Klaus Sedlbauer und Martin Krus

Experimentelle und rechnerische Untersuchungen an Holzfachwerk mit nachträglicher Innendämmung

Da viele Fachwerkhäuser unter Denkmalschutz stehen, gilt es, einen tragbaren Kompromiß zwischen energetischer Sanierung und der Erhaltung des historischen Erscheinungsbildes und der Bausubstanz zu finden. Oftmals bleibt unter Voraussetzung der Erhaltung des äußeren Erscheinungsbildes der Fachwerkfassade als einzig mögliche Wärmeschutzmaßnahme die Anbringung einer Wärmedämmung auf der Innenseite der Außenwand. Da Innendämmungen aber aus bauphysikalischen Gründen – Absenkung der Temperatur zwischen Dämmung und Ausfachungsmaterial und damit verbunden höhere Feuchten in diesem Bereich – nicht unkritisch sind, sollte die Wahl des Dämmstoffes sowie der gesamte Konstruktionsaufbau den hygrothermischen Verhältnissen einer Fachwerkfassade genau angepaßt werden.

Experimental an analytical timber framework with retrofitted interior insulation. *Since many timber-ramed houses are listed, a practicable compromise between thermal rehabilitation and preservation of the historic appearance and fabric must be found. If the historic appearance is required to be preserved, thermal protection can only be achieved by applying thermal insulation to the interior insulation lowers the temperature between insulation layer and filling material and thus raises the humidity level in this area, such measures are not without risk. The choice of a suitable type of insulation and an appropriate type of assembly must be made with proper consideration of the hygrothermal conditions at the timber-framed façade.*

1 Einleitung und Zielsetzung

Bei energetischen Sanierungen von Fachwerkbauten sind die derzeit geltenden Bestimmungen zur Energieeinsparung und zum klimabedingten Feuchteschutz nach DIN 4108 in den Teilen 2 [1] und 3 [2] in der Regel zu erfüllen. Eine grundsätzliche Forderung des Denkmalschutzes besteht in der Erhaltung der originalen Bausubstanz. Andererseits genügen die früher verwendeten Ausfachungsmaterialien wie Lehm oder Vollziegel nicht mehr den heutigen Anforderungen an den Wärmeschutz und Wohnkomfort. Da viele Fachwerkhäuser unter Denkmalschutz stehen, gilt es, einen tragbaren Kompromiß zwischen energetischer Sanierung und der Erhaltung des historischen Erscheinungsbildes und der Bausubstanz zu finden. Oftmals bleibt unter Voraussetzung der Erhaltung des äußeren Erscheinungsbildes der Fachwerkfassade als einzig mögliche Wärmeschutzmaßnahme die Anbringung einer Wärmedämmung auf der Innenseite der Außenwand. Da Innendämmungen aber aus bauphysikalischen Gründen – Absenkung der Temperatur zwischen Dämmung und Ausfachungsmaterial und damit verbunden höhere Feuchten in diesem Bereich – nicht unkritisch sind, sollte die Wahl des Dämmstoffes sowie der gesamte Konstruktionsaufbau den hygrothermischen Verhältnissen einer Fachwerkfassade genau angepaßt werden.

Holzfachwerk ist aus bauphysikalischer Sicht eine äußerst problematische Konstruktion. Der Grund liegt in dem geringen Regenschutz aufgrund von Schwindrissen, verbunden mit einem feuchteempfindlichen tragenden Holzfachwerk. Ausgehend von bekannten Hinweisen zur hygrothermisch sinnvollen Auslegung von Fachwerkbauten, wie sie beispielsweise im Merkblatt 8-1-96 der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA) [3] dargelegt sind, ist eine Bewertung der verschiedenartigen Einflußgrößen hinsichtlich ihrer praktischen Bedeutung anhand von experimentellen und rechnerischen Untersuchungen im Vergleich zu klimabedingten Einflüssen möglich. Dazu sollen neue Erkenntnisse aus mehrjährigen Freilanduntersuchungen an Fachwerkfassaden (Bild 1) im Freigelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen sowie aus weitergehenden Berechnungen mit dem bereits mehrfach experimentell verifizierten Rechenverfahren WUFI [4] zum Feuchteschutz von Fachwerkbauten erläutert und Hinweise zur bewitterungsabhängigen Auswahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen gegeben werden. Dabei wird schwerpunktmäßig auf Innendämmungen mit sog. kapillaraktiven Dämmstoffen sowie auf den Einsatz von intelligenten Dampfbremsen eingegangen.

2 Schlagregenschutz

Der Schlagregenschutz ist ein wesentlicher Teil des Feuchteschutzes. Zur Beurteilung der Schlagregenbeanspruchung sind in DIN 4108-3 [2] drei Beanspruchungsgruppen definiert, die im Einzelfall unter Berücksichtigung der regionalen klimatischen Bedingungen, der örtlichen Lage und der Gebäudeart festzule-

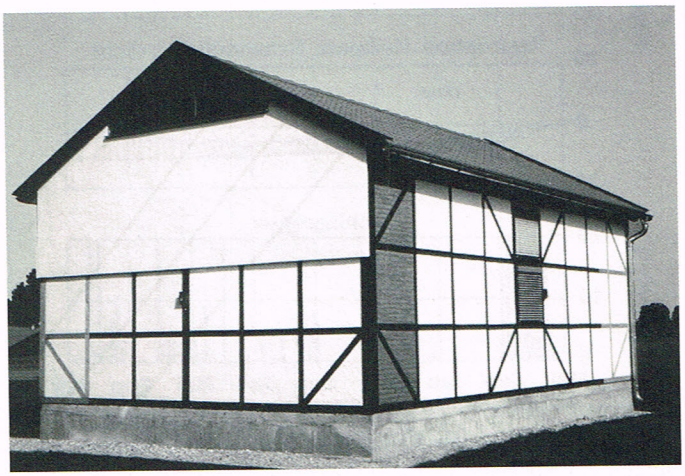

Bild 1 Fachwerkhaus auf dem Freigelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen.

Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer und Dr.-Ing. Martin Krus: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen (Leiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis).
K. Sedlbauer: Stellvertretender Abteilungsleiter für den Bereich Hygrothermik und stellvertretender Institutsleiter. Seit 2003 zusätzlich Profwssor an der Fachhochschule Rosenheim.
M. Krus: Gruppenleiter in der Abteilung Hygrothermik und Technischer Leiter der Prüfstelle „Feuchte/Mörtel/Strahlung" sowie Lehrbeauftragter an der Universität Stuttgart.

© 2003 Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

gen sind. Umfangreiche Untersuchungen [5] haben gezeigt, daß Sichtfachwerk nur einer geringen Schlagregenbeanspruchung ausgesetzt werden darf, d.h. Beanspruchungsgruppe I mit Jahresniederschlagsmengen unter 600 mm oder geschützte Lage in Beanspruchungsgruppe II. Insgesamt sollte die jährliche Schlagregenmenge auf eine Fachwerkfassade den Wert von 150 Liter/m² nicht überschreiten. Ansonsten sind konstruktive Regenschutzmaßnahmen vorzunehmen, wie beispielsweise eine Verschindelung der Fassade.

Das Eindringen von Regenfeuchte in die Wand bei Sturm oder Gewitter ist allerdings auch unterhalb dieser Grenze nicht völlig auszuschließen. Während bei normalen Mauerwerkswänden der Außenputz wasserhemmend bzw. wasserabweisend eingestellt wird, hat dies bei Fachwerkfassaden den Effekt, daß das vom hydrophoben Putz ablaufende Regenwasser in die Schwindfugen zwischen Ausfachung und Fachwerk eindringt und dort erst recht zu Feuchteschäden führt. Eine Lösung wäre hier nur die gezielte Abdichtung dieser Fugen gegen Schlagregen. Bislang ist es jedoch nicht gelungen, eine wirklich dauerhafte Fugenabdichtung zu gewährleisten [5], wie die in Bild 2 bespielhaft dargestellten Zeitverläufe der Feuchteänderungen von Fachwerkelementen mit Ausfachung durch Porenbetonmauerwerk bei Orientierung nach Westen (Schlagregen) und Osten (geschützt) bei Variation des Außenputzes und der Fugenausführung belegen. Auffallend ist zunächst, daß sich die Ausfachungsvarianten mit Kalkputz und offenen bzw. dichten Schwindfugen nur wenig unterscheiden. Die Wirkungslosigkeit der Fugenabdichtung erklärt sich dadurch, daß der sehr saugfähige Außenputz den größten Teil des Regenwassers aufnimmt und nur wenig in die Fugen läuft. Ob diese nun dicht sind oder nicht, wirkt sich in diesem Fall nur geringfügig aus. Beim hydrophobierten Außenputz läuft hingegen das Regenwasser zum größten Teil am Putz ab und belastet damit verstärkt die Fugen. Aus Bild 2 Mitte wird deutlich, daß das vom Putz abgewiesene Wasser offensichtlich vollständig über die Fugen aufgenommen worden ist. Nur in diesem Fall kann sich eine Abdichtung der Schwindfugen in der erwarteten Weise auswirken, wie das zweitunterste Diagramm in Bild 2 zeigt. Die Feuchteanstiege im dritten Untersuchungsjahr sind auf die entstandenen Undichtheiten in der Fugenabdichtung zurückzuführen. Zu bedenken ist auch, daß im Laufe der Bewitterung Schwindrisse im Holz bzw. zwischen Holz und Ausfachung entstehen werden und daß dort eindringendes Wasser infolge der gezielten Fugenabdichtung nicht mehr austreten kann.

