



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Master's Thesis

Beurteilung von Innendämmsystemen Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar
und
Dipl.-Ing. Dr.techn. Clemens Hecht

durchgeführt am

E 206
Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Paul Wegerer
Matrikelnummer: 0025005
Gymnasiumstraße 53
1180 Wien

Wien, Juni 2010

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, nur die angegebenen Quellen benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Wien, im Juni 2010

Danksagung

Am Ende meiner Studienzeit angelangt, möchte ich mich bei allen bedanken, die dazu beigetragen haben, dass ich die letzten Jahre in bester Erinnerung behalten werde. Dazu gehören vor allem die engagierten Professoren und Assistenten, die auf zahlreichen Exkursionen, in interessanten Vorträgen und anregenden Diskussionen mein Interesse für unterschiedlichste Themen aus dem Bereich des Bauwesens geweckt haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Studienkolleginnen und -kollegen mit denen ich viel Zeit in der Bibliothek, beim Lernen und auch abseits des Studiums verbracht habe. Sie haben oft mit dazu beigetragen, dass ich mein Ziel – meinen Studienabschluss – nicht aus den Augen verloren habe.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Betreuern, Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar und Herrn Dipl.-Ing. Dr. Clemens Hecht, für ihre wertvollen Hinweise und Ratschläge und vor allem für die Möglichkeit, über dieses interessante und zukunftssträchtige Thema meine Arbeit zu verfassen.

Mein Dank gilt auch all jenen, die sich die Zeit genommen haben, diese Arbeit Korrektur zu lesen.

Meiner Freundin, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt hat und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist, danke ich für ihre Liebe und ihr Verständnis.

Schließlich möchte ich mich auch noch sehr herzlich bei meinen Eltern bedanken, dass sie mir mein Studium ermöglicht und mich in diesen Jahren sowohl finanziell als auch moralisch unterstützt haben.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Beurteilung und der Auswahl von Innendämmsystemen für Außenwände. Um erhaltenswerte Fassaden thermisch zu sanieren, kommt häufig nur eine Innendämmung in Frage, auch wenn eine Außendämmung aus bauphysikalischer Sicht grundsätzlich vorzuziehen wäre. Die Applikation einer Innendämmung ist stets mit komplexen hygrothermischen Prozessen verbunden, die bei der Planung einer Dämmmaßnahme unbedingt berücksichtigt werden müssen.

Neben den Vor- und Nachteilen sowie den Zielen von Innendämmmaßnahmen werden eingangs die wesentlichen bauphysikalischen Grundlagen – Feuchtespeicherung, Feuchtetransport und Mindestwärmeschutz – sowie die Arten und Materialien von Innendämmsystemen vorgestellt. Danach wird ausführlich auf die Einflussfaktoren für die Auswahl eines geeigneten Innendämmsystems eingegangen. Hier spielen sowohl die Befeuchtung von außen durch Schlagregen oder aufsteigende Feuchte als auch die Befeuchtung von innen durch Dampfkonvektion und -diffusion sowie das Nutzerverhalten eine wichtige Rolle. Nicht außer Acht gelassen werden dürfen weiters konstruktive Parameter, wie die Art der Bestandskonstruktion, die Oberflächenbeschaffenheit der Bestandswand, mögliche Wärmebrücken sowie problematische Bauteilanschlüsse.

Ein weiterer Abschnitt widmet sich den Schäden, die an innengedämmten Wandkonstruktionen auftreten können. Hier steht die Schimmelpilzbildung im Mittelpunkt, die bei Wandkonstruktionen mit nachträglich angebrachter Innendämmung im Bereich von Wärmebrücken ein besonderes Risiko darstellt. Im Anschluss daran wird versucht, die unterschiedlichen Bewertungskriterien für Innendämmsysteme in einen Zusammenhang zu stellen und daraus einen Fragenkatalog zur Bestandsaufnahme bei der Planung einer Innendämmmaßnahme abzuleiten.

Der abschließende Teil beschäftigt sich ausführlich mit der messtechnischen Beurteilung von Innendämmungen. Dabei werden die Ergebnisse von Feuchte- und Temperaturmessungen, die drei Jahre lang durchgeführt wurden, jenen von Simulationen gegenübergestellt. Bei dem beschriebenen Projekt handelt es sich um den Versuch, ein Gründerzeithaus mit Schilfdämmplatten und Lehmverputz an der Innenseite zu dämmen. Neben den gemessenen Temperaturen und relativen Luftfeuchten in der eingebauten Innendämmung werden mithilfe des Simulationsprogramms HAM3D verschiedene Dämmstärken und Raumklimata miteinander verglichen. Analysen über die Gefahr von Schimmelpilzbildung anhand des Isoplethenmodells bei den untersuchten Dämmstärken schließen die Arbeit ab. Dabei zeigt sich deutlich, dass die Kombination von Schilfdämmplatten und Lehmputz eine bauphysikalisch sehr gut funktionierende Variante einer Innendämmung darstellt.

Abstract

This thesis is concerned with the assessment and range of interior insulation systems for outside walls. To thermally renovate façades worthy of preservation, interior insulation is often the only possibility, even though building physics would suggest exterior insulation to be preferable. The application of interior insulation is always connected with complex hygrothermal processes that have to be considered during the planning stage of an insulating measure by all means.

At the beginning, the building physical basics – retention of moisture, transport of moisture and minimal thermal insulation – and the kinds and materials of interior insulation systems will be introduced with their advantages and disadvantages as well as the objectives of interior insulating measures. After that, the factors of influence on choosing a suitable interior insulation system will be dealt with in great depth. Here, the dampening from the outside through driving rain or ascending moisture is as important as the dampening from the inside through convection of steam and user behaviour. Constructive parameters, such as the constituent construction, the surface character of the constituent wall, possible thermal bridges and problematic constructive junctions must be taken into account.

A further section will deal with the damage that can occur on interior insulated wall constructions. The development of mould, which proposes a risk especially with wall constructions subsequently fitted with interior insulation in areas of thermal bridges, is central to these considerations. Afterwards, attempts will be made to put the different evaluation criteria for interior insulation systems into coherence and deduce a questionnaire for a structural survey when planning an interior insulating measure from the results.

The final, major part is extensively concerned with metrological assessments of interior insulations. In this context, results from moisture and temperature measurements conducted over a period of three years will be compared with results from simulations. The project described represents an attempt to insulate a 19th century townhouse on the interior by using insulating wall panels made out of reeds and clay plaster. Using the HAM3D simulator various levels of insulation thickness and room climates as well as measured temperatures and relative humidity will be compared with each other. The thesis ends with analyses on how the simulated levels of insulation thickness influence the danger of mould development based on the isopleths-model. Thereby, it clearly shows that a combination of insulating wall panels made out of reeds and clay plaster makes for a very well functioning interior insulation alternative.

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Innendämmung von Bestandsobjekten	8
1.1	Vor- und Nachteile von Innendämmungen	8
1.2	Ziele von Innendämmmaßnahmen	10
1.3	Bauphysikalische Grundlagen	11
1.3.1	Feuchtespeicherung	12
1.3.2	Feuchtetransport	13
1.3.3	Mindestwärmeschutz – Vermeidung von kritischen Oberflächentemperaturen	14
1.4	Arten von Innendämmsystemen	15
1.5	Materialien für Innendämmungen	16
1.5.1	Auswahlkriterien	16
1.5.2	Einteilung der Dämmmaterialien	16
2	Einflussfaktoren für die Auswahl eines Innendämmsystems	18
2.1	Befeuchtung von außen	18
2.1.1	Schlagregenbeanspruchung	18
2.1.2	Trocknungsverhalten nach einer Befeuchtung durch Schlagregen	19
2.1.3	Hydrophobierungsmaßnahmen	21
2.1.4	Aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk	22
2.2	Befeuchtung von innen	23
2.2.1	Dampfkonvektion	23
2.2.2	Dampfdiffusion	26
2.2.2.1	Beschreibung des Diffusionsproblems	26
2.2.2.2	Aufgabe und Eigenschaften von Dampfbremsen	26
2.2.2.3	Umkehrdiffusion	28
2.2.3	Feuchteintrag durch erhöhte Anfangsfeuchte	28
2.3	Konstruktive Parameter	30
2.3.1	Wandkonstruktionen im Altbau und deren Schwachstellen	30
2.3.1.1	Verputzte Wandkonstruktionen aus Ziegelmauerwerk	31
2.3.1.2	Wandkonstruktionen aus Sichtziegelmauerwerk	32
2.3.1.3	Wandkonstruktionen aus Natursteinen	32
2.3.1.4	Fachwerkkonstruktionen	32
2.3.1.5	Massivholzkonstruktionen	33
2.3.2	Oberflächenbeschaffenheit der Bestandswand	33
2.3.3	Wärmebrücken	34
2.3.4	Bauteilanschlüsse im Bestand	36
2.3.4.1	Innenwandanschluss	36
2.3.4.2	Deckenanschluss im Massivbau	38
2.3.4.3	Anschluss von Holztrapeckdecken	39
2.3.4.4	Fensterlaibung	40
2.3.4.5	Versatz von Innen- zu Außendämmung	42

2.4	Einflussfaktoren durch das Nutzerverhalten.....	44
2.4.1	Lüften und Heizen von Wohnungen	45
2.4.2	Probleme mit der Einrichtung	47
2.4.3	Nutzeransprüche und Qualitätsanforderungen an Dämmstoffe	47
3	Vermeidung von Schäden an innengedämmten Wandkonstruktionen	48
3.1	Schadensbilder.....	48
3.1.1	Verformung von Bauteilen.....	48
3.1.2	Frostschäden, Wasserschäden und ihre Folgen.....	49
3.1.3	Schimmelpilzbildung in Wohnräumen.....	50
3.1.3.1	Wachstumsvoraussetzungen für Schimmelpilze	50
3.1.3.2	Vorhersagemodelle für Schimmelpilzwachstum	52
3.1.3.3	Typische Schadensfälle mit Schimmelpilzwachstum	53
3.1.4	Biokorrosion an Fassaden	54
3.2	Feuchtemanagement	55
3.3	Kapillaraktive Innendämmung.....	56
3.3.1	Grundlagen und Funktionsweise einer kapillaraktiven Innendämmung	56
3.3.2	Materialeigenschaften von kapillaraktiven Innendämmungen.....	58
4	Beurteilungskriterien für Innendämmsysteme	60
5	Langzeitmessung und hygrothermische Simulation	66
5.1	Das Gesamtprojekt im Überblick	66
5.2	Charakteristika der Baustoffe Schilf und Lehm	67
5.2.1	Dämmmatten aus Schilf.....	67
5.2.2	Eigenschaften des Baustoffes Lehm	69
5.3	Versuchsaufbau und Montage der Innendämmung.....	70
5.3.1	Beschreibung und Vorbereitung der Versuchsanlage	70
5.3.2	Aufbau der Innendämmung und Anbringung der Sensoren	74
5.3.3	Vom Verputzen zur fertigen Wand	77
5.4	Analyse der Messergebnisse.....	82
5.5	Simulation mit HAM3D	88
5.5.1	Grundlagen des Simulationsprogramms.....	88
5.5.2	Konstruktionsbedingte Eingabeparameter und Klimadaten	89
5.6	Vergleich von Simulations- und Messergebnissen.....	90
5.7	Simulation unterschiedlicher Dämmstärken bei gemessenem Klima und Konstantklima im Vergleich.....	100
5.7.1	Entwicklung der relativen Luftfeuchte an der kalten Seite der Dämmung in Abhängigkeit von Dämmstärke und Klima	100
5.7.2	Ermittlung des Schimmelpilzpotentials bei unterschiedlichen Dämmstärken.....	104
	Zusammenfassung und Ausblick.....	110
	Literaturverzeichnis.....	113

1 Grundlagen der Innendämmung von Bestandsobjekten

Energieeinsparung und Energieeffizienz sind in den letzten Jahren zu einem sehr wichtigen Thema geworden, das mittlerweile alle möglichen Bereiche der technischen Wissenschaften beschäftigt. Auch das Bauwesen wird sich dieser Problematik annehmen müssen. In Zukunft werden die Bauaktivitäten vom Neubau immer mehr auf den Altbau und dessen Modernisierung sowie thermische Sanierung verlegt werden. Für Neubauten wurden, nicht zuletzt durch die Einführung des verpflichtenden Energieausweises, bereits Regeln für die Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes definiert. Daneben gibt es jedoch zahlreiche Altbauten, die in den nächsten Jahren einer thermischen Sanierung bedürfen, um die Energieprobleme der zukünftigen Generationen in den Griff zu bekommen. [GÄN10]

Viele sanierungsbedürftige Altbauten stammen aus der Gründerzeit Ende des 19. Jahrhunderts. Sie weisen oft reich verzierte Fassaden mit Gesimsen, Fensterfriesen und speziellen Putztechniken auf. Die Erhaltung dieser Kunstwerke ist oberstes Gebot und oft in Denkmalschutzgesetzen verankert. Auch Fachwerkhäuser oder Gebäude mit Sichtmauerwerk sind meist erhaltungswürdig oder sogar denkmalgeschützt. Bei Gebäuden dieser Art kann eine nachträgliche thermische Sanierung mit einer Außendämmung nicht realisiert werden, und es bleibt nur die Möglichkeit, eine Innendämmung zu applizieren. Neben den denkmalpflegerischen Aspekten kann eine Innendämmung auch sinnvoll sein, wenn nur ein Teil eines Gebäudes, ein Stockwerk oder nur einzelne Wohnungen, gedämmt werden sollen. Im Vergleich zur konventionellen Außendämmung ist die Innendämmung meist preisgünstiger, sie birgt aber nicht zu unterschätzende Risiken. Nach dem Anbringen einer Innendämmung belegen oft Bauschäden, dass Planer und Ausführende die feuchtetechnischen Prozesse nicht genügend betrachtet haben. Daher sollte die Entscheidung nur dann zugunsten einer Innendämmung getroffen werden, wenn alle anderen Möglichkeiten ausgeschlossen sind. Eine Außendämmung ist dieser bauphysikalisch komplexeren Lösung immer vorzuziehen, wenn es die örtlichen Gegebenheiten zulassen. Vor allem Wärmebrücken sind bei einer Außendämmung besser zu beherrschen, da die Tragstruktur umschlossen wird und keine Durchdringungen in der Dämmung entstehen. Bei einer richtigen Herangehensweise und Planung einer Innendämmung können Fehler jedoch vermieden und das Risiko eines Bauschadens kann verringert werden. [NAT10], [HIS10], [GÄN09]

1.1 Vor- und Nachteile von Innendämmungen

Um eine Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht zu beurteilen, ist ein Vergleich mit den beiden anderen Möglichkeiten der Dämmung – der Außendämmung und der Kerndämmung – sinnvoll. Eine Außendämmung mindert die thermische Belastung der tragenden Wand, wodurch die Gefahr von Schäden durch thermische Spannungen sowie die Wirkung von Wärme-

brücken reduziert wird. Hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes ist eine Außendämmung ebenfalls von Vorteil, da die Wärmespeicherfähigkeit der Außenwand erhalten bleibt. Ein wesentlicher Nachteil der Außendämmung ist jedoch, dass diese vor Witterungseinflüssen geschützt werden muss, wobei der Außenputz durch Unterschreitung der Taupunkttemperatur dem Risiko einer mikrobiologischen Besiedelung durch Pilze oder Algen ausgesetzt ist.

Die Kerndämmung, die zwischen tragender Wand und Vormauerschale angebracht wird, vereint die Vorzüge der Außendämmung hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes mit einer deutlichen Reduzierung der thermischen Belastung des Dämmstoffes. Allerdings ist die Gefahr einer kapillaren Befeuchtung des Dämmstoffes bei unzureichend regendichter Vormauerschale gegeben. Bei solarer Erwärmung kann es in diesem Fall zu einer starken Umkehrdiffusion kommen. Außerdem ist die Kerndämmung teurer als die beiden anderen Möglichkeiten und kann nicht nachträglich ausgeführt werden. [KRU10]

Der größte Vorteil der Innendämmung ist die einfache und daher meist kostengünstige Anbringung. Eine aufwändige Einrüstung der gesamten Fassade entfällt, und es ist nicht zwingend erforderlich, den gesamten Fassadenbereich zu dämmen. Eine Innendämmung kann auch nur raumweise angebracht werden, z.B. um das Raumklima in einem bestimmten Bereich der Wohnung zu verbessern. Mithilfe dieser Maßnahme kann in ungedämmten Gebäuden sehr schnell und einfach der hygienische Mindestwärmeschutz gemäß ÖNORM B 8110-3 hergestellt werden. Das Anbringen von geringen Dämmschichtstärken bewirkt bereits eine wesentliche Erhöhung der Oberflächentemperatur. Dadurch ergibt sich eine sehr effiziente Methode zur Anhebung des Behaglichkeitsgefühls in Aufenthaltsräumen. Außerdem kann bei einer innen-seitig angebrachten Dämmung der Raum viel schneller aufgeheizt werden, da die massiven Außenwände nicht mit erwärmt werden müssen. Dies ist vor allem bei selten genutzten und beheizten Räumen von enormem Interesse. Bei Wochenendhäusern oder Kirchen, die nur temporär genutzt und beheizt werden, ist eine funktionierende Innendämmung sehr energieeffizient. Aus dem Vorteil der schnellen Erwärmbarkeit im Winter ergibt sich aber auch ein Nachteil im Sommer. Durch eine Innendämmung geht der sommerliche Wärmeschutz fast zur Gänze verloren, da die Außenwände nicht mehr als speicherwirksame Masse herangezogen werden können. Des Weiteren führt eine Innendämmung zu einer Verschlechterung des Brandschutzes, wenn das Dämmmaterial aus entflammaren oder brennbaren Stoffen besteht. Als nachteilig stellt sich auch – vor allem in Ballungsgebieten mit hohen Wohnraumkosten – der Verlust an Wohnnutzfläche dar. Außerdem wird der Gebrauch einer Wohnung während des Anbringens der Dämmung beeinträchtigt. Der Nutzer sollte beim Einrichten eines innenge-dämmten Raumes darauf achten, dass das Einbohren von Dübeln in Innendämmungen möglicherweise problematisch sein könnte. Die Befestigung von schweren Gegenständen ist generell nur auf Vorsatzschalen zu empfehlen, wobei hier die Dampfbremse absichtlich beschädigt

wird. Dies birgt die Gefahr, dass Wasserdampf hinter die Dämmschicht eindiffundiert, was wiederum zu Bauschäden führen kann. Als wesentliche Nachteile von Innendämmsystemen gelten jedoch die bauphysikalischen Probleme. Vor allem die Gefahr der Tauwasserbildung sowie schwierig zu lösende Wärmebrückendetails und Bauteilanschlüsse sind schon bei der Planung besonders zu beachten. Das je nach Konstruktion unterschiedliche Austrocknungspotenzial und die damit verbundene Gefahr von Schimmelpilzbildung sind nicht zu unterschätzen. Auch die schallschutztechnischen Eigenschaften des Bauteils können bei einer Innendämmmaßnahme verändert werden. Durch die zweischalige Konstruktion kann es zu einer Resonanzfrequenzverschiebung in den hörbaren Bereich und damit zu einer Verschlechterung des bestehenden Schallschutzniveaus kommen. [WTA09], [GÄN09], [WOR08], [WOR10]

Tab. 1: Stichwortartige Aufstellung der Vor- und Nachteile einer Innendämmung [KRU10]

Innendämmung	
+	Rasches Wiederanheizen
+	Bequeme Anbringung
+	Geringere Kosten
–	Sommerlicher Wärmeschutz
–	Brandschutz
–	Verlust von Wohnnutzfläche
–	Nutzerbeeinträchtigung
–	Wärmebrücken
–	Tauwasser
–	Trocknungsverzögerung

1.2 Ziele von Innendämmmaßnahmen

Im vorigen Abschnitt wurden durch die Erläuterung der Vorteile von Innendämmsystemen einige Ziele vorweggenommen. Der massive Planungsaufwand, der mit der Realisierung einer Innendämmmaßnahme verbunden ist, kann außerdem durch die folgenden Ziele gerechtfertigt werden. [GÄN09], [XEL10]

- **Erhöhung der Oberflächentemperatur der Wand**

Die Applikation einer Innendämmung hebt die Oberflächentemperatur von Außenwänden so weit an, dass das Behaglichkeitsgefühl steigt und ein Schimmelpilzwachstum in allen Bereichen ausgeschlossen werden kann. Durch die Strahlungswärme ist die empfundene Temperatur höher und die Raumlufttemperatur kann im Vergleich zu einem ungedämmten Raum abgesenkt werden. Die Verwendung natürlicher Baustoffe, wie beispielsweise Lehmputz, kann das Raumklima zusätzlich positiv beeinflussen.

- **Rasches Aufheizen des Innenraums bei selten benützten Räumen**
- **Vermeidung von Schimmelpilzwachstum**

Durch die Entschärfung von Wärmebrücken wird die Oberflächentemperatur angehoben und ein Schimmelpilzwachstum wird ausgeschlossen.
- **Eindämmung von Transmissionswärmeverlusten**

Die Entschärfung von Wärmebrücken führt auch zu einer Minimierung der Transmissionswärmeverluste.
- **Heizkostensparnis**

Der Energieverbrauch kann gesenkt werden.
- **Klimaschutz**

Rund ein Drittel des gesamten Primärenergiebedarfs wird in privaten Haushalten verbraucht. Hiervon werden ca. 77 % für Heizanlagen verwendet. Die nachträgliche Wärmedämmung kann erheblich zur Reduzierung des Energieverbrauchs beitragen.
- **Erhaltung von denkmalgeschützten Fassaden**

Denkmalgeschützte Fassaden können ausschließlich innen gedämmt werden, um eine thermische Sanierung zu realisieren.
- **Rechtliche Konfliktlösung**

Es empfiehlt sich eine Innendämmung, wenn eine Außendämmung technisch oder rechtlich nicht möglich ist (z.B. Grenzbebauung, Grundstücksgrenzen).
- **Wertsteigerung der Immobilie**

Eine richtig geplante und ausgeführte Sanierung schützt die Bausubstanz und vermeidet Bauschäden, wodurch der Zeit- und Wiederverkaufswert einer Immobilie nachhaltig erhöht wird.
- **Wirtschaftlichkeit der Sanierung**

Bei anstehenden Instandhaltungsmaßnahmen, Umbauten oder Erweiterungen sind energetische Modernisierungen nicht nur sinnvoll, sondern besonders wirtschaftlich.

1.3 Bauphysikalische Grundlagen

Die ÖNORM B 6000 definiert Wärmedämmstoffe wie folgt: Wärmedämmstoffe sind Baustoffe, die infolge ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit (Rechenwert $\lambda \leq 0,1 \text{ W/mK}$) zur Wärmedämmung herangezogen werden. Sie weisen eine offen- oder geschlossenzellige Struktur mit Luft- oder speziellem Gaseinschluss auf.

Im Folgenden wird auf die wesentlichen bauphysikalischen Grundlagen, die für das Verständnis der Funktionsweise von Innendämmungen wichtig sind, eingegangen.

1.3.1 Feuchtespeicherung

Der Feuchtehaushalt poröser mineralischer Baustoffe wird durch die Feuchtespeichereigenschaften sowie die im Baustoff in flüssiger und gasförmiger Phase ablaufenden Feuchtetransportvorgänge bestimmt. Für die Feuchtespeicherung lassen sich drei Bereiche unterscheiden: der Sorptionsfeuchtebereich, der Kapillarwasserbereich und der Übersättigungsbereich. [GET05], [KRU95], [IBP01]

- **Sorptionsfeuchtebereich**

Als Sorption bezeichnet man die Anlagerung von Wasser aus der feuchten Umgebungsluft in den Poren eines hygroskopischen Stoffes bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes. Dieser Zustand wird auch Gleichgewichtsfeuchte oder Ausgleichsfeuchte genannt. Zwischen der Menge des angelagerten Wassers und der relativen Luftfeuchte gibt es einen Zusammenhang, der durch die Sorptionsisotherme dargestellt werden kann. Für hygroskopische poröse Baustoffe hat die Sorptionsisotherme einen typischen s-förmigen Verlauf, der oft einen Hystereseffekt zwischen Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe zeigt. Dieser Effekt entspricht dem Adsorptions- und Desorptionsverhalten einiger Baustoffe, wie z.B. Kalziumsilikat oder Lehm, die Feuchtigkeit sehr schnell aufnehmen und langsam gleichmäßig wieder abgeben können.

