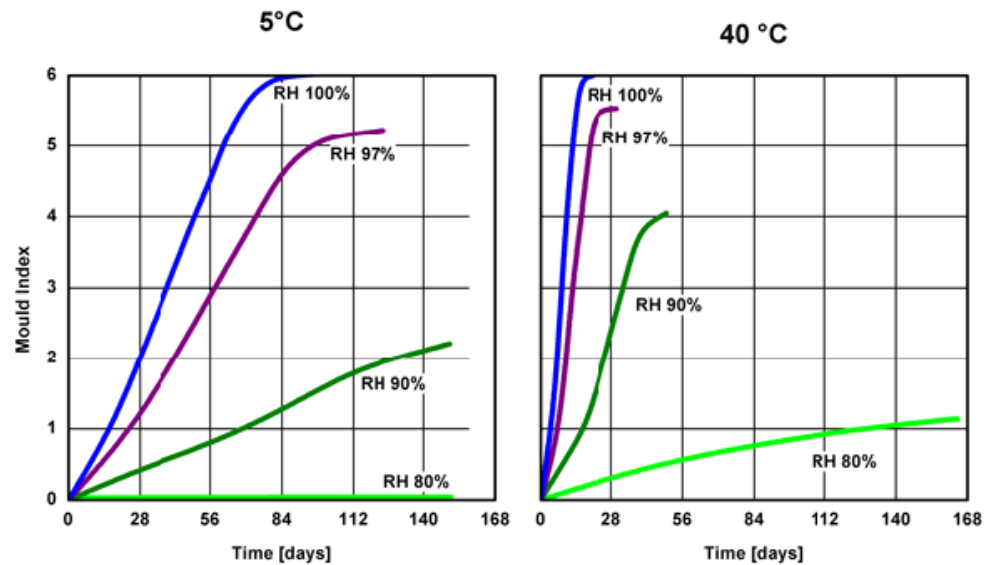


Bild 85:
Vorhergesagte Schimmelpilzbildung bei +5 und 40 °C unter unterschiedlichen Feuchtebedingungen (Viitanen et. al. 2000)

Das Modell des VTT für Schimmelpilzbildung ist außerdem mit bauphysikalischen Modellen zur Analyse der kritischen Feuchte- und Temperaturbedingungen kombiniert [110], [109]. Gegenwärtig prognostiziert das Modell lediglich das Schimmelpilzwachstum auf Holz. Materialien aus Holz sind hinsichtlich Schimmelpilzbefall am anfälligsten und daher der ungünstigste anzunehmende Fall. Dennoch wird das Forschungsprojekt zur Verbesserung des Modells fortgeführt werden. Dabei sollen insbesondere die folgenden Auswirkungen auf das Schimmelpilzwachstum untersucht und in das Modell implementiert werden:

Nicht aus Holz bestehende Grundmaterialien, wechselhaftes Wetter einschließlich Langzeit Schwankungen über Monate und jährlich wiederkehrender Ereignisse wie z.B. Frost und benachbarte Baustoffe und Materialien.

Isoplethensysteme

Zwischen einzelnen Pilzspezies ergeben sich bei den Wachstumsvoraussetzungen signifikante Unterschiede. Daher wurden bei der Entwicklung allgemein gültiger Isoplethensysteme nur Pilze berücksichtigt, die in Gebäuden auftreten, gesundheitsbeeinträchtigend sein könnten und für die ausreichende Literaturdaten zur Verfügung standen. Für diese etwa 200 Spezies sind quantitative Angaben zu den Wachstumsparametern Temperatur und Feuchte zusammengestellt worden. Die Isoplethensysteme basieren auf Versuchsreihen und geben zunächst die Voraussetzungen für Schimmelpilzwachstum in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte für ein optimales Kulturmedium an. Die sich dabei ergebenden untersten Grenzen möglicher Pilzaktivität werden LIM (Lowest Isopleth for Mould) genannt.

Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Untergrundverunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, werden Isoplethensysteme (Bild 86, linke Seite) für 4 Kategorien von

Substraten definiert, die aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden:

Substratgruppe 0: Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien);

Substratgruppe I: Biologisch gut verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Materialien für dauerelastische Fugen, stark verschmutztes Material;

Substratgruppe II: Biologisch kaum verwertbare Substrate, wie z.B. mineralische Baustoffe mit porigem Gefüge (Putze etc., manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen);

Substratgruppe III: nicht verwertbare Substrate, wie Baumaterialien, die weder abbaubar sind noch Nährstoffe enthalten.

Für die Substratgruppe III wird kein Isoplethensystem erstellt, da hier davon ausgegangen wird, dass ohne Verschmutzung kein Schimmelpilzwachstum möglich ist. Im Fall einer starken Verschmutzung sollte stets die Substratgruppe I zugrunde gelegt werden. Beständige offenporige Baumaterialien gehören meist in die Substratkategorie II. Mit Hilfe dieser Isoplethensysteme können für Angaben der Temperatur und relativen Feuchte entweder die Sporenauskeimungszeiten oder das Myzelwachstum ermittelt werden. Wird der ungünstigste anzunehmende Fall zugrunde gelegt, können mit großer Sicherheit Bedingungen für Schimmelpilzfreiheit ermittelt werden. Inwieweit die Isoplethensysteme für einzelne Baumaterialkategorien mit gutem Gewissen hin zu einer höheren relativen Luftfeuchte korrigiert werden können, muss sich erst noch durch weitere Messungen herausstellen. Besonders bei der Risikoeinschätzung von empfindlichen Kunstwerken und deren Bestandteilen, wie z.B. Leinwand, Bücher, Leder etc. besteht zusätzlicher Forschungsbedarf.

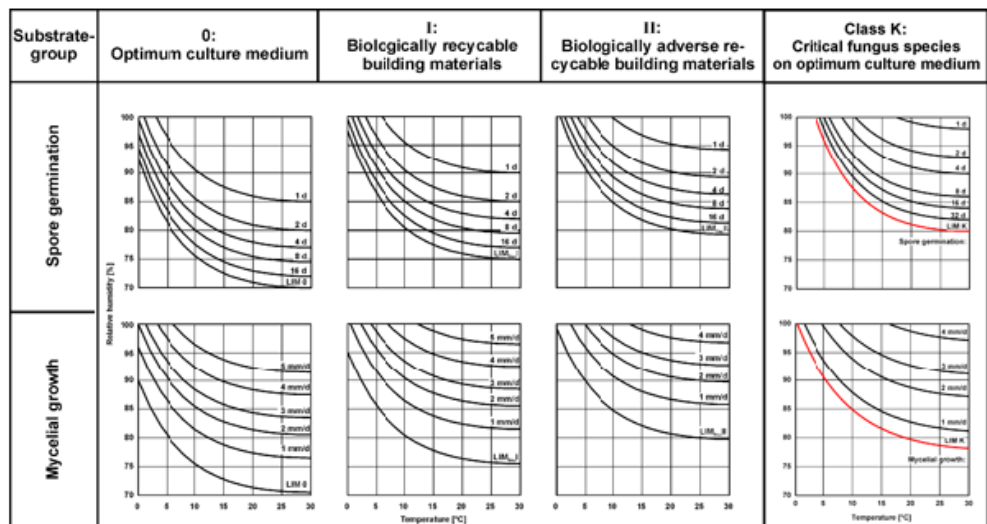


Bild 86:

Links dargestellt ist der Einfluss des Substrates auf die Schimmelpilzbildung anhand von Isoplethensystemen für 3 Substratgruppen. Rechts sind Isoplethensysteme für die so genannten kritischen Pilzarten (Klasse K, für ein optimales Kulturmedium) dargestellt.

Um die Schimmelpilzarten entsprechend ihren Gesundheitsrisiken zu klassifizieren, ist die so genannte Gefährdungsklasse K wie folgt definiert worden: Das Isoplethensystem K ist auf Schimmelpilzarten anzuwenden, die in der Literatur aufgrund ihrer möglichen Gesundheitsgefährdung (Bild 86 rechts) Erwähnung finden. Für die gefährlichen Arten *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus flavus* und *Stachybotrys chartarum* stehen Wachstumsdaten aus [?86?alt] zur Verfügung. Das Isoplethensystem für die als gesundheitsgefährdend eingestuften Pilzarten basiert auf den verfügbaren Laborergebnissen bei optimalem Kulturmedium. Für die Aufstellung von Isoplethensystemen zu den übrigen Substratgruppen fehlen hier bislang genauere Daten.

Bild 87 zeigt die gemessenen Isoplethen für drei verschiedene Materialien. Es wird unterschieden zwischen dem Inokulationsbereich (wo Spuren von Nährstoffen vorhanden sein können) und der unveränderten Materialoberfläche. LIM 0 (Lowest Isopleth for Mould), die unterste Grenzen möglicher Pilzaktivität kennzeichnet die Bedingungen, unter denen Wachstum ausgeschlossen werden kann.

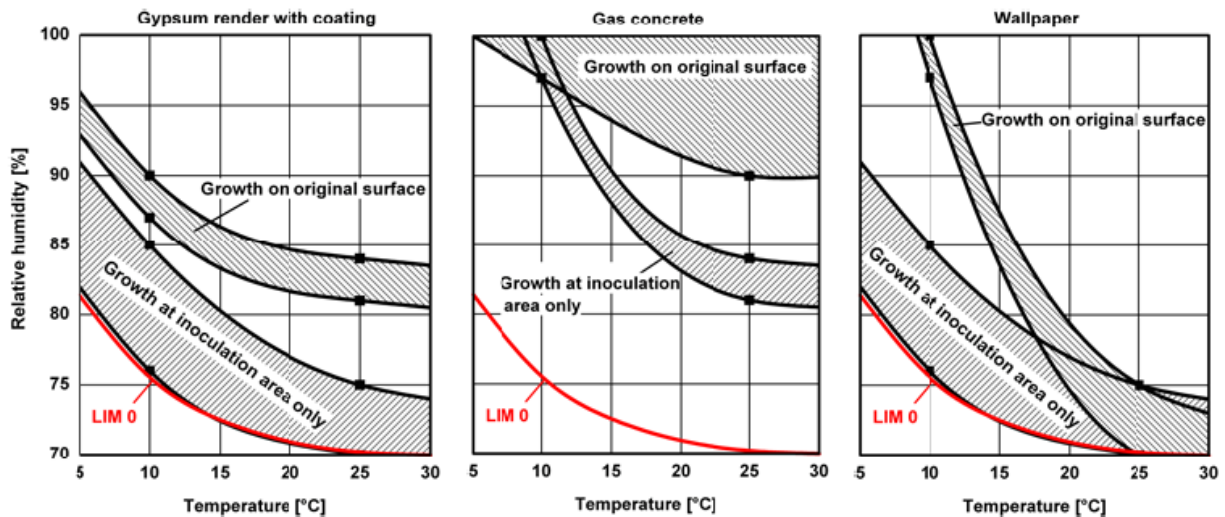


Bild 87: Messtechnisch bestimmte Isoplethenbereiche für drei verschiedene Materialien. Es wird zwischen dem Inokulationsbereich (wo Nährstoffe in Spuren vorhanden sein können) und unveränderter Materialoberfläche unterschieden. Der "Lowest Isopleth for Mould" (LIM 0) kennzeichnet die Grenze möglicher Pilzaktivität.
olivier.savin@dassault-aviation.com

Links: Gipsputz mit Anstrich

Mitte: Porenbeton

Rechts: Tapete

Biohygrothermisches Modell

Für instationäre Randbedingungen der Temperatur und relativen Feuchte können entweder die Dauer der Sporenkeimung oder das Mycelwachstum mit Hilfe dieser Isolethensysteme bestimmt werden. Jedoch haben die Aussagen über Wachstumswahrscheinlichkeiten nur auf Basis des Isolethenmodells den Nachteil, dass ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen bei instationären hygrothermischen Randbedingungen nicht berücksichtigt werden kann. Deshalb wird in diesen Fällen häufiger Sporenkeimung prognostiziert als mittels dem sogenannten biohygrothermischen Modell (Bild 88).

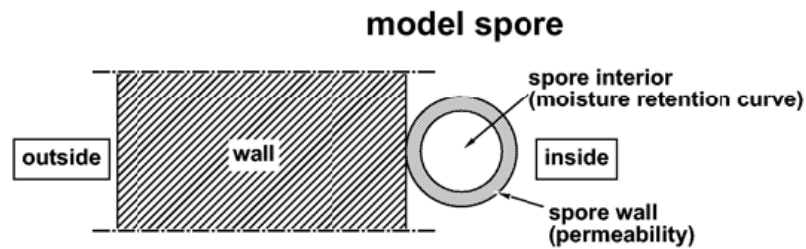


Bild 88:
Schematische Darstellung des biohygrothermischen Modells [70].

Andere Untersuchungen und Modelle zur Vorhersage von Schimmelpilzbildung

Ayerst [10] untersuchte die Auswirkung der Feuchtigkeit und der Temperatur auf das Wachstum und die Sporenkeimung einiger Schimmelpilzarten auf Agar-Medium. Er erstellte auch die Temperatur- und Wasseraktivitäts-Isolethen der Sporenkeimung und des Myceliumwachstums einiger Pilzarten auf. Block [16] untersuchte die Feuchteanforderung für Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Materialien. Smith und Hill [99] untersuchten die Auswirkung der Temperatur und der Wasseraktivität auf die Keimung und das Wachstum von ausgewählten Schimmelpilzarten. Sie erstellten die Isolethen der Wachstumsbedingungen von Schimmelpilzen auf Agar-Medium. Grant et. al. [45] analysierten und modellierten die Feuchtevoraussetzung für einige aus Proben aus Wohnungen isolierte Schimmelpilzarten. Eine von den Feuchtevoraussetzung und der Schimmelpilzart abhängige Reihenfolge in Primär-, Sekundär- und Tertiärbesiedler konnte aufgestellt werden.

Adan [1] verwendete eine nichtlineare Regression, um sigmoidale Kurven, die das vegetative Pilzwachstum von *Penicillium chrysogenum* auf Gipsplattenmaterial beschreiben, zu modellieren. Er verwendete die Befeuchtungszeit als Maßstab der Wasserverfügbarkeit für Pilzwachstum unter instationären hygrischen Bedingungen. Die Befeuchtungszeit ist durch das Verhältnis der zyklischen feuchten Phase ($r. F. \geq 80\%$) und der zyklisch trockenen Phase definiert. Das Schimmelpilzwachstum ist eine Funktion der Auswirkung der niedrigsten Feuchte, Befeuchtungszeit und hoher relativer Luftfeuchte, und schließlich von Perioden mit feuchten und trockenen Bedingungen. Er verwendete LTSEM, um das Wachstum zu analysieren und untersuchte die Auswirkung von Beschichtungen und der Oberflächenbeschaffenheit auf das Schimmelpilz-

wachstum. Er wertete auch die Auswirkung der Verteilung der Wachstumsdichte auf die Prüfergebnisse aus.

Clarke et. al. [22] haben ein Berechnungsmodell zur Prognose von Schimmelpilzbildung in Gebäuden entwickelt. Hierfür wurden Angaben zu den Wachstumsparametern Temperatur und Feuchte von sechs Pilzfamilien analysiert. Die sich dabei ergebenden untersten Grenzen der Wachstumsvoraussetzungen wurden in dem ESP-r-Programm in Verbindung mit einer kombinierten Wärme- und Feuchtestromsimulation hinterlegt.

Hens [52] stellt ein ergebnisorientiertes Modell für Schimmelpilzbildung in Gebäuden vor. Moon [84] beurteilt anhand einer stochastischen Analyse das Risiko von Schimmelpilzbildung. Bild 89 zeigt einen Vergleich der gefundenen kritischen Bedingungen für Schimmelpilzwachstum einiger verschiedener Modelle. Offensichtlich stimmen die auf verschiedenen experimentellen Resultaten beruhenden Grenzwerte ziemlich gut überein.

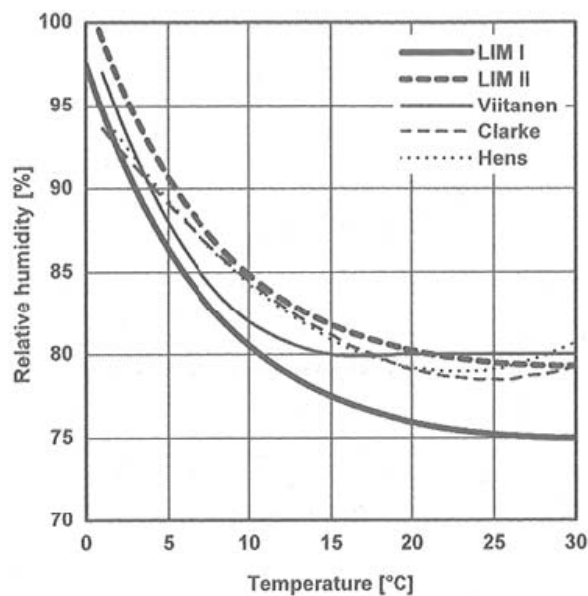


Bild 89: Vergleich von LIMs der Substratklasse 1 (LIM I, bioabbaubare Materialien) und Substratklasse 2 (LIM II, poröse Materialien) nach Sedlbauer **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** mit Daten aus Ergebnissen von Baumaterialien nach Viitanen et. al. [108], Clarke et. al. [23] und Hens [52].

Die Prognose von Schimmelpilzwachstum ist allerdings immer eine Abschätzung des Risikos und nicht eine Vorhersage für das exakte Wachstum. Der Einfluss von Unsicherheiten ist signifikant, egal ob für das Modell an sich oder beispielsweise die Wetterdaten. Bild 90 zeigt einerseits den Vergleich zweier völlig verschiedener Modelle – Wufi-Bio und Viitanen/VTT-Modell – und andererseits den Einfluss von Wetterdaten. Die Proben von Kiefern-Splintholz wurden fast ein Jahr lang im Labor Freilandbedingungen ausgesetzt. Es hat sich gezeigt, wie prekär die Ergebnisse sind, die in [86] detailliert diskutiert werden.

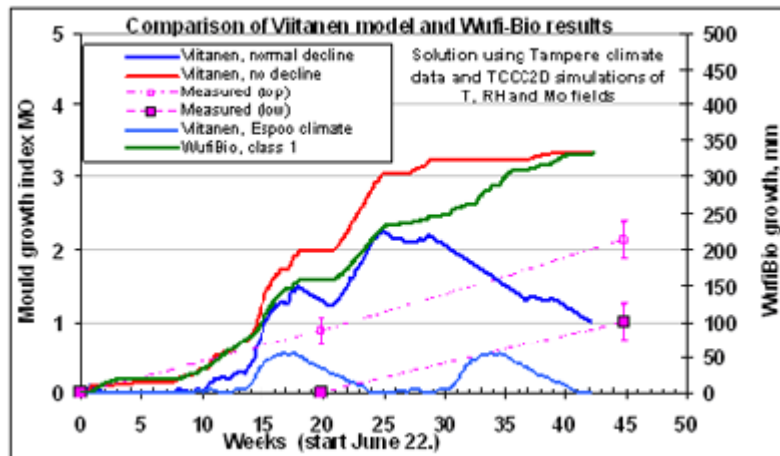


Bild 90: Vergleich von Viitanen/VTI-Modell und Wufi-Bio mit gemessenem Schimmelpilz-Index auf Kiefern-Splintholz. Die Ergebnisse mit dem Viitanen/VTI-Modell wurden unter verschiedenen Voraussetzungen berechnet.

Prüfung der Schimmelpilzresistenz

Die Isoplethen und die anderen zuvor beschriebenen Modelle basieren auf experimentellen Untersuchungen zur Fragestellung, wie widerstandsfähig oder auch nicht verschiedene Materialien gegenüber Schimmelpilzen sind. Es gibt zwei Prüfverfahren, die normalerweise verwendet werden [59], [33], [23]:

A: Das Material wird einem definierten Klima (relative Luftfeuchte und Temperatur) und normalen Sporenarten, wie wir sie auf Materialien für gewöhnlich finden, ausgesetzt. Das Wachstum dieser Sporenarten kann geprüft werden.

B: Das Material wird Sporen einer oder mehrerer bekannten Arten (sog. "Pilzcocktail") ausgesetzt. Dieser Pilzcocktail kommt dann in ein definiertes Klima und der Schimmelpilz kann wachsen. Das Material muss vor dem Test sterilisiert werden um zu verhindern, dass Sporen auf dem Material das Ergebnis beeinflussen.

Das Ausmaß des Befalls und die Wachstumsgeschwindigkeit sind nicht nur vom Material, sondern auch von der Pilzart abhängig. Während die verschiedenen Materialien, z. B. Gipsplatten im Freilandversuch von verschiedenen Pilzarten befallen werden können, hängt das Prüfergebnis im Laborversuch (s. Bild 91) von der im Versuch verwendeten Schimmelpilzart ab. Dadurch wird es sehr schwierig, Laborergebnisse mit Freilandversuchen zu vergleichen.

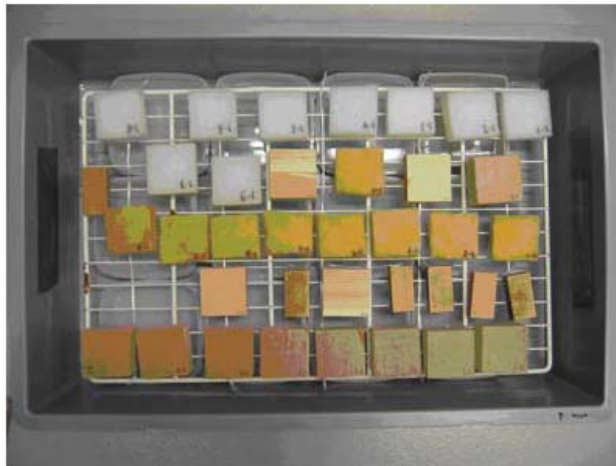


Bild 91:
Prüfmaterialproben im Labor.

Anwendungsbeispiel: Prognose für Schimmelpilzwachstum im "Riiksmuseum Amsterdam"

Historische Gebäude und Museen bilden die sichtbare und wichtigste Grundlage des europäischen Kulturerbes und tragen in bedeutendem Maße zur Attraktivität und Identität Europas sowohl für seine Bürger als auch Besucher bei. Deshalb müssen wir dafür Sorge tragen, dass diese Zeugen von unschätzbarem Wert aus vergangenen Zeiten erhalten und nachhaltig geschützt werden. Obwohl in modernen Gebäuden schon aus Energiespargründen ein großer Fortschritt mit Hilfe von Klimatisierungs- und Heizungstechnik gemacht wurde, werden die meisten Schäden an Kunstsammlungen in historischen Bauwerken noch immer durch ungünstige klimatische Bedingungen verursacht.

Eine Nutzungsänderung von Räumen, Stockwerken oder sogar ganzen Gebäuden führt in den meisten Fällen zu einer Veränderung der raumklimatischen Verhältnisse. Das ist immer dann der Fall, wenn eine Raumklimatisierung oder eine zusätzliche Heizung eingesetzt wird. Das folgende Anwendungsbeispiel eines Modells zur Prognose von Schimmelpilzwachstum behandelt die Renovierung des "Riiksmuseum Amsterdam".

Schon in der Planungsphase der umfangreichen Renovierungsmaßnahmen im Museum war abzusehen, dass entscheidende Veränderungen des Innenraumklimas auch aufgrund einer Nutzungsänderung zu erwarten waren. Räume, die zuvor nur gelegentlich oder als Lagerraum genutzt wurden, sollten jetzt als Ausstellungsräume für Kunstobjekte dienen und von dementsprechend vielen Besuchern frequentiert werden. Zusätzlich war geplant, das Innenraumklima den Anforderungen der Ausstellungsobjekte anzupassen. Das bedeutet Raumtemperaturen zwischen 19 °C und 23 °C bei einer relativen Luftfeuchte von bis zu 60 %. Darüber hinaus wurden die einfach verglasten Fenster durch moderne Fenster mit Doppelverglasungen ersetzt. Dadurch konnten sowohl die Wärmeverluste reduziert als auch der Schutz vor übermäßiger Sonneneinstrahlung und zudem der Einbruchschutz verbessert werden. Der bessere U-Wert der Fenster bewirkte höhere Oberflächentemperaturen an den Scheiben als an den Wänden. Das bedeutet, dass jetzt der Taupunkt zuerst an den Wänden überschrit-

ten wird und nicht wie zuvor an den Fenstern. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit von Tauwasser sowie Schimmelpilzbildung enorm an. Schon vor den Renovierungsmaßnahmen gab es Feuchtprobleme aufgrund von Tauwasser an Bauteiloberflächen. Nach Fertigstellung aller geplanten Maßnahmen wurden daher noch ungünstigere Verhältnisse erwartet. Deshalb wurde das Risiko von Tauwasser- und Schimmelpilzbildung für kritische Gebäudedetails anhand von ein- und zweidimensionalen Simulationen [49] berechnet. Für das Außenklima wurden gemessene Klimadaten verwendet. Aus Gründen des Denkmalschutzes wird raumseitig eine Dämmung aus diffusionsoffenem Kalziumsilikat verwendet. Diese Innendämmung bewirkt höhere Oberflächentemperaturen und demzufolge eine niedrige relative Feuchte auf den Wandoberflächen. Aufgrund des niedrigen Diffusionswiderstands kann die Wand raumseitig austrocknen. Durch hohe Kapillarität verteilt sich vorhandenes Tauwasser.

