Die Sanierung und ihre Folgen – rechnerische Betrachtungen ausgewählter Beispiele

Dr. Martin Krus, Dr. Andreas Holm, Prof. Dr. Klaus Sedlbauer,
Dr. Hartwig Künzel

Dr. Martin Krus
1984 Diplom Chemieingenieurwesen Universität Karlsruhe. Seit 9/85 Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik. 1995 Promotion an der Universität Stuttgart. Lehrbeauftragter an der Universität Stuttgart und der Fachhochschule Rosenheim. Seit 10/2000 Technischer Leiter der Prüfstelle „Feuchte/Mörtel/Strahlung“. Seit 1/2004 Stellvertretender Abteilungsleiter der Abteilung Raumklima und Klimawirkungen.

Dr. Andreas Holm
Studium der Physik an der TU München. Seit 1996 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen. 2001 bis 2004 Gruppenleiter in der Abteilung Hygrothermik. 2001 Promotion and der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Seit 2004 Leiter der Abteilung Raumklima/Klimawirkungen. Seit WS 2002 Lehrauftrag an der Fachhoch-

schule Rosenheim. Seit 2004 Abteilungsleiter der Abteilung Raumklima und Klimawirkungen.

Prof. Klaus Dr. Sedlbauer
Studium der Physik an der LMU München. Seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter beim Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart und Holzkirchen. Seit 2000 stellvertretender Abteilungsleiter für den Bereich Hygrothermik mit den Arbeitsschwerpunkten Freiland- und Laboruntersuchungen sowie rechnerische Modellierung. Promotion 2001. Von 2001 bis 2003 stellvertretender Institutsleiter. Sommersemester 2003 Professor an der Fachhochschule Rosenheim. Seit Nov. 2003 Institutsleiter und Professor an der Universität Stuttgart.

Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel
Studium des Chemieingenieurwesens an der Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 1987 wiss. Mitarbeiter, am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in

Holzkirchen. Seit 1994 Leiter der Abteilung Hygrothermik. 1994 Promotion an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart. Mitglied bzw. Obmann in internationalen Normungsausschüssen und Fachgremien (z.B. WTA, CEN, ASHRAE). Sachverständiger beim DIBT.

Zusammenfassung

Für unterschiedliche in der Praxis auftretende Fragestellungen wurden Berechnungstools entwickelt, die erlauben, verschiedene Sanierungsmaßnahmen vor deren Anwendung auf ihre Wirksamkeit hin vergleichend zu bewerten. Im folgenden Beitrag werden die neu entwickelten Verfahren kurz beschrieben und ganz unterschiedliche Anwendungsbeispiele aufgeführt. Sie zeigen die Problematik der energetischen Altbausanierung mit Dämmung und Einbau neuer Fenster, der aufsteigenden Feuchtigkeit oder des Einflusses von Hydrophobierungsmaßnahmen. Außerdem werden die Konsequenzen von Baumängeln oder auftretender Wasserschäden rechnerisch untersucht und die daraus sich ergebenden Konsequenzen dargestellt. Am Beispiel einer Flachdachsanierung wird gezeigt, wie sich messtechnische und rechnerische Untersuchungen ergänzen.

Abstract

Calculation tools have been developed for different problems encountered in practice, allowing the practitioner to compare different possible rehabilitation measures for their effectiveness before applying them. The following article gives a short description of these new simulation models and presents quite different practical examples.

1 Energetische Altbausanierung 6
1.1 Verwendete Berechnungsmodelle 6
1.2 Durchführung der Untersuchungen 8
1.3 Ergebnisse und Erläuterungen 11
1.4 Zusammenfassung, Beurteilung und Folgerungen 16
1.5 Neue Belüftungstechnik 18
2 Aufsteigenden Feuchtigkeit 21
2.1 Feuchtetransport im Mauerwerk 21
2.2 Rechnerische Untersuchung 21
3 Einfluss von Hydrophobierungsmaßnahmen 26
3.1 Feuchtestau hinter dem hydrophobierten Wandbereich 27
3.2 Fehlstelle in einem hydrophobierten homogenen Mauerwerk 28
3.3 Fehlstelle durch Abrisse im Bereich der Mörtelfuge 30
3.4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen 31
4 Pilzbewuchs auf Außenfassade durch Baumängel 33
4.1 Durchführung der Untersuchungen 33
4.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen 34
5 Beurteilung eines Wasserschadens 37
5.1 Durchführung der Untersuchungen 37
5.2 Annahmen für die Berechnung 37
5.3 Ergebnis der Berechnung und Schlussfolgerung 39
6 Flachdachsanierung durch belüftete Leichtbetonschale 41
6.1 Durchgeführte Untersuchungen 42
6.2 Ergebnisse der Untersuchungen 43
7 Literatur 47

Die Sanierung und ihre Folgen – rechnerische Betrachtungen ausgewählter Beispielen

1 Energetische Altbausanierung

Zahlreiche Schäden an Wohn- und Geschäftsgebäuden sind direkt oder indirekt auf die Einwirkung von Feuchte zurückzuführen. Bei der Sanierung von Altbauten sollte neben eventuell zu beseitigenden Schäden auch einer Verbesserung der energetischen Verhältnisse angestrebt werden. Dies kann zur Verminderung von vorher vorhandenen Feuchteproblemen - wie z.B. Schimmelpilzbildung durch zu niedrige Temperaturen an der Innenoberfläche - führen, unter Umständen jedoch auch neue Feuchteprobleme verursachen. Im Folgenden soll deshalb nach einer kurzen Beschreibung der verwendeten Berechnungsmodelle durch rechnerische Untersuchungen auf den Einfluss einer thermischen Sanierung auf das Schimmelpilzrisiko eingegangen werden.

1.1 Verwendete Berechnungsmodelle

Biohygrothermisches Modell

Von besonderer Bedeutung für die Baupraxis ist die Beurteilung des Wachstumsrisikos von Schimmelpilzen auf Gebäudeoberflächen und im Inneren von Bauteilen. Da die Temperatur- und Feuchteverhältnisse wesentliche Einflussfaktoren für das Schimmelpilzwachstum darstellen, kann aus der Kenntnis der hygrothermischen Bedingungen und deren zeitlicher Veränderung eine Wachstumswahrscheinlichkeit für Schimmelpilze abgeleitet werden. Sog. Isoplethensystheme beschreiben die Abhängigkeit der Sporenkeimung bzw. des Myzelwachstums von der Oberflächentemperatur und –feuchte. Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Verunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, wurden Isoplethensysteme für drei unterschiedliche Substratgruppen (Grenzkurve LIM_{Bau}) vorgeschlagen: 0 = optimaler Nährboden, I = biologisch gut verwertbar, II = biologisch kaum verwertbare Substrate.

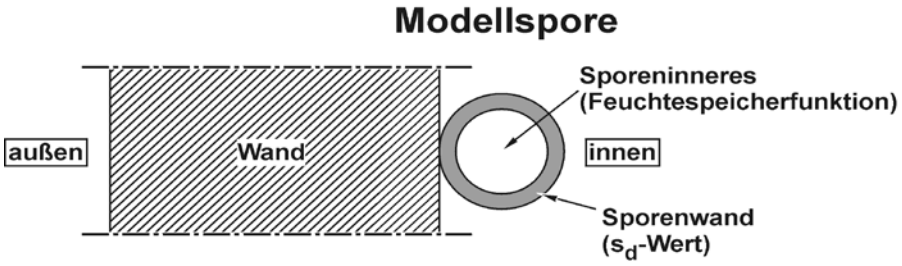


Bild 1 Schematisierte Darstellung einer Spore auf einer Wand. Das reale Verhältnis von Sporendurchmesser zur Wanddicke (30 cm) beträgt rund 1:100.000.

Für die bauphysikalisch korrekte Beschreibung der Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, wurde ein neuartiges biohygrothermisches Modell entwickelt. Dieses ist in der Lage, den Feuchtehaushalt einer Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln, also auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen zu berücksichtigen. Bild 1 zeigt schematisch die dem biohygrothermischen Verfahren WUFI®-Bio zugrunde liegende Modellspore.

Ist ein bestimmter Wassergehalt (Grenzwassergehalt) im Sporeninneren erreicht, kann die Sporenkeimung als abgeschlossen betrachtet werden und das Schimmelpilzwachstum beginnt. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethensysteme für Sporenauskeimung festgelegt. Details zu diesem Modell, das bereits mehrfach erfolgreich zur Beurteilung von Schimmelpilzschäden angewandt wurde, sind in [1] enthalten.

Raumklimamodell WUFI®-Plus

Durch die Verknüpfung der hygrothermischen Bauteilberechnung mit der energetischen Gebäudesimulation können auch die Wärme- und Feuchte-Wechselwirkungen zwischen dem Gesamtgebäude und seinen Bauteilen berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Feuchtepufferwirkung der Umschließungsflächen bei Änderungen der Feuchtelast im Raum oder die Feuchtesorption bzw. -desorption bei Temperaturänderungen an den Bauteiloberflächen (z.B. durch die strahlungsbedingte Bauteilerwärmung oder nächtliche Abkühlung). Im Rahmen der WUFI®-Familie wurde dazu das Raumklimamodell WUFI®-Plus entwickelt [1, 2]. WUFI®-Plus besteht aus einem Raumbilanzierungsmodul an das beliebig viele - die Zahl richtet sich nach Anzahl der sowohl im Aufbau als auch in der Orientierung unterschiedlichen Raumumschließungsflächen - eindimensionale WUFI®-Bauteilsimulationen gekoppelt werden. Diese Ankopplung ist in Bild 2 beispielhaft für eine Dach- und eine Außenwandfläche dargestellt. Eventuelle Wärmebrücken haben zwar im Vergleich zu den flächenmäßig wesentlich größeren ungestörten Bereichen (Bauteilregelquerschnitt) meist keinen großen Einfluss auf das Raumklima, umkehrt hat aber das Raumklima bedeutende Auswirkungen auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse und damit auch das Schimmelpilzrisiko an der Wärmebrücke. Ähnliches gilt für Wände, die noch anderen Feuchtebeanspruchungen ausgesetzt sind, wie z.B. lokal begrenzte Baufeuchte oder aufsteigende Grundfeuchte.

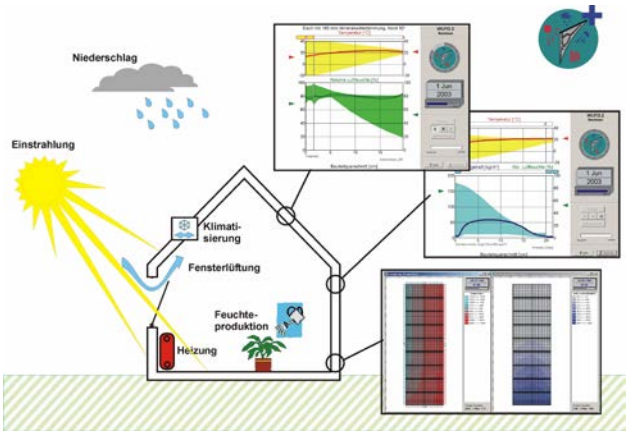


Bild 2 Beispielhafte Darstellung der Modellverknüpfungen bei der Raumklimasimulation mit WUFI®-Plus zur Berücksichtigung der hygrothermischen Wechselwirkung zwischen Raumluft und Gebäudehülle.

1.2 Durchführung der Untersuchungen

Besonders in den Raumecken kommt es aufgrund der Wirkung der geometrischen Wärmebrücke und der reduzierten Wärmeübergangskoeffizienten zu niedrigeren Oberflächentemperaturen und somit höheren Oberflächenfeuchten verbunden mit erhöhter Schimmelpilzgefahr. Dem für die Berechnung des erforderlichen Lüftungsverhaltens zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum verwendeten Raumklimamodell WUFI® -Plus ist das eindimensionale WUFI® zugrunde gelegt. Um mit diesem eindimensionalen Modell trotzdem den Einfluss von Raumecken berücksichtigen zu können, muss ein Verfahren entwickelt werden, mit dem diese Raumecke in ein eindimensionales Bauteil übergeführt werden kann, das in Bezug auf die Oberflächentemperaturen bzw. -feuchten dasselbe instationäre Verhalten aufweist. Dies erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde im zweidimensionalen Berechnungsprogramm WUFI® 2D (derzeit existieren keine dreidimensionalen Wärme- und Feuchtetransportberechnungsprogramme) durch eine Variation der Wärmekapazität (über die Rohdichte) und der Wärmeleitfähigkeit das Temperaturverhalten der damit berechneten Außenkante so angepasst, dass sich der Temperaturfaktor ergibt, wie er sich mit dem Wärmebrückenkatalog für die dreidimensionale Ecke errechnet. Im Anschluss daran wurde auf analoge Weise ein eindimensionales Bauteil gebildet, das einen vergleichbaren instationären Innenoberflächentemperatur- und –feuchteverlauf aufweist, wie in der beschriebenen angepassten zweidimensionalen Innenkante [4]. Damit ist der Eckeneinfluss auf die zur Schimmelpilzvermeidung erforderliche Lüftung zumindest mit guter Übereinstimmung zur Realität berücksichtigt.

Für die rechnerische Ermittlung der Lüftungsstrategie zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung wurde als Anwendungsbeispiel eine typische 3-Zimmerwohnung ausgewählt (s. Bild 3). Berechnet wurden dabei in [5] ein nicht sa-

nierter Altbau mit Ziegelmauerwerk und Mindestwärmeschutz (U-Wert 1,4 W/m²K) mit alten Fenstern (Variante 1), ein komplett sanierter Altbau mit WDVS und neuen dichten Fenstern (Variante 2) sowie ein Altbau, der ohne zusätzliche Dämmmaßnahme neue dichte Fenster erhalten hat (Variante 3). In dieser Untersuchung wird die Feuchteproduktion nicht verallgemeinert über die Wohnung gemittelt angenommen, sondern Raum für Raum getrennt betrachtet. Der Feuchteaustausch zwischen den Räumen, z.B. durch geöffnete Türen, kann dabei nicht berücksichtigt werden. Für jeden Raum werden zwei Feuchteproduktionsverläufe erarbeitet, die die Nutzungsbedingungen realitätsnah nachbilden. Der Normalfall beinhaltet die Feuchteproduktion durch Bewohner, Pflanzen, Körperreinigung und Kochvorgänge. In der worst case Betrachtung wird das Feuchteprofil zusätzlich durch trocknende Wäsche erhöht. Die Feuchteproduktion einer geschleuderten Waschladung pro Tag wurde hier nach Raumvolumen verteilt und dem normalen Feuchteprofil aufgeschlagen. Allen Räumen wurde je nach Nutzung eine entsprechende Feuchteproduktion zugrunde gelegt. In Tabelle 1 ist für diese Räume der Tagesverlauf der angesetzten Feuchtelasten aufgelistet. Mit in die Betrachtung einbezogen wurden auch unterschiedliche Lüftungsgewohnheiten der Bewohner (Taglüfter; Nachtlüfter) sowie ein dem Zimmer (unterschieden nach Altbau ohne und mit neuen dichten Fenstern) entsprechender Infiltrationsluftwechsel.

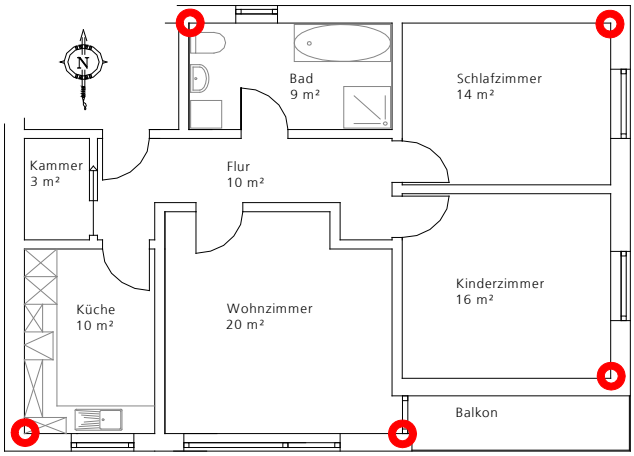


Bild 3 Grundriss der für die Berechnung ausgewählten 3-Zimmerwohnung. Markiert sind die dabei betrachteten Außenraumecken.

Tabelle 1: Tagesverlauf der angesetzten Feuchteproduktionen. Die Werte in Klammer bezeichnen die Feuchteproduktion mit Wäschetrocknung.