- **Kapillarwasserbereich**

Für Luftfeuchten über 95 % ist es nicht mehr möglich, die Ausgleichsfeuchte zu bestimmen, da die Sorptionsisotherme sehr stark ansteigt. Hier beginnt der überhygroskopische Bereich, auch Kapillarwasserbereich genannt, der bis zum Erreichen der freien Wassersättigung führt. Dieser Wert ist eine wichtige Kenngröße jedes Baustoffs, da er die Stofffeuchte darstellt, die durch freies Saugen ohne Einwirkung äußerer Kräfte unter Normaldruck erreicht werden kann. Dieser Vorgang kann mittels Saugspannungskurve dargestellt werden, die einen Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt darstellt. Die Saugspannung wird in Versuchen mittels Wasserlagerung von Baustoffproben gemessen. Die Auswertung dieser Messung ergibt eine überhygroskopische Feuchtespeicherungsfunktion, die in Abb. 1 im blau hinterlegten Bereich dargestellt ist.

- **Übersättigungsbereich**

Wenn der gesamte Porenraum eines Baustoffes mit Wasser gefüllt ist, spricht man vom Übersättigungsbereich. Dieser Zustand kann nur durch Überdruck oder durch lange Wasserlagerung erzielt werden, wenn die in den Poren eingeschlossene Luft sich im Wasser

löst. Bei länger andauernden Perioden mit Tauwasserausfall oder bei starker Schlagregenbeeinträchtigung kann der Wassergehalt eines Baustoffes bis in den Übersättigungsbereich steigen.

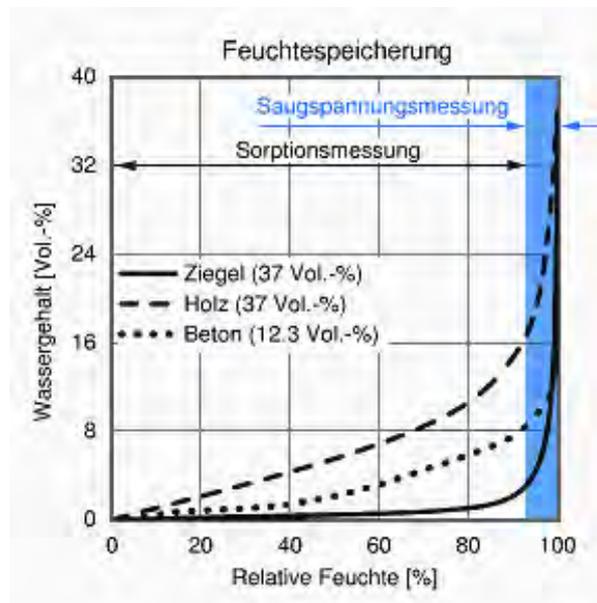


Abb. 1: Typische Feuchtespeicherfunktionen für schwach (Ziegel), mäßig (Beton) und stark (Holz) hygroskopische Baustoffe. Die Werte in Klammern geben die freie Wassersättigung der einzelnen Materialien im sorptionsabhängigen überhygroskopischen Bereich an. [IBP01]

1.3.2 Feuchtetransport

Die Feuchtetransportmechanismen in hygroskopischen Baustoffen kann man im Wesentlichen in Dampfdiffusion, Oberflächendiffusion und Kapillarleitung unterteilen. In nicht hygroskopischen Materialien, wie z.B. in Kunststoffen, findet die sogenannte Lösungsdiffusion statt, wobei sich Wassermoleküle zwischen den polymeren Makromolekülen einlagern.

Als Wasserdampfdiffusion bezeichnet man den Gastransport durch poröse Materialsichten, wobei der Diffusionsstrom einen höheren Widerstand zu überwinden hat als in einem freien Luftraum. Der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ drückt aus, um welchen Faktor der Diffusionswiderstand einer Materialschicht größer ist als jener einer gleich dicken Luftschicht. [KRU95]

Multipliziert man den Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ mit der jeweiligen Schichtdicke, erhält man den s_d -Wert, der eine äquivalente Luftschichtdicke angibt. Er beschreibt, wie dick eine Luftschicht sein muss, um denselben Durchlasswiderstand wie eine Materialschicht zu haben. [BED08]

In Abb. 2 wird der Zusammenhang zwischen den dominierenden Feuchtetransportmechanismen erläutert. Mittels bauüblicher Randbedingungen wird angenommen, dass der Dampfdruck

innen größer ist als außen und die relative Luftfeuchte außen höher ist als innen. Entsprechend dem Dampfdruckgefälle diffundiert der Wasserdampf von innen nach außen, vorausgesetzt der Baustoff ist ausreichend trocken. Wenn der Baustoff feucht ist, bildet sich an den Porenwänden ein Sorbatfilm aus. Steigt die relative Feuchte auf über 60 %, findet neben der Dampfdiffusion auch eine Oberflächendiffusion statt, wobei das Sorbat an den Porenwänden beweglich wird. Dieser Feuchtetransport erfolgt entgegen dem Dampfdruckgefälle von der höheren Wasserkonzentration hin zur geringeren, da die Menge des Sorbats mit der relativen Luftfeuchte in den Poren zunimmt. Daraus resultiert, dass die treibende Kraft für die Oberflächendiffusion die relative Feuchte ist und nicht der Dampfdruck.

Kapillarleitung tritt bei gefüllten Poren ein, wenn beispielsweise das Material durch Schlagregen belastet wurde. Durch kapillaren Unterdruck aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers wird die Feuchtigkeit in trockenere Schichten geleitet.

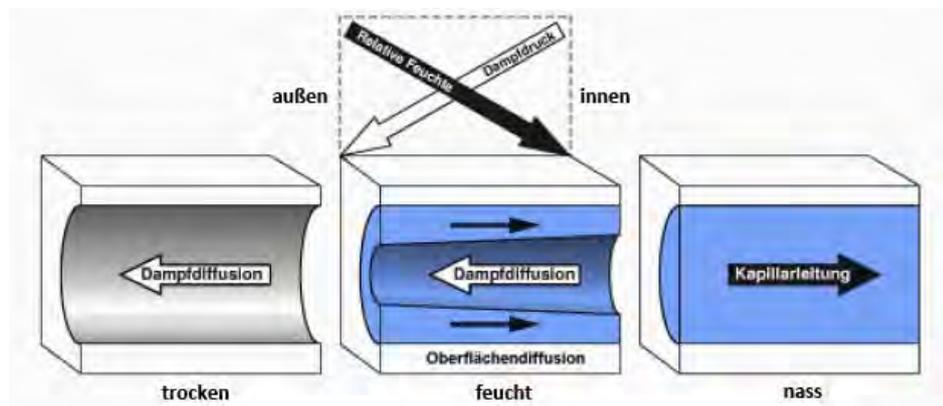


Abb. 2: Schematische Darstellung der Feuchtetransportmechanismen in hygroskopischen Baustoffen [IBP01]

Das Beispiel in Abb. 2 zeigt deutlich die häufig entgegengesetzten Transportmechanismen von Dampfdiffusion und Flüssigwassertransport. Die Dampfdiffusion erfolgt meist von warm nach kalt, während der Flüssigwassertransport weitgehend temperaturunabhängig von feucht nach trocken gerichtet ist. [IBP01], [KRU95], [BED08]

Dieses Phänomen der kapillaren Rückleitung machen sich die sogenannten kapillaraktiven Innendämmungen zu Nutze, auf die in Abschnitt 3.3 genauer eingegangen wird.

1.3.3 Mindestwärmeschutz – Vermeidung von kritischen Oberflächentemperaturen

Tauwasserbildung und Schimmelpilzbefall an Oberflächen von Außenwänden müssen aus hygienischen Gründen vermieden werden. Nach ÖNORM B 8110-2 tritt Kondensation an Bauteiloberflächen auf, wenn die relative Luftfeuchte in diesem Bereich 100 % erreicht. Je länger die Oberflächenluftfeuchte über 80 % liegt, desto größer ist das Risiko für Schimmelpilzbefall. In

den wenigsten Schadensfällen kommt es jedoch tatsächlich zu einer Tauwasserbildung. Meist ist das Problem durch sehr lange Feuchteperioden mit relativen Oberflächenfeuchten von 75 – 90 % charakterisiert. Daher ist das entscheidende Kriterium für kritische Bauteilanschlüsse nicht die Entstehung von Kondensat, sondern jene von Schimmelpilzen. Aus diesem Grund ist unter Berücksichtigung einer maximalen Oberflächenfeuchte von 80 % der Temperaturfaktor für beheizte Wohnräume mit 0,71 angegeben. Daraus lässt sich für ein bestimmtes Klima die mindestens erforderliche Oberflächentemperatur einer Wärmebrücke bzw. einer Wandkonstruktion ermitteln. [BED08]

In Altbauten haben Außenwandbauteile typischerweise einen Wärmedurchlasswiderstand von ca. 0,5 m²K/W. Unter Annahme der Klimabedingungen gemäß ÖNORM B 8110-2 müsste eine Dämmung ($\lambda = 0,04$ W/mK) von mindestens 4,8 cm angebracht werden, um den Mindestwärmeschutz zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung zu erreichen.

1.4 Arten von Innendämmsystemen

Grundsätzlich lassen sich drei verschiedene Arten von Innendämmsystemen unterscheiden:

- **Dampfdichte Systeme**, z.B. Schaumglasplatten, Polyurethan-Hartschaumplatten, vakuumgedämmte Isolationspaneele. Dabei wird die dichte Ebene durch die Dämmplatten selbst hergestellt.
- **Dampfdurchlässige Systeme**, z.B. Kalziumsilikatplatten, Dämmputze, Schilfrohrplatten mit Lehmputz. Diese können in der Tauperiode Feuchtigkeit aufnehmen und speichern. Durch die gute kapillare Leitfähigkeit wird das Tauwasser in Verdunstungszonen transportiert und zu hohe Feuchtigkeitsgehalte werden vermieden.
- **Dämmsysteme mit Dampfbremse**, z.B. Mineralwolle, Zellulose, Hanf, Schafwolle. Zwischen Raumluft und Dämmung wird eine Dampfbremse angeordnet, um das Eindringen von Luftfeuchtigkeit zu verhindern.

Die Auswahl eines geeigneten Innendämmsystems ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Maßgeblich sind vor allem die Dämmwirkung, die verfügbare Raumfläche und die Beschaffenheit der Wandoberfläche. Bei dampfdichten und dampfdurchlässigen Systemen muss ein vollflächiger Kontakt zwischen Wand und Dämmung hergestellt werden, wobei das Aufbringen einer Ausgleichsschicht erforderlich sein kann. Auf diese Weise soll einerseits Kondensat infolge von Hinterströmung vermieden und andererseits eine rasche Aufnahme von möglichem Kondensat gewährleistet werden. Bei Systemen mit Dampfbremse ist vor allem auf die Boden-, Decken- und Innenwandanschlüsse zu achten. [GET05]

1.5 Materialien für Innendämmungen

1.5.1 Auswahlkriterien

Für Innendämmmaßnahmen stehen verschiedene Produkte und Materialien zur Verfügung. Um im Einzelfall das richtige Dämmsystem zu wählen, ist eine Reihe von Entscheidungsfaktoren relevant, wie z.B. die Dämmwirkung, die Beschaffenheit der Wandoberfläche und die verfügbare Raumfläche [HEC06]. Auch der Brandschutz spielt eine wesentliche Rolle. So sollten für Innendämmungen entweder nicht brennbare (Brennbarkeitsklasse A), schwer brennbare (Brennbarkeitsklasse B1) oder höchstens normal brennbare Dämmstoffe (Brennbarkeitsklasse B2) verwendet werden. Des Weiteren sind der Widerstand gegen Feuchtigkeit, das Gewicht und die ökologische Verträglichkeit sowie letztlich auch der Preis wichtige Parameter für eine Entscheidungsfindung. Die Materialien müssen abhängig von der Konstruktionsart der Bestandswand ausgewählt werden. Außerdem muss auf Belastungen der Außenwand durch klimatische und nutzungsspezifische Einflüsse geachtet werden. Nach [GÄN08] sind im Vorfeld folgende Punkte abzuklären:

- Eigenschaften der Bestandskonstruktion
- Untergrundbeschaffenheit
- Anforderungen an Nutzung, Bauphysik und Gestaltung

Im Gegensatz zu Dämmstoffen für den Außenbereich ergeben sich für Innendämmstoffe zusätzliche Auswahlkriterien. Die Diffusionsfähigkeit und Kapillarität der Außenwand soll durch die Innendämmung nicht maßgeblich beeinträchtigt werden. Vor allem bei schlagregenbeanspruchten Fassaden ist dies besonders zu beachten.

1.5.2 Einteilung der Dämmmaterialien

Eine Einteilungsmöglichkeit der Materialien ist die Unterscheidung in anorganische und organische Dämmstoffe mit Bezug auf die Rohstoffbasis. Als Beispiele für anorganische Dämmstoffe sind Kalziumsilikat, Mineralwolle und Schaumglas zu nennen. Die organischen Dämmstoffe umfassen unter anderem die natürlichen Rohstoffe Flachs, Holzwolle, Schilfrohr etc., aber auch synthetische Rohstoffe wie expandiertes Polystyrol. Eine genaue rohstoffbezogene Einteilung ist in [CZI05] zu finden.

Die für die Baupraxis wichtigere und gebräuchlichere Einteilung der Dämmmaterialien erfolgt nach den Konstruktionsweisen. Šiškovic [SIS07] hat sich mit diesem Thema sehr ausführlich auseinandergesetzt. An dieser Stelle sollen die wesentlichen Konstruktionen überblicksmäßig erläutert werden:

- **Verklebung/Verdübelung von Platten**

Bei diesem Verfahren werden Wärmedämmplatten ohne zusätzliche tragende Unterkonstruktion direkt auf die bestehende Außenwand geklebt. In manchen Fällen ist eine Verdübelung erforderlich, vor allem dann, wenn der Untergrund eine zu geringe Festigkeit aufweist. Wichtig ist auch, dass die Wand vollflächig verputzt ist und eine durchgehend ebene Fläche darstellt. Die Verklebung erfolgt entweder mit der Punkt-Wulst-Methode oder mittels Kambettverfahren, wobei letzteres aufgrund einer vollflächigen Verklebung und der Vermeidung von Hinterströmung vorzuziehen ist.

- **Verklebung/Verdübelung von Verbundplatten**

Verbundplatten bestehen aus einer Dämmschicht und einer druckfesten Platte, die als Stabilisierung und Schutz der Dämmung wirkt. Zwischen den beiden Schichten kann eine Dampfbremssfolie eingearbeitet sein.

- **Vorsatzschalen**

Bei sehr unebenen Wandoberflächen empfiehlt sich die Herstellung einer raumhohen Vorsatzschale in Trockenbauweise. Sie besteht aus der Dämmschichtebene, einer Unterkonstruktion, einer Dampfbremse und einer raumseitigen Beplankung. Bei Vorsatzschalen mit Dampfbremse ist auf die Herstellung dichter Bauteilanschlüsse bei Boden, Decke und Innenwand zu achten. Außerdem sollten Durchdringungen der Dampfbremse, wie beispielsweise Steckdosen oder Lichtschalter, wegen einer möglichen Hinterströmung der Dämmebene, vermieden werden.

- **Wärmedämmputze**

Wärmedämmputze bestehen grundsätzlich aus einem Unterputz und einem Oberputz, wobei die wärmedämmende Funktion vom Unterputz durch Zumischung von Polystyrolkügelchen übernommen wird. Der Oberputz schützt die Dämmschicht vor mechanischer Beanspruchung. Zur Anwendung kommen Wärmedämmputze vor allem an geschwungenen und runden Flächen, wie beispielsweise in Erkern historischer Gebäude.

- **Sonderlösungen**

Von den verschiedensten Sonderlösungen sei das Vakuumisulationspaneel hervorgehoben. Es besteht aus einem porösen Kernmaterial, das unter Vakuum in ein gasdichtes Hüllmaterial eingeschweißt wird. Dadurch ergibt sich eine um den Faktor zehn geringere Wärmeleitfähigkeit gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen wie beispielsweise Mineralwolle oder extrudiertes Polystyrol.

2 Einflussfaktoren für die Auswahl eines Innendämmsystems

Die Anbringung einer Innendämmung an Außenwandmauerwerk ist mit sehr komplexen feuchtephysikalischen Einflüssen verbunden. Deshalb ist es wichtig, die Einflussfaktoren vor einer Dämmmaßnahme zu erörtern und abzuwägen. Vor allem sind die Randbedingungen, die durch eine Befeuchtung von außen oder von innen bzw. durch die bestehende Konstruktion gegeben sind, genau zu untersuchen und in die Planung einzubeziehen. Im Folgenden werden jene Parameter beschrieben, die bei der Auswahl eines Innendämmsystems entscheidend sind.

2.1 Befeuchtung von außen

Der Feuchteeintrag von außen in eine Fassade bzw. einen Außenwandbauteil wird fast zur Gänze durch Regenwasser hervorgerufen. Vor allem auf der Gebäudeseite, die der Hauptwindrichtung zugewandt ist, kann es zu einer erhöhten Schlagregenbeanspruchung kommen. Während der kalten Jahreszeit führen die niedrigen Temperaturen zu einer langsameren Austrocknung des Mauerwerks nach Schlagregenbelastungen. In der warmen Jahreszeit hingegen trocknet das Mauerwerk zwar relativ schnell ab, doch kann die Tauwasserbildung in klaren Sommernächten ebenfalls zu einer Feuchtebeanspruchung der Fassade führen. Ein weiterer wesentlicher Feuchteinfluss auf Außenwände kann durch aufsteigende Grundfeuchte gegeben sein. Im Zuge der Bauaufnahme für eine geplante Innendämmmaßnahme ist es von großer Wichtigkeit, die Ursachen bestehender Mauerwerksfeuchte zu ergründen.

2.1.1 Schlagregenbeanspruchung

Als Schlagregen wird Regen bezeichnet, der vom Wind aus seiner lotrechten Fallrichtung gebracht wird. Dies hat zur Folge, dass die Regentropfen nicht nur auf dem Boden, sondern auch an senkrechten Flächen auftreffen. Für Bauwerke wirkt sich dieser Umstand ungünstig aus, da viele Baustoffe aufgrund ihrer Kapillarwirkung das auftreffende Wasser aufsaugen, wodurch es zu Feuchteschäden kommen kann. Meist handelt es sich dabei um Ausblühungen, Frostschäden, Schimmel- und Pilzbefall. Häufige Feuchtebelastungen auf Bauteile beschleunigen auch die Verwitterung der jeweiligen Baustoffe. Besonders gefährdet sind Holzoberflächen und Mauerwerk ohne Putz. In diesen Fällen dringt die Feuchtigkeit in die Fugen und Oberflächen ein und kann nur sehr langsam abtrocknen. Die Schlagregenbeanspruchung ist in der Regel auf der Wetterseite am größten. Besonders betroffen sind hoch gelegene Fassadenflächen, Gebäudeecken und -kanten sowie Erker und andere Mauerwerksvorsprünge. [KÜN06]

Gebäude mit außenseitig sichtbarem Fachwerk verfügen über eine spezielle Fugenausbildung. Da die Dicke der Holzbalken eines Fachwerks meist der Wandstärke entspricht, verlaufen die Fugen zwischen Holz und Ausfachung, die meist aus Ziegelmauerwerk besteht, durch den gesamten Wandquerschnitt. Bei einer Schlagregenbeanspruchung der Fassade kann Regenwasser

durch diese Fugen ungehindert bis an die Innenwandoberfläche vordringen. Winddruck an die Wandoberfläche kann das Eindringen von Feuchtigkeit noch verstärken. Eine erhöhte Feuchtebeanspruchung ergibt sich auch, wenn Niederschlagswasser an den verputzten Stellen der Fassade abrinnt und in größerer Menge an einen Fachwerkträger gelangt. Dort entsteht ein erhöhter Feuchteeintrag. Eine ähnliche Situation tritt beim Zusammentreffen von Ständer und Diagonalstreben an der Fußschwelle auf. Dieser Punkt ist besonders kritisch, weil ablaufendes Regenwasser entlang der Diagonalstrebe an den Fußpunkt der Hölzer geleitet wird. Die dauerhaft hohe Feuchtigkeit an dieser Stelle ist meist durch Moosansatz belegt. Grundsätzlich sollten Sichtfachwerke nur realisiert werden, wenn die Schlagregenbelastung der Fassade kleiner als 140 l/m^2 ist. Dies entspricht der Schlagregengruppe 1 nach DIN 4108-3. [BOR06]

Um ein Eindringen von Feuchtigkeit bis an die Innenoberfläche der Wand zu vermeiden, sollten Sichtfachwerkwände an der Innenseite eine Putzschicht aufweisen. Ein durchgehender Innenputz kann bei geringer Schlagregenbeanspruchung das Schadensrisiko auf ein akzeptables Maß reduzieren. Der Putz verringert einerseits die Gefahr, dass Wind den Regen tief in die Konstruktion hineintreiben kann, andererseits wirkt er als Feuchtepuffer. [BOR05]

2.1.2 Trocknungsverhalten nach einer Befeuchtung durch Schlagregen

Wird eine Außenwand mit einer Innendämmung versehen, kommt es zu einer Verschiebung des Temperaturgefälles. Der Temperaturgradient ist in der Dämmung wesentlich größer als in der Ziegelwand, wodurch sich das außenliegende Mauerwerk ständig an die Außenklimabedingungen anpassen muss. So entstehen größere Temperaturschwankungen als bei einer ungedämmten oder einer außen gedämmten Wand. Vor allem in der kalten Jahreszeit kühlt innengedämmtes Mauerwerk stärker ab als jenes ohne innenliegende Dämmung. Nach [KRU06] sind Frostschäden an den meisten mineralischen Baustoffen ausgeschlossen, wenn der Wassergehalt im Material weniger als 90 % der freien Sättigung beträgt. Frostschäden sind durch Abplatzen von Putz oder Mauerwerksteilen erkennbar.

Der Trocknungsverlauf einer Außenwand nach einem Schlagregenereignis wird durch eine vorhandene Innendämmung massiv beeinflusst. In Abb. 3 sind ein Wandaufbau mit und einer ohne Innendämmung abgebildet. Bei einer Wand ohne Dämmung kann die Feuchtigkeit nach beiden Richtungen, sowohl in den Raum als auch nach außen hin, austrocknen. Der Anteil des Regens, der über normales Saugen des Putzes und des Ziegels in das Mauerwerk eindringt, wird durch Kapillartransport und Verdunstung wieder an die Außenseite abgeführt. Tritt Feuchtigkeit aber tiefer in den Baukörper ein, sei es durch offene Lagerfugen, Risse im Putz oder Materialfugen zwischen Holz und Mauerwerk wie beispielsweise bei einem Fachwerkbau, wird diese meist nach innen abgeführt. Dieser Sachverhalt birgt Probleme, wenn die Konstruktion mit einer Innendämmung versehen ist. Da die Dämmung nach gängiger Praxis entweder selbst

relativ dicht ist, wie z.B. extrudierte Polystyrol-Hartschaumplatten, oder die Dämmschicht mit einer Dampfbremse versehen ist, wird eine Austrocknung nach innen fast gänzlich unterdrückt. Außerdem wird durch die Innendämmung das Temperaturniveau im Mauerwerk gesenkt. Wie bereits in Abschnitt 1.3.2 erwähnt, ist die Antriebskraft für die Diffusion bzw. für die Verdunstung ein Temperaturgradient im Wandquerschnitt. Da hinter der Innendämmung ein sehr geringes Temperaturniveau herrscht, ist die Trocknung nach außen verlangsamt. [HEC06]

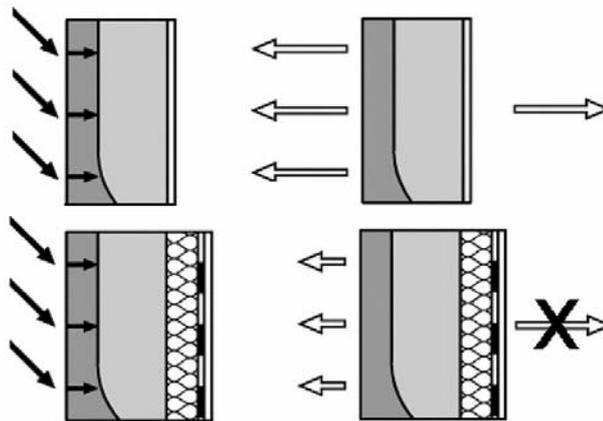


Abb. 3: Schematische Darstellung der Befeuchtung (links) und Trocknung (rechts) einer Außenwand ohne Dämmung (oben) und mit Innendämmung (unten); die schwarzen Pfeile symbolisieren Befeuchtung; die weißen Pfeile symbolisieren Trocknung [KÜN04]

Um eine rasche Verdunstung des tief eingedrungenen Wassers zu ermöglichen, ist es sinnvoll, nur leicht dampfbremsende Schichten an der Innenseite der Dämmung anzuordnen. Nach [BOR05] gilt für innengedämmte Konstruktionen folgende Devise:

- so diffusionsdicht wie nötig, um Tauwasser aus normaler Diffusion zu minimieren und
- so diffusionsoffen wie möglich, um die Austrocknung von Schlagregenfeuchte zu unterstützen

Diese beiden Anforderungen werden durch feuchtevariable Dampfbremsen erfüllt. Die Funktionsweise wird in Abschnitt 2.2.2.2 näher erläutert.

