

Möglichkeiten der Innendämmung beim Fachwerkbau

Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer, Dr.-Ing. Martin Krus
Fraunhofer-Institut für Bauphysik

1 Hintergrund 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. Dabei sind Schlagregen- und Tauwasserschutz von entscheidender Bedeutung für den Erhalt und die Dauerhaftigkeit von Fachwerkgebäuden. Ausgehend von bekannten Weisheiten 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) mit dem Titel "Bauphysikalische Anforderungen an Fachwerkfassaden" [3] dargelegt sind, 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 Dämmstoffe sowie auf den Einsatz von intelligenten Dampfbremsen eingegangen.



Bild 1 Fotografische Aufnahme des Fachwerkhouses auf dem Freigelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen.

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 festzulegen 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 muss konstruktiver Regenschutz vorgenommen werden.

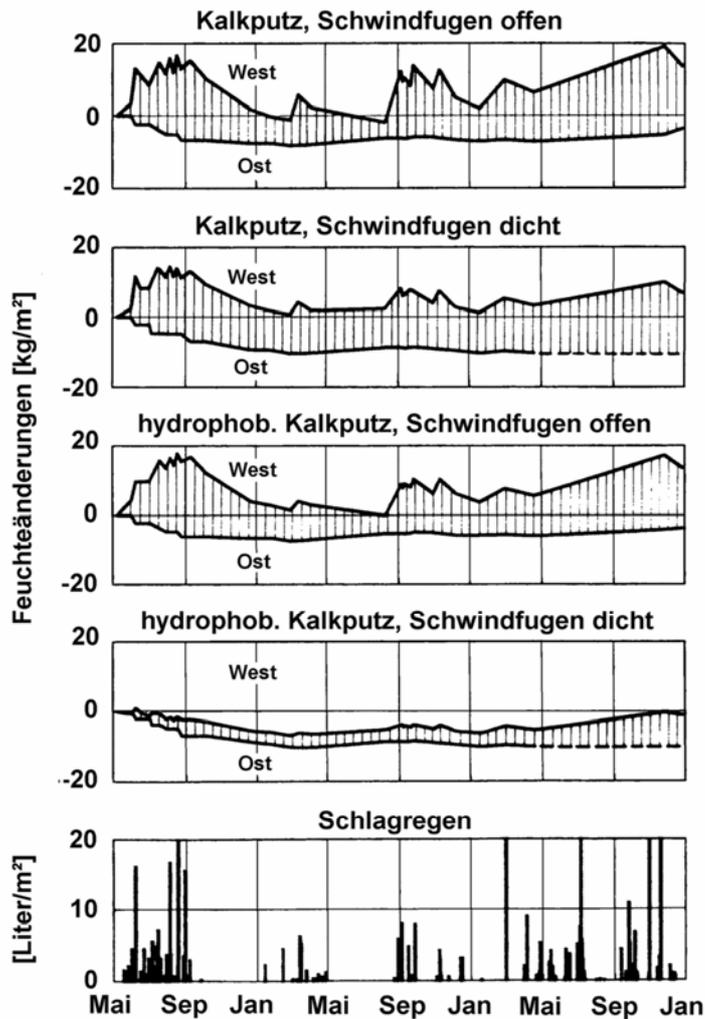


Bild 2 Zeitverläufe der Feuchteänderungen von Fachwerkelementen mit Ausfachung durch Porenbetonmauerwerk bei Orientierung nach Westen (Schlagregen) und Osten (geschützt) bei Variation des Außenputzes und der Fugenausführung aus [5].

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 beispielhaft 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 hydropho-

bierten 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. Diese sowie weitere Untersuchungen belegen, dass eine dauerhafte Fugenabdichtung nicht möglich ist.

Um Schäden zu vermeiden, muss daher 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 [5] sind historische und moderne Lehmbaustoffe eher ungünstig. 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 anhand von Bild 3 verdeutlicht wird. 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 Dampfsperre beinhaltet, dann ist für die Feuchte der Weg nach innen weitgehend unterbunden. Zusätzlich wird durch die Innendämmung, ausser im Hochsommer, das Temperaturniveau der dahinterliegenden 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.