Beispielhaft sind im Folgenden die Ergebnisse dieser Berechnung für die Fensterlaibung und die Außenwand dargestellt. Die Fensterlaibung ist von innen nach außen durchgängig aus Sandstein. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit besonders im Winter niedrige Oberflächentemperaturen und hohe relative Luftfeuchten (10,8 °C und 97 % r. F., Bild 92) auftreten. Eine 40 mm starke Innendämmung aus Kalziumsilikat verbessert die Bedingungen: Die Temperatur steigt auf 13,1 °C bei 87 % r. F. an.

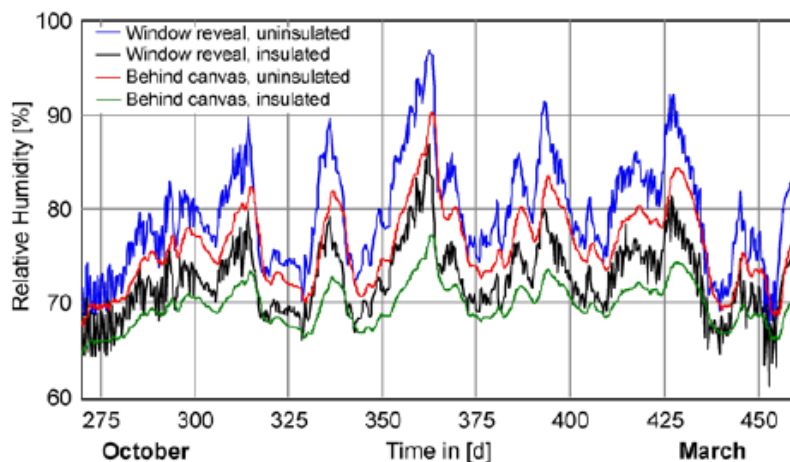
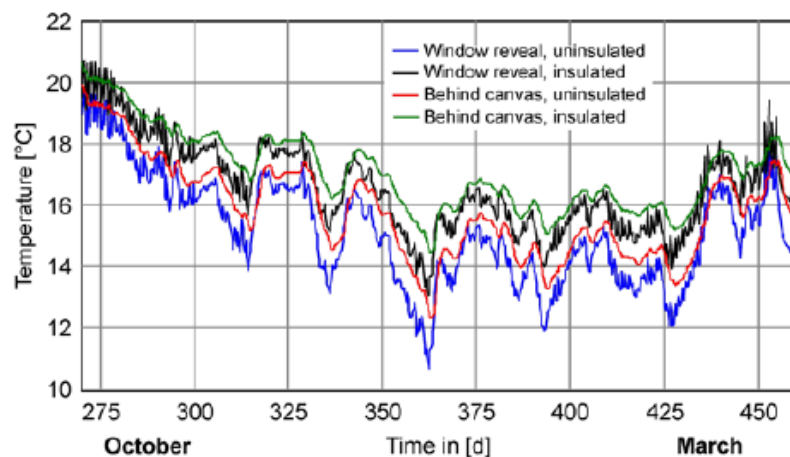


Bild 92:
Temperaturverlauf (oben) und relative Luftfeuchte (unten) im Winter an einer Fensterlaibung und hinter einem Gemälde auf Leinwand an der Wand.

Blau: Fensterlaibung, ungedämmt.

Schwarz: Fensterlaibung, gedämmt.

Rot: Gemälde an ungedämmter Außenwand.

Grün: Gemälde an gedämmter Außenwand.

Gemälde auf Leinwand sollten an bis dato noch nicht genutzten Bereichen der Außenwände aufgehängt werden. Unter der Voraussetzung, dass der Holzrahmen eines Gemäldes vollflächig an der Wand aufliegt, kann von einer ruhenden Luftschicht hinter dem Gemälde ausgegangen werden. Diese zusätzliche Dammschicht führt zu einer Absenkung der Temperatur auf der Wandoberfläche hinter dem Bild. Da das Eindringen von Raumluft in den Bereich zwischen Bild und Wand nie zu 100% verhindert werden kann, steigt die Gefahr von Tauwasser hinter dem Bild beträchtlich. Die Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Zwischenraum sind in Bild 92, rot und grün dargestellt. Der positive Einfluss einer zusätzlichen Innendämmung der Außenwand ist offensichtlich. Im Winter steigt dadurch die Oberflächentemperatur um ca. 2 K und die relative Luftfeuchte verringert sich um ca. 10 bis 15 %. Bild 93 zeigt das Ergebnis der Prognose für Schimmelpilzbildung. Während mit innenliegender Dämmung kein Schimmelpilzwachstum prognostiziert wird, ist ohne zusätzliche Dämmung mit zunehmenden Problemen nach der geplanten Nutzungsänderung zu rechnen.

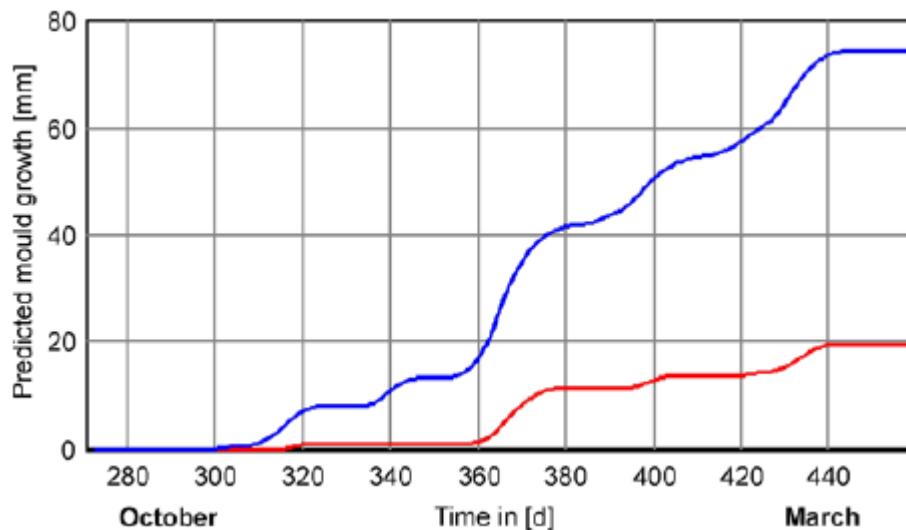


Bild 93:
Prognostiziertes Schimmelpilzwachstum hinter einem Gemälde an der ungedämmten Außenwand (blau) und in einer ungedämmten Fensterlaibung (rot).

Mikroorganismen auf Fassaden

In jüngster Zeit häufen sich die Beschwerden über mikrobiellen Bewuchs an Fassaden, insbesondere von Algen. Aufgrund der höheren Dämmstandards haben sich die Temperatur- und Feuchtesituationen an Fassaden verändert. Dieser Bewuchs tritt zum Ärger vieler Eigentümer oft schon im ersten Jahr nach Fertigstellung auf. Algen sind auf der ganzen Welt verbreitet und bilden, ebenso wie Pilze, einen bedeutenden Teil unseres Ökosystems. Sie gelten weltweit als größter Sauerstoffproduzent. Der Bereich der Wasseralgen ist bereits sehr gut erforscht, wohingegen Algen als mikrobieller Bewuchs von Fassaden erst in den letzten Jahren Interesse fanden. Es finden sich hauptsächlich Blau- und Grünalgen auf Fassaden, vereinzelt auch Rot- und Goldalgen.

Wachstumsvoraussetzungen

Algen sind auf der ganzen Welt verbreitet und bilden einen bedeutenden Teil unseres Ökosystems. Sie gelten weltweit als größter Sauerstoffproduzent. Der Bereich der Wasseralgen ist bereits sehr gut erforscht. In den letzten Jahren aber sind die aerophytischen Algen als wichtiger Teil im mikrobiologischen Bewuchs auf Fassaden erkannt worden. Die verbreitete Meinung ist, dass hauptsächlich die blauen und grünen Algen auf Fassaden wachsen. Vereinzelt treten auch rote und goldene Algen auf. Wir wissen noch nicht genug über die Wachstumsbedingungen und die biotischen Einflüsse. Dennoch können einige Fragen spezifiziert werden. Für die Photosynthese müssen in ausreichendem Maße Licht, Wasser, Temperatur, Kohlendioxyd und mineralische Nährstoffe vorhanden sein. Einige Algen brauchen auch Spurenelemente (wie z. B. Fe, Mn, Si, Zn, Cu, Co, Mo, B, V) für das Wachstum, die normalerweise in unserer Umgebung vorkommen (Regen, Staub), sodass das lokale Mikroklima der bestimmende Faktor für biologisches Wachstum auf Fassaden ist. Die wichtigsten Klimakonditionen sind Feuchte und Temperatur.

Feuchtigkeit ist eine Grundvoraussetzung für Algenwachstum, weil sie für die Photosynthese erforderlich ist. Da die Algen keine Wurzeln haben, muss die Wasseraufnahme direkt durch die Zellwand durch Osmose geschehen. Die Wachstumsgrenze für grüne Algen liegt bei mindestens 70 bis 80 % r. F. (Denfner 1983 [25]) und für blaue Algen bei 100 % r. F. (flüssiges Wasser) (Scherer 1993 [96]). Schlagregen und Tauwasser bilden vor allem Feuchtigkeit auf Fassaden durch flüssiges Wasser. Algen können während trockenen Perioden ohne Schaden zu nehmen überleben und dann Weiterwachsen, sobald wieder genügend Feuchte zur Verfügung steht. Deshalb reicht auch das Abtrocknen der Fassaden während des Tages nicht aus, Algenbewuchs zu verhindern.

Venzmer gibt in [106] die optimalen Wachstumsbedingungen für grüne Algen auf Fassaden in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 40 °C an. Unter trockenen Bedingungen können Algen extreme thermische Bedingungen (Wärme- oder Kältebelastung) viel besser aushalten als unter feuchten Bedingungen. Aus diesem Grund ist auch eine Prognose für Algenbewuchs auf Fassaden ein ungelöstes Problem. Dieser Ansatz beschreibt den ersten Versuch zur Problemlösung.

Hygrothermische Randbedingungen

Die hygrothermischen Randbedingungen an der externen Oberfläche sind sehr wichtig für das Wachstum von Mikroorganismen auf Fassaden. Diese Bedingungen werden von einigen gleichzeitig verlaufenden physikalischen Phänomenen beeinflusst. Die Strahlung zwischen der externen Oberfläche und der Umgebung führt zu einem anhaltenden Energieverlust an der Oberfläche. Die Oberflächentemperatur steigt durch die Sonneneinstrahlung während des Tages und deshalb sinkt die relative Feuchte auf der Oberfläche und die Wand wird trockener. Während der Nacht gibt es keine Sonneneinstrahlung und aufgrund der thermischen Strahlung fällt die Oberflächentemperatur und erhöht dadurch das Risiko von Tauwasserbildung an der Fassade.

Wie bereits erwähnt sind ausreichende Temperatur- und Feuchtebedingungen an der externen Oberfläche von Wänden notwendige Voraussetzungen für biologisches Wachstum. Schimmelpilze brauchen eine relative Feuchte von ca. 80 % (in Abhängigkeit von der Temperatur) über einen längeren Zeitraum, wohingegen Algen eine höhere Luftfeuchte für ihr Wachstum oder auch nur flüssiges Wasser brauchen. Ein zwischenzeitliches Abtrocknen schadet ihnen nicht. Die Tatsache, dass mikrobiologisches Wachstum meistens auf den in nördlicher Richtung liegenden Fassaden auftritt, auf denen sehr wenig Schlagregen vorhanden ist, zeigt, dass die Oberflächenkondensation aufgrund natürlicher Langwellenstrahlung eine bedeutende Feuchtigkeitsquelle auf den Fassaden darstellt. Deshalb genügen wahrscheinlich schon die Perioden der Oberflächenkondensation während der Nacht als ein Kriterium zur Risikoabschätzung für Wachstum aus.

Wird die Oberflächentemperatur kälter als die Taupunkttemperatur der Außenluft, dann tritt Tauwasser an der Oberfläche auf. Bild 94 zeigt die Verläufe der Oberflächentemperaturen eines alten Gebäudes ($U\text{-Wert} = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) und einer gut gedämmten Fassade ($U\text{-Wert} = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) für eine Septembere Nacht. Die Auswirkung einer zusätzlichen Dämmung auf die Temperatur der externen Oberfläche ist deutlich zu erkennen. Die Oberflächentemperatur des alten Gebäudes ist höher als die Taupunkttemperatur während der ganzen Nacht, wohingegen die Temperatur der gut gedämmten Fassade von 3 Uhr bis 8 Uhr morgens unter die Taupunkttemperatur sinkt. Das Ergebnis ist eine größere Menge an Tauwasser auf der Oberfläche der gut gedämmten Fassade.

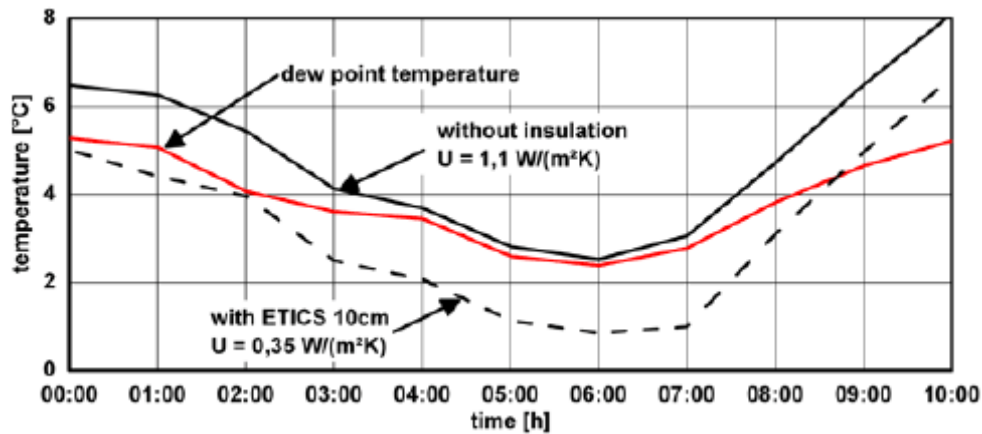


Bild 94:
Verläufe der Oberflächentemperatur eines alten Gebäudes und einer gut gedämmten Fassade mit WDVS im Vergleich zur Taupunkttemperatur der Außenluft.

Neben der Befeuchtung durch Schlagregen tritt Tauwasser auch als Folge von Langwellenstrahlung in klaren Nächten dadurch auf, dass die Temperaturen unter den Taupunkt der Außenluft sinken. Die Perioden der Oberflächenkondensation und der akkumulierte Kühlungsgrad unter der Taupunkttemperatur werden als Kriterium zur Klassifizierung der Ergebnisse herangezogen ([69]). Die folgenden beiden Konstruktionsarten werden anhand von hygrothermischen Berechnungen mit den Klimadaten für Holzkirchen verglichen, um die Oberflächentemperaturen mit der Taupunkttemperatur der Außenluft zu vergleichen. Die erste ist eine Wand aus Beton mit WDVS. Die zweite Wand besteht aus Porenbeton. Beide Wände haben einen ähnlichen Wärmedurchgangskoeffizienten von ca. $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ausgehend von einer Standard-WDVS-Konstruktion werden verschiedene Oberflächeneigenschaften untersucht. Neben der Farbe (Strahlungskoeffizient) des Putzes war der Einfluss der Langwellenemissivität von besonderem Interesse. Zusätzlich wurden zahlreiche Feldversuche an Wänden mit WDVS, die sowohl in nördliche als auch westliche Richtung lagen, durchgeführt, um die berechneten Ergebnisse zu verifizieren.

Ergebnisse durch Modellierung

Das Frühjahr und insbesondere der Herbst sind die kritischsten Jahreszeiten, weil es im Winter meist zu kalt und im Sommer meist zu heiß und trocken ist. Bild 95 zeigt die summierten Stunden unter dem Taupunkt für beide Konstruktionen und Richtungen. Der Unterschied zwischen der Konstruktion mit WDVS und der monolithischen ist offensichtlich. Die monolithische Wand bekommt mehr Tauwasser auf der in östlicher Richtung liegenden Seite ab als im Vergleich dazu die Wand mit WDVS. Der Grund dafür ist, dass die gespeicherte Sonnenenergie von der Morgensonne bis zur Abenddämmerung teilweise verschwunden ist, während auf der nach Westen gerichteten Seite die Energie während der Nacht konserviert werden kann. Dieser Effekt ist bei WDVS nicht so wichtig, weil die Wärmekapazität gering ist. Alles in allem, die Tauwassermenge ist mit WDVS offensichtlich höher als bei der monolithischen Wand aus Porenbeton. Das deckt sich mit Beobachtungen aus der Praxis in Bezug auf biologischen Bewuchs auf Fassaden. Deshalb konzentrieren sich weitere Untersuchungen auf WDVS.

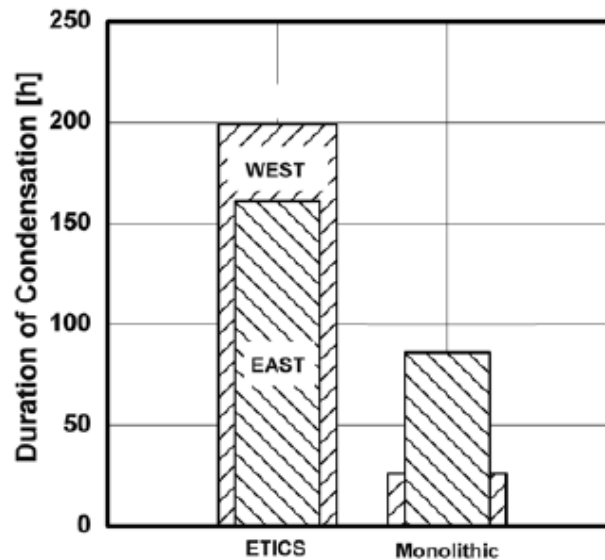


Bild 95:
Vergleich der summierten Stunden unter dem Taupunkt im Herbst für eine Konstruktion mit WDVS und einer monolithischen für zwei Ausrichtungen.

Um den Einfluss der Strahlungseigenschaften der Oberfläche zu erfahren, wurden Berechnungen durchgeführt mit einer dunklen Farbe des Putzes anstelle einer weißen (Strahlungskoeffizient von 0,6 anstatt 0,4) und mit einer niedrigeren Infrarot-Emissivität (Langwellenstrahlungskoeffizient von 0,6 anstatt von 0,9). Wie zu erwarten war, erreichte die Oberflächentemperatur des dunkelfarbigem Putzes während des Tages die maximale Temperatur, wie in Bild 96 zu sehen ist. Auch die Variante mit einem hellen Putz und niedriger Infrarot-Emissivität wird wärmer als der Standardfall. Das bedeutet, dass während des Tages jede Oberfläche aufgrund von Langwellenemission Energie verliert, die nicht vernachlässigt werden darf.

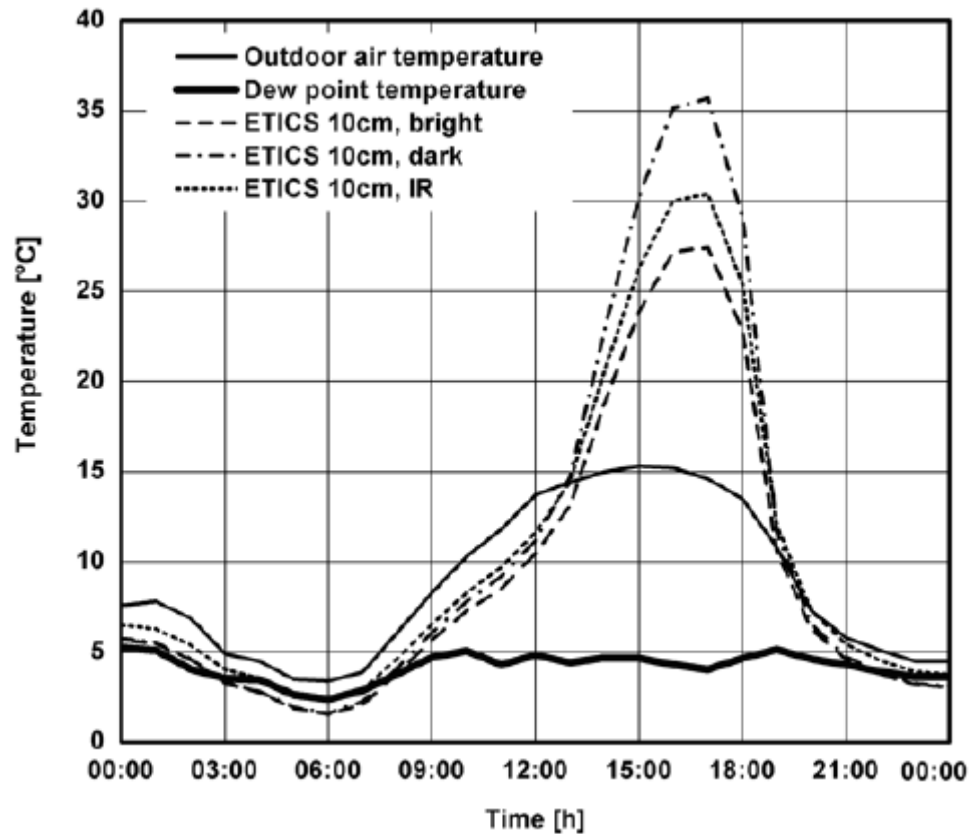


Bild 96:

Verläufe der Oberflächentemperatur für nach Westen ausgerichtete Wände mit WDVS und verschiedenen Oberflächeneigenschaften. Daten für einen sonnigen Sommertag (13. Sept.). Zusätzlich werden die Kurven für die Außenlufttemperatur und die Taupunkttemperatur angegeben.

Während der Nacht verursacht die thermische Strahlung eine Abkühlung der Wand. Die Oberflächentemperatur der dunkelfarbigen Fassade, die während des Tages die höchsten Temperaturen hatte, kühlt sich bis unter die Taupunkttemperatur über den gleichen Zeitraum wie die weiße ab. Dies zeigt, dass die thermische Masse des Putzes oben auf der Dämmung zu gering ist, um genügend Sonnenenergie zur Verhinderung der Tauwasserbildung zu speichern. Die Oberflächentemperatur des WDVS mit geringer Infrarot-Emissivität bleibt allerdings über der Taupunkttemperatur.

Berechnet man nun die akkumulierte Dauer der Kondensation für Wände mit WDVS während der Hauptwachstumsphase im Herbst in Abhängigkeit von verschiedenen Oberflächeneigenschaften, wird deutlich, dass eine dunkle Farbe nur eine sehr geringe Verbesserung zur Folge hat, oder in anderen Worten eine Reduzierung der Tauwasserbildung um ca. 5%. Der Vorteil einer dunklen Farbe liegt in den höheren Oberflächentemperaturen nach Sonnenaufgang, was das Abtrocknen des Putzes fördert. Die gute Leistung von WDVS mit infrarotaktiver Farbe im Vergleich zu konventionellen Anstrichen zeigt, dass dies eine vielversprechende Möglichkeit zur Reduzierung des Risikos des Algenwachstums auf WDVS darstellt.