Wegen der reduzierten Austrocknungsmöglichkeit nach innen sollte der s_d -Wert der Dämmschicht inklusive der Dampfbremse so weit minimiert werden, dass gerade kein Tauwasserausfall zu erwarten ist. Laut DIN 4108-3 ist eine Holzfachwerkwand mit Innendämmung nachweisfrei, wenn der innere s_d -Wert zwischen 1,0 und 2,0 m liegt. Dadurch sollte die Trocknungsmöglichkeit zum Raum hin ausreichend sein, wobei das Problem an sich nicht gelöst wurde. Das heißt, dass auch weiterhin ein Risiko eines Bauschadens infolge Feuchteintrag in die Tiefe der Wand gegeben ist. Zur genauen Beurteilung und Lösung dieses Problems erweist sich eine

hygrothermische Simulation als sehr sinnvoll (vgl. Kapitel 5). Zur konstruktiven Lösung des Problems könnte einerseits ein verbesserter Schlagregenschutz dienen, andererseits wäre eine Fassadenhydrophobierung eine Maßnahme, um ein Eindringen von Feuchtigkeit in das Mauerwerk zu verhindern.

2.1.3 Hydrophobierungsmaßnahmen

Die Verschlechterung des Austrocknungsvermögens von Mauerwerk nach Anbringung einer Innendämmung führt zu einer langfristigen Feuchteerhöhung und zu damit verbundenen Folgeschäden in der Wand. Um den Feuchteintrag von außen zu unterbinden, bietet sich als Regenschutzmaßnahme eine Imprägnierung der Fassade mit Hydrophobierungsmitteln an. Vor allem bei Sichtziegelmauerwerk sind Hydrophobierungsmittel ein sehr effektiver Schlagregenschutz. Neben der Verhinderung des Wassereintritts von außen wird jedoch die Austrocknungsgeschwindigkeit bereits bestehender Feuchte im Mauerwerk reduziert. Daher ist es von Vorteil, die Innendämmmaßnahme erst einige Zeit nach der Fassadenhydrophobierung vorzunehmen, um ein vollständiges Austrocknen der Wand nach innen zu gewährleisten.

Grundsätzlich sollte eine möglichst tiefgehende Hydrophobierung angestrebt werden. Einerseits wird dadurch das Risiko von Fehlstellen minimiert, andererseits wird der Übergang zwischen hydrophobem Bereich und Originalsubstanz mit zunehmender Eindringtiefe weicher. Dies hat den Vorteil, dass hygrothermische Spannungsspitzen vermindert werden und dass der Unterschied des Ausdehnungsverhältnisses zwischen hydrophobiertem und unbehandeltem Material gleitend verläuft. Bei weniger tief hydrophobierten Fassadenteilen können hygrothermische Spannungen das Abplatzen der imprägnierten Schicht bewirken.

Risse, Lagerfugen oder Materialübergänge sind grundsätzlich Problemzonen bei der Fassadenhydrophobierung. An diesen Stellen kann Regenwasser durch Kapillarleitung hinter die hydrophobierte Zone transportiert werden. Dies hat meist eine, bezogen auf den Flächenanteil, überproportionale Feuchtezunahme des Mauerwerks zur Folge. Das Risiko eines Frostschadens ist in diesen Bereichen sehr hoch, da der Feuchtegehalt im Material auf über 95 % des freien Wassergehalts ansteigen kann. Eine weitere Problemstelle bei historischen Fassaden ist der Anschluss von Gesimseverblechungen an den Außenputz. Dort kann einerseits Spritzwasser, andererseits stehengebliebenes Regenwasser in die Konstruktion eindringen und mittels Kapillarleitung in die tieferen Schichten des Mauerwerks gelangen.

Nach einer Fassadenhydrophobierung ist mit einer geringfügigen Verschlechterung der Austrocknungsbedingungen zu rechnen. Daher sollten Problemstellen rechtzeitig erkannt und saniert werden. Manchmal kann es erforderlich sein, Lagerfugen oder einzelne brüchige Ziegel eines Sichtmauerwerks zu erneuern, damit keine Feuchtigkeit durch die Risse eindringen kann.

Weiters ist es sehr wichtig, dass Fassaden in ihrer Gesamtheit imprägniert werden. Eine teilweise Hydrophobierung einer Wandoberfläche hat zur Folge, dass das Regenwasser von der hydrophobierten Fassade nicht aufgenommen wird, während nicht hydrophobierte Zonen durch das ablaufende Wasser einer höheren Feuchtebelastung ausgesetzt werden, als es bei einer unbehandelten Fassade der Fall wäre. Dieser Effekt tritt auch bei Fachwerkbauten auf, da das Wasser zwar an einer hydrophobierten Putzoberfläche ablaufen, aber an den Schwindfugen zwischen Ausfachung und Fachwerk ungehindert in die Konstruktion eindringen kann. Eine Austrocknung von innengedämmten hydrophobierten Fachwerkkonstruktionen dauert dementsprechend sehr lange und birgt ein hohes Risiko für Feuchteschäden in der Konstruktion. [KRU04]

2.1.4 Aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk

Bei Altbauten mit Fundamenten aus Ziegelmauerwerk wird oft Feuchtigkeit durch Kapillarleitung bis in die Wohnbereiche transportiert, da diese Gebäude in der Regel über keine horizontale Abdichtung gegen aufsteigende Feuchte verfügen. Um feuchte Wände zu sanieren, werden häufig dampfdichte Innendämmungen aufgebracht, ohne die Herkunft der Mauerfeuchte genau zu analysieren. Handelt es sich bei der Feuchte in den Wänden um aufsteigende Grundfeuchte, ist eine dichte Innendämmung die falsche Lösung. Durch die Abdichtung der Wand an der Innenseite wird die raumseitige Austrocknung unterbunden. Die Folge ist ein weiteres Ansteigen des Feuchtehorizontes in der Wand. [KOR03]

Häufig kann aufsteigende Feuchtigkeit plausibel erklärt und mit sehr einfachen Mitteln entschärft werden. Undichte Dachrinnen oder Regenabfallrohre, Leckagen in alten Abwasserleitungen sowie eindringendes Oberflächenwasser durch falsch geneigte Traufenpflaster können in Kombination mit einer nicht vorhandenen Vertikalabdichtung an der Außenseite des Fundamentmauerwerks zu dauerfeuchten Kellerwänden und zu aufsteigender Wandfeuchte führen. Wenn allerdings sichergestellt ist, dass die Mauerfeuchte infolge Grundwassers aus dem Boden kommt, muss eine Mauerwerkstrockenlegung durchgeführt werden, bevor mit einer Innendämmmaßnahme begonnen wird.

Das dynamische Gleichgewicht der Austrocknungsfähigkeit von Mauerwerk wird durch eine Außendämmung, beispielsweise auf Mineralwollebasis, nicht weiter beeinflusst. Das liegt an der gleichzeitigen Temperaturanhebung in der Wand nach der Dämmmaßnahme. Dadurch werden die Trocknungsbedingungen kaum verschlechtert. Das Anbringen einer Innendämmung beeinträchtigt hingegen die Austrocknungsfähigkeit stark, die Wandtemperatur wird gesenkt und der Feuchtehorizont im Mauerwerk über den Ausgangszustand hinaus angehoben. [KÜN04], [KRU10]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk ein KO-Kriterium für die Anbringung einer Innendämmung darstellt (vgl. Kapitel 4).

2.2 Befeuchtung von innen

Wie bereits in Abschnitt 1.3.2 erwähnt, findet der Feuchtetransport durch Bauteile einerseits mittels Dampftransport und andererseits mittels Flüssigwassertransport statt. Bei der Feuchteinwirkung auf die Raumseite einer Außenwand handelt es sich im Normalfall um Wasserdampf, wobei man Dampfkonvektion und Dampfdiffusion unterscheiden muss. Der Flüssigwassertransport von der Innenseite ist im Gegensatz zur Belastung der Außenseite der Wand durch Schlagregen zu vernachlässigen. Im Innenbereich handelt es sich meist um Schadensereignisse, wie beispielsweise einen Wasserrohrbruch, wenn große Wassermengen in den Baukörper eingetragen und durch Kapillartransport verteilt werden. Dennoch können Konvektion und Diffusion über einen längeren Zeitraum zu Schäden führen.

2.2.1 Dampfkonvektion

Der Großteil der Innendämmmaßnahmen erfolgt bei Altbauten mit denkmalgeschützter Fassade oder bei erhaltenswerten Fachwerkgebäuden. Diese Bauwerke weisen meist unebene Wände auf, verfügen oft über unverputzte Flächen oder haben Erker mit gekrümmten Wandflächen. Auch Stein- oder Mischmauerwerk ist durch große Oberflächenunebenheiten gekennzeichnet. Das Anbringen einer Innendämmung an unebenen Wandoberflächen lässt Hohlräume zwischen dem Dämmmaterial und dem Mauerwerk entstehen. Vor allem bei der Verwendung von steifen Dämmplatten können sich große Lufträume, wie in Abb. 4 links dargestellt, ergeben.

Ein ähnlicher Fall tritt ein, wenn ein plattenförmiger Dämmstoff mittels Klebemörtel an der Wandoberfläche befestigt wird. Die gängigste Montageart der Dämmplatten ist, vermutlich wegen des geringeren Materialverbrauchs, die Befestigung mittels Mörtelbatzen. Doch beim Ankleben zum Beispiel einer Verbundplatte aus Gipskarton- und Polystyrolplatte mit Mörtelbatzen ergibt sich zwangsläufig ein durchströmbarer Hohlraum zwischen Wand und Dämmplatte. Diese Konstruktionsweise ist als Negativbeispiel, das in der Praxis nicht ausgeführt werden sollte, in Abb. 4 rechts dargestellt. Um einen vollflächigen Kontakt zwischen Dämmplatte und Wand herzustellen, ist es günstiger, den Klebemörtel mit einer Zahnpachtel aufzutragen. [BOR06a]

Sobald Hohlräume im Inneren der Konstruktion vorhanden sind, besteht die Gefahr der Hinterströmung der Dämmschicht durch Leckagen an den Bauteilanschlüssen oder durch Installationsöffnungen in der Wandoberfläche. Aufgrund der Verschiebung des Temperaturgefälles nach innen kühlt die eingeschlossene Luft hinter der Dämmschicht ab. Das kann bei zusam-

menhängenden Hohlräumen und bei Verbindungen dieser Hohlräume mit der Raumluft einen Konvektionsprozess auslösen. Die Abkühlung der Luft hinter der Dämmung bewirkt, dass die Luft schwerer wird und absinkt. Bei Steckdosen oder Lichtschaltern kann die abgekühlte Luft in den Raum zurückströmen. Auf diese Weise zieht warme, feuchtere Raumluft durch mögliche Anschlussfugen im Deckenbereich hinter die Dämmebene, wodurch ein geschlossener Kreislauf entsteht, der bei entsprechend hoher Raumluftfeuchte einen konvektiven Feuchteintrag hinter die Dämmschicht dargestellt. Bereits kleine Temperatur- und Dichteunterschiede reichen aus, um diesen Effekt zu starten. Es entsteht ein kleiner, aber kontinuierlicher Luftstrom, wodurch warme, feuchte Raumluft an der kalten Wandoberfläche kondensieren oder zumindest ein Klima erzeugen kann, das für Schimmelpilzwachstum geeignet ist. [BOR05]

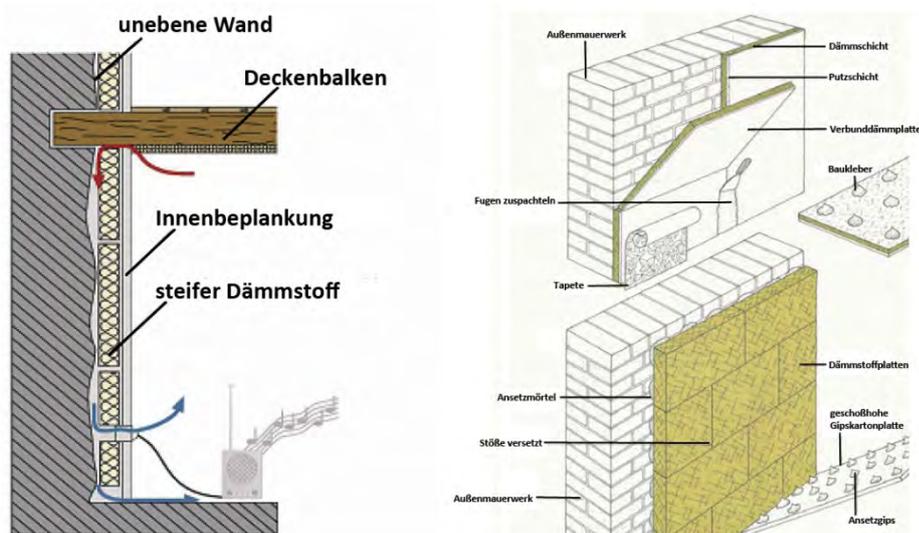


Abb. 4: Doppelfehler: Hinterströmungspfade bei Hohlräumen zwischen Dämmung und Wand (links); steife Dämmplatten mit Mörtelbatzentechnik vor unverputztem Mauerwerk (rechts) [BOR06a]

Neben der Gefahr der Hinterströmung besteht auch das Risiko von Durchströmung der Wand. Vor allem bei Wänden ohne durchgehenden Außen- oder Innenputz kann das Mauerwerk nicht als luftdicht angesehen werden. Bei Fachwerkkonstruktionen, die großteils nur aus der Holzkonstruktion und der Ausfachung ohne Putz bestehen, können erhebliche Leckagen auftreten. Speziell die Durchdringung von Außenwänden durch Deckenbalken ist bei Fachwerkhäusern sehr oft gegeben, aber auch bei Altbauten mit zweischaligem Mauerwerk reichen die Balkenköpfe meist durch das Mauerwerk in den äußeren Bereich der zweischaligen Konstruktion. Oft ergibt sich dadurch ein zugiges Raumklima, das aber in der Regel nicht zu konvektiven Feuchteschäden führt, da die Luft aufgrund kurzer Strömungswege entlang der Balken sehr schnell nach außen gelangt und es zu keiner Unterschreitung der Taupunkttemperatur in der Konstruktion kommt. Es kann sogar vorkommen, dass sich die Oberflächen im Luftkanal gegenüber dem stationären Zustand erwärmen. [BOR05]

Diese vorerst unproblematische Durchströmung kann nach Anbringung einer Innendämmung an der nicht luftdichten Außenwand einen potentiellen Schadensfall hervorrufen. Wird die Dämmschicht nicht luftdicht an die Nachbarbauteile angeschlossen, kann weiterhin Luft durch die gesamte Konstruktion nach außen strömen. Wie in Abb. 5 links veranschaulicht, ist der Strömungsweg vom Eintritt in die Konstruktion an der Deckenanschlussfuge bis zu den Leckagen an den Balkendurchdringungen wesentlich länger als vor der Dämmmaßnahme. Dadurch verlängert sich auch die Verweildauer der feuchten Raumluft in der Konstruktion und die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten vergrößern die Gefahr der Tauwasserbildung im Luftkanal. Das Schimmelpilzrisiko ist dort am größten, wo die Luft an der kalten Außenwand entlangstreifen kann. In Abb. 5 rechts sind die schwarzen Schimmelflecken unterhalb der Balkenköpfe eindeutig erkennbar.



Abb. 5: Durchströmungspfade bei undichter Innendämmung mit Hohlräumen hinter der Dämmebene (links); Schimmelbildung infolge von Durchströmung an undichtem Balkenanschluss (rechts) [BOR06a]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Innendämmung immer vollflächig an der Wand anliegen sollte. Daher sind bei unebenem Mauerwerk oder Verputz Einblas- oder Schüttdämmstoffe sowie elastische Dämmstoffe von großem Vorteil. Bei der Anbringung von Verbundplatten oder anderen steifen Dämmstoffplatten ist es ratsam, den Klebemörtel mit der Zahnpachtel vollflächig aufzutragen, sofern dies die Ebenheit des bestehenden alten Putzes zulässt. Um sicherzugehen, sollten die Randanschlüsse zu Innenwänden, Fußboden und Decke rissfrei abgedichtet werden. Besonders die sorgfältige Luftdichtung auf der warmen Seite der Dämmung ist notwendig, um einerseits die Hinterströmung der Dämmschicht zu unterbinden und andererseits einen Feuchteintrag in die Deckenkonstruktion zu vermeiden. Dies ist vor allem bei Holzbalkendecken von enormer Wichtigkeit. Die Abdichtung der Deckenanschlussfuge kann beispielsweise mit einem Dämmkeil erfolgen, der gleichzeitig eine Entschärfung der

Wärmebrücke im Deckenanschluss bewirkt. Bei Deckenuntersichten mit Stuckverzerrungen bietet sich die Anbringung einer Stuckhohlkehle aus Polystyrol an, die über der Fuge zwischen Decke und Wand vollflächig verklebt wird. Steckdosen oder andere Durchdringungen der Dämmschicht sollten vermieden oder mit luftdichten Hohlwanddosen ausgeführt werden.

2.2.2 Dampfdiffusion

2.2.2.1 Beschreibung des Diffusionsproblems

Das Diffusionsproblem ist vor allem durch das Glaserverfahren bekannt und ein wichtiger Parameter bei der Planung einer Innendämmmaßnahme. Die Feuchtezunahme hinter einer Innendämmung infolge der Wasserdampfdiffusion wird maßgeblich von den thermischen Verhältnissen und den diffusionstechnischen Eigenschaften der beteiligten Bauteilschichten bestimmt. Die Dampfdiffusion findet ständig in allen Baukörpern statt, sobald sich ein Dampfdruckgefälle ausbildet. Der Dampfdruck ist von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte abhängig. Aufgrund des dauernd stattfindenden Druckausgleichs diffundiert die Luft mit höherem Dampfdruck, also warme, feuchte Luft, zu Luft mit niedrigerem Dampfdruck, also kalter, trockener Luft. Während der kalten Jahreszeit diffundiert aufgrund des Dampfdruckgefälles die warme, feuchte Innenluft eines Gebäudes durch die Außenbauteile hindurch. Dabei kühlt die Raumluft innerhalb des Bauteils ab, was im ungünstigsten Fall zu Tauwasserbildung in der Konstruktion führt. Durch die Applikation einer Innendämmung verschiebt sich das Temperaturgefälle und der Taupunkt rückt in der Wandkonstruktion weiter nach innen, wodurch die Gefahr von Tauwasserausfall in der Wand steigt. [HIS10]

Wie in Abschnitt 1.4 erwähnt, kann man – bezogen auf das Diffusionsverhalten – drei Gruppen von Innendämmsystemen unterscheiden. Bei dampfdichten Systemen wird der Diffusionsstrom durch die Wand gänzlich oder zumindest größtenteils unterbunden, da das Dämmmaterial bereits eine Dichtungsebene darstellt. Im Gegensatz dazu haben dampfdurchlässige oder diffusionsoffene Systeme keinen Schutz vor Wasserdampfdiffusion durch die Konstruktion. Dämmsysteme mit Dampfbremse weisen eine eingebaute Dampfbremsschicht bzw. eine Dampfspererschicht auf. Bei allen Systemen hängt die tatsächlich stattfindende Dampfdiffusion von den verwendeten Materialien und deren Schichtstärken ab. Die entscheidende Materialkenngröße ist dabei der s_d -Wert (vgl. Abschnitt 1.3.2), der die äquivalente Luftschichtdicke einer Materialschicht bzw. einer Konstruktion angibt. Je höher der s_d -Wert einer Schicht oder Konstruktion ist, desto weniger Dampf kann durch diese hindurch diffundieren.

2.2.2.2 Aufgabe und Eigenschaften von Dampfbremsen

Um den Feuchtetransport infolge Diffusion zu begrenzen, wird eine Dampfbremse in die Konstruktion eingearbeitet. Sie sollte möglichst weit auf der warmen Seite der Wandkonstruktion

installiert sein und gleichzeitig als Luftdichtheitsschicht fungieren. Bis vor wenigen Jahren war man der Meinung, dass je weniger Feuchtigkeit in die Konstruktion eindringen könne, desto geringer sei die Gefahr eines Bauschadens. Daher wurden früher Dampfsperren mit einem s_d -Wert von 100 m oder mehr verwendet, um den Diffusionsstrom durch die Wand zur Gänze zu unterbinden. Dadurch erfüllte man auch sehr einfach die Anforderungen nach ÖNORM B 8110-2. Im Vergleich zu früher werden Dampfsperren heute in der Praxis nur mehr sehr selten verwendet, da sie den Diffusionsstrom in beiden Richtungen sperren. Neben dem Vorteil, dass keine Raumlufftfeuchte in die Konstruktion eindringen kann, haben Dampfsperren den Nachteil, dass sie die Austrocknung der Wand nach innen ebenfalls verhindern. Untersuchungen an modernen Holzhäusern in den USA haben gezeigt, dass selbst bei guter Verarbeitung der konvektionsbedingte Feuchteeintrag in Außenbauteile etwa dem Diffusionsstrom durch eine Dampfbremse mit einem s_d -Wert von ca. 3 m entspricht. [KÜN03] Daraus ergibt sich, dass auch bei einem höheren Diffusionswiderstandsfaktor der Dampfbremse so viel Feuchte in den Bauteil gelangt, als wenn diese nur einen s_d -Wert von 3 m hätte. Ähnliche Werte können bei Innendämmungen angenommen werden, da auch hier die Gefahr von konvektivem Feuchteeintrag stets gegeben ist. Weiters ist bei Innendämmmaßnahmen mit Zwischenwandanschlüssen die Flankendiffusion zu berücksichtigen. Dabei dringt Feuchtigkeit über die Flanke des Wandanschlusses hinter die Dämmung ein. Der Diffusionsstrom umgeht dadurch den möglicherweise sogar richtig hergestellten luftdichten Bauteilanschluss von Dampfbremsefolie und Zwischenwand. [PRO10], [GEI01], [FEI10]

In den meisten Fällen ist es sinnvoller, statt einer Dampfsperre eine diffusionshemmende Dampfbremse mit einem s_d -Wert zwischen 2 m und 5 m einzusetzen. Einerseits wird dadurch die Tauwasserbildung während der kalten Jahreszeit ausreichend begrenzt, andererseits kann die Konstruktion während der wärmeren Monate zur Raumseite hin austrocknen.

Oft reicht die Rücktrocknung durch eine diffusionshemmende Dampfbremse nicht aus. Vor allem bei Fachwerkgebäuden muss die Austrocknung nach innen sehr schnell erfolgen, um eine dauerhafte Feuchtesicherheit der Konstruktion zu gewährleisten. In diesen Fällen ist es günstig, das Trocknungspotential durch den Einsatz trockenungsfördernder, sogenannter feuchteadaptiver Dampfbremsen zu erhöhen. In den Wintermonaten verhalten sich diese wie diffusionshemmende Dampfbremsen. Bei günstigen Voraussetzungen für die Austrocknung des Bauteils wird die Folie diffusionsoffener und fördert damit die Austrocknung, lange bevor ein Tauwasserproblem entstehen kann. Dieses Phänomen lässt sich durch den variablen s_d -Wert der feuchteadaptiven Dampfbremse erklären. In Abb. 6 ist die Abhängigkeit des s_d -Wertes der variablen Dampfbremsefolie auf Polyamidbasis von der Umgebungsluftfeuchte dargestellt.