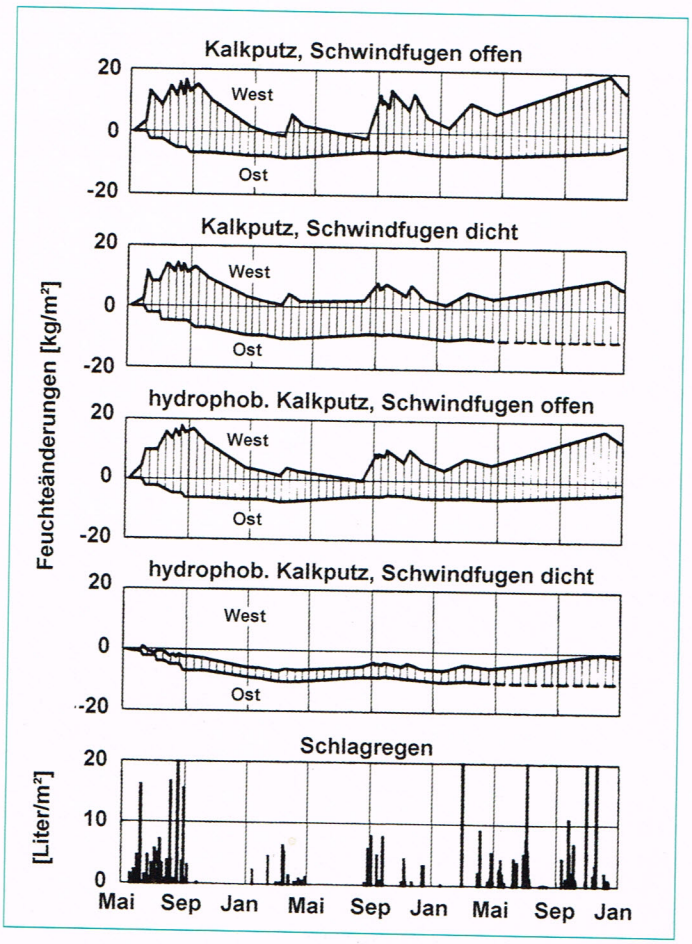

Bild 2 Zeitverläufe der Feuchteänderungen von Fachwerkelementen mit Ausfachung durch Porenbetonmauerwerk bei Orientierung nach Westen (Schlagregen) und Osten (geschützt) bei Variation des Außenputzes und der Fugenausführung aus [5].

Um Schäden zu vermeiden, muß die Feuchte rasch genug austrocknen können. Das Sicherstellen einer ausreichenden Trocknungsmöglichkeit ist somit der einzig mögliche Schlagregenschutz für Sichtfachwerk bei Beanspruchungsgruppe I und geschützte Lagen der Beanspruchungsgruppe II. Für die Trocknung nach außen sind diffusionsoffene Ausfachungsmaterialien (μ-Wert < 10) günstig. Generell sind die meisten herkömmlichen Mauersteine und Mörtel, eventuell in Verbindung mit Faserdämmstoffen, zur Ausfachung geeignet. Aufgrund der Feuchteempfindlichkeit und des ausgeprägten Quell- und Schwindverhaltens sind historische und moderne Lehmbaustoffe eher ungünstig [5]. Es ist selbstverständlich, daß nicht nur die Ausfachungsmaterialien für eine gute Trocknung entsprechend dampfdurchlässig sein müssen, sondern auch die Außenanstriche. Für einen Anstrich auf der Ausfachung gilt, daß der s_d-Wert kleiner als 0,1 m sein soll, während für den Holzanstrich die Grenze von s_d < 0,5 m wegen des höheren Diffusionswiderstandes von Holz ausreicht [6].

Eine zusätzliche Innendämmung kann den Trocknungsverlauf nach einem Schlagregenereignis gravierend beeinflussen, wie Bild 3 verdeutlicht. Bei einem Wandaufbau ohne Dämmung kann die Feuchte nach beiden Richtungen, also auch zur Raumseite hin, austrocknen. Dies ist besonders dann wichtig, wenn beispielsweise ein starker Wind das Wasser tief in die Schwindfugen eingetrieben hat. Wird eine Innendämmung aufgebracht, die nach gängiger Praxis eine Dampfbremse beinhaltet, dann ist für die Feuchte der Weg nach innen weitgehend unterbunden. Zusätzlich wird durch die Innendämmung, außer im Hochsommer, das Temperaturniveau der davorliegenden Wand abgesenkt, was auch die Austrocknung nach außen verlangsamt, da die Temperaturdifferenz, die an der Ausfachung anliegt, den Diffusionsvorgang beeinflußt. Aus diesem Grund sollte im Sinne einer Trocknungsmöglichkeit zum Raum hin versucht werden, den s_d-Wert der raumseitigen Dämmschicht inklusive Dampfbremse zu minimieren, ohne den Tauwasserschutz zu gefährden. In [3] ist deshalb ein Grenzwert von s_d = 2 m genannt, der von einer Innendämmung keinesfalls überschritten werden sollte.

3 Mindestwärmeschutz

Aus hygienischen Gründen ist Tauwasserbildung bzw. Schimmelpilzbefall auf den Wandinnenoberflächen zu verhindern. Deshalb schreibt die DIN 4108-2 [1] einen Mindestwärmedurchlaßwiderstand vor, der bei allen beheizten Gebäuden, also auch bei Fachwerkhäusern einzuhalten ist. Für Außenwände beträgt dieser Mindestwärmedurchlaßwiderstand je nach Flächenmasse zwischen 1,0 und 1,75 m²K/W. Das bedeutet für Fachwerkwände mit einer durchschnittlichen Dicke von 14 cm und einer Rohdichte des Ausfachungsmaterials von etwa

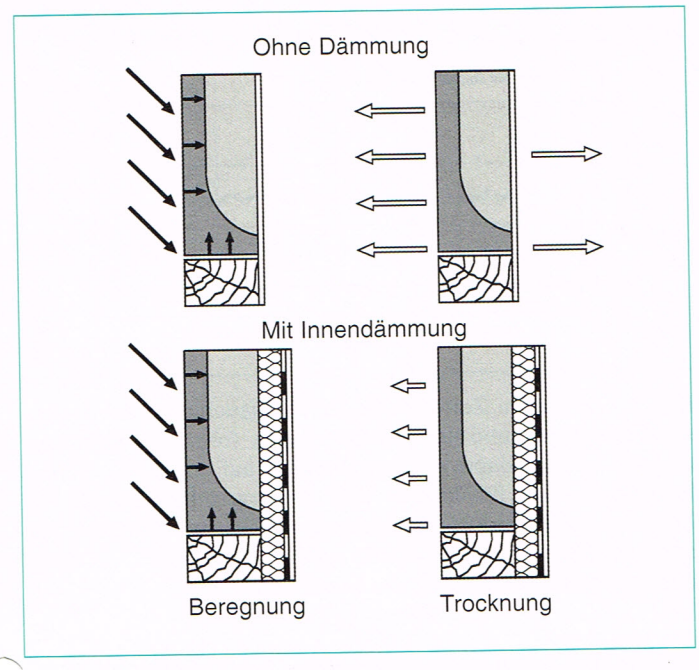

Bild 3 Schematische Darstellung der Befeuchtung und Trocknung einer Fachwerkwand ohne Dämmung und mit Innendämmung inklusive Dampfbremse. Im Gegensatz zur schlagregenbedingten Feuchteaufnahme, die durch die Dämmung nicht beeinflußt wird, verlangsamt die Innendämmung durch Absenkung des Temperaturniveaus die Austrocknung nach außen und unterbindet die Trocknung nach innen.

500 kg/m³ (z. B. Leicht-Strohlehm, Ausfachungsmörtel, Porenbeton) einen Mindestwert von R = 1,0 m²K/W (entsprechender U-Wert 0,85 W/m²K). Dieser Wert garantiert eine ausreichende Sicherheit gegen Tauwasserbildung im Bereich von fachwerktypischen Ecken und Kanten [7]. Er entspricht auch etwa dem Dämmwert der Holzkonstruktion, so daß sich eine gleichmäßige Temperaturverteilung an den Wandoberflächen einstellt.