Experimentelle Ergebnisse

Verschiedene Feldversuche sind auf dem Versuchsgelände des Fraunhofer IBP durchgeführt worden. Im Folgenden werden nun zwei Testfassaden diskutiert, die eine mit nördlicher Ausrichtung besteht aus einem Standard-WDVS und verschiedenen Anstrichen, die anderen mit westlicher Ausrichtung sind monolithische Konstruktionen. Unter der Außenoberfläche der Wände wurde der Temperaturverlauf gemessen, um die Dauer und Intensität der Tauwasserbildung zu erfahren, indem diese Oberflächentemperatur mit der gemessenen Außentaupunkttemperatur verglichen wurde. Bild 97 zeigt das Beispiel für den nächtlichen Verlauf dieser Messungen an einer nach Westen ausgerichteten Versuchsfassade. In diesem Fall wird ein Standard-WDVS mit einer weißen Farbe und einem dünnen Putz von ca. 5 mm mit einem System verglichen, bei dem ein dicker Putz von ca. 15 mm verwendet wird, um die Wärmekapazität zu steigern. Aufgrund der höheren Wärmekapazität des dickeren Systems im Vergleich zum dünneren System sinkt die Oberflächentemperatur später unter die Taupunkttemperatur. Andererseits aber überschreitet sie die Taupunkttemperatur später auch. Der graue IR-Anstrich zeigt ein ganz anderes Verhalten. In diesem Fall wurde die Taupunkttemperatur nicht ein einziges Mal überschritten. Es muss erwähnt werden, dass es bislang keinen weißen IR-Anstrich gibt, weil der IR-Effekt durch Beimischung von metallischen Pigmenten erzielt wird. Deshalb wurde ein grauer Anstrich gewählt.

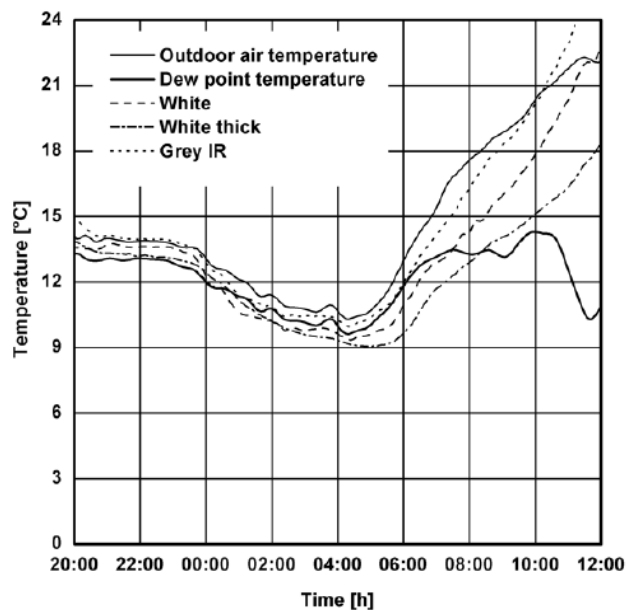


Bild 97:

Verläufe von Oberflächentemperaturen für nach Westen ausgerichtete Wände mit WDVS und verschiedenen spektralen Eigenschaften. Zusätzlich werden die Kurven für die Außenlufttemperatur und die Taupunkttemperatur gezeigt.

Ein Vergleich der Kondensationszeiten für die beschriebenen WDVS mit den monolithischen Konstruktionen wird in Bild 98 gezeigt. Für die monolithische Konstruktion aus Porenbeton mit einer Dichte von 400 kg/m³ und Mauerziegeln mit einer Dichte von 600 kg/m³ beträgt die gemessene Kondensationszeit nur 120 beziehungsweise 85 Stunden im Vergleich zum Standard-WDVS mit 290 Stunden und ist damit sehr gering. Der farbige Anstrich des WDVS bringt

eine sehr geringe Verbesserung von ca. 3 %. Der IR-Anstrich, der für diese Versuche zur Verfügung stand, erzielte eine Langwellen-Emissivität von 0,78 anstelle von 0,6, die für die Computerberechnungen zugrunde gelegt wurde. Damit betrug die Differenz zur Standardfarbe mit einer Emissivität von 0,9 weniger als die Hälfte. Mit dieser IR-Farbe wurden mehr als 20 % weniger Kondensationsstunden erzielt, was gut mit den Berechnungen übereinstimmt.

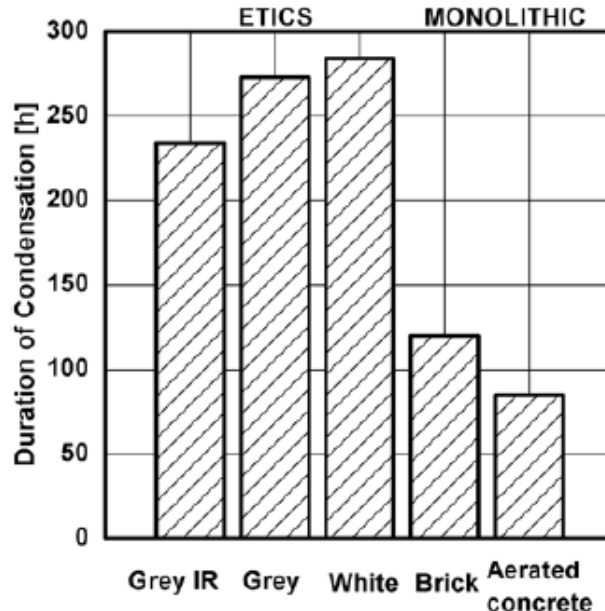


Bild 98:
 Akkumulierte Kondensationsdauer für verschiedene Wandkonstruktionen und Anstriche innerhalb der Hauptwachstumsphase im Herbst.

Nicht nur die Kondensationsdauer und die Menge an Kondensat sind wichtig für die Risikoabschätzung von mikrobiellem Bewuchs, weil dafür nur das Wasser an der oberen Schicht der Oberfläche einer Fassade verfügbar ist. Deshalb wurde auch auf der westlichen Fassade der Zeitverlauf der Wassermenge gemessen. Dafür wurden trockene Papierhandtücher auf die verschiedenen Oberflächen zu bestimmten Zeiten gedrückt, und die Menge des absorbierten Wassers wurde durch Wiegen bestimmt. In Bild 99 sind die Messergebnisse am Morgen nach einer klaren Nacht zu sehen. Auf der Oberfläche des Standard-WDVS mit weißer Farbe hat sich fast doppelt so viel Wasser angesammelt wie an der Oberfläche des dicken Putzes. Es muss beachtet werden, dass diese Ergebnisse stark von den hygrischen Materialeigenschaften und Anstrichen abhängig sind. Der dicke Putz absorbiert mehr Kondensat unter die Oberfläche. Das eindrucksvollste Resultat liefert die Oberfläche mit IR-Anstrich, bei der am Morgen fast kein Wasser an der Oberfläche gemessen werden konnte. Dennoch müssen diese IR-Anstriche für die praktische Verwendung noch optimiert werden, weil bislang alle getesteten verfügbaren IR-Anstriche durch die Witterungseinflüsse einen metallischen Glanz bekommen. Das liegt an dem speziellen Binder, der wegen der Langwellenstrahlung transparent sein muss, aber nicht stabil genug für die Außenanwendung ist.

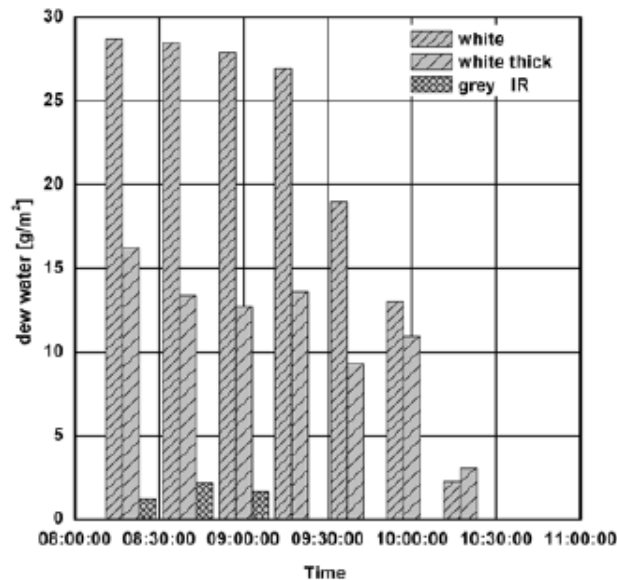


Bild 99:

Verläufe des Oberflächenwasser für nach Westen ausgerichtete Wände mit verschiedenen WDVS.

Offensichtlich bereits geringe Differenzen im mittel- oder langfristigen Feuchtegehalt sichtbare Wachstumsunterschiede verursachen, könnte die Kontrolle der hygrischen Oberflächenparameter zu einer tiefgreifenden Reduzierung des biologischen Bewuchses führen. Es muss in diesem Zusammenhang noch geklärt werden, inwieweit Hydrophobie der Oberfläche, die für weniger Wasserabsorption des Außenputzes sorgt, den allgemein erwarteten positiven Effekt einer Reduzierung der Verschmutzung und des mikrobiellen Bewuchses zur Folge hat. Es ist auch möglich, dass ein bestimmter Grad an Absorptionsfähigkeit des Substrats dazu beiträgt, mikrobielles Wachstum zu verhindern, indem Kondenswasser von der Oberfläche tiefer in Bauteile abgeleitet wird, damit es nicht mehr für Mikroorganismen erreichbar ist.

Um den zeitlichen Verlauf der Oberflächenfeuchte unter natürlichen Randbedingungen zu bestimmen, wurde das bereits beschriebene Verfahren des Abtupfens und anschließenden Wiegens eines Vlieses an einer nach Westen ausgerichteten Außenfassade mit verschiedenen Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) und Anstriche verwendet. Die Ergebnisse sind für einen zweistündigen Zeitraum im September in Bild 100 dargestellt. Beim ersten Messzeitpunkt um 8:00 Uhr war die Kondenswassermenge auf dem dicken und dünnen Putzsystem mit mineralischer Beschichtung deutlich geringer als auf dem dünnen Putzsystem mit Silikonharzanstrich und ultrahydrophober Beschichtung. Beim Probekörper mit ultra-hydrophober Beschichtung nimmt die Kondenswassermenge am Anfang immer noch zu, wohingegen sie bei den anderen Probekörpern fast konstant bleibt. Die Probekörper mit dickem und dünnem Putz mit Wasser abstoßender Beschichtung trocknen im zeitlichen Verlauf, wobei der Probekörper mit dem dicken Putz langsamer abtrocknet wie der mit dem dünnen Putz. Um 10:00 Uhr sind beide Wände bereits an der Oberfläche trocken, wobei auf den Silikonharzanstrichen und insbesondere auf der ultra-hydrophoben Beschichtung noch immer Kondenswasser zurückbleibt.

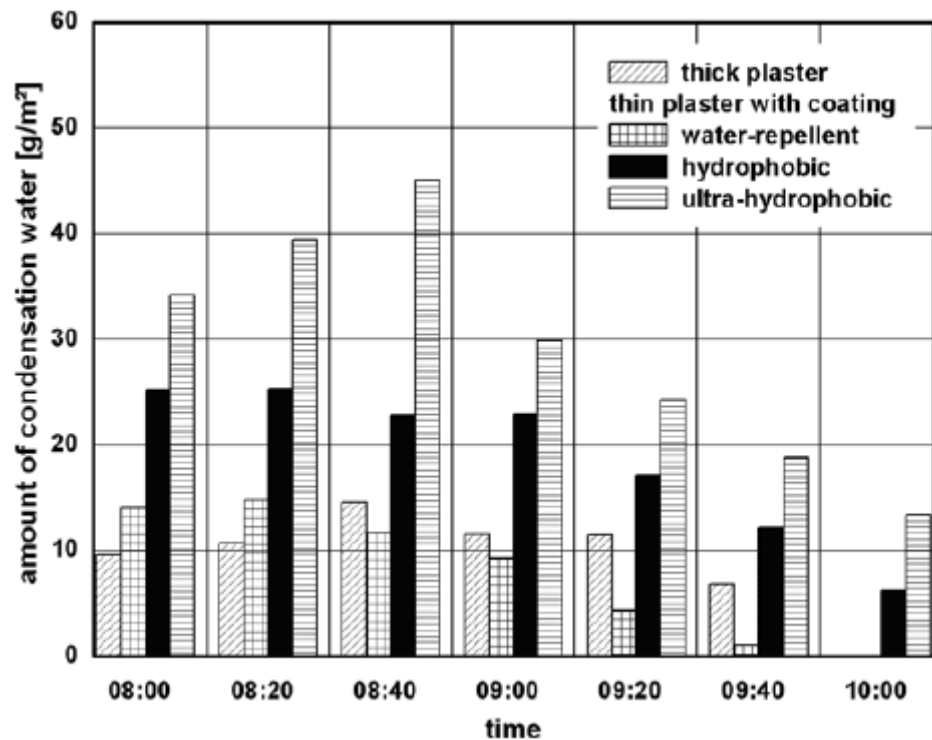


Bild 100:

Gravimetrische Bestimmung der Oberflächenfeuchte auf einer Versuchswand mit verschiedenen Beschichtungen.

Der zeitliche Verlauf der Oberflächenfeuchte kann durch Verwendung der spezifischen Materialeigenschaften der Putze und Beschichtungen auf der Fassade mit Hilfe eines Berechnungsverfahrens, das bei Krus & Rösler 2006 [68] beschrieben wird, berechnet werden. Bild 101 zeigt die Wassermenge an der Außenfassade für einen ultrahydrophoben Anstrich und eine Dispersionssilikatbeschichtung, die sich während der Hauptwachstumsperiode von Mikroorganismen im Herbst angesammelt hat. Es ist gut zu erkennen, dass die Dispersionssilikatbeschichtung nur die Hälfte der Wassermenge für die Mikroorganismen liefert. Bei der Beurteilung dieser Forschungsergebnisse muss in Betracht gezogen werden, dass auch andere Einflussfaktoren, wie z. B. Selbstreinigungseffekte, mikrobiellen Bewuchs trotz einer hohen Oberflächenfeuchte verhindern können.

Schlussfolgerungen

Das wesentlichste Kriterium für das Risiko des mikrobiellen Bewuchses an Fassaden ist die Verfügbarkeit von ausreichenden Wassermengen. Befeuchtung während der Nacht ist von besonderer Bedeutung, weil sie die einzig mögliche Erklärung für eine Zunahme des mikrobiellen Wachstums auf der nördlichen Seite mit nur geringen Mengen an Schlagregen darstellt. Im direkten Vergleich von monolithischen Wänden aus Porenbeton oder Mauerziegeln mit Wänden mit WDVS sind die Vorteile der monolithischen Wände beachtlich. Für die energetische Verbesserung von bestehenden Gebäuden werden in den meisten Fällen WDVS verwendet. Deshalb müssen Lösungen gegen den mikrobiellen Bewuchs dieser Systeme gefunden werden. Die Wahl einer dunkleren Anstrichfarbe bringt nur eine sehr geringe Verbesserung, weil die Wärmeka-

pazität des Standardputzes fehlt. Bei dicken Putzen reduziert sich die Kondenswassermenge ein wenig, aber der größte Vorteil dieses Systems liegt in der Kapazität, einen Teil des Kondenswassers unter die Oberfläche zu absorbieren. Die effektivste Methode ist allerdings die Verwendung von IR-Anstrichen, die den für mikrobiellen Bewuchs verantwortlichen physikalischen Effekt reduzieren. Leider sind diese Anstriche für langfristige Bewitterung bislang noch nicht stabil genug.

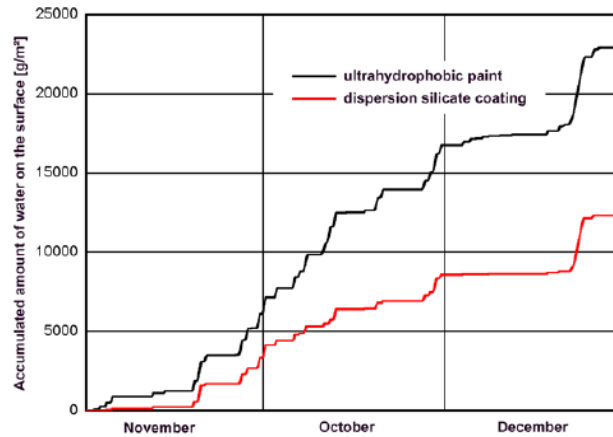


Bild 101:

Wassermenge auf einer Außenfassade von einem ultra-hydrophoben Anstrich und einer Dispersionssilikatbeschichtung, die sich während der Hauptwachstumsphase von Mikroorganismen im Herbst angesammelt hat.

Doch nach gegenwärtigem Kenntnisstand ist offensichtlich nicht die Kondenswassermenge für das Risiko des mikrobiellen Bewuchses entscheidend sondern das Kondenswasser an der Außenoberfläche, das für die Mikroorganismen in der anfänglichen Wachstumsphase verfügbar ist. Absorbierende Substrate können in dieser Hinsicht beachtliche Vorteile haben.

Eine exakte Abschätzung der Zeitdauer, in der Kondenswasser an einer Fassade auftritt, bevor das Algenwachstum beginnt, kann noch nicht gemacht werden. Wenn man bedenkt, dass trotz der Befeuchtung während der Nacht die meisten installierten Wärmedämmverbundsysteme frei von Schaden blieben, kann man davon ausgehen, dass schon eine geringe Abnahme des Kondenswassers von ca. 20 % oder etwas mehr das Risiko des mikrobiellen Bewuchses beträchtlich reduzieren kann. Aber in besonderen Fällen, z. B. bei schattigen Fassaden in der Nähe eines Waldes oder Flusses o.ä., hilft nur die Verwendung von Bioziden.

6.1.4 Energieeinsparung

Das Energiemanagement birgt ein gewisses Konfliktpotenzial, da sowohl die Ziele der Energieeinsparung als auch der Wirtschaftlichkeit bei der Planung, dem Bau, dem Betrieb und der Wartung des Gebäudes und seiner technischen Anlagen verfolgt werden müssen. Mitunter erfordert feuchtebedingtes Schadenrisiko wie z.B. von Schimmelpilz, zusätzliche Investitionen in den Wärmeschutz und/oder die Gebäudetechnik. Dennoch ist es möglich, das Feuchteproblem wirtschaftlich anzugehen und dabei zudem weniger Energie als bei vielen konventionellen Bauweisen zu verbrauchen.

Feuchtigkeit und Wärmeleitfähigkeit

Bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen wird für die üblichen Berechnungsverfahren von Ausgleichsfeuchtegehalten ausgegangen. Dies ist selbst bei Anfangsfeuchtegehalten nicht falsch, solange die betroffene Bauteilschicht gut gedämmt und das Dämmmaterial selbst trocken bleibt. Anders verhält es sich jedoch, wenn die dämmende Bauteilschicht selbst mit Feuchte beaufschlagt ist oder sich eine feuchte Bauteilschicht zusammen mit einer dampfdurchlässigen Wärmedämmung zwischen zwei Dampfbremsen befindet.

Im ersten Fall ist der Wärmedurchgangskoeffizient anfangs höher als geplant. Bei Porenbeton kann der Anfangswert beispielsweise doppelt so hoch, also 100 % höher sein als der Zielwert (Bild 102). Während des Trocknungsvorgangs bei trockener Luft fällt der Wärmedurchgangskoeffizient dann auf den Zielwert. Dieser ist Abhängig von der Dicke der Wand, der Temperatur und der relativen Luftfeuchten innen und außen sowie des Dampfdiffusionswiderstands der Raumschließungsflächen.

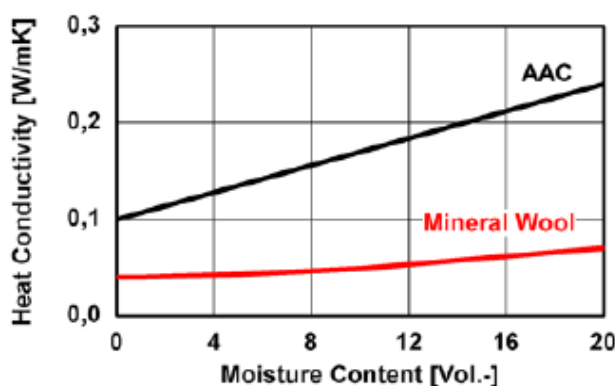


Bild 102:
Experimentell ermittelte Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts der Baustoffe Mineralfaserdämmung (rot) und Porenbeton (schwarz).

Die Wärmeleitfähigkeit kann allgemein in Abhängigkeit des Feuchtegehalts dargestellt werden. Dafür wird der Feuchtegehalt von trockenen und in der Klimakammer bei 80 % r. F. [28] konditionierten Proben mit dem Plattengerät

gemessen. Wohingegen die hygrothermischen Materialeigenschaften für gebräuchliche Dämmstoffe wie Mineralwolle und Polystyrolschaum bekannt sind, gibt es für ökologische Dämmstoffe noch nicht genügend Daten. Sie sind für gewöhnlich hygroskopisch und haben entsprechend ziemlich hohe Feuchtegehalte. Um einen geeigneten Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit zu erhalten, ist in den Bauvorschriften deshalb vorgesehen die im trockenen Zustand gewonnenen Messwerte um einen bestimmten Wert zu erhöhen. So sieht z.B. die deutsche Norm einen Zuschlag für α von 20 % vor.

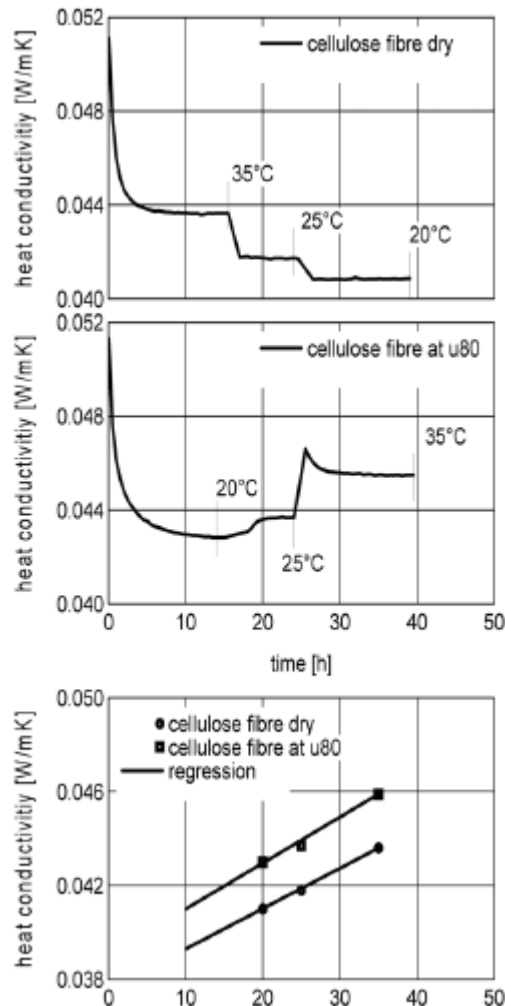


Bild 103: Messung der Wärmeleitfähigkeit für eine Zellulosefaserdämmung. Die Ergebnisse in der Graphik oben zeigen die Messungen einer trockenen Probe, die in der Mitte des einen bei 80 % r. F. konditionierten Probe. Die Graphik unten zeigt die Extrapolation der Wärmeleitfähigkeit für den Temperaturbereich zwischen 10 °C und 40°C. Aus der Differenz dieser beiden linearen Funktionen kann der feuchteabhängige Zuschlag der Wärmeleitfähigkeit berechnet werden.

Bild 103 zeigt den zeitlichen Verlauf der bei instationären Wärmestrom im Plattengerät bestimmten Wärmeleitfähigkeit für Zellulosefaserdämmstoff. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft der Zellulosefaser nimmt die anfangs trockene Probe geringere Mengen an Feuchte aus der Umgebungsluft auf. Die-

ser Effekt wird in die Auswertung der Messergebnisse miteinbezogen. Die Grafik in Bild 103 unten zeigt die Extrapolation der Wärmeleitfähigkeit für den Temperaturbereich zwischen 10 °C und 40 °C. Aus der Differenz dieser beiden linearen Funktionen kann die feuchteabhängige Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit berechnet werden. Dabei zeigt sich, dass bei 80 % r. F. der Unterschied der Wärmeleitfähigkeit des feuchten zum trockenen Dämmstoff nur 6 % beträgt. Das ist viel weniger als der von der deutschen Norm geforderte Zuschlag von 20 %. Die Diskrepanz kann wie folgt erklärt werden:

Bild 104 zeigt den gemessenen und den berechneten durchschnittlichen Wärmestrom durch ein bei 80 % r.F. konditioniertes Probekörper aus Zellulosefaser. Die Berechnungen werden auf drei verschiedene Arten durchgeführt. Die erste umfasst latente Wärmeeffekte durch Feuchteverdampfung an der Heizplatte und Kondensation an der Kühlplatte sowie einen Feuchtezuschlag von 6 % zur Wärmeleitfähigkeit. Im zweiten und dritten Fall werden nur die latenten Wärmeeffekte oder der Feuchtezuschlag berücksichtigt. Es ist natürlich physikalisch nicht korrekt, latente Wärmeeffekte während hygrothermischen Berechnungen auszuschließen. Hier ist es jedoch notwendig, um die Bedeutung dieser einzuschätzen. Aus den Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass der gemessene Feuchtezuschlag von 6 % nur der latente Wärmeeffekt ist. Das bedeutet, dass die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes im Gleichgewicht mit 80 % r. F. nicht höher ist als in trockenem Zustand. Der Temperaturgradient im Dämmstoff führt jedoch während des Versuchs zu einer Umverteilung der Sorptionsfeuchte durch Dampfdiffusion. Dies hat einen Enthalpiefluss zur Folge, der sich auf den Versuch mit der Plattengerätetemethode ähnlich auswirkt wie der Wärmestrom durch Konduktion. Es gibt allerdings einen deutlichen Unterschied zwischen dem Enthalpiefluss und dem Konduktionswärmestrom. Der Enthalpiefluss ist von seinen Eigenschaften her instationär und umkehrbar. Das heißt, er hört auf, sobald das lokale Sorptionsgleichgewicht erreicht ist. Wenn der Temperaturgradient umgekehrt wird, verändert der Enthalpiefluss seine Richtung und die verlorene Energie wird zurückgewonnen. Deshalb sollten die latenten Wärmeeffekte nicht in die Wärmeleitfähigkeit einbezogen werden.

