

Sichtfachwerk mit innenliegender Dämmung

Neuartiges Messverfahren zur Ermittlung der Fugendichtheit und rechnerische Beurteilung des Konvektionseinflusses –

M. Krus, C. Fitz



Dr.-Ing. Martin Krus

1984 Diplom Chemieingenieurwesen Universität Karlsruhe. 9/85 bis 11/86 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart. Seit 11/86 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen. 1995 Promotion an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen an der Universität Stuttgart. Seit SS 2000 Lehrbeauftragter an der Universität Stuttgart. Seit 10/2000 Technischer Leiter der Prüfstelle „Feuchte/Mörtel/Strahlung“. Seit WS 2003/2004 Lehrbeauftragter an der Fachhochschule Rosenheim für „Bauphysik“ und seit 1/2004 Stellvertretender Abteilungsleiter der Abteilung Raumklima und Klimawirkungen.



Dr. rer.nat. Cornelia Fitz

1977 bis 1984 Chemiestudium an der Universität Stuttgart. 1984 bis 1987 Promotion am Lehrstuhl für Organische Chemie, Biochemie und Isotopenforschung der Universität Stuttgart. Seit Mai 1994 Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Seit November 2000 stellvertretende Prüfstellenleiterin für den Bereich Feuchte und Mörtel. Seit Januar 2004 Gruppenleiterin in der Abteilung Hygrothermik.

Kurzzusammenfassung

Auch für die Altbausanierung gelten seit Einführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) strenge Anforderungen hinsichtlich der Luftdichtheit der Gebäudehülle und der Begrenzung der Transmissionswärmeverluste. Um diese Anforderungen auch im Bereich des Fachwerkbaus erfüllen zu können, sind neuartige Sichtfachwerkaufbauten mit innen liegender Dämmung untersucht worden. Die Luftdichtheit wurde mit einer eigens für diese Untersuchung entwickelten Messeinrichtung in regelmäßigen Abständen mit positiven Ergebnissen überprüft. Diese hohe Luftdichtheit spiegelt sich auch in den Messwerten der Holzfeuchten wider.

Für die Abschätzung des konvektiven Feuchteintrags bei einer möglichen durchgehenden Fugenbildung ist das Feuchteverhalten der Konstruktion mit Hilfe der Simulationssoftware WUFI®CFD berechnet worden. Diese rechnerischen Untersuchungen zeigen einen vorher nicht erwarteten für die Holzkonstruktion günstigen Effekt auf. Aufgrund der Diffusionsoffenheit der innenliegenden Mineralwollendämmung 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 großer Flächen abtrocknen.

Sichtfachwerk mit innenliegender Dämmung

Neuartiges Messverfahren zur Ermittlung der Fugendichtheit und rechnerische Beurteilung des Konvektionseinflusses – M. Krus, C. Fitz

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. 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 innenliegender Dämmung sollen neue Mess- und Rechenmethoden zur Beurteilung der Fugendichtheit und des Feuchteverhaltens unter Realbedingungen gezeigt werden.

2 Methodik der Untersuchung

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 [2] und dem „Feuchtehaushalt von Fachwerkwänden“ [3]. 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 vielfach 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.



Bild 1: Westansicht des Versuchsfachwerkhauses nach dem Umbau

3 Aufbau der Gefache

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.

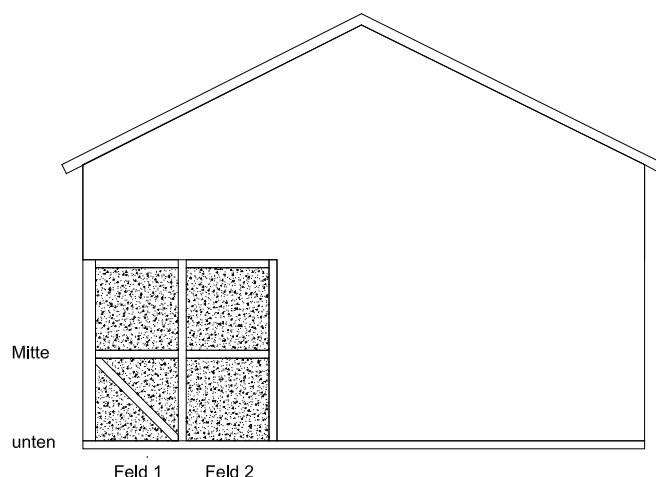


Bild 2: Aufteilung der Gefachreihen am Testfachwerkhaus auf der Westseite.
Die Zuordnung der Ausführungsvarianten erfolgt nach dieser Aufteilung.

