Neue Lösungen zur energetischen Sanierung von Fachwerkhäusern

M. Krus, K. Sedlbauer, C. Fitz



M. Krus



K. Sedlbauer



C. Fitz

Zusammenfassung

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 als einzig mögliche Wärmeschutzmaßnahme die Anbringung einer Wärmedämmung auf der Innenseite der Außenwand. Da Innendämmungen aber aus bauphysikalischen Gründen nicht unkritisch sind, sollte die Wahl des Dämmstoffes sowie der gesamte Konstruktionsaufbau den hygrothermischen Verhältnissen einer Fachwerkfassade genau angepasst werden. Es wurde untersucht, inwiefern die bauphysikalischen Probleme einer Innendämmung durch Einsatz einer feuchteadaptiven Dampfbremse oder durch Verwendung eines kapillaraktiven Dämmstoffes vermindert werden können. Ein völlig neuer Ansatz besteht darin, die Dämmung in das Gefach zu legen. Hierzu wird ein neuartiger Gefachaufbau vorgestellt und durch Freilanduntersuchungen und Berechnungen dessen Funktionsfähigkeit gezeigt.

Summary

Since many timber-framed houses are listed, a practicable compromise between thermal rehabilitation and preservation of the historic appearance and fabric must be found. Mostly the thermal protection can only be achieved by applying thermal insulation to the interior side of the exterior wall. But since interior insulation lowers the temperature between insulation layer and filling material and thus raises the humidity level, 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. It has been investigated to which extend the moisture problems created by an interior insulation material. Another novel approach consists of using the insulation as part of the infill. A newly designed infill assembly is presented whose performance has been demonstrated by outdoor exposure tests and hygrothermal simulations.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Das Thema Fachwerk erfährt in der modernen Architektur eine enorme Aktualität. Im Wohntrend aller Altersschichten liegen derzeit sanierte Fachwerkbauten und Bauernhäuser. Ebenso weist die städtebauliche Zielsetzung und die Vergabe öffentlicher Gelder eindeutig in Richtung Sanierung der Ortskerne zur Wiederherstellung des historischen Stadtbildes. Der Sanierungs- und Modernisierungsbedarf erhaltenswerter Fachwerkarchitektur steigt demnach stetig an. Die Anforderungen seitens des Denkmalschutzes werfen oftmals Schwierigkeiten bei der Umsetzung sinnvoller Sanierungskonzepte auf. Der Spagat zwischen der Erhaltung der gesamten alten Bausubstanz als Forderung des Denkmalschutzes einerseits, und der Anpassung an die neuen Anforderungen der Bewohner an die Wohn- und Lebensqualität sowie die grundsätzliche Änderung der Nutzung der Gebäude andererseits ist äußerst schwierig.

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. Es werden dazu neue Erkenntnisse aus mehrjährigen Freilanduntersuchungen an Fachwerkfassaden im Freigelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen sowie aus weitergehenden Berechnungen zum Feuchteschutz von Fachwerkbauten zum Einsatz der feuchteadaptiven Dampfbremse sowie von kapillaraktiven Dämmstoffen gegeben.

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zum Thema Fachwerk haben gezeigt, dass eine dauerhafte Umsetzung des Sichtfachwerkes auf der Westfassade (Wetterseite) in Gebieten mittlerer und hoher Schlagregenbelastung bauphysikalisch nicht möglich ist. Als Kernaussage der entsprechenden Veröffentlichungen hierzu ist festzuhalten, dass die durchschnittlich dort zu erwartende Niederschlagsbelastung für jegliches Sichtfachwerk eindeutig unzulässig ist [1]. Am Beispiel eines neu entwickelten Gefachaufbaus mit innen liegender Dämmung soll mit neuen Mess- und Rechenmethoden zur Beurteilung der Fugendichtheit und des Feuchteverhaltens unter Realbedingungen gezeigt werden, dass es inzwischen Möglichkeiten gibt, fachwerksichtige und dennoch dichte Konstruktionen aufzubauen.

2 Einsatz einer feuchteadaptiven Dampfbremse

Das seit 1990 bestehende und in Bild 1 gezeigte Versuchsfachwerkhaus auf dem Gelände der Freilandversuchsstelle Holzkirchen wurde für die neue Versuchsreihe umgebaut. Bisherige Untersuchungen befassten sich unter anderem mit der Thematik "Ausfachungen in Verbindung mit Mineralfaserdämmstoffen" als Innendämmung [1] und dem "Feuchtehaushalt von Fachwerkwänden" [2]. Ziel dieser neueren Untersuchungen ist es, die Funktionsfähigkeit des Einsatzes einer feuchteadaptiven Dampfbremse im Freilandversuch sowie durch begleitende Berechnungen zu überprüfen.



Bild 1: Westansicht des Versuchsfachwerkhauses nach dem Umbau

2.1 Untersuchungsvarianten

Am Beispiel eines Fachwerkmörtels als Ausfachungsmaterial und Mineralwolleplatten als Innendämmung wird der Einfluss einer feuchteadaptiven Dampfbremse untersucht [3]. Die Nord- und Südwand des auf dem Freigelände des IBP bestehenden Fachwerk-Versuchshauses (Bild 1) wurden derart ausgeführt. Der Wandaufbau ist in Bild 2 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. Mit 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% 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.



Bild 2: Schematische Darstellung des untersuchten Wandquerschnittes am Fachwerkhaus. Dämmputz bzw. Leichtbeton als Ausfachungsmaterial. Mit angegeben ist die geometrische Verteilung der Holzfeuchtemessstellen.

2.2 Ergebnisse

Bild 3 zeigt die Verläufe der Holzfeuchte auf der zum Raum hin liegenden Seite des Fachwerkholzes bei der in Bild 2 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 [4] wird über einen längeren Zeitraum überschritten, während sich mit Dampfbremse, auf die gesamte Messzeit bezo-gen, 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 [5] für die zweidimensionalen instationären Wärme- und Feuchtetransportvorgänge Berechnungen durchgeführt. 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. angenommen. Bild 4 zeigt für einen Zeitraum von vier Jahren den Verlauf der Holzfeuchte für die Variante mit und ohne feuchteadaptiver 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.