Tabelle 1 Zusammenstellung der rechnerischen Wärmeleitfähigkeit einiger häufig anzutreffender Ausfachungsmaterialien und des resultierenden Wärmedurchlaßwiderstandes der Ausfachung bei einer Dicke von 14 cm.

Ausfachungsmaterial	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Wärmedurchlaßwiderstand [m²K/W]
Naturstein (Sedimentgestein)	2,3	0,06
Vulkanisch-poriges Gestein	0,5	0,3
Vollziegel	0,7	0,2
Strohlehm	0,5	0,3
Lehm mit Leichtzuschlägen	0,2 – 0,3	0,5 – 0,7
Ausfachungsmörtel	0,2	0,7
Porenbeton	0,12 – 0,14	1,0 – 1,2
Mauerstein + 4 cm Dämmung (Mineralfaser/ Schaumkunststoff)	2,3 0,04	~ 1,0
Fachwerkholz	0,13 – 0,2	0,7 – 1,1

Somit läßt sich auch ein Abzeichnen des Fachwerks nach dem Verputzen, bedingt durch unterschiedliche Oberflächenfeuchteverhältnisse oder Verschmutzung, vermeiden.
Betrachtet man die Wärmedurchlaßwiderstände in Tabelle 1, die sich bei einer 14 cm dicken Wand mit historischen und modernen Baustoffen erzielen lassen, wird deutlich, daß zur Erfüllung der Wärmeschutzanforderungen in der Regel eine zusätzliche Dämmung notwendig ist. Das gilt vor allem dann, wenn die Bedingungen der EnEV [8] erfüllt werden sollen. Zur Erhaltung der Außenansicht der Fachwerkfassade ist dann eine Innendämmung unumgänglich. Ob sie bauphysikalisch machbar ist und wie sie gegebenenfalls auszuführen ist, hängt vom Konstruktionsaufbau, den verwendeten Materialien und den Witterungsverhältnissen sowie Raumklimabedingungen ab.

4 Tauwasserschutz bei Innendämmung

Wird der Mindestwärmeschutz eingehalten, ist bei normaler Wohnraumnutzung auch der Schutz gegen Oberflächentauwasser gewährleistet. Normale Wohnraumnutzung bedeutet, daß die relative Luftfeuchte im Winter im Mittel unter 50 % bleibt [9]. Die Tauwassergefahr ist vor allem beim Anbringen einer Innendämmung zu berücksichtigen, da durch eine derartige Dämmmaßnahme die Temperatur der Innenoberflächen des Fachwerks unter die Taupunkttemperatur der Raumluft sinken kann. Wasserdampfdiffusion oder Luftkonvektion aus dem Wohnraum führen dann ggf. zu einer Feuchteerhöhung im Holz oder der Ausfachung. Um Luftkonvektion zu verhindern, muß der gesamte Wandaufbau stets luftdicht ausgeführt werden. Hohlräume z.B. zwischen Innendämmung und Außenwand sind möglichst zu vermeiden. Aufgrund der häufig vorhandenen Unebenheiten von Fachwerkwänden sind Dämmstoffe, die sich dem Untergrund anpassen können, wie z. B. Dämmputze oder Faserdämmstoffe, günstig. Auch Innendämmungen aus Leichtlehm sind anwendbar, solange damit kein zu hoher Feuchteeintrag während der Applikationsphase verbunden ist. Starre Dämmplatten hingegen können Hohlräume bilden, deren Abdichtung selbst bei besonderer Sorgfalt oft nicht dauerhaft gewährleistet werden kann.
Um Tauwasserschäden an der Holzkonstruktion in der Winterperiode infolge der Innendämmung zu vermeiden, wird nach [10] empfohlen, die Dämmwirkung der zusätzlichen Innendämmung auf R = 0,8 m²K/W zu begrenzen oder einen „kapillaraktiven" Dämmstoff, der einen Teil des anfallenden Tauwassers kapillar zum Raum hin zurückführt, zu verwenden. Das Problem der Wasserdampfdiffusion aus dem Raum ist wegen der bereits erwähnten Anforderungen an die Trocknungsmöglichkeit einer Fachwerkwand bei der Planung einer Innendämmung genauer zu betrachten. Der Dampfdiffusionswiderstand der raumseitigen Bauteilschichten sollte nicht höher sein als aus Tauwasserschutzgründen notwendig. In [3] wird dazu unabhängig von der Art der Dämmung ein Mindestwert von s_d = 0,5 m gefordert. Ob die Einhaltung dieses Mindestwertes in der Praxis ausreicht oder ob er sogar noch unterschritten werden kann, wird im folgenden anhand neuerer Versuchsergebnisse erörtert. Insbesondere wird auf die Anordnung einer feuchteadaptiven Dampfbremse auf der Raumseite mit variablem s_d-Wert eingegangen, die im Winter dichter, im Sommer dampfdurchlässiger ist.

4.1 Einsatz einer feuchteadaptiven Dampfbremse

Untersuchungsvarianten
Ziel dieser neueren Untersuchungen ist es, die Funktionsfähigkeit des Einsatzes einer feuchteadaptiven Dampfbremse im Frei-

landversuch sowie durch begleitende Berechnungen zu überprüfen. Dabei wird am Beispiel eines Fachwerkmörtels als Ausfachungsmaterial und Mineralwolleplatten als Innendämmung der Einfluß einer feuchteadaptiven Dampfbremse untersucht [11]. Die Nord- und Südwand des auf dem Freigelände des IBP bestehenden Fachwerk-Versuchshauses (Bild 1) wurden derart ausgeführt. Der Wandaufbau ist in Bild 4 dargestellt, wobei zwei unterschiedliche Ausfachungsmaterialien zum Einsatz kamen, Dämmputz und Leichtbeton. Am unteren Querbalken wird die Dämmung zur Raumseite hin mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse versehen. Eingezeichnet ist die Anordnung der Holzfeuchtemeßstellen.

Die Fertigstellung des Wandaufbaus erfolgte von Juli bis September 2000. Mit der Messung der Holzfeuchte konnte im August 2000 begonnen werden. Während der ersten Winterperiode (Dezember 2000 bis März 2001) wurde der Innenraum auf ca. 20 °C und 60% r. F. klimatisiert, um extreme Raumklimabedingungen zu simulieren. In der zweiten Winterperiode (Dezember 2001 bis März 2002) wurde die Raumlufttemperatur im Mittel auf 20 °C und die Raumluftfeuchte auf ca. 50 % eingestellt.

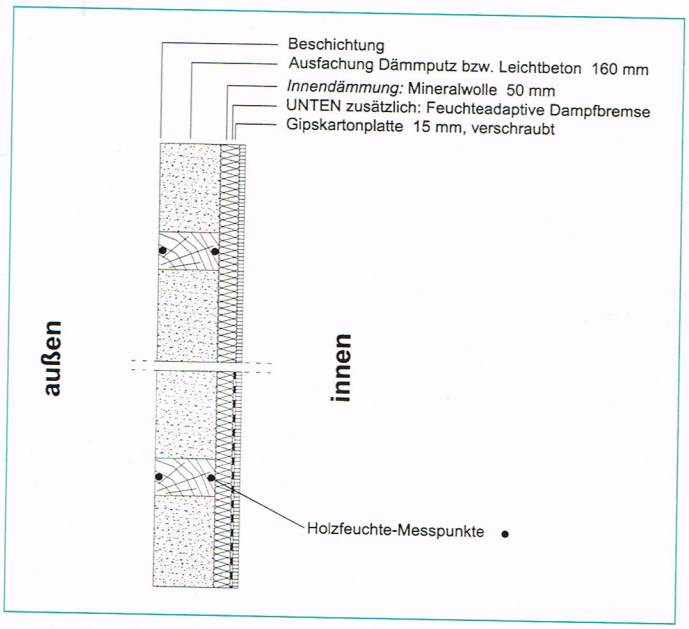

Bild 4 Schematische Darstellung des untersuchten Wandquerschnittes am Fachwerkhaus. Dämmputz bzw. Leichtbeton als Ausfachungsmaterial. Mit angegeben ist die geometrische Verteilung der Holzfeuchte-Meßstellen.

Ergebnisse

Bild 5 zeigt die Verläufe der Holzfeuchte auf der zum Raum hin liegenden Seite des Fachwerkholzes bei der in Bild 4 gezeigten Variante mit Leichtbeton als Ausfachungsmaterial. Man erkennt für die dargestellte Nordseite deutlich den Feuchteanstieg im Winter auf knapp 25 M.-% im Falle einer fehlenden Dampfsperre bzw. -bremse. Die als kritisch einzustufende Holzfeuchte von 20 M.-% gemäß DIN 68800 Teil 2 [12] wird über einen längeren Zeitraum überschritten, während sich mit Dampfbremse, auf die gesamte Meßzeit bezogen, unkritische Werte einstellen. Insgesamt ergeben sich dort Holzfeuchten zwischen 10 und 15 M.-%. Generell liegen aufgrund der höheren solaren Einstrahlung die gemessenen Werte der Holzfeuchte auf der Südseite niedriger als auf der Nordseite (nicht dargestellt).