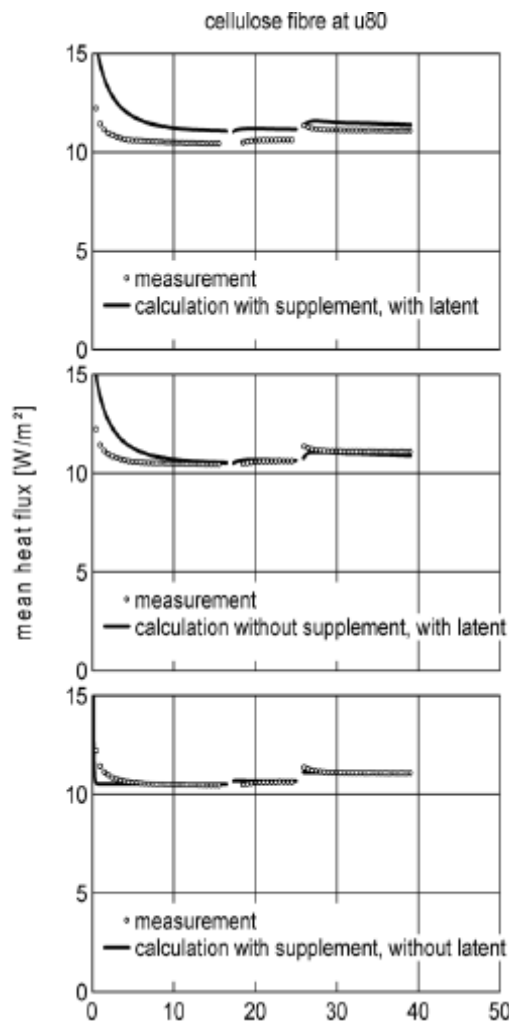


Bild 104:

Vergleich zwischen dem gemessenen und dem mit WUFI berechneten durchschnittlichen Wärmestrom für eine bei 80 % r. F. konditionierte Zellulosefaserprobe. Oben: Berechnung, bei der der gemessene Feuchtezuschlag und die latenten Wärmeeffekte berücksichtigt werden. Mitte: Berechnung, bei der der gemessene Feuchtezuschlag vernachlässigt wird, aber die latenten Wärmeeffekte berücksichtigt werden. Unten: Berechnung, bei der der gemessene Feuchtezuschlag berücksichtigt wird, aber die latenten Wärmeeffekte vernachlässigt werden.

Eine Umverteilung der Feuchte tritt überall dort auf, wo die Feuchte sich im Winter an der Außenseite der Dämmung akkumuliert. Doch diese Umverteilung geschieht nur ein Mal pro Heizperiode. Daher ist der gesamte latente Wärmeverlust im Vergleich zur Wärmeübertragung vernachlässigbar. Als praktisches Beispiel zeigt Bild 105 den mit HAM berechneten inneren Wärmestrom einer Dachkonstruktion mit Zellosedämmung und südlicher Orientierung an 4 Wintertagen mit hoher Strahlung [64]. Die Ergebnisse zeigen, dass der Mittelwert der Wärmeströme gleich der Berechnung mit und ohne latente Wärmeeffekte ist. Werden diese Wärmeströme während der gesamten Heizperiode integriert, beträgt die Differenz der Wärmeverluste nur 0,5 %. Deshalb sollten diese instationären Wärmeeffekte nicht in den Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen einbezogen werden.

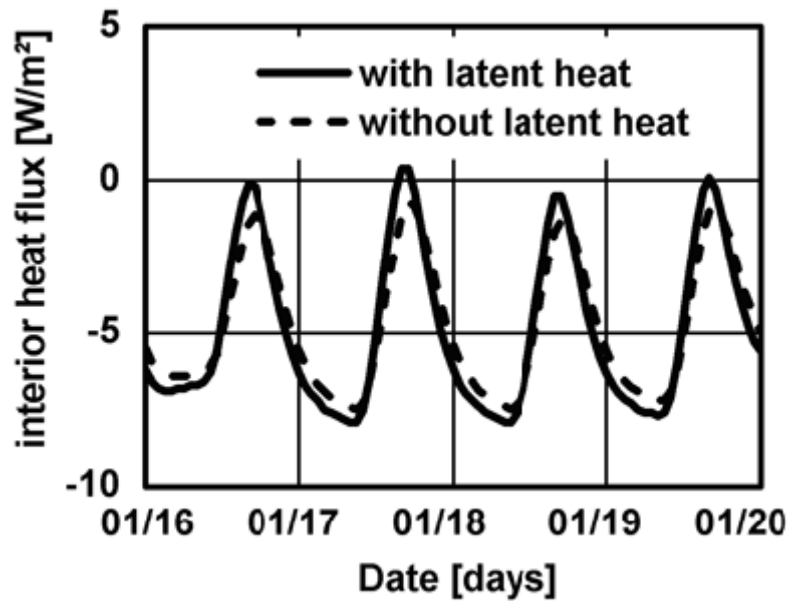


Bild 105:
Berechneter innerer Wärmestrom einer nach Süden gerichteten Dachkonstruktion (Dachneigung 50°) mit Zellulosedämmung während 4 Wintertagen mit hoher Strahlung. Das Bild zeigt die Berechnung mit und ohne latente Wärmeeffekte.

Einfluss der Baufeuchte auf die Energieeffizienz

Bekanntermaßen gibt es unterschiedliche Ursachen für Feuchte in Bauteilen. Die Baufeuchte als eine dieser Ursachen kann wiederum selbst unterschiedliche Ursachen haben. Sie spiegelt die Baugeschichte eines Gebäudes wieder und gibt Auskunft über den Transport, die Lagerung und die Art wie die Baustoffe auf der Baustelle eingebaut wurden. Einige Baustoffe werden bereits herstellungsbedingt feucht auf die Baustelle geliefert, so z.B. Porenbeton. Andere Baustoffe werden erst auf der Baustelle durch Regen oder durch den Bau anfallendes Wasser feucht. So wird z.B. eine große Menge Feuchte durch das im Mörtel befindliche Anmachwasser in ein Mauerwerk eingebracht. Aber auch manch chemische Reaktion ist Ursache für Baufeuchte.

Somit besitzen Neubauten, besonders wenn sie in Mauerwerk erstellt wurden, nach der Fertigstellung eine ziemlich hohe Feuchtelast. Beurteilungskriterien der anfänglichen Baufeuchte bestehen einzig und alleine im schadenfreien Austrocknen. Verzögert sich der Trocknungsprozess können u.a. die geplanten U-Werte nicht erreicht und/oder durch Umverteilung der Baufeuchte andere feuchteempfindliche Baustoffschichten gefährdet werden.

Typischerweise werden die Nutzer in der Austrocknungsphase monatelang durch hohe Raumlufffeuchten belästigt, die zudem das Schimmelpilzrisiko an geometrischen Wärmebrücken begünstigen. Außerdem ist die Austrocknungsphase immer mit zusätzlichem Energieverbrauch verbunden, egal ob sie kurz oder lang dauert. Da die Feuchte zudem die Wärmedämmeigenschaften der Bauteile verschlechtert ist also ein rasches Austrocknen erwünscht.

Die Austrocknung von Mauerwerkswänden wird maßgeblich von der Oberflächengestaltung der Wände beeinflusst. Die Auswirkungen der beiden verschiedenen Innenoberflächen Gipsputz und Fliesen hinsichtlich der Austrocknungsdauer und der daraus entstehende jährliche Heizbedarf werden im Folgenden berechnet. Für die Berechnungen wird ein Gebäude mit einem Flachdach ($R = 5,4 \text{ m}^2\text{K/W}$) und 36,5 cm starke Außenwände ($R = 2,7 \text{ m}^2\text{K/W}$) zugrunde gelegt. Der Wandaufbau besteht von außen nach innen aus einem Kalkputz, Porenbeton und Gipsputz. Die Fensterfläche der Südfassade des untersuchten Gebäudes beträgt 50 m², die der anderen Himmelsrichtungen jeweils 20 m². Das Raumvolumen errechnet sich zu 1625 m³ und die Grundfläche zu 250 m². Als Randbedingung wird die Raumtemperatur zwischen 8:00 und 16:00 Uhr auf 20 °C angenommen. Während dieser Zeit sind 40 Studenten anwesend. Die angenommene Feuchteproduktion beträgt 16 kg pro Tag. In der restlichen Zeit, d. h. während der Nacht, beträgt die Temperatur 18 °C ohne Feuchteproduktion und Wärmequellen. Während der Betriebszeit wird eine Luftaustauschrate von 1 h⁻¹ angenommen, d.h. einmal pro Stunde wird die gesamte Innenraumluft ausgetauscht. Die strikte Einhaltung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte wird durch idealisierte raumluftechnische Anlagen im Programm WUFI Plus garantiert.

Bild 106 zeigt den Einfluss der Oberflächen und der Dämmung auf den jährlichen Heizbedarf, die relative Raumluftheuchte und den Wassergehalt des Porenbetons. Die Variante mit Fliesen zeigt die langsamste Austrocknung. Im Gegensatz dazu trocknet die Variante mit Gipsputz am schnellsten aus. Hier kann das Bauteil sowohl nach innen wie nach außen austrocknen. Die Auswirkung auf den Heizbedarf ist im Diagramm in Bild 106 oben dargestellt.

Built-In Moisture

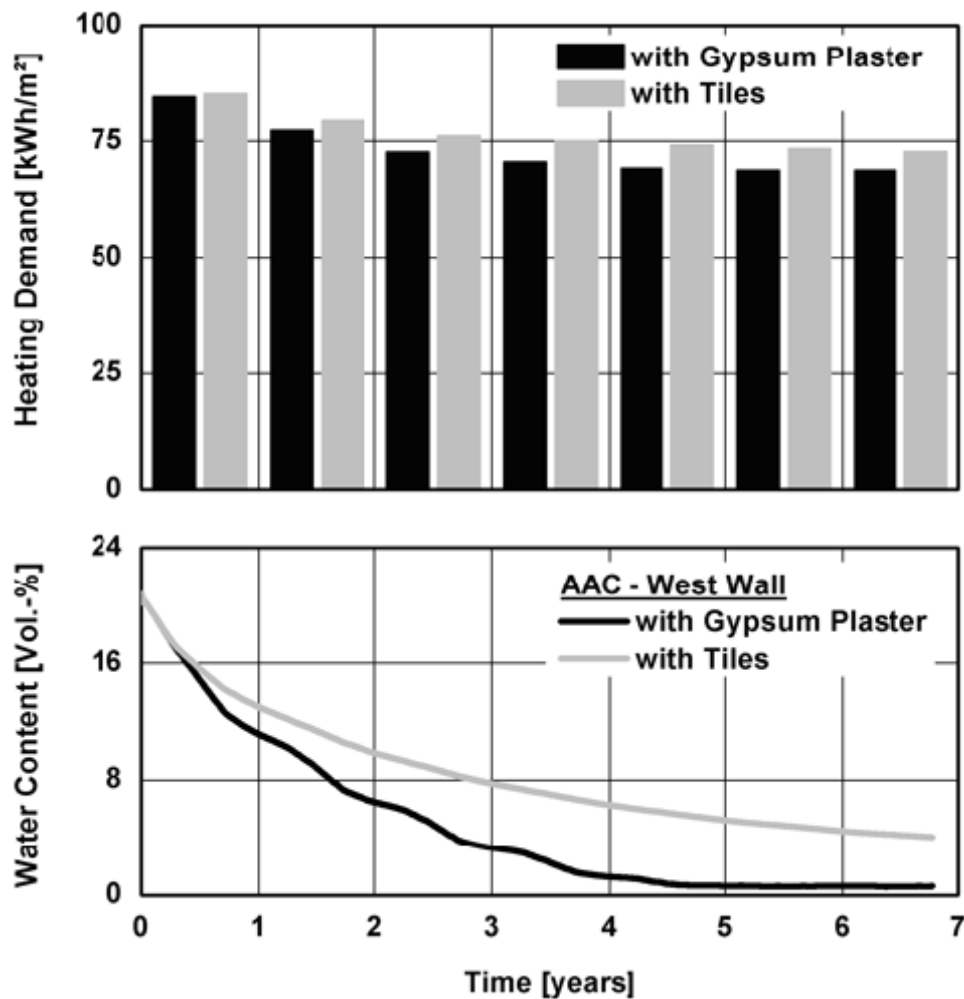


Bild 106:

Einfluss der Wandoberflächen auf das Trocknungsverhalten (unten) von Porenbeton mit inhärenter Feuchte und die Auswirkung der Feuchte auf den erreichten Heizbedarf (oben).

Die Untersuchungen zeigen, dass der Diffusionswiderstand der Raumboflächen ein Schlüsselparameter ist. Besonders der Wandaufbau mit Fliesen bedarf mehrere Jahre, bis die Ausgleichsfeuchte erreicht wird. Der hohe Feuchtegehalt von Porenbeton verschlechtert den U-Wert sehr stark, aber auch zusätzliche Lüftungswärmeverluste erhöhen den Energieverbrauch weiter. Die verstärkte Lüftung wird wegen den erhöhten Raumlufftfeuchten während der Austrocknungsphase notwendig.

6.2 Raumklimaregelung

Wasserdampf ist ein Bestandteil der Raumluft, der durch zwei besondere Eigenschaften gekennzeichnet ist. Zum Einen haben die Verdunstung sowie die Tauwasserbildung etwas mit latenter Wärme zu tun und können die Energieeffizienz eines Gebäudes stark beeinflussen. Zum Anderen ist die relative Luftfeuchte ein wichtiger Faktor für die empfundene Raumluftqualität, sie steht in Beziehung zu einigen Schadstoffen (z. B. Mikroorganismen, Emission von flüchtigen organischen Verbindungen etc.) und sie beeinflusst die Beständigkeit von Bauteilen.

Hierfür muss jede Strategie zur Regelung der Raumluftfeuchte stets im Zusammenhang mit energetischen Fragen und Fragen hinsichtlich der Raumluftqualität betrachtet werden. Im Allgemeinen werden "aktive" und "passive" Feuchteregelungsstrategien unterschieden. Die aktiven Strategien nutzen Feuchtesensoren und beinhalten bestimmte Maßnahmen, wenn Grenzwerte über- bzw. unterschritten werden. Beispielsweise wird die Luftwechselrate verändert, die Luft be- oder entfeuchtet etc. Die passiven Strategien nutzen den Feuchtepufferungseffekt von Materialien, um Feuchteschwankungen zu reduzieren. In der Praxis werden beide Strategien zur effizienten Regelung der Raumluftfeuchte kombiniert.

Um die Effizienz von Raumklimatisierungsanlagen zu verbessern, ist es bei aktiven feuchtegeregelten Lüftungsstrategien und feuchtegeregelten Lüftungs- und Kühlanlagen sehr wichtig die Feuchte zusammen mit energetischen Belangen und der Raumluftqualität zu berücksichtigen.

Aktive feuchtegeregelte Lüftungssysteme

Hintergrund

Die Lüftung spielt beim Raumklima eine wesentliche Rolle. Sie ist notwendig, um eine gute Raumluftqualität aufrechtzuerhalten, indem innerhalb des belüfteten Raums abgegebene Schadstoffe verdünnt und abgeführt werden. Dabei gibt es verschiedene Anforderungen an die Belüftung von Räumen:

- Abführen von menschlichen Ausdünstungen (CO₂-Gehalt kann dabei als Indikator verwendet werden) und Gerüchen,
- Begrenzung von Verunreinigungen und Feuchte, die durch normale Tätigkeiten der Nutzer verursacht wird,
- Begrenzung der Schadstoffe, die von Baumaterialien und Innenausstattungen abgegeben werden und
- in manchen Fällen die erforderliche Kühlung.

Eine leistungsstarke Lüftungsanlage mit niedrigem Energieverbrauch muss zwei widersprüchlichen Anforderungen genügen: einerseits ein angemessener Luftvolumenstrom für eine zufriedenstellende Raumluftqualität und andererseits

muss sie ein minimaler Luftvolumenstrom zur Reduzierung des Lüftungswärmeverlusts. Bei Lüftungsanlagen mit variablem Luftstrom, der anhand von Kriterien wie Bedarf, Zeitschaltuhr oder Nutzererkennung geregelt wird, schwankt die Lüftungsrate zwischen einem Maximum und einem Minimum, welches jeweils abhängt von der Nutzung und von der Verschmutzung wie z. B. Feuchte- oder CO₂-Produktion.

Das Energieeinsparpotential mit kohlendioxidgeregelten Lüftungsanlagen (DCV, Demand Controlled Ventilation) [87], [35] ist bekannt (10 % bis 80 %). Dennoch bleiben Fragen bezüglich der Raumluftqualität offen, wenn nur CO₂ in Betracht gezogen wird [14]. Im Gegensatz dazu, ist die Luftfeuchte in einem Gebäude nicht nur von der Anwesenheit der Nutzer abhängig, sondern auch vom Luftaustausch mit der Außenluft, vom Kochen, Duschen, Wäschewaschen und -trocknen. Darüber hinaus führen hohe Raumluftfeuchten häufig zu gesundheitlichen Beschwerden und Gebäudeschäden. Möglicherweise haben feuchtegeregelte Lüftungsanlagen weniger Schwächen als CO₂-basierte.

Außerdem ist die grundsätzliche Frage, wie sich die Feuchtepufferung auf die Effizienz auswirkt und wie viel Energie mit einer feuchtegeregelten Lüftungsstrategie eingespart werden kann.

Nachdem zwei Feuchtesensoren für die Lüftungsregelung vorgestellt wurden, folgt die Präsentation einiger experimenteller und numerischer Studien, in denen die Effizienz der feuchtegesteuerten Lüftungsanlagen eingeschätzt wird.

Taupunktsensor

Ein neuartiger Feuchtesensor wurde von Krus et al. [71] vorgestellt. Die Idee ist, eine künstliche Wärmebrücke an einem ausgewählten Punkt der Außenwand anzubringen. Mithilfe des hygrothermischen Modells kann diese "Wärmebrücke" so konzipiert werden, dass sich Tauwasser bildet, sobald die Oberflächenfeuchte einen Schwellenwert erreicht hat, der zur Schimmelpilzbildung an problematischen Stellen der Innenoberflächen von Außenwänden (z. B. Ecken) führt. Bild 107 zeigt die schematische Darstellung einer derartigen künstlichen "Wärmebrücke". An der Innenoberfläche einer solchen künstlichen "Wärmebrücke" kann dann ein Taupunktsensor, der die Lüftung regelt, angebracht werden.

Das Lüftungssystem arbeitet, so lange Tauwasser vorhanden ist. Ist keines vorhanden, wird die Lüftungsanlage entsprechend den Anforderungen automatisch ausgeschaltet (oder auf einen Mindestwert zurückgefahren).

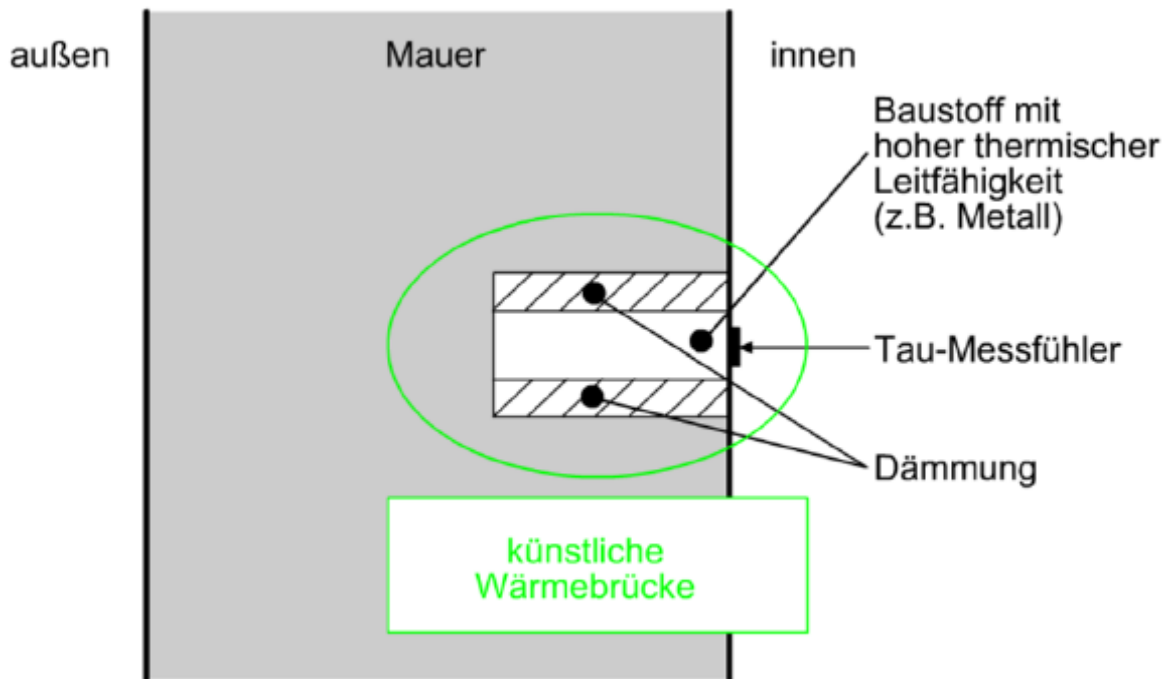


Bild 107:
Schematische Darstellung einer künstlichen "Wärmebrücke" mit Taupunktsensor

Der Vorteil eines derartigen Taupunktschalters besteht darin, dass die Lüftung nur dann betrieben wird, wenn die Außenlufttemperatur geringer ist als die der Raumluft, was vom bauphysikalischen Standpunkt aus richtig ist. Deshalb funktioniert die Lüftung nur dann, wenn die Raumluftfeuchte hoch ist und die innenseitige Oberflächentemperatur so weit unter der Raumlufttemperatur liegt, dass die innenseitige Oberflächenfeuchte bei Außenwänden zu hoch ist. Unnötige und zum Teil sogar falsche Lüftung wird dadurch vermieden. Der besondere Vorteil bei der Verwendung eines derartigen Taupunktschalters ist, dass er ohne jegliche Messgeräte funktioniert. So ist er kosteneffizient, nahezu wartungsfrei und regelmäßige Kalibrierungsmaßnahmen entfallen.

Vergleich Taupunktsensor und feuchteabhängiges System

Ziel der von Krus et al. vorgelegten Arbeit war es, die Effizienz der beiden Feuchtesensoren zu vergleichen. Die Untersuchungen wurden in einem alten Prüfgebäude mit zwei kleinen Räumen und schlechter Wärmedämmung in Deutschland durchgeführt. Der Wandaufbau besteht aus 27 cm starken Bimsbeton mit Innen- und Außenputz. Während der Untersuchungen war das Fenster abgedeckt, um jeglichen Einfluss von Sonneneinwirkung zu vermeiden. Sensoren wurden an verschiedenen Punkten angebracht, um die Temperatur und Feuchtebedingungen sowie den Energieverbrauch der Heizung und die Auswirkung des Lüftungssystems auf das Raumklima zu messen. Die Raumtemperatur wurde konstant auf 20 °C gehalten und die Feuchte wurde mit einem Ultraschallverdampfer erzeugt. Es wurde die Feuchtezufuhr eines normalen Tages einschließlich Duschen am Morgen zwischen 6 und 8 Uhr sowie Kochen, Waschen und allgemeine Feuchteproduktion durch Menschen am Abend zwischen 16 und 22 Uhr simuliert. In den Phasen zwischen den Spitzenbelastungen wird

die Luftfeuchte auf einen kleineren Wert reduziert, der die durch Pflanzen und Haustiere verursachte Feuchtelast simuliert. Die Gesamtfeuchtelast beträgt 7,8 kg/Tag bezogen auf eine Wohnung mit 65 m², was bezogen auf die Größe des Versuchsaumes in diesem Fall 2,1 kg/d ergibt.