Untersuchungszeitraum [Feb. 2000 bis Aug. 2001]

Bild 3: 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 2 dargestellte Gefach mit Leichtbeton als Ausfachungsmaterial. Ab Dezember 2000 wurde die Innenraumluftfeuchte von 50 auf 60 % angehoben, um extreme Raumklimabedingungen zu simulieren.



Bild 4: 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 feuch-teadaptiver Dampfbremse bei einer Innenraumluftfeuchte von 50%.

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 2 mit Dämmputz als Ausfachungsmaterial sind in Bild 5 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.-%.



Bild 5: 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 2 dargestellte Gefach mit Dämmputz als Ausfachungsmaterial.

Die gemessenen extrem hohen Feuchtegehalte, sind nicht durch anfallendes Tauwasser zu erklären, da ein derart schneller Feuchteanstieg nicht über Diffusionsvorgängen 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 6: 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. Bild 6 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 sd-Wert von 2 m) sowie mit einer Dampfbremse aus Polyethylen. Deutlich zeigt sich das rasche Austrocknen mit feuchteadaptiver Dampfbremse, während sich bei einem konstanten sd-Wert von 2 m im Sommer etwas höhere Werte der Holzfeuchte ergeben. Bei Verwendung der Dampfbremse mit einem sd-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 bezeichnen 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 [6, 7] 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 sd-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 7: 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 7 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.

3 Einsatz einer kapillaraktiven Innendämmung

3.1 Untersuchungsvarianten

Die zur Untersuchung der Wirkung kapillaraktiver Innendämmungen, wie sie beispielsweise in [8] beschrieben sind, aufgebauten Varianten sind in Bild 8 dargestellt. 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 Vorraussetzung 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/m³ eingesetzt. Die bei den messtechnischen Untersuchungen vorhandenen Randbedingungen entsprechen den in Kapitel 2 beschriebenen.



Bild 8: Schematische Darstellung des Wandquerschnittes 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 Holzfeuchtemessstellen.

3.2 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 9 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.



Bild 9: 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 10: 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.

Bei den durchgeführten Berechnungen wird aus Vergleichsgründen vom praktischen Feuchtegehalt, d.h. von einen 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 10 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.



Bild 11: 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).

Zusätzlich wird mit Hilfe zweidimensionaler Berechnungen das Austrocknungsverhalten eines stark befeuchteten Querriegels mit 80 M.-% (vgl. Sturmschaden Lothar, Bild 5) berechnet. Als Innendämmung wurde dabei eine kapillaraktive Calciumsilikatplatte mit 12 cm Dicke angesetzt, da sie eine deutlich höhere Kapillaraktivität als die Porenbetonplatte aufweist. Bild 11 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 5). 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 11 links zeigt höhere Holzfeuchtewerte, die 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.

4 Innenliegende Dämmung

4.1 Untersuchungsvarianten

Für die Durchführung der Untersuchungen werden in das Fachwerkhaus auf der Nordseite und der dem Schlagregen ausgesetzten Westseite einige Gefache freigelegt und neu aufgebaut. Dabei wird auch versucht, durch eine zwischen Innen- und Außenputz liegende Mineralfaserdämmung, ein der EnEV entsprechendes Dämmniveau zu erreichen. Mit Hilfe einer für diese Zwecke neu entwickelten Messeinrichtung wird durch wiederholte Messungen der zeitliche Verlauf der Fugendichtheit ermittelt. Parallel dazu wird durch Berechnungen mit einem am Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP neu entwickelten Programm, das auf dem viel-

fach validierten Berechnungsprogramm zur Ermittlung der instationären Wärme- und Feuchteströme WUFI[®] beruht, ermittelt, welchen Einfluss eine durchgängige Fuge und die damit verbundenen Konvektionsvorgänge auf den Feuchtehaushalt der Holzbalken hat.

Zum Zeitpunkt des Umbaus waren alle bis dahin am Fachwerkgebäude durchgeführten Untersuchungen abgeschlossen, sodass die Auswahl der freizulegenden Gefache nach der größtmöglichen Belastung für die gewählten Aufbauten während der Versuchsphase erfolgen konnte. Dabei wurde als Extremfall die Westseite als so genannte Wetterseite mit der für Holzkirchen typischen hohen Schlagregenbelastung gewählt.



Bild 12: Aufteilung der Gefachreihen am Testfachwerkhaus auf der Westseite. Die Zuordnung der Ausführungsvarianten erfolgt nach dieser Aufteilung.

Auf der Westseite wurde das als Regenschutz aufgebrachte Wärmedämmverbundsystem von zwei benachbarten Feldern (Feld 1 und Feld 2), bestehend aus zwei übereinander liegenden Gefachen, entfernt und die Gefache anschließend freigelegt (Bild 12). In einem weiteren Schritt wurden die Messfühler zur Aufnahme der Holzfeuchtigkeit und der Holztemperatur auf der Oberseite aller freigelegten Querriegel der Fachwerkkonstruktion installiert (siehe Bild 13).





Ausführung der Ausfachung

Der Grundaufbau besteht aus einer Kerndämmung mit Mineralwollelamellen, die in einer Stärke von 80 mm eingebaut wurde. Raumseitig ist darauf eine 40 mm starke Schicht Wärmedämmputz aufgebracht, außen hingegen eine ebenfalls 40 mm starke Schicht Sanierputz. Der detaillierte Gesamtaufbau dieser Variante ist Bild 14 zu entnehmen. Der U-Wert der Riegelkonstruktion liegt bei 0,5 W/(m²·K), der der Ausfachung bei

 $0,33 \text{ W/(m^2 \cdot K)}$. Aufgrund der unterschiedlichen Flächenanteile ergibt sich ein gemittelter U-Wert des Gesamtaufbaus von $0,36 \text{ W/(m^2 \cdot K)}$, der deutlich innerhalb der Anforderungsgrenzen von [9], [10] und [11] liegt. Die Besonderheit der Konstruktion liegt in Details der Abdichtung auf die hier, da die Untersuchungen im Kundenauftrag erfolgten, nicht genauer eingegangen werden soll.

Der Aufbau der Variante im Feld 2 der Westfassade entspricht im Wesentlichen dem der oben beschriebenen Ausführungsvariante. Der Unterschied besteht lediglich in der Materialwahl des Außenputzes. Anstatt des Sanierputzes ist hier Fachwerkmörtel verwendet worden. Dadurch soll der Einfluss der unterschiedlichen hygrothermischen Eigenschaften des Außenputzes unter gleichen Bedingungen untersucht werden.