Um zur Ergänzung der experimentellen Ergebnisse das langfristige Feuchteverhalten zu klären, wurden mit Hilfe des Programms WUFI-2D [4] für die zweidimensionalen instationären

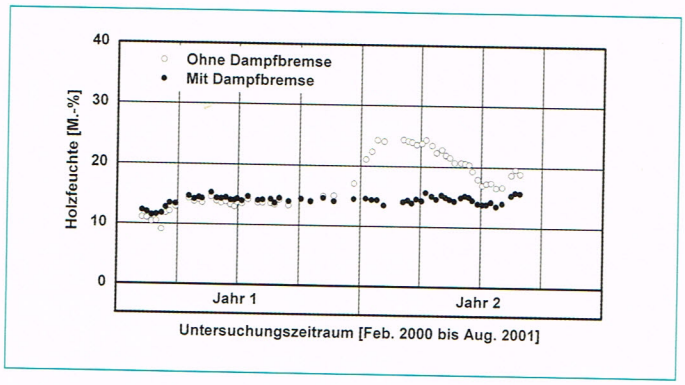

Bild 5 Gemessene Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des oberen und unteren Querriegels (ohne Dampfbremse und mit feuchteadaptiver Dampfbremse) auf der Nordseite des Fachwerkhauses für das in Bild 4 dargestellte Gefach mit Leichtbeton als Ausfachungsmaterial. Ab Dezember 2000 wurde die Innenraumluftfeuchte von 50 auf 60 % angehoben, um extreme Raumklimabedingungen zu simulieren

Wärme- und Feuchtetransportvorgänge Berechnungen durchgeführt. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, muß bei komplexen rechnerischen Untersuchungen generell als erster Schritt eine Validierung erfolgen, die im vorliegenden Fall eine gute Überstimmung von Rechnung und Messung ergab [11]. Somit kann davon ausgegangen werden, daß auch die Berechnung des langfristigen Verhaltens verschiedener Varianten die realen Effekte korrekt wiedergibt. Bei den Berechnungen wird aus Vergleichsgründen für das Holz als Startwert von einem massebezogenen Feuchtegehalt von 20 % ausgegangen. Als Außenklima dienen Holzkirchner Wetterdaten von 1991, wobei für mehrjährige Berechnungen der Datensatz mehrfach durchlaufen wird. Startzeitpunkt der Berechnungen ist der Oktober. Für das Innenklima werden konstante Verhältnisse von 20 °C und 50 % r.F.

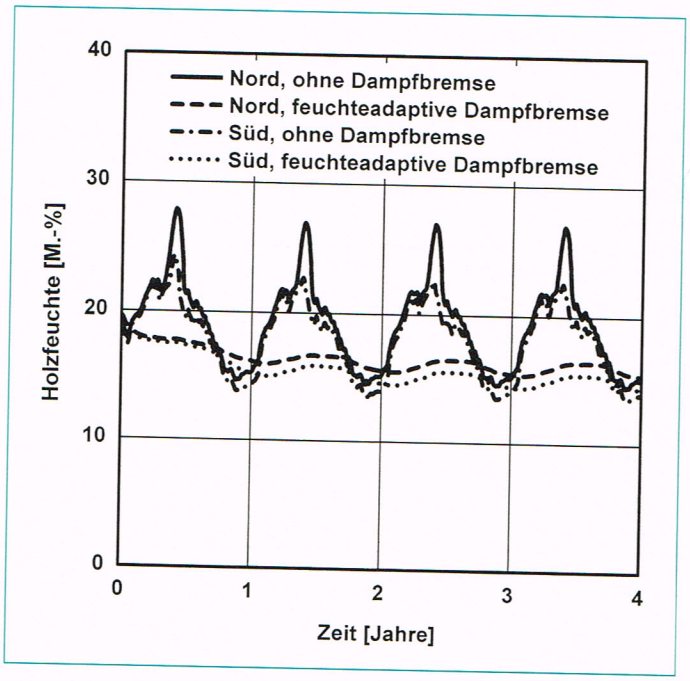

Bild 6 Für einen Zeitraum von vier Jahren berechnete Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des oberen und unteren Querriegels auf der Nord- und Südseite des Fachwerkhauses mit und ohne feuchteadaptiver Dampfbremse bei einer Innenraumluftfeuchte von 50 %.

angenommen. Bild 6 zeigt für einen Zeitraum von vier Jahren den Verlauf der Holzfeuchte für die Variante mit und ohne feuchteadaptive Dampfbremse. Ohne Dampfbremse steigt der Feuchtegehalt auf der Nord- und Südseite jeweils im Winter stark an und es werden auf der Nordseite Werte bis 28 M.-% erreicht. Durch die sommerliche Trocknung sinkt die Holzfeuchte bis auf 15 M.-%. Trotzdem liegen für Zeiträume von jährlich drei bis vier Monaten Holzfeuchten über 20 M.-% vor. Die Variante mit feuchteadaptiver Dampfbremse trocknet im ersten Jahr, bis ein Feuchtegehalt von ca. 15 M.-% erreicht wird. Im weiteren Zeitverlauf schwankt die Holzfeuchte jahreszeitlich bedingt und liegt im Mittel bei 15 M.-%. Man erkennt, daß erwartungsgemäß die Südwand trockener bleibt als die Nordwand.

Trotz ähnlichen Aufbaus (Ausfachung Dämmputz statt Leichtbeton) wurden in einem anderen Bereich der Fachwerkfassade wesentlich höhere Wassergehalte beobachtet. Die zeitlichen Verläufe der Holzfeuchte, gemessen auf der Innenseite des oberen und unteren Querriegels für die Variante gemäß Bild 4 mit Dämmputz als Ausfachungsmaterial, sind in Bild 7 wiedergegeben. Der Verlauf der Holzfeuchte zeigt bei der Variante ohne Dampfbremse im Januar 2001 einen extremen Anstieg, sowohl für die Nord- als auch die Südseite. Es werden Holzfeuchten über 80 M.-% gemessen. Anschließend findet bis zum Sommer eine Austrocknung auf ca. 20 M.-% statt. In der zweiten Winterperiode ist eine geringfügige Zunahme der Holzfeuchte zu verzeichnen. Bei der Variante mit feuchteadaptiver Dampfbremse steigt die Holzfeuchte nur auf der Nordseite im Januar 2001 extrem an. Anschließend nimmt sie langsam bis auf 25 M.-% ab. Auf der Südseite dagegen bleibt die Holzfeuchte erwartungsgemäß unter 20 M.-%.

Die gemessenen extrem hohen Feuchtegehalte sind nicht durch anfallendes Tauwasser zu erklären, da ein derart schneller Feuchteanstieg nicht über Diffusionsvorgänge erfolgen kann. Es müssen in der ersten Winterperiode äußere Einflüsse (Unwetter Lothar) dazu geführt haben, daß in die Konstruktion Wasser von außen eingedrungen ist. Eine vergleichende Bewertung verschiedener Varianten ausschließlich anhand der Meßverläufe der Holzfeuchte ist deshalb nicht möglich. Aus diesem Grund werden wiederum zusätzlich zu den Messungen rechnerische Untersuchungen mit WUFI durchgeführt. Bild 8 zeigt die berechneten Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite eines Querriegels auf der Nordseite für das Austrocknungsverhalten der Variante mit feuchteadaptiver und herkömmlicher Dampfbremse (Membran mit einem s_d-Wert von 2 m) sowie mit einer Dampfbremse aus Polyethylen. Deutlich zeigt sich das rasche Austrocknen mit feuchteadaptiver Dampfbremse, während sich bei einem konstanten s_d-Wert von 2 m im Sommer etwas höhere Werte der Holzfeuchte ergeben. Bei Verwendung der Dampfbremse mit einem s_d-Wert von 50 m werden aufgrund von Umkehrdiffusion, wobei durch die Erwärmung der Außenoberfläche die Feuchte aufgrund des sich einstellenden Wasserdampfpartialdruckgefälles nach innen getrieben wird, vorübergehend Feuchtegehalte von bis zu 40 M.-% erreicht.