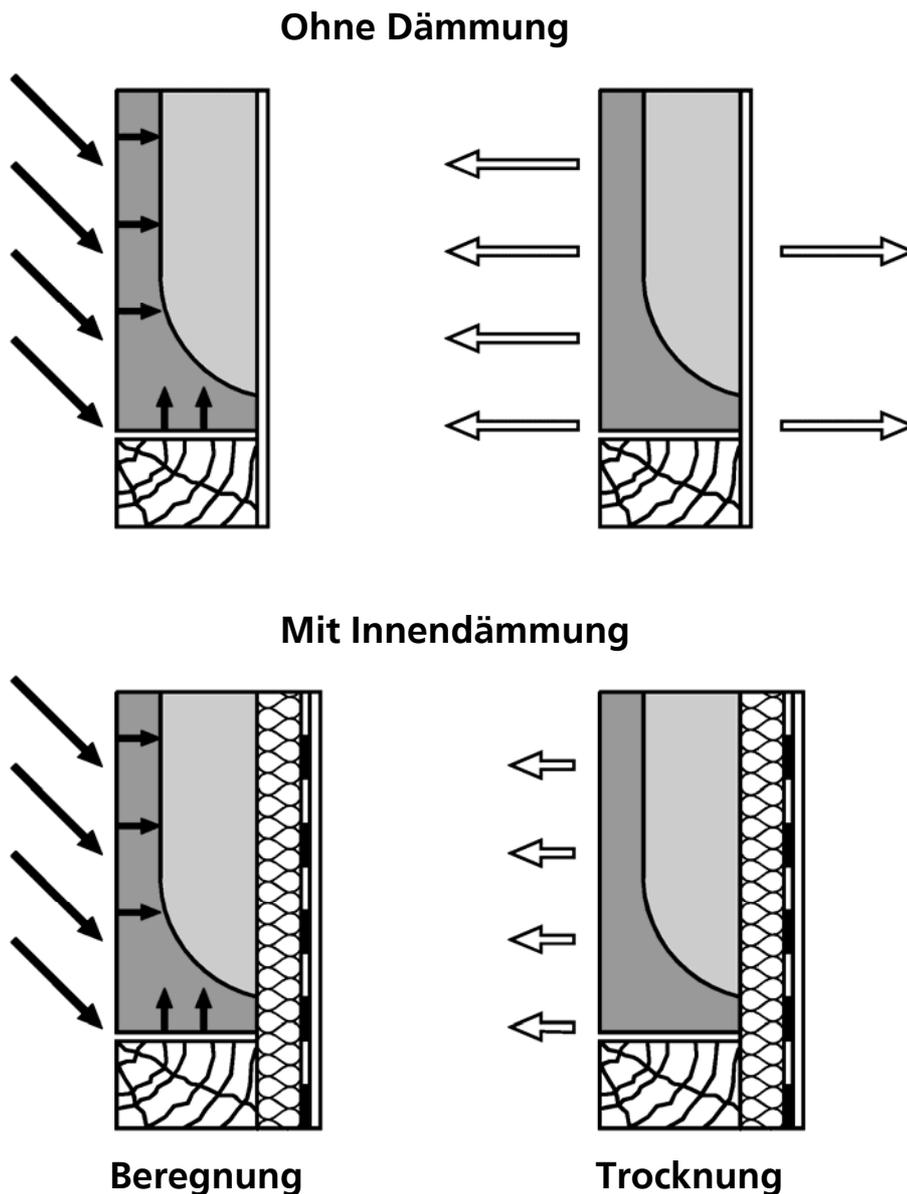


Bild 3 Schematische Darstellung der Befeuchtung und Trocknung einer Fachwerkwand ohne Dämmung und mit Innendämmung inklusive Dampfsperre. Im Gegensatz zur schlagregenbedingten Feuchteaufnahme, die durch die Dämmung nicht beeinflusst wird, verlangsamt die Innendämmung durch Absenkung des Temperaturniveaus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

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 bei Leichtbauwänden mit einer Flächenmasse von weniger als 100 kg/m^2 $1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$. Für massive Wände

mit höherer Flächenmasse, zu denen auch die meisten Fachwerkwände zählen, gelten geringere Anforderungen mit einem Mindestwärmedurchlasswiderstand von $1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ (entsprechender U-Wert $0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$). 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. 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, um die Wärmeschutzanforderungen an eine durchzuführende Sanierungsmaßnahme zu erfüllen, in der Regel eine zusätzliche Dämmung notwendig ist. Das gilt vor allem dann, wenn die Bedingungen der Energieeinsparverordnung [8] erfüllt werden soll. Zur Erhaltung der Außenansicht der Fachwerkfassade ist eine Innendämmung erforderlich. Ob sie bauphysikalisch machbar ist und wie sie gegebenenfalls auszuführen ist, hängt vom Konstruktionsaufbau, den verwendeten Materialien und den Witterungsverhältnissen sowie Raumklimabedingungen ab.

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/(m K)]	Wärmedurchlasswiderstand [m ² KW]
Naturstein (Sedimentgestein)	2,3	0,1
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	0,5
Porenbeton	0,12 – 0,14	1,0 – 1,2
Mauerstein + 4 cm Dämmung (Mineralfaser/Schaumkunststoff)	(0,04)	> 1,0
Fachwerkholz	0,13 – 0,2	0,7 – 1,1

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 also vor allem beim Anbringen einer Innendämmung zu berücksichtigen. Durch eine derartige Dämmmaßnahme kann die Temperatur der Innenoberflächen des Fachwerks unter die Taupunkttemperatur der Raumluft sinken. Wasserdampfdiffusion oder Luftkonvektion aus dem Wohnraum führen dann ggf. zu einer Feuchteerhö-

hung im Holz. Um Luftkonvektion zu verhindern, muss der gesamte Wandaufbau stets luftdicht ausgeführt werden. Hohlräume z.B. zwischen Innendämmung und Außenwand sind 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 kein zu hoher Feuchteintrag während der Applikationsphase damit verbunden ist. Starre Dämmplatten hingegen können Hohlräume bilden, deren dauerhafte Abdichtung besondere Sorgfalt erfordert.

Um Tauwasserschäden an der Holzkonstruktion in der Winterperiode infolge der Innendämmung zu vermeiden, wird nach [10] empfohlen, die Dämmwirkung der zusätzlichen Innendämmung auf $R = 0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ 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 Tauwasser-schutzgründen notwendig. In [3] wird dazu unabhängig von der Art der Dämmung ein Mindestwert von $s_d = 0,5 \text{ m}$ 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 Freilandversuch 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. Am unteren Querbalken wird die Dämmung zur Raumseite hin mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse versehen. Mit eingezeichnet ist die Anordnung der Holzfeuchtemessstellen.

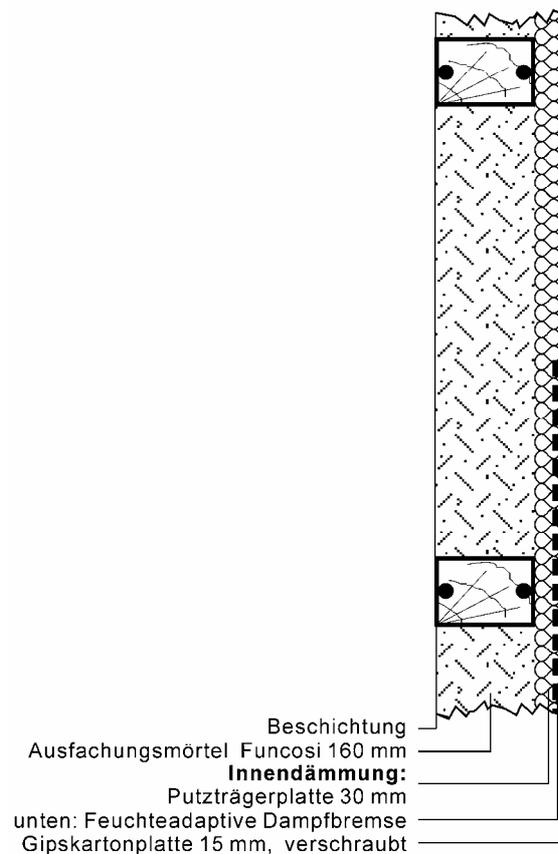


Bild 4 Schematische Darstellung des untersuchten Wandquerschnittes am Fachwerkhaus. Mit angegeben ist die geometrische Verteilung der Holzfeuchte-Messstellen.

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 % relative Feuchte 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.