In allen Varianten ist ein beidseitiges Sichtfachwerk ausgeführt worden. Dies gilt bislang als problematisch, da die Dauerhaftigkeit der Fugenkonstruktion im Hinblick auf die Luft- und Schlagregendichtheit nicht hinreichend nachweisbar beherrscht wird. Das Risiko für Bauschadensfälle ist entsprechend hoch. Diese Problemstellung wird daher gezielt auf der Westseite untersucht, da hier mit den widrigsten Bedingungen für die Gesamtkonstruktion gerechnet werden kann.



Bild 14: Gefachaufbau (Längsschnitt)

4.2 Entwicklung einer Messeinrichtung zur Ermittlung der Luftdichtheit

Die Messung mittels "Blower Door" ist hier nicht zielführend, da die Luftdichtheit des bestehenden Gebäudes bei weitem nicht die Anforderungen erfüllt und die Verbesserung einer einzelnen Gefachreihe bezogen auf das gesamte Gebäudevolumen messtechnisch kaum erfassbar wäre. Das Funktionsprinzip der eigens für diese Versuchsreihe entwickelten Messeinrichtung zur Ermittlung der Luftdichtheit der einzelnen Gefache basiert wie das genormte Blower Door –Verfahren ebenfalls auf dem Prinzip der Differenzdruckmessung. Hierzu wird auf das Gefach die Messeinrichtung in Form einer Kammer aufgeschraubt, in der ein entsprechender Überdruck mit Hilfe eines Gebläses aufgebaut werden kann. Der entstehende Luftvolumenstrom durch die Leckagen wird mittels Hitzdrahtanemometer messtechnisch erfasst. Zur Erzeugung des erforderlichen regelbaren Differenzdruckes bedarf es einer nach außen hin luftdicht isolierten Kammer, in der mit Hilfe eines Ventilators der innenseitige Luftdruck variiert werden kann. Die in Bild 15 dargestellte Messmaske besteht aus einem Edelstahlrahmen, der im Kern durch ein Kantholz verstärkt ist. Auf diesem Rahmen ist eine Polycarbonatscheibe fest mit einem Spezialkleber vollflächig und luftdicht aufgeklebt. In der Mitte dieser Scheibe befindet sich der Einblasstutzen, der ebenfalls luftdicht eingeklebt ist. Diese Konstruktion wird mit einer Schraubenverbindung am Riegelwerk fixiert, in welchem zur einfacheren Wiederholung der Messung bereits Verbundmuffen aus Edelstahl vormontiert sind.



Bild 15: Konstruktionszeichnung der eigens für diese Versuchsreihe entwickelten Messeinrichtung zur Ermittlung der Luftdichtheit der einzelnen Gefachvarianten.



Bild 16: Die Messmaske zur Ermittlung der Luftdichtheit der Gefachaufbauten im Montagezustand.

Auf diese Weise entsteht vor dem zu messenden Gefach eine Kammer, die durch zwei voneinander unabhängigen Dichtungsebenen auf der Unterseite der Messeinrichtung luftdicht an dem Riegelwerk angeschlossen ist. An dem Einblasstutzen wird ein flexibler und luftdichter Schlauch befestigt, der wiederum an einem Gebläse montiert ist. Bild 16 zeigt zum besseren Verständnis die Messeinrichtung im Montagezustand an einem Gefach. Gut zu erkennen ist bei dieser Einstellung der vom Einblasstutzen abgehende dünne Schlauch. Dieser ist direkt am Differenzdruckmessgerät angeschlossen und liefert den Vergleichswert zum Umgebungsluftdruck. Auf diese Weise wird der tatsächliche Überdruck in der Kammer kontinuierlich gemessen und am Differenzdruckmessgerät angezeigt. Dem verwendeten Gebläse ist ein Regler zur Einstellung der gewünschten Druckdifferenz vorgeschaltet, mit dessen Hilfe der Kammerdruck mit hinreichender Genauigkeit stufenlos variiert werden kann. Die Messreihe wird in 5 Pa-Schritten beginnend bei 15 Pa durchgeführt und endet bei einem Differenzdruck von 140 Pa. Die hier aufgezeichneten Messreihen gehen damit über das nach Norm vorgegebene Vergleichsmaß von 100 Pa hinaus.



Bild 17: Detail der Strömungsmessung mit Hilfe eines Hitzdrahtanemometers in der Messstrecke der Versuchseinrichtung.

Der flexible Schlauch wird auf dem Weg zum Ventilator durch ein gerades, formsteifes und deutlich dünneres Zwischenstück unterbrochen. Dies stellt die Messstrecke dar, auf der die Strömungsgeschwindigkeit gemessen wird und dient der Beruhigung der turbulenten Strömung, sodass die Messung des Volumenstromes in einem annähernd als laminar angenommenen Strömungsabschnitt erfolgen kann. Diese Messstrecke ist in Bild 17 dargestellt. Die Strömungsmessung erfolgt mittels Hitzdrahtanemometer. Bild 18 zeigt den gesamten Messaufbau.

Um ein Verfälschen der Messwerte durch systemimmanente Leckagen der Messeinrichtung ausschließen zu können, ist zu Beginn der Versuchsreihe die Dichtheit der Messmaske experimentell ermittelt worden. Hierfür ist eine Messung in montiertem Zustand durchgeführt worden, wobei zwischen Gefach und Messmaske die zur Positionierung der Verbindungsmuffen verwendete Bohrschablone aus Hartfaser mit eingebaut wurde. Durch die Abdichtung des Gefachaufbaus soll jeglicher möglicher Einfluss entstandener Leckagen innerhalb des Testgefaches ausgeschlossen werden. Durch diese Vergleichsmessung kann direkt ermittelt werden, welcher Volumenstrom allein durch die Messeinrichtung selbst entweicht, ohne dass eine Undichtheit im Gefach vorliegt. Dieser Kurvenverlauf ergibt eine so genannte Referenzkurve und ist in allen Ergebnisdarstellungen schwarz dargestellt.



Bild 18: Darstellung des kompletten Versuchsaufbaus zur Ermittlung der Luftdichtheit der Varianten.