Die für die Untersuchungen eingesetzte feuchteadaptive Dampfbremse kann als trocknungsfördernd bezeichnet werden, da sie, wie die Messungen belegen, im Vergleich zu herkömmlichen Dampfbremsfolien bei gleichem Tauwasserschutz eine verbesserte Austrocknung ermöglicht. Der Grund dafür ist, daß sie, wie u.a. in [13, 14] gezeigt, ihren Sperrwert in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ändert. Dadurch kann sie im Sommer, wenn die Fachwerkwand nach innen trocknen soll, im Extremfall so dampfdurchlässig werden wie eine Gipskartonplatte (s_d-Wert: 0,1 m). Bei den Temperatur- und Feuchteverhältnissen im Winter bietet sie mit einem s_d-Wert von etwa 4 m dennoch einen ausreichenden Tauwasserschutz. Sollte bei einer Fachwerkkonstruktion aus unterschiedlichen Gründen Wasser von außen eindringen, was nicht auszuschließen ist, da sich zwischen Holz und Ausfachung durch Schwinden Fugen bilden können, ermöglicht die feuchteadaptive Dampfbremse im Vergleich zu einer herkömmlichen Dampfbremse ein schnelleres Austrocknen der Konstruktion.

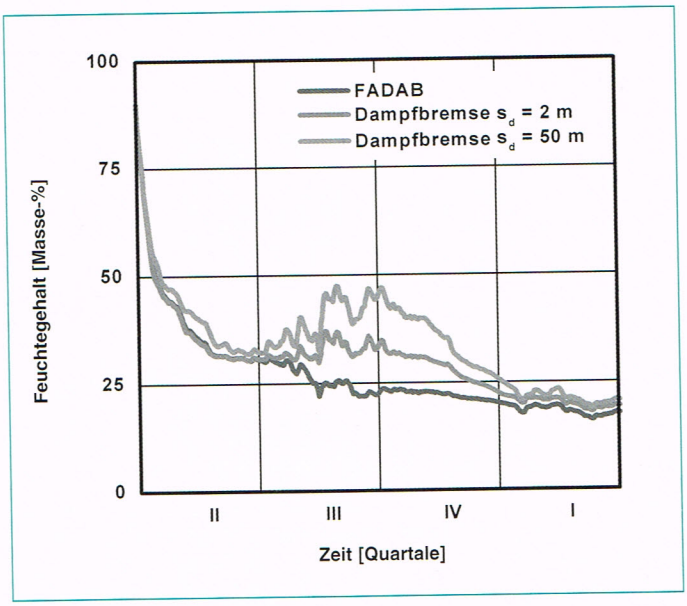

Bild 8 Berechnete Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite eines Querriegels auf der Nordseite für das Austrocknungsverhalten der Variante mit feuchteadaptiver Dampfbremse (FADAB) und herkömmlicher Dampfbremse mit niedrigem und hohem Diffusionswiderstand (FADAB: unten, Dampfbremse s_d = 2 m: Mitte, Dampfbremse s_d = 50 m: oben).

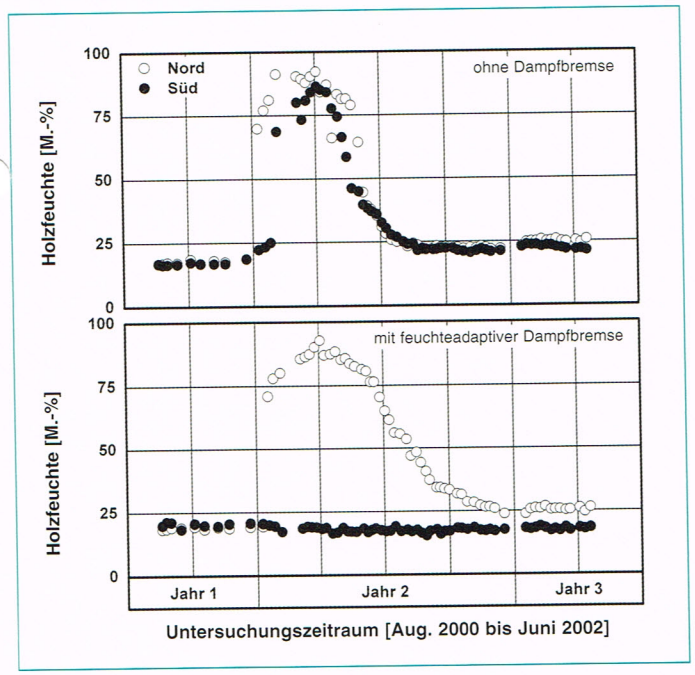

Bild 7 Gemessene Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des oberen und unteren Querriegels (ohne und mit feuchteadaptiver Dampfbremse) auf der Nord- und Südseite des Fachwerkhauses für das in Bild 4 dargestellte Gefach mit Dämmputz als Ausfachungsmaterial.

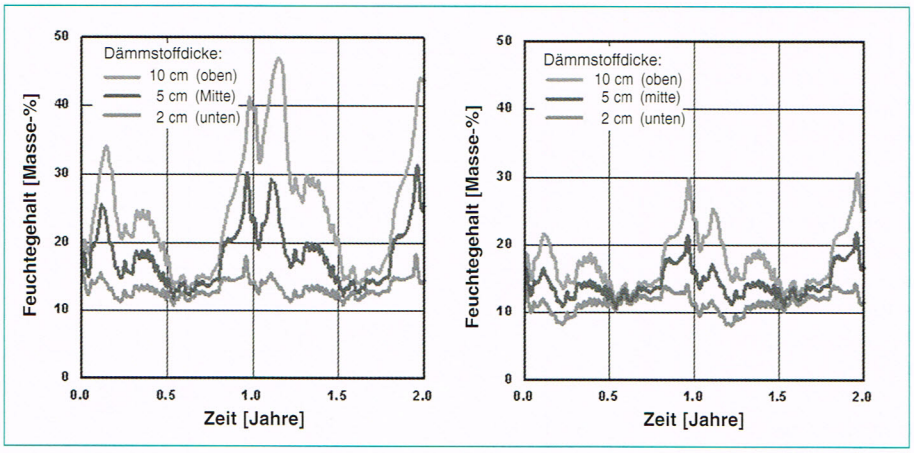

Bild 9 Mit dem Rechenverfahren WUFI ermittelte Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des Querriegels ohne Dampfsperre bzw. Dampfbremse auf der Nordseite einer Fachwerkwand bei unterschiedlichen Dicken der innenseitigen Dämmung. Links: für eine normale Feuchtelast (im Winter ca. 40% r.F.) Rechts: für eine geringe Feuchtelast (im Winter ca. 30 % r.F.).

Um zu klären, ob immer eine innenseitige Dampfbremse erforderlich ist, werden für einen Aufbau ohne Dampfbremse die Feuchtegehalte im Fachwerkholz bei Annahme einer geringen (im Winter im Mittelwert 30 % r.F.) bzw. normalen Feuchtelast, die im Winter etwa 40 % r.F. im Raum bedeutet, berechnet. Aus den in Bild 9 dargestellten Ergebnissen wird deutlich, daß sich bei geringer Feuchtelast innere Dämmschichtdicken von bis zu 5 cm ohne Schadensrisiko verbauen lassen. Dies erklärt auch die Tatsache, daß viele Fachwerkinnendämmungen schadensfrei bleiben, obgleich eine Dampfbremse fehlt.
Zusammenfassend ist festzustellen, daß sich lediglich bei geringen Feuchtelasten Fachwerkinnendämmungen ohne Dampfbremsen bewerkstelligen lassen, während bei allen anderen Fällen stets der Dampfdiffusionsstrom begrenzt werden muß. Bild 10 zeigt dazu die nach *Künzel* [15] erforderlichen s_d-Werte in Abhängigkeit vom Wärmedurchlaßwiderstand der Innendämmung. Sind die Anschlüsse aber nicht dauerhaft sicher ausgeführt, sollte der Wärmedurchlaßwiderstand auf 1 m^2K/W begrenzt bleiben, um eine nachteilige Feuchteerhöhung im Bereich der Balkenköpfe zu vermeiden.

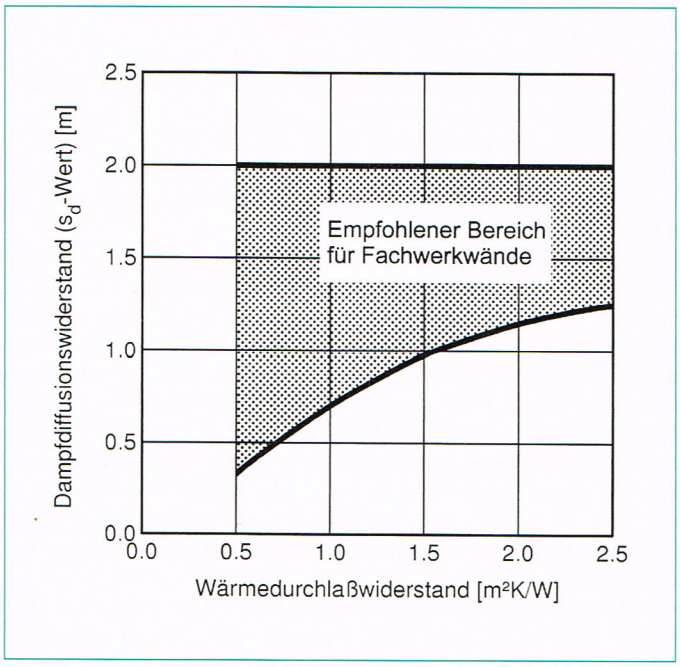

Bild 10 Erforderliche raumseitige s_d-Werte in Abhängigkeit vom Wärmedurchlaßwiderstand der Innendämmung nach Künzel [15].