Ergebnisse

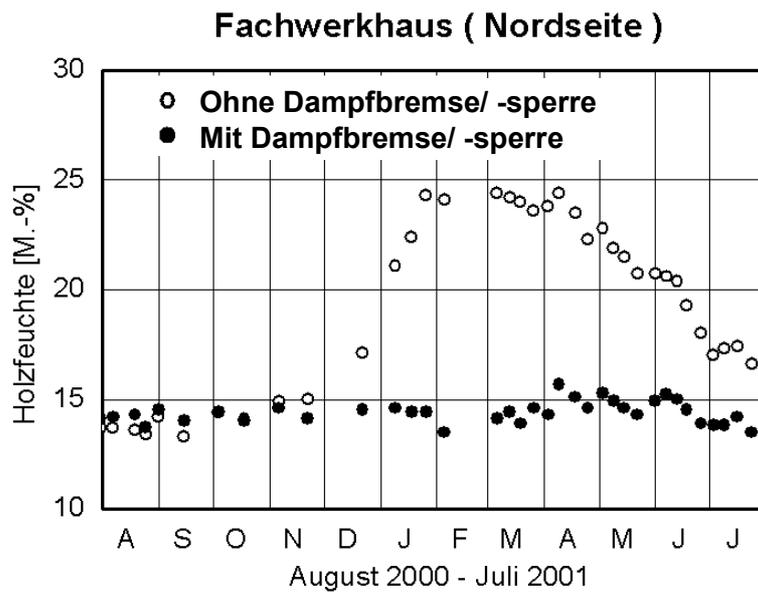


Bild 5 Gemessene Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des oberen und unteren Querriegels (ohne Dampfsperre und mit feuchteadaptiver Dampfbremse bzw. Dampfsperre) auf der Nordseite des Fachwerkhauses.

Bild 5 zeigt die Verläufe der Holzfeuchte auf der zum Raum hin liegenden Seite des Fachwerkholzes bei der in Bild 4 gezeigten Variante. 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 68 800 [12] wird über einen längeren Zeitraum überschritten, während sich mit Dampfbremse bzw. -sperre, 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 Nordseite höher als auf der Südseite (nicht dargestellt).

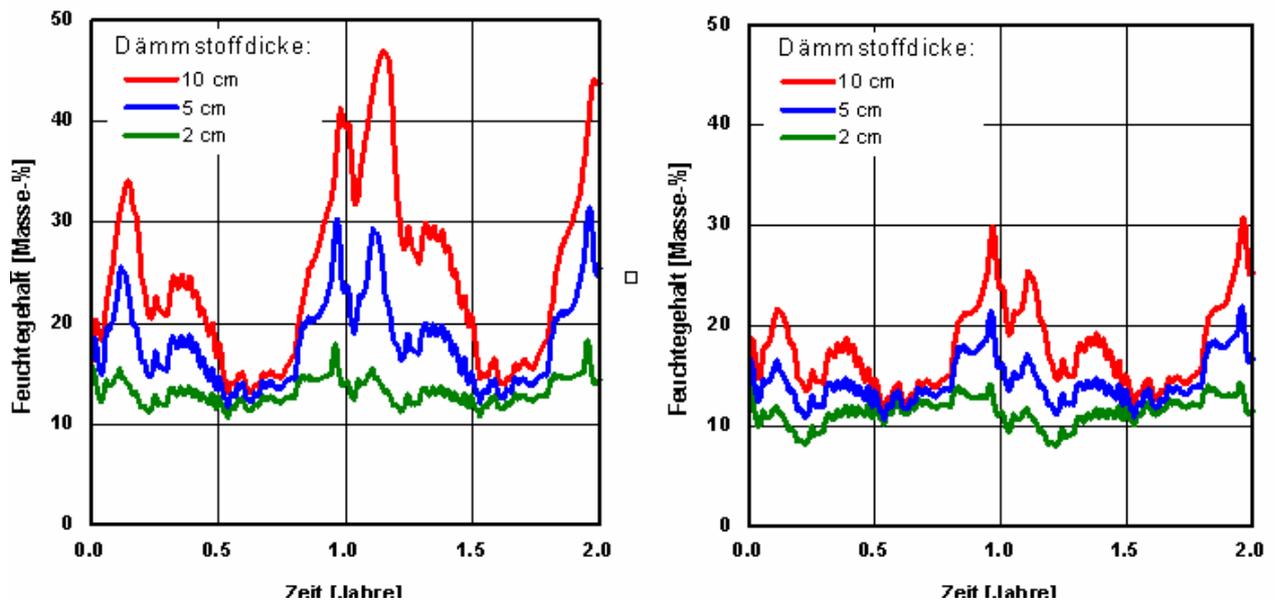


Bild 6 Mit dem Rechenverfahren WUFI ermittelten Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des Querriegels ohne Dampfsperre auf der Nordseite einer Fachwerkwand bei unterschiedlichen Dicken der innenseitigen Dämmung für eine geringe (Bild rechts) und normale (Bild links) Feuchtelast.

Bild 6 zeigt die bei Annahme einer fehlenden Dampfbremse mit WUFI ermittelten Feuchtegehalte im Fachwerkh Holz bei Annahme einer geringen (im Winter im Mittelwert 30 % r.F.) bzw. normalen Feuchtelast, die etwa 40 % r.F. im Raum bedeutet. Dabei wird deutlich, dass bei geringer Feuchtelast innere Dämmschichtdicken von bis zu 5 cm schadensfrei bauen lassen. Dies erklärt auch die Tatsache, dass viele Fachwerkkinnendämmungen schadensfrei bleiben, obgleich eine Dampfbremse fehlt. Bei größeren Dämmschichtdicken oder normaler Feuchtelast ist stets eine raumseitige Dampfbremse erforderlich. Die Berechnungen wurden mit Hilfe des Berechnungsprogramm WUFI-2D [4] für die zweidimensionalen instationären Wärme- und Feuchtettransportvorgänge durchgeführt. Als Klimarandbedingungen dienen die während des Untersuchungszeitraumes bestimmten Außen- und Innenklimaparameter. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, muss bei komplexen rechnerischen Untersuchungen generell als erster Schritt eine Validierung erfolgen, bei der die Messergebnisse mit WUFI nachvollzogen werden konnte [11]. Somit kann davon ausgegangen werden, dass auch die Berechnung des langfristigen Verhaltens verschiedener Varianten die realen Effekte korrekt wiedergibt.