4.3 Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen

Die Luftdichtheit ist innerhalb des Untersuchungszeitraumes mehrfach gemessen worden, um möglicherweise jahreszeitlich bedingte Schwankungen der Luftdichtheit der unterschiedlichen Konstruktionsvarianten erfassen zu können. Die Diagramme enthalten alle zu der entsprechenden Ausführungsvariante durchgeführten Messungen, so dass ein direkter Vergleich der Entwicklung der Dichtheit während des gesamten Untersuchungszeitraums möglich ist. Gemessen wurde an den Felder 1 und 2 auf der Westseite des Testfachwerkhauses jeweils am untersten Gefach. Die Vergleichskurve des alten Gefachaufbaus (gepunktete Kurve) spiegelt das Messergebnis eines alten Gefaches wieder, das deutlich erkennbare Fugen zwischen Ausfachung und Riegelwerk aufweist.

Die in Bild 19 dargestellten Kurven für Feld 1 weisen in Bezug auf die Referenzkurve eine gute Dichtheit der gewählten Anschlussgeometrie auf. Erkennbar ist, dass im Verlauf der Untersuchungsreihe die Dichtheit der Konstruktion tendenziell zugenommen hat, obwohl die Wetterlage von häufigen und teilweise heftigen Niederschlägen in Verbindung mit Sturmböen und Gewittern in der Region Holzkirchen geprägt war. Die im Jahr 2005 gemessene Zunahme der Luftdurchlässigkeit ist, wie spätere Kontrollen vermuten lassen, vor allem in einem Dichtigkeitsverlust der Messapparatur begründet.



Bild 19: Darstellung der Entwicklung der Luftdichtheit während des Untersuchungszeitraumes auf der Westseite in Feld 1 unten.

Beim Feld 2 lässt sich, wie in Bild 20, erkennbar ist, eine ähnliche Tendenz wie in Feld 1 feststellen. Die Dichtheit der Fuge nimmt über den Untersuchungszeitraum hin annähernd stetig zu. Quantitativ gesehen stellt sich eine ähnlich hohe Dichtheit wie bei Variante 1 ein.



Bild 20: Darstellung der Entwicklung der Luftdichtheit während des Untersuchungszeitraumes auf der Westseite in Feld 2 unten.

Geht man davon aus, dass das gesamte Fachwerkgebäude mit derartigen Ausfachungen ausgestattet ist und unterstellt man für die gesamte Umfassungsfläche des Testfachwerkhauses von ca. 150 m² eine konstante flächenbezogene Luftwechselrate in Höhe der hier erfassten Messwerte bei 50 Pa Druckdifferenz, so erhält man bei dem in diesem Fall vorliegenden beheizten Gebäudevolumen von ca. 190 m³ näherungsweise einen maximalen Infiltrationsluftwechsel von 0,1 h-1 über die Gefache. Damit wird über die Gefache der hier untersuchten Sichtfachwerkkonstruktionen nur ein vernachlässigbarer zusätzlicher Infiltrationsluftwechsel bewirkt.

4.4 Ergebnisse der Feuchtemessungen

Während des gesamten Versuchszeitraumes sind einmal wöchentlich die Messwerte der Fugenfeuchte aufgenommen worden. Dabei wurde das Testfachwerkhaus in der Heizperiode bis einschließlich Mai auf 20 °C Innentemperatur und 50 % relative Raumluftfeuchte klimatisiert.

Die Feuchteprofile in den Fugen des Feldes 1 sind in Bild 21 und 22 einander gegenübergestellt. Der Verlauf der Messstelle 4 (hier blau dargestellt) fällt sowohl im mittleren als auch im unteren Feld deutlich auf. Die dort gemessenen Werte liegen während der Heizperiode in einem relativ hohen Bereich von über 30 Masse - %, fallen in den Frühlingsmonaten aber auf Feuchten um die 20 Masse - % ab bzw. knapp darunter, um im folgenden Winter erneut anzusteigen. Dieses Verhalten ist nicht verwunderlich, da diese Messstelle sehr weit außen liegt. Eine Gefährdung der Baukonstruktion dürfte aber kaum gegeben sein, da zu den Zeitpunkten mit Feuchten oberhalb von 20 Masse - % dort niedrige Temperaturen vorliegen, die einem Wachstum von Holz zerstörenden Pilzen kaum ermöglichen. Die übrigen drei Messstellen in der Fuge weisen einen annähernd konstanten Kurvenverlauf über den Untersuchungszeitraum hinweg auf, wobei die Feuchte von innen nach außen im Fugenprofil leicht ansteigt. Das Feuchteniveau pendelt sich bei den Messstellen 1 (schwarzer Kurvenverlauf) und 2 (roter Kurvenverlauf) auf unter 20 Masse - % ein, die Werte der Messstelle 3 (hier grün dargestellt) liegen im Bereich von ca. 20 Masse - % Feuchte.



Bild 21: Feuchteprofile in der Fuge auf der Westseite in Feld 1 Mitte.



Bild 22: Feuchteprofile in der Fuge auf der Westseite in Feld 1 unten.

Aus den relativ konstanten Kurvenverläufen der drei innen liegenden Messstellen in beiden Fugenquerschnitten des Feldes 1 lässt sich ableiten, dass keine unmittelbare Abhängigkeit des Feuchteprofils im Inneren der Fuge von einem Feuchteeintrag aus Niederschlagsereignissen besteht und die Fuge somit als schlagregendicht eingestuft werden kann. Dies spricht neben den beschriebenen Dichtheitsmessungen ebenfalls für die Gesamtdichtheit der gewählten Fugenkonstruktion. Hierbei ist besonders hervorzuheben, dass aus der durch die enorme Niederschlagsbelastung auf der hier untersuchten Westseite bedingten Feuchtelast ein deutlich stärkerer Einfluss auf das Feuchteprofil innerhalb der Konstruktion zu erwarten war.