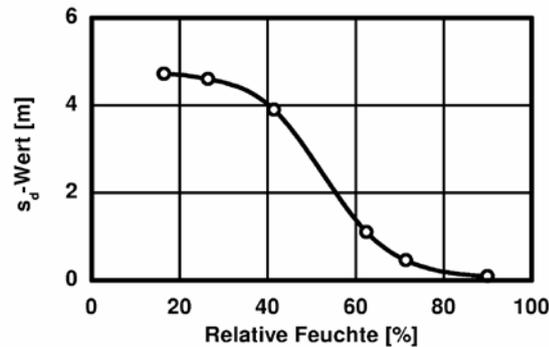


Abb. 6: Abhängigkeit des Diffusionssperwertes (s_d -Wert) der feuchteadaptiven Dampfbremse auf Polyamidbasis von der relativen Luftfeuchte [KÜN03]

Die relative Luftfeuchte zwischen Dampfbremse und Dämmung kann bei schlagregenbeanspruchten Fassaden oder bei nicht luftdichten Konstruktionen, wie beispielsweise Fachwerkbauten, abhängig von den Witterungsbedingungen stark schwanken. Trocknet die Fassade außen ab und wandert die Feuchte hinter der Dampfbremse nach außen, wird es im Bereich der Folie sehr trocken. Daher muss die Dampfbremse möglichst dicht sein, damit keine Feuchtigkeit von der Raumseite nachströmt und die Diffusion nach außen noch verstärkt. Wandert die Feuchtigkeit nach innen, ist mit einem Ansteigen der relativen Luftfeuchte im Bereich der Dampfbremse zu rechnen. In diesem Fall sollte die Folie möglichst diffusionsoffen sein, damit die ankommende Feuchte an die Raumluft abgegeben werden kann. Die Wand trocknet dadurch nach innen aus. [KÜN03], [FEI10]

2.2.2.3 Umkehrdiffusion

Der oben beschriebene Vorgang wird als Umkehrdiffusion oder auch Sommerkondensation bezeichnet. Bei solarer Erwärmung der Fassade und in weiterer Folge der äußeren Bauteilschichten diffundiert die dort gespeicherte Feuchtigkeit durch den Bauteil hindurch nach innen zum kühleren Klima. Wenn die Innendämmung aus einem diffusionsoffenen Material besteht, kann die Feuchtigkeit bis an die innenliegende Dampfbremse gelangen und dort kondensieren. Ist bei dieser Konstruktion eine konventionelle Dampfbremse, die quasi eine Einbahn darstellt, oder eine Dampfsperre vorhanden, wird eine Austrocknung nach innen gänzlich verhindert. Um dies zu vermeiden, ist auch in diesem Fall die Anbringung einer feuchteadaptiven Dampfbremse von großem Vorteil. [GÄN08]

2.2.3 Feuchteintrag durch erhöhte Anfangsfeuchte

Grundsätzlich kann man im Bauwesen zwischen Nass- und Trockenbauweise unterscheiden. Auch bei Innendämmsystemen gibt es Konstruktionen, die in Trockenbauweise, beispielsweise Vorsatzschalen mit Beplankung und Mineralwollendämmung, oder in Nassbauweise errichtet

werden. Das Ansprühverfahren ist eine mögliche Variante der Herstellung einer Innendämmung in Nassbauweise. Dabei wird das Dämmmaterial, meist in Flocken- oder Spanform, mit einem Wassernebel befeuchtet und an die bestehende Wandoberfläche, zwischen eine zuvor angebrachte vertikale Holzlattung, aufgesprüht. Die feuchten Flocken kleben somit aneinander und bilden eine sehr poröse, mit Wasser gesättigte Schichte, die mit einer Richtlatte abgeglichen werden kann. Auf der zuvor konstruierten Holzlattung kann das überschüssige Material abgezogen werden, und es entsteht eine ebene Wandoberfläche, die mit einer Dampfbremse und einer Beplankung versehen wird. Die Wasserzugabe während der Dämmstoffaufbringung erhöht die Holzfeuchte der Unterkonstruktion nach Anbringen der Beplankung auf Werte über 25 Masseprozent. Diese Holzfeuchte kann bei längerer Einwirkungsdauer zu Schäden führen (vgl. Abschnitt 3.1). Auch das Bestandsmauerwerk sowie der Bestandsputz werden einer hohen Feuchtebelastung ausgesetzt. Eine Dampfbremse in der Beplankung verschärft den langwierigen Austrocknungsprozess zusätzlich. Dampfsperren sind auch Trocknungssperren und können das Austrocknen von Baufeuchte massiv verlangsamen. Daher ist in solchen Fällen der Einsatz einer feuchteadaptiven Dampfbremse ideal. Wie in Abschnitt 2.2.2.2 erläutert, kann eine sogenannte „intelligente“ Dampfbremse den Gesamtwassergehalt durch eine schnelle, ungebremste Austrocknung der Konstruktion im unkritischen Rahmen halten. [IFL10], [BOR05], [BOR08]

Der Feuchteeintrag durch das Ansprühverfahren ist beträchtlich. Daher ist eine entsprechende Austrocknungsphase einzuplanen. Idealerweise sollte die Konstruktion bis zur Ausgleichsfeuchte abtrocknen, bevor der Innenausbau fertiggestellt wird. Auf jeden Fall muss die Dämmschicht vor der ersten Tauperiode, also vor Bezug und Nutzung der Wohnung, ausgetrocknet sein. Die Austrocknungsdauer ist grundsätzlich vom Umgebungsklima abhängig. Weiters wird sie durch eine möglicherweise vorhandene Dampfbremse, speziell durch den jeweiligen s_d -Wert der verwendeten Folie, beeinflusst. Bei Dämmungseinbauten im Spätherbst, wo davon ausgegangen werden kann, dass eine rasche selbständige Austrocknung aufgrund des Außenklimas nicht möglich ist, muss die Raumluft geheizt und in regelmäßigen Abständen gelüftet werden. In Abb. 7 sind zwei Austrocknungskurven dargestellt, eine mit feuchteadaptiver und eine mit konventioneller Dampfbremse. Die feuchteadaptive Dampfbremse bietet einen schnelleren Austrocknungsprozess, der trotzdem in den Wintermonaten durch vermehrte Feuchtezufuhr aus der Raumluft unterbrochen wird. Der Gesamtwassergehalt beginnt zu steigen, sobald die kalte Jahreszeit einsetzt und die Oberflächentemperaturen in den Tauwasserbereich absinken. Da in der folgenden Trocknungsphase mehr Feuchtigkeit austrocknen kann als in der Tauperiode davor angefallen ist, wird die Konstruktion von Jahr zu Jahr trockener und daher schadens-toleranter.

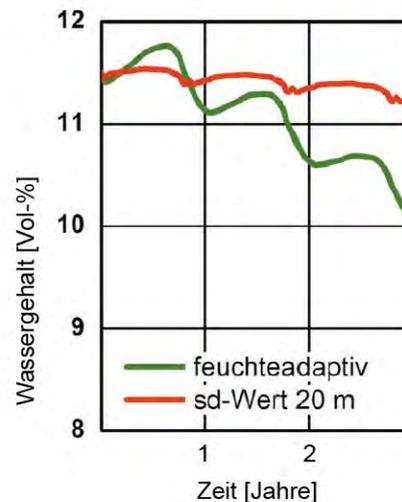


Abb. 7: Austrocknungsverhalten einer Konstruktion mit feuchteadaptiver und mit konventioneller Dampfbremse [KÜN08]

Die absinkende Sinuskurve stellt einen langjährigen Austrocknungsprozess in Form des Gesamtwassergehalts der Konstruktion dar, der während der kalten Jahreszeit durch Feuchteanreicherung kurzfristig wieder ansteigt. Im darauffolgenden Sommer trocknet die Konstruktion etwas mehr aus als im Jahr zuvor.

Eine sehr hohe Feuchtebelastung der Bestandswand und des verwendeten Dämmmaterials tritt bei der Verarbeitung von Lehmputzen auf. Die Verarbeitung und die Applikation einer mit Lehm verputzten Dämmkonstruktion werden in Abschnitt 5.1 5.3 näher erläutert.

2.3 Konstruktive Parameter

2.3.1 Wandkonstruktionen im Altbau und deren Schwachstellen

Für die richtige Wahl eines Innendämmsystems ist es wichtig, zuerst die Bestandskonstruktion genau zu untersuchen und zu analysieren. In Altbauten sind die unterschiedlichsten Baumaterialien als Wandbildner zu finden. Die am häufigsten mit einer Innendämmung zu sanierenden Bestandsobjekte stammen aus der Zeit zwischen 1870 und 1914. Dabei handelt es sich größtenteils um Bauwerke aus Ziegelmauerwerk mit Decken aus Holz. Eine andere Art der Wandkonstruktion weisen Fachwerkhäuser auf. Sie bestehen aus Holzriegelkonstruktionen, die mit unterschiedlichen Füllmaterialien ausgefacht sind. Eine eher seltene, aber für die nachträgliche Anbringung einer Innendämmung dennoch prädestinierte Konstruktionsart ist die Holzblockbauweise. Sie ist vor allem in ländlichen Gebieten des alpinen Bereiches vertreten.

Unabhängig von der Konstruktion der Außenwand müssen vor einer Innendämmmaßnahme folgende Faktoren erfasst werden:

- Gibt es einen funktionstüchtigen Schlagregenschutz an der Fassade?
- Sind Schäden infolge Feuchteinwirkung aus dem Boden, durch Schlagregen oder durch Wasserschäden (Dachdeckung, Dachrinne, Regenabfallrohr) sichtbar?
- Gibt es Stellen an der Fassade, an denen Regenwasser vermehrt in die Konstruktion eindringen kann (Fugen, Risse, mikrobiologischer Bewuchs)?
- Sind Ausblühungen an der Fassade zu erkennen und lassen diese Rückschlüsse auf mögliche Wasserströmungen in der Wandkonstruktion zu?
- Gibt es Bereiche, wo das Material augenscheinlich ausgetauscht werden muss?
- Sind die äußerlichen Schäden in irgendeiner Form an der Innenoberfläche zu erkennen (feuchter Innenputz, Stockflecken, Schimmelpilzwachstum, Abplatzung des Anstrichs, Ablösung von Tapeten)?
- Ist an der Innenoberfläche der Außenwand ein durchgehender Verputz aufgebracht?
- Welche Materialien werden verwendet, und gibt es einen Zusammenhang von Schaden und Materialwahl (beispielsweise Gipsputz an der Innenoberfläche)?

In den folgenden Abschnitten sollen die wesentlichen Faktoren, die bei einer Innendämmmaßnahme an der jeweiligen Konstruktion zu beachten sind, erörtert werden.

2.3.1.1 Verputzte Wandkonstruktionen aus Ziegelmauerwerk

Bei Bauteilen aus Ziegelmauerwerk ist besonders auf den Feuchtegehalt der Bestandskonstruktion zu achten. Es muss einerseits abgeklärt werden, woher die Feuchtigkeit im Mauerwerk stammt, andererseits sind die Austrocknungsmöglichkeiten des Bauteils zu ermitteln. Weiters ist das Bestandsmauerwerk auf Schäden zu untersuchen. Es müssen auch noch nicht ersichtliche, aber zu erwartende Folgeschäden, die möglicherweise erst zu einem späteren Zeitpunkt auftreten, ergründet werden. [BRA04]

Historische Putzoberflächen weisen oft feine Risse oder Hohllagen auf, die mit freiem Auge nicht erkennbar sind, durch die aber ein erhöhtes Maß an Feuchtigkeit in das Mauerwerk eindringen kann. Die Ergänzung, Konservierung und Reparatur geschädigter Putze von denkmalgeschützten Fassaden ist häufig sehr problematisch, da es sich hauptsächlich um Kalkputze und Kalkmörtel handelt, die mit den heute verwendeten Materialien nur schwer zu kombinieren sind. [SCH07]

2.3.1.2 Wandkonstruktionen aus Sichtziegelmauerwerk

Gebäude mit Sichtziegelmauerwerk zählen zu den ältesten traditionellen Bauweisen. Bis ins 20. Jahrhundert wurden die Außenwände aus einschaligem Ziegelmauerwerk mit außenliegender Ziegelschicht aus witterungsbeständigerem Steinmaterial hergestellt. Diese Vormauerschale besteht meist aus höher gebrannten Klinkerziegeln. Sie haben gegenüber normal gebrannten Ziegeln den Vorteil, dass die Poren durch den Sinterprozess geschlossen sind und daher kein Wasser aufnehmen können. Im Gegensatz zu Fassaden aus großformatigen Natursteinen weisen Klinkerfassaden jedoch einen hohen Fugenanteil auf. Dabei ist der Verbund zwischen Fugemörtel und Ziegelsteinen besonders zu beachten. Die Dauerhaftigkeit hängt stark vom Feuchtehaushalt der Fassade ab. Dieser wird durch die Wasseraufnahme unter Schlagregenbeanspruchung und die Trocknungsgeschwindigkeit der Wandoberfläche bestimmt. [SCH07]

Die Wasserleitung findet bei Klinkerfassaden ausschließlich in den Lagerfugen statt, wodurch es in der kalten Jahreszeit zu Frostschäden und bei starker Verdunstung in einer Austrocknungsphase zu Salzausblühungen kommen kann.

2.3.1.3 Wandkonstruktionen aus Natursteinen

Bei historischen Gebäuden ist die Natursteinfassade Bestandteil der tragenden Außenwandkonstruktion und reicht entweder über den gesamten Querschnitt oder ist als mehrschichtiges Verblendmauerwerk mit Hintermauerung aus Ziegelsteinen ausgeführt. Neben materialbedingten Schäden an der Oberfläche können andere konstruktionsbedingte Schäden in Form von Rissbildungen und Abplatzungen bis hin zu großflächigen Ablösungen des Steinverblendmauerwerks von der Ziegelwand auftreten. Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn das innenliegende Ziegelmauerwerk durch eine Innendämmung zur Raumseite hin abgedichtet ist. Um einen Feuchteintrag durch Regenwasser und ein daraus resultierendes Austrocknungsproblem zu vermeiden, sollten Natursteinfassaden mit einer Imprägnierung versehen werden (vgl. Abschnitt 2.1.3). [SCH07]

2.3.1.4 Fachwerkkonstruktionen

Die tragende Struktur bei Fachwerkkonstruktionen besteht aus einer Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Holz, die für gewöhnlich mit verputztem Mauerwerk oder mit Sichtziegelmauerwerk ausgefacht ist. Es können auch andere Materialien wie Naturstein oder Strohlehm als Ausfachung vorkommen. Die Schwachstelle einer Fachwerkfassade ist die Fugenausbildung zwischen Holzbalken und Ausfachung. Wie in Abschnitt 2.1.1 erwähnt, muss eine Fachwerkfassade vor Schlagregenbelastung geschützt werden. Früher wurden an die Westseiten von Fachwerkgebäuden, also an die am stärksten durch Witterung beanspruchten Fassadenteile,

andere Gebäudeteile, meist Wirtschaftsgebäude oder Stallungen, angebaut. Dadurch ergab sich für den Wohnbereich ein ausreichender Feuchteschutz. In manchen Regionen ist die Wetterseite auch traditionell mit Schiefer oder Schindeln versehen. Heute sind andere Methoden, wie beispielsweise vorgehängte Fassaden oder weitere Dachüberstände, als Schlagregenschutz erforderlich. Vorteilhaft erweist sich bei Fachwerkkonstruktionen eine hohe Saugfähigkeit der Mauersteine, weil dadurch das Risiko, dass ablaufendes Regenwasser im Bereich der Riegel und Schwellen in die Konstruktion eindringen kann, minimiert wird. Zusätzlich zur hohen Saugfähigkeit sollten die Ausfachungen aus sehr dunklen Ziegeln bestehen, um bei solarer Einstrahlung nach einem Schlagregenereignis eine Erwärmung der Fassade zu erreichen und eine rasche Abtrocknung zu ermöglichen. Das WTA-Merkblatt 8-5 widmet sich ausführlich den Möglichkeiten der Innendämmung von Fachwerkkonstruktionen, vor allem der Auswahl eines geeigneten Dämmmaterials. [BOR06], [WTA08]

2.3.1.5 Massivholzkonstruktionen

Neben Fachwerkbauten, die aufgrund der stabförmigen Tragwerke zur Skelettbauweise zählen, werden auch Massivholzkonstruktionen, wie beispielsweise Blockbauten, oft mit einer nachträglichen Innendämmung versehen. Die horizontal übereinanderliegenden Balken sind an den Ecken mit Verkämmungen oder Überblattungen konstruktiv verbunden. [SCH07] Hier tritt das Problem auf, dass durch Schwinden des Holzes weite Fugen entstehen können, durch die Niederschlag eindringen kann. Da bei den meisten älteren Konstruktionen die Blockwand die einzige wandbildende Schale darstellt, kann es zu Zugluft und Feuchteintrag bis in den Wohnraum kommen.

Bei der Sanierung durch Anbringung einer Innenschale in Form einer Innendämmung müssen die Fugen in der Blockwand geschlossen werden, um den Feuchteintrag in den Griff zu bekommen.

2.3.2 Oberflächenbeschaffenheit der Bestandswand

Wie in [SIS07] ausführlich beschrieben, ist die Oberflächenbeschaffenheit der Bestandskonstruktion von enormer Wichtigkeit. Die Auswahl eines Dämmsystems muss je nach Ebenheit bzw. Unebenheit der Wandoberfläche erfolgen. Die einfachere Variante könnte sein, für einen speziellen Untergrund bestimmte Dämmsysteme auszuschließen, weil beispielsweise die Gefahr von Hinterströmung gegeben ist. In Abschnitt 2.2.1 wurde das Konvektionsproblem genauer beschrieben.

Neben der Ebenheit der Bestandswand sollte bei der Planung einer Innendämmmaßnahme die stoffliche Verträglichkeit untersucht werden. Die Frage, ob der Wandbildner und der Oberputz

mit der geplanten Innendämmung verträglich sind, muss beantwortet werden. Die folgenden spezifischen Fragestellungen sind zu berücksichtigen:

- Sind sperrende Schichten im Bestandsputz enthalten?
- Gibt es Verunreinigungen, wie beispielsweise ölhaltige Stoffe, an der Putzoberfläche?
- Handelt es sich um einen gipshaltigen Putz?
- Ist die Festigkeit des Putzes, speziell die Haftung am Mauerwerk, ausreichend?

Für Dämmsysteme mit verklebten Dämmstoffplatten muss ein stabiler, vollflächig verputzter Untergrund vorliegen. Damit die Haftung von Klebern gegeben ist, darf kein ölhaltiger Anstrich am Bestandsputz vorhanden sein. Bei diffusionsoffenen Konstruktionen müssen bestehende sperrende Schichten entfernt werden. Um die Verträglichkeit von zementhaltigen Klebern sicherzustellen, sollten gipshaltige Putze entfernt und durch einen anderen passenden Putz ersetzt werden.

Die Beurteilung dieser Parameter obliegt dem Planer und muss, nach einer eingehenden Analyse der Baustoffe vor Ort oder im Labor, als Grundlage für die weiteren Planungsschritte herangezogen werden.

2.3.3 Wärmebrücken

Wärmebrücken sind örtlich begrenzte Stellen, die im Gegensatz zu den angrenzenden Bauteilen eine höhere Wärmestromdichte bzw. einen höheren Wärmefluss aufweisen. Dies hat zur Folge, dass in den betroffenen Bereichen ein höherer Wärmeverlust und dadurch geringere Oberflächentemperaturen auftreten. Dadurch wird die Möglichkeit der Bildung von Tauwasser und in weiterer Folge das Wachstum von Schimmelpilz begünstigt. [JEN01]

In der DIN EN ISO 10211-1¹, die die Berechnung von Wärmebrücken regelt, werden diese als Teil der Gebäudehülle bezeichnet, an der der ansonsten normal zur Bauteiloberfläche auftretende Wärmestrom deutlich verändert wird. Dies geschieht durch

- eine volle oder teilweise Durchdringung der Gebäudehülle durch Baustoffe mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit und/oder
- einen Wechsel der Dicke der Bauteile und/oder
- eine unterschiedlich große Differenz zwischen Innen- und Außenoberfläche, wie sie bei Wand-, Fußböden- und Deckenanschlüssen sowie bei Ecken auftritt. [MET10]

¹ Die DIN EN ISO 10211-1 entspricht in der österreichischen Fassung der ÖNORM EN ISO 10211-1

In Bezug auf die oben angeführte Definition kann man stoffliche und geometrische Wärmebrücken unterscheiden. Häufig sind auch Mischformen anzutreffen, wie beispielsweise der Anschluss einer Stahlbetondecke in Ziegelmauerwerk.

Zur Beschreibung der Transmissionswärmeverluste an Wärmebrücken wird ein Wärmebrückenverlustkoeffizient ermittelt, der von der Wärmebrückengeometrie, ob linienförmig (ψ -Wert) oder punktuell (χ -Wert), abhängig ist. In diesem Zusammenhang sei auf [BED08] verwiesen. Die Bedeutung der Wärmebrückenverluste wird im nächsten Abschnitt deutlich, vor allem in 2.3.4.2, wo anhand eines Beispiels die Wärmebrückenverluste bei einem Deckenanschluss erörtert werden.

Seit der Einführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) in Deutschland bzw. des Energieausweisvorlagegesetzes (EAVG) in Österreich sind Wärmebrücken vermehrt ins Blickfeld der Planer von Sanierungsprojekten gerückt. Nach EnEV stehen zur Ermittlung der Transmissionswärmeverluste unter Berücksichtigung der Wärmebrücken verschiedene Verfahren zur Auswahl. Bei der Sanierung werden die Wärmebrücken folgendermaßen berücksichtigt: [KEH07]

- im Regelfall durch Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten um $\Delta U_{WB} = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die gesamte wärmeübertragende Umfassungsfläche
- wenn mehr als 50 % der Außenwand mit einer innenliegenden Dämmschicht und einer einbindenden Massivdecke versehen sind durch Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten um $\Delta U_{WB} = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die gesamte wärmeübertragende Umfassungsfläche
- bei vollständiger energetischer Modernisierung aller zugänglichen Wärmebrücken unter Berücksichtigung von DIN 4108-2 durch Erhöhung der Wärmedurchgangskoeffizienten um $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die gesamte wärmeübertragende Umfassungsfläche
- durch genauen Nachweis der Wärmebrücken nach DIN 4108-6 in Verbindung mit weiteren anerkannten Regeln der Technik

Neben der pauschalen Erfassung besteht auch bei der Altbausanierung die Möglichkeit der detaillierten Berechnung der Wärmebrückenverluste. Dadurch ergeben sich zwei wesentliche Vorteile:

- Bei einer gut geplanten Detailausbildung ergibt sich eine erhebliche Reduzierung der rechnerischen Transmissionswärmeverluste.
- Die Vermeidung zu niedriger Oberflächentemperaturen an schwierigen Anschlussdetails kann mit einem Wärmebrückenprogramm nachgewiesen werden.

Bei der Altbausanierung können Wärmebrücken oft nicht gänzlich beseitigt werden. Je nachdem, welche Dämmmethode gewählt wird, liegen die kritischen Punkte mit den größten Transmissionswärmeverlusten an unterschiedlichen Anschlusspunkten. Wie in Abschnitt 1.1 erwähnt, ist eine Außendämmung grundsätzlich immer vorzuziehen, da sie den gesamten Baukörper umschließt und nicht von Bauteilen durchdrungen wird. Eine Innendämmung, die nur abschnittsweise und nicht vollflächig an das Außenwandmauerwerk angebracht werden kann, ruft in den Anschlussbereichen an Innenwände, Decken und Außenwandöffnungen Wärmebrücken hervor. Die dadurch entstehenden zusätzlichen Wärmeverluste und niedrigen Oberflächentemperaturen müssen in der Planung berücksichtigt werden. [GÄN08]

2.3.4 Bauteilanschlüsse im Bestand

Im Folgenden werden die wesentlichen Anschlussdetails genauer betrachtet. Dabei soll der Fragestellung, wie sowohl Wärmebrückenverluste reduziert als auch niedrige Oberflächentemperaturen bei Innendämmungen vermieden werden können, nachgegangen werden.

2.3.4.1 Innenwandanschluss

Bei einem ungedämmten Innenwandanschluss ist überraschenderweise festzustellen, dass die Oberflächentemperaturen an den Kanten höher sind als in der Fläche der Außenwand. Die Innenwand leitet Wärme in die Außenwand ein und hebt dadurch die Kantentemperaturen an. Das Schimmelrisiko ist daher als sehr gering einzustufen.