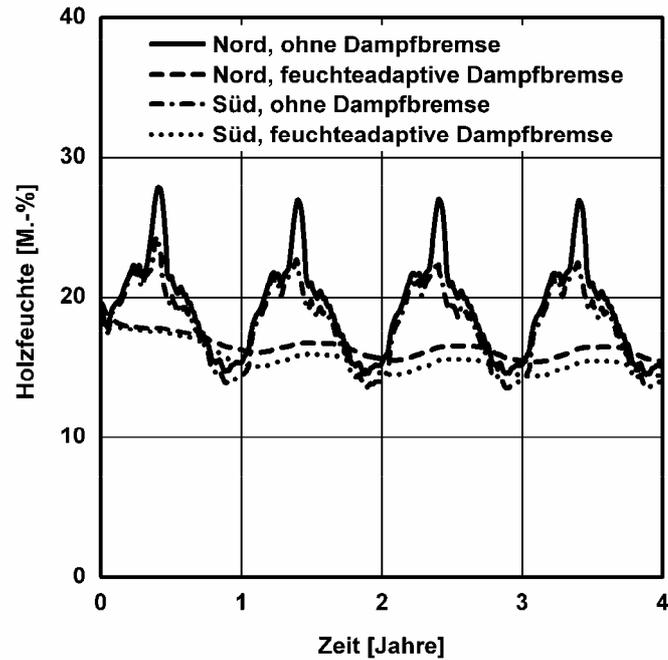


Bild 7 Für einen Zeitraum von vier Jahren berechnete Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des oberen und unteren Querriegels auf der Nordseite und Südseite des Fachwerkhäuses mit und ohne feuchteadaptive Dampfbremse.

Bei weiteren Berechnungen wird aus Vergleichsgründen für das Holz als Startwert von einem massebezogenen Feuchtegehalt von 20 M.-%. ausgegangen. Als Außenklima dienen die Holzkirchner Wetterdaten von 1991, wobei für mehrjährige Berechnungen diese Daten mehrfach durchlaufen werden. Startzeitpunkt der Berechnungen ist der Oktober. Für das Innenklima werden konstante Verhältnisse von 20 °C und 50 % r.F. angenommen. Bild 7 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 3 bis 4 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.

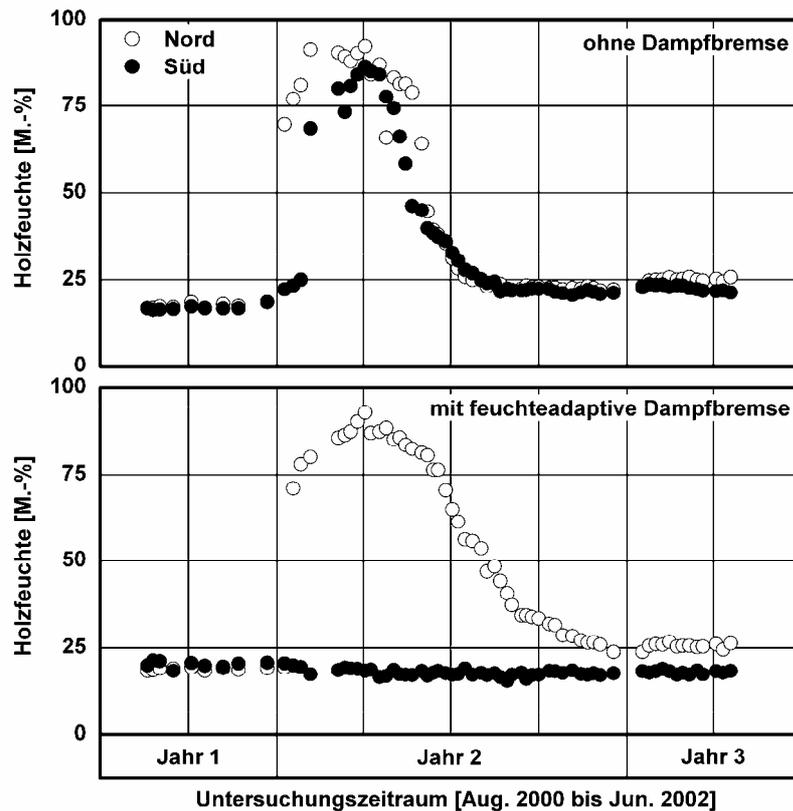


Bild 8 Gemessene Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des oberen und unteren Querriegels (ohne und mit feuchteadaptiver Dampfbremse) auf der Nordseite und Südseite des Fachwerkhäuses.

Die zeitlichen Verläufe der Holzfeuchte, gemessen auf der Innenseite der oberen und unteren Querriegel für die Variante gemäß Bild 4 sind in Bild 8 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.-%.

Für die Wandaufbauten liegen teilweise extrem hohe Feuchtegehalte vor, die nicht durch anfallendes Tauwasser zu erklären sind. Es müssen in der ersten Winterperiode äußere Einflüsse (Unwetter) dazu geführt haben, dass in die Konstruktion Wasser von außen eingedrungen ist. Eine vergleichende Bewertung verschiedener Varianten ausschließlich anhand der Messverläufe der Holzfeuchte ist nicht möglich. Aus diesem Grund werden wiederum zusätzlich zu den Messungen rechnerische Untersuchungen mit WUFI durchgeführt. Bild 9 zeigt die berechneten Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite eines Querriegels auf der Nordseite für das Austrocknungsverhalten der Variante mit feuchteadaptiver und herkömmlicher Dampfbremse sowie mit einer Dampfsperre. Deutlich zeigt sich das rasche Austrocknen mit FADAB, wäh-

rend sich bei einem konstanten s_d -Wert von 2 m im Sommer etwas höhere Werte der Holzfeuchte sich ergeben. Bei Verwendung der Dampfsperre mit einem s_d -Wert von 50 m ergeben sich aufgrund Umkehrdiffusion vorübergehend Feuchtegehalte von bis zu 40 M.-%.