Künstliche Wärmebrücken aus Metallzylindern verschiedener Länge wurden in der Wand eingebaut. Jeder Taupunktsensor auf der Wärmebrücke kann zur Regulierung des Lüftungssystems verwendet werden. Ein anderes kommerzielles und nachrüstbares Lüftungssystem wurde als Vergleichssystem installiert. Dieses System ist mit einem Luftzufuhrelement mit Öffnungsklappen ausgerüstet, die von einem eingebauten feuchteabhängigen Sensor gesteuert werden.

Ergebnisse

Bild 108 zeigt ein Beispiel für Verläufe der Raumluftfeuchte (rote Kurve), der Feuchte auf der Wärmebrückenoberfläche (schwarze Kurve) sowie der Schaltpunkte des Taupunktschalters (blaue Kurve) für die 15 cm starke künstliche Wärmebrücke. Es ist zu erkennen, dass der Taupunktschalter die Lüftung genau dann einschaltet, sobald eine relative Luftfeuchte von 100 % auf der Oberfläche erreicht ist und sich Tauwasser bildet. Die Raumluftfeuchte (rote Kurve) steigt während der Befeuchtung um ca. 10 % auf ein Maximum von ca. 55 % r. F. an. Der erstaunliche Effekt dabei ist, dass der Taupunktschalter die Lüftung während den Befeuchtungsphasen immer wieder aus- und einschaltet. Ein Grund dafür ist wahrscheinlich, dass die Leistung des eingebauten Ventilators zu hoch ist. Es ist zu erwarten, dass die Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge durch eine Begrenzung des Ventilators reduziert werden kann.

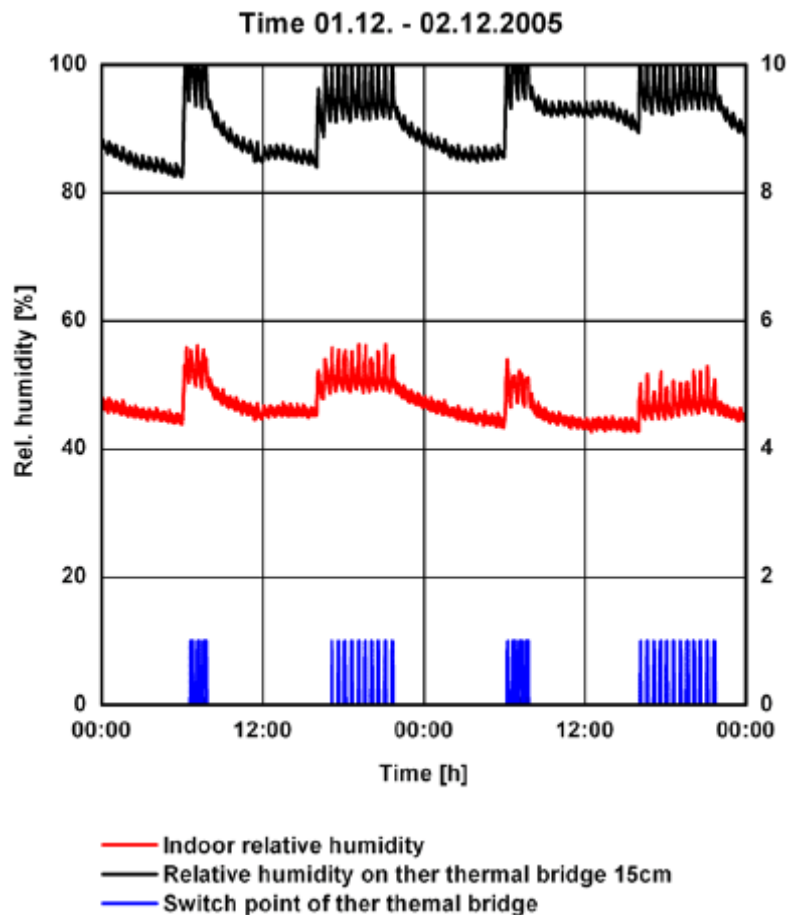


Bild 108:

Verläufe der Luftfeuchte für zwei aufeinander folgende ausgewählte Tage und Schaltpunkte mit Ventilatorregulierung durch den Taupunktschalter einer 15 cm starken Wärmebrücke.

Der Raumluftfeuchteverlauf bei ähnlichen Außenluftbedingungen im Falle einer Ventilatorregulierung durch das kommerzielle Lüftungssystem ist im Bild 109 dargestellt. Der Verlauf zeigt einen größeren Schwankungsbereich als der bei der Anwendung eines Taupunktschalters (Bild 108). Neben der gemessenen Ventilatorleistung (blaue Kurve) ist auch die Klappenposition (grüne Kurve) dargestellt, wobei der Wert am unteren Ende des Diagramms völlig geschlossen anzeigt und am oberen Ende völlig geöffnet. Es ist deutlich zu sehen, dass das Lüftungssystem in diesem Fall konstant läuft und damit für einen permanenten Luftaustausch sorgt, der höher ist als der Infiltrationsluftaustausch.

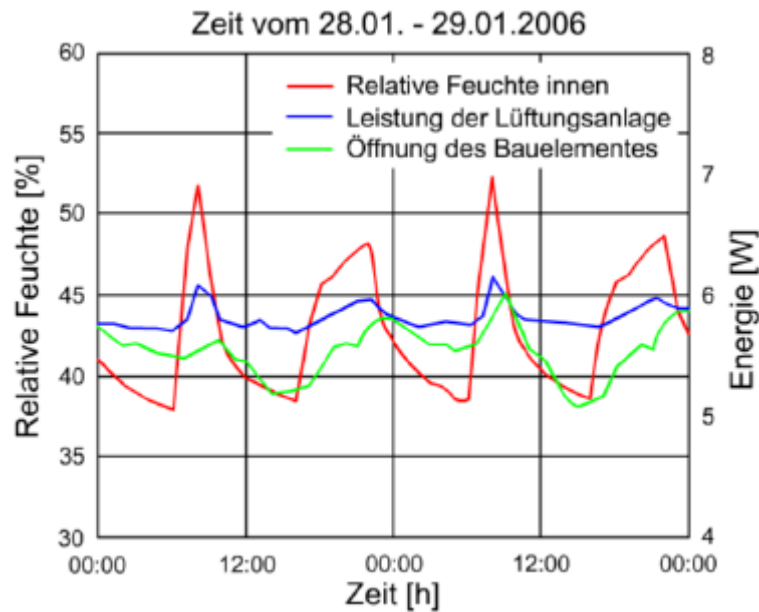


Bild 109: Verläufe der relativen Raumlufftfeuchte und abhängige Reaktionen der Ventilatorregulierung durch ein kommerzielles Lüftungssystem an zwei aufeinander folgenden ausgewählten Tagen.

Im Bild 110 wurde die Heizleistung für das Lüftungssystem mit "Ventilatorregulierung mittels Taupunktschalter", im Bild 111 mit "Luftfeuchte reguliertem Luftzufuhrelement" aufgetragen. In beiden Fällen steigt die Heizleistung während der Befeuchtungsphasen deutlich an, was auf den zunehmenden Luftaustausch, aber auch auf die Verdunstungswärme der vom Ultraschallverdampfer zugeführten Feuchtigkeit zurückgeführt werden kann. Allerdings wurden die Werte für beide Systeme unter leicht unterschiedlichen Bedingungen aufgezeichnet, was die Auswertung der tatsächlichen Energieeffizienz erschwert. Zusätzliche Langzeitmessungen sind deshalb erforderlich.

Der wesentliche Unterschied des Taupunktsensors im Vergleich zu anderen Lüftungssystemen besteht darin, dass der Zweck dieser Anlage nicht darin besteht, für die Belüftung des Nutzers zu sorgen und ihn zu überwachen. Das System funktioniert nur, wenn das Lüftungsverhalten der Benutzer nicht ausreichend ist oder anders ausgedrückt als eine Art automatische Notfallbelüftung. Bei ausreichender Lüftung, bemerkt der Nutzer diese Anlage gar nicht. Deshalb empfiehlt sich diese Art von Ventilatorsteuerung auch für den Bereich des sozialen Wohnungsbaus, da insbesondere dort ein verantwortungsbewusster Umgang mit Wohnraum und Lüftung nicht als garantiert angesehen werden kann.

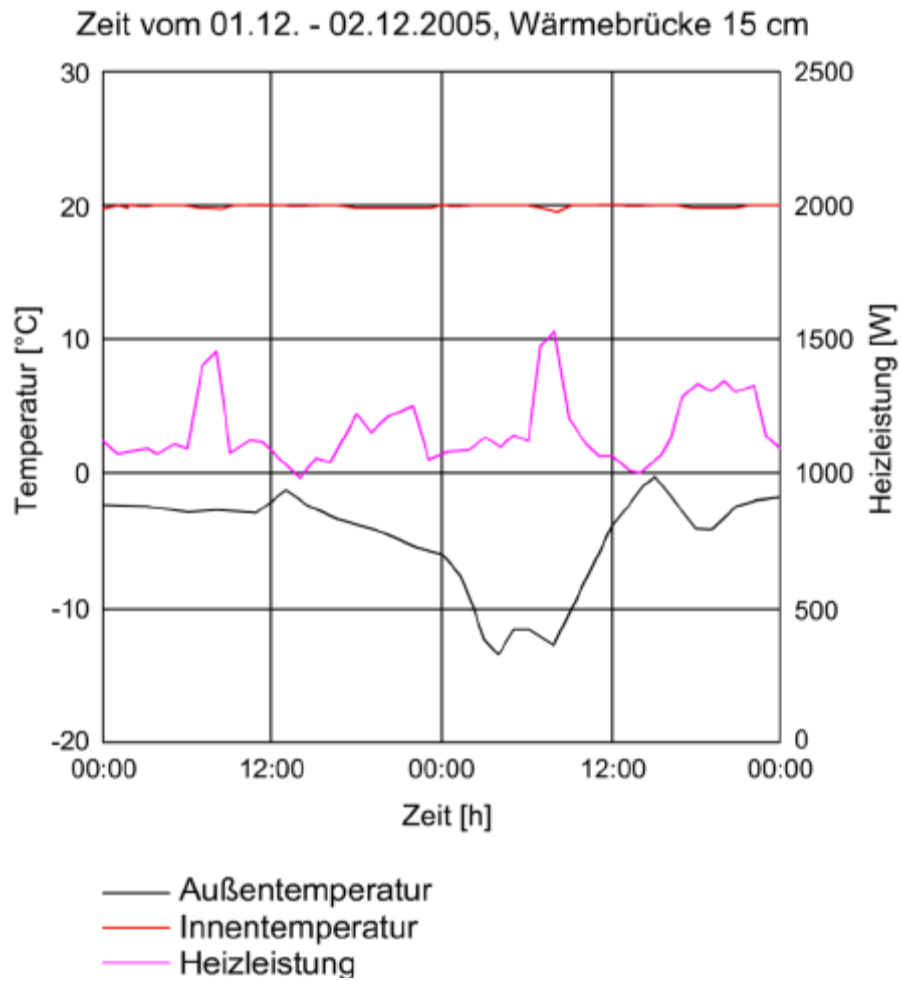


Bild 110:
Verläufe der Temperaturen und Raumwärmeleistung für zwei aufeinander folgende ausgewählte Tage mit Ventilatorregulierung mittels Taupunktschalter.

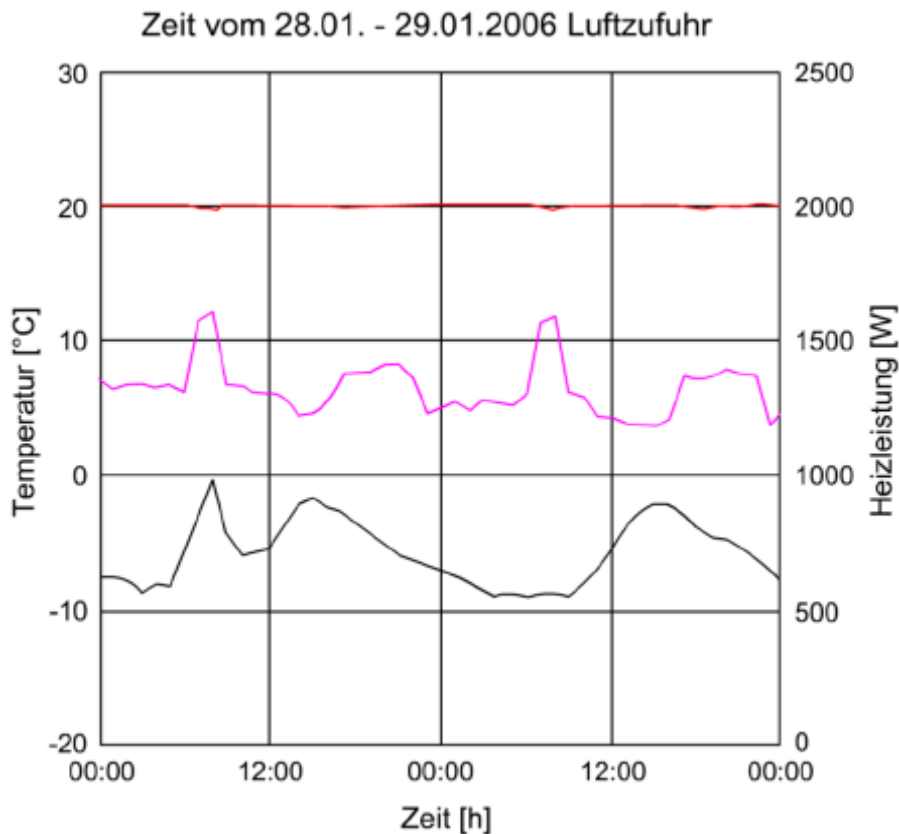


Bild 111:
Verläufe der Temperaturen und Raumwärmeleistung für zwei aufeinander folgende ausgewählte Tage mit Luftfeuchte reguliertem Luftzufuhrelement.

Minimale Lüftungsanforderung bezüglich Schimmelpilzwachstum

Anstatt feuchtegeregelte Lüftungssysteme zu verwenden, ist eine weitere Idee, ein einfaches Lüftungssystem zu konzipieren, das ohne Regelungsstrategien auskommt. Krus et al. [67] bestimmten durch Verbindung des hygrothermischen Raumklimamodells WUFI@Plus mit dem biohygrothermischen Modell WUFI@-Bio eine optimierte Lüftungsstrategie in Abhängigkeit von verschiedenen Feuchtelasten.

Die Berechnung der Lüftungsstrategie zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung, erfolgte an einer typischen Dreizimmerwohnung. Dazu wurden zwei Varianten von hochwirksamen Wärmedämmkonstruktionen untersucht: zum Einen mit außenseitigem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) und zum Anderen mit hochgedämmten Ziegelmauerwerk. Des Weiteren wird ein Beispiel für einen Altbau aus Mauerwerk mit minimaler Wärmedämmung (U-Wert 1,4 W/m²K) mit alten Fenstern (Variante 3) und eines mit neuen luftdichten Fenstern (Variante 4) [63] angegeben. Jeder Raum wurde gesondert betrachtet. Die Feuchteproduktion durch die Nutzer, Pflanzen, Hygiene und Kochen wurde für den Normalfall betrachtet. Für das "Worst-Case-Szenario" erfolgte zusätzlich eine Erhöhung der Feuchteproduktion durch Wäschetrocknen. In diesem Fall wurde die Feuchteproduktion durch Trocknen einer Waschmaschinenfüllung pro Tag auf das Raumvolumen verteilt und zur normalen Feuchtelast addiert.

Die Gesamtfeuchteproduktion für alle Räume betrug 6,74 kg/Tag (9,32 kg/Tag im Falle der Wäschetrocknung).

Die optimalen Lüftungsraten zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung wurden für die beiden Lüftungssysteme Dauerlüftung und Stoßlüftung (Öffnen der Fenster) bestimmt. Das Berechnungsverfahren ist in [97] dargestellt.

Aufgrund von geometrischen Wärmebrücken und des reduzierten Wärmedurchgangskoeffizienten sind die Oberflächentemperaturen vor allem in den Ecken eines Raumes niedriger. Somit ist dort die Oberflächenfeuchte höher und damit auch das Risiko der Schimmelpilzbildung. Die hygrothermischen Bedingungen in den Ecken eines Raumes werden anhand des WUFI®-Plus-Simulationsinstruments berechnet, wobei Korrekturterme verwendet wurden, um die Wärme- und Massenströme zweidimensional abzubilden. Dann wurde das Schimmelpilzrisiko unter Verwendung des biohygrothermischen Modells WUFI®-Bio beurteilt. Die Festlegung der erforderlichen Luftwechselrate oder der Dauer der Stoßlüftung erfolgt iterativ, indem die Temperaturen und die Feuchte in den Raumecken bei gegebenem Lüftungsquerschnitt anhand des modifizierten hygrothermischen Raumklimamodells bestimmt werden. Auf dieser Basis wird das Schimmelpilzrisiko anhand des biohygrothermische Modells beurteilt und der Lüftungsquerschnitt anschließend solange angepasst, bis sich hinreichende Lüftungsanforderungen einstellen (Bild 112).

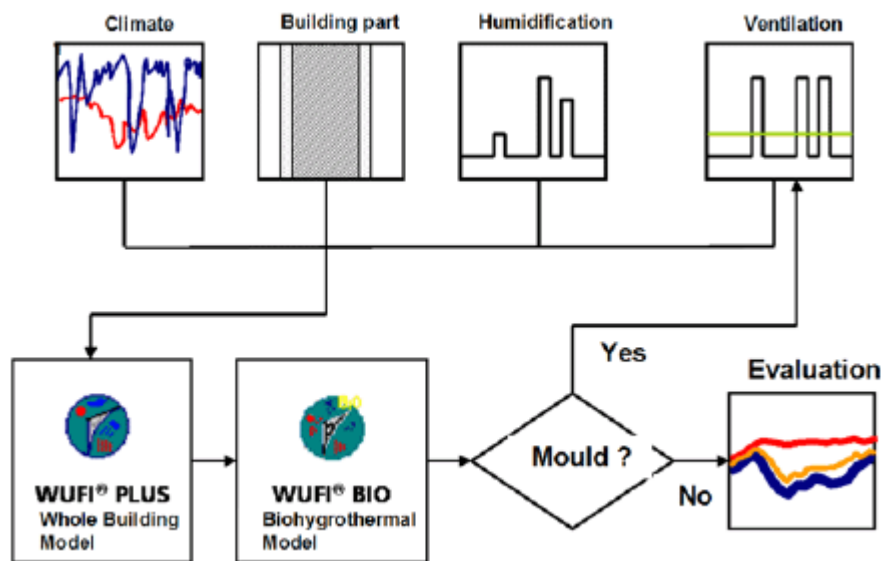


Bild 112: Diagramm mit den einzelnen Berechnungsschritten zur Bestimmung der Lüftungsanforderungen, um Schimmelpilzwachstum zu vermeiden.

Beispielhaft enthält Bild 113 die resultierenden Lüftungsanforderungen zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum in einer Wohnung mit außenseitigem Wärmedämmverbundsystem (WDVS). Es sind die Fälle Dauerlüftung und Stoßlüftung im Schlafzimmer dargestellt. Für die minimale Luftwechselrate bei Dauerlüftung (rote Linie) oder bei Stoßlüftung (violette Linie), bildet sich Oberflächenfeuchte in den Raumecken der Außenwände. Diese liegt gerade unter den für Schimmelpilzbildung erforderlichen Voraussetzungen, die für das biohygrothermische Modell (WUFI®-Bio) definiert sind. Die grüne Linie beschreibt

die Luftwechselrate durch Infiltration, die in der minimalen Luftwechselrate für Dauerlüftung (0,5 h⁻¹ bei einem Altbau mit alten Fenstern, ansonsten 0,1 h⁻¹) definiert und enthalten ist. Der Einfluss einer erhöhten Feuchtelast durch Wäschetrocknen ist offensichtlich. Falls Wäsche getrocknet wird, reicht eine Stoßlüftung von 15 Minuten am Morgen mit einer Luftwechselrate von 10 h⁻¹ nicht mehr aus, um Schimmelpilzwachstum zu vermeiden. In diesem Fall müssten die Fenster drei Mal täglich über einen längeren Zeitraum geöffnet werden.

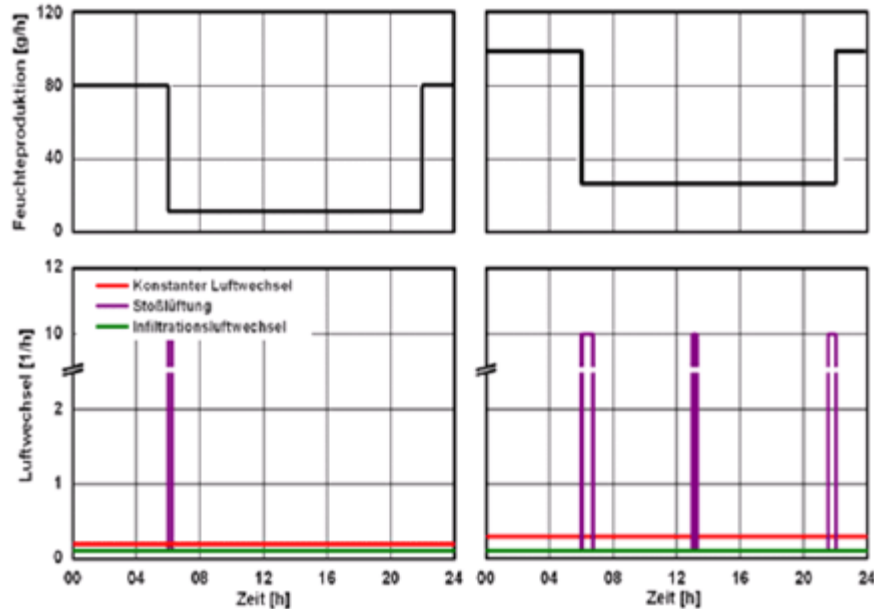


Bild 113:

Oben: Verlauf der Feuchteproduktion in einem Schlafzimmer einer ausreichend gedämmten Wohnung ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknen im Wohnzimmer.

Unten: Bestimmte Lüftungsanforderungen zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum im Falle von Dauerlüftung oder Stoßlüftung. Der Infiltrationsluftaustausch wird auch beschrieben.

Bild 114 zeigt die Anforderungen an die Dauerlüftung, um für alle Varianten und Räume Schimmelpilzbildung zu vermeiden. Ein zusätzlicher Lüftungsbedarf beim Wäschetrocknen ist offensichtlich. Aufgrund der höheren Feuchteproduktion im Badezimmer und in der Küche, insbesondere bei Altbauten, sind die Lüftungsanforderungen deutlich höher. Jedoch reicht der Einsatz einer Dunstabzugshaube mit Abluft normalerweise aus, um die Feuchtigkeit zu entfernen (ohne weitere Betrachtung). Gemäß den Ergebnissen sind die deutlich höheren Lüftungsanforderungen an die Küche von Variante 2 im Vergleich zu Variante 1 mit Dauerlüftung offensichtlich. Die beiden Varianten unterscheiden sich nur im Wandaufbau. Die Variante 1 hat ein außenseitiges Wärmedämmverbundsystem, Variante 2 besteht aus hochgedämmten Ziegelmauerwerk. Die Ursache der unterschiedlichen Energieeffizienzen liegt in der Lage der Küche begründet. Sie ist der einzige untersuchte Raum, der an der nach Westen ausgerichteten Wand Schlagregen ausgesetzt ist. Aufgrund kapillaren Saugens des Außenputzes und der Mauerziegel sind die Innenoberflächentemperaturen und folglich die Lüftungsanforderungen bei Variante 2 höher, was auf die vorübergehend

höheren Feuchtegehalte der Wände zurückzuführen ist. Die Verwendung eines hydrophoben Putzes würde eine Verringerung der Lüftungsanforderungen zur Folge haben. Wie zu erwarten war, verursacht ein geringerer Wärmedämmstandard deutlich höhere Lüftungsanforderungen. Jedoch ist mit Ausnahme von Küche und Bad die in diesem Fall allgemein erforderliche Luftwechselrate von 0,5 h⁻¹ ausreichend, um Schimmelpilzwachstum zu vermeiden, so lange in der Wohnung keine Wäsche getrocknet wird.