Durch das Anbringen einer Innendämmung verlagert sich der Schwachpunkt der Konstruktion von der Fläche der Außenwand zur Anschlusskante. Die Oberflächentemperatur in der Fläche der Innendämmung erhöht sich je nach Dämmstärke deutlich. An der Kante hingegen ändert sich die Temperatur kaum, es kann sogar vorkommen, dass bei geringen Dämmstärken die Kantentemperatur leicht absinkt. Abhängig ist dies neben der Dämmstärke auch von der Wärmeleitfähigkeit der anschließenden Innenwand. Hat diese eine bessere Wärmeleitung als das Außenwandmauerwerk, muss die Dämmschicht dicker sein, um Schimmelpilzbildung zu vermeiden. Wenn beide Bauteile dieselbe Wärmeleitfähigkeit aufweisen, reichen geringe Dämmstärken aus, um die Oberflächentemperatur anzuheben. [KEH06], [KEH07a] Bei sehr niedrigen Kantentemperaturen kann eine Flankendämmung, wie sie im folgenden Abschnitt genauer erklärt wird, die erforderliche Oberflächentemperatur sicherstellen.

Tab. 2 stellt die Oberflächentemperaturen der Wandfläche und der Kante bei drei verschiedenen Innenwandanschlüssen und zwei unterschiedlichen Wandbildnern einander gegenüber. In der linken Spalte ist ein ungedämmter Anschluss, wie er im Bestand häufig vorkommt, abgebildet. In der Mitte und rechts sind unterschiedlich stark gedämmte Innenwandanschlüsse dargestellt.

Tab. 2: Oberflächentemperaturen an innengedämmten Außenwänden mit Innenwandanschluss [KEH06]

	Ungedämmt		Innendämmung 40 mm		Innendämmung 80 mm	
	Oberflächentemperatur					
	in der Fläche	an der Kante	in der Fläche	an der Kante	in der Fläche	an der Kante
Vollziegel-Außenwand ($d = 300 \text{ mm}$; $\lambda = 0,81 \text{ W/mK}$)	11,2 °C	12,5 °C	16,5 °C	12,7 °C	17,8 °C	13,3 °C
Hochlochziegel-Außenwand ($d = 300 \text{ mm}$; $\lambda = 0,581 \text{ W/mK}$)	12,7 °C	13,7 °C	16,8 °C	13,6 °C	17,9 °C	14,1 °C

Eine kritische Situation kann sich ergeben, wenn ein Innenwandanschluss nur einseitig gedämmt wird. Je nach Dicke der Innenwand und je nach Dämmstärke können sich an der ungedämmten Wandanschlusskante geringere Oberflächentemperaturen als vor der Dämmmaßnahme ergeben. Das Beispiel in Abb. 8 zeigt einen einseitig gedämmten Innenwandanschluss. Die hier angeführte Schilfrohrdämmung mit Lehmputz wird im Abschnitt 5.3 näher erläutert.

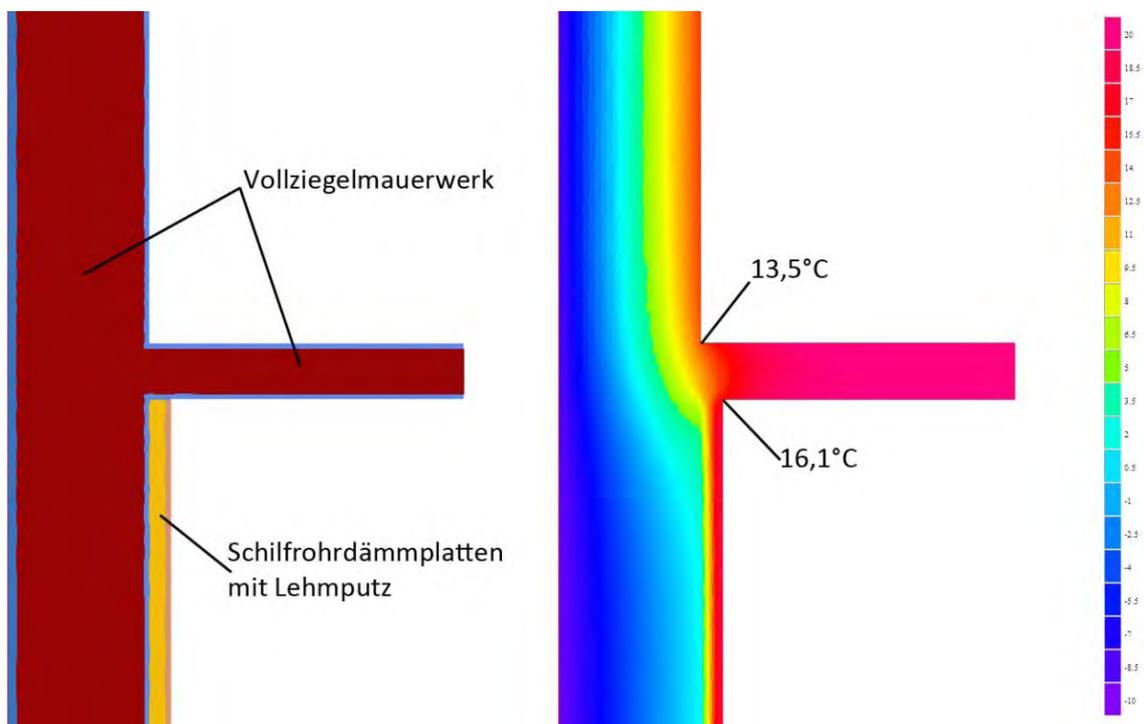


Abb. 8: Einseitig gedämmter Innenwandanschluss aus Vollziegelmauerwerk und 5 cm Schilfrohrdämmung ($\lambda = 0,06 \text{ W/mK}$) mit 2 cm Lehmputz ($\lambda = 0,65 \text{ W/mK}$); (vgl. Kapitel 5)
 Außenwand ungedämmt: $d = 52 \text{ cm}$; $U = 0,94 \text{ W/m}^2\text{K}$; $f_{\text{Rsi}} = 0,78$
 Außenwand gedämmt mit 5 cm Schilfdämmplatten: $d = 59 \text{ cm}$; $U = 0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$; $f_{\text{Rsi}} = 0,87$

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei Innenwandanschlüssen eine Flankendämmung grundsätzlich nicht erforderlich ist. Sie kann sich aber aus energetischer Sicht durchaus lohnen. Bei einer 80 mm dicken Innendämmung verringert sich durch eine 40 mm dicke und 300 mm breite Flankendämmung der Wärmebrückenverlustkoeffizient von 0,25 W/mK um über 30 % auf 0,17 W/mK. [KEH06]

2.3.4.2 Deckenanschluss im Massivbau

Deckenanschlüsse innenseitig gedämmter alter Mauerwerkskonstruktionen gelten von Grund auf als kritisch, da die Decke als tragender Bauteil die Dämmschicht vollständig durchdringt und in den kalten Bereich der Konstruktion reicht. Wird eine Innendämmung an eine Außenwand angebracht, steigt der Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ_i markant an. Ohne zusätzliche Maßnahmen würde ein stumpfer Anschluss der Dämmung an eine Massivdecke die bestehende Wärmebrücke noch verstärken. Die Oberflächentemperatur in der Anschlusssecke wäre geringer als die erforderliche Mindestoberflächentemperatur zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung. Abhilfe leistet eine Flankendämmung, die an der Deckenunterseite befestigt wird. Ein Dämmstreifen von 2 cm Dicke und ca. 20 – 30 cm Breite reicht aus, damit sich der Wärmebrückeneffekt auf das vorherige ungedämmte Niveau reduziert. Dadurch kann sich in Kombination mit der flächenhaften Verminderung der Transmissionswärmeverluste der Gesamtwärmeverlust pro Geschoßmeter auf die Hälfte verringern. [KEH06]

In Abb. 9 ist ein mit Innen- und Flankendämmung sanierter Massivdeckenanschluss dem unsanierten Originalzustand gegenübergestellt. Die Anhebung der Oberflächentemperaturen und die Entschärfung der Wärmebrücke sind hier klar ersichtlich.

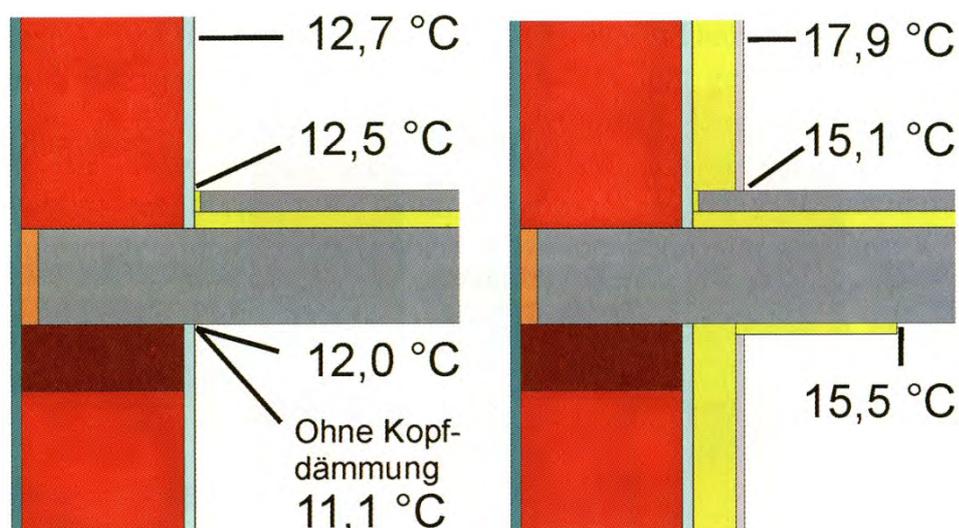


Abb. 9: Verbesserung der Oberflächentemperaturen durch Innen- und Flankendämmung bei einem Massivdeckenanschluss [KEH06]

Die Flankendämmung ist aus feuchtetechnischer Sicht erforderlich, um das Schimmelrisiko im Deckenanschluss zu minimieren. Der Temperaturanstieg an der Oberseite des Deckenanschlusses ist auf den Randdämmstreifen des Estrichs zurückzuführen. Fehlt dieser Randdämmstreifen, ist auch hier eine Unterschreitung der Mindestoberflächentemperatur zu erwarten. Bei Gebäudesanierungen ist es daher sinnvoll, den Fußbodenbereich zu öffnen und die Innendämmung bis zur Rohdecke durchzuziehen. So wird auch eine mögliche Hinterströmung der Dämmschicht vermieden, da die Konstruktion bis in den Estrich hinein reicht (vgl. 2.2.1). Durch den direkten Anschluss einer Trittschalldämmung an die Innendämmkonstruktion fällt die Notwendigkeit einer Flankendämmung auf der Oberseite der Decke weg.

2.3.4.3 Anschluss von Holztramdecken

Im Unterschied zum Deckenanschluss einer Massivdecke ist bei einer Holztramdecke die zu beachtende Wärmebrücke nicht linienförmig, sondern punktförmig ausgebildet. Die Innendämmung wird von den Holzträmen in bestimmten Abständen unterbrochen, wodurch sich der Wärmestrom punktuell erhöht. Bei einer Generalsanierung eines unbewohnten Gebäudes, im Zuge derer möglicherweise auch die Fußböden erneuert und dadurch die Decken geöffnet werden, sollte die Innendämmung stockwerksübergreifend ausgeführt werden. Die Dämmung wird dabei von unten und von oben an die Deckenträme herangeführt, wodurch der neue Fußbodenaufbau thermisch von der Außenwand getrennt wird. Die Wärmebrücken sind dann auf die Balkenköpfe der Tramdecke beschränkt. In Abb. 10 ist die ideale Ausführung der Innendämmung im Deckenbereich dargestellt.

- Die Innendämmung wird im Deckenhohlraum fortgeführt.
- Die Luftdichtung bzw. die Dampfbremse des oberen Geschoßes wird bis an die unterseitige Deckenverkleidung herangeführt.
- Die Balkendurchdringungen werden mit Klebebandmanschetten an ein ausgeklinktes Stellbrett angeschlossen.

Mit dieser Dämm- und Dichtungsmethode können feuchtetechnisch kritische Situationen sicher unterbunden werden. [BOR05]

Vor dem Anbringen einer Innendämmung im Tramdeckenbereich müssen die Balkenköpfe genau untersucht und auf bestehende Schäden geprüft werden. In Nassräumen, vor allem in Badezimmern und Küchen mit diffusionsdichten Bodenbelägen, können die Balkenköpfe von Tramdecken schadhaft sein. Eine unsachgemäße energetische Verbesserung der Bausubstanz verschärft diese Problemzonen zusätzlich. Ebenso können Streichbalken nach der Anbringung einer Innendämmung zu Schadensfällen werden, wenn oftmalige Schwankungen des Wassergehaltes im Holz infolge einer unsachgemäßen Innendämmmaßnahme auftreten. In diesem Fall

können Bauteiltemperierungen in Form von heizrohrgestützter Wärmeenergiezufuhr Abhilfe schaffen. Dabei wird der Rücklauf der Heizanlage am Streichbalken bzw. am zu temperierenden Bauteil vorbeigeleitet, um eine gleichmäßige Temperierung zu erhalten. Weiters können Wärmestäbe oder Wärmerohre, auch Heatpipes genannt, die die Phasenumwandlungsenergie eines Arbeitsmediums ausnutzen, zum Einsatz kommen. [STO10]

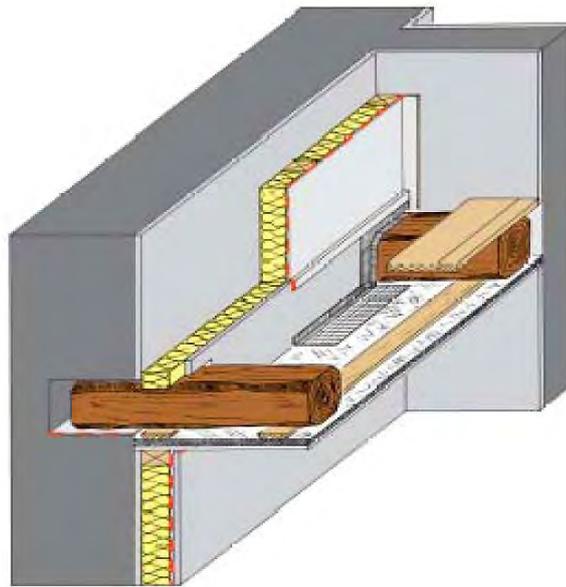


Abb. 10: Ideale Ausführung einer Innendämmung beim Wandanschluss einer Holztramdecke [BOR05]

2.3.4.4 Fensterlaibung

Fensterlaibungen stellen vor allem in Kombination mit einer Innendämmung eine Schwachstelle im Wandaufbau dar. Erstaunlicherweise treten Schäden an Fensterlaibungen nicht in Altbauten, sondern in sanierten Gebäuden, meist nach einem Fenstertausch, auf. Früher wiesen Fenster oft undichte Fugen zwischen Rahmen und Mauerwerk auf. Außerdem handelte es sich hauptsächlich um Kastenfenster mit einfach verglasten Scheiben. Dies führte einerseits zu einem kontinuierlichen Luftzug und andererseits zu Tauwasserbildung an den Fensterscheiben. Diese Einflüsse verhinderten trotz der niedrigen Oberflächentemperaturen der Laibungen ein Schimmelpilzwachstum. [KEH06], [KEH07a]

Bei einer Gebäudesanierung werden meist die alten Kastenfenster durch neue Fenster mit Isolierverglasung ersetzt. Diese sind nur aus einer Scheibenebene aufgebaut und haben daher einen viel weniger tiefen Fensterstock. Die Frage, wo bzw. in welcher Tiefe das neue Fenster in die Wandöffnung eingebaut wird, ist davon abhängig, ob die Wand im Zuge der Sanierung gedämmt wird. Weiters ist die Wahl des Dämmsystems ausschlaggebend für die Positionierung des Fensters. Während bei Außendämmungen der Fensterstock möglichst weit außen im

Mauerwerk sitzen und von der Dämmung teilweise überdeckt werden sollte, kann bei einer innen gedämmten Wand das Fenster weiter innen positioniert werden. Idealerweise sollte die Innenseite des Fensterstockes im Bereich der 10,5 bis 12,6 °C-Isothermen liegen. Die genaue Position kann nur mit einem Wärmebrückenprogramm ermittelt werden.

Nach einem Fenstertausch wird aufgrund der Dichtheit der neuen Isolierglasfenster das Feuchteproblem in den Fensternischen verstärkt. Durch zu geringe Konvektion kann die feuchte Raumluft an den Laibungsflächen in Fensterstocknähe zu Schimmelpilzbildung führen. Daher ist ein Fenstertausch ohne begleitende bauliche Veränderungen eine hoch riskante Sanierungsmethode. Kehl [KEH06] bringt ein Beispiel von ungedämmtem Hochlochziegelmauerwerk, das nach dem Einbau von neuen Isolierglasfenstern in der Laibung einen 5 cm breiten kritischen Bereich aufweist, wo die Oberflächentemperatur unter der Taupunkttemperatur liegt. Dieser Zustand ist in Abb. 11 links dargestellt. Wird bei der Verbesserung des Wärmeschutzes auf der Innenseite der Wand die Laibungsdämmung nicht ausgeführt, verschärft sich die Lage zusätzlich, wie in der mittleren Abbildung zu sehen ist. Hingegen erhöht sich durch eine 20 mm dicke Laibungsdämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ die Temperatur so weit, dass der kritische Bereich für Schimmelpilzbildung auf wenige Millimeter begrenzt wird, wie in Abb. 11 rechts dargestellt ist.

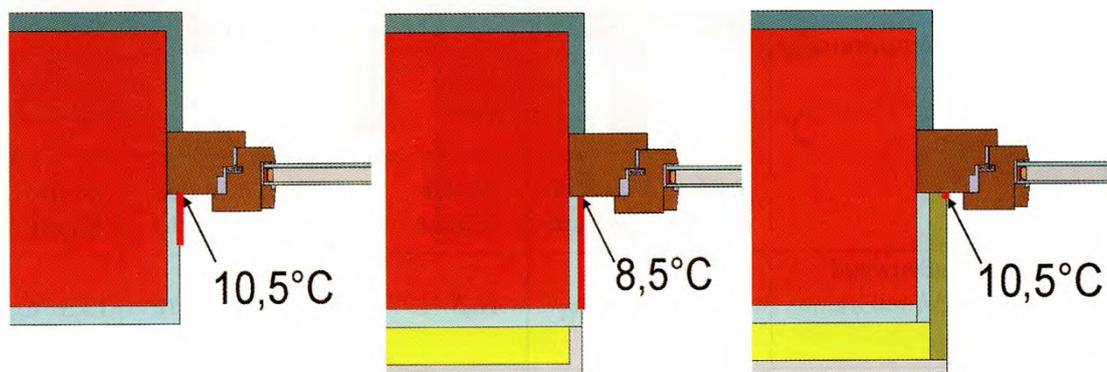


Abb. 11: Veränderung der Oberflächentemperaturen an Fensterlaibungen nach Anbringung einer Innendämmung bzw. einer Laibungsdämmung [KEH06]

Fensteranschlussdetails sind oft nicht einfach zu lösen. In manchen Fällen sollte eine Wärmebrückenberechnung erfolgen, um die Funktionalität des Anschlusses sicherzustellen. Nur so ist es möglich, das Risiko der Schimmelpilzbildung weitestgehend zu minimieren. Eine Alternative zum Einbau neuer Isolierglasfenster ist die Sanierung der bestehenden Kastenfenster. Vor allem bei denkmalgeschützten Fassaden sind Kastenfenster oft eine zusätzliche Bereicherung, nicht zuletzt wegen der vielen bauphysikalischen Vorteile, die sie mit sich bringen. Neben schallschutztechnischen Vorteilen umgehen Kastenfenster die meisten feuchtetechnischen Probleme,

die bereits angesprochen wurden. Voraussetzung dafür ist ein ordnungsgemäßer Einbau des Rahmenstockes in das Mauerwerk, wobei vor allem auf die Luftdichtheit zwischen Fensterstock und Mauerwerk zu achten ist. In Abb. 12 ist ein Querschnitt durch ein Kastenfenster mit Isolierverglasung dargestellt. Außerdem ist die Fensterlaibung mit einer Flankendämmung versehen. Dieses Beispiel zeigt zwar keine Innendämmung, doch anhand des Isothermenverlaufs ist deutlich zu erkennen, dass aufgrund des breiten Rahmenstockes des Fensters das Temperaturgefälle im Bereich der Fensterlaibung relativ gering ist. Dadurch werden kritische Oberflächentemperaturen vermieden und ein Schimmelpilzwachstum kann ausgeschlossen werden.

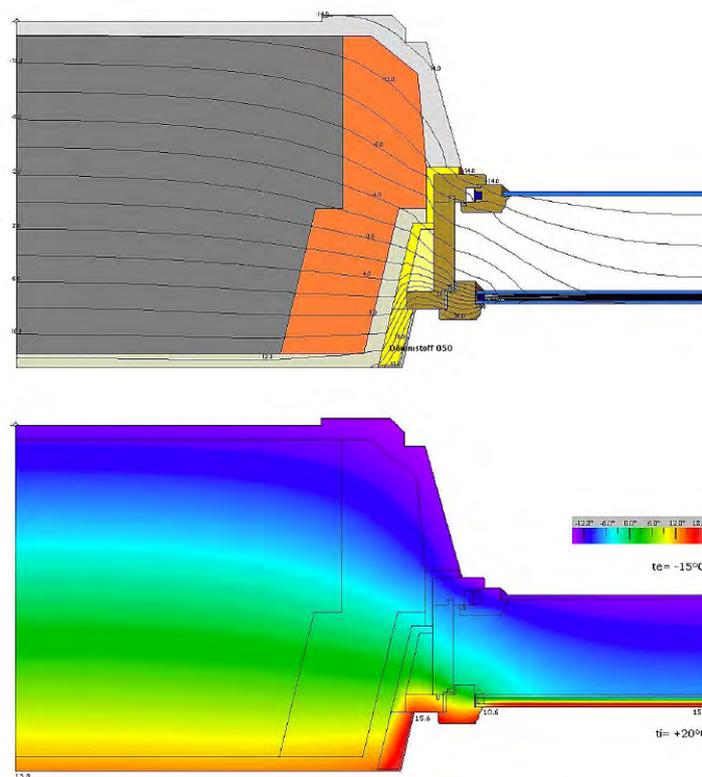


Abb. 12: Querschnitt durch ein Kastenfenster mit Isolierverglasung [ORT05]

2.3.4.5 Versatz von Innen- zu Außendämmung

Bei vielen Gründerzeithäusern ist nur die straßenseitige Fassade mit Gesimsen und Verzierungen versehen, manchmal sogar denkmalgeschützt. Die hofseitigen Außenwände und, bei freistehenden Gebäuden, die Feuermauer zum Nachbargrundstück sind meistens ohne Ornamente ausgebildet. Abb. 13 zeigt ein Beispiel eines Wiener Gründerzeithauses, bei dem die Straßenseite nur mit einer Innendämmung versehen werden kann, während die Feuermauer mit wenig Aufwand thermisch saniert werden könnte. Hier kann ein Wärmedämmverbundsystem aufgebracht werden, vorausgesetzt die Grundstücksgrenze darf überbaut werden.



Abb. 13: Gründerzeithaus in Wien Währing; hier könnte straßenseitig eine Innendämmung und an der seitlichen Wand eine Außendämmung angebracht werden.

Im Wandanschluss von Straßenfassade und Feuermauer ergibt sich aufgrund der einmal außen- und einmal innenliegenden Dämmung eine materialbedingte Wärmebrücke. Im Vergleich zum ungedämmten Zustand wird durch den Versatz der Dämmungen die Oberflächentemperatur an der Innenseite der Ecke deutlich erhöht, jedoch nicht genug, um den Anforderungen des Mindestwärmeschutzes zu genügen. Daher ist die Applikation einer Flankendämmung an der Innenseite der Feuermauer notwendig. Vereinfacht ausgedrückt, muss die Innendämmung um die Ecke geführt werden, um die Wärmebrücke zu entschärfen. [KEH06] Dieses Eckdetail ist in Abb. 14 links ohne Flankendämmung und rechts mit weitergeführter Innendämmung qualitativ dargestellt.