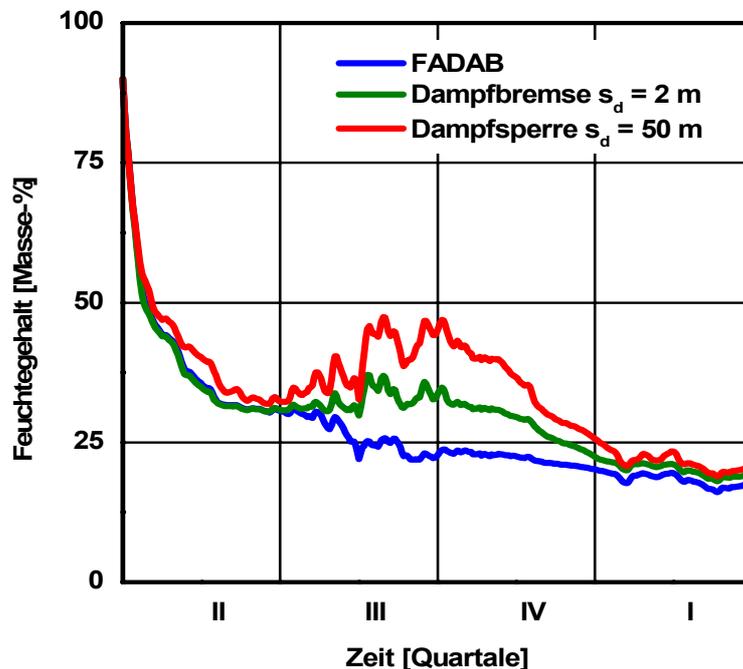


Bild 9 Berechnete Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite eines Querriegels auf der Nordseite für das Austrocknungsverhalten der Variante mit feuchteadaptiver und herkömmlicher Dampfbremse sowie mit einer Dampfsperre

Für die Untersuchungen wurde eine feuchteadaptive Dampfbremse verwendet, die als trocknungsfördernd zu bezeichnen ist, da sie im Vergleich zu herkömmlichen Dampfbremsefolien bei gleichem Tauwasserschutz eine verbesserte Austrocknung ermöglicht. Diese feuchteadaptive Dampfbremse ändert, wie u.a. in [13, 14] gezeigt, ihren Sperrwert in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen. Dadurch kann sie im Sommer, wenn die Fachwerkwand nach innen austrocknen soll, im Extremfall so dampfdurchlässig werden wie eine Gipskartonplatte (s_d -Wert: 0,4 m). Bei den Temperatur- und Feuchteverhältnissen im Winter bietet sie mit einem s_d -Wert von etwa 4 m dennoch einen ausreichenden Tauwasserschutz. Der Vorteil der feuchteadaptiven Dampfbremse liegt in ihrem günstigen Austrocknungsverhalten. 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 ein schnelleres Austrocknen der Konstruktion im Vergleich zur herkömmlichen Dampfbremse.

Aus diesen Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass sich lediglich bei geringen Feuchtelasten Fachwerkkinnendämmungen ohne Dampfbremsen bewerkstelligen lassen, während bei allen anderen Fällen stets der Dampfdiffusionsstrom begrenzt werden muss. Bild 10 zeigt dazu die erforderlichen s_d -Werte in Abhängigkeit vom Wärmedurchlasswiderstand der Innendämmung. Wie weiterführende Berechnungen gezeigt haben, können bei sorgfältiger, also luftdichter Bauweise, auch R-Werte bis 5 m^2K/W schadensfrei eingebaut werden. Sind die Anschlüsse aber nicht dauerhaft sicher ausgeführt, sollte der R-

Wert auf 1 m²K/W begrenzt bleiben, um nachteilige Feuchteerhöhung im Bereich der Balkenköpfe zu vermeiden.

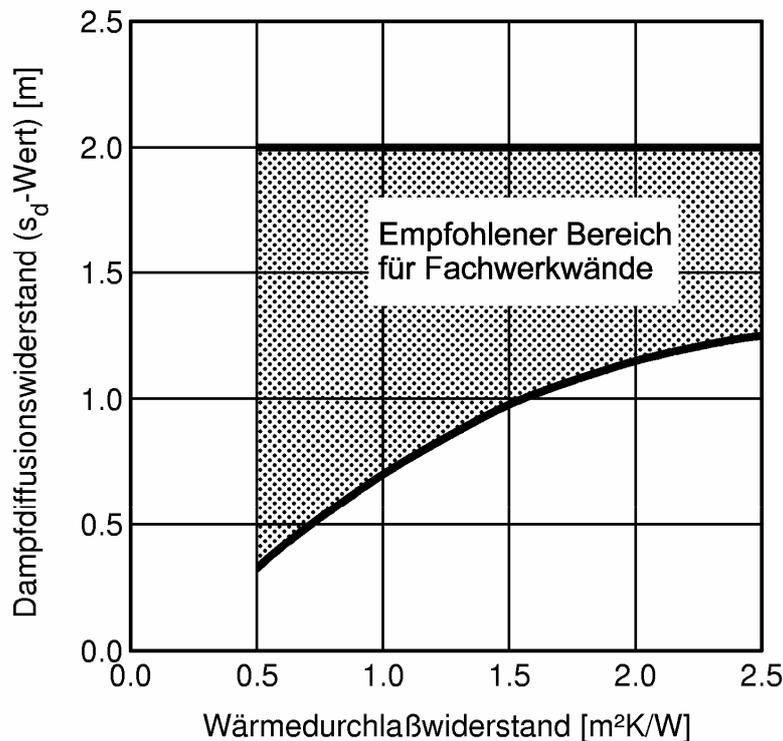


Bild 10 Erforderliche raumseitige s_d-Werte in Abhängigkeit vom Wärmedurchlasswiderstand der Innendämmung.

4.2 Einsatz einer kapillaraktiven Innendämmung

Das Ziel des Einsatzes einer kapillaraktiven Innendämmung besteht darin, dass anfallendes Tauwasser kapillar zum Innenraum hin zurückgeführt wird. In Bild 11 unten ist das Modell für den überlagerten Flüssig- und Dampftransport im Porenraum für nichtisotherme Randbedingungen (typische Wintersituation) dargestellt. Im Innenraum liegt aufgrund der Feuchteproduktion durch die Nutzung des Gebäudes im Winter immer ein höherer Wasserdampfpartialdruck vor als in der Außenluft. Aus diesem Grund erfolgt die Diffusion in diesem Zeitraum von Innen nach außen. Aufgrund der hohen Raumlufttemperatur ist aber die relative Luftfeuchte innen höher als außen. Dies führt dazu, dass die Sorptionsfeuchte innen niedriger ist und somit, wie im Bild dargestellt, die Sorbatschicht von außen nach innen abnimmt. Da sich die Schichtdicke auszugleichen versucht, findet ein Flüssigtransport nach innen statt, der dem Diffusionstransport entgegen gerichtet ist. Bei hydrophoben Dämmstoffen ist dagegen nur ein Diffusionstransport zu beobachten (Bild 11 oben). Beim Einsatz der kapillaren Innendämmung am Fachwerk soll auf diesem Wege vor allem das Kondenswasser von der Innenseite des Balkens wegtransportiert werden.