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 2). 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 3).

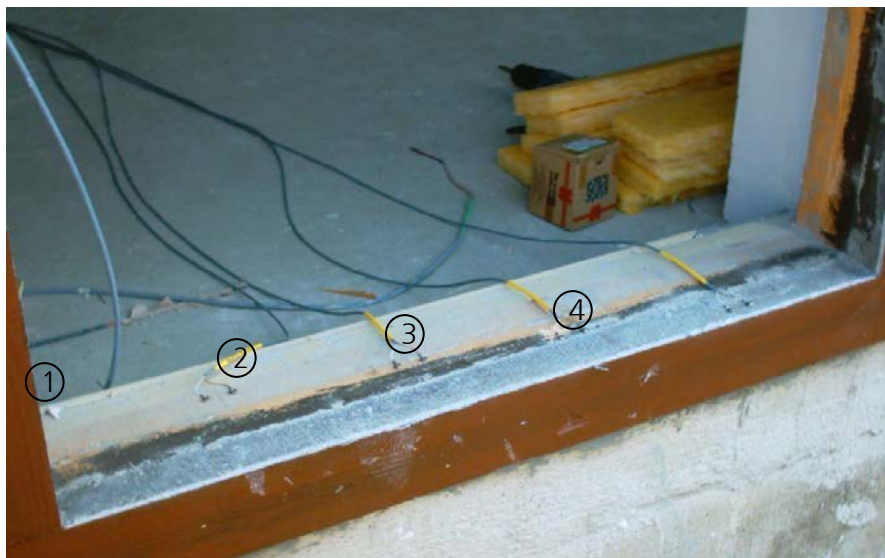


Bild 3: Anordnungsschema der Holzfeuchte - Messfühler auf den Querriegeln

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 4 zu entnehmen. Der U-Wert der Riegelkonstruktion liegt bei $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, der der Ausfachung bei $0,33 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Aufgrund der unterschiedlichen Flächenanteile ergibt sich ein gemittelter U-Wert des Gesamtaufbaus von $0,36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, der deutlich innerhalb der Anforderungsgrenzen von [4], [5] und [6] 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.

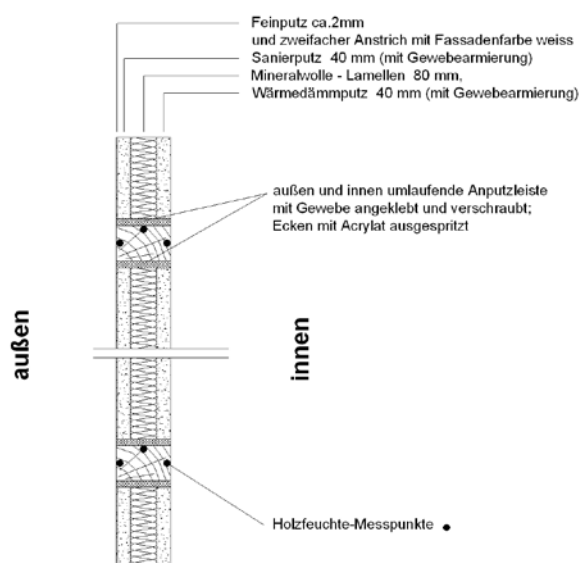


Bild 4: Gefachaufbau (Längsschnitt)

4 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 5 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.