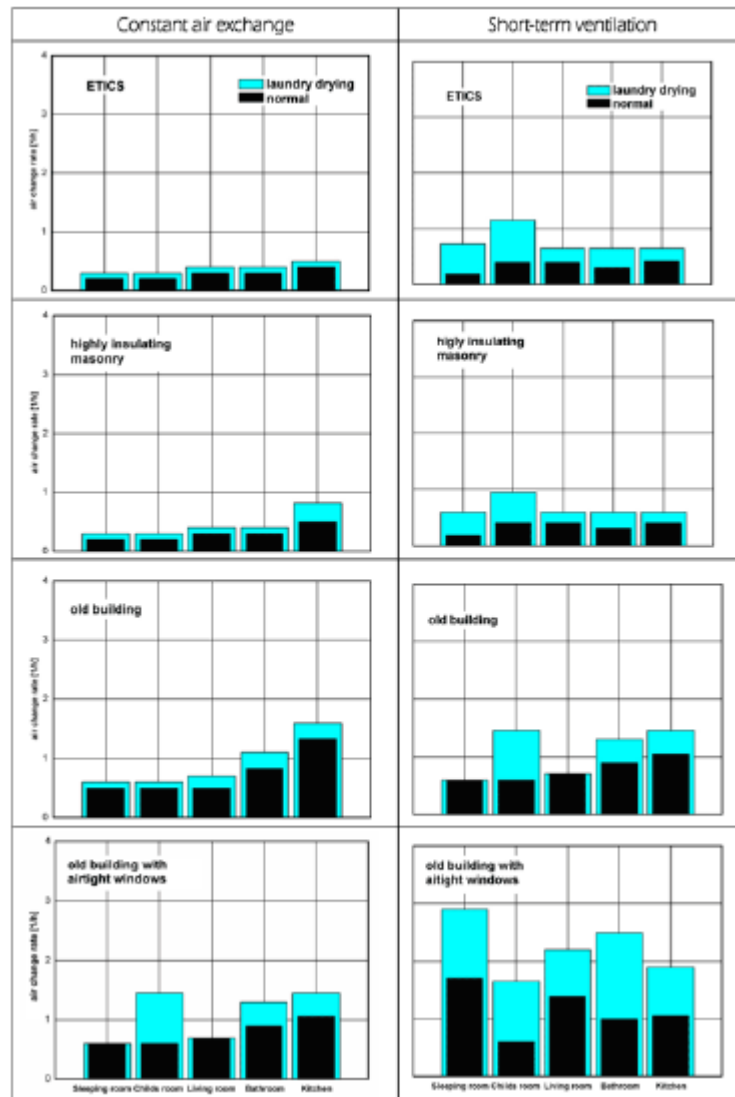


Bild 114: Erforderliche konstante minimale Luftwechselraten (links) für verschiedene Räume, um Schimmelpilzwachstum zu verhindern, und im Vergleich dazu erforderliche Stoßlüftung für stündliche Luftwechselraten als Durchschnittswert pro Tag (rechts) für alle Varianten der Modellwohnung.

Bild 115 zeigt den Einfluss des unterschiedlichen Lüftungsverhaltens (Lüftung während des Tages und in der Nacht) für ein Schlafzimmer auf den Heizenergiebedarf der vier Varianten. Es ist offensichtlich, dass bei einer Wohnung mit ausreichender Wärmedämmung der Luftwechsel infolge Stoßlüftung zu einem geringeren Energieverbrauch führt, obwohl die Luftwechselrate geringfügig

höherer ist. Bei Altbauwohnungen mit luftdichten Fenstern hingegen ist Dauerlüftung eindeutig günstiger. Das trifft im Allgemeinen auch dann zu, wenn in einer Wohnung durch Wäschetrocknen eine zusätzliche Feuchtequelle existiert. Zu erwähnen ist, dass das Ergebnis einer energetischen Betrachtung der gesamten Wohnung zeigt, dass Wäschetrocknen in der Wohnung einen zusätzlichen Energieverbrauch verursacht. Der Grund dafür ist der erhöhte Lüftungsbedarf, der häufig größer ist als der Energiebedarf eines Wäschetrockners. Dabei ist zu beachten, dass der Wäschetrockner mit primär-energetisch ungünstigerem Strom betrieben wird. Vom energetischen Standpunkt gesehen ist die Stoßlüftung weder geeignet noch vernünftig, um eine Wohnung, in der Wäsche (ohne Wäschetrockner) getrocknet wird, zu belüften.

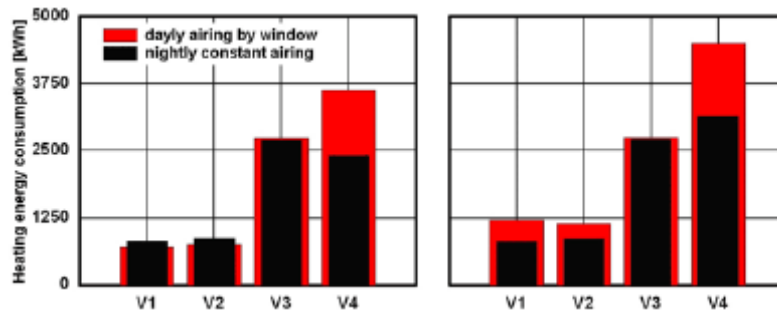


Bild 115:
Vergleich des Heizenergiebedarfs für ein Schlafzimmer während der Heizperiode von Oktober bis März für die verschiedenen Varianten. Die rechte Seite zeigt den Energiebedarf, wenn Wäsche in der Wohnung getrocknet wird.

V1: Konstruktion mit außenseitigem Wärmedämmverbundsystem

V2: hochwärmedämmendes Mauerwerk

V3: Altbau

V4: Altbau mit neuen luftdichten Fenstern

Anwendung in Schulen

Unter Verwendung des Simulationsinstruments Wufi®-Plus wurden die Möglichkeiten zur Sanierung eines Klassenzimmers in der Nähe von Holzkirchen untersucht. Das Klassenzimmer (Fläche von 55 m², Raumvolumen von 170 m³, siehe Bild 116) wurde im Jahr 1964 erbaut und hatte ein niedriges Wärmedämmniveau: Die Außenwände hatten U-Werte zwischen 0,6 und 1,8 W/m²K, und die Fenster hatten einen U-Wert von 2,7 W/m²K. Der Blower-Door Test ergab für das Klassenzimmer einen n50-Wert von 11,0 h⁻¹.



Bild 116:
Photographische Ansicht des simulierten Klassenzimmers, das 1964 erbaut wurde. Die Ausrichtung der Fenster geht nach Südosten. Das Klassenzimmer hat eine Fläche von 55 m².

Der gegenwärtige Zustand wird mit 6 unterschiedlichen Sanierungsvarianten verglichen. Stündliche Daten der Wetterstation in Holzkirchen dienen als klimatische Randbedingungen. Bezüglich der internen Wärme-, Feuchte- und CO₂-Lasten wird angenommen, dass das Klassenzimmer konstant mit 30 Menschen belegt ist (Montag bis Freitag zwischen 8:00 Uhr und 13:00 Uhr, mit Ausnahme einer 30-minütigen Pause von 10:15 bis 10:45 Uhr).

Tabelle 20 zeigt die Lüftungsstrategien für das Klassenzimmer, die für die 6 Sanierungsvarianten untersucht wurden, im Vergleich zur gegenwärtigen Situation. Für alle Varianten (mit Ausnahme des gegenwärtigen Zustands) ziehen die Berechnungen eine Verbesserung der Wärmedämmung (Außenwände: $U = 0,2$ W/m²K) und neue Fenster ($U = 1,3$ W/m²K) in Betracht. Dies führt zu einer bedeutenden Verbesserung hinsichtlich des Heizenergiebedarfs. Liegt der Luftwechsel bei den geforderten 5 m³/h m² (ca. 30 m³/h Personen), steigt der Heizenergiebedarf trotz der deutlich verbesserten Wärmedämmung leicht an (im Vergleich zur gegenwärtigen Situation). Der direkte Vergleich von Fall 2 und Fall 3 zeigt ganz deutlich wie wichtig die Verwendung eines Wärmerückgewinnungssystems ist. Aus diesem Grund basieren alle weiteren Überlegungen auf einem Wärmerückgewinnungssystem mit einem Wirkungsgrad von 80 %. Die erwarteten Verläufe der Raumluftfeuchte und -temperaturen sind in Bild 117 für die Ausgangssituation und für den Fall 6 dargestellt.

Tabelle 20:
Varianten der Wufi@plus-Berechnungen

Fall	Infiltration [h ⁻¹]	Lüftung	Dauer	Kontrolliert durch	HRS*	Heizbedarf [kWh] 1.Dez.-31.März
Basis	0,3	5 h ⁻¹	Während den Pausen	-		1924
1	0,1	5 h ⁻¹	Während den Pausen	-		590
2	0,1	15 m ³ /(hm ²)	7 Uhr bis 14 Uhr	-		2360
3	0,1	15 m ³ /(hm ²)	7 Uhr bis 14 Uhr		80 %	314
4	0,1	max. 15 m ³ /(hm ²)		RH > 55 %	-	318
5	0,1	max. 15 m ³ /(hm ²)		CO ₂ > 1500 ppm	-	443
6	0,1	8,5 m ³ /(hm ²) plus 5 h ⁻¹	7 Uhr bis 14 Uhr; während den Pausen		-	237

* HRS = Heat Recovering System

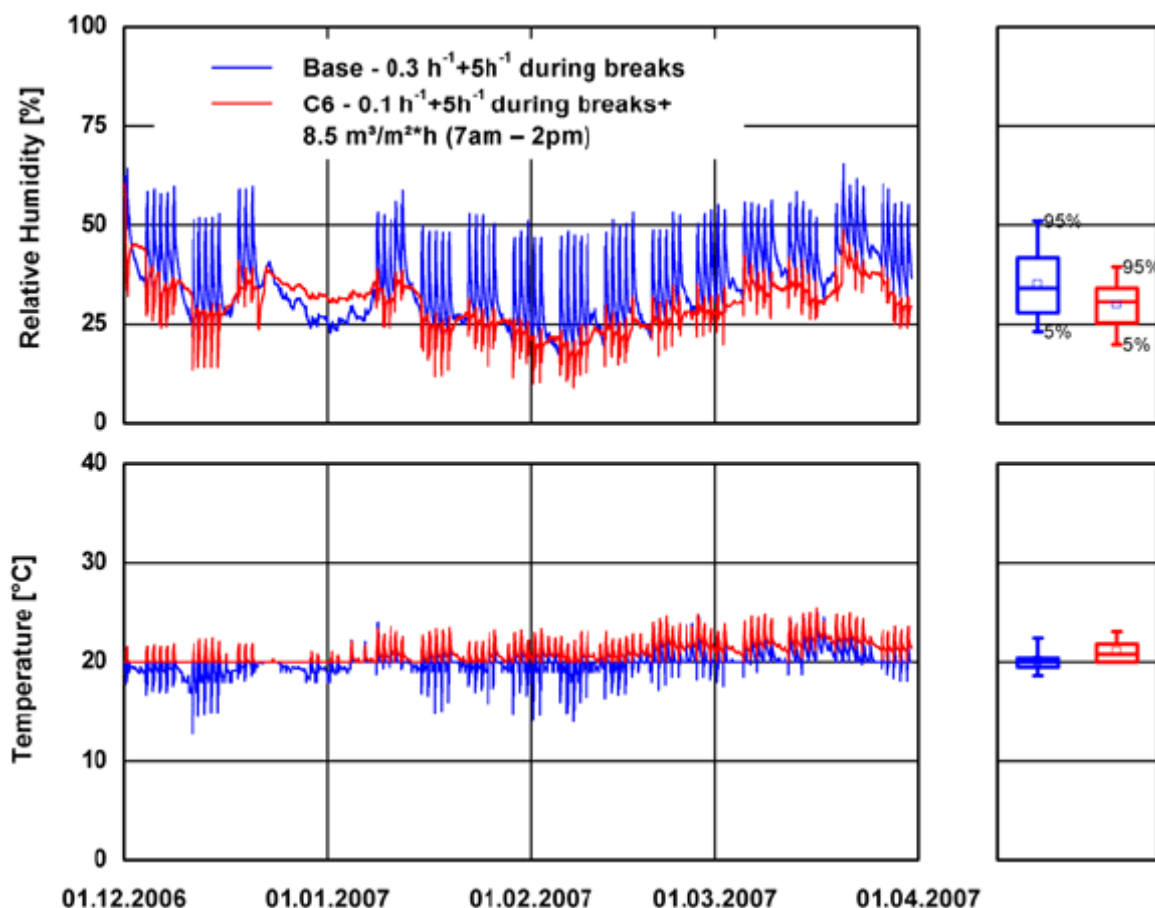


Bild 117:
Berechnete Verläufe der relativen Luftfeuchte und Temperatur im Klassenzimmer für den ursprünglichen Raum und die vorgeschlagene Sanierung (Fall 6).

Im Bild 118 werden die sich ergebenden CO₂-Konzentrationen für einen Tag exemplarisch dargestellt. Der obere Teil des Diagramms zeigt die Luftwechselrate, der untere die errechnete CO₂-Konzentration in der Raumluft in Abhängigkeit von der Tageszeit. Bei einem Grenzwert der relativen Luftfeuchte von 55 %, wird die günstigste Situation hinsichtlich des Heizenergiebedarfs erreicht, die CO₂-Konzentration wird jedoch kaum verbessert. Wenn der Grenzwert der CO₂-Konzentration auf 1500 ppm (0,15 Vol. %) festgesetzt wird, beträgt der gesamte Heizenergiebedarf fast 450 kWh. Unter dem Aspekt des Energieverbrauchs ist dies von allen die wohl ungünstigste Lösung. Deshalb wurde im Fall 6 eine Variante berechnet, bei der von einer reduzierten Luftwechselrate von 8,5 m³/(hm²) zwischen 7:00 Uhr und 14:00 Uhr ausgegangen wird, wobei zusätzlich Stoßlüftung während der Pausen stattfindet. Diese Variante erzielt deutlich verbesserte CO₂-Konzentrationen. Es werden 0,15 Vol. % nach drei Unterrichtsstunden vorübergehend leicht überschritten. Dies kann allerdings durch zusätzliche Stoßlüftung nach jeder Unterrichtsstunde verbessert werden (d.h. nach 45 Minuten wird das Klassenzimmer durchgelüftet). Die in diesem Zusammenhang dargestellten Berechnungen sollen die Beurteilung der verschiedenen Lüftungskonzepte durch nicht stationäre Berechnungen erleichtern. Es ist allerdings nicht möglich, den End- und/oder Primärenergieverbrauch aufgrund dieser Berechnungen einzuschätzen.

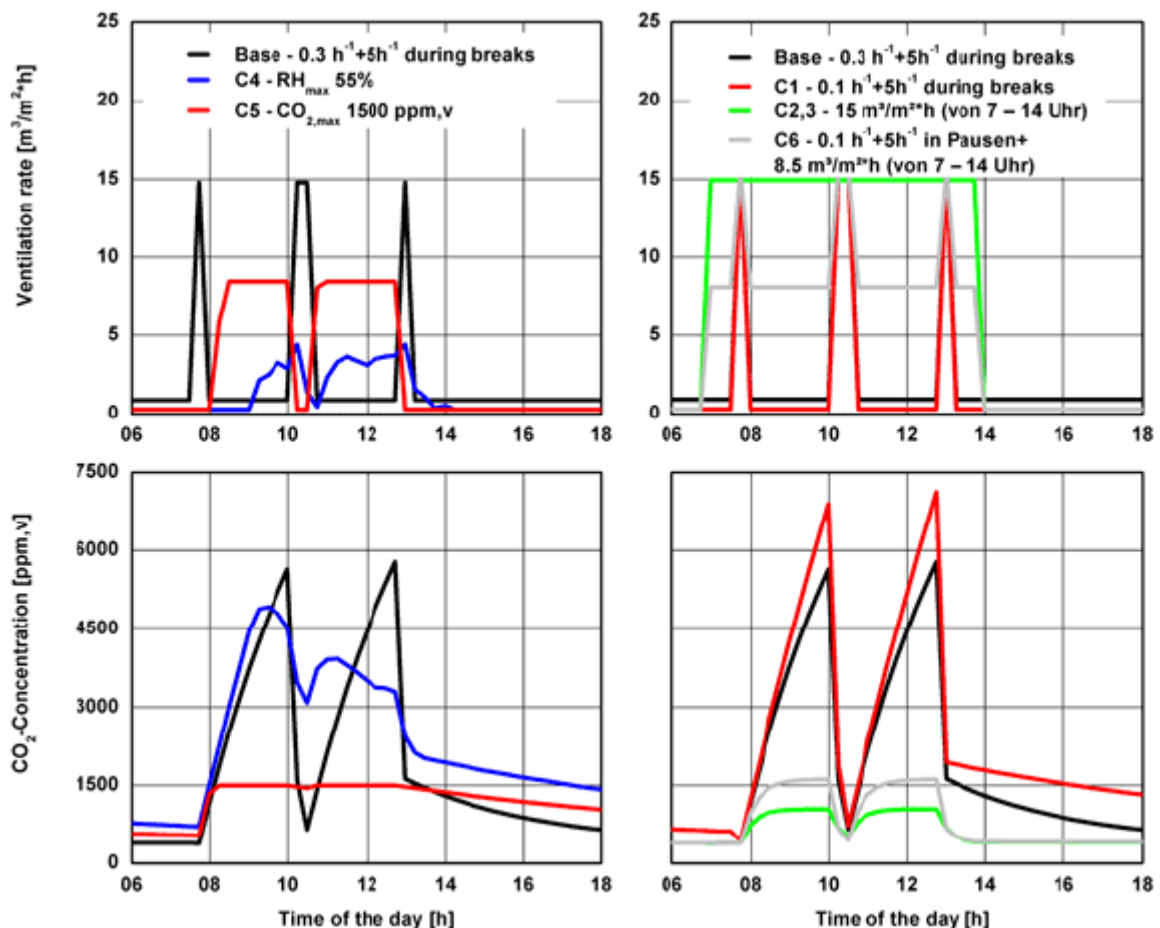


Bild 118: Angenommener Außenluftaustausch und berechneter Verlauf der CO₂-Konzentration, der sich im Klassenzimmer ergibt.

6.2.1 Schlussfolgerung

Belüftung ist offensichtlich eine gute Art und Weise, übermäßige Feuchtigkeit aus Innenräumen zu entfernen oder anders ausgedrückt, eine korrekte Raumluftqualität sicherzustellen. Die Belüftung von beheizten Räumen führt jedoch zu zusätzlichem Energieverbrauch. Deshalb sollte eine Effizienzanalyse der Belüftung die beiden Aspekte umfassen: Raumluftqualität (einschließlich Feuchte aber auch andere Schadstoffe) und Energie (Energieverbrauch aber auch Singularitäten wie z. B. Wärmebrücken). Anders ausgedrückt bedeutet die Reduzierung der durchschnittlichen Lüftungsrate eine Senkung des Energieverbrauchs für die Beheizung von Frischluft, allerdings muss die Lüftungsrate sorgfältig ausgelegt werden, um Probleme mit der Raumluftqualität zu vermeiden und dem Wärmedämmniveau des Gebäudes zu genügen.

Die Lüftungsanforderungen zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum hängen stark ab vom hygrothermischen Raumklima (hauptsächlich Feuchtelast und Heizung), von der Gebäudeeffizienz und von den sorptiven Eigenschaften der Innenraumbooberflächen und Einrichtungsgegenständen. Wenn die Wärmedämmung niedrig ist, dann muss die Luftwechselrate bei der gleichen Feuchtelast höher sein als in gut gedämmten Gebäuden. Wenn die Außenwände ausreichend gedämmt sind und die Innenraumfeuchtelast nicht zu hoch ist (kein Wäschetrocknen im Innenraum), dann könnte die Dauerlüftungsrate durch Stoßlüftung ersetzt werden. Dabei müssen allerdings die Fenster während oder kurz nach einer Zunahme der Feuchteproduktion geöffnet werden. Es ist tatsächlich so, dass die Stoßlüftung ohne zeitlichen Zusammenhang mit einer Feuchteproduktion zu einem höheren Energieverbrauch führt. In diesem Fall muss die Feuchtigkeit, die bereits von den Wandverkleidungsmaterialien absorbiert wurde, durch lang anhaltende Lüftung beseitigt werden. So sollte mit Ausnahme des oben beschriebenen Falles die Stoßlüftung durch Dauerlüftung ergänzt werden, um die permanent erzeugte Feuchte zu entfernen.

Eine ausreichende außenseitige Wärmedämmung reduziert den Transmissionswärmeverlust und die Lüftungsanforderungen zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum sowie den dazu in Beziehung stehenden Energieverbrauch. Darüber hinaus wird das Risiko von Schimmelpilzbildung aufgrund von Wärmebrücken geringer und der Vorteil einer einfacheren Lüftungsart sollte nicht unterschätzt werden.

So scheint im Allgemeinen die feuchtegeregelte Lüftung eine gute Möglichkeit zu sein, den Energiebedarf eines Gebäudes zu reduzieren. Dies steht in direktem Zusammenhang mit der Reduzierung der durchschnittlichen Lüftungsrate, wenn das Gebäude nicht bewohnt wird. Der Vorteil dieser Art von bedarfsgeregelter Lüftung besteht darin, dass die maximalen Werte der relativen Luftfeuchte auf einem korrekten Niveau gehalten werden. Auch feuchtegeregelte Auslässe im Zusammenhang mit natürlichen oder hybriden Lüftungssystemen sichern einen konstanten Luftwechsel während des ganzen Jahres (sowohl während den kalten als auch während den milden Monaten). Der Effekt der feuchtegeregelten Lüftung wird noch verstärkt durch die Verwendung von feuchtepuffernden Materialien, indem die Amplitude der täglichen Feuchteschwankungen reduziert wird. Dieser deutliche Einfluss dieser Materialien auf den relativen Luftfeuchtegehalt ist relativ gering in Bezug auf den Energieverbrauch.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurden verschiedene Arbeiten auf experimenteller Basis und Weiterentwicklung eines Softwaretools zur Simulation von hygrothermischen Bedingungen in Gebäuden und der angrenzenden Bauteile durchgeführt. Einige der experimentellen Untersuchungen dienen direkt für die Weiterentwicklung des Softwaretools WUFI-Plus, andere zeigen Anwendungsbeispiele einer solchen Software und ein Teil der Untersuchungen zeigen Ergebnisse aus messtechnischer Sicht, die am bestehenden Gebäude durchgeführt wurden auf.

Die Grundidee zur Entwicklung eines hygrothermischen Gebäudesimulationstools entsteht durch die Annahme, dass eine Interaktion zwischen Gebäudehülle und -innerem besteht und die Feuchte- und Wärmeverhältnisse somit voneinander abhängig sind. Experimentelle Untersuchungen kosten heutzutage sehr viel Geld, benötigen viel Zeit und sind selten geeignet um Parameterstudien durchzuführen. Hierin liegt der Vorteil von numerischen Simulationen, denn diese erlauben durch meist einfache und schnelle Maßnahmen die Veränderung des Gebäudeaufbaus, des Bauteilaufbaus, die Eingabe von verschiedenen Außenrandbedingungen, sowie die Veränderung von Materialeigenschaften. Deshalb wurde im Rahmen des Projektes das Softwareprogramm WUFI-Plus für die Simulation von Gebäuden und des Innenraumklimas weiterentwickelt und durch verschiedene Validationen erfolgreich getestet. Nichts desto trotz sollten noch weitere Validierungsberechnungen durchgeführt werden, um die Software weiter zu verbessern und die Genauigkeit belegen zu können.

Hygrothermische Gebäudesimulationstools sollen helfen energetische Simulationen durch die Berücksichtigung von Latentwärmeeffekten und Berechnungen von zeitlichen Verläufen in Abhängigkeit der Randbedingungen zu erweitern. Somit wird die Vorhersage des Innenraumklimas und der Oberflächenbedingungen in Gebäuden realistischer. Dies sind zwei wichtige Punkte bei der Betrachtung und Beurteilung der hygienischen und behaglichen Bedingungen. Des Weiteren können bessere Ergebnisse mit Vorhersagemodellen für Schimmelpilzwachstum und Korrosion ermittelt werden, da die Ergebnisse der hygrothermischen Simulationsberechnung realistischer sind als bei einfachen energetischen Systemen. Ein weiterer Vorteil eines hygrothermischen Gebäudesimulationstools ist, dass das Feuchtepufferverhalten von Materialien zur Beurteilung des sich einstellenden Innenraumklimas bei Nutzung von Klimaregelungsgeräten bei der Berechnung berücksichtigt wird. Bei denkmalgeschützten Gebäuden und Museen liegt hier ein großes Anwendungsgebiet, da durch Simulationsberechnungen verschiedene Sanierungsmaßnahmen betrachtet und die beste Variante umgesetzt werden kann, was Kosten und Probleme reduzieren kann.