Die gemessenen Kurvenverläufe der Feldes 2 sind in Bild 23 und 24 dargestellt. Ähnlich den Verläufen von Feld 1 sticht jeweils die Kurve der Messstelle 4 (blau) deutlich heraus. Die Anfangsfeuchten der Messreihen liegen hier bei über 40 Masse- % und steigen in den Wintermonaten weiter auf bis zu 80 Masse - % an. Anschließend fallen die Kurven wie bei Feld 1 deutlich ab, pendeln sich jedoch auf einem unterschiedlich hohen Niveau am Ende des Sommers ein. Im darauf folgenden Winter werden wieder Wassergehalte um 50 M.-% erreicht. Die gemessene Feuchte im mittleren Feld (Bild 23) liegt in einem mit Feld 1 vergleichbaren Bereich und stellt sich auf ca. 20 Masse - % ein. Sie liegt damit jedoch um etwa 10 Masse - % unterhalb der Messwerte des unteren Feldes (Bild 24). Dies lässt sich zum einen auf den Zustand der Schwelle zum Zeitpunkt des Gefacheinbaus zurückführen, die von der vorherigen Ausfachung und Fugengestaltung stark in Mitleidenschaft gezogen war. Um die vorhandenen Schäden für diese Untersuchung provisorisch zu beheben, ist ein Holzkitt verwendet worden, der die bereits verfaulten Bereiche in der Schwelle ersetzt bzw. aus-

füllt. Damit konnte ein eigentlich erforderlicher und kostenintensiver Austausch der Schwelle verhindert werden. Da der Holzkitt jedoch ein anderes Feuchteverhalten aufweist als Massivholz und die homogene Struktur dadurch unterbrochen ist, weichen die Messwerte von dem bisher zu verzeichnenden Feuchteniveau ab. Die deutlich höheren Werte an dieser Messstelle sind zusätzlich auf die höhere Wasseraufnahmefähigkeit des Fachwerkmörtel zurückzuführen, der gegenüber dem Sanierputz mit einem w - Wert von 0,5 kg/(m² \sqrt{h}) einen w – Wert von ca. 2 kg/(m² \sqrt{h}) aufweist. Dieser Putz kann demnach schneller Feuchte aufnehmen, was sich in dem Feuchtegehalt im Anschlussbereich der Riegelkonstruktion mit der Ausfachung niederschlägt.

Die Messstellen 1 (schwarz) und 2 (rot) weisen ein über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg annähernd gleich bleibendes Feuchteniveau auf und liegen unter 20 Masse - %. Ab Anfang Oktober weist das untere Feld deutlich höhere Feuchten auf. Dies ist in einer Schädigung dieses Gefaches während der Umbaumaßnahmen des rechts daneben liegenden Gefaches begründet. Bei den in Bild 20 dargestellten Ergebnissen der Luftdichtheit dieses Gefaches wurde deshalb ab diesem Zeitpunkt keine Luftdichtheitsmessung mehr vorgenommen.



Bild 23: Feuchteprofile in der Fuge auf der Westseite in Feld 2 Mitte.



Bild 24: Feuchteprofile in der Fuge auf der Westseite in Feld 2 unten.

4.5 Rechnerische Untersuchungen

Mit Hilfe des am IBP Holzkirchen entwickelten und an Freiland- und Labordaten validierten menügesteuerten PC-Programms WUFI[®] (Wärme und Feuchte instationär) und dessen Zusatzmodul WUFI[®]CFD soll untersucht werden, welchen Einfluss eine mögliche Fugenbildung auf das Feuchteverhalten der hier untersuchten Konstruktionsvarianten ausübt. Als Modellfuge dient hierzu eine einfache Fugengeometrie mit einer durchschnittlichen Fugenstärke, die sich im Deckputzbereich der Ausführungsvarianten eingestellt hat. Um den ungünstigeren Fall betrachten zu können, wird die Fugenstärke der Variante 1 zugrunde gelegt, bei der sich außenseitig ein Fuge von ca. 1 mm ausbildete. Für die Berechnungen wird, um den eher ungünstigeren Fall zugrunde zu legen, eine durchgängige Fuge mit einer im gesamten Querschnitt der Konstruktion gleich bleibenden Fugenstärke angenommen, obwohl außen mit großer Wahrscheinlichkeit die Fugenstärke deutlich größer ist. Ferner wird rechnerisch ein möglicher zusätzlicher Einfluss der hier verwendeten unterschiedlichen Putzarten im Außenbereich untersucht. Die Berechnungssoftware des neuesten Zusatzmoduls WUFI[®]CFD befindet sich derzeit noch in der Erprobungsphase und wird weiterentwickelt. In Bild 25 ist der für diese Berechnungen zugrunde gelegte Aufbau dargestellt.



Bild 25: Darstellung der berechneten vereinfachten Fugengeometrie (hier für Feld 1).

Für die rechnerischen Untersuchungen ist ein spezifischer Klimadatensatz erstellt worden, der sich auf den tatsächlichen Untersuchungszeitraum bezieht und für das Innenklima anstatt der vorgegebenen sinusförmigen Standardklimakurve die tatsächlichen Innenklimadaten verwendet, die in Stundenmittelwerten mit Hilfe eines Datenloggers aufgezeichnet wurden.

Durch einen in [12] durchgeführten Abgleich der Messergebnisse der Untersuchungen und Computersimulationen mit einem CFD-Programm können sinnvolle und validierte Vorgaben für die notwendigen Strömungsparameter für CFD-Berechnungen angenommen werden. Bei den dort durchgeführten Berechnungen sind ebenfalls die bei realen Objekten vorhandenen Leckagen für die rechnerische Simulation durch Spaltleckagen einfacher Geometrie nachgebildet worden. Eine der dort definierten Fugengeometrien entspricht dem im Rahmen dieser Arbeit erzeugten Modell, welches den durchgeführten WUFI[®]-Berechnungen zugrunde gelegt wurde. Dieses Modell weist eine von innen nach außen durchgehende Fuge gleich bleibender Stärke von 1 mm auf, in der sich eine laminare Strömung einstellt. Die für den Baubereich interessierenden Spaltleckagen weisen nach [12] bis zu einer Druckdifferenz von 20 Pa zwischen Innenraum und Umgebungsklima überwiegend laminare Strömungen auf. Erst bei einer Spalthöhe von mehr als 4 mm ist bei den üblichen Druckdifferenzen bis maximal 20 Pa mit einer turbulenten Strömung zu rechnen. Die Rauhigkeit der Oberflächen der die Fuge begrenzenden Materialien ist daher als Einflussgröße auf den Druckabfall zu vernachlässigen und hat nach dem in [12] beschriebenen einfachen Ansatz keinen Einfluss auf den Volumenstrom bei ansonsten gleichen Randbedingungen. Da es in der hier verwendeten Software WUFI[®]CFD nicht möglich ist, aus den Druckdifferenzen die sich in der Fuge einstellende Strömungsgeschwindigkeit errechnen zu lassen, sind die in [12] ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten und die zugehörigen Druckdifferenzen für die hier dargestellten Berechnungen zugrunde gelegt worden. Die Berechnungen erfolgen hierbei ausschließlich für die Spalthöhe von 1 mm, die der tatsächlichen Rissbreite zwischen Deckputz und Riegelwerk der

untersuchten Varianten am Testfachwerkhaus entspricht. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen für die berechneten Druckdifferenzen von 2 Pa, 5 Pa und 20 Pa jeweils bei 0,14 m/s, 0,34 m/s und 1,3 m/s.