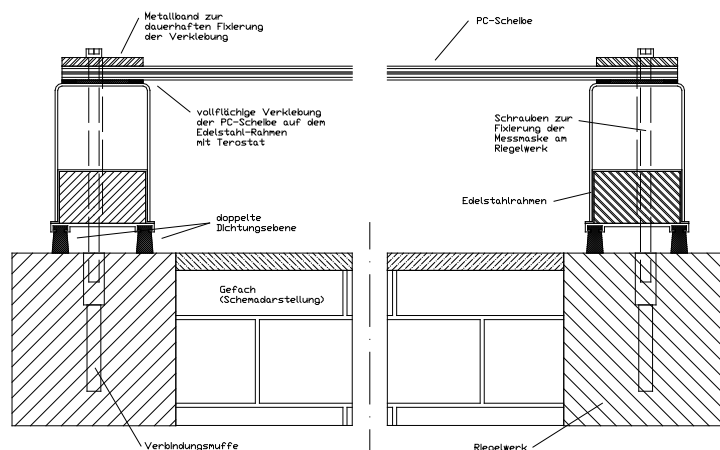


Bild 5: Konstruktionszeichnung der eigens für diese Versuchsreihe entwickelten Messeinrichtung zur Ermittlung der Luftdichtheit der einzelnen Gefachvarianten.



Bild 6: 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 6 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 7: Detail der Strömungsmessung mit Hilfe eines Hitzdrahtanemometers in der Messstrecke der Versuchseinrichtung.

Der flexible Schlauch wird auf dem Weg zum Ventilator durch ein gerades, formstifes 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 7 dargestellt. Die Strömungsmessung erfolgt mittels Hitzdrahtanemometer. Bild 8 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 8: Darstellung des kompletten Versuchsaufbaus zur Ermittlung der Luftdichtheit der einzelnen Varianten.

5 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 Testfachwerkhäuses 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 9 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.

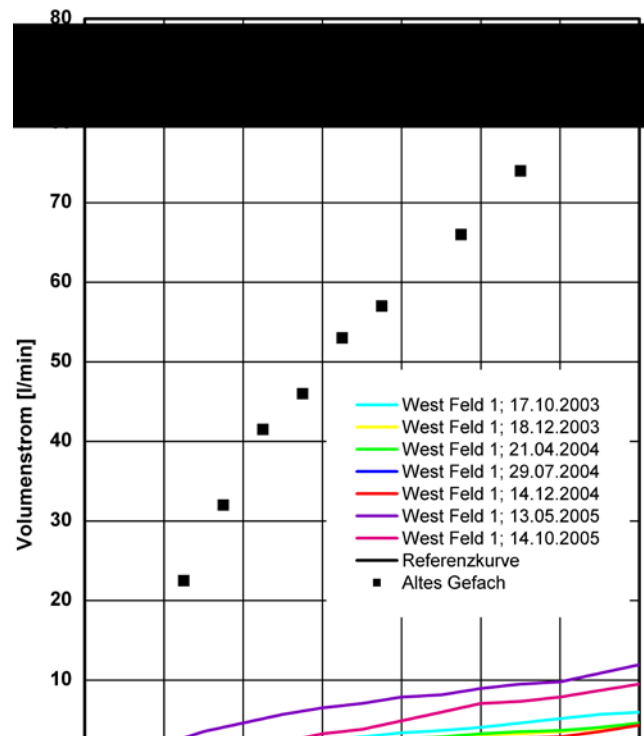


Bild 9: Darstellung der Entwicklung der Luftdichtheit während des Untersuchungszeitraumes auf der Westseite in Feld 1 unten.

Beim Feld 2 lässt sich, wie in Bild 10, 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.