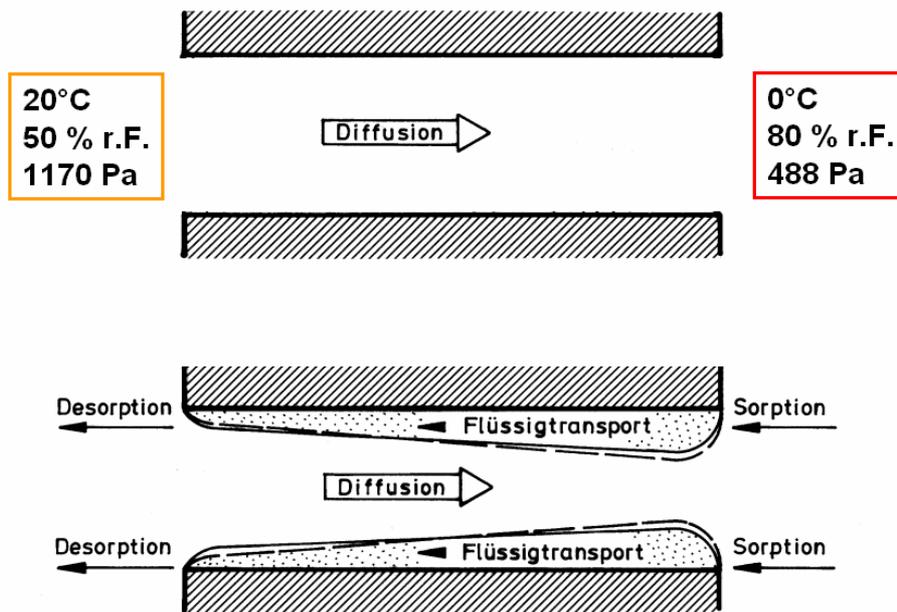


Bild 11 Schematische Darstellung der Funktionsweise der Diffusion und des Flüssigtransport in einer Außenwand bei für den Winter üblichen Klimarandbedingungen.

Untersuchungsvarianten

Die zur Untersuchung der Wirkung kapillaraktiver Innendämmungen, wie sie beispielsweise in [15] beschrieben sind, aufgebauten Varianten sind in Bild 12 dargestellt. Mit 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 hygri-scher 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 Ziffer 4.1 beschriebenen.

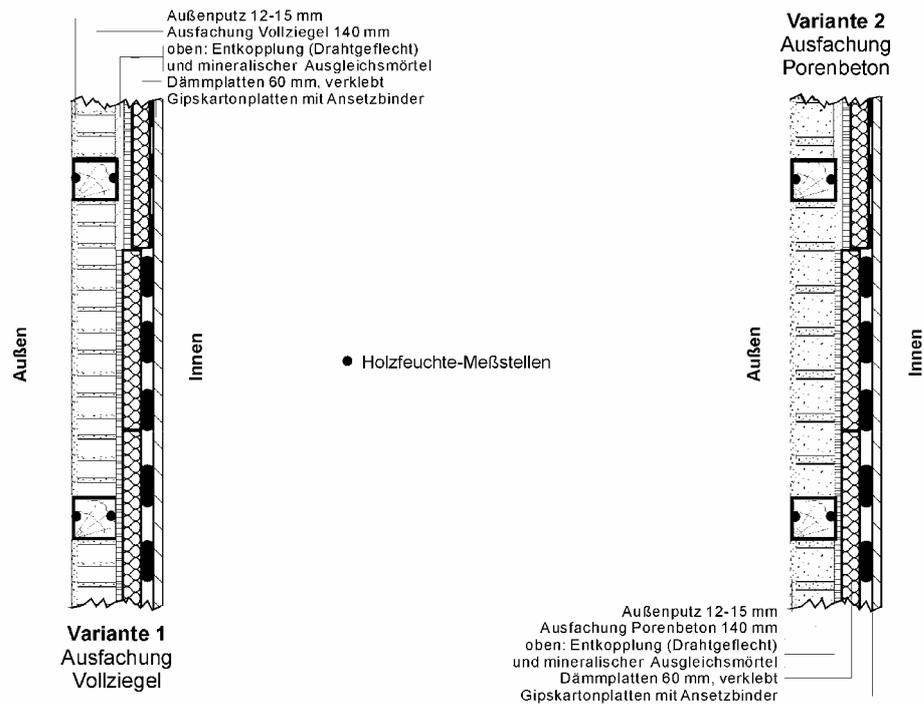


Bild 12 Schematische Darstellung des Wandquerschnittes zur Untersuchung der Wirkung kapillar aktiver Dämmplatten (Variante 1 links: Ausfachung aus Vollziegel und Variante 2 rechts: Ausfachung aus Porenbeton) am Fachwerkhaus. Mit angegeben ist die geometrische Verteilung der Holzfeuchte-Messstellen.

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 13 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) 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 (nicht dargestellt). Zwischen der Variante oben (Entkopplung durch Drahtgeflecht) und unten (ohne Entkopplung) ist bei allen Varianten kein grundlegender Unterschied festzustellen.