Uhrzeit	Schlafzimmer	Kinderzimmer	Wohnzimmer	Bad	Küche
	Feuchte in g/h	Feuchte in g/h	Feuchte in g/h	Feuchte in g/h	Feuchte in g/h

$0^{00} – 6^{00}$	2Ps,2T 80 (100)	2Ps,2T 80 (105)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
$6^{00} – 7^{00}$	2T 10 (30)	2T 10 (35)	4Pt,10T 235 (265)	2D 500 (515)	K 100 (115)
$7^{00} – 13^{00}$	2T 10 (30)	2T 10 (35)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
13^{00} - 14^{00}	2T 10 (30)	2T 10 (35)	3Pt,10T 185 (215)	HT 20 (35)	M 250 (265)
14^{00} - 17^{00}	2T 10 (30)	2Pt,2T 115 (140)	1Pt,10T 85 (115)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
17^{00} -18^{00}	2T 10 (30)	2Pt,2T 115 (140)	1Pt,10T 85 (115)	HT 20 (35)	A 450 (465)
18^{00} - 19^{00}	2T 10 (30)	2T 10 (35)	4Pt,10T 235 (255)	HT 20 (35)	G 250 (265)
19^{00} - 20^{00}	2T 10 (30)	2T 10 (35)	2Pt,10T 135 (155)	2D 500 (515)	2 T 10 (25)
20^{00} - 22^{00}	2T 10 (30)	2Ps,2T 80 (105)	2Pt,10T 135 (155)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
22^{00} - 24^{00}	2Ps,2T 80 (100)	2Ps,2T 80 (105)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
Summe	800 (1280) g	1360 (1940) g	1890 (2610) g	1440 (1875) g	1250 (1610) g
Gesamtfeuchtesumme					6740 (9315) g
Gesamtvolumen					172,5 m³
Volumen bezogene Feuchte					1,63 (2,25)g/(h*m³)

HT = Handtuchtrocknen, D = Duschen 5 Minuten, Ps = schlafende Person, T = Topfpflanze, Pt = tätige Person, K = Kaffee kochen, M = Mittagessen kochen, A = Abendessen kochen, G = Geschirr spülen

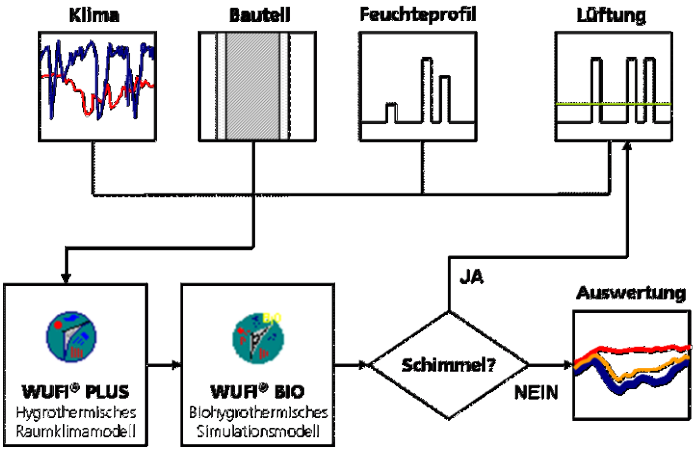


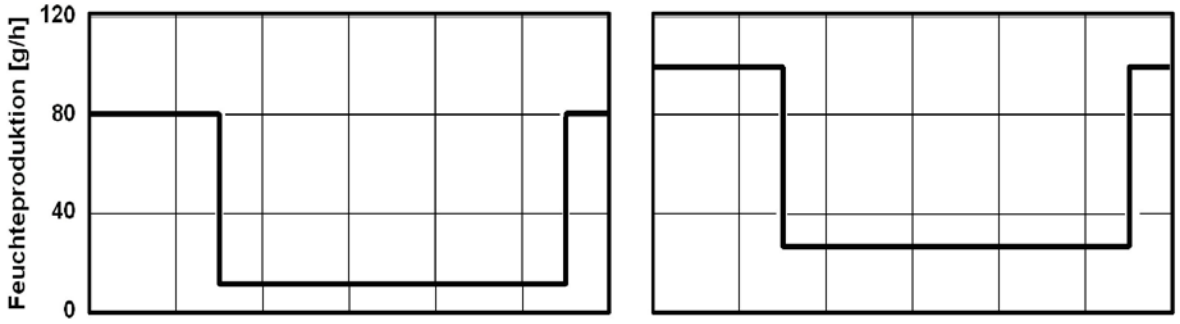
Bild 4 Ablaufschema für die einzelnen Berechnungsschritte im Zuge der Ermittlung der zur Schimmelpilzvermeidung erforderlichen Lüftung.

Die Ermittlung der erforderlichen Luftwechselrate oder Fensteröffnungszeiten für Stoßlüftung erfolgt iterativ, indem bei vorgegebenem Lüftungsprofil mit Hilfe des modifizierten Raumklimamodells die Temperatur- und Feuchteverläufe der Raumecken ermittelt werden. Anhand dieser erfolgt mit Hilfe des Biohygrothermischen Modells die Beurteilung des Schimmelpilzwachstumsrisikos mit anschließender Anpassung des Lüftungsprofils bis zum Erreichen des gerade erforderlichen Luftwechsels (Ablaufschema s. Bild 4).

1.3 Ergebnisse und Erläuterungen

Als Beispiel zeigt Bild 5 den zeitlichen Verlauf der Feuchteproduktion sowie die daraus zur Schimmelpilzvermeidung resultierenden Lüftungserfordernisse im Falle der Dauerlüftung bzw. der Stoßlüftung für ein Schlafzimmer einer typischen Altbauwohnung ohne und mit Wäschetrocknung. Bei dem dargestellten konstanten Mindestluftwechsel (rote Linie) bzw. dem Mindeststoßluftwechsel (lila Linie) ergeben sich in den Außenraumecken Oberflächenfeuchten, die gemäß den Berechnungen mit dem Biohygrothermischen Modell (WUFI-Bio) gerade unterhalb den für Schimmelpilzbildung erforderlichen Wachstumsvoraussetzungen liegen. Als grüne Linie ist der dabei angesetzte und im konstanten Mindestluftwechsel enthaltene Infiltrationsluftwechsel mit angegeben (0,5 h^{-1} beim Altbau mit alten Fenstern, sonst 0,1 h^{-1}). Trotz des niedrigeren Dämmstandards, der das Schimmelpilzrisiko aufgrund der abgesenkten Oberflächentemperaturen grundsätzlich erhöht, ist aufgrund des deutlich höheren Infiltrationsluftwechsels (grüne Linie) eine einmalige kurze morgendliche Stoßlüftung ausreichend. Selbst im Falle der Wäschetrocknung (rechte Abbildung) kommt man hierbei ohne weitere Stoßlüftung aus. Bei Dauerlüftung genügt ein geringer zusätzlicher Luftaustausch. Allerdings muss der bei diesen Berechnungen als Infiltrationsluftwechsel dauerhaft angesetzte Luftwechsel von 0,5 h^{-1} im Falle ungünstiger Witterungsbedingungen (z.B. bei Windstille) durch entsprechende Lüftungsmaßnahmen sichergestellt werden.

In Bild 7 ist dieselbe Situation für einen komplett sanierten Altbau mit WDVS und neuen dichten Fenstern dargestellt. Der Einfluss der erhöhten Feuchtelast durch Wäschetrocknen ist deutlich zu erkennen. Mit Wäschetrocknung reicht eine morgendliche viertelstündliche Stoßlüftung mit einer Luftwechselrate von 10 h^{-1} nicht mehr aus, um Schimmelpilzbildung zu vermeiden; hier müssen die Fenster dreimal täglich für einen längeren Zeitraum geöffnet werden.



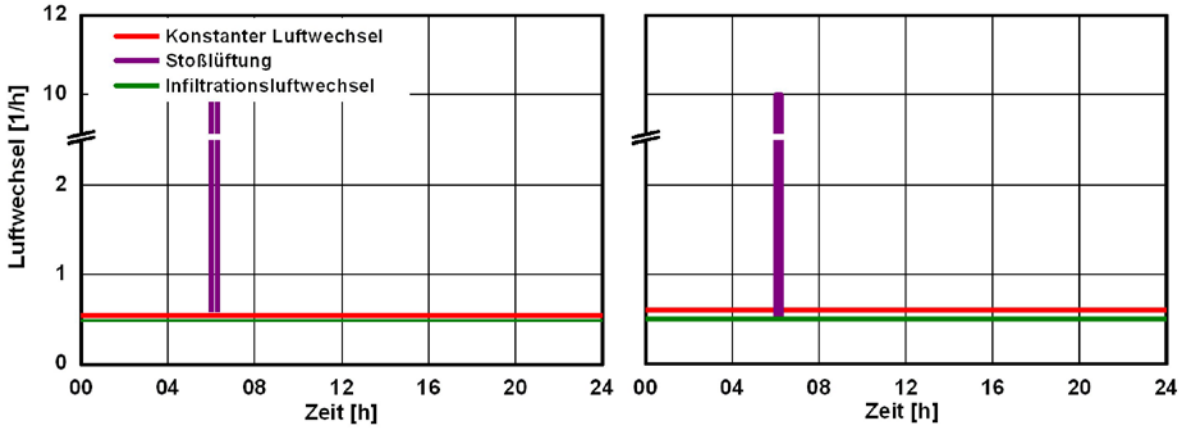


Bild 5 Oben: Zeitverlauf der angenommenen Feuchteproduktion ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum.

Unten: Ermittelte zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauer lüftung bzw. Stoßlüftung im Schlafzimmer einer Altbau wohnung.

Mit dargestellt ist der Infiltrationsluftwechsel.

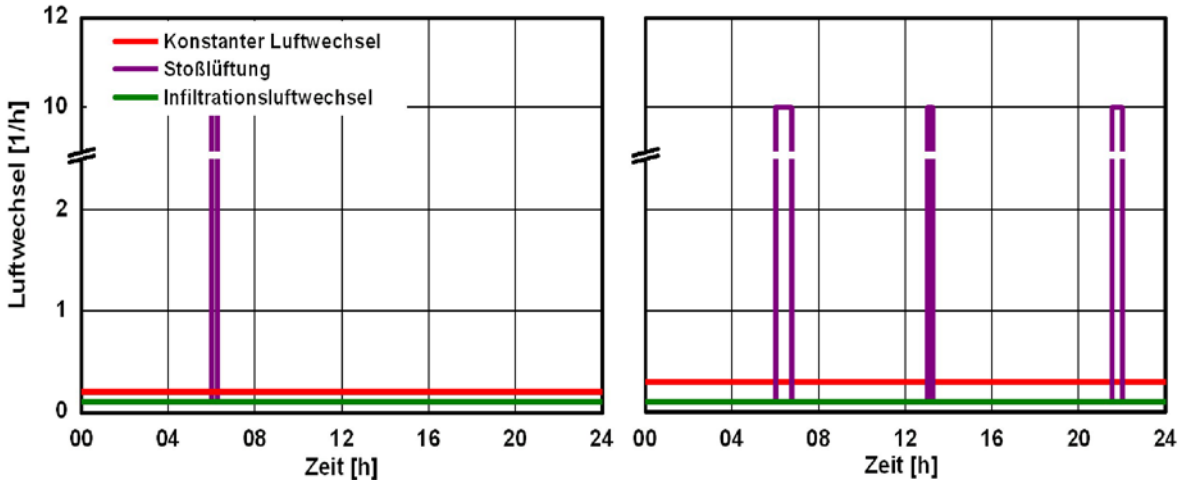


Bild 6 Ermittelte zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauerlüftung bzw. Stoßlüftung im Schlafzimmer einer gut gedämmten mit neuen Fenstern ausgestattete Wohnung ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum. Mit dargestellt ist der Infiltrationsluftwechsel.

Ein ganz anderes Bild ergibt sich, wenn beim Altbau ohne zusätzliche Dämmmaßnahme dichte Fenster eingesetzt werden. Hier müssen aufgrund des deutlich reduzierten Infiltrationsluftwechsels mindestens dreimal täglich die Fenster mehr als eine Stunde lang geöffnet werden (Bild 7 links). Im Falle der Wäschetrocknung (rechts) ist eine Schimmelpilzvermeidung durch Stoßlüftung kaum mehr praktikabel. In diesem Fall dürften sich die durch den Einbau dichter Fenster erhofften Energieeinsparungen bei Vermeidung von Schimmelbewuchs nicht einstellen.

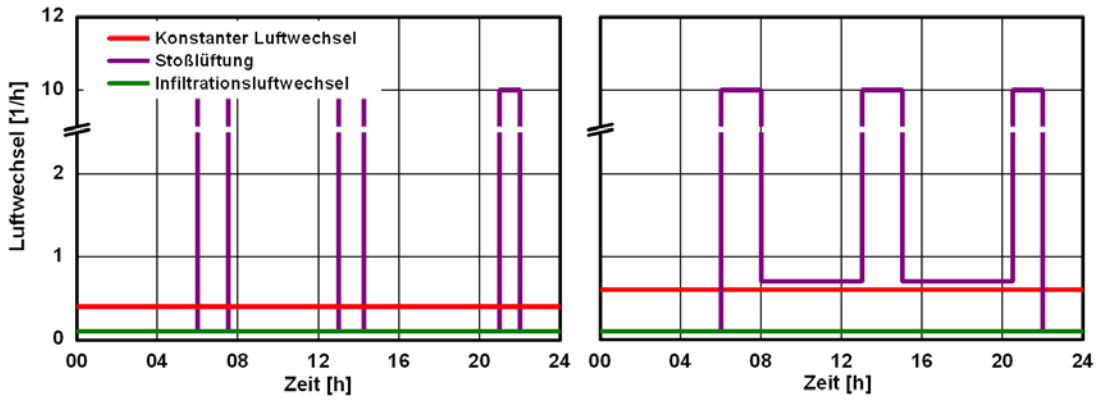


Bild 7 Ermittelte zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauerlüftung bzw. Stoßlüftung im Schlafzimmer der Altbauwohnung aus Bild 5 nach Einbau dichter Fenster ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum. Mit dargestellt ist der Infiltrationsluftwechsel.

Bild 8 links zeigt für alle Varianten und alle Räume die berechneten erforderlichen konstanten Luftwechsel zur Schimmelpilzvermeidung. Der Mehrbedarf an Lüftung bei Wäschetrocknung ist deutlich zu erkennen. Aufgrund des erhöhten Feuchteaufkommens ist im Bad und in der Küche insbesondere bei den Altbauvarianten eine deutlich höhere Lüftung erforderlich, wobei in der Küche der Betrieb eines Dunstabzuges im Abluftbetrieb über dem Herd meist die erforderliche Feuchteabfuhr bewirkt (hier nicht berücksichtigt).

Konstanter Luftwechsel Stoßlüftung

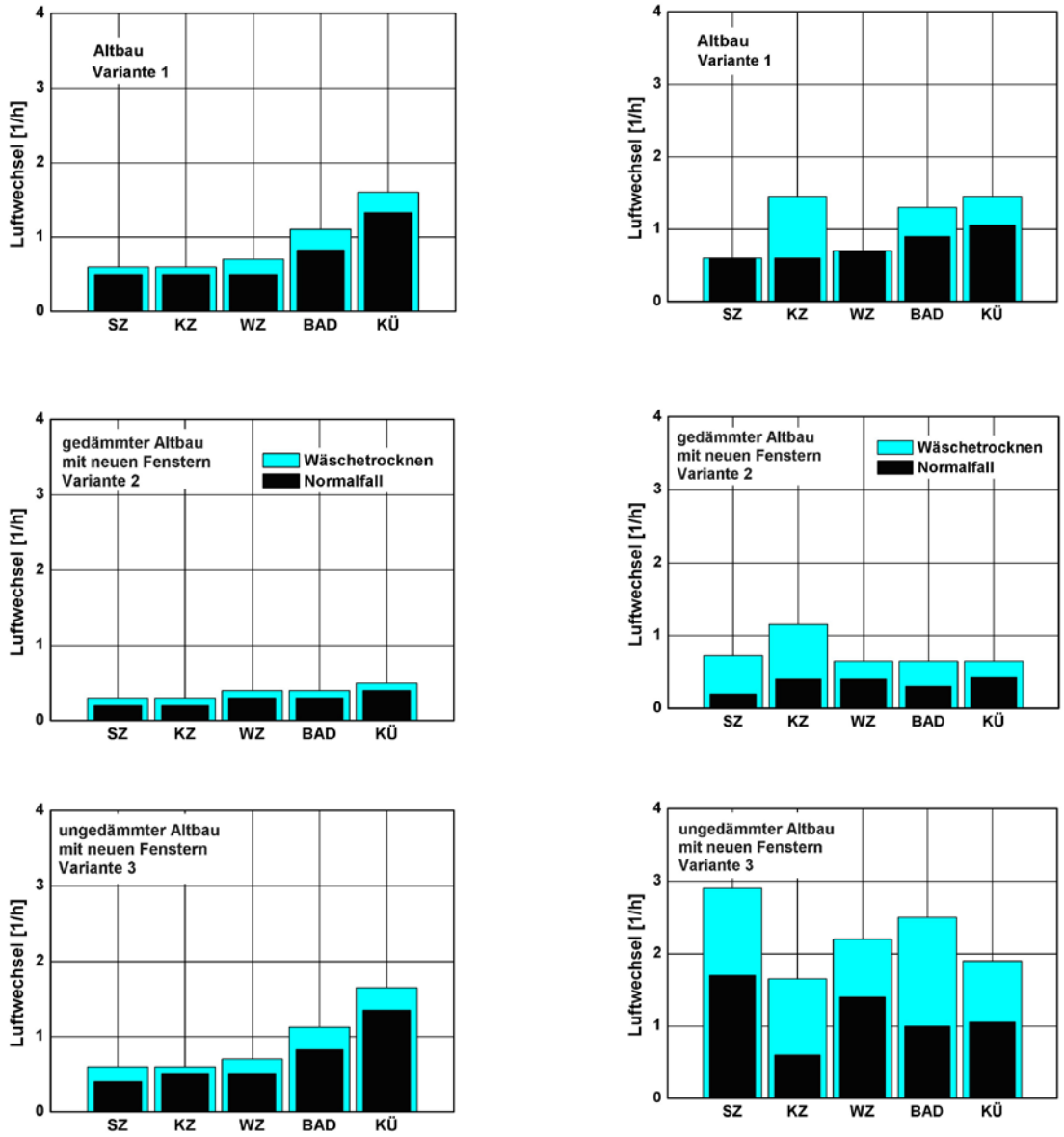


Bild 8 Für die unterschiedlichen Räume zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung erforderliche konstante Mindestluftwechsel (links) und bei Stoßlüftung erforderliche zu Vergleichszwecken über den Tag gemittelte stündliche Luftwechsel (rechts) für alle Varianten der Modellwohnung.

Wie zu erwarten, ergeben sich bei niedrigem Dämmstandard deutlich höhere Lüftungsnotwendigkeiten. Mit Ausnahme der Küche und des Bades ist aber auch hier, sofern in der Wohnung keine Wäschetrocknung erfolgt, die allgemein geforderte Luftwechselrate von 0,5 h^{-1} ausreichend für eine Schimmelpilzvermeidung.

In Bild 8 rechts ist ein aus den berechneten Stoßlüftungen ermittelter mittlerer stündlicher Luftwechsel dargestellt. Der Vergleich mit Bild 8 links zeigt, dass in den meisten Fällen, die Stoßlüftung zu höheren über den Tag gemittelten Luftwechselraten führt, als die dosierte Dauerlüftung. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich bei Luftwechselraten von 10 h^{-1} die Luft nicht bis auf Raumtemperatur erwärmt und somit weniger Feuchte mitnehmen kann.