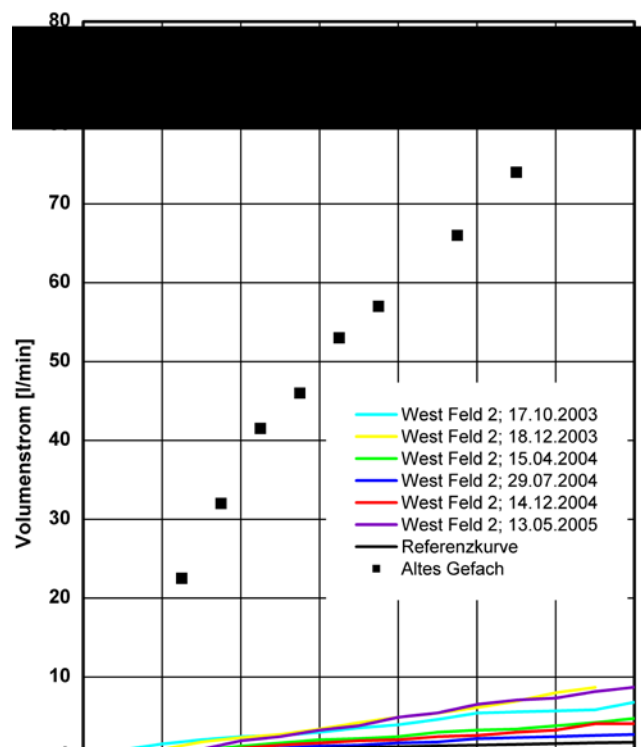


Bild 10: Darstellung der Entwicklung der Luftdichtheit während des Untersuchungszeitraumes auf der Westseite in Feld 2 unten.

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 Sichtfachwerkstrukturen nur ein vernachlässigbarer zusätzlicher Infiltrationsluftwechsel bewirkt.

6 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 Raumluftheuchte klimatisiert.

Die Feuchteprofile in den Fugen des Feldes 1 sind in Bild 11 und 12 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.

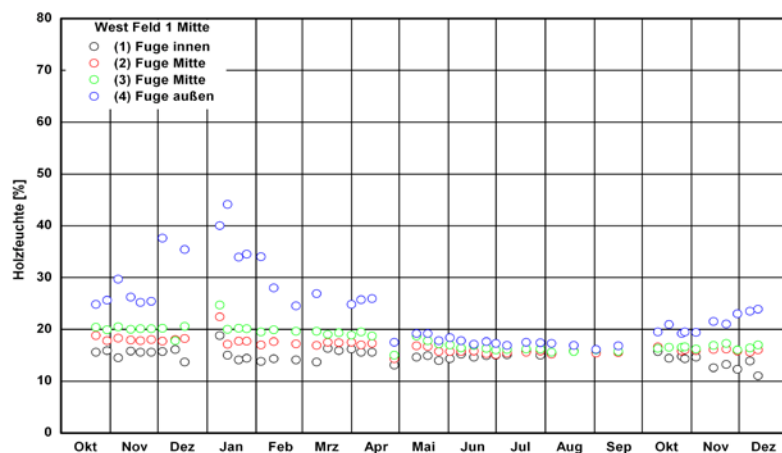


Bild 11: Feuchteprofile in der Fuge auf der Westseite in Feld 1 Mitte.

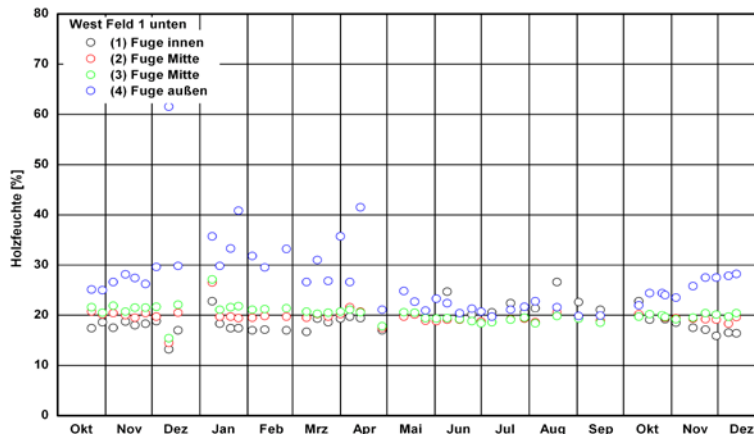


Bild 12: Feuchteprofile in der Fuge auf der Westseite in Feld 1 unten.

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 Feuchteintrag 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 13 und 14 dargestellt. Ähnlich den Verläufen der 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 13) 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 14). 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. ausfüllt. 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 $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$ einen w -Wert von ca. $2 \text{ kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{h}})$ 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 10 dargestellten Ergebnissen der Luftdichtheit dieses Gefaches wurde deshalb ab diesem Zeitpunkt keine Luftdichtheitsmessung mehr vorgenommen.