4.2 Einsatz einer kapillaraktiven Innendämmung

Untersuchungsvarianten

Die zur Untersuchung der Wirkung kapillaraktiver Innendämmungen aufgebauten Varianten, wie sie beispielsweise in [16] beschrieben sind, sind in Bild 11 dargestellt. Eingezeichnet ist jeweils die Anordnung der Holzfeuchtemeßstellen. Bei beiden Untervarianten wurde zusätzlich oben zwischen Ausfachung bzw. Querbalken und Innendämmung eine Entkopplungsschicht aus Drahtgeflecht eingebracht, um zu klären, ob ein vollflächiger idealer hygrischer Kontakt Voraussetzung für die Wirksamkeit eines kapillaraktiven Dämmstoffes ist. Die Variante mit Vollziegelausfachung soll die Verhältnisse bei einem Altbau repräsentieren, bei dem zusätzlich eine Innendämmung aufgebracht wird. Bei der anderen Variante besteht die Ausfachung aus Porenbeton der Rohdichteklasse 600. Als Innendämmstoff wird für beide Ausfachungsmaterialien eine Porenbetondämmplatte mit einer Rohdichte von ca. 115 kg/m^3 eingesetzt. Die bei den meßtechnischen Untersuchungen vorhandenen Randbedingungen entsprechen den in Abschn. 4.1 beschriebenen.

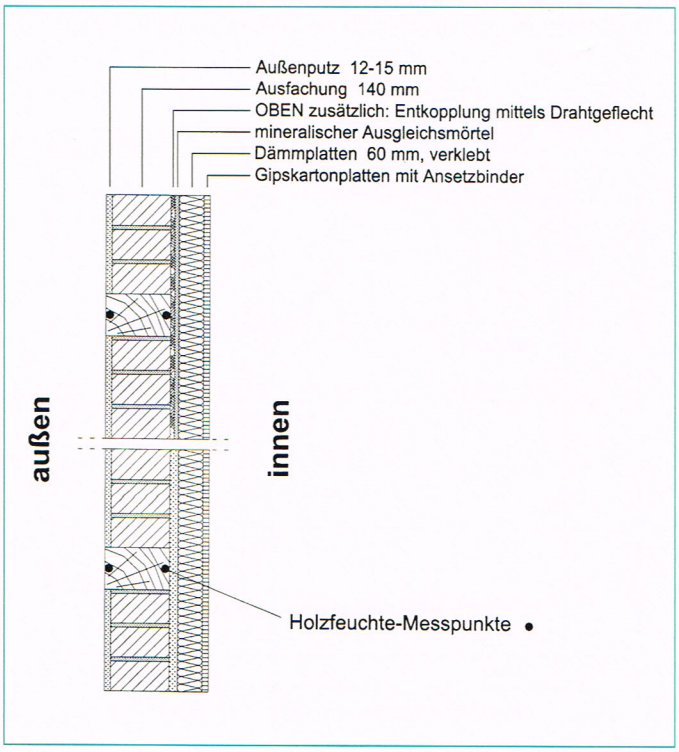

Bild 11 Schematische Darstellung des Wandquerschnitts zur Untersuchung der Wirkung kapillaraktiver Dämmplatten am Fachwerkhaus (Variante 1 Ausfachung aus Vollziegel und Variante 2 Ausfachung aus Porenbeton). Mit angegeben ist die geometrische Verteilung der Holzfeuchte-Meßstellen.

Ergebnisse

Die zeitlichen Verläufe der Holzfeuchte für die Variante mit Vollziegel- und Porenbetonausfachung, gemessen auf der Innenseite der oberen und unteren Querriegel, sind in Bild 12 wiedergegeben. Die Holzfeuchte zeigt bei der Ausfachung mit Vollziegel sowohl auf der Süd- als auch auf der Nordseite kritische Werte. Bei der Variante mit Porenbetonausfachung liegen die Holzfeuchten auf der Innenseite zu Beginn der Messungen bei 18 M.-% und sinken im Laufe des Sommers auf 15 M.-% ab. In der zweiten Winterperiode (60 % Raumluftfeuchte im Winter 2000/2001) steigen die Feuchten bis zu einem Maximalwert von 22 M.-%, der im März und April 2001 erreicht wird. Danach findet eine langsame Trocknung statt. Die Holzfeuchte ist vor allem in der zweiten Sommerperiode auf der Südseite niedriger als auf der Nordseite. Zwischen der Variante oben (Entkopplung durch Drahtgeflecht) und unten (ohne Entkopplung) ist bei allen Varianten kein grundlegender Unterschied festzustellen.

Die berechneten Verläufe der Holzfeuchte im Querbalken werden in [17] den Meßergebnissen gegenübergestellt. In allen Fällen wird eine gute Übereinstimmung zum Experiment erreicht, d. h. die Validierung war erfolgreich. Aus Vergleichsgründen wird bei der Berechnung des langfristigen Verhaltens vom praktischen Feuchtegehalt, d.h. von einem Sorptionsfeuchtegehalt entsprechend 80 % r. F. ausgegangen. Als Außenklima dienen auch hier die Holzkirchner Standardwetterdaten, wobei für mehrjährige Berechnungen diese Daten mehrfach durchlaufen werden. Startzeitpunkt der Berechnungen ist der Oktober. Für das Innenklima werden konstante Verhältnisse angenommen, d. h. 20 °C und 50 % r. F. Bei den Berechnungen des langfristigen Verhaltens werden im Unterschied zu den Messungen oberflächennähere Bereiche der Holzbalken untersucht, da dort zeitweise höhere und damit kritischere Feuchtegehalte zu erwarten sind. Bild 13 zeigt für einen Zeitraum von zwei Jahren den berechneten Verlauf der Holzfeuchte bei der Ausfachung mit Vollziegel und Porenbeton für die nord- und südorientierte Wand, jeweils oben und unten, d. h. ohne und mit Kapillarkontakt zwischen Porenbetondämmplatte und Ausfachung bzw. Holzbalken. Man erkennt zum einen, daß erwartungsgemäß die Südwand merklich trockener bleibt als die Nordwand. Ferner bestätigt auch die Berechnung den mit der Zeit auf kritische Werte ansteigenden Holzfeuchtegehalt in der Variante mit Vollziegelausfachung. Ein wesentlicher Einfluß des hygrischen Kontakts kann auch rechentechnisch nicht festgestellt werden.

Um nun den möglichen Einfluß der Kapillaraktivität zu bestimmen, wird mit Hilfe zweidimensionaler Berechnungen das Austrocknungsverhalten eines stark befeuchteten Querriegels mit 80 M.-% (vgl. Sturmschaden Lothar, Bild 7) berechnet. Als Innendämmung wurde dabei eine kapillaraktive Calciumsilikatplatte mit 12 cm Dicke angesetzt, da sie eine deutlich höhere Kapillaraktivität als die Porenbetonplatte aufweist. Bild 14 gibt die Modellierung des Konstruktionsaufbaus wieder.

Bild 15 rechts zeigt den zeitlichen Verlauf der Holzfeuchte für die drei gerechneten Varianten, wobei zur Modellierung eines Schadensfalls auf die Feuchtegehalte des Holzes zurückgegriffen wurde, wie sie sich nach dem Unwetterschaden meßtechnisch zeigten (Bild 7). Die schnellste Austrocknung ergibt sich im Falle der exakten rechentechnischen Abbildung der Kalziumsilikatplatte mit hygrischem Kontakt. Ohne hygrischen Kontakt werden kurzzeitig etwas höhere Holzfeuchten festgestellt. Schaltet man, was rechentechnisch einfach möglich ist, die Kapillarleitung aus, so ist unschwer ein langsameres Austrocknen festzustellen. Ohne Kapillarleitung ergeben sich auch ohne Unwetterschaden, wie Bild 15 links zeigt, höhere Holzfeuchtewerte, die