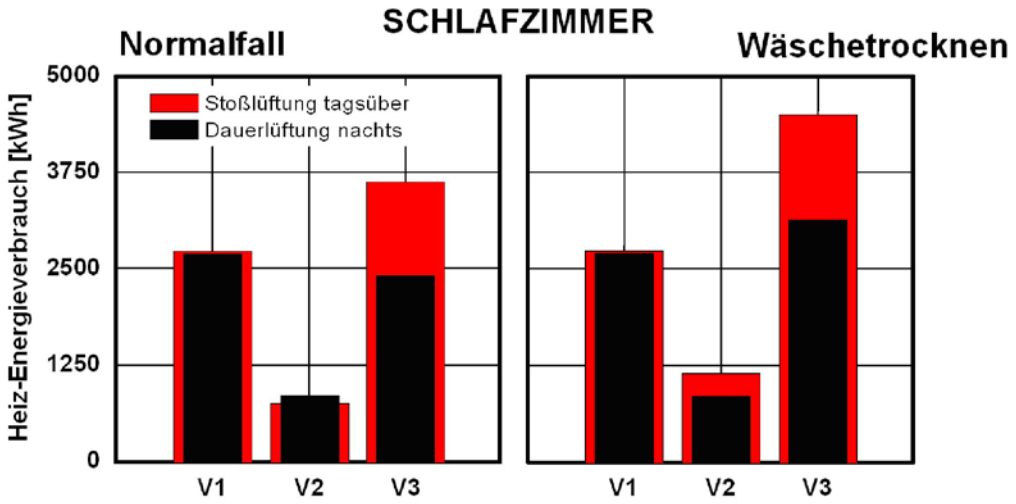


Bild 9 Vergleich der Heiz-Energieverbräuche für das Schlafzimmer während einer Heizperiode von Oktober bis März für die unterschiedlichen Varianten. Im rechten Bild ist der Energieverbrauch bei Trocknung der Wäsche in der Wohnung dargestellt.

V1: Altbau

V2: gedämmter Altbau mit neuen Fenstern

V3: ungedämmter Altbau mit neuen Fenstern

In Bild 9 ist für das Schlafzimmer der Einfluss der unterschiedlichen Lüftungsgewohnheiten (Tag-, Nachtlüfter) auf den Heizenergieverbrauch der drei untersuchten Varianten dargestellt. Man kann erkennen, dass bei gut gedämmten Wohnungen, trotz des etwas höheren Luftwechsels die Stoßlüftung zu etwas niedrigeren Energieverbräuchen führt. Im Falle der Altbauwohnung mit dichten Fenstern ist dagegen die Dauerlüftung deutlich günstiger. Dies gilt allgemein auch, wenn durch Wäschetrocknen in der Wohnung eine zusätzliche permanente Feuchtquelle vorliegt.

Es sollte erwähnt werden, dass die energetische Betrachtung der gesamten Wohnung ergibt, dass eine Wäschetrocknung in der Wohnung über den erhöhten Mehrbedarf an Lüftung einen zusätzlichen Energieverbrauch bewirkt, der

meist größer ist als der eines Kondenstrockners zur Trocknung der gleichen Menge Wäsche (siehe Bild 10). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Trockner mit primärenergetisch ungünstigerem elektrischen Strom betrieben wird. Eine Stoßlüftung ist, wie aus dem rechten Bild ersichtlich, nicht geeignet eine Wohnung mit Wäschetrocknung (ohne Trockner) energetisch sinnvoll zu lüften.

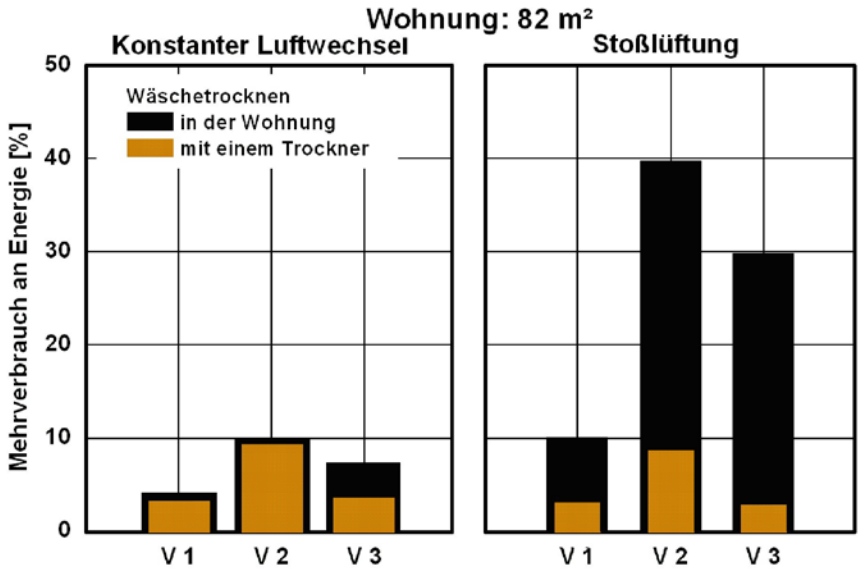


Bild 10 Mehrverbräuche an Heizungsenergie aufgrund der Wäschetrocknung in der Wohnung bei konstantem Luftwechsel (links) und bei Stoßlüftung (rechts) ohne und mit Verwendung eines Kondenstrockners.

V1: Altbau

V2: gedämmter Altbau mit neuen Fenstern

V3: ungedämmter Altbau mit neuen Fenstern

1.4 Zusammenfassung, Beurteilung und Folgerungen

Mit Hilfe des Raumklimamodells WUFI®-Plus kann der Einfluss unterschiedlicher Lüftungsvarianten auf das Raumklima berechnet werden. Wesentlich ist dabei, dass auch das instationäre Verhalten in den Raumecken berücksichtigt wird, da vor allem hier mit Schimmelpilzwachstum zu rechnen ist. Durch gekoppelte Anwendung mit dem Biohygrothermischen Modell kann unter Verwendung der berechneten Oberflächentemperaturen und –feuchten das Schimmelpilzrisiko abgeschätzt werden. Für gegebene Randbedingungen wird die notwendige Lüftung durch eine iterative Anwendung beider Verfahren ermittelt. Als Beispiele dienen in dieser Arbeit unterschiedliche Baukonstruktionen,

an denen der Einfluss verschiedener Lüftungsstrategien (Dauerlüftung oder Stoßlüftung) auf den zur Schimmelpilzvermeidung erforderlichen mittleren Luftwechsel und somit den Lüftungswärmeverlust demonstriert wird.

Die Berechnungen bestätigen, dass die für die Schimmelpilzvermeidung erforderliche Lüftung in komplexer Weise von den Klimarandbedingungen, der Baukonstruktion, den unterschiedlichen nutzungsabhängigen Feuchtelasten sowie den sorptiven Eigenschaften der Innenoberflächen und wohl auch des Mobiliars abhängt. Bei gut gedämmten Außenwänden ergeben sich in Bezug auf die Energieverluste nur geringfügige Unterschiede zwischen kontinuierlicher Lüftung und Stoßlüftung, wobei eine richtig ausgewählte Stoßlüftung wesentlich ist. Dies bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Stoßlüftung hauptsächlich während oder kurz nach der erhöhten Feuchteproduktion stattfindet. Eine Stoßlüftung, die in keinem zeitlichen Zusammenhang mit der Feuchteproduktion steht, ist dagegen energetisch ungünstiger als die Dauerlüftung, weil dann die bereits in den Wandmaterialien sorbierte Feuchte über eine langandauernde Stoßlüftung entfernt werden muss. Bei der energetischen Betrachtung muss auch berücksichtigt werden, dass den Berechnungsergebnissen eine kontinuierliche Beheizung auch während der Zeiten der Stoßlüftung zugrunde liegt. Sofern man, wie allgemein empfohlen, während der Stoßlüftung die Heizung abschaltet, wird die Stoßlüftung energetisch vorteilhafter sein. Dies gilt allerdings nicht mehr, wenn z.B. durch Wäschetrocknen eine zusätzliche konstante Feuchtelast gegeben ist.

Außerdem zeigen die Berechnungen, dass bei Altbauten mit schlechter Wärmedämmung wesentlich mehr und auch differenzierter in Abhängigkeit von der Raumart bzw. –nutzung gelüftet werden muss. Außer für das Bad und die Küche ist der allgemein geforderte Mindestluftwechsel von 0,5 h^{-1} durchaus ausreichend und dann beide Belüftungsarten energetisch gleichwertig, sofern die Wäschetrocknung außerhalb der Wohnung oder mit Hilfe eines Trockners erfolgt. Andernfalls ergeben sich für die erforderliche „Stoßlüftung“ extrem lange Öffnungszeiten, die weder praxisnah noch energetisch vertretbar sind.

Insgesamt lässt sich erkennen, dass neben der Stoßlüftung stets eine kontinuierliche Lüftung vorhanden sein sollte, die permanent eingebrachte Feuchte abführt. Je schlechter der Wärmestandart, desto höher muss bei gleicher Feuchtelast die durch Dauerlüftung erzielte Luftwechselrate sein. Dies zeigt sich vor allem bei den Ergebnissen des Altbaus mit unterschiedlicher Fensterdichtheit. Während beim gedämmten Mauerwerk die Infiltrationsluftwechselrate von 0,1 h^{-1} ausreichend für die kontinuierlich anfallende Feuchtelast ist und die restliche Feuchte wahlweise durch Stoßlüftung oder zusätzliche kontinuierliche Lüftung abgeführt werden kann, ergibt sich beim ungedämmten Altbau ein ganz anderes Bild. Bei Einbau dichter Fenster mit der Folge einer Absenkung des Infiltrationsluftwechsels auf 0,1 h^{-1} kann die Restfeuchte nicht mehr sinnvoll über Stoßlüftung abgeführt werden. Dies bedeutet aber nichts

anderes, als dass über zusätzliche Öffnungen wieder eine mittlere Luftwechselrate von 0,5 h^{-1} erreicht werden muss bzw. die Fenster wieder „undichter“ gemacht werden müssen. Bei alledem darf aber nicht übersehen werden, dass in der Praxis keine wirklich konstante Infiltrationsluftwechselrate vorliegt, da diese auch von äußeren Einflüssen (Wind) abhängt. Gegebenenfalls sollte über eine geeignete einfache Abluftsteuerung bedarfsgerecht die Feuchteabfuhr erfolgen.

Eine gute Außendämmung führt nicht nur über einen verminderten Transmissionswärmeverlust zu Energieeinsparung, auch die zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung erforderliche Lüftung und die dadurch bedingten Energieverluste werden deutlich reduziert. Hinzu kommen eine geringere Schimmelpilzgefährdung durch Wärmebrücken und der nicht zu unterschätzende Vorteil einer wesentlich unproblematischeren Lüftung.

1.5 Neue Belüftungstechnik

Zur Reduzierung von unnötig hohen Wärmeverlusten durch einen unkontrollierten Luftaustausch in Gebäuden durch Leckagen sowie zur Vermeidung von Bauschäden durch ausfallendes Tauwasser in der Baukonstruktion werden Gebäude zunehmend luftdicht gebaut. Eine bedarfsgerechte Lüftung reduziert durch einen angepassten Luftaustausch die Gefahr einer Schimmelpilzbildung, ohne dass unnötig hohe Lüftungswärmeverluste verursacht werden. „Unter bedarfsgerechter Lüftung ist eine optimierte Betriebsweise zu verstehen, bei der der Luftvolumenstrom … an den Bedarf angepasst wird.“ (gekürztes Zitat aus [6]). Dabei ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Nutzung verbunden mit unterschiedlichen Feuchtelasten für jedes Zimmer andere Lüftungserfordernisse [7].

Gerade im Altbaubereich ist nach erfolgter energetischer Sanierung (Einbau dichter Fenster) aufgrund beibehaltener Lüftungsgewohnheiten (siehe z.B. Bild 11) häufig Schimmelpilzbildung zu beobachten. Schimmelpilzbefall an Innenoberflächen von Außenbauteilen kann die Gesundheit der Bewohner gefährden.

Bild 11 Eine ausreichende Lüftung kann hier nur über undichte Fensterfugen oder eine zusätzliche Lüftungseinrichtung erfolgen (Bild von Prof. K. Gertis zur Verfügung gestellt).

Eine bedarfsgerechte Lüftung, die der Schimmelpilzvermeidung dienen soll, muss also dafür sorgen, dass diese Oberflächenrandbedingungen zumindest nicht längerfristig auftreten. Aus energetischer Sicht ist eine erzwungene permanente Lüftung keine Lösung. Diese muss in Abhängigkeit von den vor allem auch durch instationäre Befeuchtungsvorgänge (Kochen, Duschen etc.) sich an der Oberfläche einstellenden Randbedingungen erfolgen. Eine andauernde messtechnische Bestimmung der Oberflächenfeuchten und –temperaturen ist aber von der Sensorik und dem Aufwand her kaum vertretbar. Derzeit eingesetzte Lüftungsanlagen werden deshalb meist nur über die Luftqualität (CO_2-Konzentration) gesteuert, die Feuchtelast und das Schimmelpilzrisiko bleiben dagegen unberücksichtigt.

Die Idee der hier beschriebenen Entwicklung besteht nun darin, dass an ausgewählten Stellen der Außenwand eine künstliche Wärmebrücke eingesetzt wird [8]. Diese „Wärmebrücke“ lässt sich mit am IBP entwickelten neuartigen Programmen (WUFI [9, 10], Feuchtetechnisches Raummodell [2], Biohygrothermisches Verfahren zur Beurteilung des Schimmelpilzwachstumsrisikos [1, 11]) thermisch so auslegen, dass dort Tauwasser ausfällt, wenn an der Außenwandinnenoberfläche von Problembereichen (z.B. in den Ecken) die Oberflächenfeuchte gerade einen Wert erreicht hat, ab dem Schimmelpilzwachstum zu erwarten ist. In Bild 12ist der einfache Aufbau einer derartigen künstlichen „Wärmebrücke“ skizziert.

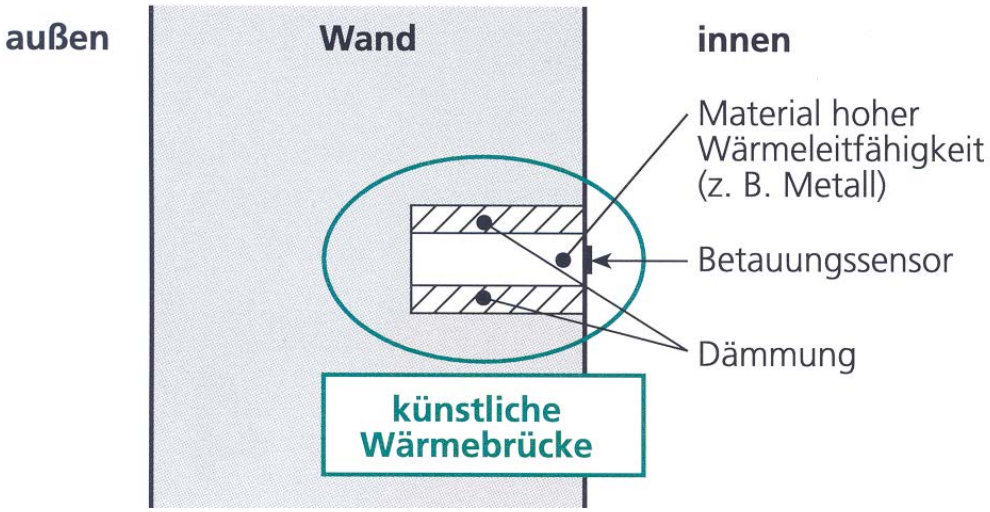


Bild 12 Schematischer Aufbau einer künstlichen „Wärmebrücke“ mit Betauungssensor.

Befinden sich nun an der Innenoberfläche dieser künstlichen „Wärmebrücke“ einfache, schaltende Betauungssensoren (Aufbau z.B. wie in Bild 13 aber auch einfache resistive Sensoren oder ähnliches), so können damit, solange Betauung vorliegt, Lüftungsanlagen in Gang gesetzt werden. Sobald keine Betauung mehr gegeben ist, wird diese bedarfsgerecht wieder automatisch abgeschaltet.

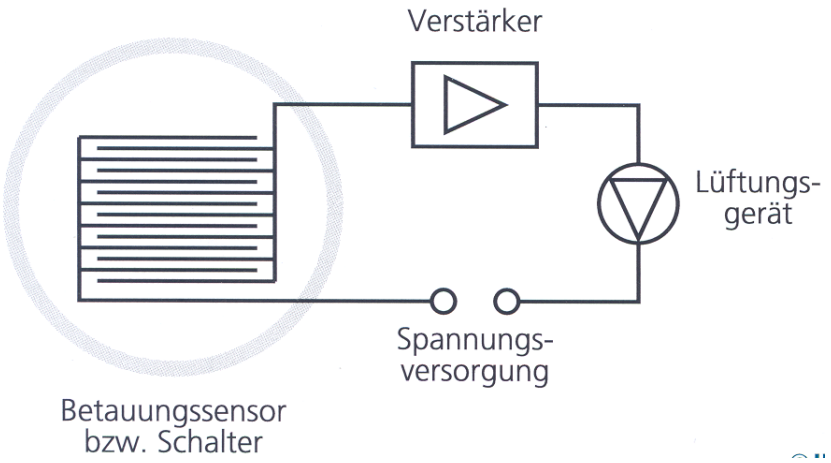


Bild 13 Schematischer Aufbau einer Betauungssensors zur Lüftungssteuerung.

Der Vorteil liegt darin, dass sich bei Verwendung dieses Taupunktschalters die Lüftung, bauphysikalisch richtig, nur dann einschaltet, wenn die Außenlufttemperatur unterhalb der Innentemperatur liegt. Die Lüftung läuft damit nur dann, wenn die Innenraumluftfeuchte hoch ist und die Wandinnentemperaturen soweit unterhalb der Raumlufttemperaturen liegt, dass eine zu hohe Innenober-

flächenfeuchte auftritt. Eine unnötige oder zum Teil auch falsche Lüftung wird damit nahezu unmöglich. Ein besonderer Vorteil der Anwendung eines derartigen Taupunktschalters liegt darin, dass er völlig ohne irgendeine Messmimik auskommt. Das macht ihn preisgünstig und praktisch wartungsfrei; regelmäßige Kalibriermaßnahmen entfallen vollkommen.