4.6 Ergebnisse der Berechnungen

In der in Bild 26 dargestellten Wärme- und Feuchteverteilung sind die vier Bereiche eingezeichnet, die im Folgenden näher betrachtet werden. In der Darstellung der Temperaturen im Konstruktionsquerschnitt fällt besonders die Temperaturentwicklung im Bereich der Fuge auf, die bis zum Luftauslass ähnlich hohe Temperaturen aufweist, wie die innenseitige Oberfläche des Riegelwerkes und der Ausfachung. Dies hängt mit dem konvektiven Luftvolumenstrom zusammen, der bei Durchströmen der Modellfuge die aus der Raumluft enthaltene Wärme an die Fugen begrenzenden Materialien abgibt. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit der Ausfachungsmaterialien breitet sich die Temperaturenköhung im Riegelwerk weiter aus, als in der Ausfachung.

Bild 27 zeigt für Feld 1 oben links die berechneten Temperatur- und Feuchteverläufe der Position 1 und oben rechts der Position 2 für eine Druckdifferenz von 5 Pa. Vergleicht man diese beiden Temperaturverläufe in den außen liegenden zur genaueren Betrachtung ausgewählten Bereichen, so kann man erkennen, dass die Temperatur an Pos. 1 im Mittel um ca. 5 °C höher liegt und eine geringere Schwankungsbreite aufweist. Dies hängt vermutlich an dem zusätzlichen Wärmeeintrag infolge der konvektiven Durchströmung von innen nach außen. Die Temperaturen an Position 3 (Bild 27 unten links) pendeln sich in einem annähernd gleich bleibenden Niveau von ca. 18 °C ein und liegen damit erwartungsgemäß nahe der Innenlufttemperatur. Im Sanierputz an Pos. 4 erhält man annähernd die gleichen Temperaturverläufe wie an Pos. 2.

Bei einem niedrigerem Differenzdruck von 2 Pa ergibt sich an Position 1 aufgrund der geringeren Strömung und damit vermindertem Energietransport in der Heizperiode eine etwas niedrigere Temperatur und entsprechend bei 20 Pa eine höhere Temperatur (beides nicht dargestellt). An den drei anderen Positionen ist dagegen kaum ein Druckeinfluss erkennbar.

Die in den Graphen der Positionen 1 bis 3 grün dargestellte Linie entspricht dem nach [4] kritischen Feuchtegehalt im Holz von 20 Masse - %, der nur für einen kurzen Zeitraum überschritten werden darf. Die Kurven der Wassergehalte an den Positionen 1 und 3 verlaufen gualitativ ähnlich, wobei an der äußeren Position 1 der Wassergehalt auf etwas höherem Niveau liegt. Dieser Feuchteanstieg ist auf die Konvektion innerhalb der Fuge zurückzuführen, liegt jedoch nicht in einem kritischen Bereich. Obwohl im Rahmen dieser Untersuchungen mit deutlich höheren als allein aus den Messungen resultierenden Strömungen innerhalb der Anschlussfuge mit einem entsprechend hohen konvektiven Feuchteeintrag gerechnet wurde, ist die Feuchtezunahme in der Anschlussfuge unerwartet gering. Zum einen hängt das damit zusammen, dass aufgrund der einfachen Fugengeometrie die Verweildauer des eindringenden Luftvolumens innerhalb der Konstruktion bereits bei einer Druckdifferenz von nur 2 Pa mit ca. einer Sekunde für einen nennenswerten konvektiven Feuchteeintrag zu gering ist. Da die Strömungsgeschwindigkeiten bei den ebenfalls rechnerisch untersuchten Druckdifferenzen von 5 Pa und 20 Pa deutlich höher liegen, besteht aufgrund der noch kürzeren Verweilzeiten trotz des mengenmäßig entsprechend größeren durch die Fuge strömenden Luftvolumens kaum die Möglichkeit eines höheren konvektiven Feuchteeintrages infolge einer Druckerhöhung. Dies erklärt die nur äußerst geringen Anstiege der Wassergehalte in Abhängigkeit der angelegten Druckdifferenz in allen ausgewerteten Bereichen (nicht dargestellt). An Position 2 ergeben sich die höchsten Holzfeuchten, die aber ebenfalls gemäß der Berechnung unterhalb von 20 M.-% bleiben.



Bild 26: Darstellung der mit WUFI[®]CFD berechneten Wärme- und Feuchteverteilung innerhalb der Konstruktion von Variante 1 bei 20 Pa Druckdifferenz zum Zeitpunkt des maximalen Wassergehaltes im März.

Links: Darstellung der berechneten Wassergehaltsverteilung in kg/m³. Rechts: Darstellung der berechneten Temperaturverteilung in °C.



Bild 27: Darstellung der Temperatur- und Wassergehaltsverläufe von Feld 1

Oben links:	Position 1 aus Bild	25
Oben rechts:	Position 2 aus Bild	25
Unten links:	Position 3 aus Bild	25
Unten rechts:	Position 4 aus Bild	25

Die Berechnungen zeigen auch, dass die Wahl des Außenputzes (Sanierputz in Feld 1 und Fachwerkmörtel in Feld 2) keinen wesentlichen Einfluss auf die Feuchteverhältnisse innerhalb des Riegelwerkes hat. Auf die nochmalige Darstellung der Verläufe von Temperatur und Wassergehalt im Querriegel bei Variante 2 wird deshalb verzichtet.