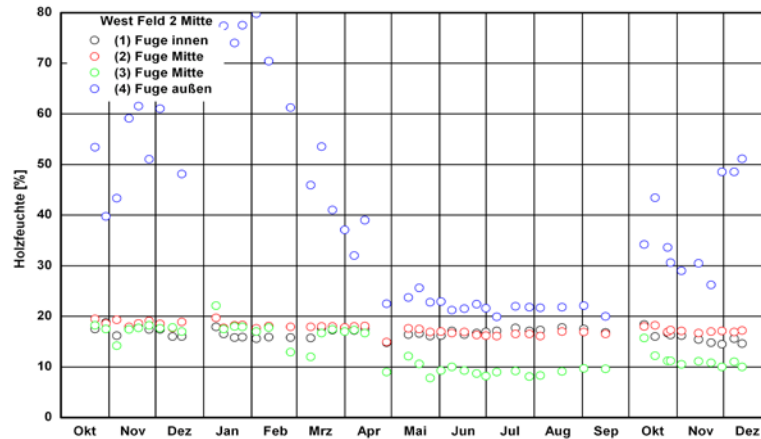


Bild 13: Feuchteprofile in der Fuge auf der Westseite in Feld 2 Mitte.

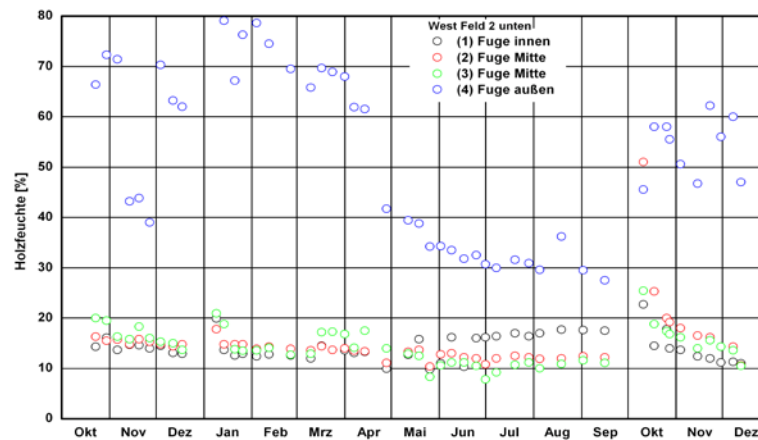


Bild 14: Feuchteprofile in der Fuge auf der Westseite in Feld 2 unten.

7 Rechnerische Untersuchungen

Mit Hilfe des am IBP Holzkirchen entwickelten und an Freiland- und Labordaten validierten menügesteuerten PC-Programms WUFI® (**W**ärme **u**nd **F**euchte **i**nstationär) 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. 1mm 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 15 ist der für diese Berechnungen zugrunde gelegte Aufbau dargestellt.

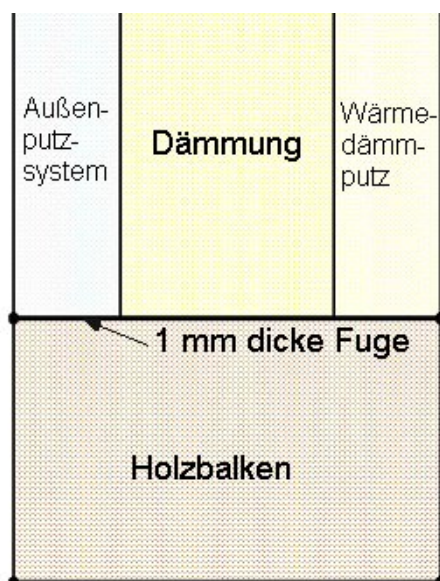


Bild 15: Darstellung der berechneten vereinfachten Fugegeometrie (hier für Feld 1).

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 [7] 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 Fugegeometrien 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 [7] 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 Rauigkeit der Oberflächen der die Fuge begrenzenden Materialien ist daher als Einflussgröße auf den Druckabfall zu vernachlässigen und hat nach dem

in [7] 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 [7] 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.