2 Aufsteigenden Feuchtigkeit

Bei alten Gebäuden sind häufig Schäden an den Grundmauern zu beobachten. Diese sind durch Verfärbung und Fleckenbildung an den Oberflächen sichtbar; häufig treten noch zusätzlich Salzausblühungen auf. In vielen Fällen wird dabei aufsteigende Feuchtigkeit als Schadensursache diagnostiziert. Aus diesem Grund sind im Laufe der Zeit verschiedene Methoden zur Reduzierung der Feuchtigkeitsaufnahme aus dem Untergrund entwickelt und mit mehr oder weniger großen Erfolg in der Praxis eingesetzt worden. Über das Phänomen der aufsteigenden Feuchte und über die Wirksamkeit von diesbezüglichen Sanierungsmaßnahmen ist in letzter Zeit eine rege Diskussion entstanden. Künzel spricht davon, dass ein erhöhter Salzgehalt oft als aufsteigende Feuchtigkeit interpretiert wird [12]. Durch zweidimensionale rechnerische Untersuchungen mit einem instationären Wärme- und Feuchteberechnungsprogramm sollen beispielhafte Aussagen über das Phänomen der aufsteigenden Feuchtigkeit und geeignete Sanierungsmaßnahmen getroffen werden.

2.1 Feuchtetransport im Mauerwerk

Bei homogenen Stoffen nimmt bei Kontakt mit flüssigem Wasser die Wasseraufnahme proportional zur Quadratwurzel der Zeit zu und wird durch den materialspezifischen Wasseraufnahmekoeffizient w bzw. die Kapillartransportkoeffizienten D_w beschrieben. Bei einem aus verschiedenen kapillaraktiven Materialien zusammengesetzten Mauerwerk erfolgt die Wasseraufnahme hingegen nur für die unterste Materialschicht entsprechend dem w-Wert. Die Wasseraufnahme des gesamten Mauerwerkes hängt dann vor allem vom Verhältnis der Saugspannungen der aneinandergrenzenden Materialien und von der Güte des Kontaktes ab [13]. Die Güte des Kontaktes wird bei Berechnungen durch einen „Übergangswiderstand“ berücksichtigt. Die Bestätigung für die Einführung eines solchen Übergangswiderstandes liefern zahlreiche Beobachtungen in der Praxis und im Labor [14, 15].

2.2 Rechnerische Untersuchung

Mit Hilfe von WUFI wird das hygrothermische Verhalten von verschiedenen im Grundwasser stehenden 2 m hohen Mauerwerkskonstruktionen berechnet. Betrachtet wird eine 60 cm dicke Meter nach Norden orientierte Wand. Somit werden sowohl kurzwellige Strahlungsgewinne, die die Austrocknung beschleunigen könnten, als

auch Schlagregenereignisse, die die sichtbare Feuchtigkeitsgrenze verschieben könnten, nicht berücksichtigt. Eine Beschreibung der untersuchten Varianten zeigt Tabelle 2. Die Wahl des stark saugenden Ziegels (w-Wert > 14 kg/m$^2\sqrt{h}$) soll als Extremfall dienen. In der Praxis sind in der Regel Ziegel mit geringeren w-Werten zu finden. Um die Rechenzeiten zu reduzieren, werden nur die jeweils vier untersten Steinlagen (20 cm hoch) als einzelne Schicht erfasst. Die restliche Höhe wird als ein monolithischer Stein angenähert. Diese Annahme ist auf Grund der maximal zu erwartenden Steighöhe gerechtfertigt. Die für das jeweilige Material benötigten hygrothermischen Kennwerte stammen aus der WUFI-Datenbank. Der auf der Rauminnenseite befindliche Putz wird mit einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke (s_d-Wert) von 0,2 m berücksichtigt.

Tabelle 2 Durchgeführte Variationen

Fall	Beschreibung
1	60 cm Natursandsteinmauerwerk (nur horizontale Fugen)
2	60 cm Natursandsteinmauerwerk (horizontale und vertikale Fugen)
3	60 cm Ziegelmauerwerk
4	8 cm Mineralwolle-WDVS auf 60 cm Natursandsteinmauerwerk
5	5 cm Innendämmung (EPS) auf 60 cm Natursandsteinmauerwerk
6	60 cm Natursandsteinmauerwerk mit Reduzierung der Feuchtigkeitsaufnahme vom Grund (Injektion in der untersten Schicht)
7	Wie Fall 6 nur mit anfänglich hoher Durchfeuchtung im Mauerwerk

Als klimatische Randbedingungen werden Tagesmittel der Außentemperatur und –feuchte eines für Holzkirchen typischen Jahres gewählt. Das Raumklima variiert sinusförmig zwischen 20°C, 40 % relativer Feuchte im Winter und 22°C, 60 % relativer Feuchte im Sommer. Das entspricht einer normalen Feuchtelast. Die Anfangsfeuchte der verwendeten Materialien entspricht der Ausgleichsfeuchte bei 80 % rel. Feuchte. Rechenbeginn ist jeweils der 1. Januar. Betrachtet wird die zeitliche Entwicklung des Gesamtwassergehaltes, der Wassergehalt in verschiedenen Schichten der Konstruktion (Abhängig von der Höhe) und die Verteilungen der relative Feuchte im Mauerwerk.

Bild 14 zeigt die zeitliche Entwicklung des mittleren Gesamtwassergehaltes für die unterschiedlichen Fälle. Im oberen Bild ist sie für ein Natursandsteinmauerwerk und für ein Ziegelmauerwerk dargestellt. In beiden Fällen wird nach ca. 1,5 Jahren ein stabiler Zustand erreicht. Der durchschnittliche Wassergehalt im Natursandsteinmauerwerk liegt bei ca. 50 kg/m³, im Ziegelmauerwerk bei ca. 70 kg/m³. Um den Einfluss von vertikalen Fugen auch quantitativ zu erfassen, ist zusätzlich noch der Wassergehalt für das Natursandsteinmauerwerk mit sowohl horizontalen als auch vertikalen Fugen angegeben. Aus Symetriegründen wird dabei eine 2,0 cm dicke, durch das ganze Bauteil mittig verlaufende Mörtelfuge gewählt. Es wird ein um ca. 5 % höhere

Gesamtwassergehalt erreicht. Für die folgenden Betrachtungen wird nur von horizontalen Fugenverläufen ausgegangen. Der Einfluss von verschiedenen Dämmaßnahmen ist beispielhaft für das Natursandsteinmauerwerk in Bild 14 unten aufgezeichnet. Dabei wird auf das im Standardfall (durchgezogene Linie) betrachtete 60 cm dicke Mauerwerk zusätzlich eine 5 cm dicke EPS Innendämmung oder ein 8 cm dickes Mineralwolle Wärmedämmverbundsystem zur Erhöhung der Dämmung aufgebracht. Während der Verlauf des Gesamtwassergehalts durch das WDV-System nur geringfügig verändert wird, erhöht sich dieser aber beim Aufbringen der Innendämmung kontinuierlich. Selbst nach 2 Jahren ist noch kein stabiler Gleichgewichtszustand erreicht.
Als weitere Variante wird beim Standardfall die Wasseraufnahmefähigkeit in der unterste Steinlage reduziert. Durch Herabsetzen der Transportkoeffizienten um den Faktor 100, soll eine Bohrlochinjektion simuliert werden. Diese Reduzierung der Feuchtigkeitsaufnahme führt erwartungsgemäß zu einem deutlich niedrigeren Gesamtwassergehalt (ca. 30 kg/m³).

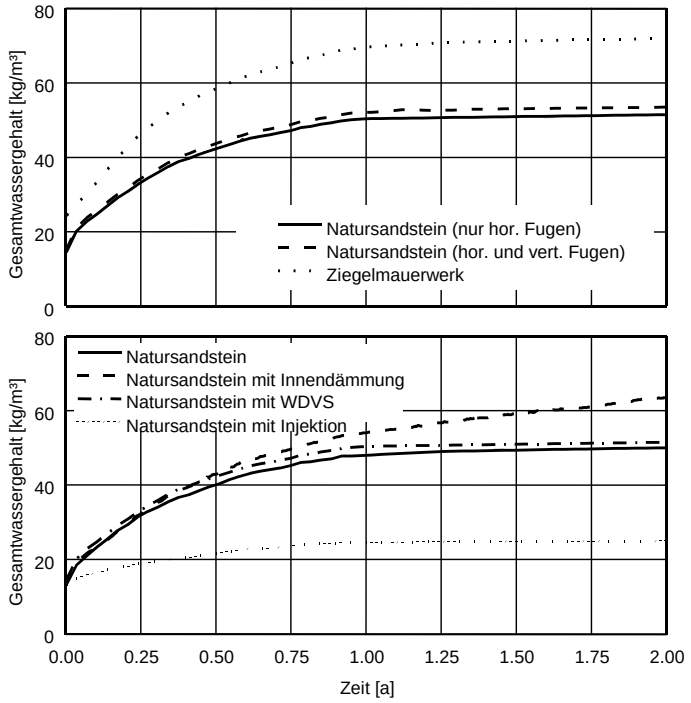


Bild 14 Zeitliche Entwicklung des flächenbezogenen Wassergehaltes für die verschiedenen durchgeführten Variationen.

Die Verteilung der relativen Feuchte im Inneren der Konstruktion nach dem 1. Jahr zeigt Bild 15für diese beiden Varianten (links für das Ziegel-, rechts für das Natursandsteinmauerwerk). Deutlich sichtbar ist die unterschiedliche Steighöhe. Beim Natursandstein beträgt die relative Feuchte an der Wandinnenoberfläche ab einer Höhe von ca. 80 cm weniger als 80 %. Die etwas höhere Steighöhe beim Ziegelmauerwerk ist durch die größere kapillare Wasseraufnahme aus dem Untergrund und durch das

günstiger Saugspannungsverhältnis zwischen Mörtel und Stein bedingt. Es ergeben sich für aufsteigende Feuchtigkeit typische Wassergehaltsverteilungen mit einem Maximum in der Mitte der Wand.

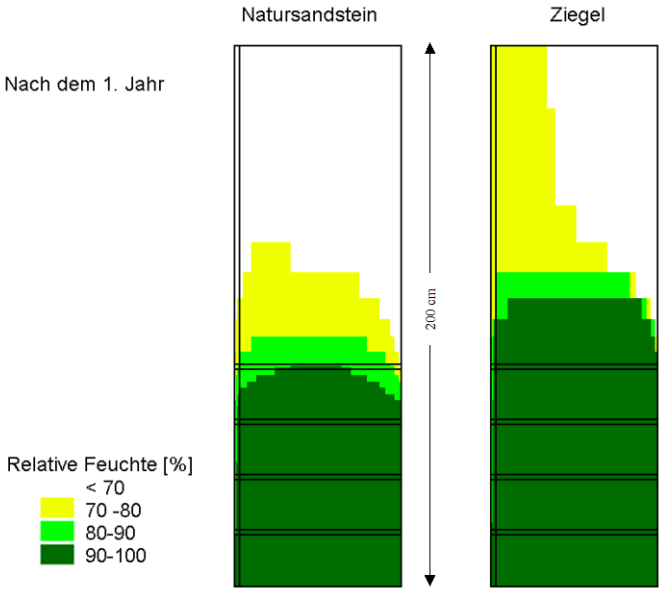


Bild 15 Verteilung der relativen Feuchte im Mauerwerk nach dem 1. Jahr für die Fälle 1 und 3.

Der Einfluss einer zusätzlichen Dämmung auf ein Natursandsteinmauerwerk zeigt das nächste Bild (Bild 16). Hier ist jeweils die Verteilung der relativen Feuchte im Bauteilinneren nach dem ersten und dem zweiten Jahr sowohl für eine raumseitig aufgebrachte 5 cm dicke Polystyrol-Hartschaumplatten, als auch für ein 8 cm dickes Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolledämmplatten dargestellt. Für den Fall mit WDVS bleibt die sichtbare Steighöhe nahezu konstant. Die Verdunstungsfähigkeit über die Oberflächen wird durch die diffusionsoffene Mineralwolle nicht vermindert. Es hat sich ein Gleichgewicht zwischen der kapillar aufsteigenden und der über die Wandoberflächen ausdiffundierenden Feuchte eingestellt. Dieses Gleichgewicht wird durch die Innendämmung gestört. Die verminderte Austrocknung über die Rauminnenseite auf Grund des relativ diffusionsdichten Dämmaterials führt zu einer deutlich höheren Steighöhe.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich das Phänomen der aufsteigenden Feuchte mit Hilfe des zweidimensionalen Feuchtetransportprogramm WUFI in Übereinstimmung mit Praxisbeobachtungen berechnen lässt. Für die Berechnungen sind aber einige idealisierte Annahmen getroffen worden, die das Auftreten von aufsteigender Feuchte begünstigen. Trotz dieser in der Praxis sicher nicht vorhandenen Randbedingungen ergeben sich nur Steighöhen von ca. einem Meter. Dies deckt sich mit zahlreichen Beobachtungen aus der Praxis. Durch die unterschiedlichen Saugspannungen und Übergangswiderstände sind extremere Steighöhen unter realen Bedingungen nicht zu erwarten. In alten oder historischen Gebäuden sind die Über-

gangswiderstände durch die in der Regel lückenhaften Mörtelverbände sogar noch größer als die hier angenommenen, sodass man zum Teil sogar von kapillarbrechenden Schichten sprechen kann.

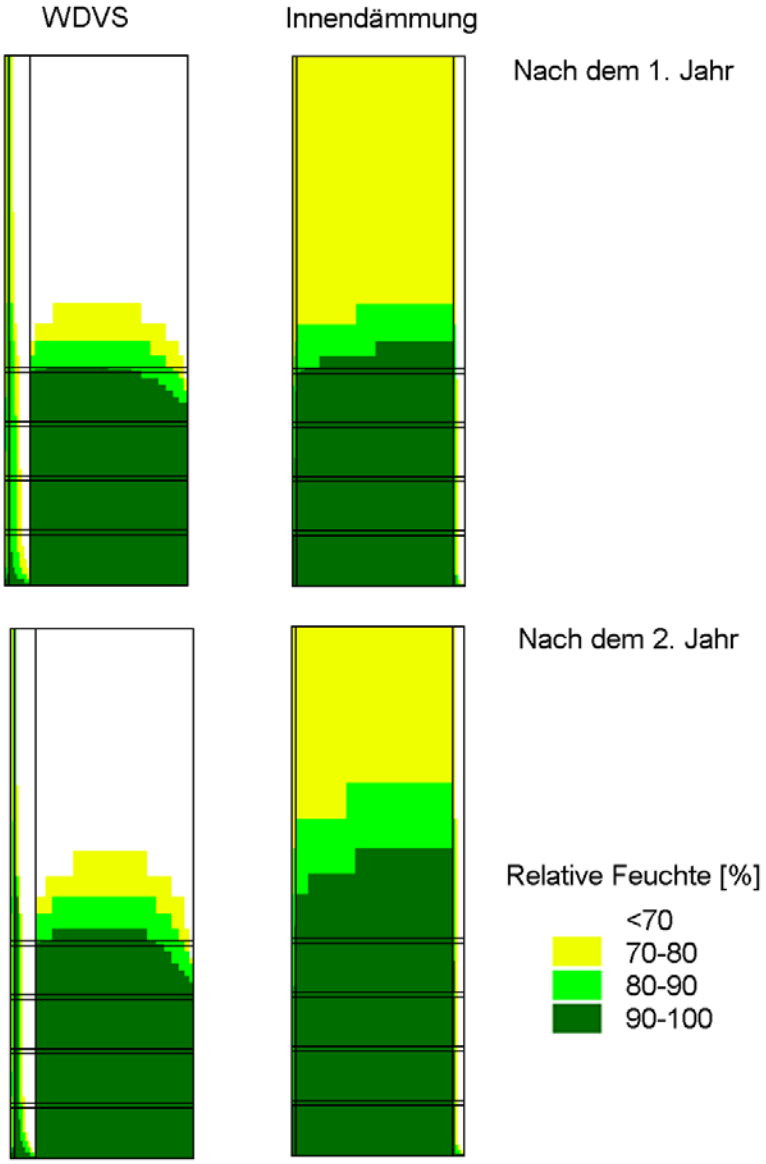


Bild 16 Verteilung der relativen Feuchte im gedämmten Mauerwerk nach dem ersten (oben)und nach dem zweiten Jahr (unten).
Links: Außendämmung mit 8 cm Mineralwolle-WDVS
Rechts: Innendämmung mit 5 cm EPS.

Wird in der Praxis in höheren Lagen ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt festgestellt, kann es sich unseres Erachtens meist nicht um reine aufsteigende Feuchte handeln. Die wirklichen Ursachen sollten deshalb durch ergänzende Untersuchungen geklärt werden. Oft liegt ein hoher Anteil von hygroskopischen Salzen oder mangelnder äußerer Regenschutz vor.

Eine Abhilfe zur Reduzierung bzw. Beseitigung der erhöhten Mauerfeuchtigkeit aufgrund aufsteigender Feuchte ist die Reduzierung bzw. Unterbindung der Feuchtigkeitsaufnahme vom Untergrund. Dazu werden verschiede Methoden eingesetzt. Eine Übersicht über einige heute gängige Verfahren und deren Vor- und Nachteile ist in [16] gegeben. Diese Maßnahmen sind in der Regel aufwendig und teuer. Mit Hilfe von modernen Rechenverfahren können solche Maßnahmen, wie gezeigt, auf dessen Praxistauglichkeit ohne oft zeitaufwändige zum Teil messtechnisch problematische und kostspielige Experimente untersucht werden. Sie können somit einen wertvollen Beitrag zur Abschätzung, Bewertung, Optimierung und Planung von Sanierungsmaßnahmen leisten.

3 Einfluss von Hydrophobierungsmaßnahmen

Schäden an gemauerten Fassaden lassen sich häufig auf örtlich vorhandene kritische Feuchtezustände zurückführen. Für fast alle Zerstörungsprozesse, seien sie physikalischer, chemischer oder biologischer Art, ist die Anwesenheit von Wasser eine Grundvoraussetzung. Massive Außenwände alter Gebäude sind aber häufig nicht oder nur unzureichend schlagregengeschützt, so dass vor allem auf der Wetterseite mit erhöhter Mauerwerksfeuchte zu rechnen ist. Zum einen birgt eine hohe Mauerwerksfeuchte die Gefahr von Frostschäden im Bereich der Fassade. Andererseits führt ein hoher Wassergehalt zu einer Reduktion des meist ohnehin geringen Wärmedurchlasswiderstandes solcher Wände, wobei in manchen Fällen der aus hygienischen Gründen erforderliche Mindestwärmeschutz unterschritten wird.