Die Umsetzung des hygrothermischen Softwaretools ist bisher noch nicht beendet. Es wurden erst einfache Fragestellungen mit der Realität verglichen. Bisher können nur eindimensionale Feuchte- und Wärmetransporte durch die Bauteile betrachtet werden, in Wirklichkeit findet aber ein zwei- bzw. dreidimensionaler Transport in Materialien statt. Das Modell bildet zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur die Interaktion von Umschließungsflächen mit dem Raum in einer Zone ab. In realen Gebäuden interagieren aber auch unterschiedliche Zonen innerhalb des Gebäudes miteinander. Es findet ein Energie- und Masse-

transport durch Bauteile aber auch durch Luftbewegung in Abhängigkeit der jeweils herrschenden Bedingungen statt. Diese Zusammenhänge können noch nicht abgebildet werden.

Des Weiteren wird momentan von einem optimalen Luftaustausch bzw. - optimaler Durchmischung in Räumen ausgegangen. Die Berechnung von Undichtigkeiten und deren Einfluss auf den Luftwechsel in Gebäuden ist nicht möglich. Eine genaue Definition, wo die Undichtigkeiten bzw. Luftein- oder -auslässe von Lüftungsanlagen sind, wäre hierfür notwendig. Dieses Wissen ist in Betracht auf den Feuchtetransport und den Energieverbrauch in Gebäuden wichtig.

Massiven Einfluss auf das resultierende Raumklima in realen Gebäude hat die verwendete Anlagentechnik. Die Art der durch die Anlagentechnik realisierten Wärme- und Feuchtequellen bzw. -senken bestimmt maßgeblich, wie sich das Raumklima einstellt. Momentan werden bei der Simulation durch das hygrothermische Gebäudesimulationstool nur die benötigten Heiz- bzw. Kühlenergien und die benötigten Be- und Entfeuchtungslasten ermittelt. Wie diese Lasten in den Raum eingebracht werden, das zeitabhängige Verhalten der Heizung, Kühlung, Be- und Entfeuchtung sowie der Lüftungsanlage und möglicher Steuerungen kann nicht betrachtet werden. Dies ist ein weiterer wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer realitätsnahen instationären hygrothermischen Gebäudesimulation.

Die oben genannten notwendigen Erweiterungen der Software sind nur als wissenschaftlich fundiert zu betrachten, wenn entsprechende Validierungen vorliegen. Im Rahmen dieses Projektes konnten einige Validierungsfälle geschaffen werden, die der Überprüfung und Weiterentwicklung dienen können. Validierungsfälle für mehrzonale hygrothermische Modelle liegen nicht vor. Diese sind jedoch Grundvoraussetzung, um zu entwickelnde Modelle zu testen, zu überprüfen und zu verbessern. Das gleiche gilt für Modelle zur Abbildung der anlagentechnischen Ausrüstung der Gebäude. Rein thermische Validierungsfälle können der Literatur entnommen werden, das hygrothermische Zusammenwirken von feuchtepuffernden Raumumschließungsflächen und entsprechender Anlagentechnik ist noch durch Versuche zu unterlegen.

Um eine breite Akzeptanz und Anwendung der entwickelten Tools zu fördern ist es weiterhin notwendig, dem Nutzer Hilfen und Anleitungen an die Hand zu geben, um einerseits eine einfache Eingabe zu fördern und andererseits die berechneten Ergebnisse beurteilen zu können. Eine Unterstützung bei der Findung möglicher Aussagen über den Energieverbrauch, den Komfort im Raum und über die Schadensfreiheit der Gebäudehülle ist wünschenswert. Hierzu ist es notwendig das Pre- und Postprozessing des Simulationstools entsprechend zu erweitern.

Ergebnisse, die man durch das hygrothermische Gebäudesimulationstool erhält sind derzeit deterministisch. Das heißt es werden feste Eingangsgrößen verwendet, die mit festgelegten mathematischen Zusammenhängen in feste Ergebnisse umgewandelt werden. In der Realität sind viele Eingangsgrößen Schwankungen unterworfen. Materialkennwerte schwanken produktionsbedingt, Klimarandbedingungen können nur durch eine wahrscheinliche Verteilung angegeben werden oder das Nutzerverhalten kann nur statistisch verteilt

modelliert werden. Bezieht man diese Unsicherheiten mit ein, wäre eine Risikoanalyse bei der Berechnung möglich. Die Genauigkeit der Simulation kann abgeschätzt und die Bandbreite der Ergebnisse ermittelt werden.

Im Rahmen dieses Projektes konnte die Anwendbarkeit von hygrothermischer Gebäudesimulation gezeigt werden. Das existierende Softwaretool wurde verbessert und erweitert. Validierungsbeispiele wurden geschaffen, die die Funktionsfähigkeit der Software und die Genauigkeit entsprechender Berechnungen zeigen. Durch Anwendung der Software für verschiedene Fälle konnte der Nutzen und die Notwendigkeit einer hygrothermischen Gesamtgebäudebetrachtung gezeigt werden. Jedoch ist die im Rahmen dieses Projekts erfolgte Weiterentwicklung nur ein Schritt auf dem Weg zu einer realitätsnahen Simulation von Gebäuden.

Ein weiteres Ziel in der Entwicklung sollte es sein, das bestehende Modell auf ein mehrdimensionales und mehrzoniges Modell auszuweiten. Anlagentechnik muss in das Modell integriert werden. Validierungsfälle müssen geschaffen, das theoretische Modell mit den realen Messwerten verglichen werden. Eine Erweiterung des Modells um probabilistische Ansätze würde erweiterte Aussagen ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] Adan, O.C.G.: On the fungal defacement of interior finishes. Eindhoven University of Technology. Thesis. (1994).
- [2] Andersen, I., Lundqvist, G. R., Jensen, P. L., Proctor, D. F.: Human Response to 78-hour Exposure to Dry Air. Arch. Environ. Health 29. S. 319 - 324. (1974).
- [3] Andersen, I., Lundqvist, G. R., Proctor, D. F.: Human Nasal Mucosal function under Four Controlled Humidities. Am. Rev. Respir. Disease 106. S. 438 - 449. (1972).
- [4] Andersen, I., Lundqvist, G. R., Proctor, M. D.: Human Nasal Mucosal Function in a Controlled Climate. Arch. Environ. Health 23, S. 408 - 420. (1971).
- [5] ANSI/ASHRAE Standard 55-1992: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta (1992).
- [6] ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta (2004).
- [7] Arundel, A. V., Sterling, E. M., Biggin, J. H., Sterling, T. D.: Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments. Environ. Health Perspect. 65, S. 351 -361. (1986).
- [8] Ashley-Smith, J.: Risk Assessment for Object Conservation. Oxford. (1999).
- [9] ASHRAE Applications Handbook (SI), (2003).
- [10] Ayerst, G.: The Effect of Moisture and Temperature on Growth and Spore Germination in some Fungi. J. stored Prod. Res., 5. S. 127 - 141. (1969).
- [11] Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege (eds.): Vorsorge, Wartung und Pflege, Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmalern und ihrer Ausstattung. Denkmalpflege Informationen, München. (2002).
- [12] Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege: (2002).
- [13] Berglund, L. G., Cain, W. S.: Perceived air quality and the thermal environment. In: Proceedings of IAQ 1989, Atlanta, S. 93 - 99 (zit. in Nagda und Hogson, 2001). (1989)
- [14] Bergson, N.C.: Humidity as a Control Parameter for Ventilation. Indoor and Built Environment. Heft 12. S. 215 - 216. (2003).
- [15] BIA-Report: Grenzwerte-Liste 2003 - Thermische Belastungen. www.bia.de. (2003)
- [16] Block, S.S.: Humidity requirements for mould growth. Applied Microbiology 1(6). S. 287 - 293. (1953).
- [17] Building Energy Software Tools Directory:
http://www.eren.doe.gov/buildings/tools_directory

- [18] Bundesministerium für Raumordnung: Dritter Bauschadensbericht über Schäden an Gebäuden. Bauwesen und Städtebau. (1995).
- [19] Burgmester, A.: Die Beteiligung des Nutzers bei Museumsneubau und -sanierung: Risiko oder Notwendigkeit oder Welche Klimawerte sind die richtigen? In Raumklima in Museen und Historischen Gebäuden. Bietigheim-Bissingen, S. 9 - 24. (2000).
- [20] CEN Bericht CR 1752: Lüftung von Gebäuden, Auslegungskriterien für Innenräume. (1998).
- [21] Chang, J.C.S., et al: Growth Evaluation of Fungi (*Penicillium* and *Aspergillus* spp) On Ceiling Tiles. Atmospheric Environment, 29(17). S. 2331 - 2337. (1995).
- [22] Clarke, J.A., et al: A technique for prediction of the conditions leading to mould growth in buildings. Building and Environment 34. S. 515 - 521. (1998).
- [23] Clarke, J.A., et al: Energy Systems Research Unit in collaboration with Department of Bioscience/Biotechnology, Energy Systems Unit. Dep. Of Bioscience and Biotechnology, University of Strathclyde. (1996).
- [24] Cooke, R.C., Whipps, J.M.: Ecophysiology of Fungi. Blackwell Scientific Publications. (1993).
- [25] Denffer v., D., et al: Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Begründet von E.. (1983).
- [26] Deutsches Institut für Normung: Wärmeschutz und Energie Einsparung in Gebäuden, Teil x: Vermeidung von Schimmelpilzen (heat protection and energy saving in buildings, part x: prevention of mould growth). Beuth Verlag, Draft 10.05.1999. (1999).
- [27] DIN 4108-2:2003-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth Verlag 2003.
- [28] DIN 52616: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmestrommeßplatten-Gerät. Beuth Verlag. Berlin. (1977).
- [29] DIN EN 15251: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Beuth Verlag. Berlin. (2006).
- [30] DIN EN ISO 13788: Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods. (2001).
- [31] DIN EN ISO 7730: Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Organisation for Standardization. (1994).
- [32] Documentation 026, Moulds in buildings - A survey of the projects of the program. Danish Building Research Institute. (2002).
- [33] Doll, S.C., Burge, H.A.: Characterization of Fungi Occuring on "New" Gypsum Wallboard. Conference Proceedings IAQ 2001. Moisture, Microbes and Health Effects: Indoor Air Qual-

- ity and Moisture in Buildings, San Francisco, California. (2001).
- [34] Ellinger, M.: Feuchtepufferwirkung von Holzinneverkleidungen. Diplomarbeit, Fachhochschule Rosenheim. 2004.
- [35] Emmerich, S.J., Persily, A.K.: A literature review on CO₂-based demand controlled ventilation. ASHRAE Transactions. Atlanta. GA. (1997).
- [36] EnergyPlus: http://www.eren.doe.gov/buildings/energy_tools/energyplus
- [37] EnEV: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik in Gebäuden. Beuth Verlag. Berlin. (2001).
- [38] Erhorn, H. et al: Stimmen Computerberechnungen des wärmetechnischen Verhaltens von Gebäuden mit praktischen Messungen überein? Bauphysik 10 (1988), Nr. 4, S. 97-104.
- [39] ESP-r: <http://www.esru.strath.ac.uk/>
- [40] Fang, L., Clausen, G., Fanger, P. O.: Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. Indoor Air 8, S. 80 - 90. (1998).
- [41] Fang, L., Clausen, G., Fanger, P. O.: Impact of Temperature and Humidity on perception of Indoor Air Quality During Immediate and Longer Whole-Body Exposures. Indoor Air 8, S. 276 - 284. (1998):
- [42] Fanger, P. O.: Thermal Comfort. Reprint 1982 by R. E. Krieger Publishing Company, Florida, 244 pp. (1970).
- [43] Fiedler, K.: Hygiene, Präventivmedizin, Umweltmedizin. Kap. 15: Wohnungshygiene. Uni-Med Verlag, ISBN 3-89599-101-5, 576 Seiten. (1995).
- [44] Geißler, A., Hauser, G.: Untersuchungen der Luftdichtheit von Holzhäusern. (1996).
- [45] Grant, C., et al: The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. International Biodeterioration 25. S 259 - 284. (1989).
- [46] Gwosdow, A. R., et al: Effect of thermal conditons on the acceptability of respiratory protectove devices on humans at rest. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 50, S. 188 - 195. (1989).
- [47] Harriman, L., Brundrett, G. Kittler, R.: Humidity Control Design Guide for Commercial and Institutional Buildings. Atlanta. ASHRAE publication. (2001).
- [48] Hartmann, T., Reichel, D., Richter, W.: Feuchteabgabe in Wohnungen - alles gesagt? Gesundheitsingenieur 122 (2001), H. 4, S. 189 - 195.
- [49] Häupl, P., Petzold, H., Finkenstein, C.: Feuchteschutztechnische und energetische Bewertung der Gebäudesanierung mit raumseitiger Wärmedämmung aus Calciumsilikat. Abschluss-Forschungsbericht, TU Dresden. (2003).
- [50] Hausladen, T., Oppermann, J.: Fensteröffnungsverhalten in Niedrigenergiehäusern - ein Modell. Heizung Lüftung/Klima Haustechnik. Nr. 57. (2002).

- [51] Hens, H.: Mold in dwellings: Field Studies in a moderate climate. Annex 41 Subtasks 4. Kyoto Meeting. (2006).
- [52] Hens, H.: Fungal defacement in buildings: A performance related approach. International Journal of Heating, Ventilation, Air-Conditioning and Refrigerating Research. Vol. 5. Heft 3. S. 256 - 280. (1999).
- [53] Hettinger, Th.: Klimawirkungen auf den Menschen. In: Handbuch der Arbeitsmedizin, Konietzko und Dupuis (Hrsg.), ecomed Verlag Landsberg, Kap. III-4. S. 10. (1995).
- [54] Hilbert G.S., et al: Sammlungsgut in Sicherheit. Geb. Mann Verlag. Berlin. ISBN 3-7861-2348-9. (2002)
- [55] Holmberg, J. G.: Relative Humidity in historic houses, museums and museum storage rooms, a literature study. In EURO CARE Eureka Project EU 140, EU 1378 PREVENT, Preventive Conservation, Report No. 1 from Swedish Partners, Stockholm. (1995).
- [56] Holmberg, J.G.: Environment Control in Historical Buildings. Royal Institute of Technology Building Services Engineering, Bulletin No. 53, Stockholm. (2001).
- [57] Horner, E., et al: How Quickly must gypsum board and ceiling tile be dried to preclude mold growth after a water accident? ASHRAE Conference IAQ 2001. Moisture, Microbes and Health Effects: Indoor Air Quality and Moisture in Buildings, San Francisco. (2001).
- [58] Hukka, A., Viitanen, H.: A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology. 33(6). S. 475 - 485. (1999).
- [59] Hyvärinen, A., et al: Fungi and actinobacteria in moisture-damaged building materials - concentrations and diversity. International Biodeterioration & Biodegradation (49). S. 27 - 37. (2002).
- [60] Jaakkola, J. J. K., Heinonen, O. P., Seppänen, O.: Sick building syndrome, sensation of dryness and thermal comfort in relation to room temperature in an office building: need for individual control of temperature. Environment Int. 15, S. 163 - 168. (1989).
- [61] Johanning, E., Landsbergis, P., Gareis, M., Yang, C. S., Olmsted, E.: Clinical Relevance and Results of a Sentinel Health Investigation Related to Indoor Fungal Exposure. Environ. Health Perspect. 107, S. 489 - 494. (1999).
- [62] Johansson, P.: Mögel på nytt och begagnat byggnadsvirke, SP Energiteknik, Borås. (2003).
- [63] Kainz, E.: Lüftungskonzepte zur Erhaltung der Raumluftqualität und gleichzeitiger Vermeidung von Schimmelpilzen. Diplomarbeit Fachhochschule Rosenheim. (2004).
- [64] Kehrler, M., Künzel, H.M., Sedlbauer, K.: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen - ist der Feuchtezusatz für die Wärmeleitfähigkeit gerechtfertigt? IBP Mitteilung 390. (2001).
- [65] Kotterer, M.: Standardklimawerte fuer Museen? Restauero - Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen, März 2004, Nr, 2, S. 106 - 116. (2004).
- [66] Kröling, P.: Gesundheits- und Befindensstörungen in klimatisierten Gebäuden.

- Zuckschwerdt, München (zit. In Knorr 1993). (1985).
- [67] Krus, M., et al: Minimum ventilation requirements for buildings from the mould point of view. Contribution to the IEA-Annex 41. (2005).
- [68] Krus, M., Rösler, D.: New model for the hygrothermal calculation of condensate on the external building surface. Third International Building Physics Conference in Montreal. (2006)
- [69] Krus, M., Sedlbauer, K.: Instationärer Feuchtegehalt an Außenoberflächen und seine Auswirkungen auf Mikroorganismen. Tagungsbeitrag zur IBK-Bau-Fachtagung 288 Bauschäden durch Schimmelpilze und Algen. Berlin. S. 5/1 - 5/15. (2003).
- [70] Krus, M.: Moisture Transport and Storage Coefficient of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods. IRB-Verlag Stuttgart. S. 1 - 172. ISBN 3-8167-4535-0. (1996).
- [71] Krus: Annex 41
- [72] Künzel, H., et al: Feuchtepufferwirkung von Innenraumbekleidungen aus Holz oder Holzwerkstoffen. IBP-Bericht HTB-04/2004.
- [73] Künzel, H.: Die Feuchtigkeitsabsorption von Innenoberflächen und Inneneinrichtungen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 42. 1965. S. 103-116.
- [74] Künzel, H.: Instationärer Wärme- und Feuchteaustausch an Gebäudeinnenoberflächen. Konferenzbeitrag. Aachener Bausachverständigentage 1988. S. 45-51.
- [75] Künzel, H.M.: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen. IBP-Mitteilung 314. Nr. 24. (1997).
- [76] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [77] Lengsfeld, K., Krus, M.: Numerische Modellierung der raumklimatischen Wirkungen von Wandverkleidungen und Einbauten aus Holz bezüglich Feuchtepufferung. IBP-Bericht RKB-11-2007. (2007).
- [78] Leusden, F. P. und Freymarck, H.: Darstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen Gebrauch. Gesundheitsingenieur 72, S. 271 - 273. (1951).
- [79] Lindgren, T., Andersson, K., Dammström, B.-G., Norbäck, D.: Ocular, nasal, dermal and general symptoms among commercial airline crews, Int. Arch. Occup. Environ. Health 75, S. 475 - 483. (2002).
- [80] Maas, A., Kaiser, J., Oppermann, J.: Das Synergie-Haus - Energetische Analyse und Bewertung von Synergie Häusern. IRB Verlag. (1999).
- [81] Mair, S., Breuer, K., Mayer, E.: Geruchsneutraler Kfz-Innenraum, Schlussbericht zum Vorhaben gemäß Anforderung Nr. BM2156274, Phase I, IBP-Bericht RK-03/2002. (2002).

- [82] Michalski, S.: Relative Humidity: A Discussion of Correct / Incorrect Values. In ICOM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting Washington, DC, USA Preprints, Paris, S. 624 - 629. (1993).
- [83] Molhave, L.: Sensory irritation in humans caused by volatile organic compounds (VOCs) as indoor air pollutants: a summary of 12 exposure experiments. In: Indoor Air Quality Handbook, Mc Graw Hill Comp., S. 25.1 - 25.28. (2000).
- [84] Moon, H.J.: Assessing mould risk in buildings under uncertainty. Doctoral thesis Georgia Institute of Technology, USA. (2005).
- [85] Nordström, K., Norbäck, D., Akseleson: Effect of air humidification on the sick building syndrome and perceived indoor air quality in hospitals: a four month longitudinal study. *Occup. Environ. Med.* 51, S. 683 - 688. (1994).
- [86] Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R.: Modelling of Mould Growth in Building Envelopes. IEA-Annex Meeting Porto. (2007).
- [87] Persliy, A., et al: Simulations of indoor Air Quality and Ventilation Impacts of Demand Controlled Ventilation in Commercial and Institutional Buildings NISTIR 7042. NIST. (2003).
- [88] Plathner, P. und Woloszyn, M.: Interzonal air and moisture transport in a test house: experiment and modelling. *Building and Environment* 37 (2002), S. 189-199.
- [89] Plenderleith, H., Werner, A.: *The conservation of antiquities and works of art*, 2nd ed. London: Oxford University Press. (1971):
- [90] Preschk, A.: Gebäude-Anlagen-Simulation unter Berücksichtigung der hygrischen Prozesse in den Gebäudewänden. Dissertation Technische Universität Berlin (2000).
- [91] Reinikainen, L. M., Jaakkola, J. J. K., Seppänen, O. P.: The Effect of air Humidification on Symptoms and Perception of Indoor Air Quality in Office Workers: A Six-Period Cross-Over Trial. *Arch. Environ. Health* 47, S. 8 - 15. (1992).
- [92] Reinikainen, L., Jaakkola, J. J. K., Hainonen, O. P.: The effect of air humidification on different symptoms in office workers - an epidemiologic study. *Environment International* 17, S. 243 - 250. (1991):
- [93] Richter, W., Hartmann, T., Kremonke, A. et al: Gewährleistung einer guten Raumluftqualität bei weiterer Senkung der Lüftungswärmeverluste. Technische Universität. (1999).
- [94] Ritschkoff, A.-C., Viitanen, H., Koskela, K.: The response of building materials to the mould exposure at different humidity and temperature conditions. *Proceedings of Healthy Buildings*, Vol. 3. S. 317 -322. (2000).
- [95] Rode, C.: *Moisture Buffering of Building Materials*, Report, Department of Civil Engineering, TU Denmark (2005).
- [96] Scherer, S.: Anpassung von Cyanobakterien in Wüsten. In: Hausmann, K. & Kremer, B. P.: *Extremophile: Mikroorganismen in ausgefallenen Lebensräumen*. VCH Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo. S. 179 - 193. (1993).

- [97] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart. (2001).
- [98] Simonson, C.J., Salonvaara, M.H., Ojanen, T.: Improving Indoor Climate and Comfort with Wooden Structures. Digital Media Partners. Helsinki. (2001).
- [99] Smith, S.L., Hill, S.T.: Influence of temperature and water activity on germination and growth of *aspergillus restrictus* and *aspergillus versicolor*. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 79(3), S. 558 - 560. (1982).
- [100] Sollinger, S., Levsen, K., Wünsch, G.: Indoor pollution by organic emissions from textile floor coverings: climate test chamber studies under static conditions. *Atmospheric Environment* 28, S. 2369 - 2378. (zit. in Fang et al 1999). (1994).
- [101] Sticker, R., Erhorn, H. und Szerman, M.: Gütesiegel für Rechnerergebnisse zum thermischen Gebäudeverhalten? Genauigkeitsanalyse von Programmen und Anwendereinflüsse. *Bauphysik* 11 (1989), Nr. 6, S. 205-210.
- [102] Sundell, J.: On the Association between Building Ventilation Characteristics, Some Indoor Environmental Exposures, Some Allergic manifestations and Subjective Symptom Reports. *Indoor Air Suppl.* 2, pp 1 -148 (zit. in. Brightman and Moss, 2000). (1994).
- [103] Thomson, G.: *The Museum Environment*, 2nd edition London. (1986).
- [104] Toftum, J., Jorgensen, A. S.: Effect of humidity and temperature of inspired air on perceived comfort. *Energy and Buildings*, 28, S. 15 - 23 (zit. in Fang et al. 1999). (1998).
- [105] Trnsys: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- [106] Venzmer, H.: Grüne Fassaden nach der Instandsetzung durch WDVS? Nicht bestellt und dennoch frei Haus. 3. Dahlberg-Kolloquium in Wismar. (2001).
- [107] Viitanen, H., Bjurman, J.: Mould growth on wood under fluctuation humidity conditions. *Mat. Und Org.* 29(1). S. 27 - 46. (1995).
- [108] Viitanen, H., et al: Modelling mould growth and decay damages Healthy Buildings. Espoo, Vol. 3. FISIAQ. S. 341 - 346. (2000).
- [109] Viitanen, H., et al: Moisture conditions and bio deterioration risk of building materials and structure. *Proc. 2nd Int. Symp. ILCDES 2003 Integrated Life-time Engineering of Buildings and Civil Infrastructures.* Kuopio, S. 1 - 3. (2003).
- [110] Viitanen, H., Salonvaara, M.: Failure Criteria: in *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes* by Heinz R. Trechsel, *Astm Manual Series, Mnl 40.* Astm Intl. (2001).
- [111] Viitanen, H.: Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. Docoral Thesis. Uppsala. The Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Forest Products. S. 58. (1996).