8 Ergebnisse der Berechnungen

In der in Bild 16 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 fugenbegrenzenden Materialien abgibt. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit der Ausfachungsmaterialien breitet sich die Temperaturerhöhung im Riegelwerk weiter aus, als in der Ausfachung.

Bild 17 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 17 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.

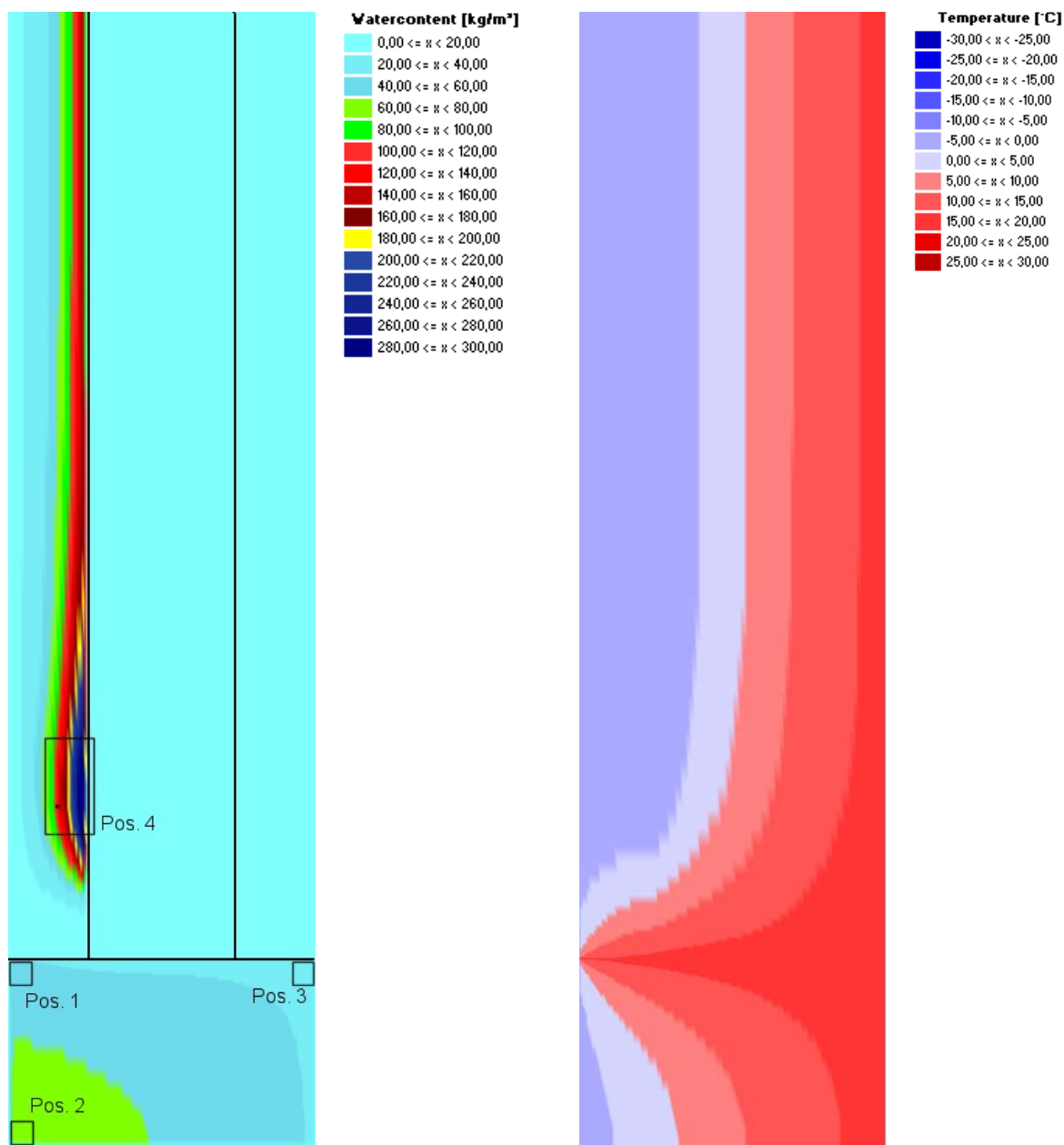


Bild 16: Darstellung der mit WUFI®CFD berechneten Wärme- und Feuchteverteilung innerhalb der Konstruktion von Variante 1 bei 20 Pa Druckdifferenz zum Zeitpunkt des maximalen Wassergehaltes im März.
 Links: Darstellung der berechneten Wassergehaltsverteilung in kg/m³.
 Rechts: Darstellung der berechneten Temperaturverteilung in °C.