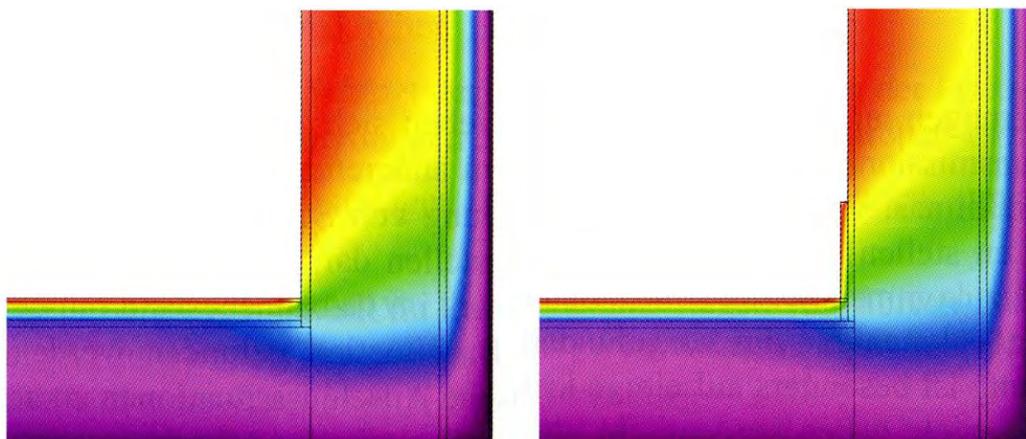


Abb. 14: Isothermenbilder von versetzten Innen- und Außendämmungen; links ohne, rechts mit Flankendämmung [KEH06]

Die Flankendämmung hat den optischen Nachteil, dass sie eine Stufe in der Wandoberfläche erzeugt. Um diesen Übergang so unauffällig wie möglich zu gestalten, können Dämmkeile mit

Dämmstärken von 20 mm verwendet werden. Die optimale Lösung dieses Problems erhält man mithilfe der Berechnung mit einem Wärmebrückenprogramm. Dabei könnte überlegt werden, ob die Flankendämmung auch durch einen entsprechend dicken und verlaufenden Wärmedämmputz hergestellt werden könnte.

Eine weitere Problemstelle kann auftreten, wenn die Innendämmung in einer Außenecke endet. Wie in Abb. 15 dargestellt, tritt infolge der einseitigen Dämmung der Wand in der Ecke ein starker Wärmestrom auf. Dadurch wird die Oberflächentemperatur im Bereich des stumpfen Anschlusses der Dämmung an die Wand abgesenkt. Dies kann zu Tauwasserausfall und Schimmelwachstum in der Anschlussfuge der Dämmung führen. Die rechte Abbildung zeigt den Versuch einer Flankendämmung mittels 2 cm dickem Wärmedämmputz. Die Anhebung der Oberflächentemperatur fällt nur gering aus. Das beschriebene Eckdetail wird in Kapitel 5 dieser Arbeit näher betrachtet und mit einer hygrothermischen Simulation analysiert.

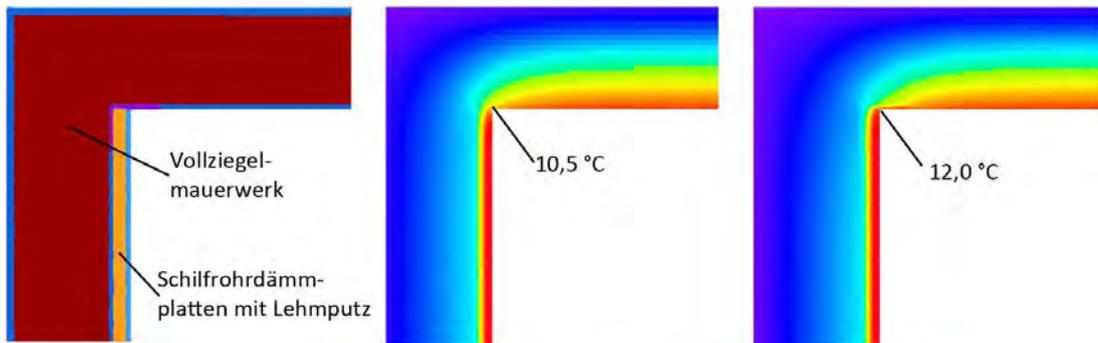


Abb. 15: Außenecke mit 5 cm „einseitiger“ Innendämmung; diese ist nur an einer Wandfläche angebracht und führt nicht um die Ecke.

Außenwand ungedämmt: $d = 52 \text{ cm}$; $U = 0,94 \text{ W/m}^2\text{K}$; $f_{\text{Rsi}} = 0,8$

Außenwand gedämmt mit 5 cm Schilfdämmplatten: $d = 59 \text{ cm}$; $U = 0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$; $f_{\text{Rsi}} = 0,73$

2.4 Einflussfaktoren durch das Nutzerverhalten

Die Analyse des Nutzerverhaltens stellt einen wesentlichen Bestandteil der Planung einer Innendämmmaßnahme dar. Primär ist abzuklären, welche Widmung ein bestimmter Raum aufweist, um daraus ein entsprechendes Raumklima abzuleiten. Das für die Bewohner/innen so wichtige Innenraumklima wird von folgenden Einflussfaktoren maßgeblich bestimmt: [FAL09]

- Raumlufttemperatur
- Raumluftfeuchtigkeit
- Oberflächentemperatur der Hüllflächen (Fußboden, Wände, Decke)
- Heizungsart und -intensität
- Luftaustausch

Dabei wird als Kriterium für die Behaglichkeit eine Raumtemperatur von 18 – 24 °C mit einer relativen Raumlufftfeuchte von 35 – 65 % definiert. Die Temperaturdifferenz zwischen bodennahen und deckennahen Luftschichten in einem Raum sollte nicht mehr als 3 °C betragen. Dies ist in Altbauten mit Raumhöhen über 3,00 m nur bedingt möglich. Die Oberflächentemperaturen werden von der Raumlufft- und der Außenlufttemperatur sowie vom Wandaufbau bestimmt. In Abhängigkeit vom vorhandenen Wärmeschutz und von der Heizung stellen sich eine Raumtemperatur und eine raumlufftbezogene relative Luftfeuchtigkeit ein. Die Feuchtigkeitskapazität eines Raumes, die von Wärmeschutz und Heizung beeinflusst wird, muss groß genug sein, um die nutzungsspezifischen Feuchteinträge aufnehmen zu können. Das heißt, dass

- der Feuchteintrag aus der Summe aller Belastungen immer kleiner sein muss als die Feuchtigkeitsabgabe und
- die Kondenswasserabgabe immer geringer sein muss als die Verdunstungsmenge.

Vor Sanierungen mit Änderung der nutzungsbedingten Feuchteemissionen sollte daher eine bauphysikalische Planung mit einem Heizungs- und Nutzungskonzept erstellt werden, um spätere Bauschäden zu vermeiden. [FAL09]

2.4.1 Lüften und Heizen von Wohnungen

Der Feuchteintrag durch die Nutzung einer Wohnung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu zählen die Anzahl der Personen, die sich in einer Wohnung aufhalten, das Vorhandensein von Haustieren und Pflanzen sowie die alltäglichen Tätigkeiten wie Waschen, Kochen oder Schlafen. Die relative Luftfeuchtigkeit in typischen Wohnhaushalten zeigt eine jahreszeitliche Schwankung [KÜN03a], die in Abb. 16 dargestellt ist.

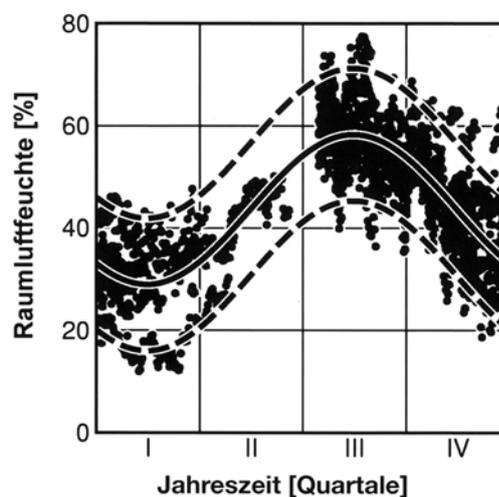


Abb. 16: Jahresganglinie der relativen Raumlufftfeuchte in Wohnungen; die durchgezogene Linie ist an die Messpunkte angepasst; die gestrichelten Linien stellen die Streubreite der Messpunkte dar; zwischen diesen beiden Linien liegen 90 % aller Messpunkte. [MOR07]

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass im ersten Quartal, also während der Heizperiode, die geringsten Luftfeuchten auftreten und im dritten Quartal, im Hoch- bis Spätsommer, die höchsten Luftfeuchten zu verzeichnen sind. In vielen anderen Situationen kann die tatsächliche Raumlufftfeuchte infolge eines schlechten Lüftungsverhaltens Extremwerte annehmen, die zu Schimmelpilzbildung führen können. Fehlerhaftes Lüften in Kombination mit ungenügendem Heizen kann Feuchte- und Schimmelschäden immer dann verursachen, wenn

- unzureichend oder überhaupt nicht gelüftet wird,
- falsch gelüftet wird,
- ungenügend geheizt wird oder
- die notwendige Hygiene bei Lüftungsanlagen fehlt.

Durch Ermittlung des Lüftungsbedarfs aus Raumlufftvolumen, mittlerer Raumluffttemperatur und Raumlufftfeuchtigkeit sowie denselben Parametern an den kritischen Bauteilanschlüssen wie Ecken und Kanten kann eine Feuchtebilanz erstellt und der hygienisch erforderliche Luftwechsel berechnet werden. In ÖNORM EN 12831 Beiblatt 1 (nationaler Anhang) ist der hygienische Luftwechsel je nach Raumwidmung mit einem festgesetzten Wert angeführt. Weiters ist angegeben, dass innenliegende Bäder und Toiletten mit einer mechanischen Entlüftung ausgestattet sein müssen. Dies wird dadurch begründet, dass in diesen Räumen die höchsten Feuchtebelastungen auftreten.

Das richtige Lüftungsverhalten sieht vor, dass Aufenthaltsräume mindestens viermal täglich für ungefähr fünf Minuten stoßgelüftet werden sollten, wobei jeweils ein vollständiger Luftaustausch stattfinden sollte. Bei Querdurchlüftung ist eine entsprechend geringere Lüftungsdauer erforderlich. Bei Küchen ist eine mechanische Entlüftung vorteilhaft. Wesentlich ist aber, dass Küchen sowie Bäder nicht querdurchlüftet werden sollten, um eine Verteilung hoher Luftfeuchten in kühlere Gänge oder Vorzimmer zu vermeiden. [KOR07], [FIS02]

Neben dem benutzerspezifischen Lüften ist der baulich bedingte Grundluftwechsel, auch Infiltrationsluftwechsel genannt, nicht außer Acht zu lassen. Die mit der gezielten Verringerung der Lüftungswärmeverluste einhergehende Reduzierung baulich bedingter Infiltration erfolgt seit den letzten Jahren vorwiegend durch den Fenstertausch in Altbauten. Dadurch wird meistens auch das Schimmelpilzproblem verschärft, da neue dichte Fenster eine Umstellung des Nutzerverhaltens in Bezug auf die Raumlüftung erfordern. Aufgrund der besseren Wärmedämmung neuer Fenster bilden sich keine oder nur geringe Mengen Kondensat an den Scheiben. Daraus könnte man auf ein gutes Raumklima schließen, doch in der Realität kann es passieren, dass sich das Kondensat an anderen Stellen, beispielsweise in Raumecken, niederschlägt. Deshalb

scheint es sinnvoll, bei einer thermischen Sanierung der Fenster gleichzeitig die Außenwand so weit thermisch zu verbessern, dass Feuchteschäden an Wandoberflächen vermieden werden.

Bei einer normalen Raumnutzung mit einer Lufttemperatur von 18 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von ungefähr 60 % ist eine Wandoberflächentemperatur unter 12 °C kritisch, da die Gefahr von Kondensation besteht. [FAL09] Dieses Beispiel gilt für eine Wandfläche mit zweidimensionaler Wärmebrückenberechnung. An dreidimensionalen Anschlüssen kommt es durchaus zu niedrigeren Temperaturen.

2.4.2 Probleme mit der Einrichtung

Nicht selten kommt es vor, dass der Nutzer sich über muffige Luft in der Wohnung wundert, schon lange bevor ein Schaden entdeckt wird. Die Ursache dafür ist meist hinter einem Kasten oder dergleichen zu finden. Möbelstücke, die an Außenwänden stehen, wirken quasi als Innendämmung und führen zu einer Absenkung der Oberflächentemperatur der Wand. Es ist daher wichtig, dass zwischen Kasten und Wand eine ständige Luftbewegung und Luftzirkulation stattfindet, um eine Entfeuchtung der Wand zu ermöglichen. Raumhohe Einbauten, die einen durchgehenden Bodenkontakt und oft auch Wandkontakt haben, können die Temperatur und den Feuchtegehalt der betreffenden Materialoberflächen erheblich negativ beeinflussen. Es entsteht ein vom Raumklima abweichendes Mikroklima, durch dessen Abschluss von der Raumluft kein Feuchteaustausch mehr möglich ist und infolge dessen die Durchfeuchtung der Oberflächen stark ansteigt. [FAL09]

2.4.3 Nutzeransprüche und Qualitätsanforderungen an Dämmstoffe

Dämmmaterialien weisen oft eine empfindliche Oberfläche auf und könnten daher vom Bauherrn als wenig benutzerfreundlich eingestuft werden. Die häufig für Innendämmungen verwendeten Kalziumsilikatplatten haben beispielsweise den Nachteil, dass sie zwar mineralisch aufgebaut sind, die Oberfläche aber sehr leicht verletzbar ist. Auch wenn eine Spachtelung mit Armierungsgewebe über die fertig versetzten Platten gezogen wird, bleibt die Oberfläche empfindlich. Sessellehnen oder Tischkanten können sehr leicht Spuren in der Dämmstoffoberfläche hinterlassen, was vorrangig zu ästhetischen Qualitätseinbußen der Wandoberfläche führt. Das Bekleben der Innenwandoberfläche mit einem diffusionsdichten Belag (z.B. einer alukaschiereten Thermotapete) ist nicht zu empfehlen, da das Austrocknen der Konstruktion in den Innenraum unterbunden würde.

Das Problem kann ohne großen Mehraufwand mit dem Errichten einer hinterlüfteten Vorsatzschale gelöst werden. Diese kann beispielsweise aus Gipskartonplatten auf einer Metallständerkonstruktion bestehen. Nachteilig erweist sich jedoch der zusätzliche Raumverlust, der damit verbunden ist. [HHJ09]

3 Vermeidung von Schäden an innengedämmten Wandkonstruktionen

3.1 Schadensbilder

In den ersten beiden Kapiteln wurden bereits einige Schäden infolge bestimmter Einflussgrößen angeführt. In vielen Fällen soll die Applikation einer Innendämmung einen möglichen Bauschaden verhindern. Leider tritt oft das Gegenteil ein, und eine Sanierung wird zu einem neuerlichen Schadensfall. Die Gründe dafür sind meist eine unzureichende Planung, ein vorher anders definiertes Nutzerverhalten oder schlichtweg die mangelnde Genauigkeit bei der Bauausführung. Die Sanierung einer Sanierung ist in den meisten Fällen mit einem enormen Kosteneinsatz verbunden und macht die eingangs angeführten Vorteile eines Innendämmsystems zunichte.

Die Beurteilung von Schäden an Innendämmsystemen wird in der Literatur oft in den Hintergrund gerückt, da die Dämmsysteme an sich und die Forschung im Bereich Innendämmung mit mittlerweile unzähligen Musterprojekten in den Mittelpunkt gestellt werden. Dennoch soll in den folgenden Abschnitten ein Überblick über die möglichen Schäden bei Innendämmsystemen anhand von Beispielen gegeben werden.

Die wesentlichen Schäden an Innendämmungen sind auf das Nutzerverhalten oder auf konstruktionsbedingte Parameter zurückzuführen. Es treten auch Mischfälle auf, die infolge nutzerbedingter und konstruktionsbedingter Einflüsse entstehen können.

3.1.1 Verformung von Bauteilen

Bei einer innenliegenden Wärmedämmung wird der gedämmte Wandquerschnitt vom Innenraumklima entkoppelt. Das hat zur Folge, dass er großen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen im Jahresverlauf ausgesetzt ist. Gegenüber dem Ursprungszustand kommt es zu thermisch und hygrisch bedingten Verformungen, die vor allem während der kalten Jahreszeit zu Schäden führen können. Es handelt sich hauptsächlich um Rissbildung im Bereich von Bauteilanschlüssen oder bei Übergängen von unterschiedlichen Materialien. [OST07]

Die Problematik der Rissbildung kann speziell bei einem stumpfen Anschluss einer Innendämmung an einen Nachbarbauteil schlagend werden, da sich undichte Bauteilanschlüsse auf die Funktionstüchtigkeit der Dämmung an sich auswirken. Es besteht die Möglichkeit von weiteren Schäden im Bereich der Innendämmung, beispielsweise einer Hinterströmung der Dämmebene durch einen aufgrund von Verformungen entstandenen Riss im Bauteilanschluss. Auch eine temperaturbedingte Setzung der Dämmebene und eine daraus resultierende Öffnung einer Fuge im Deckenbereich bietet weiteres Schadenspotential.

Risse und Fugen sind grundsätzlich als Eintrittspforten für Feuchte anzusehen und sollten so bald wie möglich nach dem Erkennen durch den Nutzer oder den Ingenieur inspiziert und auf Folgeschäden untersucht werden. In weiterer Folge sollten sie verschlossen werden, um Folgeschäden zu vermeiden.

3.1.2 Frostschäden, Wasserschäden und ihre Folgen

Unabhängig vom Vorhandensein einer Innendämmung sind historische Fassaden aus Naturstein, Sichtziegelmauerwerk oder verputzte Fassaden mit Gesimsen und Stuckverzierungen durch Frost-Tau-Wechsel stark gefährdet. Aufgrund der vielen Möglichkeiten des Wassereintritts in die Fassade steigt das Gefährdungspotential bei Schlagregenbeanspruchung noch weiter an. Frostschäden sind im Wesentlichen an den Abplatzungen von Verputz oder Mauerwerk zu erkennen. Dabei führt meistens nicht ein einzelnes Frostereignis, sondern der häufige Wechsel zwischen den Frost- und Tauperioden zu einem Schaden. Abhilfe bietet eine Fassadenhydrophobierung, wie sie bereits in Abschnitt 2.1.3 besprochen wurde.

Bei innengedämmten Außenwänden verlagern sich die frostgefährdeten Schichten von der Fassade in das Wandinnere. Der Temperaturabfall im Mauerwerk, bedingt durch die Applikation der Innendämmung, kann so stark ausfallen, dass bei langen Kälteperioden die Frostgrenze bis an die Dämmschicht nach innen wandert. Der gesamte tragende Wandaufbau ist dann gefroren und birgt Gefahren für Zu- und Abwasserleitungen. Vor allem in alten Gebäuden, in denen durchwegs noch Bleirohre verlegt sind, kann es sehr schnell zu einem Haarriss infolge von Frosteinwirkung auf die Wasserleitungsrohre kommen. Der auftretende Schaden wird erst bemerkt, wenn bereits große Teile des Wandquerschnitts inklusive der Innendämmung wassergesättigt sind. Außenwände von ehemaligen Gang-WCs sowie von Küchen und Bädern, in denen meist die Wasserleitungen verlaufen, sind an der Innenoberfläche oft mit Fliesen verkleidet. Dadurch bleibt der Schaden für lange Zeit unbemerkt.

Auch bei innengedämmten Außenwänden, die keine Wasserleitungen führen, kann es zu Schäden infolge Frosteinwirkung im Wandinneren kommen. Sinkt die Außenlufttemperatur, kann davon ausgegangen werden, dass einerseits aufgrund des Nutzerverhaltens die Raumluftfeuchte leicht ansteigt, andererseits die kritische Oberflächentemperatur an der Wand absinkt. Parallel dazu steigt die Gefahr von Tauwasserbildung hinter der Innendämmung an. Gleichzeitig ist die Austrocknung nach außen unterbunden, da die Feuchtigkeit gefriert, sobald sie in den Frostbereich gelangt.

Abhilfe kann eine kapillaraktive Innendämmung (siehe Abschnitt 3.3) schaffen, die anfallendes Tauwasser im Dämmkörper verteilt und wieder nach innen abgibt. Außerdem ist sie aufgrund ihrer hohen Porosität nahezu frostbeständig.

3.1.3 Schimmelpilzbildung in Wohnräumen

In den Abschnitten des Kapitels 2 der vorliegenden Arbeit wurden die Einflüsse und Problemstellen, die zur Schimmelpilzbildung an Bauteilen führen können, erläutert. Die Beurteilung von Feuchteschäden ist oft sehr schwierig, da diese nicht immer offensichtlich sind. Neben den visuell erkennbaren Feuchte- oder Schimmelflecken sowie sichtbaren Materialschädigungen treten auch häufig versteckte Schäden auf. Diese sind durch entsprechenden Schimmelgeruch, durch erhöhte Bauteilfeuchte oder mittels Laboruntersuchungen von Materialproben zu erkennen.

3.1.3.1 Wachstumsvoraussetzungen für Schimmelpilze

Die Kombination aus Feuchteeinwirkung und einem bestimmten Temperaturbereich stellt die Grundlage für ein mikrobielles Klima dar. Außerdem muss ein Nährboden vorhanden sein, der das Schimmelpilzwachstum fördert. Falsches Lüftungs- und Heizverhalten sowie eine mangelnde Wohnhygiene bieten die besten Voraussetzungen dafür. [KOR07] In Tab. 3 sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf das Wachstum von Mikroorganismen dargestellt.

Tab. 3: Wesentliche Einflussfaktoren für das Auskeimen und das Wachstum von Schimmelpilzen mit Angaben des minimalen und maximalen Wachstumsbereichs [SED03]

Einflussgröße	Parameter	Einheit	Wachstumsbereich		Bemerkungen
			minimal	maximal	
Temperatur	Temperatur an der Bauteiloberfläche	°C	-8	60	hängt von der Pilzart und dem Lebensstadium (Sporenkeimung oder Myzelwachstum) ab
Feuchte	relative Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche	%	70	100	
Substrat	Nährstoffe und Salzgehalt	–	–	–	auch in Staubablagerungen können Nährstoffe gefunden werden
Milieu	pH-Wert der Oberfläche	–	2	11	
Zeit	z.B. Stunden pro Tag	h/d	1	–	je nach Temperatur und Feuchte
Atmosphäre	Sauerstoffgehalt	%	0,25		immer vorhanden

Im Folgenden werden die wesentlichen Einflussfaktoren näher erklärt:

- **Temperatur**

Der Temperaturbereich, in dem Pilzsporen gedeihen können, ist sehr weit gefächert. Da im Inneren von Baukonstruktionen oder an Innenoberflächen die Temperaturen in der Regel zwischen 0 °C und 30 °C liegen, wird sich nie eine letale Wirkung der Temperatur auf Schimmelpilze einstellen. Die Geschwindigkeit des Myzelwachstums ist hingegen massiv von der Umgebungstemperatur abhängig. Oft kann eine geringe Temperaturdifferenz von wenigen Kelvin darüber entscheiden, ob ein Wachstum einer bestimmten Pilzspezies stattfindet oder nicht.

- **Feuchte**

Ein entscheidendes Kriterium für das Wachstum von Mikroorganismen ist die Feuchtigkeit, die der Pilz sowohl aus dem Substrat als auch aus der Luft in Form von Wasser bzw. Wasserdampf entnehmen kann. Die Mechanismen des Feuchtehaushalts von porösen Materialien wurden bereits in Abschnitt 1.3.2 ausführlich besprochen. Maßgeblich für das Schimmelpilzwachstum ist die relative Luftfeuchte an der Materialoberfläche. Die Feuchtegrenze, unterhalb derer kein Wachstum von Schimmelpilzen in Gebäuden stattfindet, liegt bei ca. 70 % relativer Luftfeuchte. Die Wahrscheinlichkeit für ein Pilzwachstum steigt mit zunehmendem Feuchtegehalt an, wobei der Optimalbereich bei 90 % bis 96 % liegt. Im flüssigen Wasser, also bei Tauwasserausfall, finden nur sehr wenige Schimmelpilze ausreichende Lebensbedingungen.

- **Kombination von Temperatur und Feuchte**

Die Überlagerung der Einflüsse von Temperatur und relativer Luftfeuchte zeigen die wahren Wachstumsbereiche von Schimmelpilzen. Der in Abb. 17 dargestellte Wachstumsbereich wird mit einer Kurve abgegrenzt, unter der Bedingungen vorherrschen, die weder Sporenkeimung noch Sporenwachstum zulassen. Die Darstellung von Auskeimzeiten bzw. Wachstumsraten in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte werden als Isoplethensystem bezeichnet. Neben Sedlbauer [SED03] hat sich v.a. Viitanen [VIIT97], [VIIT97a] ausführlich mit dem Einfluss der Temperatur- und Feuchtebedingungen auf das Schimmelpilzwachstum beschäftigt.