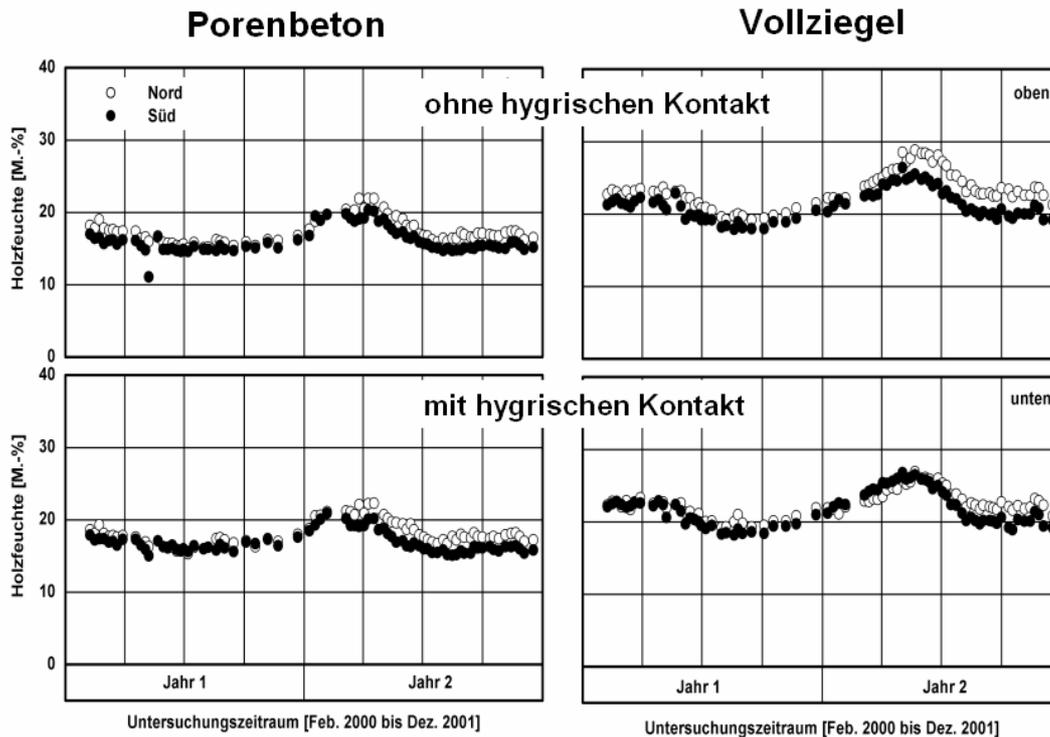


Bild 13 Gemessene Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des oberen und unteren Querriegels für die Variante mit Ausfachung aus Vollziegel (Bild rechts) und Porenbeton (Bild links) auf der Nordseite und Südseite des Fachwerkhauses.

Die berechneten Verläufe der Holzfeuchte im Querbalken werden in [16] den Messergebnissen gegenübergestellt. In allen Fällen wird eine gute Übereinstimmung zum Experiment erreicht, d. h. die Validierung war erfolgreich. Somit kann davon ausgegangen werden, dass auch Berechnungen des langfristigen Verhaltens die realen Effekte korrekt wiedergeben. 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.

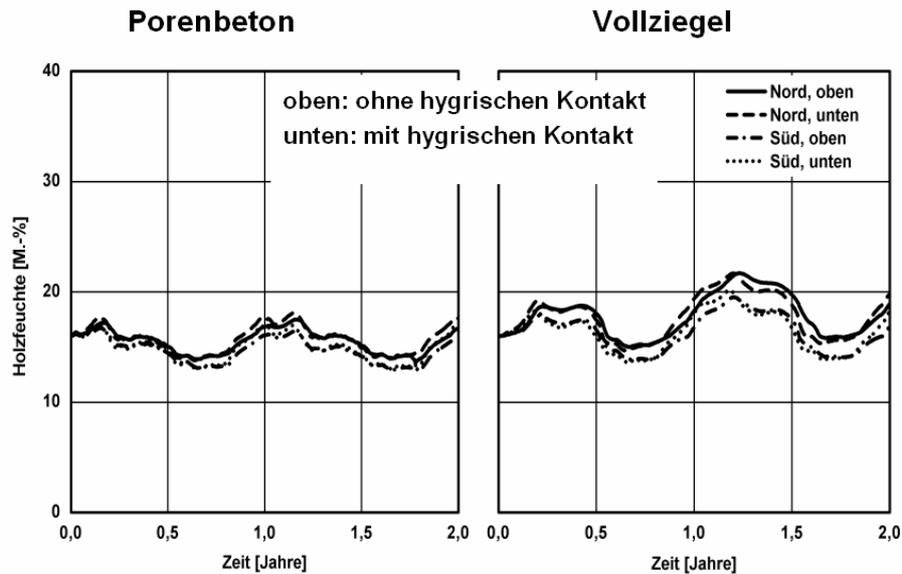


Bild 14 Für einen Zeitraum von 2 Jahren berechnete Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des Querriegels für die Variante mit Ausfachung aus Vollziegel (Bild rechts) und Porenbeton (Bild links) auf der Nordseite und Südseite des Fachwerkhauses.

Bild 14 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. Der Einfluss des hygrischen Kontakts kann auch rechenstechnisch nicht festgestellt werden.

Um nun den direkten Einfluss der Kapillaraktivität zu bestimmen, wird, erfolgreiche Validierung des Rechenverfahrens mittels Vergleich mit Messwerten vorausgesetzt, mithilfe 2-dimensionaler Berechnungen das Austrocknungsverhalten eines feuchten Holzes berechnet. Dabei wird auf die Feuchtegehalte des Holzes zurückgegriffen, wie sie sich nach dem Unwetterschaden messtechnisch zeigten (Bild 8). Bild 15 gibt die Modellierung des Konstruktionsaufbaus wieder.

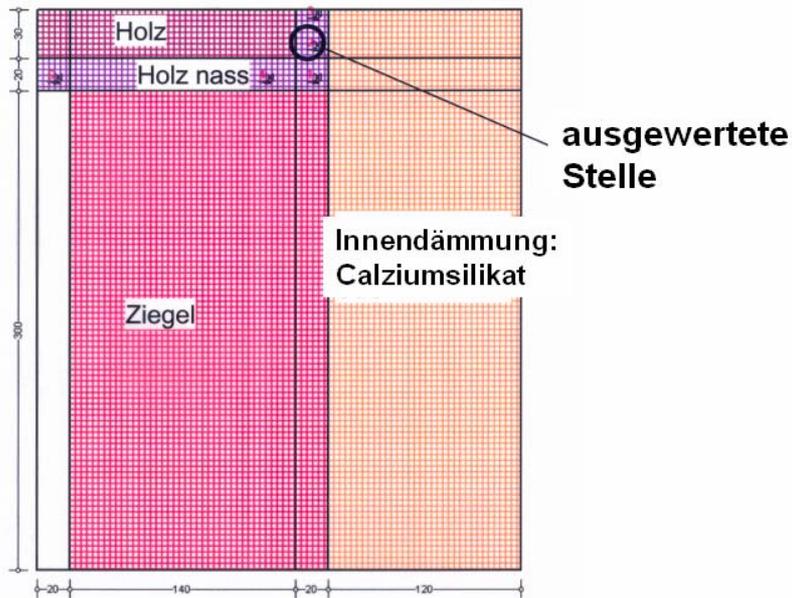


Bild 15 Modellierung des Konstruktionsaufbaus bei der Berechnung der Holzfeuchte zur Untersuchung des Einflusses des hygrischen Kontakts und der Kapillarleitung. Die bei den Berechnungen ausgewertete Stelle wird angegeben.