Wenn dann zur Verbesserung des Wohnkomforts und der Energieeinsparung eine Innendämmung aufgebracht wird, ist mit einer weiteren Erhöhung der Gefahr von Frostschäden zu rechnen, da sich die Trocknungsmöglichkeit der massiven Außenwand verschlechtert und ihr Temperaturniveau herabgesetzt wird. Ein verbesserter Feuchte- und Wärmeschutz solcher Wände setzt daher einen adäquaten Regenschutz voraus. Dies kann bei Sichtmauerwerk beispielsweise in Form einer Fassadenhydrophobierung geschehen. Bei fachgerechter Applikation wird dadurch der Eintrag von Regenwasser weitgehend verhindert. Gleichzeitig wird aber auch die Austrocknung aufgrund der fehlenden Kapillarleitung und der Erhöhung des Diffusionswiderstandes im Bereich der Imprägnierung beeinflusst. Eine Hydrophobierungsmaßnahme kann deshalb bei mangelhafter Ausführung selbst zu einem Schadensrisiko werden.

Deshalb werden einige grundsätzliche Betrachtungen angestellt, um Hinweise für die Sanierungspraxis abzuleiten. Da nicht alle Fragestellungen durch Freilandversuche beantwortet werden können, sind rechnerische Untersuchungen notwendig. Als Außenklimarandbedingungen werden dabei in der Freilandversuchsstelle Holzkirchen

gemessene Wetterdaten verwendet, um einen Vergleich mit den ebenfalls durchgeführten messtechnischen Untersuchungen zu gewährleisten.

Die Oberflächenhydrophobierung von Fassaden führt zu einer Verringerung der Austrocknungsgeschwindigkeit, da in der hydrophobierten Zone die Kapillarleitung weitgehend unterbunden ist. Zusätzlich ist in dieser Zone auch der Dampfdiffusionwiderstand durch den Einfluss des Hydrophobierungsmittels etwas erhöht. Im Folgenden soll deshalb betrachtet werden unter welchen Umständen kritische Wassergehalte im Mauerwerk zu befürchten sind.

3.1 Feuchtestau hinter dem hydrophobierten Wandbereich

Eine häufige Frage, die bezüglich Hydrophobierungen gestellt wird, ist, inwieweit nach einer solchen Behandlung die durch die Innenraumnutzung in das Gebäude eingebrachte Feuchte zu einer Feuchteakkumulation hinter der hydrophobierten Zone führt. Das vorliegende Beispiel beschreibt einen Extremfall: Die Außenseite einer Ziegelwand mit einer Dicke von lediglich 30 cm wird hydrophobiert, nachdem sich durch langjährige Bewitterung ein eingeschwungener Zustand mit hoher Wandfeuchte eingestellt hat. Auf der Innenseite wird durch die Nutzung ein extremes Innenklima erzeugt, das (bei sinusförmigem Jahresverlauf) im Sommer zu einer rel. Luftfeuchte von 80 % bei 23 °C Innentemperatur und im Winter zu 60 % bei 20 °C führt. Bei der Rechnung wurde davon ausgegangen, dass bis zu einer Tiefe von 2 cm hydrophobiert wurde und der Diffusionswiderstand der behandelten Zone im Vergleich zum Originalgestein um nicht mehr als 50 % erhöht wird. Die Materialkennwerte für die Rechnung stammen aus der WUFI-Datenbank. Für den hydrophobierten Mauerbereich wurden die Kapillartransportkoeffizienten auf Null gesetzt und der Diffusionswiderstand um 50 % erhöht.

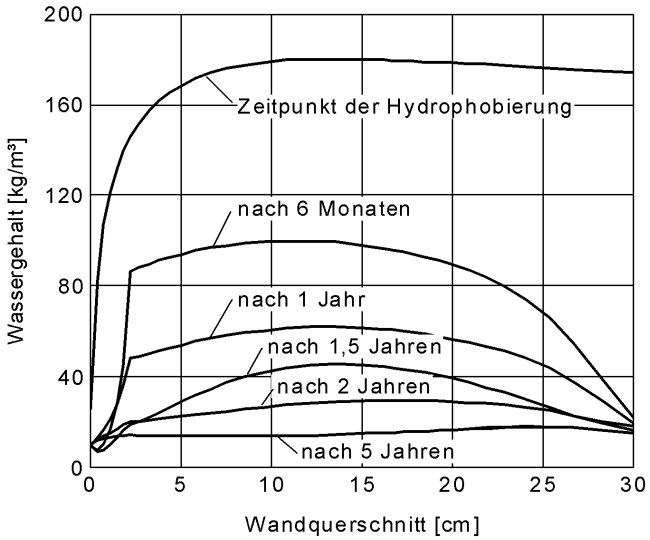


Bild 17 Wassergehaltsverteilungen zu verschiedenen Zeitpunkten nach einer Hydrophobierungsmaßnahme. Zum Zeitpunkt der Hydrophobierung lag

in der 30 cm dicken Ziegelwand die oben eingezeichnete Wassergehaltsverteilung (eingeschwungener Zustand nach mehrjähriger Bewitterung) vor.

Aus den in Bild 17 dargestellten Ergebnissen wird erkennbar, dass die Wand trotz der extremen raumseitigen Feuchtebelastung, bei der es in den Wintermonaten auch zu Tauwasserbildung auf der Innenoberfläche kommt, nach der Hydrophobierungsmaßnahme über die Jahre hinweg langsam austrocknet. Dies bedeutet, dass der nutzungsbedingte Feuchtestrom von der Raumseite her keinen Hinderungsgrund für eine Hydrophobierungsmaßnahme darstellt, vorausgesetzt, die Behandlung führt nicht zu einer außergewöhnlich starken Erhöhung des Diffusionswiderstandes.

3.2 Fehlstelle in einem hydrophobierten homogenen Mauerwerk

Im Gegensatz zu den im vorigen Kapitel dargestellten Untersuchungen lässt sich der Einfluss einer Fehlstelle rechnerisch nur mit Hilfe eines zweidimensionalen Programms zur Berechnung des instationären Wärme- und Feuchtetransports (WUFI-2D) untersuchen [17]. Zugrunde gelegt wird hierfür ein Wandausschnitt aus homogenem Ziegelmauerwerk mit einer Gesamtdicke von 42 cm und einer Höhe von 50 cm. Die Wand ist nach Westen orientiert, um vor allem die Schlagregeneinflüsse zu erfassen. Die für das jeweilige Material benötigten Kennwerte stammen ebenfalls aus der WUFI-Datenbank. Auch bei diesem Wandaufbau sind die ersten 2 cm der Wand hydrophobiert. In der Oberflächenmitte befindet sich eine horizontale Fehlstelle mit einer Dicke von 1 cm. Da zweidimensionale Rechnungen einen erheblich höheren Rechenaufwand bedeuten, wurde der Einfachheit halber als Startbedingung von einer lufttrockenen Wand ausgegangen mit einer Ausgleichsfeuchte entsprechend 80 % relativer Feuchte.

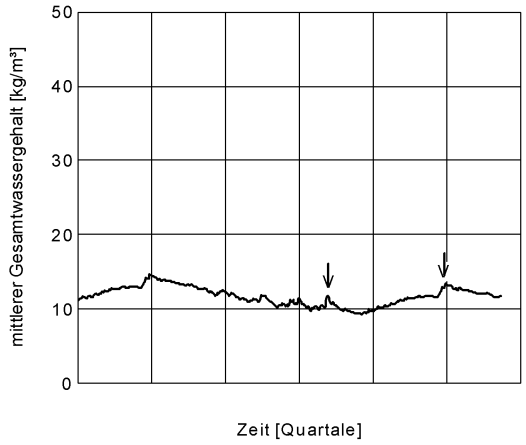


Bild 18 Zeitlicher Verlauf des mittleren Gesamtwassergehaltes des berechneten Wandausschnittes. Die Pfeile markieren die Zeitpunkte für die 2D-Darstellungen in Bild 19.

Bild 19 zeigt, dass die Wand über die berechneten zwei Jahre nur geringfügige Feuchtegehaltsänderungen aufweist. Betrachtet man dagegen die örtliche Wassergehaltsverteilung zu zwei bestimmten Zeitpunkten nach einem Regenereignis im Sommer (Bild 19 links) und bei Frost im Winter (Bild 19 rechts) erkennt man, dass die zeitweise geringfügige Wassergehaltserhöhung im Bild 18 auf einer örtlich bedeutenden Feuchteerhöhung im Bereich der Fehlstelle beruhen. Gerade im Winter sind hohe Wassergehalte nahe der Außenoberfläche kritisch.

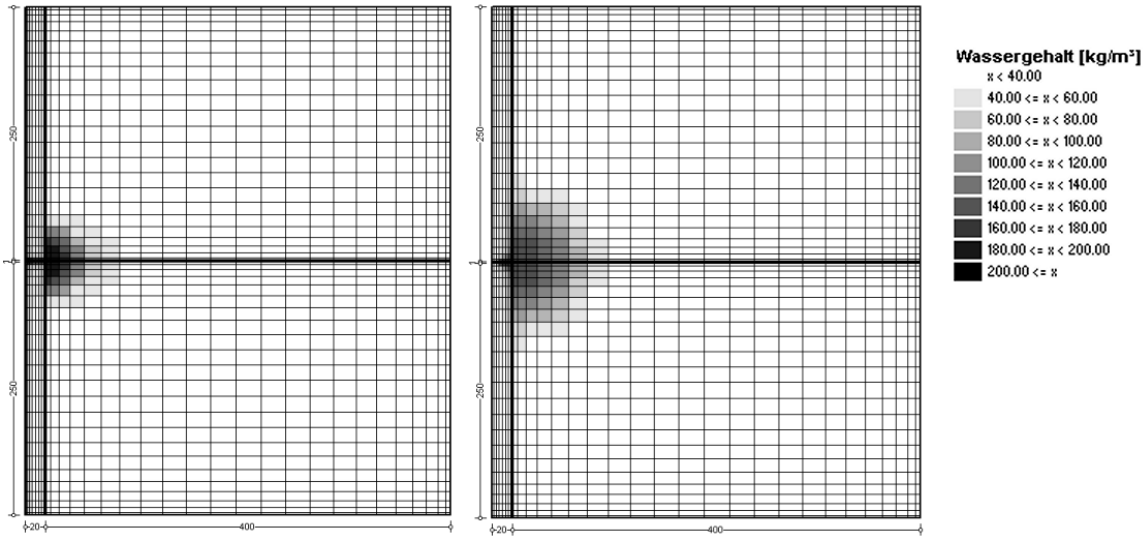


Bild 19 Darstellung der Feuchteverteilungen im berechneten Wandausschnitt zu den im Bild 18 gekennzeichneten Zeitpunkten im Sommer (links) und Winter (rechts).

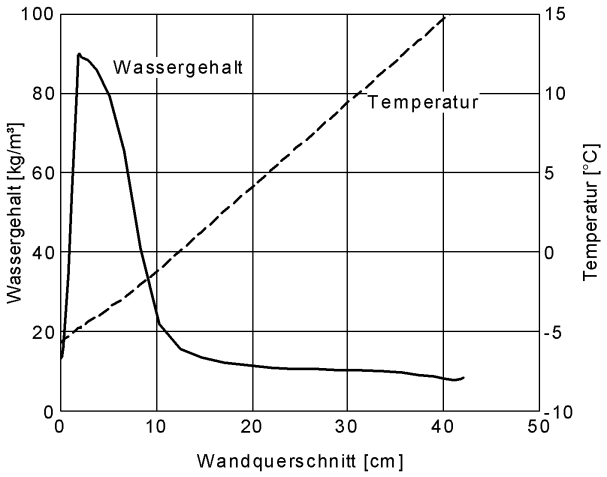


Bild 20 Wassergehaltsprofil (durchzogene Linie) und Temperaturprofil (gestrichelte Linie) für einen horizontalen Schnitt knapp oberhalb der Fehlstelle zu dem in Bild 19 rechts dargestellten Zeitpunkt.

Bild 20 zeigt das zu Bild 19 rechts gehörende Wassergehalts- und Temperaturprofil knapp oberhalb der Fehlstelle. Man erkennt, dass gerade in den Bereichen, in denen Frosttemperaturen, auftreten, die höchsten Wassergehalte vorliegen. Sie liegen zwar in diesem Rechenbeispiel nur bei etwa der halben Wassersättigung, was in der Regel noch keine Frostschäden bedeuten würde. Wenn man jedoch berücksichtigt, dass die Feuchtebeanspruchung des Fehlstellenbereichs nicht nur aus dem direkt auftreffenden Schlagregen besteht, sondern eventuell noch von den darüber liegenden hydrophobierten Fassadenbereichen Ablaufwasser dazu kommt, dann können auch in diesem Fall kritische Feuchtezustände erreicht werden.

3.3 Fehlstelle durch Abrisse im Bereich der Mörtelfuge

Im Allgemeinen wird bei einer oberflächlich hydrophobierten Ziegelwand eine Fehlstelle vor allem im Mörtelbereich durch Flankenabriss auftreten. Um einen Extremfall darzustellen wurde ein stark saugender Vollziegel, der ohne Hydrophobierung nicht für Sichtmauerwerk geeignet ist, und ein Mörtel mit ebenfalls hohem w-Wert verwendet. Der Fugenmörtel mit einer Dicke von 1 cm liegt horizontal in der Mitte des Wandausschnittes (siehe Bild 22). Diese Materialkennwerte über die Fehlstelle (siehe Bild 21) führen zu einer sehr starken Wasseraufnahme, die über die berechnete zweijährige Bewitterungsdauer hinaus zu einer weiteren Feuchteaufnahme führen dürfte. Entsprechend ergeben sich auch in der zweidimensionalen Darstellung über große Bereiche hohe Wassergehalte, wobei in Bild 22 die Farbpalette bis auf 200 kg / m^2 ausgedehnt wurde. Bild 23 zeigt nahe der Fehlstelle im Ziegel fast wassergesättigte Bereiche bei Temperaturen deutlich unter Null Grad, so dass hier mit Frostschäden zu rechnen ist.

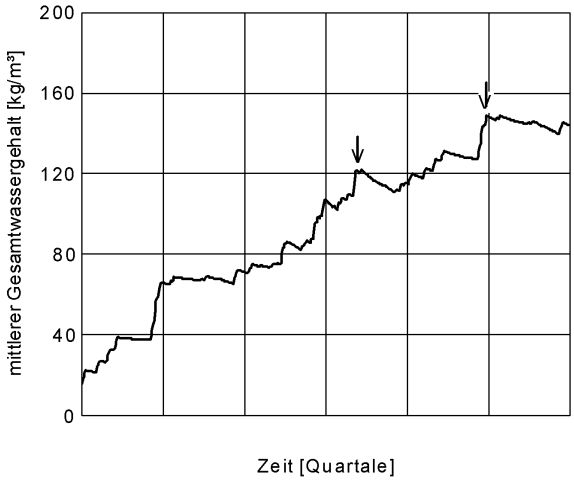


Bild 21 Zeitlicher Verlauf des mittleren Gesamtwassergehaltes des berechneten Wandausschnittes. Die Pfeile markieren die Zeitpunkte für die 2D-Darstellungen in Bild 22.

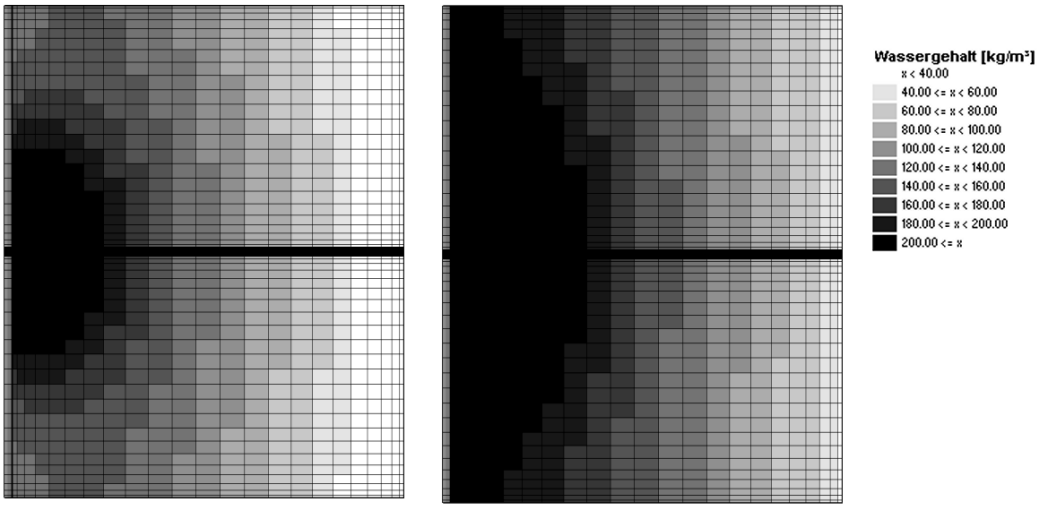


Bild 22 Darstellung der Feuchteverteilungen im berechneten Wandausschnitt zu den im Bild 21 gekennzeichneten Zeitpunkten im Sommer (links) und Winter (rechts).

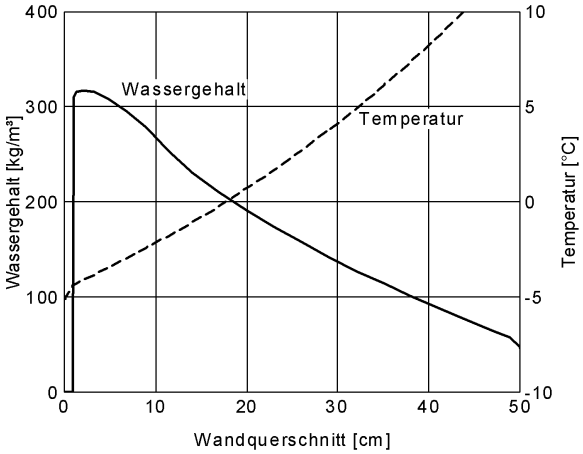


Bild 23 Wassergehaltsprofil (durchzogene Linie) und Temperaturprofil (gestrichelte Linie) für einen horizontalen Schnitt knapp oberhalb der Fehlstelle zu dem in Bild 22 rechts dargestellten Zeitpunkt.