Bei allen ausgewählten Bereichen innerhalb des Querriegels ist festzustellen, dass zu keinem Zeitpunkt diese kritische Holzfeuchte erreicht wird. Die trotz der Berücksichtigung der Konvektion geringen Feuchtegehalte innerhalb des Riegelwerkes bedeuten dabei jedoch nicht, dass die Fugenbildung im Anschlussbereich zwischen Riegelwerk und Ausfachung als unkritisch zu bewerten ist, da der Schlagregeneinfluss auf eine solche Fugengeometrie aufgrund des Entwicklungsstandes der Software derzeit rechnerisch nicht berücksichtigt werden kann. Gerade auf der hier untersuchten Westseite wird bei Schlagregen mit einem entsprechenden Winddruck eine nicht unerhebliche Menge an Feuchte unmittelbar über die Fuge in die Konstruktion gelangen. Zugleich kann sich im Bereich dieser Fugen das ablaufende Niederschlagswasser der oberhalb der Fuge liegenden Fassadebereiche sammeln, was ein weiteres Gefährdungspotential für das tragende Holzgerüst darstellt.

Für die meisten mineralischen Baustoffe kann vereinfachend angenommen werden, dass ein Unterschreiten des Gefrierpunktes keine Schädigung hervorruft, wenn der dabei vorliegende Wassergehalt weniger als 90 % der freien Sättigung des Materials beträgt. Erkennbar wird ein solcher Frostschaden am Abplatzen des Außenputzes. Der hierfür kritische Wassergehalt liegt bei dem Sanierputz bei 450 kg/m³ und ist mit einer grünen Linie in der zugehörigen Graphik in Bild 16 rechts unten dargestellt.



Bild 28: Darstellung der Temperatur- und Wassergehaltsverläufe von Feld 2

Der Wassergehalt innerhalb der Konstruktion im Bereich des Fachwerkmörtels in Feld 2, der in Bild 28 dargestellt ist, liegt deutlich niedriger, als bei der Ausführung mit Sanierputz. Dies hängt vor allem mit dem deutlich höheren w – Wert des Fachwerkmörtels zusammen, der für eine höhere Trocknungsgeschwindigkeit sorgt. Die kritische Feuchtegrenze für den Frostschutz des Fachwerkmörtels liegt entsprechend der geringeren freien Sättigung mit ca. 320 kg/m³ niedriger als beim Sanierputz (grüne Linie). Auch hier zeigen die Berechnungen, dass sich die durch Konvektion anfallende Feuchtemenge hauptsächlich im Bereich des Fachwerkmörtels an der Grenze zur Mineralwolle sammelt. Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu bedenken, dass die Berechnungen keinen Regeneinfluss berücksichtigen.

Allen berechneten Ergebnissen der vier definierten Bereiche ist gemein, dass in keinem betrachteten Fall die Feuchte die in den Diagrammen eingezeichnete kritische Grenze übersteigt. Das Feuchteverhalten sowohl im Riegelwerk als auch im Gefach ist, wie die Berechnungsergebnisse zeigen, bei einer derartigen Fugengeometrie und Strömungsgeschwindigkeit nahezu unabhängig von einer wechselnden Druckdifferenz. Der geringe Feuchteeintrag hängt hierbei mit der geringen Verweildauer des Luftvolumens innerhalb der Konstruktion zusammen. Dadurch kann die Luft nicht so weit abkühlen, dass ein nennenswerter konvektiver Feuchteeintrag entsteht. Der Anteil an konvektiver Feuchte, der dennoch entsteht, wird über die Diffusion durch den Dämmstoff an den Außenputz transportiert. Von dort aus wird sie in Abhängigkeit vom w – Wert des Materials mehr oder weniger schnell zur Außenseite transportiert und kann von dort aus der Konstruktion über Verdunstung entweichen. Ein Einfluss des gewählten Außenputzes auf das Feuchteverhalten innerhalb des Querriegels ist bei den hier untersuchten Ausfachungen nicht erkennbar.

5 Schlussfolgerungen

Sowohl für die Errichtung von Gebäuden als auch für die Altbausanierung gelten seit Einführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) im November 2001 strenge Anforderungen hinsichtlich der Luftdichtheit der Gebäudehülle und der Begrenzung der Transmissionswärmeverluste. Um diese gesetzlich verankerten und daher verbindlichen Anforderungen auch im Bereich des Fachwerkbaus erfüllen zu können, sind verschiedene neuartige Sichtfachwerkaufbauten untersucht worden. Die Untersuchungen sind an einem Testfachwerkhaus auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer Instituts für Bauphysik IBP in Holzkirchen durchgeführt worden. Holzkirchen liegt geographisch bedingt in der Schlagregenbeanspruchungsgruppe III, welche die höchste Niederschlagsbelastung für die nach Westen ausgerichteten Fassaden zur Folge hat. Dadurch war es möglich, die neuartigen Aufbauten auch unter für Fachwerkkonstruktionen extremen Niederschlagsbedingungen zu testen.

Unter Voraussetzung der Erhaltung des äußeren Erscheinungsbildes der Fachwerkfassade bleibt bisher, 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 Dampfdif-

fusionswiderstand (sd-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 sd-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 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 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 als gemäß den WTA-Richtlinien ohne Schaden gebaut werden können. Eine Überprüfung im Freilandversuch sollte möglichst rasch erfolgen.

Als völlig neuartige Variante der Fachwerksanierung wird im Rahmen dieses Beitrags über zwei Varianten mit in der Ausfachung liegender Dämmung berichtet. Diese beiden Varianten sind beidseitige Sichtfachwerkkonstruktionen mit verputzten Ausfachungen und wurden auf der Westseite des Versuchsgebäudes eingebaut. Der Unterschied dieser Varianten liegt lediglich in der Wahl des Außenputzes. Das Hauptaugenmerk bei allen Varianten war auf die Ausführung des Anschlussdetails zwischen Riegelwerk und Ausfachung gerichtet, worin die wesentlichste Schwachstelle sämtlicher bis dahin getesteter Ausfachungsvarianten bestand. Um die neu entwickelten Anschlussdetails im Hinblick auf die Anforderungen der EnEV umfassend beurteilen zu können, erfolgten die Untersuchungen mit drei Schwerpunkten:

Luftdichtheit der Konstruktion, Feuchteverhalten innerhalb der Konstruktion und abschließend die rechnerische Beurteilung des langfristigen Feuchteverhaltens der gewählten Ausfachungen. Die Entwicklung der Luftdichtheit der verschiedenen Varianten wurde mit einer eigens für diese Untersuchung entwickelten Messeinrichtung in regelmäßigen Abständen überprüft. Das Ergebnis dieser Messungen zeigt eine hohe Luftdichtheit der beidseitigen Sichtfachwerkkonstruktionen. Diese hohe Luftdichtheit spiegelt sich auch in den Messwerten der Holzfeuchten an den Querriegeln innerhalb der Konstruktion wieder. Dabei ist festzuhalten, dass der diffusionsoffene Aufbau ein sehr hohes Trocknungspotential aufweist.