Bild 16 rechts zeigt den zeitlichen Verlauf der Holzfeuchte für die 3 gerechneten Varianten. Die schnellste Austrocknung ergibt sich im Falle der exakten rechen-technischen Abbildung der Kalziumsilikatplatte mit hygrischem Kontakt. Ohne hygrischen Kontakt werden kurzzeitig etwas höhere Holzfeuchten festgestellt. Schaltet man, was rechen-technisch einfach möglich ist, die Funktion Kapillarleitung aus, so ist unschwer ein langsames Austrocknen festzustellen. Ohne Kapillarleitung ergeben sich auch, wie Bild 16 links zeigt, unter Annahme normaler Holzfeuchten, im Sommer gegenüber der Berechnung mit Kapillarleitung höhere Holzfeuchtwerte.

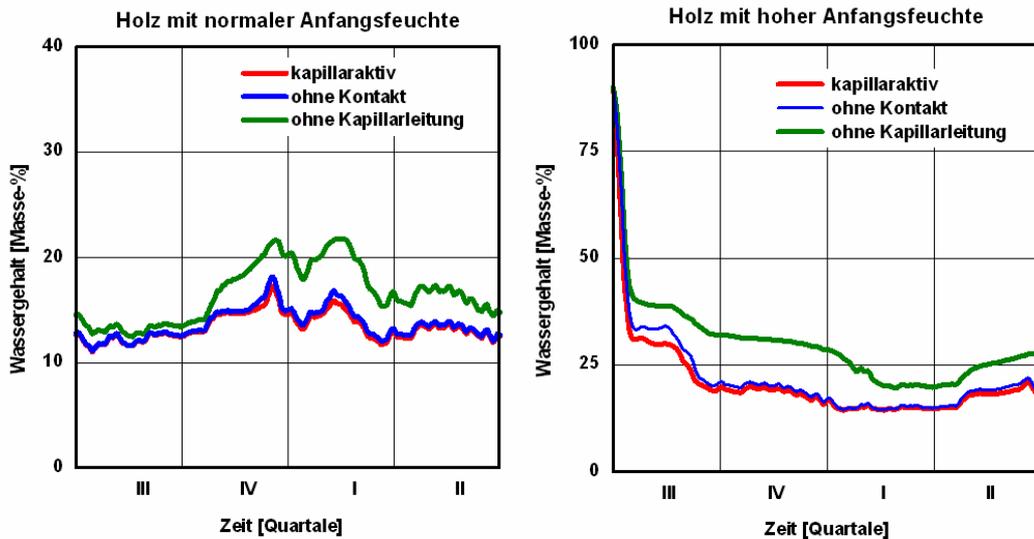


Bild 16 Berechnete Zeitverläufe der Holzfeuchte an der Innenseite des Querriegels für die Variante mit Ziegelausfachung auf der Nordseite des Fachwerkhauses mit und ohne hygrischen Kontakt bzw. ohne Kapillarleitung für den Fall normaler Holzfeuchte beim Beginn der Berechnungen (Bild links) sowie hoher (Bild rechts).

Damit 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 langfristig 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 $1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ 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. Anstriche 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 sollte so gering sein, dass die Baufeuchte inner-

halb 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 nicht ausreichend abdichtbar sind.

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. Das Anbringen einer Innendämmung sollte, wie bereits erläutert, nur bei nachweislich geringer Schlagregenbeanspruchung der betreffenden Fassade in Betracht gezogen werden. Der Wärmedurchlasswiderstand der Innendämmung sollte auf die Ausfachung der Wand abgestimmt sein, d.h. er darf nur dann den in [3] genannten Grenzwert von $0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ übertreffen, wenn die Ausfachung selbst wärmedämmende Eigenschaften hat. Der s_d -Wert der Innendämmung inklusive Innenbeplankung und eventueller Dampfbremse sollte mindestens $0,5 \text{ m}$ betragen. Beim Einsatz von Faserdämmstoffen ist die Anwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse mit variablem s_d -Wert vorteilhaft. Sind die o.g. handwerklichen und bauphysikalischen Anforderungen erfüllt, kann auch eine Innendämmung mit einem gegenüber den WTA-Empfehlungen größerer Wärmedurchlasswiderstand bewerkstelligt werden.

Ergänzende messtechnische und rechnerische Untersuchungen zur Wirksamkeit von kapillaraktiven Innendämmungen zeigen, dass die erhoffte Wirkung der Kapillaraktivität bei „normalen“ sowie vor allem schadhafte hohen Feuchtegehalten nachgewiesen werden kann. Dabei setzt aufgrund Kapillarkondensation eine Oberflächendiffusion auch schon vor Erreichen von Tauwasser ein. Auch für diese Art der Innendämmung gilt, dass gegenüber WTA höhere R-Werte ohne Schaden bei richtiger handwerklicher Ausführung gebaut werden können.

6 Literatur

- [1] DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (2003 - 07).
- [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 010202.
- [9] Künzel, H.M.: Raumlufffeuchteverhältnisse in Wohnräumen. IBP-Mitteilung 24 (1997), Nr. 314.
- [10] WTA-Merkblatt 8-7-98: Fachwerkinstandsetzung nach WTA, Beschichtungen auf Fachwerkwänden - Holz. Oktober 1999.
- [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] Häupl, P. et al.: Energetische Verbesserung der Bausubstanz mittels kapillaraktiver Innendämmung. Bauphysik 21 (1999), H. 4, S. 145-154.
- [16] 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.
- [17] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoefizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart (1995).