3.4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Eine Innendämmung von schlagregenbelasteten einschaligen Wänden sollte nur bei ausreichendem Regenschutz der Fassade durchgeführt werden. Andernfalls kann die damit einhergehende Verschlechterung der Austrocknungsbedingungen des Mauerwerks zu einer langfristigen Feuchteerhöhung und damit verbundenen Folgeschäden führen. Bei Sichtmauerwerk bietet sich als Regenschutzmaßnahme eine Imprägnierung mit Hydrophobierungsmitteln an. Eine Innendämmung der Wand führt dann langfristig nicht zu einer erhöhten Mauerwerksfeuchte, wie es bei unbehandelten Fas-

saden der Fall sein kann. Sie reduziert jedoch die Austrocknungsgeschwindigkeit der bereits vor der Hydrophobierung vorhandenen Regenfeuchte, so dass es vorteilhaft sein kann, die Dämmmaßnahme erst einige Zeit nach der Fassadenimprägnierung vorzusehen.

Mit der im Freilandversuch eingesetzten Siloxanimprägnierung scheint ein dauerhafter Regenschutz auch bei kleineren Flankenabrissen zwischen Stein und Mörtelfugen erzielbar. Letzteres wird von Fachleuten jedoch in Frage gestellt, die bei rissigem Mauerwerk trotz Hydrophobierung lokale Schlagregenpenetrationen feststellen mussten [18]. Es ist daher unklar, ob die hier gezeigte erfolgreiche Rissehydrophobierung auf die Praxis übertragbar ist. Eine sorgfältige Ausführung der Hydrophobierungsmaßnahme umfasst also in der Regel mehrere Applikationsschritte, was bei alten Fassaden auch eine zusätzliche Reinigung sowie eine Neuverfugung oder spezielle Rissbehandlungen beinhalten kann. In jedem Fall sollte eine möglichst tief gehende Hydrophobierung angestrebt werden, um einerseits das Risiko von Fehlstellen zu minimieren. Andererseits erhält man mit zunehmender Eindringtiefe weichere Übergänge zwischen hydrophobem Bereich und der Originalsubstanz. Dadurch werden hygrothermische Spannungsspitzen vermindert, die aufgrund des unterschiedlichen Ausdehnungsverhaltens von hydrophobiertem und unbehandeltem Steinmaterial entstehen [19]. Im Extremfall können solche hygrothermischen Spannungen vor allem bei vorgeschädigtem Mauerwerk langfristig zum Abplatzen der hydrophobierten Zone führen.

Fehlstellen in der Fassadenhydrophobierung sind grundsätzlich Problemzonen. Zusätzlich zu den hier mit Berechnungen und Messungen belegten Beispielen wird auch in [20] darauf hingewiesen, dass tiefer gehende Abrisse oder nicht ausreichend hydrophobierte Bereiche zu einer Erhöhung des Frostschadensrisikos führen können, was auf lokale Nester hoher Feuchte zurückzuführen ist. Wie die vorliegenden Untersuchungen zeigen, haben Fehlstellen, durch die das Regenwasser kapillar hinter die hydrophobierte Zone transportiert wird, eine ihrem Flächenanteil überproportionale Feuchtezunahme des Mauerwerks zur Folge. Durch die Hydrophobierung der Oberfläche werden die Austrocknungsbedingungen zwar geringfügig verschlechtert, der Grund für diese Feuchtezunahme ist jedoch eher darin zu sehen, dass das Regenwasser von der hydrophobierten Fassade nicht aufgenommen wird und nicht hydrophobierte Zonen durch das ablaufende Wasser einer höheren Feuchtebelastung ausgesetzt sind, als es bei einer unbehandelten Fassade der Fall ist. Aus diesem Grunde sollten zusammenhängende Fassadenflächen in ihrer Gesamtheit behandelt werden. Ein ähnlicher Effekt tritt besonders auch bei Fachwerkwänden auf, wo wasserabweisende Ausfachungen nicht zu einer geringeren Feuchteaufnahme der Wand führen, da das ablaufende Wasser durch die Schwindfugen zwischen Holz und Ausfachung aufgenommen wird [21].

Unbedingt erforderlich für die Entscheidung zu einer Hydrophobierungsmaßnahme ist die Kenntnis der wesentlichen Feuchtequellen. Nur wenn sicher gestellt ist, dass außer über den Schlagregen nur eine geringfügige Mengen an Feuchte von anderen Quellen (aufsteigende Feuchte, Leckagen etc.) herrührt, ist eine solche Maßnahme angezeigt. Bei einer hohen Salzbelastung des Mauerwerks kann eine Imprägnierung zum Abplatzen der Oberfläche führen, da das Salz beim Trocknen hinter der hydrophobierten Zone kristallisiert und dabei entsprechende Sprengkräfte entwickelt.

4 Pilzbewuchs auf Außenfassade durch Baumängel

An den Außenfassaden einer Wohnanlage, die im Sommer bis Herbst fertiggestellt wurden, zeigte sich nach kurzer Zeit ein sichtbarer biologischer Aufwuchs. Wie in [22] beschrieben, war vor allem im Bereich des Fenstersturzes ein flächiger Schimmelpilzbefall zu erkennen (deutliche Verfärbung). Die Fensterstürze sind nicht wie im übrigen Wandbereich mit Polystyrol-Hartschaum sondern aus Gründen des Brandschutzes mit Mineralwolle gedämmt worden. In den Wandflächen in Wandmitte treten vorwiegend kreisförmige Befallsmuster auf. An diesen Stellen wurden Bohrkernproben gezogen. Dabei zeigte sich, dass die Dämmstoffplatten aus Polystyrol-Hartschaum nicht auf Stoß verlegt wurden, sondern dass zwischen ihnen ein Spalt von etwa drei Millimetern vorhanden ist. Dieser Spalt ist durchgängig bis auf den darunterliegenden Beton. Der kreisförmige Pilzbefall befindet sich etwa im Bereich des Stoßkreuzes von vier Dämmstoffplatten. In diesem Fall wird ein Befeuchtungsmechanismus wirksam, der im Zusammenhang mit der Frostschadensgefahr bereits analysiert und dokumentiert wurde („Diffusionsbefeuchtung" [23]). Diese Diffusionsbefeuchtung hängt unmittelbar mit der hohen Wasserdampfdurchlässigkeit der Mineralwolledämmung bzw. mit den Fehlstellen (Luftspalte zwischen den Dämmplatten) zusammen. Da der Feuchtetransport vom Raum nach außen bei feuchtem Mauerwerk bzw. Beton in der kalten Jahreszeit ständig erfolgt, nicht nur zeitweilig wie bei nächtlicher Tauwasserbildung oder infolge Beregnung, ist es verständlich, dass der biologische Aufwuchs relativ frühzeitig in Erscheinung getreten ist.

4.1 Durchführung der Untersuchungen

Um den zur Beurteilung der Schimmelpilzbildung wesentlichen Feuchtehaushalt im Bereich der Fensterstürze sowie des Luftspaltes zwischen den Dämmplatten näher zu untersuchen, werden mit dem Programm WUFI zweidimensionale hygrothermische Berechnungen durchgeführt. Dabei wird von folgendem Wandaufbau (von innen nach außen) ausgegangen:

Wandbildner:	150 mm Beton
Dämmmaterial:	160 mm Polystyrol in Wandmitte bzw.
	160 mm Mineralwolle im Fenstersturz

Putz: 5 mm Kunstharzputz bzw. zum Vergleich 10 mm mineralischer Putz.

Zwischen den Polystyrolplatten wird ein Luftspalt mit 3 mm Dicke angenommen. Der Berechnung werden die Materialkennwerte der WUFI-Datenbank zugrunde gelegt. Es wird von einer normalen raumseitigen Feuchtelast ausgegangen. Als Außenklima dient das in Stundenmittelwerten vorliegende Testreferenzjahr für den Standort [24]. Die berechnete Wand hat eine Ausrichtung nach Norden, da diese aufgrund niedriger Sonneneinstrahlung am langsamsten austrocknet. Es werden, beginnend am 1. Oktober, Berechnungen über einen Zeitraum von einem Jahr durchgeführt. Um die Rechenzeit im sinnvollen Rahmen zu halten, wird mit Tagesmittelwerten gerechnet. Diese sind deshalb geeignet, weil im vorliegenden Fall weder eine Schlagregenbelastung noch direkte solare Einstrahlung von Bedeutung sind. Bei Beton wird von einem Anfangswassergehalt von 15 Vol.-% und bei Putz von 10 Vol.-% ausgegangen.

4.2 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In Bild 24 ist für das erste Jahr der Verlauf der Temperatur (oben) und der relativen Feuchte im Außenputz (Mitte) an der Stelle des Plattenstoßes (gestrichelte Linie) und des Fenstersturzes (gepunktete Linie) im Vergleich zum Putz im ungestörten Bereich, also in Wandmitte (punkt-gestrichelte Linie), dargestellt. Außer im Zeitraum von Mitte November bis Mitte Januar unterscheiden sich die Verläufe in den beiden unterschiedlichen Stellen wesentlich. Während am Putz (Substratgruppe II) die relative Feuchte in Wandmitte ab diesem Zeitpunkt aufgrund der steigenden Außenluft- und damit der Putztemperaturen (Bild oben) sinkt, bleibt sie an der Fehlstelle (Plattenstoß) bis etwa Mitte Juli bei annähernd 90 %. Im Bereich des Fenstersturzes ergeben sich im Vergleich zur Fehlstelle im Putz noch höhere Feuchten [22]. Nimmt man diese Klimadaten als Randbedingungen für Berechnungen mit dem biohygrothermischen Modell, so ist in Bild 24 unten zu erkennen, dass die Wassergehalte in den sich auf dem Putz befindlichen Modellsporen im Zeitraum von Mitte November bis Mitte Januar ebenfalls etwa gleich verlaufen, sich sonst aber in Wandmitte geringere Werte ergeben. Die starken Schwankungen im Verlauf des Grenzwassergehalts liegen an den großen Temperaturänderungen an einer Außenfassade. Die Maxima der Grenzwassergehalte bei Temperaturen etwa 0 °C entsprechen der „freien Wassersättigung“ der Spore und liegen temperaturunabhängig bei etwa 92 Vol.-%.

Der Wassergehalt in den Sporen in Wandmitte liegt, abgesehen von den Anfangswerten der ersten zwei Wochen nach Fertigstellung, stets unter dem Grenzwassergehalt. Das bedeutet, dass in Wandmitte kein Pilzwachstum auftreten sollte, was auch mit den Beobachtungen am Objekt und Erfahrungen aus der Praxis übereinstimmt. Anders bei den Putzen im Bereich des Fenstersturzes und bei den Fehlstellen an den Plattenstößen. Im Bereich des Fenstersturzes wird der Grenzwassergehalt in den ers-

ten sechs Wochen nach Baufertigstellung und ab April überschritten. Wie auch am Objekt beobachtet, ergibt sich bereits im Frühjahr ein großflächiger Pilzbewuchs. Beim Plattenstoß ergeben sich geringere Überschreitungen des Grenzwassergehaltes, was zu einem etwas geringeren Befall führt.

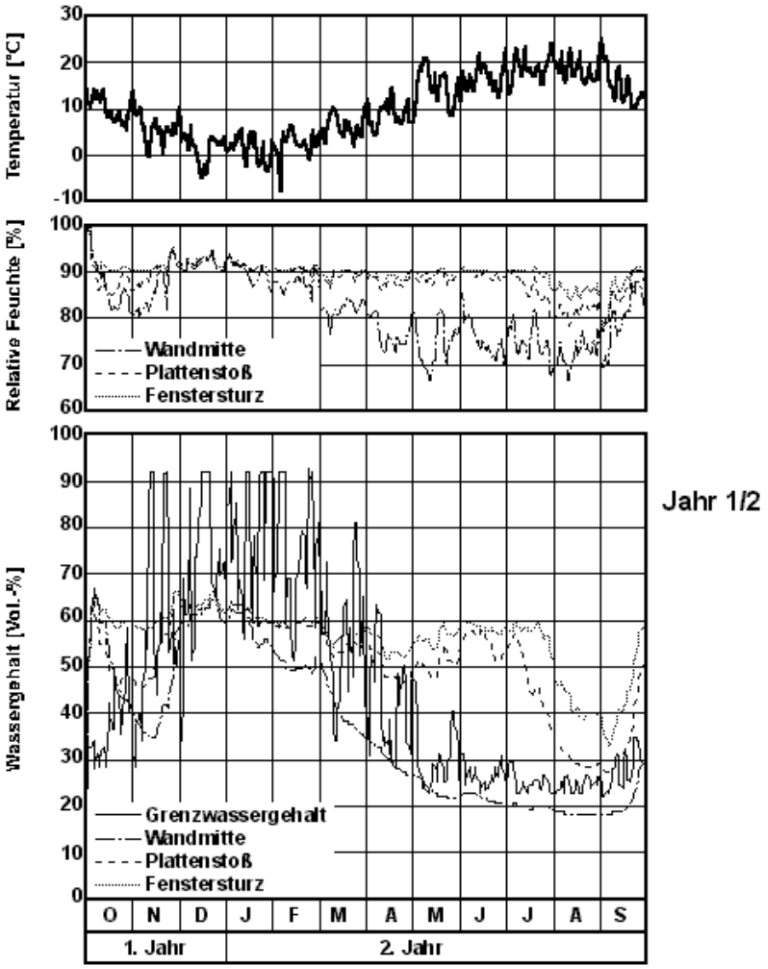


Bild 24 Berechnete Zeitverläufe von Temperatur (oben) und relativer Feuchte (Mitte) sowie des Sporen-Wassergehaltes (unten) an verschiedenen Stellen des Außenputzes einer Außenwand.

Untersuchte Stellen:

Ungestörter Bereich: kein Schimmelpilzbefall
Plattenstoß (WDVS): Schimmelpilzbefall
Fenstersturz: Schimmelpilzbefall.

Im unteren Bild ist der Verlauf des Grenzwassergehalts mit eingezeichnet; er gilt für alle Wandstellen und zeigt, ab wann Sporenkeimung einsetzt.

Um festzustellen, nach welchem Zeitraum die hygrothermischen Verhältnisse an der verputzten Wärmedämmverbundsystem(WDVS)-Fassade keine Pilzbildung mehr zulassen, wird mit dem biohygrothermischen Modell ermittelt, wie sich die Austrock-

nung der Baufeuchte auf die mikrobielle Aktivität auswirkt. Dazu werden die Temperatur- und Feuchteverläufe auf dem Putz in Wandmitte sowie im Bereich des Fenstersturzes und am Plattenstoß mit dem Programm WUFI, beginnend im Oktober (Bauerstellung), über einen Zeitraum von 10 Jahren berechnet. Das Testreferenzjahr wird dabei mehrfach durchlaufen.

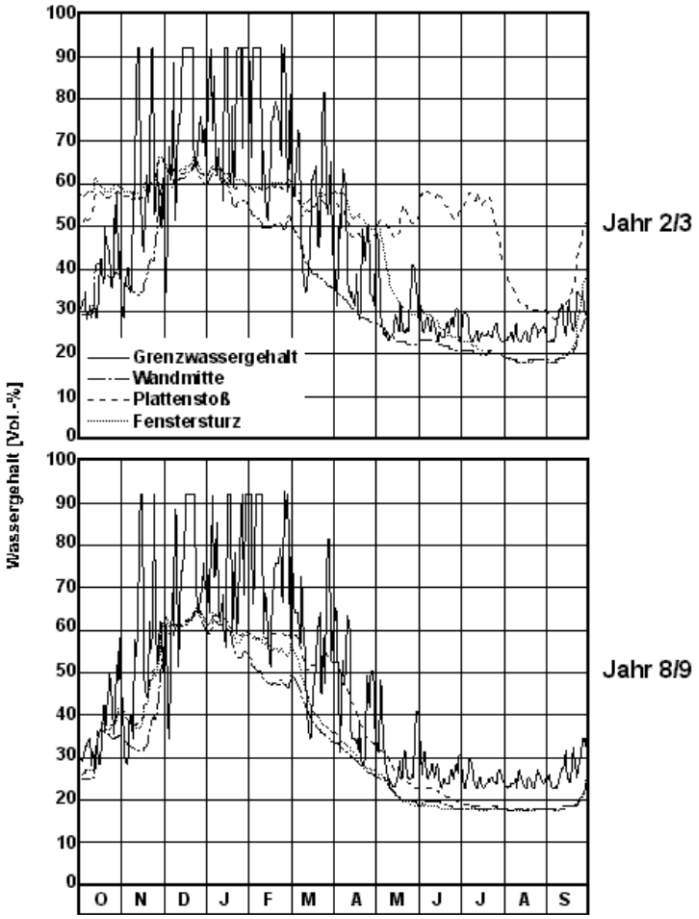


Bild 25 Berechnete Zeitverläufe des Sporen-Wassergehaltes an verschiedenen Stellen des Außenputzes einer Außenwand.
Oben: 2. Untersuchungsjahr
Unten: 8. Untersuchungsjahr.

Zugrunde gelegte Daten und Randbedingungen:
Klimadaten: gemäß Datensatz [24]
Wandaufbau: WDVS auf Beton als Wandbildner
Untersuchte Stellen: Ungestörter Bereich, Plattenstoß (WDVS), Fenstersturz.

Der Verlauf des Grenzwassergehalts ist jeweils mit eingezeichnet; er gilt für alle Wandstellen und zeigt, ab wann Sporenkeimung einsetzt.