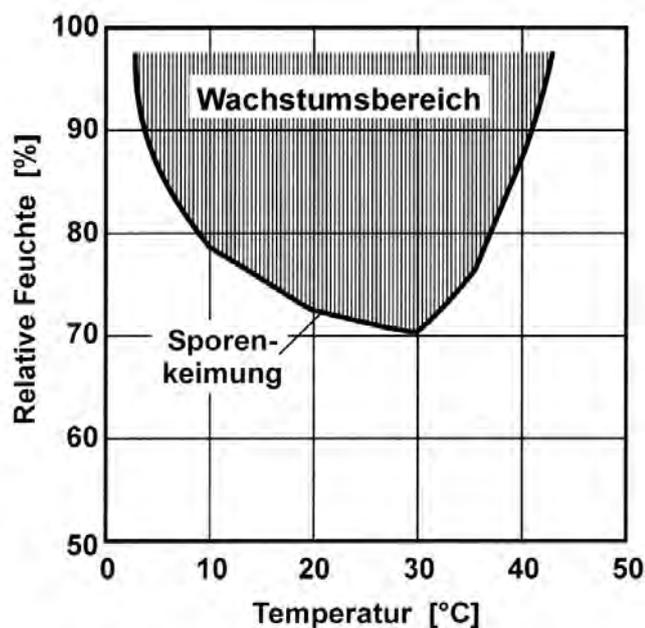


Abb. 17: Schematische Darstellung des Wachstumsbereichs für Schimmelpilze in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte [SED03]

- **Substrat**

Der Nährstoffgehalt des Materials, auf dem der Schimmelpilz wächst, ist neben Temperatur und Feuchtigkeit die wichtigste Einflussgröße auf das Schimmelpilzwachstum. Baustoffe sind für gewöhnlich nicht sehr nährstoffreiche Substratgründe, doch sind sie oft mit Verunreinigungen oder organischen Substanzen beschichtet. Manchmal reichen geringe Mengen an organischen Zusätzen, wie beispielsweise in Mineralputzen, aus, um ein mikrobiologisches Wachstum zu ermöglichen. Auch Verschmutzungen wie Staub und Fette bieten genug Nährstoffe für ein Schimmelpilzwachstum an Bauteiloberflächen. Daher sind Wohnhygiene sowie Lüftungs- und Heizverhalten wesentliche Kriterien bei der Beurteilung und bei der Vorhersage von Schimmelpilzschäden in Wohngebäuden.

- **Zeit**

Temperatur und relative Luftfeuchte unterliegen regelmäßigen Schwankungen. Daher ist es enorm wichtig, angeben zu können, wie lang und wie häufig ein bestimmter Bauteil einer Feuchtebelastung ausgesetzt sein muss, bevor eine Schimmelpilzbildung auftritt. Letztlich ist diese Zeitdauer materialabhängig und nur durch Versuche unter stationären Bedingungen im Labor eindeutig feststellbar.

Auf die weiteren in Tab. 3 angeführten Einflussfaktoren wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, sondern auf Sedlbauer [SED03] verwiesen.

3.1.3.2 Vorhersagemodelle für Schimmelpilzwachstum

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Entwicklung von Schimmelpilzwachstum vorherzusagen. Die Schwierigkeiten bei der Vorhersage bestehen einerseits darin, einen instationären Feuchteverlauf in Bauteilen hinsichtlich der Schimmelpilzbildung zu beurteilen, und andererseits eine Kategorisierung der einzelnen Schimmelpilze vorzunehmen. Ein mögliches Vorhersagemodell stützt sich auf die Bewertung der „Time of Wetness“ (TOW). Sie bezeichnet die Anzahl der Stunden hoher relativer Feuchte pro Tag, bezogen auf 24 Stunden. Dabei wird angenommen, dass Schimmelpilzwachstum auftritt, wenn ein gewisser Grenzwert, angegeben in Stunden pro Tag, mit einer relativen Luftfeuchte von beispielsweise 80 % überschritten wird.

Ein anderes Modell vergleicht die vorhandenen Oberflächentemperaturen von Bauteilen mit den Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen. Dieses System, genannt ESP-r (Environmental Systems Performance research), beruht auf sechs Klassen von Schimmelpilzen mit unterschiedlichen Feuchtegrenzen von stark xerophil (Trockenheit liebend) bis stark hydrophil (Feuchte liebend). Die Grenzkurven sind in einem Isoplethendiagramm dargestellt. Überschreitet ein errechneter oder gemessener Klimawert eine dieser Grenzkurven, wird dies als Wachstum der entsprechenden Pilzart gewertet.

Ein weiteres Vorhersagemodell wurde von Viitanen [VIIT96] zur Beurteilung von Schimmelpilzwachstum an Fichten- und Kiefernholz aufgestellt. Dabei werden Proben aus den genannten Hölzern im Labor untersucht und einem sogenannten Mould-Index zugeordnet. Das Pilzwachstum wird in sieben Klassen eingeteilt, wobei der Mould-Index in Abhängigkeit von der prozentuellen Flächenbelegung durch Schimmelwachstum angegeben wird.

Beim Isoplethenmodell werden Temperatur und relative Feuchte auf der Bauteiloberfläche als Mikroklima-Randbedingungen in Form von Stundenwerten in die Isoplethensysteme eingetragen. Liegen die Wachstumsbedingungen für eine bestimmte Zeitdauer über der sogenannten LIM-Kurve (Lowest Isopleth for Mould), kann es je nach Substratgruppe zu Schimmelpilzaktivität kommen. Allerdings kann durch dieses Modell die Austrocknung bzw. das Absterben der Sporen in Trockenperioden nicht berücksichtigt werden. Daher sollte dieses Verfahren nie über längere Zeiträume, wie z.B. eine gesamte Heizperiode, angewendet werden. Denn bei kurzzeitig hohen Feuchten, beispielsweise beim Duschen oder Wäschetrocknen, kann eine Schimmelpilzbildung immer „erreicht“ werden. [WTA05]

Die angeführten Vorhersagemodelle werden bei Sedlbauer [SED01], [SED03], bei Viitanen [VIIT96] und im WTA-Merkblatt 6-3-05 [WTA05] genauer beschrieben.

3.1.3.3 Typische Schadensfälle mit Schimmelpilzwachstum

Schäden in Verbindung mit Schimmelpilzwachstum haben meist konstruktive oder nutzerbedingte Ursachen. Wie in den vorigen Abschnitten erwähnt, hängt das Auftreten von Schimmelpilzen auf der Raumseite von Bauteilen immer von der Oberflächentemperatur bzw. der relativen Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche ab. Diese beiden Parameter werden wiederum vom Wärmedurchgang, eventuellen Wärmebrücken und den Wärmeübergangswiderständen sowie den hygrothermischen Verhältnissen im Raum beeinflusst.

Speziell bei Wandkonstruktionen mit nachträglich angebrachter Innendämmung kann es im Bereich von Wärmebrücken zu Schadensbildern mit Schimmelpilzwachstum kommen. Die Innendämmung verstärkt eine bestehende Wärmebrücke dahingehend, dass die Oberflächentemperatur an Bauteilanschlüssen kritische Werte annimmt, wenn neben der Dämmung keine Begleitmaßnahmen ergriffen werden. Weiters können Schlagregenbeanspruchung und aufsteigende Feuchtigkeit in Kombination mit einer Innendämmung und dem damit einhergehenden verminderten Austrocknungsvermögen zu Schimmelpilzwachstum führen.

Nutzerbedingte Schadensfälle sind durch erhöhte Feuchteproduktion und mangelndes Lüftungsverhalten begründet. Vor allem Feuchtespitzen, wie beispielsweise Duschen oder Wäschetrocknen, können die Oberflächenfeuchte an Konstruktionen in einen kritischen Bereich steigen lassen. [LOR05]

3.1.4 Biokorrosion an Fassaden

Die auf Außenbauteilen vorkommenden Mikroorganismen zeichnen sich durch sehr kleine Sporen und Zellverbände aus, die in Luft und im Wasser transportiert werden. Beispielsweise können Algen sehr schnell und effektiv Wasser aufnehmen, weisen aber keinen nennenswerten Verdunstungsschutz auf. Daher müssen sie, um überleben zu können, über eine starke Austrocknungstoleranz verfügen. Das wesentliche Merkmal von Algen ist die Photosynthese. Durch diese autotrophe Ernährungsweise sind sie nicht auf Nährböden angewiesen und können daher nahezu überall überleben. [SED10]

Mikrobieller Bewuchs an Fassaden ist ein Indiz dafür, dass zumindest gelegentlich Oberflächenfeuchtigkeit an diesen Wachstumsstellen auftritt. In Abhängigkeit von der Wandkonstruktion können verschiedene Gründe dafür vorliegen. Bei Fassaden mit Wärmedämmverbundsystemen, aber auch bei ungedämmten monolithischen Fassaden kann es durch kosmische Abstrahlung zu Tauwasserbildung an der Wandoberfläche kommen. In klaren Sommernächten können beträchtliche Feuchtigkeitsmengen auskondensieren, die bei regelmäßiger Befeuchtung der Fassade ein Algenwachstum hervorrufen. Eine andere Ursache für Biokorrosion stellen Leckagen in Dachrinnen oder Regenabfallrohren dar, wie in der folgenden Abbildung ersichtlich.



Abb. 18: Biokorrosion an einer Fassadenkante infolge einer undichten oder falsch geneigten Dachrinne

Der mikrobielle Bewuchs ist in diesem Beispiel ein Indikator für das Auftreten regelmäßiger Feuchtebelastungen an der Fassadenoberfläche. In manchen Fällen kann damit auch eine Durchfeuchtung des Mauerwerks einhergehen. Diese muss vor dem Anbringen einer Innen-

dämmung untersucht und gegebenenfalls saniert werden. Die innenseitige Dämmung von nassem Mauerwerk führt unweigerlich zu Schimmelpilzschäden im Wandinneren. Es handelt sich dabei um verdeckte Schäden, die lange nicht erkannt werden und dadurch ein großes Schadenspotential darstellen.

3.2 Feuchtemanagement

Die Feuchtigkeit spielt im Hochbau, vor allem in der Bausanierung, eine wesentliche Rolle. In den letzten Jahren erkannte man, dass die Baufeuchte ein sehr komplexes Themengebiet der Bauphysik darstellt. Früher war man der Meinung, dass dampfdichte Sperrschichten eine sichere Lösung für Bauschäden infolge Feuchtigkeitseinwirkung darstellten. Doch viele sanierte Objekte, die ein zweites Mal zu Schadensfällen wurden, zeigten, dass nicht zuletzt durch den Zusammenhang von Feuchte- und Temperaturbeanspruchung eine Sperrschicht zu weiteren Schadensfällen führen kann.

Es stellte sich heraus, dass der Einsatz von dampfdichten Sperrschichten an bewitterten, innen gedämmten Außenwandkonstruktionen zu vermehrten Feuchteschäden führt. Viele Bauschäden sind auf das Versagen solcher Sperrschichten aufgrund von Ausführungsmängeln oder ungenügender Dauerhaftigkeit zurückzuführen. Statt die hermetische Abdichtung zu perfektionieren, konzentriert sich der moderne Feuchteschutz deshalb auf das Feuchtemanagement. Das heißt, dass ein begrenzter Feuchteeintrag hingenommen wird, wenn anschließend eine ausreichend rasche Rücktrocknung sichergestellt werden kann. Die Feuchtespeicherfähigkeit und die Feuchteresistenz der beteiligten Materialien spielen dabei eine wesentliche Rolle, da dies die ausschlaggebenden Parameter für den zulässigen Feuchteeintrag sind.

Der Grundgedanke des Feuchtemanagements besteht darin, dass Feuchtigkeit, die während einer Tauperiode in einem Bauteil kondensiert, in der nächsten Austrocknungsperiode vollständig abtrocknen kann. Betrachtet man einen Jahreszyklus, so muss beispielsweise das im Winter anfallende Tauwasser in den Sommermonaten wieder völlig austrocknen können. Ebenso muss Niederschlagswasser, das durch ein Schlagregenereignis in die Fassade eingetragen wird, während der nächsten Trockenperiode wieder abgegeben werden, ohne zuvor Materialschäden oder Schimmelpilzwachstum hervorzurufen. Um das Feuchtemanagement bei Innendämmsystemen gezielt einsetzen zu können, ist die Planung auf hygrothermische Simulationsmethoden angewiesen. Aufgrund der Einplanung eines hohen Austrocknungspotentials weisen simulierte Konstruktionen eine erhöhte Feuchteschadenstoleranz gegenüber Ausführungsmängeln oder alterungsbedingten Eigenschaftsänderungen auf. [KÜN03]

3.3 Kapillaraktive Innendämmung

3.3.1 Grundlagen und Funktionsweise einer kapillaraktiven Innendämmung

Die Fähigkeit, Wasser kurzzeitig aufzunehmen und bei Situationen wie Schlagregenbelastung oder Kondensatbildung eine kritische Durchfeuchtung infolge von Diffusion zu vermeiden, wird als hygroskopische Speicherfähigkeit bezeichnet. Kapillaraktive Baustoffe sorgen für den Abtransport von Feuchtigkeit innerhalb der Konstruktion. Baustoffe, die hygroskopische und kapillaraktive Eigenschaften vereinen, sind unter anderem Ziegel, Gips, Holzfaserwerkstoffe, Lehm oder Kalziumsilikat-Platten. Letztere weisen die mit Abstand am stärksten ausgeprägten Eigenschaften einer kapillaraktiven Dämmung auf. Bei Konstruktionen mit einer kapillaraktiven Innendämmung ist es besonders wichtig, dass die Bestandsoberfläche keine dampfsperrende Schicht aufweist, da ansonsten die Funktionalität des kapillaraktiven Dämmstoffes nicht gegeben ist. [WIK10]

Der grundsätzliche Funktionsmechanismus einer kapillaraktiven Innendämmung ist in Abb. 19 dargestellt. Das Ziel des Einsatzes dieser Materialien besteht darin, dass anfallendes Tauwasser kapillar zum Innenraum hin zurückgeführt wird. Während einer typischen Wintersituation erfolgt in einem kapillaraktiven Dämmstoff eine Überlagerung von Flüssigwasser- und Dampftransport im Porenraum (siehe dazu Abschnitt 1.3.2). Aufgrund des Ausgleichsbestrebens der Sorbatschicht in den Porenräumen findet ein Flüssigtransport nach innen statt, der entgegen dem Diffusionsstrom gerichtet ist. Sobald sich in der Konstruktion Kondensat bildet, setzt zusätzlich zu den Dampfströmen der Flüssigwassertransport ein. Dadurch wird das anfallende Tauwasser großflächig und räumlich im Dämmmaterial verteilt. Dies führt zu einer Verminderung der lokalen Belastung der Konstruktion. Vor allem bei Feuchtebelastungen infolge Schlagregen, wo in kurzer Zeit beträchtliche Wassermengen in die Wandkonstruktion eindringen können, ist ein rascher Abtransport der Feuchtigkeit hinter der Dämmung erforderlich. Durch einen verstärkten Flüssigwassertransport zur raumseitigen Oberfläche kann die Schicht zwischen Bestandsmauerwerk und Innendämmung schnell austrocknen. Eine beschleunigte Verdunstung an der Oberfläche unterstützt diesen Prozess zusätzlich. Voraussetzung für das Funktionieren dieses Dämmsystems ist die vollkommen diffusionsoffene Bauweise. Eine Innendämmung aus einem kapillaraktiven Dämmstoff darf daher nicht durch eine Dampfbremse beeinträchtigt werden. [SED05], [RUI10], [ENG10], [GEB10]

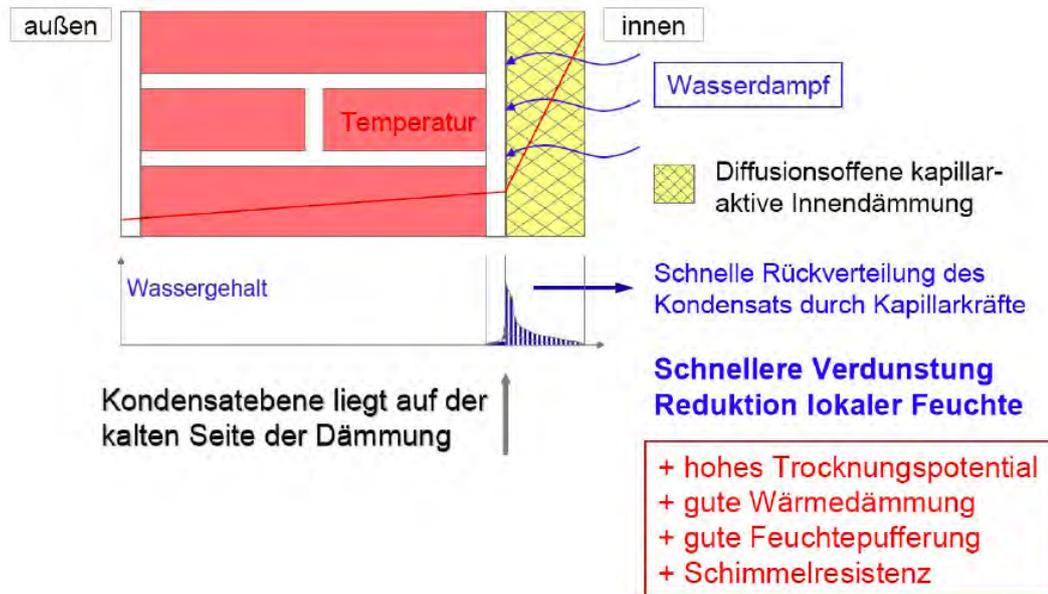


Abb. 19: Wirkprinzip einer kapillaraktiven Innendämmung [PLA08]

Im Zuge verschiedenster Messungen in Testhäusern [PLA08], [RUI10], [SED05], [HÄU99], [HÄU06], [GRU99] konnte nachgewiesen werden, dass die Kapillarität eines Dämmstoffes die im Winter anfallende Kondensatmenge reduzieren kann. Die Wirksamkeit der Kapillaraktivität im Vergleich zu einer nicht kapillaraktiven Innendämmung ist in Abb. 20 veranschaulicht. Mittels eines Simulationsprogrammes wurden Berechnungen an einer innen gedämmten Ziegelwand unter natürlichen Klimabedingungen für Kalziumsilikat und für ein gleich gut wärmedämmendes Material ohne kapillare Leitfähigkeit durchgeführt. [RUI10]

Der Unterschied zwischen den anfallenden Kondensatmengen ist deutlich zu erkennen, wobei auffällt, dass die kapillare Leitfähigkeit die Austrocknungsdauer verkürzt.

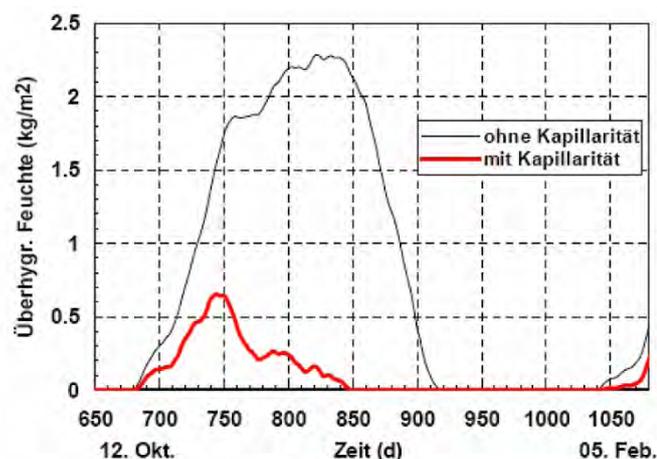


Abb. 20: Verlauf der Kondensatmenge während einer Kälteperiode; Simulationsberechnung mit und ohne Berücksichtigung der kapillaren Eigenschaften der Wärmedämmung [RUI10]

Bei der Herstellung einer kapillaraktiven Innendämmung aus Kalziumsilikatplatten ist auf eine qualitativ einwandfreie Verarbeitung des Dämmsystems, bestehend aus den Dämmplatten und dem Klebemörtel, zu achten. Vor allem der vollflächige Anschluss an die bestehende Bausubstanz ist sehr wichtig. Wie bereits erwähnt, sollte der Klebemörtel mit einer Zahnpachtel vollflächig aufgetragen werden, um Hohlräume zwischen Dämmung und Bestandswand zu vermeiden. In diesen möglichen Luftspalten kann sich Kondensat niederschlagen, das nicht von der Dämmung aufgesaugt wird. Die vollflächige Verklebung sollte in einer Ausschreibung bzw. in den Verarbeitungsrichtlinien des Herstellers festgesetzt werden, um eine Qualitätssicherung zu gewährleisten und eine mögliche Schadenshaftung eindeutig zuweisen zu können.

3.3.2 Materialeigenschaften von kapillaraktiven Innendämmungen

Wenn von einer kapillaraktiven Innendämmung die Rede ist, handelt es sich meist um Dämmplatten aus Kalziumsilikat. Sie bestehen aus Kalziumoxid, Siliziumoxid, Zellulosefasern und Wasser. Kalziumsilikat wird hauptsächlich als Isolationsmaterial in Hochtemperaturbereichen eingesetzt. Wegen seiner mechanischen, feuchte- und wärmetechnischen Eigenschaften ist es auch als Dämmstoff, speziell für die nachträgliche Innendämmung, geeignet. Neben den wesentlichen Vorteilen, der hohen Alkalität mit einem pH-Wert von 10, wodurch der Widerstand gegen Schimmelpilzwachstum stark erhöht wird, und der enormen kapillaren Saugfähigkeit, hat Kalziumsilikat den Nachteil einer vergleichsweise schlechten Wärmeleitfähigkeit. Das Wärmedämmvermögen des Rohmaterials liegt bei $\lambda = 0,065$ bis $0,1$ W/mK. Durch Optimierung der hygrothermischen Eigenschaften können insbesondere

- eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit,
- eine höhere Kapillaraktivität und
- günstigere Feuchtespeichereigenschaften im Bereich von 40 bis 80 % relativer Luftfeuchte erreicht werden. [RUI10], [ENG10], [HÖL07]

Dämmstoffe aus Mineralschäumen weisen ein besseres Wärmedämmvermögen als Kalziumsilikatplatten auf. Der λ -Wert liegt im Durchschnitt bei $0,045$ W/mK. Dadurch erreicht man bei gleicher Materialstärke einen höheren Dämmwert. Weiters sind die Material- und Produktionskosten von Mineralschaumplatten geringer als jene von Kalziumsilikatplatten. Beide Systeme sind diffusionsoffen mit μ -Werten kleiner fünf. Das große Manko der Mineralschaumplatten besteht in der eingeschränkten kapillaren Saugfähigkeit. Daher eignen sie sich nicht als diffusionsoffenes Dämmsystem. [CAS10]

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Versuche unternommen, die Vorteile des Kalziumsilikatdämmstoffes mit einem anderen mineralischen Dämmstoff niedrigerer Wärmeleitfähigkeit

zu kombinieren. Eine mögliche Verbesserungsvariante besteht darin, einen geschichteten Dämmstoff herzustellen. Dabei wird eine Kalziumsilikatplatte mit einer Perliteplatte kombiniert. Bei hygrothermischen Simulationen zeigt sich, dass der geschichtete Aufbau die Dämmeigenschaften der Platte bzw. des entstandenen Sandwichelements maßgeblich verbessert. Weiters stellt sich heraus, dass die Dicke der sehr kapillaraktiven Kalziumsilikatplatte und deren Anordnung entscheidend sind. Der Kalziumsilikatdämmstoff muss zur Außenwand hin angeordnet sein. [HOL09], [SCH02]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass kapillaraktive Dämmstoffe einen wesentlichen Beitrag zum Feuchtemanagement bei Innendämmsystemen leisten. Mit diesen Dämmmaterialien werden Konstruktionen schadenstoleranter und können Spitzenwerte in der Feuchtebelastung besser abfedern.

4 Beurteilungskriterien für Innendämmsysteme

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Möglichkeiten und die Einflussparameter von Innendämmsystemen ausführlich besprochen. Soll nun nach Abwägung sämtlicher Vor- und Nachteile eine Innendämmung ausgeführt werden, müssen im Zuge der Planung zahlreiche Fragen geklärt und das geeignetste Innendämmsystem ausgewählt werden. Dabei gilt es, die Einflussparameter im jeweiligen Fall möglichst objektiv zu beurteilen und eine individuelle Bewertung der Gegebenheiten vorzunehmen.