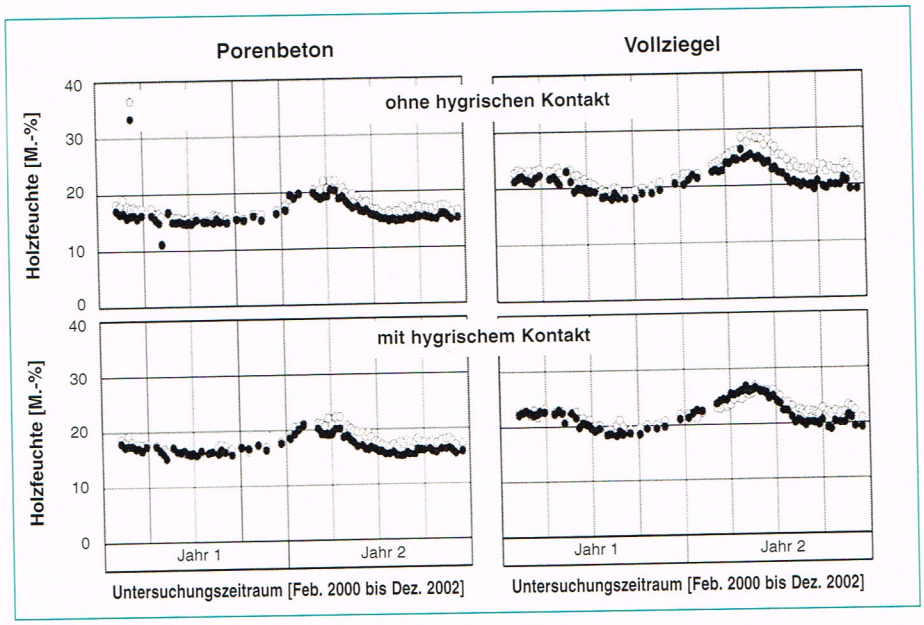

Bild 12 Gemessene Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des oberen und unteren Querriegels für die Variante mit Ausfachung aus Vollziegel (Bild rechts) und Porenbeton (Bild links) auf der Nord- und Südseite des Fachwerkhauses.

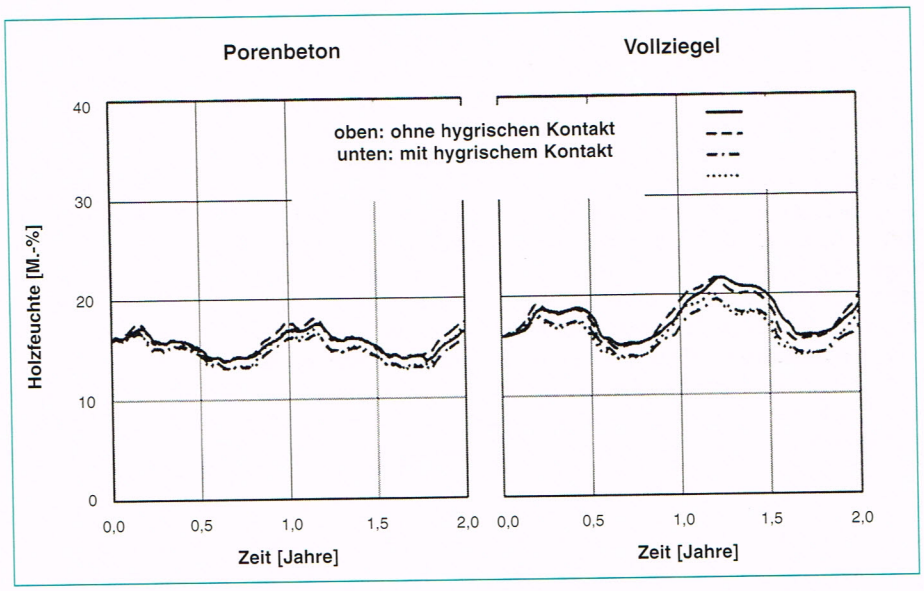

Bild 13 Für einen Zeitraum von 2 Jahren berechnete Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des Querriegels für die Variante mit Ausfachung aus Vollziegel (Bild rechts) und Porenbeton (Bild links) auf der Nord- und Südseite des Fachwerkhauses.

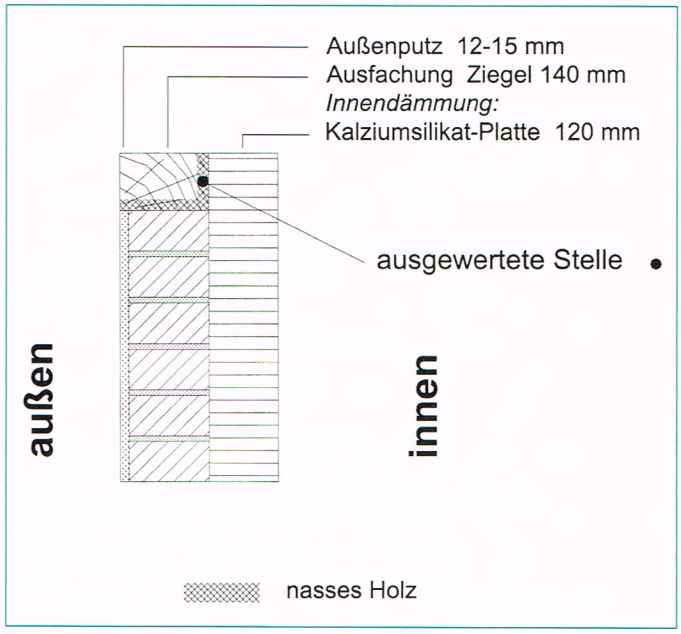

Bild 14 Modellierung des Konstruktionsaufbaus bei der Berechnung der Holzfeuchte zur Untersuchung des Einflusses des hygrischen Kontakts und der Kapillarleitung.

zeitweise auch die 20 M.-% übersteigen. Bei diesen Ergebnissen ist zu berücksichtigen, daß die zugrunde gelegten Materialkennwerte nicht eigenen Messungen entstammen und derzeit noch nicht nachgemessen werden konnten. Außerdem steht eine Überprüfung im Freilandversuch noch aus.

Aus den dargelegten Ergebnissen wird klar, daß die Wirkung kapillaraktiver Innendämmsysteme zu niedrigen Holzfeuchten führen kann, auch wenn, was für Fachwerkbauten aufgrund des jahreszeitlich bedingten Schwind- und Quellverhaltens typisch ist, kein hygrischer Kontakt langzeitig bewerkstelligt werden kann. Allerdings muß auch bei Einsatz biegesteifer Dämmplatten dauerhaft sichergestellt sein, daß keine Hinterströmung auftritt und der Anschluß an die flankierenden Bauteile fachgerecht ausgeführt wird. Sind beide Bedingungen gegeben, kann auch mit Dämmschichtdicken bis zu 10 cm gearbeitet werden, wie weitergehende, aber hier nicht dargestellte Berechnungen zeigen.

5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Bei energetischen Sanierungen von Fachwerkbauten sind die geltenden Bestimmungen zur Energieeinsparung und zum klimabedingten Feuchteschutz zu erfüllen. Dabei sind aus feuchteschutztechnischer Sicht generell folgende Punkte zu beachten:

- Die Außenwände sollten im Sinne des Mindestwärmeschutzes einen Wärmedurchlaßwiderstand von 1,0 m^2K/W aufweisen.
- Vor dem Freilegen einer Fachwerkfassade ist zu prüfen, ob die Schlagregenbeanspruchung tatsächlich gering genug ist. Da Schlagregen stets in die Fugen des Fachwerkverbands eindringen kann, ist für ein ausreichendes Trocknungspotential zu sorgen. Außenputz und Anstriche der Ausfachung sollten dampfdurchlässig und nicht zu hydrophob sein. Ferner sind wärmedämmende und diffusionsoffene Ausfachungsmaterialien vorzuziehen.
- Der Feuchteeintrag beim Ausfachen oder beim Applizieren raumseitiger Putze und Bekleidungen soll so gering sein, daß die Baufeuchte innerhalb von sechs Monaten austrocknet.
- Luftkonvektion führt zu erheblichen Feuchteschäden sowie unnötig hohen Lüftungswärmeverlusten. Es ist daher unbedingt auf eine luftdichte Ausführung aller Bauteile und Anschlußbereiche zu achten. Hohlräume im Bereich der Dämmung sind zu vermeiden. Dabei ist zu bedenken, daß beidseitig fachwerksichtige Wände in der Regel nicht ausreichend luftdicht auszuführen sind.
- Besonders günstig ist eine Ausfachung mit ähnlichem Wärmedurchlaßwiderstand wie das Holzfachwerk, da dies zum einen zu einer gleichmäßigen Temperaturverteilung auf der Innenoberfläche führt und damit ein Abzeichnen der Ausfachung durch Verschmutzung verhindert. Wesentlicher ist aber, daß damit eine deutlich geringere Feuchtebelastung des Holzes erreicht wird.