Im zweiten Jahr trocknet die Feuchte im Bereich des Fenstersturzes gegen Ende des Sommers aus, so dass dann dort mit keinem Pilzbefall mehr gerechnet werden muss (Bild 25 oben). Der über den Plattenstoß hinweggezogene Putz benötigt für den glei-

chen Austrocknungsprozess etwa 8 Jahre, wie Bild 25 unten zeigt. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass (außer bei schadhaftem System) sich nach spätestens einem Jahr keine biohygrothermisch kritischen Zustände auf der Fassade einstellen. Dies bedeutet, dass ggf. ein Biozid so ausgelegt werden kann, dass es nur im ersten Jahr wirksam sein muss. Relativierend sei darauf hingewiesen, dass der Einfluss langwelliger Abstrahlung, welcher bei Wärmedämmverbundsystemen zu nächtlicher Unterkühlung und ggf. zu mikrobiellem Wachstum führen kann, bei diesen Berechnungen nicht berücksichtigt wurde.

5 Beurteilung eines Wasserschadens

Beim Umbau eines öffentlichen Gebäudes ist bei der vorgeschriebenen mehrfachen Dichtheitsprüfung der milchsäurebeständigen Abdichtung durch Fluten über Undichtheiten Wasser in den Bodenaufbau des angrenzenden Küchenbereichs gelangt. Bild 26 zeigt eine schematische Ansicht des Wand- und Deckenaufbaus. Das eingedrungene Wasser befindet sich unterhalb einer Abdichtung, die einen kapillaren Flüssigtransport nach oben ausschließt und einen hohen Diffusionswiderstand aufweist. Aus diesem Grund kann die Feuchte nicht in den Küchenboden nach oben steigen und Schäden verursachen. Ungeklärt ist allerdings, ob das Wasser in der aufstrebenden Wand aufsteigen und dort zu Schimmelpilzwachstum führen kann oder ob an der Unterseite des Küchenbodens bzw. der Decke des darunterliegenden Raums Schimmelpilzwachstum zu befürchten ist. Mit Hilfe zweidimensionaler Berechnungen des Wärme- und Feuchtetransports und der Anwendung des biohygrothermischen Modells soll darauf eine Antwort gefunden werden.

5.1 Durchführung der Untersuchungen

Die Oberflächentemperaturen und -feuchten, welche die maßgeblichen Kriterien für das Risiko eines Schimmelpilzbewuchses darstellen [25], werden mit dem Programm WUFI 2D für einen Zeitraum von einem Jahr nach der Befeuchtung des Bodens berechnet. Der Aufbau des Küchenbodens wird mit der für die Berechnung notwendigen Genauigkeit in WUFI 2D implementiert, wobei die in der WUFI-Materialdatenbank vorhandenen feuchte- und wärmetechnischen Materialkennwerte zugrunde gelegt werden. Für die Beurteilung der Gefahr eines Schimmelpilzbewuchses mit dem biohygrothermischen Modell werden die berechneten Oberflächentemperaturen und -feuchten an den kritischen Stellen der aufsteigenden Wand auf der Küchenseite und der des angrenzenden Raumes sowie der Decke unterhalb der Küche herangezogen (siehe Monitorpositionen in Bild 26).

5.2 Annahmen für die Berechnung

Es wird davon ausgegangen, dass der Estrich unterhalb der Abdichtungsbahn, die Schutzmatte (Vlies) sowie die oberen zwei Zentimeter der Betondecke komplett mit Wasser gesättigt sind. Bei der vorhandenen Materialdicke bedeutet dies pro Quadratmeter 5 l Wasser im Estrich, 2,3 l Wasser im Vlies und 1,5 l Wasser im angrenzenden

Beton, mit in der Summe 8,8 l Wasser pro Quadratmeter unterhalb der Abdichtungsbahn. Auf die Grundfläche von 60 m^2 bezogen bedeutet dies eine Gesamtmenge eingedrungenen Wassers von etwas mehr als 500 l.

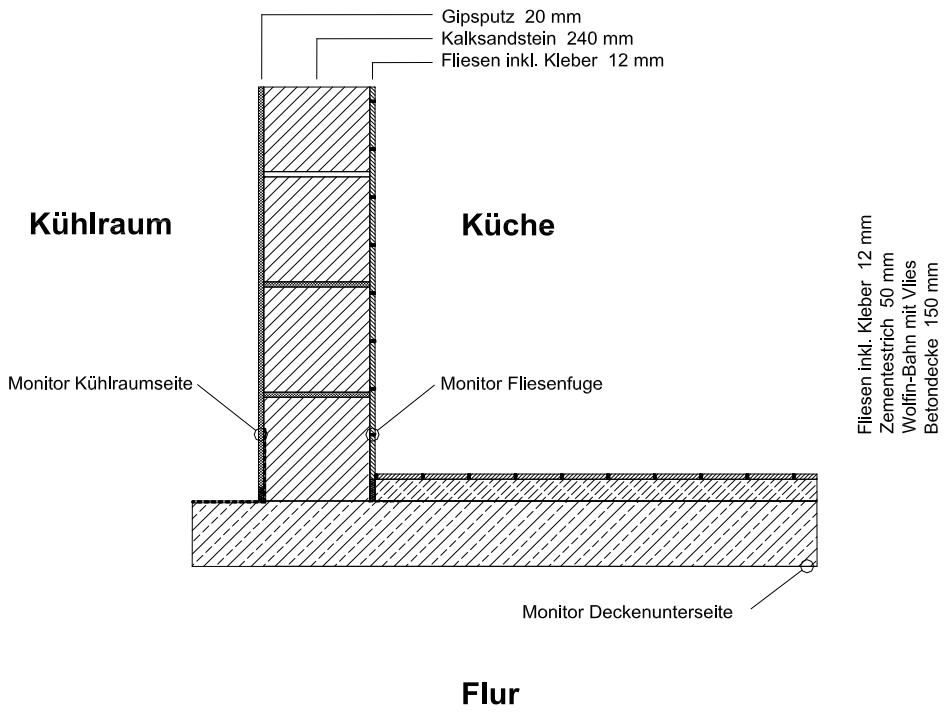


Bild 26 Schematische Darstellung des für die Berechnungen angepassten Wand- und Deckenaufbaus.

Da keine genaue Zustandsanalyse vorliegt, müssen für das eingedrungene Wasser und für die äußeren Randbedingungen Annahmen gemacht werden. Diese wurden so gewählt, dass sie in Bezug auf einen möglichen Feuchteschaden ungünstig, aber gerade noch realistisch sind. Sie werden im folgenden vorgestellt

Im Küchenbereich wird mit 27 °C von relativ hoher Innenraumtemperatur verbunden mit einer hohen Feuchtelast (55 ± 5 % relativer Luftfeuchte (r.F.)) ausgegangen. Der Wärmeübergangswiderstand liegt wie im Raum darunter (Flur) bei 8 W/m^2K. Bei einer Ortsbesichtigung bei winterlichem Wetter mit Außentemperaturen unter 0 °C, wurden im Flur Temperaturen von etwa 13 °C und eine niedrige Raumluftfeuchte von 38 % r.F. gemessen. Aus diesem Grund wird hier für die Berechnung von einer konstanten Temperatur von 13 °C und normaler Feuchtelast ausgegangen, obgleich normale Feuchtelasten in der Regel bei diesen Temperaturen kaum erreicht werden. Im Raum neben der Küche soll ein Kühlraum installiert werden, weshalb hier eine Temperatur von 8 °C angesetzt wird.

5.3 Ergebnis der Berechnung und Schlussfolgerung

Für die Beurteilung der Gefahr eines Schimmelpilzbewuchses werden die berechneten Oberflächentemperaturen und –feuchten an den kritischen Stellen der aufsteigenden Wand auf der Küchenseite und der des angrenzenden Raumes sowie der Decke unterhalb der Küche herangezogen. Bild 27 zeigt für den Zeitraum von einem Jahr nach Eintreten des Feuchteschadens die berechneten Oberflächentemperaturen (oben) und Oberflächenfeuchten (unten). Es stellt sich aufgrund der konstanten Raumtemperaturen auch auf der Oberfläche eine konstante Temperatur ein. Die höchsten Oberflächentemperaturen und oberflächennahen Luftfeuchten ergeben sich dabei auf der küchenseitigen Wandfläche in der Fuge zwischen den Wandfliesen. Aufgrund der für diesen Bereich gewählten Raumtemperatur von 27 °C erhält man dort eine Oberflächentemperatur von etwa 22 °C. An dieser Stelle tritt im August mit 81 % r.F. auch die höchste Oberflächenfeuchte auf. Deshalb wird mit Hilfe des biohygrothermischen Modells für diesen Bereich das Schimmelpilzrisiko abgeschätzt.

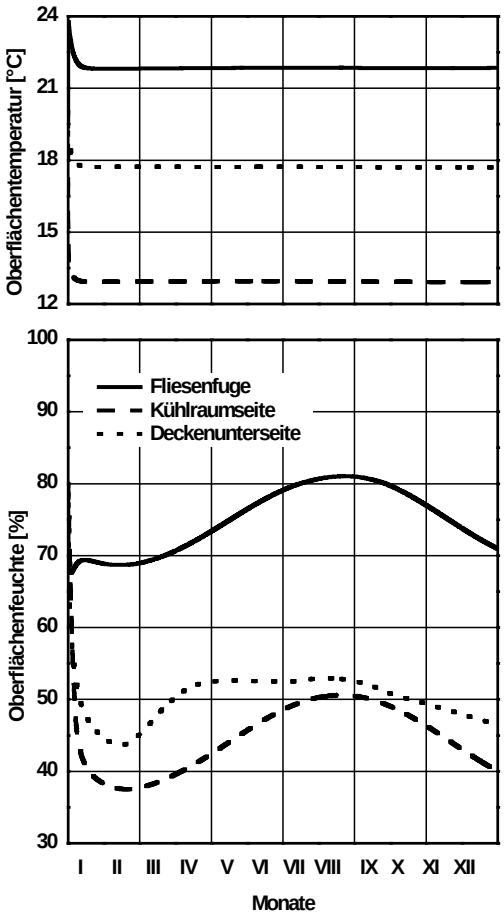


Bild 27 Berechneter Verlauf der Oberflächentemperatur (oben) und Oberflächenfeuchte (unten) der ausgewählten kritischen Stellen für den Zeitraum von einem Jahr nach dem Eintreten des Wasserschadens.

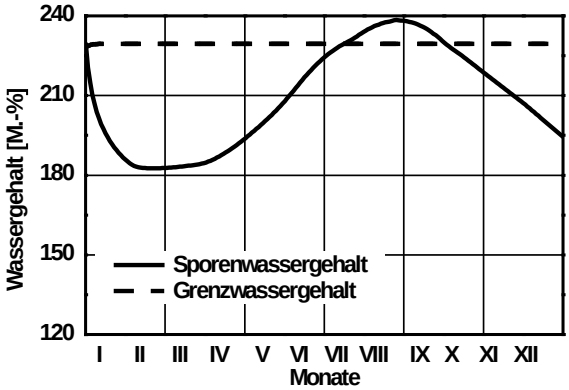


Bild 28 Vergleich des berechneten Verlaufs des Wassergehaltes einer auf der Fliesenfuge befindlichen Spore mit dem temperaturabhängigen Grenzwassergehalt. Eine Überschreitung des Grenzwassergehaltes deutet Schimmelpilzwachstum an.

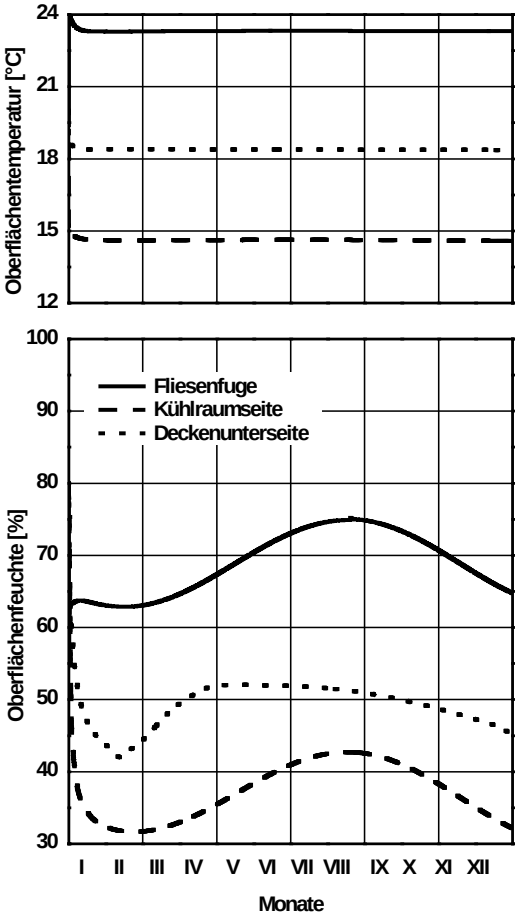


Bild 29 Berechneter Verlauf der Oberflächentemperatur (oben) und Oberflächenfeuchte (unten) der ausgewählten kritischen Stellen für den Zeitraum von einem Jahr nach dem Eintreten des Wasserschadens bei Dämmung der Küchenwand.

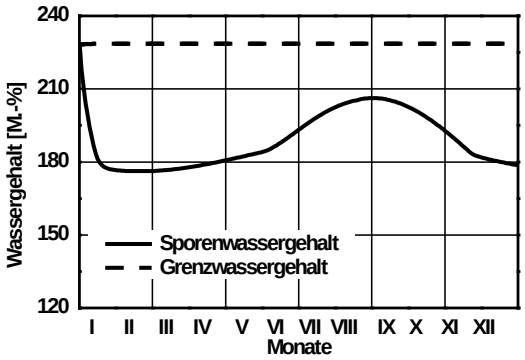


Bild 30 Vergleich des berechneten Verlaufs des Wassergehaltes einer auf der Fliesenfuge befindlichen Spore mit dem temperaturabhängigen Grenzwassergehalt bei Dämmung der Küchenwand. Eine Überschreitung des Grenzwassergehaltes deutet Schimmelpilzwachstum an.

Aus Bild 28 ist ersichtlich, dass im August der für die Spore berechnete Wassergehalt den kritischen Wassergehalt überschreitet. Ohne Wasserschaden ergibt sich dagegen kein Schimmelpilzwachstum (nicht dargestellt). Da eine schnelle Trocknung nur durch eine äußerst aufwändige Maßnahme erreicht werden kann, wird stattdessen eine Dämmung der Küchenwand auf der Kühlraumseite mit 5 cm Polystyrol vorgeschlagen, womit sich zusätzlich ein Energiespareffekt ergibt. Durch die damit verbundene Erhöhung der Oberflächentemperatur ergibt sich eine deutlich niedrigere maximale Oberflächenfeuchte von 75 % (Bild 29). Damit ist, wie aus Bild 30 ersichtlich, keine Schimmelpilzbildung mehr zu befürchten.

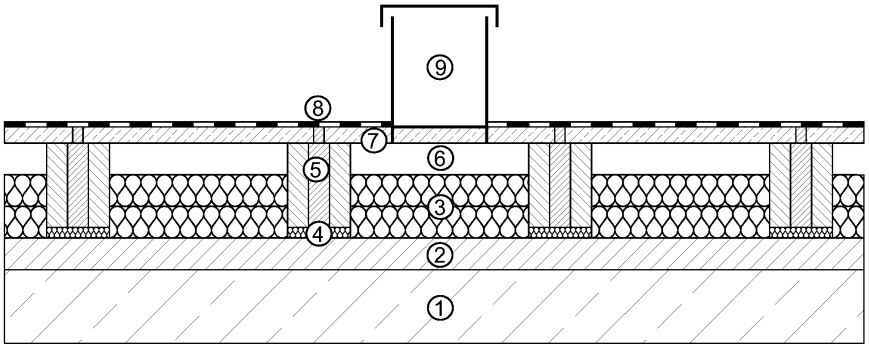
6 Flachdachsanierung durch belüftete Leichtbetonschale

Flachdächer können als belüftete Konstruktionen ausgeführt werden, um in die Wärmedämmung eindiffundierten Wasserdampf mittels eines Luftvolumenstroms wieder abzuführen (vgl. [26, 27]). Unter ungünstigen Randbedingungen, wie z. B. große Tagestemperaturamplituden in Verbindung mit einer hohen Außenluftfeuchte sowie falscher Dimensionierung der Belüftung, können feuchte Stellen im Bauteil eventuell über einen längeren Zeitraum nicht abtrocknen. Im Extremfall wird durch zuströmende Luft zusätzlich Feuchte in die Konstruktion eingetragen, welche sich an kalten Bauteiloberflächen niederschlägt [28]. Hierdurch sind in der Vergangenheit Bauschäden aufgetreten.

6.1 Durchgeführte Untersuchungen

Unter welchen Bedingungen Tauwasserbildung im Luftspalt auftritt, wurde in der Freilanduntersuchung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen bestimmt. Darüber hinaus ist die im Winterhalbjahr stattfindende Feuchteumverteilung sowie die im Sommer bei hohen Temperaturen auftretende Feuchteabfuhr, z. B. durch Konvektion, Inhalt sowohl der messtechnischen Untersuchungen als auch ergänzender feuchtetechnischer Berechnungen.

Untersucht wurde ein Zweischalenflachdach, bestehend von unten nach oben aus einer Stahlbetondecke, einer Porenbetonschicht der Dicke 75 mm (aus versuchstechnischen Gründen), einer Wärmedämmung aus 180 mm Mineralwolle, einer Luftschicht der Dicke 5 cm sowie der aus vorbitumierten Dachplatten, Dachhaut und Abschlussprofil bestehenden befahrbaren Abdeckung mit einer Neigung von etwa 5 %.



1. Stahlbetondecke
2. Porenbeton
3. Mineralwolle
4. Dämmplatte
5. Ausgleichsstein
6. Luftschicht
7. Leichtbetonplatte
8. Eindichtung
9. Durchlüftungshaube

Bild 31 Konstruktiver Aufbau des Zweischalenflachdaches (schematisiert).