Um den konvektiven Feuchteeintrag bei einer im beidseitigen Sichtfachwerk möglichen durchgehenden Fugenbildung abschätzen zu können, ist das Feuchteverhalten der Konstruktion mit Hilfe der Simulationssoftware WUFI®CFD berechnet worden. Dieses Programm bietet die Möglichkeit, neben den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen auch die Konvektion durch einen Luftspalt einfacher Geometrie berücksichtigen zu können. Die für die hier erfolgten Berechnungen erzeugte geometrische Modellfuge ist von innen nach außen mit einer gleich bleibenden Spaltstärke von 1 mm konstruiert und entspricht damit der maximalen Spalthöhe, die sich zwischen Deckputz und Riegelwerk eingestellt hat. Die rechnerischen Untersuchungen zeigen einen vorher nicht erwarteten für die Holzkonstruktion günstigen Effekt auf. Aufgrund der Diffusionsoffenheit der innen liegenden Mineralwolledämmung wird über Diffusionsvorgänge die am Holzbalken im Fugenbereich vorliegende Feuchte zum Teil in den kälteren Außenputz der Ausfachung verlagert und kann von dort durch die Kapillaraktivität des Putzes über größere Flächen abtrocknen. Durch diesen Mechanismus weist die Ausfachung mit innen liegender Dämmung eine zusätzliche Sicherheit gegenüber Schäden durch Holz zerstörende Organismen auf.

Die im Rahmen dieser Untersuchungen erreichte Dichtheit der Gefachaufbauten zeigt entgegen bisheriger Expertenmeinung ein neuartiges Sanierungskonzept auf, wonach sogar auf der bislang als kritisch bewerteten Westfassade trotz höchster Schlagregenbeanspruchungen der Beanspruchungsgruppe III eine energetische Sanierung von Fachwerkgebäuden mit Umsetzung beidseitigen Sichtfachwerks denkbar wäre. Der entscheidende Vorteil neben der Erhaltung des historischen Erscheinungsbildes ist, dass zur Erfüllung der Anforderungen seitens der EnEV bei verputzten Gefachen keine Innendämmung mehr erforderlich ist. Dadurch werden die bauphysikalischen Probleme umgangen, die sich bei der Sanierung nach dem alten Konzept bisher ergeben haben. Ist aufgrund regionaler und traditioneller Bauweisen die Ausführung von Fachwerk mit Sichtziegelausfachung nicht gefordert, so stellen diese Varianten eine sinnvolle Alternative zu dem bislang verfolgten alten Sanierungskonzept dar.

Die durchgeführten messtechnischen Untersuchungen müssen noch über einen deutlich größeren Zeitraum fortgesetzt werden, um die gewonnenen positiven Ergebnisse auch langfristig zu bestätigen. Im Anschluss daran sollte eine Auswahl der neuen Ausfachungsvarianten auch in einem genutzten Demonstrationsobjekt eingebaut werden, um der Fachwelt in anschaulicher Weise deren Funktionsfähigkeit unter Beweis zu stellen. Dabei ist vor allem wichtig, auch die Denkmalschützer und Restauratoren von der neuartigen und von der bisher gewohnten Konstruktion abweichenden Lösung zu überzeugen.

Grundsätzlich ist bei der Sanierung von Fachwerkbauten auch auf folgendes zu achten:

- 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, mit Ausnahme des in dieser Arbeit vorgestellten Aufbaus, 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 geringeren Feuchtebelastung des Holzes erreicht wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Künzel, H.: Untersuchungen an einem Fachwerk-Versuchshaus mit Ausfachungen in Verbindung mit Mineralfaserdämmstoffen. IBP-Bericht FB-49/1993.
- [2] Künzel, H.: Der Feuchtehaushalt von Fachwerkwänden. Untersuchungen an Fachwerkelementen und Fachwerkhäusern. IBP-Bericht FB-55/1994.
- [3] Zillig, W.; Fitz, C.; Sedlbauer, K.: Austrocknungsverhalten einer Fachwerkwand im Schadensfall. IBP-Mitteilungen 29 (2002), Nr. 410.
- [4] DIN 68800 Teil 2, Holzschutz im Hochbau, Ausgabe Mai 1996.
- [5] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart, 1994.
- [6] Künzel, H.M. und Kasper, F.-J.: Von der Idee einer feuchteadaptiven Dampfbremse bis zur Markteinführung. Bauphysik 20 (1998), H. 6, S. 257-260.
- [7] Künzel, H.M.: Feuchtesichere Altbausanierung mit neuartiger Dampfbremse. Bundesbaublatt 45 (1996), H. 10, S. 798-801.
- [8] WTA-Merkblatt 8-3-98: Fachwerkinstandsetzung nach WTA, Beschichtungen auf Fachwerkwänden und Holz. November 1998.
- [9] Energieeinsparverordnung EnEV: 2002–02.
- [10] DIN 4108 2: 2001-03 "Wärmeschutz im Hochbau Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz"
- [11] DIN 4108 3: 2001-07 "Wärmeschutz im Hochbau Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für die Planung und Ausführung"
- [12] Geißler, A.; Hauser, G.: Abschätzung des Risikopotentials infolge konvektiven Feuchtetransportes. Abschlussbericht AIF-Forschungsvorhaben Nr. 12764 (Juli 2002).
- [13] Heinz, F.: Fugendichtheit neuartiger Sichtfachwerkaufbauten Messung mit einem neu entwickelten Messverfahren, rechnerische Beurteilung und vergleichende Bewertung. Diplomarbeit, Fachhochschule Rosenheim, 2004.