Die in den Graphen der Positionen 1 bis 3 grün dargestellte Linie entspricht dem nach [8] 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 qualitativ 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 Feuchteintrages 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.

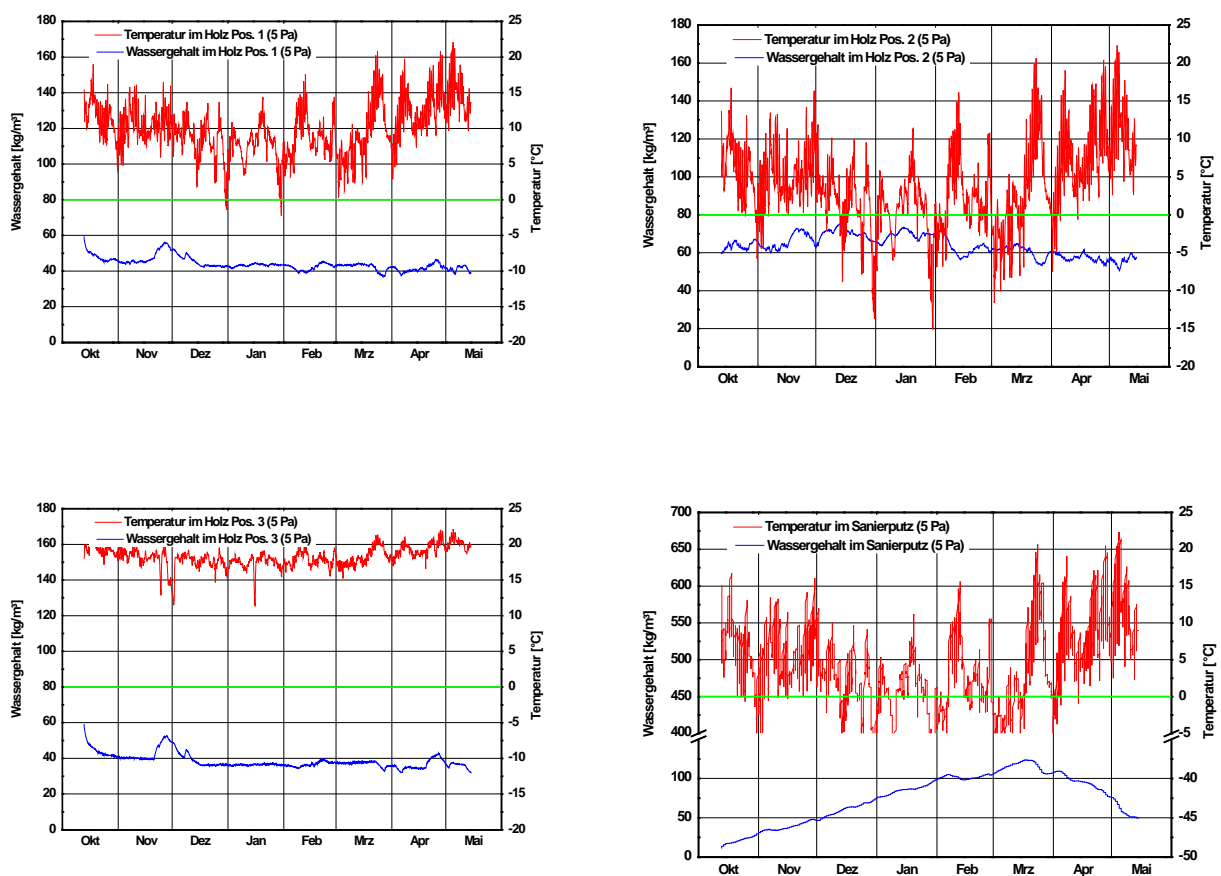


Bild 17: Darstellung der Temperatur- und Wassergehaltsverläufe von Feld 1

- Oben links: Position 1 aus Bild 15
- Oben rechts: Position 2 aus Bild 15
- Unten links: Position 3 aus Bild 15
- Unten rechts: Position 4 aus Bild 15

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 Fassadenbereiche 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/m^3 und ist mit einer grünen Linie in der zugehörigen Graphik in Bild 16 rechts unten dargestellt.