Bild 31 zeigt schematisch den Dachaufbau. Die untersuchte Dachlänge beträgt 6 m. Die in [29] für belüftete Dächer mit einer Neigung kleiner als 10° angegebenen Grenzwerte für die einzuhaltende Dimensionierung der Lüftungsöffnung sind berücksichtigt: die freien Lüftungsquerschnitte an zwei gegenüberliegenden Seiten müssen mindestens 2/1000 der Dachgrundrissfläche betragen, wobei eine Luftschichtdicke von 50 mm nicht unterschritten werden sollte. Die vorgeschriebene diffusionsäquivalente Luftschichtdicke der Dachkonstruktion unterhalb des belüfteten Raums von mindestens 10 m ist durch die Betondecke gewährleistet.
Zur Simulation der Austrocknung einer „abgesoffenen“ Konstruktion wurde unterhalb der Dämmung in einem Fall ein feuchter Porenbeton eingebracht (Variante “feucht”). Um ein großes Dach zu simulieren sind in einer weiteren Variante mit trockenem Porenbeton die Einströmöffnungen etwa in der Mitte des Winters reduziert worden (Variante “gering belüftet”). Messtechnisch erfasst wurden Wärmeströme,

relative Luftfeuchten, Materialfeuchten (mittels Widerstandsmessung) und Temperaturen an beiden Varianten. Vor allem die Umrechnung auf eine sich einstellende Taupunkttemperatur im Luftspalt an den drei entlang der Messstrecke befindlichen Messstellen West, Mitte und Ost lässt Aussagen zu, unter welchen Bedingungen Tauwasserausfall auftritt (z. B. nächtliche Abstrahlung oder Schneebedeckung). Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Untersuchungszeitraum von November 1998 bis Juli 1999. Um verallgemeinerte Aussagen über die im Winter stattfindende Feuchteumverteilung in der Dachkonstruktion sowie die im Sommer bei hohen Temperaturen auftretende Feuchteabfuhr zu bekommen, werden ergänzende feuchtetechnische Berechnungen mit dem PC-Programm WUFI durchgeführt.

6.2 Ergebnisse der Untersuchungen

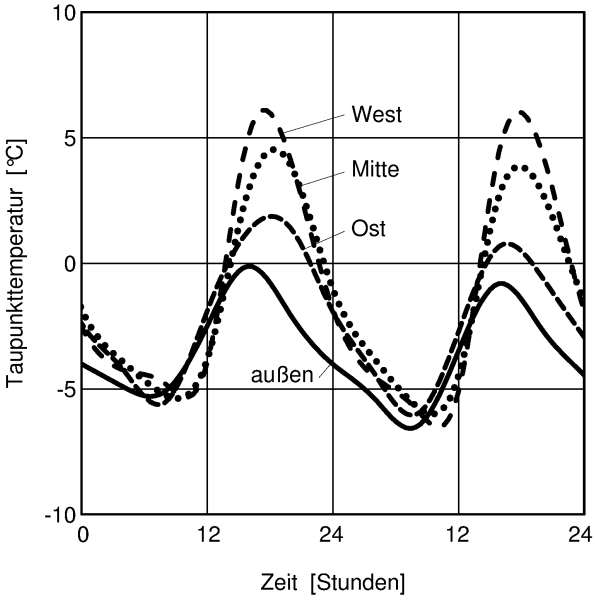


Bild 32 Gemessene Zeitverläufe der Taupunkttemperaturen der Außenluft sowie der Luft im Spalt an den Messstellen West, Mitte und Ost an zwei Wintertagen mit mäßigem Ostwind.

Bild 32 zeigt den Tagesverlauf der Taupunkttemperaturen der Außenluft sowie im Luftspalt an den Messstellen Ost, Mitte und West bei der Variante “feucht”. Da an diesem Tag Ostwind herrscht, erhöht sich die Taupunkttemperatur entlang der Messstrecke von Ost nach West, d.h. die Luft nimmt Feuchte auf. Kommt es nun, wie in Bild 33 dargestellt, zu einer Unterschreitung der Temperatur der äußeren Dachabdeckung unter die Taupunkttemperatur, so tritt Tauwasser aus.

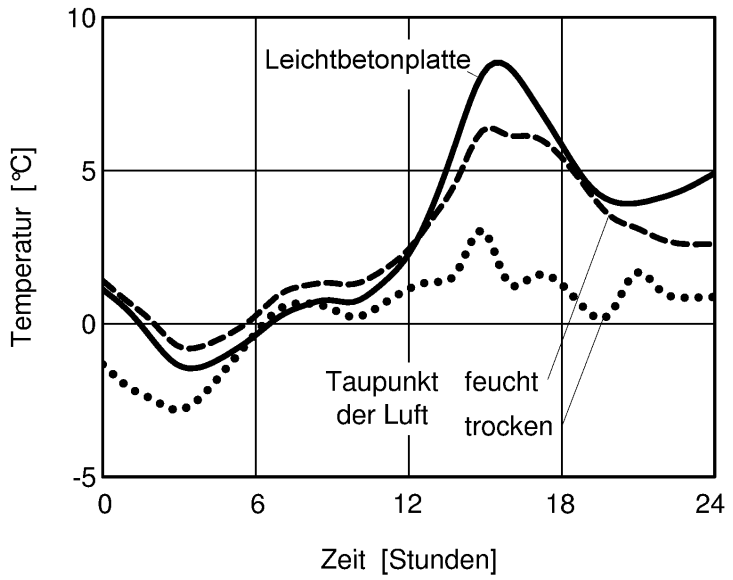


Bild 33 Tagesverläufe der Temperatur der äußeren Abdeckung aus Leichtbeton sowie der Taupunkttemperatur im Luftspalt an der Messstelle „Mitte“ für die Varianten mit trockenem und feuchtem Porenbeton während eines Wintertages.

In Tabelle 3 sieht man dazu die mittlere tägliche Dauer der Taupunkttemperaturunterschreitung für die unterschiedlichen Varianten. Man erkennt, dass auf der Ostseite an mehr Stunden Tauwasser austritt als im Westen. Dies ist einfach durch die Ergebnisse aus Bild 33 zu erklären, wenn man weiß, dass Westwinde im Winter 1998/99 dominant waren. Ferner zeigt sich, dass in der feuchten Variante deutlich häufiger Tauwasser auftritt im Vergleich zur trockenen. Dies liegt an der beständigen Feuchtelieferung durch den nassen Porenbeton, der erst im Laufe des Winters trockener wurde.

Tabelle 3 Mittlere tägliche Dauer der Taupunktunterschreitung für die Varianten „feucht“ und „trocken“ im Winter 1998/99.

Variante	Schnee	mittlere tägliche Dauer der Unterschreitung der Taupunkttemperatur [h/d]			
		trocken West	trocken Ost	feucht West	feucht Ost
belüftet	mit	2	4	9	9
gering belüftet	mit	0,2	7	-	-
belüftet	ohne	4	7	9	14
gering belüftet	ohne	1	8	-	-

Bezüglich der Auswirkung einer Schneebedeckung – im untersuchten Winter an etwa 100 Tagen – stellt man fest, dass es eher durch nächtliche Abstrahlung als durch eine kühlende Schneedecke zu Unterschreitungen der Taupunkttemperatur kommt. Der Schnee hat also dämmende Wirkung. Bei der Variante mit trockenem Porenbeton zeigen sich keine signifikanten Unterschiede bei den Taupunktunterschreitungen zwischen guter und geringer Belüftung. Das Dach funktioniert in beiden Fällen, also auch ohne die vorgeschriebene Belüftung.

Bild 34 zeigt dazu den zeitlichen Verlauf der Wassergehalte im Porenbeton an den Messstellen, die sich in einer oberflächennahen Schicht befinden, für die Varianten „trocken“ und „feucht“. Für den trockenen Fall kann, werden nach Umbau vom gut belüfteten zum gering belüfteten Dach, keine Änderung des Verlaufs des Wassergehalts festgestellt. Diese Abdichtungsmaßnahme fand Mitte Januar statt. Zur Bestimmung der Feuchtegehaltsverläufe im gesamten Dachaufbau – also auch in den Materialien, in denen keine messtechnische Erfassung möglich ist – sind Wärme- und Feuchteberechnungen mit dem Programm WUFI durchgeführt worden. An den in Bild 34 dargestellten Wassergehalten in der Porenbetonoberfläche erkennt man in beiden Varianten die gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung, so dass die hier gewählte Modellierung als validiert angesehen und für weitere Berechnungen verwendet werden kann.

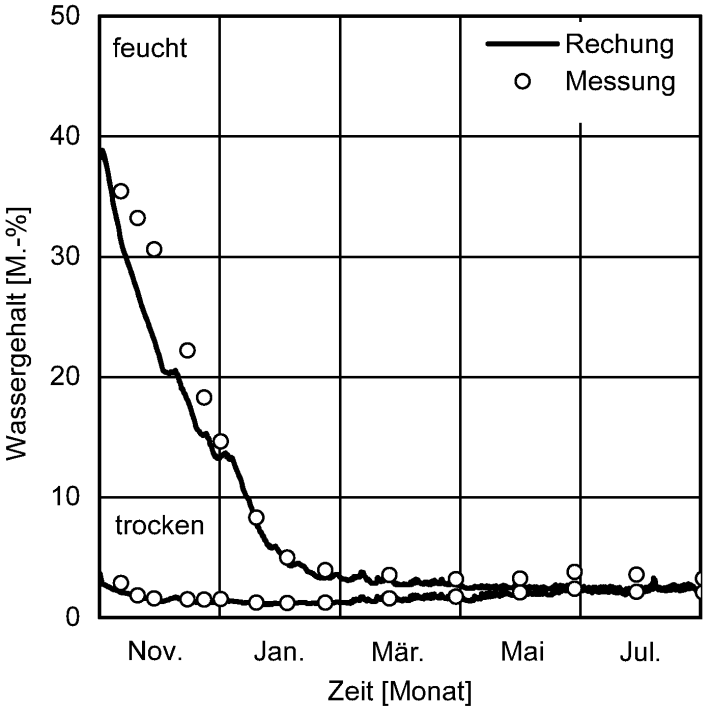


Bild 34 Zeitlicher Verlauf der gemessenen und berechneten Wassergehalte im Porenbeton (äußere Schicht) für die Variante „feucht“ und „trocken“.

Unter Verwendung der messtechnisch erfassten Feuchte- und Temperaturverhältnisse im Luftspalt können die Wassergehaltsverläufe der Materialien oberhalb und unterhalb der Luftschicht rechnerisch ermittelt werden. Bild 35 zeigt den zeitlichen Verlauf der berechneten Wassergehalte im Porenbeton (rechnerisch kann hier der gesamte Porenbeton berücksichtigt werden, nicht nur die oberflächennahe Schicht), in der Mineralwolle und in der äußeren Abdeckung (Leichtbeton) für die Variante „feucht“. Man erkennt, dass im Winterhalbjahr der Leichtbeton bedingt als Feuchtepuffer funktioniert, also erst im Sommer seine Feuchte in den Luftspalt abgibt, von wo aus ein konvektiver Abtransport an die Außenluft stattfindet. Dieses Verhalten kann im vorliegenden Fall der Wassersorptionseigenschaft des Leichtbetons zugeschrieben werden. Wäre nämlich dort keine Zwischenspeicherung möglich, würde im Winter die anfallende Tauwassermenge weiter zunehmen, was zu einem noch höheren Auffeuchten der Mineralwolleschicht führen würde. Dieser letztgenannte Effekt konnte messtechnisch bestätigt werden.

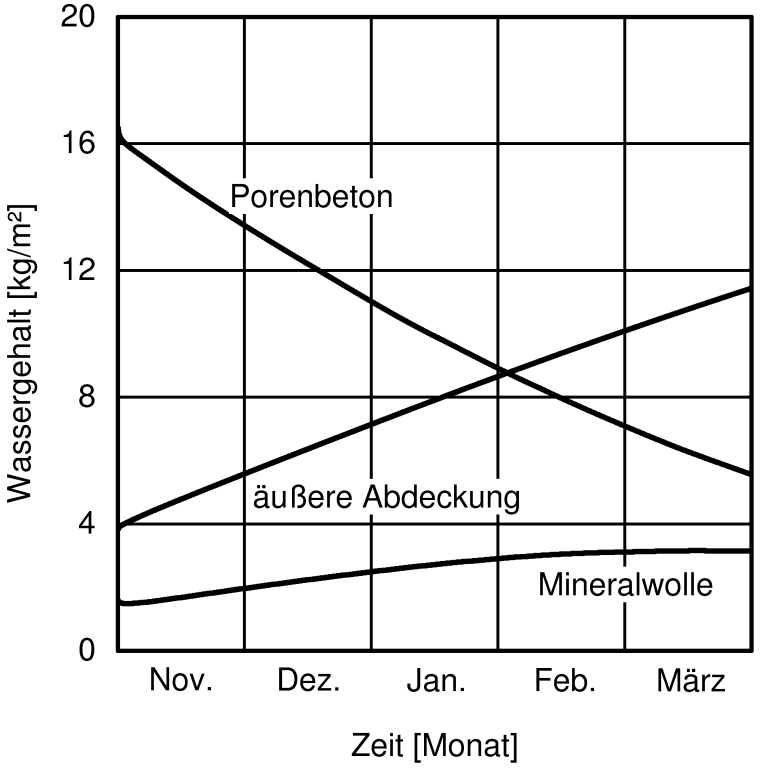


Bild 35 Zeitlicher Verlauf der berechneten Wassergehalte im Porenbeton. in der Mineralwolle und in der äußeren Abdeckung (Leichtbeton) für die Variante „feucht“.

7 Literatur

[1] K. Sedlbauer, *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*, Dissertation Universität Stuttgart 2001

[2] Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzel, H.M.; Radon, J.: *Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen – Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die Raumluftfeuchte*. Tagungsbeitrag für das 11. Bau-klimatische Symposium der TU Dresden. 26. – 30. Sep. 2002, Dresden, S. 562 – 575

[3] Holm, A.; Radon, J.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.: *Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen*. WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81 – 94. Hrsg.: WTA-Publications, München.

[4] Reichelt, B.: *Ermittlung maximaler Innenluftfeuchten zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung an Bauteiloberflächen und Vergleich mit Normvorgaben.* Diplomarbeit, Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen, Fachhochschule Rosenheim (2004).

[5] Kainz, E.: *Lüftungskonzepte zur Erhaltung der Raumluftqualität und gleichzeitiger Vermeidung von Schimmelpilzen*. Diplomarbeit, Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen, Fachhochschule Rosenheim (2004).

[6] Th. Hartmann, *Bedarfsgeregelte Wohnungslüftung*, Tagungshandbuch Hermann-Rietschel-Colloquium 2002, S. 79-87

[7] W. Richter, Th. Hartmann, *Mindestluftwechsel zur Verhinderung der Schimmelpilzbildung in Wohnungen*, VDI-Berichte Nr. 1603, (2001), S. 121-130

[8] M. Krus, K. Sedlbauer, H. Sinnesbichler, *Neuartige und einfache Lüftersteuerung zur Schimmelpilzvermeidung*, IBP-Mitteilungen 31 (2004), Nr. 437

[9] H.M. Künzel, *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*; Dissertation Universität Stuttgart 1994

[10] M: Krus, *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken*, Universität Stuttgart, Dissertation 1995

[11] K. Sedlbauer, M. Krus, W. Zillig, *Vorhersagemodell zur Schimmelpilzbildung bei Wechselklima – Praktische Beispiele*, Tagungsbeitrag zum Architekten- und Ingenieurtag zum Thema Bauphysik im Holzbau, 27. Apr. 2002, Nürnberg, S. 43 - 55

[12] H. Künzel, *Sanierputze sind mehr als eine begleitende Maßnahme*, Schriftenreihe H. 8 Feuchte und Altbausanierung e.V., Verlag für Bauwesen Berlin

[13] A. Holm, M. Krus, H.M. Künzel, *Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk*, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 2 (1996), H. 5, S. 375-396

[14] H. Künzel, *Zur Trocknungswirkung von Entfeuchtungsröhren in Grundmauern*, Sonderdruck aus dem Gesundheits-Ingenieur 89 (1968), H. 5 und 6, S. 138 bis 141 und 175 bis 178

[15] Chr. Witsch, *Einfluss des Fugenmörtels auf das kapillare Saugvermögen von Mauerwerk*, Festschrift Waubke, Institut für Baustofflehre Innsbruck 1996

[16] Venzmer u.a., *Sanierung feuchter und versalzener Wände*, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin – München 1991

[17] L. Franke, und H. Bentrup, *Einfluss von Rissen auf die Schlagregensicherheit von hydrophobiertem Mauerwerk und Prüfung der Hydrophobierbarkeit*, Bautenschutz + Bausanierung 14 (1991), H. 6, S. 98-101 und H. 7, S. 177-121

[18] R. Oswald, *Schwachstellen – Hydrophobierungen auf Ziegelsichtmauerwerk*, Deutsche Bauzeitung 1999, H. 9, S. 140-145

[19] U. Möller, H. Schuh, und E. Wendler, *Längenänderungsverhalten hydrophobierter Sandsteine*, Bautenschutz und Bausanierung 15, 1992, H. 4, S. 46-49

[20] M. Krus, H.M: Künzel, K. Kießl, *Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk*, Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart 1996

[21] H. Künzel, *Der Feuchtehaushalt von Holz-Fachwerkwänden. Bauforschung für die Praxis*, Band 23, IRB-Verlag Stuttgart 1996

[22] M. Krus, *Bauphysikalische Untersuchungen zum biologischen Befall der Wohnanlage McNair, Berlin-Steglitz*, IBP-Bericht HTB-04/2001 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart 2001

[23] H.M. Künzel, *Austrocknung von Wandkonstruktionen mit Wärmedämm-Verbundsystemen*, Bauphysik 20 (1998), H. 1, S. 18 - 23

[25] J. Reiß, H. Erhorn, *Beurteilung von Feuchteschäden*, IBP-Bericht WG 47/1997
[24] A. Jahn, *Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland*, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht T 86-051, Düsseldorf 1986

des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Stuttgart 1997

[26] K. Gertis, *Die thermodynamische Wirkung von Luftspalten in belüfteten Flachdächern*, Betonwerk + Fertigteiltechnik, Bauverlag Wiesbaden, Berlin, H. 7, S. 376-382, 44, 1978

[27] K. Liersch, *Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen, Band I Vorhangfassaden*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 1996

[28] K. Sedlbauer, ;M. Würth, *Instationär thermo-hygrische Untersuchung eines belüfteten Flachdaches*, Bauphysik 20 (1998), H. 4, S. 105-109

[29] *DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau, Teile 1 bis 4*, Beuth-Verlag, Berlin,1981