- [112] Winter, S., Kehl, D.: Objektivierung der Bewertung des Verkehrswertes von Gebäuden in Holzbauweise in Vergleich zu anderen Bauweisen (2).
- [113] Wolkoff, P.: Impact of air velocity, temperature, humidity and air on long-term VOC emissions from building products. *Atmospheric Environment* 32, S. 2659 - 2668. (zit. in Fang et al 1999). (1998).
- [114] Woloszyn, M.: Modelisation hygro-thermo-aeraulique des batiments multizones. Proposition d'une strategie de resolution du systeme couple. Dissertation L'Institute National des Sciences Appliquees de Lyon (1999).
- [115] WTA-6-2-01: Simulation of Heat and Moisture Transfer. (2001).

Anhang

Bildverzeichnis

Bild 1: Die Wechselwirkung zwischen Gebäudetechnologie und bebauter Umwelt.	7
Bild 2: Ablaufschema, wie Berechnungen mit dem Rechenprogramm WUFI-Plus vorgenommen werden. Man legt (links im Bild) die Randbedingungen fest und gibt die Materialdaten (rechts) vor. WUFI-Plus berechnet daraus die thermohygrischen Raumklimagrößen und den Heizenergiebedarf.	13
Bild 3: Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumlufftfeuchten im Testraum mit Aluminiumfolie an den Wänden und der Decke.	14
Bild 4: Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumlufftfeuchten im Testraum mit ungestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden.	15
Bild 5: Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumlufftfeuchten im Testraum mit gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden.	15
Bild 6: Verlauf der gemessenen und berechneten relativen Raumlufftfeuchten im Referenzraum mit gestrichenem Gipsputz an den Wänden und der Decke.	16
Bild 7: Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse von Step 1.	17
Bild 8: Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse von Step 2.	18
Bild 9: Ergebnisse der deskriptiven statistischen Analyse des Referenzraumes.	18
Bild 10: Grundriss der beiden Versuchsräume [72].	20
Bild 11: Verlauf der täglichen Feuchteproduktion in den zwei Versuchsräumen [34].	21
Bild 12: Vergleich der Verläufe der relativen Raumlufftfeuchte zwischen Messung und Berechnung.	23
Bild 13: Verlauf der relativen Raumlufftfeuchte im Referenzraum mit gestrichenem Gipsputz im Vergleich zum Testraum mit Aluminiumfolie an Wänden und Decke, im Zeitraum vom 23. – 31. Januar.	23
Bild 14: Bestimmung der Feuchteamplituden durch die Feuchteveränderungen der Raumlufft als Folge der Feuchteproduktion.	24

Bild 15: Feuchteamplituden in den beiden Versuchsräumen während des Untersuchungszeitraumes vom 23. – 31. Januar, jeweils für die Feuchtespitze morgens und nachmittags.	25
Bild 16: links: Durchschnittliche Feuchteamplituden des 9-tägigen Versuchszeitraums der ersten Untersuchungen.	25
Bild 17: Verläufe der relativen Raumlufffeuchten in den beiden Versuchsräumen im Zeitraum vom 16. – 24. Februar. Im Testraum sind ca. 45 m ² Gipskartonplatten eingebracht.	26
Bild 18: Feuchteamplituden in den beiden Versuchsräumen während des Untersuchungszeitraumes vom 15. – 20. Februar, jeweils für die Feuchtespitze morgens und nachmittags.	27
Bild 19: links: Durchschnittliche Feuchteamplituden des 6-tägigen Versuchszeitraums der Untersuchungen mit Gipskartonplatten an den Wänden im Testraum.	27
Bild 20: Verläufe der relativen Raumlufffeuchten in den beiden Versuchsräumen im Zeitraum vom 01. – 07. April. Im Testraum sind ca. 67 m ² Gipskartonplatten eingebracht.	28
Bild 21: Feuchteamplituden in den beiden Versuchsräumen während des Untersuchungszeitraumes vom 01. – 07. April, jeweils für die Feuchtespitze morgens und nachmittags.	28
Bild 22: links: Durchschnittliche Feuchteamplituden des 6-tägigen Versuchszeitraums der Untersuchungen mit Gipskartonplatten an den Wänden und an der Decke im Testraum. rechts: Darstellung der normierten Feuchteamplituden.	29
Bild 23: Verlauf der relativen Raumlufffeuchte in den beiden Versuchsräumen im Zeitraum vom 30. März – 04. April. Im Testraum sind ca. 45 m ² gestrichene Gipskartonplatten an den Wänden angebracht.	30
Bild 24: Feuchteamplituden in den beiden Versuchsräumen während des Untersuchungszeitraumes vom 30. März – 04. April, jeweils für die Feuchtespitze morgens und nachmittags.	30
Bild 25: links: Durchschnittliche Feuchteamplituden des 5-tägigen Versuchszeitraums der Untersuchungen mit gestrichenen Gipskartonplatten an den Wänden im Testraum.	31
Bild 26: Zusammenstellung der gemittelten und normierten Feuchteamplituden der verschiedenen Versuchsvarianten bezogen auf die Verhältnisse im Referenzraum.	32
Bild 27: Idealisierter Verlauf der relativen Feuchte des Test-Zyklus im Klimaschrank.	35

Bild 28: oben: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte im Klimaschrank während des Sorptionsversuchs vom gefilzten Kalkputz.	38
Bild 29: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einem Kalkputz mit Kalkglätte.	39
Bild 30: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einem Kalkputz mit Kalkglätte.	39
Bild 31: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einem Kalkputz mit Kalkglätte und einem Anstrich mit Silikatfarbe.	40
Bild 32: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einem Kalkputz mit strukturierten Edelputz.	40
Bild 33: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einem Kalkputz mit gefilterter Oberfläche und Silikatfarbanstrich.	41
Bild 34: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einem Lehmputz.	41
Bild 35: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einem Kalkputz mit erhöhtem Anteil an Luftporen.	42
Bild 36: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einem Kalkputz mit Kalkglätte und einer gestrichenen Raufasertapete mit Dispersionsfarbe.	42
Bild 37: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von einer Gipskartonplatte.	43
Bild 38: Verlauf der Gewichtsänderung während eines 24 h – Zykluses von Fliesen mit Fugenanteil.	43
Bild 39: Verlauf der Gewichtsänderung bei einem Kalkputz mit Kalkglätte und Silikatfarbanstrich.	45
Bild 40: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit gefilterter Oberfläche über einen Zeitraum von 24 Stunden.	47
Bild 41: : Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkglätte über einen Zeitraum von 24 Stunden.	47
Bild 42: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit Edelputz über einen Zeitraum von 24 Stunden.	48

Bild 43: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit erhöhtem Luftporenanteil über einen Zeitraum von 24 Stunden.	48
Bild 44: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Lehmputz über einen Zeitraum von 24 Stunden.	49
Bild 45: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit einer Gipskartonplatte über einen Zeitraum von 24 Stunden.	49
Bild 46: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit gefilterter Ober-fläche und Silikatfarbanstrich über einen Zeitraum von 24 Stunden.	50
Bild 47: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz mit Kalkputz mit Kalkglätte und Silikatfarbanstrich über einen Zeitraum von 24 Stunden.	50
Bild 48: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der Gewichtsänderung beim Laborversuch mit Kalkputz, Raufasertapete und Dispersionsfarbanstrich über einen Zeitraum von 24 Stunden.	51
Bild 49: Täglicher Verlauf der Feuchteproduktion im Versuchsraum.	52
Bild 50: Zeitlicher Verlauf der Innenraumfeuchte bei Einsatz verschiedener Putze bzw. von Gipskartonplatten.	52
Bild 51: Vergleich der Höhe der Feuchteamplituden während den beiden Befeuchtungsphasen beim Einsatz von verschiedenen Putzen bzw. Gipskartonplatten und im Vergleich dazu mit nicht sorptiver Oberfläche (Aluminium).	53
Bild 52: Zeitlicher Verlauf der Innenraumfeuchte bei Kalkputz mit verschiedenen Oberflächenbehandlung und unterschiedlichen Beschichtungen im Vergleich zu einer Aluminiumoberfläche.	53
Bild 53: Vergleich der Höhe der Feuchteamplituden während den beiden Befeuchtungsphasen beim Einsatz von verschiedenen Putzen mit Anstrichen bzw. Raufasertapete mit Anstrich und im Vergleich dazu mit nicht sorptiver Oberfläche (Aluminium).	54
Bild 54: Vergleich der normierten Feuchteamplituden verschiedener Putze zu einer nicht sorptiven Oberfläche (Aluminium).	56
Bild 55: Entwicklung des Wärmeschutzes von Holztafel-, Ziegel- und Kalksandsteinaußenwänden nach [113].	57

Bild 56: Anteile verschiedener Lüftungsstrategien in Deutschland nach [93].	58
Bild 57: Entwicklung der Luftdichtheit im Holzbau anhand von 52 Bauten [44].	59
Bild 58: Vergleich der Luftdichtheit zwischen Holz- und Massivbauweise nach [80].	60
Bild 59: Außenklimaverlauf im Messzeitraum.	65
Bild 60: Mittlere Amplituden der Temperaturen aller Messstellen im Februar.	67
Bild 61: Mittlere Amplituden der relativen Feuchten aller Messstellen im Februar.	69
Bild 62: Behaglichkeitsdiagramm in Abhängigkeit der feuchten Luft-Temperatur, der mittleren Strahlungstemperatur, der Luftgeschwindigkeit, der relativen Luftfeuchte sowie dem Aktivitätsgrad bei normaler Bekleidung 1,0 clo. [53]	89
Bild 63: Links: Behaglichkeitsfeld für das Wertepaar Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte; gültig für Raumumschließungsflächentemperaturen von 19,5 – 23 °C und Luftbewegungen von 0 – 20 cm/s (Leusden and Freymarck [78]).	89
Bild 64: Akzeptable Bereiche von Arbeitstemperatur und absoluter Feuchte für Menschen in typischer Winterkleidung (links) und Sommerkleidung (rechts) während leichten Tätigkeiten nach "ASHRAE Standard 55" der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers im Vergleich der Ausgaben 1992 und 2004.	90
Bild 65: Optimale relative Luftfeuchte zur Minimierung negativer gesundheitlicher Auswirkungen (aus Arundel et. al. [7])	99
Bild 66: Empfundene Luftqualität in Abhängigkeit von der Temperatur und Feuchtigkeit. Angepasst nach Fang et. al..	101
Bild 67: Darstellung der Ergebnisse aus Versuchsreihe 1: Beurteilung reiner Luft bei unterschiedlichen Temperaturen und relativen Luftfeuchten. Die schraffierte Fläche kennzeichnet den Bereich, in dem eine empfundene Luftqualität < 3 decipol ermittelt wurde.	102
Bild 68: Isoplethensysteme für Sporenkeimung (links) und für Myceliumwachstum (rechts) des Schimmelpilzes <i>Aspergillus restrictus</i> nach Smith [100]. Die Isolinien zeigen in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte die Keimungszeiten in Tagen und die Wachstumsraten in mm/d (eingetragene Zahlenwerte). Die Punkte zeigen Bedingungen,	

unter denen nach 95 Tagen noch keine Keimung stattgefunden hatte.	115
Bild 69: Modelle von mikrobiologischem Wachstum unter idealen hygrothermischen Bedingungen [24].	115
Bild 70: Kritische Feuchte (r. F. %), Zeit (Wochen) und Temperatur notwendig für den Beginn von Schimmelpilzbildung auf Kiefern-Splintholz [109].	116
Bild 71: Bedingungen, die für den Wachstumsbeginn von Schimmelpilz auf Holzmaterialien günstig sind (links) und temperaturabhängige kritische relative Luftfeuchte, die für Schimmelpilzbildung erforderlich ist bei verschiedenen Werten des Schimmelpilz-Indexes (rechts) nach Hukka und Viitanen (1999).	118
Bild 72: Vorhergesagte Schimmelpilzbildung bei +5 und 40 °C unter unterschiedlichen Feuchtebedingungen (Viitanen et. al. 2000)	119
Bild 73: Links dargestellt ist der Einfluss des Substrates auf die Schimmelpilzbildung anhand von Isolethensystemen für 3 Substratgruppen. Rechts sind Isolethensysteme für die so genannten kritischen Pilzarten (Klasse K, für ein optimales Kulturmedium) dargestellt.	120
Bild 74: Messtechnisch bestimmte Isolethenbereiche für drei verschiedene Materialien. Es wird zwischen dem Inokulationsbereich (wo Nährstoffe in Spuren vorhanden sein können) und unveränderter Materialoberfläche unterschieden. Der "Lowest Isoleth for Mould" (LIM 0) kennzeichnet die Grenze möglicher Pilzaktivität.	121
Bild 75: Schematische Darstellung des biohygrothermischen Modells [70].	122
Bild 76: Vergleich von LIMs der Substratklasse 1 (LIM I, bioabbaubare Materialien) und Substratklasse 2 (LIM II, poröse Materialien) nach Sedlbauer [97] mit Daten aus Ergebnissen von Baumaterialien nach Viitanen et. al. [109], Clarke et. al. [23] und Hens [52].	123
Bild 77: Vergleich von Viitanen/VTT-Modell und Wufi-Bio mit gemessenem Schimmelpilz-Index auf Kiefern-Splintholz. Die Ergebnisse mit dem Viitanen/VTT-Modell wurden unter verschiedenen Voraussetzungen berechnet.	124
Bild 78: Prüfmaterialeproben im Labor.	125
Bild 79: Temperaturverlauf (oben) und relative Luftfeuchte (unten) im Winter an einer Fensterlaibung und hinter einem Gemälde auf Leinwand an der Wand.	127
Bild 80: Prognostiziertes Schimmelpilzwachstum hinter einem Gemälde an der ungedämmten Außenwand (blau) und in einer ungedämmten Fensterlaibung (rot).	127

Bild 81: Verläufe der Oberflächentemperatur eines alten Gebäudes und einer gut gedämmten Fassade mit WDVS im Vergleich zur Taupunkttemperatur der Außenluft.	130
Bild 82: Vergleich der summierten Stunden unter dem Taupunkt im Herbst für eine Konstruktion mit WDVS und einer monolithischen für zwei Ausrichtungen.	131
Bild 83: Verläufe der Oberflächentemperatur für nach Westen ausgerichtete Wände mit WDVS und verschiedenen Oberflächeneigenschaften. Daten für einen sonnigen Sommertag (13. Sept.). Zusätzlich werden die Kurven für die Außenlufttemperatur und die Taupunkttemperatur angegeben.	132
Bild 84: Verläufe von Oberflächentemperaturen für nach Westen ausgerichtete Wände mit WDVS und verschiedenen spektralen Eigenschaften. Zusätzlich werden die Kurven für die Außenlufttemperatur und die Taupunkttemperatur gezeigt.	133
Bild 85: Akkumulierte Kondensationsdauer für verschiedene Wandkonstruktionen und Anstriche innerhalb der Hauptwachstumsphase im Herbst.	134
Bild 86: Verläufe des Oberflächenwasser für nach Westen ausgerichtete Wände mit verschiedenen WDVS.	135
Bild 87: Gravimetrische Bestimmung der Oberflächenfeuchte auf einer Versuchswand mit verschiedenen Beschichtungen.	136
Bild 88: Wassermenge auf einer Außenfassade von einem ultrahydrophoben Anstrich und einer Dispersionssilikatbeschichtung, die sich während der Hauptwachstumsphase von Mikroorganismen im Herbst angesammelt hat.	137
Bild 89: Experimentell ermittelte Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts der Baustoffe Mineralfaserdämmung (rot) und Porenbeton (schwarz).	138
Bild 90: Messung der Wärmeleitfähigkeit für eine Zellulosefaserdämmung. Die Ergebnisse in der Graphik oben zeigen die Messungen einer trockenen Probe, die in der Mitte der einer bei 80 % r. F. konditionierten Probe. Die Graphik unten zeigt die Extrapolation der Wärmeleitfähigkeit für den Temperaturbereich zwischen 10 °C und 40°C. Aus der Differenz dieser beiden linearen Funktionen kann der feuchteabhängige Zuschlag der Wärmeleitfähigkeit berechnet werden.	139
Bild 91: Vergleich zwischen dem gemessenen und dem mit WUFI berechneten durchschnittlichen Wärmestrom für eine bei 80 % r. F. konditionierte Zellulosefaserprobe. Oben: Berechnung, bei der der gemessene Feuchtezuschlag und die latenten	

Wärmeeffekte berücksichtigt werden. Mitte: Berechnung, bei der der gemessene Feuchtezuschlag vernachlässigt wird, aber die latenten Wärmeeffekte berücksichtigt werden. Unten: Berechnung, bei der der gemessene Feuchtezuschlag berücksichtigt wird, aber die latenten Wärmeeffekte vernachlässigt werden.	141
Bild 92: Berechneter innerer Wärmestrom einer nach Süden gerichteten Dachkonstruktion (Dachneigung 50°) mit Zellulosedämmung während 4 Wintertagen mit hoher Strahlung. Das Bild zeigt die Berechnung mit und ohne latente Wärmeeffekte.	142
Bild 93: Einfluss der Wandoberflächen auf das Trocknungsverhalten (unten) von Porenbeton mit inhärenter Feuchte und die Auswirkung der Feuchte auf den erreichten Heizbedarf (oben).	144
Bild 94: Berechnete jährliche durchschnittliche relative Luftfeuchte, Temperatur und Heizenergie in Abhängigkeit von der jährlichen Durchschnittsaußentemperatur.	73
Bild 95: Simulierte Raumlufttemperatur unter Verwendung der Wetterdaten aus verschiedenen Jahren.	74
Bild 96: Simulierte relative Raumluftfeuchte unter Verwendung der Wetterdaten aus verschiedenen Jahren.	75
Bild 97: Berechneter Gesamtfeuchtegehalt eines nach Norden (links) und nach Süden (rechts) ausgerichteten Giebeldachs unter Verwendung verschiedener Wetterdaten für Holzkirchen.	75
Bild 98: Berechneter Feuchtegehalt einer OSB-Platte in einer nach Westen (links) und nach Osten (rechts) ausgerichteten Fassade unter Verwendung verschiedener Wetterdaten für Holzkirchen.	76
Bild 99: Links: Bereiche der Feuchtelast in beheizten Räumen ohne Klimatisierung in Abhängigkeit von der monatlichen durchschnittlichen Außenlufttemperatur. Die Nutzung ist definiert als eine Klasse:	77
Bild 100: Links: Transferfunktionen für die Raumlufttemperatur und die relative Luftfeuchte in Abhängigkeit vom variablem 24-Stunden-Durchschnittswert der Außenlufttemperatur. Rechts: Verlauf der berechneten relativen Raumluftfeuchte für den Standort Holzkirchen gemäß den 2 Feuchteklassen.	79
Bild 101: Oben: Transferfunktionen für die Raumlufttemperatur und die relative Luftfeuchte in Abhängigkeit vom variablen 24-Stunden-Durchschnittswert der Außenlufttemperatur. Unten: Verlauf der berechneten relativen Raumluftfeuchte für den Standort Holzkirchen von 2 Feuchteklassen.	80
Bild 102: Überblick über die simulierten täglichen Profile für Lüftung, Wärme- und Feuchtelasten.	82

Bild 103: Raumlufttemperatur (oben) und relative Luftfeuchte (unten) für die Fälle 1 bis 7 als Ergebnisse der WUFI-Plus-Berechnung.	83
Bild 104: Statistische Auswertung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte als Ergebnisse von genormten Verfahren und WUFI-Plus-Simulationen. Die Kästen zeigen die Durchschnittswerte (Punkte), Mittelwerte und 25 % bzw. 75 % Grenzen an. Mindest- und Maximalwerte sind ebenfalls angezeigt.	84
Bild 105: Simulierter Wassergehalt der Holzverschalung (oben) und Gesamtwassergehalt der Konstruktion (unten) basierend auf verschiedenen Raumklimadaten.	85
Bild 106: Simulierter Wassergehalt der OSB-Platten (oben) und Gesamtwassergehalt der Konstruktion (unten) basierend auf verschiedenen Raumklimadaten.	86
Bild 107: Schematische Darstellung einer künstlichen "Wärmebrücke" mit Taupunktsensor	147
Bild 108: Verläufe der Luftfeuchte für zwei aufeinander folgende ausgewählte Tage und Schaltpunkte mit Ventilatorregulierung durch den Taupunktschalter einer 15 cm starken Wärmebrücke.	149
Bild 109: Verläufe der relativen Raumluftfeuchte und abhängige Reaktionen der Ventilatorregulierung durch ein kommerzielles Lüftungssystem an zwei aufeinander folgenden ausgewählten Tagen.	150
Bild 110: Verläufe der Temperaturen und Raumwärmeleistung für zwei aufeinander folgende ausgewählte Tage mit Ventilatorregulierung mittels Taupunktschalter.	151
Bild 111: Verläufe der Temperaturen und Raumwärmeleistung für zwei aufeinander folgende ausgewählte Tage mit Luftfeuchte reguliertem Luftzufuhrelement.	152
Bild 112: Diagramm mit den einzelnen Berechnungsschritten zur Bestimmung der Lüftungsanforderungen, um Schimmelpilzwachstum zu vermeiden.	153
Bild 113: Oben: Verlauf der Feuchteproduktion in einem Schlafzimmer einer ausreichend gedämmten Wohnung ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknen im Wohnzimmer.	154
Bild 114: Erforderliche konstante minimale Luftwechselraten (links) für verschiedene Räume, um Schimmelpilzwachstum zu verhindern, und im Vergleich dazu erforderliche Stoßlüftung für stündliche Luftwechselraten als Durchschnittswert pro Tag (rechts) für alle Varianten der Modellwohnung.	155

Bild 115: Vergleich des Heizenergiebedarfs für ein Schlafzimmer während der Heizperiode von Oktober bis März für die verschiedenen Varianten. Die rechte Seite zeigt den Energiebedarf, wenn Wäsche in der Wohnung getrocknet wird.	156
Bild 116: Photographische Ansicht des simulierten Klassenzimmers, das 1964 erbaut wurde. Die Ausrichtung der Fenster geht nach Südosten. Das Klassenzimmer hat eine Fläche von 55 m ² .	157
Bild 117: Berechnete Verläufe der relative Luftfeuchte und Temperatur im Klassenzimmer für den ursprünglichen Raum und die vorgeschlagene Sanierung (Fall 6).	158
Bild 118: Angenommener Außenluftaustausch und berechneter Verlauf der CO ₂ -Konzentration, der sich im Klassenzimmer ergibt.	159

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: CO ₂ -Produktionsrate in Abhängigkeit der Aktivität	12
Tabelle 2: Auflistung der durchgeführten Versuchsschritte.	22
Tabelle 3: Sorptionswassergehalte der untersuchten Materialien.	36
Tabelle 4: Diffusionswiderstandszahlen der untersuchten Innenbekleidungen.	36
Tabelle 5: Wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke der Innenwandfarben bzw. einer Raufasertapete mit Anstrich.	37
Tabelle 6: Untersuchte Materialien	37
Tabelle 7: Auflistung der Gewichtsänderung während den Befeuchtungsphasen	44
Tabelle 8: Beispiele empfohlener Kategorien zur Auslegung von maschinell beheizter und gekühlter Gebäude.	91
Tabelle 9: Empfohlene Auslegungskriterien für Luftfeuchtigkeit, wenn Befeuchtungs- oder Entfeuchtungssysteme installiert sind.	92
Tabelle 10: Symptome und Beschwerden, die nach [61] mit feuchten oder schimmelpilzbelasteten Wohnräumen in Verbindung gebracht werden.	93
Tabelle 11: Trockenheitsempfindung bei unterschiedlichen Temperaturen und einer Luftfeuchte von 10 - 15% (gekürzt aus Jaakkola et. al. [60])	94
Tabelle 12: Feldstudien zu objektiven und subjektiven Wirkungen niedriger Luftfeuchte.	95
Tabelle 13: Feldstudien zu objektiven und subjektive Auswirkungen niedriger Luftfeuchte.	97
Tabelle 14: Symptome und gesundheitliche Probleme in Flugzeugen – Vergleich zwischen Flugzeugbesatzung und Büroangestellten (Lindgren et. al.[79].)	98
Tabelle 15: Werte für Raumklimadaten nach Thomson [104] (1986).	105
Tabelle 16: Spezifikationen für Temperatur und relative Luftfeuchte für Museumsgebäude, Bibliotheken und Archive, ASHRAE (2003) [9].	107
Tabelle 17: Schimmelpilz-Index.	118

Tabelle 18: Alle wichtigen Konstruktionsdaten für die WUFI-Berechnungen.	72
Tabelle 19: Berechnete Stunden mit Raumlufttemperaturen über 24 °C, 25 °C und 26 °C.	74
Tabelle 20: Varianten der Wufi@plus-Berechnungen	158