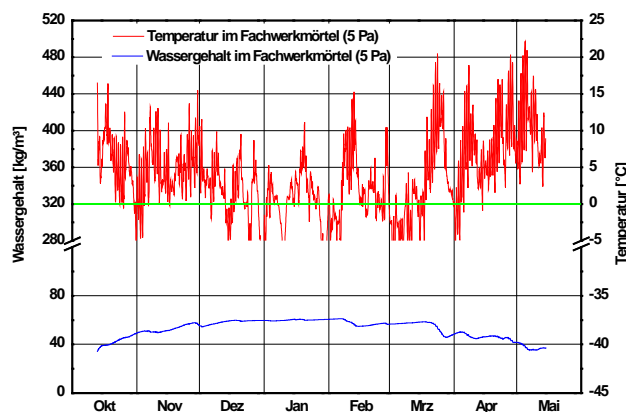


Bild 18: Darstellung der Temperatur- und Wassergehaltsverläufe von Feld 2

Der Wassergehalt innerhalb der Konstruktion im Bereich des Fachwerkmörtels in Feld 2, der in Bild 18 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/m^3 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.

9 Zusammenfassung

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 unter für Fachwerkkonstruktionen extremen Niederschlagsbedingungen zu testen.

In die Untersuchungen sind verschiedene Varianten einbezogen worden. Über zwei Varianten mit in der Ausfachung liegender Dämmung wird im Rahmen dieses Beitrags berichtet. Die Ergebnisse der anderen Varianten sowie tiefer gehende Informationen zu Versuchsaufbau und Berechnungen sind in [9] zu finden. 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 Sichtfachwerkstrukturen. Diese hohe Luftdichtheit spiegelt sich auch in den Messwerten der Holzfeuchten an den Querriegeln innerhalb der Konstruktion wider. 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 gleichbleibenden 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 innenliegenden Mineralwolle-Dämmung 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 großer Flächen abtrocknen. Durch diesen Mechanismus weist die Ausfachung mit innenliegender Dämmung eine zusätzliche Sicherheit gegenüber Schäden durch holzzerstörende 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.

Literaturverzeichnis

- [1] Künzel, H.: Regenschutz, Feuchteschutz und Wärmeschutz von Fachwerkwänden. Hinweise für Sanierung und Neubau. wksb Heft 35 S. 1-9; Juni 1995.
- [2] Künzel, H.: Untersuchungen an einem Fachwerk-Versuchshaus mit Ausfachungen in Verbindung mit Mineralfaserdämmstoffen. IBP-Bericht FB-49/1993.
- [3] Künzel, H.: Der Feuchtehaushalt von Fachwerkwänden. Untersuchungen an Fachwerkelementen und Fachwerkhäusern. IBP-Bericht FB-55/1994.
- [4] Energieeinsparverordnung – EnEV: 2002–02.
- [5] DIN 4108 – 2: 2001-03 „Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“
- [6] DIN 4108 – 3: 2001-07 „Wärmeschutz im Hochbau – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für die Planung und Ausführung“
- [7] Geißler, A.; Hauser, G.: Abschätzung des Risikopotentials infolge konvektiven Feuchte-transportes. Abschlussbericht AIF-Forschungsvorhaben Nr. 12764 (Juli 2002).
- [8] DIN 68800 – 2: 1996-05 „Holzschutz im Hochbau“
- [9] Heinz, F.: Fugendichtheit neuartiger Sichtfachwerkaufbauten – Messung mit einem neu entwickelten Messverfahren, rechnerische Beurteilung und vergleichende Bewertung. Diplomarbeit, Fachhochschule Rosenheim, 2004.