Unter Voraussetzung der Erhaltung des äußeren Erscheinungsbildes der Fachwerkfassade bleibt, um die energetischen Anforderungen zu erfüllen, als einzig mögliche Wärmeschutzmaßnahme die Anbringung einer Wärmedämmung auf der Innenseite der Außenwand. Innendämmungen verringern die Feuchtetoleranz der Konstruktion und müssen daher entsprechend sorgfältig geplant und ausgeführt werden. Der Dampfdiffusionswiderstand (s_d-Wert) der Innendämmung inklusive Innenbeplankung und eventueller Dampfbremse sollte mindestens 0,5 m betragen, sofern nicht dauerhaft eine Nutzung mit geringer Feuchtelast sichergestellt werden kann (Büronutzung). Beim Einsatz von Faserdämmstoffen ist die Anwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse mit variablem s_d-Wert vorteilhaft. Im Vergleich zu herkömmlichen Dampfbremsfolien bietet sie bei gleichem Tauwasserschutz eine verbesserte Austrocknung im Sommer. Sollte bei einer Fachwerkkonstruktion aus unterschiedlichen Gründen Wasser von außen eindringen, ermöglicht die feuchteadaptive Dampfbremse im Vergleich zu einer herkömmlichen Dampfbremse ein schnelleres Austrocknen der Konstruktion. Sind die

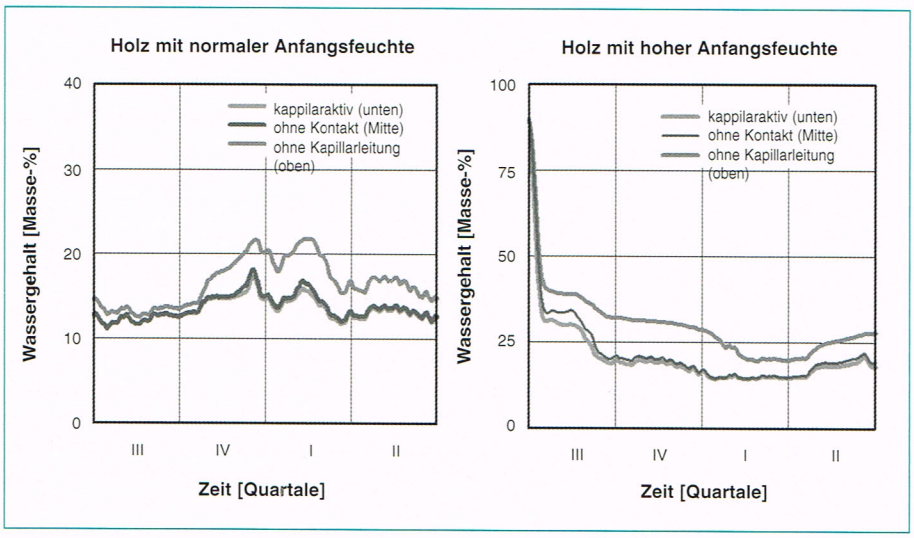

Bild 15 Berechnete Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des Querriegels für die Variante mit Ziegelausfachung auf der Nordseite des Fachwerkhauses mit und ohne hygrischen Kontakt bzw. ohne Kapillarleitung für den Fall normaler Holzfeuchte beim Beginn der Berechnungen (Bild links) sowie nach durch Unwetter eingedrungener Feuchte (Bild rechts).

o. g. handwerklichen und bauphysikalischen Anforderungen erfüllt, kann auch eine Innendämmung mit einem gegenüber den WTA-Empfehlungen größeren Wärmedurchlaßwiderstand bewerkstelligt werden.
Ergänzende meßtechnische und rechnerische Untersuchungen zur Wirksamkeit von kapillaraktiven Innendämmungen zeigen vor allem am Beispiel einer Kalziumsilikatplatte, daß die erhoffte Wirkung der Kapillaraktivität bei „normalen" sowie vor allem bei schadhaft hohen Feuchtegehalten gezeigt werden kann. Dabei setzt – auch schon bevor Tauwasser anfällt – im hygroskopischen Feuchtebereich ein Kapillartransport ein (die sog. Oberflächendiffusion), der zu einem Feuchtetransport entgegen dem Wasserdampfpartialdruckgefälle führt. Auch für diese Art der Innendämmung gilt, daß bei richtiger handwerklicher Ausführung für die Innendämmung größere Wärmedurchlaßwiderstände ohne Schaden gebaut werden können als gemäß den WTA-Richtlinien. Eine Überprüfung im Freilandversuch sollte möglichst rasch erfolgen.

Literatur

[1] DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (2001 – 03).

[2] DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung (2001 – 07).

[3] WTA-Merkblatt 8-1-96: Bauphysikalische Anforderungen an Fachwerkfassaden. Oktober 1997.

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

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

[6] *Künzel, H.M:* Fachwerksanierung ohne Feuchteschäden. WTA-Kompendium I, Fachwerkinstandsetzung nach WTA, Band 2; Fraunhofer-IRB Verlag, 2002, S. 43 – 49.

[7] *Leimer, H.-P.*: Beitrag zur Bestimmung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen bei der Sanierung historischer Fachwerkgebäude. Dissertation Hochschule Weimar, 1991.

[8] Verordnung über den energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung–EnEV); in Kraft seit 2002 – 02.

[9] *Künzel, H.M.*: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen. IBP-Mitteilung 24 (1997), Nr. 314.

[10] WTA-Merkblatt 8-3-98: Fachwerkinstandsetzung nach WTA, Beschichtungen auf Fachwerkwänden und Holz. November 1998.

[11] *Zillig, W.; Fitz, C.; Sedlbauer, K.*: Austrocknungsverhalten einer Fachwerkwand im Schadensfall. IBP-Mitteilungen 29 (2002), Nr. 410.

[12] DIN 68800 Teil 2, Holzschutz im Hochbau, Ausgabe Mai 1996.

[13] *Künzel, H.M. und Kasper, F.-J.*: Von der Idee einer feuchteadaptiven Dampfbremse bis zur Markteinführung. Bauphysik 20 (1998), H. 6, S. 257-260.

[14] *Künzel, H.M.*: Feuchtesichere Altbausanierung mit neuartiger Dampfbremse. Bundesbaublatt 45 (1996), H. 10, S. 798-801.

[15] *Künzel, H.M.*: Feuchtetechnische Anforderungen an Wärmeschutzmaßnahmen bei Fachwerkaußenwänden. 2. Intern. Kongress zur Bauwerkserhaltung, Berlin 9.-11. Februar 1994 S. 209-214.

[16] *Häupl, P. et al.*: Energetische Verbesserung der Bausubstanz mittels kapillaraktiver Innendämmung. Bauphysik 21 (1999), H. 4, S. 145-154.

[17] *Krus, M.; Fitz, C.; Zillig, W.; Sedlbauer, K.*: Fachwerkausfachungen und Innendämmungen mit Leichtbeton. Untersuchungen am „Fachwerkhaus Holzkirchen". Bericht HTB-19/2002 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.

Studienrichtung Gebäudetechnik und Bauphysik an der FH Coburg

Die Fachhochschule Coburg bietet seit dem Wintersemester 2002/2003 im Studiengang Bauingenieurwesen die Studienrichtung Gebäudetechnik und Bauphysik an. Hierbei handelt es sich um ein neues Studienkonzept, das die sonst getrennten Disziplinen Gebäudetechnik und Bauphysik verbindet.
Trotz stagnierender Auftragslage auf dem Bausektor ist der Bedarf an Ingenieuren für Gebäudetechnik und/oder Bauphysik seit Jahren steigend. Denn die Planung wie auch die Sanierung von Gebäuden stützt sich in zunehmendem Maße auf eine fundierte bauphysikalische und haustechnische Beratung. Gebäudetechniker und Bauphysiker beeinflussen heute neben Architekten und Tragwerksplanern entscheidend die Gestaltung von Gebäuden und die Entwicklung neuer Bauteile bzw. innovativer haustechnischer Einrichtungen. So hat die Energieeinsparverordnung 2002 zu einem weiteren Bedarfsanstieg an Fachingenieuren mit interdisziplinären Kenntnissen auf den Gebieten der Anlagentechnik und des Wärmeschutzes geführt.
Im Grundstudium stehen mathematisch-naturwissenschaftliche und baukonstruktive Grundlagenfächer im Vordergrund. Das Hauptstudium konzentriert sich auf die Vermittlung von Kernkompetenzen der technischen Gebäudeausrüstung (Gebäudetechnik, Gebäudeautomation, Lichttechnik und Brandschutz) und der Bauphysik (Wärme-, Feuchte- und Schallschutz von Gebäuden) bis hin zur Gebäudeklimatik bzw. -simulation. Zur Vermittlung der praktischen Kompetenz stehen modern eingerichtete Labore für Gebäudetechnik und Bauphysik zur Verfügung. Das fachübergreifende Studienkonzept berücksichtigt die aktuellen Anforderungen an die ganzheitliche Bewertung und die Planung von ökologisch und energetisch/wirtschaftlich optimierten „intelligenten" Gebäuden der Zukunft.

Information:
FH Coburg
Tel.: 09561/317-234
sekretariat@leo.fh-coburg.de

Anzeige