Die Bewertungskriterien dürfen dabei nicht isoliert voneinander betrachtet werden, sondern die einzelnen Parameter stehen miteinander in einem mehr oder weniger engen Zusammenhang. Die folgende Abbildung soll diese Tatsache veranschaulichen. Jedes Kriterium kann unter bestimmten, im Einzelfall zu ermittelnden Umständen, einen Ausschließungsgrund für eine oder mehrere Konstruktionsvarianten darstellen.

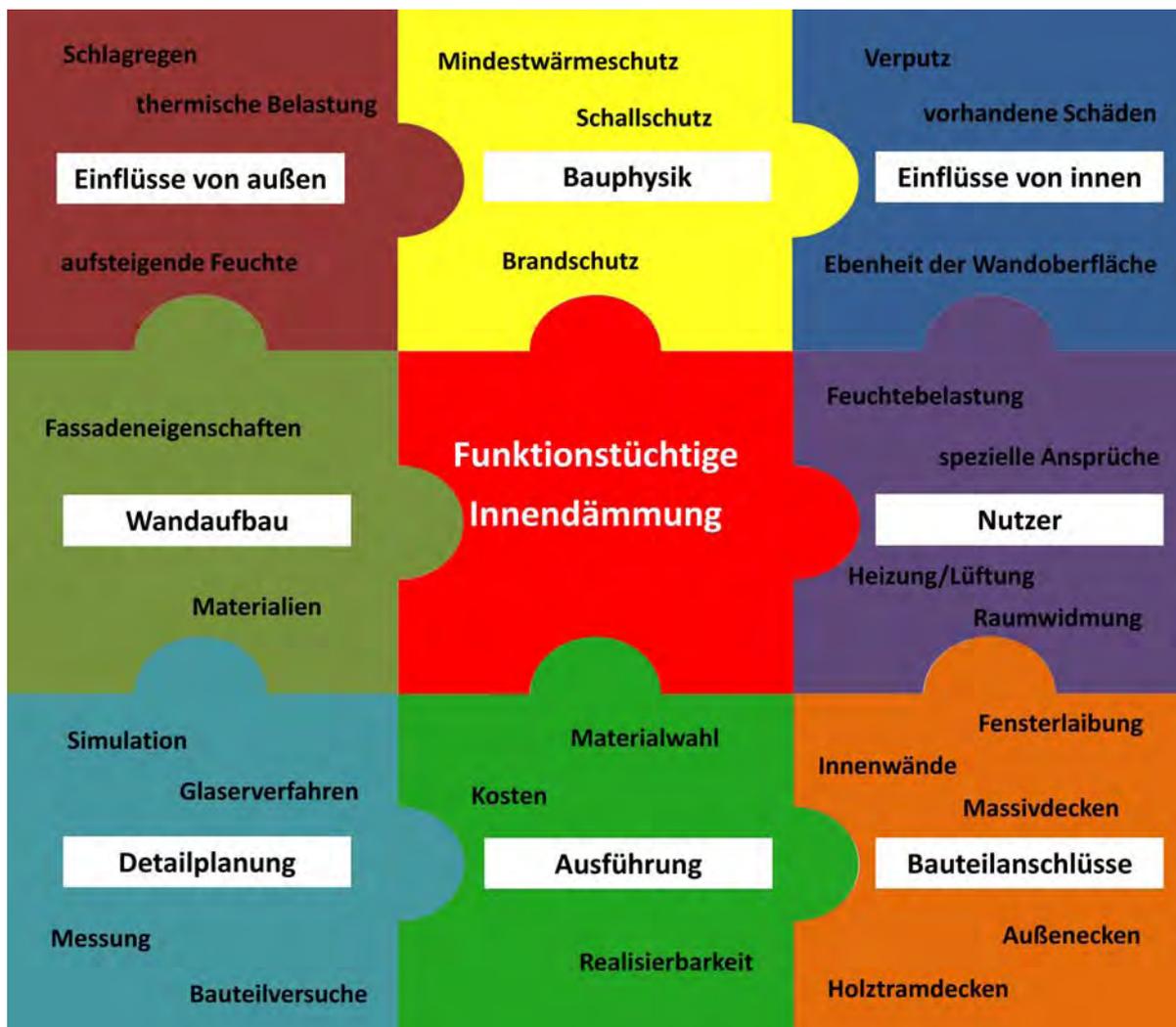


Abb. 21: Einflussfaktoren für die Auswahl von Innendämmsystemen

Aus den genannten Gründen ist keine allgemeine Bewertung der Bestandskonstruktion im Zusammenhang mit einer Innendämmung möglich, da im Einzelfall die verschiedenen Parameter sehr unterschiedlich gewichtet sein können. Manche Details, die bei einem Projekt eine große Rolle spielen, können bei einem anderen unwesentlich und daher zu vernachlässigen sein. Auch wenn alle Entscheidungskriterien für ein bestimmtes System zu sprechen scheinen, kann es sein, dass ein Detail die Applikation des geplanten Innendämmsystems unmöglich macht. Es ist daher nicht zielführend, die Frage nach einem geeigneten System zu stellen. Vielmehr sollten im Zuge der Bestandsaufnahme und der Bewertung der Gegebenheiten die unterschiedlichen Möglichkeiten nach dem Ausschlussprinzip behandelt werden. Hat man einzelne Systeme – aus welchen Gründen auch immer – ausgeschlossen, kann man unter den verbleibenden das im speziellen Fall beste auswählen. Dabei spielen neben bauphysikalischen Aspekten, wie erforderlicher Mindestwärmeschutz, Schallschutz und Brandschutz, letztlich auch die Realisierbarkeit und der finanzielle Aufwand eine Rolle, z.B. wenn eine starke Schlagregenbeanspruchung kostspielige Sanierungsarbeiten an der Fassade erfordert.

Um die Planung einer Innendämmmaßnahme zu erleichtern, bietet sich die Erstellung einer Bewertungsmatrix an. Diese enthält die Fragen, die vor der Entscheidung für ein Innendämmsystem unbedingt beantwortet werden müssen. Diese Bewertungsmatrix in Form eines Fragenkatalogs soll eine Hilfestellung für den Planer/die Planerin darstellen. Er/Sie hat jedoch im Einzelfall zu klären, welche Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen und wie diese zu gewichten sind. Die Letztentscheidung für ein Innendämmsystem obliegt in jedem Fall dem Planer/der Planerin, da – wie bereits erwähnt – keine allgemeingültige Bewertung für jede mögliche Situation vorgegeben werden kann.

Im Folgenden wird ein Vorschlag für einen Fragenkatalog zur Bestandsaufnahme vorgestellt. Dabei stehen in der linken Spalte jeweils grundlegende Fragestellungen, die mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden können. Meist sind jedoch zur genauen Analyse des Bestandes tiefergehende Fragestellungen erforderlich, daher müssen die in der rechten Spalte angeführten Detailfragen geklärt werden. Letztlich entscheidet der Planer/die Planerin, welche Gewichtung der jeweilige Parameter im Einzelfall hat.

Tab. 4: Fragenkatalog zur Bestandsaufnahme auf Basis von Einflussgrößen – Teil 1

Einflüsse	Grundlegende Fragestellungen	Prüfmöglichkeit			G	Grenzwert
		J	N	P		
von außen	Gibt es eine Schlagregenbelastung? (vgl. 2.1.1)					Welche Schlagregengruppe liegt vor? Welche Seite wird am stärksten beansprucht? Ist ein funktionstüchtiger Schlagregenschutz vorhanden?
	Besteht die Gefahr, dass die Fassade nur sehr langsam abtrocknet? (vgl. 2.1.2)					Kann die Fassade nach einem Schlagregeneignis schnell genug abtrocknen? Weist die Fassade Parameter auf, die den Trocknungsvorgang begünstigen: • Farbgebung • Oberflächenrauigkeit etc.
	Wurde die Fassade hydrophobiert? (vgl. 2.1.3)					Gibt es Fehlstellen in der Hydrophobierung?
	Gibt es aufsteigende Feuchtigkeit? (vgl. 2.1.4)					Handelt es sich um • ständige Feuchte oder • temporäre Feuchte?
	Kann die Fassade bei Schlagregenbelastung Feuchtigkeit aufnehmen?					Wie viel Feuchtigkeit wird aufgenommen? Was passiert damit? Sind die Folgen abschätzbar oder sogar ersichtlich?
	Gibt es solare Einstrahlung auf die Fassade? (vgl. 2.2.2.3)					Kann es zu Umkehrdiffusion kommen? Ist der Standort des Bauwerks • frei und exponiert oder • im verbauten Gebiet?
	Gibt es bestehende Schäden an der Fassade infolge Feuchteeinwirkung?					Erfolgt die Feuchteeinwirkung: • aus dem Boden • durch Schlagregen • durch Wasserschäden
	Weist die Fassade Stellen auf, an denen vermehrt Regenwasser in die Konstruktion eindringen kann?					Sind • Fugen, • Risse, • Bewuchs erkennbar?
von innen	Sind Fasadenschäden an der Innenoberfläche zu erkennen?					Gibt es • feuchten Innenputz, • Stockflecken, • Schimmelpilzwachstum, • Ablösung von Anstrich/Tapete?
	Ist die Wandoberfläche innen nicht verputzt?					Ist der Wandbildner • teilweise oder • großflächig sichtbar?
	Gibt es Hohllagen an der Innenoberfläche?					Ist die Festigkeit des Putzes für eine Beklebung mit Dämmplatten ausreichend? • Putzfestigkeit • Haftzugfestigkeit am Untergrund
	Gibt es Verunreinigungen an der Putzoberfläche?					
		Prüfmöglichkeit vorhanden?			Grenzwert vorhanden?	

Tab. 4 stellt einen Entwurf dar, wie mögliche Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Planung eines Innendämmsystems erhoben werden können. Dazu müssen zuerst die grundlegenden Fragestellungen mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden. Jede mit „ja“ abgeschlossene Frage muss auf Basis der detaillierteren Parameter weiter untersucht werden. Dabei sollte anhand von Prüf- und Messverfahren eine Bewertung der jeweiligen Einflussgröße erstellt werden. Im Vorfeld muss jedoch klargelegt werden, ob es einerseits eine (genormte) Prüfmöglich-

keit zu dieser Fragestellung gibt und ob andererseits ein Grenzwert zur eindeutigen Bestimmung der Einflussparameter existiert. Das Vorhandensein von Prüfmöglichkeiten und Grenzwerten ist ebenfalls in der Tabelle einzutragen.

Der zweite Teil des Fragenkatalogs beschäftigt sich mit konstruktiven, bauteilabhängigen und nutzerspezifischen Einflüssen auf die Innendämmkonstruktion. Dabei sind großteils keine Prüfmöglichkeiten im Sinne von Messungen möglich. Vielmehr geht es um die richtige Einschätzung des konstruktiven Bestands in Form einer detaillierten Bauaufnahme. Weiters ist eine Grundkenntnis der konstruktiven und bauphysikalischen Zusammenhänge erforderlich. Dies ist vor allem beim Einsatz von Erfahrungswerten wichtig und zeichnet deren Qualität aus.

Tab. 5: Fragenkatalog zur Bestandsaufnahme auf Basis von Einflussgrößen – Teil 2

Einflüsse	Grundlegende Fragestellungen	J	N	Detaillierte Parameter
der Konstruktion	Welche der angeführten Konstruktionsarten liegt vor?			Gibt es Feuchtigkeit im Mauerwerk und woher stammt diese? Sind Risse in der Putzoberfläche erkennbar? Sind Hohllagen durch Klopfen erkennbar oder tastbar?
	Verputztes Ziegelmauerwerk			
	Sichtziegelmauerwerk			Besteht das Ziegelmaterial aus <ul style="list-style-type: none"> • dichtem Klinker, • mitteldichtem Klinker und VMZ, • saugenden Vormauerziegeln?
	Natursteinfassade			Ist eine Vormauerung oder eine durchgehende Natursteinwand gegeben?
	Sichtfachwerkkonstruktion			Gibt es eine durchgehende Materialfuge? Wie ist die Fuge abgedichtet? Gibt es Schäden im Fugenbereich? Besteht die Ausfachung aus saugendem Material? Hat das Ausfachungsmaterial eine helle oder dunkle Farbe?
	Massivholzkonstruktion in Blockbauweise?			Gibt es Fugen, die in die Holzwand nach innen und nach unten führen? Gibt es verrottete Holzstellen?
	Ist die Wandoberfläche innen eben?			Wie können Unebenheiten eingegrenzt werden?
	Ist das Fassadenmaterial wasseraufnahmefähig?			Wie viel Wasser kann kapillar aufgenommen werden?
	Weist die Fassade einen hohen Fugenanteil auf?			Wie ist der Fugenzustand einzuschätzen? <ul style="list-style-type: none"> • Sind die Fugen in Ordnung bzw. saniert? • Ist der Fugenmörtel teilweise ausgebrochen oder ist • loser Fugenmörtel bzw. kein Fugenmörtel vorhanden?
	Ist eine sperrende Schicht im inneren Bestandsputz enthalten?			Liegt die sperrende Schicht <ul style="list-style-type: none"> • an der Oberfläche oder ist sie • im Putz eingearbeitet?
Handelt es sich um einen gipshaltigen Putz?			Kann es zu Materialunverträglichkeiten kommen?	
Ist eine Innendämmung über 5 cm Dämmstärke geplant?			Bei Dämmstärken über 5 cm ist ein/eine Fachplaner/-planerin zwingend beizuziehen!	

Einflüsse	Grundlegende Fragestellungen	J	N	Detaillierte Parameter
durch Bauteilanschlüsse	Sind Schäden am Bestand infolge Wärmebrücken erkennbar?			Welche Wärmebrücken müssen berücksichtigt werden? Welche Wärmebrücken müssen berechnet und nachgewiesen werden?
	Ist ein Innenwandanschluss vorhanden?			Ist die Wärmeleitfähigkeit der Innenwand besser als die der Außenwand? Handelt es sich um eine Wohnungstrennwand?
	Ist ein Massivdeckenanschluss vorhanden?			Welche Deckenkonstruktion liegt vor? <ul style="list-style-type: none"> • gewölbte Massivdecke • Stahlbetonplattendecke • Stahlsteindecke • Stahlbetonrippendecke mit Hohlkasten • Betonbalkendecke Ist eine Durchströmung bei Hohlkastendecken möglich?
	Ist ein Holzdeckenanschluss vorhanden?			Welche Deckenkonstruktion liegt vor? <ul style="list-style-type: none"> • Tramdecke • Dippelbaumdecke
	Gibt es Schäden im Bereich der Deckenbalkenaufleger?			Welches Ergebnis zeigt eine Untersuchung der Tramkästen?
	Kann die Dämmung bis an die Deckenbalken herangeführt werden?			Kann die Deckenkonstruktion geöffnet werden? Kann von oben bis an die Deckenbalken heran gedämmt werden?
	Sind Kastenfenster vorhanden?			Werden diese saniert?
	Sind Isolierglasfenster vorhanden oder werden welche eingebaut?			Kann eine Laibungsdämmung angebracht werden? Kann die Tiefe des Fensterbrettes konvektive Probleme bereiten? Wird die Fensternische ausgemauert? Ist ein Heizkörper unter dem Fenster vorhanden oder vorgesehen?
	Ist eine Außenecke zu einer ungedämmten, freistehenden Feuermauer vorhanden?			Wird die Feuermauer außen gedämmt? Wird das Nachbargrundstück verbaut?
Nutzerverhalten	Ist eine Nutzung als Wohnung vorgesehen? (vgl. 2.4)			Welche Widmungen bekommen die einzelnen Räume? Wo treten hohe Feuchtebelastungen der Raumluft auf?
	Gibt es nutzerspezifische Einrichtungswünsche?			Welche Möblierung schließt an die Dämmkonstruktion an? Sind Einbaukästen an Außenwänden geplant?
	Ist eine Nutzung als Veranstaltungsraum o.ä. vorgesehen?			Wie hoch ist die erwartete maximale Feuchtebelastung? Sind regelmäßig größere Menschenansammlungen zu erwarten?
	Ist eine Nutzung mit hoher Feuchtebelastung vorgesehen?			Ist eine Nutzung als <ul style="list-style-type: none"> • Gewächshaus, • Schwimmbad oder • unbeheizter Keller vorgesehen?
	Ist eine Heizungsanlage vorhanden oder vorgesehen?			Handelt es sich um einen <ul style="list-style-type: none"> • konditionierten oder • unkonditionierten Bereich?

In weiterer Folge sollte ein Maßnahmenkatalog mit den Fragestellungen verknüpft werden. Dieser kann anhand der in Tab. 4 erhobenen Prüfmöglichkeiten und Messergebnisse spezielle Maßnahmen vorschlagen. Auf diese Weise kann entweder ein Problem oder eine mit „ja“ beantwortete Fragestellung bereinigt und dadurch unwesentlich werden, oder die entsprechende Maßnahme schließt ein bestimmtes Innendämmsystem aus. Als Anhaltspunkt kann das Auswahlverfahren bzw. die Bewertung nach Šišković [SIS07] herangezogen werden. Dabei werden

verschiedene Innendämmsysteme aus konstruktiver und stofflicher Sicht miteinander verglichen und anhand unterschiedlichster Kriterien bewertet.

Ist nach Analyse aller zu beachtenden Parameter die Entscheidung für ein Innendämmsystem gefallen oder kommen mehrere Möglichkeiten in Betracht, so sollte – um die Entscheidung abzusichern – ein rechnerischer Nachweis der geplanten Konstruktion erfolgen. Die ÖNORM B 8110-2 definiert zwar nachweisfreie Außenwandkonstruktionen, darunter auch innengedämmte Bauteile, dennoch erscheint das Erbringen eines Nachweises bei Innendämmungen in jedem Fall, speziell an Detailpunkten, als sinnvoll.

Bis in die 1990er-Jahre entsprach das Glaser-Verfahren, was die hygrothermische Beurteilung von Bauteilen betraf, dem aktuellen Wissenstand. Allerdings arbeitet das Verfahren ausschließlich mit stationären Randbedingungen und vernachlässigt alle wärme- und feuchtetechnischen Speicherphänomene sowie den Feuchtetransport durch Kapillarleitung. Man versuchte jedoch, durch Überhöhen der klimatischen Randbedingungen dennoch in der Praxis verwertbare Ergebnisse zu erzielen, die weit genug auf der sicheren Seite lagen. Nach einigen Überarbeitungen wurde das Glaser-Verfahren auch in die EN ISO 13788 aufgenommen und um die Feuchteklassen erweitert, die in Abschnitt 5.4 näher behandelt werden. [KÜN08a], [WOR06]

Seit den 1990er-Jahren treten Verfahren zur instationären Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen in facheinschlägigen Publikationen auf. Bis dato gibt es jedoch keine am Markt erhältliche Software, um eine genormte hygrothermische Simulation durchführen zu können. Neben den WTA-Merkblättern 6-1 bis 6-3, die sich erstmals mit modernen Rechen- und hygrothermischen Simulationsverfahren befassten, ist seit Juli 2007 die DIN EN 15026 die maßgebliche Grundlage für die Durchführung von numerischen Simulationen. Ziel dieser Euro-norm ist es, das in die Jahre gekommene Glaser-Verfahren abzulösen. [GEB10]

Im folgenden Kapitel 5 soll anhand eines realen Beispiels untersucht werden, wie genau Simulationen die Realität abbilden können. Dabei wird eine bislang unerforschte Innendämmkonstruktion in einem Wiener Altbau, deren hygrothermisches Verhalten in den vergangenen drei Jahren messtechnisch erfasst wurde, mit Simulationen verglichen.

5 Langzeitmessung und hygrothermische Simulation

5.1 Das Gesamtprojekt im Überblick

Im Zuge der Sanierung einer Cottagevilla in Wien Währing, erbaut zwischen 1870 und 1880, sollte zur Erhöhung der Energieeffizienz und der Behaglichkeit der Erdgeschoßwohnung eine nachträgliche Wärmedämmung angebracht werden. Da das Gebäude in einer Schutzzone liegt und eine erhaltenswerte, stark gegliederte Rieselputzfassade aufweist, kam als einzige Möglichkeit eine Innendämmung in Frage. Um den Einsatz biologischer Baustoffe bei der Sanierung zu erforschen, wurde an zwei ausgewählten Außenwänden, einer im Wohnzimmer und einer im Schlafzimmer, eine Innendämmung aus Schilfdämmplatten mit Lehmverputz angebracht. Zusätzlich kamen in jedem Raum zumindest teilweise Lehmputze zum Einsatz. Die gesamten Wand- und Deckenflächen der Wohnung wurden mit diffusionsoffener Kaseinfarbe bemalt und im Badezimmer wurde eine abgehängte Deckenkonstruktion aus Lehmbauplatten errichtet.



Abb. 22: Bestandsobjekt in der Schutzzone in Wien Währing

Die Außenwände des zweigeschoßigen Gebäudes bestehen aus Vollziegelmauerwerk und weisen im Bereich des Erdgeschoßes eine Dicke von 50 cm inklusive Außen- und Innenputz auf.

Das Mauerwerk ist aus Normalformatziegeln und großteils minderwertigem, bindemittelarmem Mauermörtel hergestellt. Der Außenputz dürfte nicht mehr der Originalputz aus dem 19. Jahrhundert sein. Vermutlich handelt es sich um einen Kalkzementreibputz aus der Nachkriegszeit. Auffallend sind die groben Kieszuschlagskörner, die den Außenputz sehr brüchig machen. Der Innenputz ist teilweise sehr porös und hat vor allem in den Raumecken eine geringe Haftzugfestigkeit auf dem Ziegelmauerwerk. Aus diesem Grund wurden alle lockeren oder hohlen Putzstellen abgeschlagen. Die restlichen Putzflächen wurden von diversen Anstrichen gesäubert, bis die rohe Putzoberfläche zum Vorschein kam. In den Ecken kam ein Thermoputz zum Einsatz, wodurch die vorhandenen Wärmebrücken entschärft werden sollten. Die Putzoberfläche wurde grob abgezogen, um einen ebenen Anschluss für die Dämmplatten zu schaffen.

Die biologische Innendämmung aus nachwachsenden Rohstoffen sollte als Musterbeispiel für eine alternative, wenig erforschte Dämmmöglichkeit unter realem Nutzerverhalten erprobt werden. Während der Montage wurden an einer Versuchswand im gartenseitigen Schlafzimmer Temperatur- und Feuchtesensoren in die Konstruktion eingebaut, um in einer Langzeitmessung das Verhalten dieses Innendämmsystems zu analysieren. Das Interesse am Dämmverhalten der Schilfplatten und in weiterer Folge am Feuchteverhalten des Lehmputzes in Kombination mit den Schilfdämmplatten stand dabei im Mittelpunkt. Die erzielten Ergebnisse sind vor allem deshalb interessant, weil der Versuch nicht wie meist üblich in einem Klimaschrank, sondern unter einem nutzerbeeinflussten Klima in einem Bestandsobjekt stattfindet. Die Messapparatur wurde von Juni bis August 2007 während des Aufbaus der Innendämmkonstruktion eingebaut und es konnte bis dato eine durchgehende Erfassung der Klimadaten erfolgen. Nach bereits drei Jahren ist die Messung heute immer noch im Gang, um das Langzeitverhalten des Wandaufbaus erforschen zu können.

5.2 Charakteristika der Baustoffe Schilf und Lehm

5.2.1 Dämmmatten aus Schilf

Schilf wächst in Mitteleuropa an seichten Ufern von stehenden oder langsam fließenden Gewässern, in Österreich beispielsweise im Gebiet des Neusiedler Sees. Die Pflanzen erreichen eine Höhe von etwa 4 m und wachsen nach der Ernte innerhalb eines Jahres wieder nach. Für die Dämmstoffproduktion werden die geernteten Halme geschnitten, getrocknet und sortiert. Anschließend werden sie gebündelt und parallel zueinander in mehreren Schichten fest zusammengedrückt. Verbunden werden die Halme meist mit verzinktem Eisendraht. Zuletzt werden die entstandenen Matten besäumt und in der gewünschten Länge abgeschnitten. Die bei diesem Projekt eingesetzten Matten sind 125 cm breit (Halmlänge), 1 m lang und 5 cm dick.



Abb. 23: Schilf und Schilfdämmplatte

Schilfdämmplatten können als Dach-, Außen- oder Innen- sowie als Deckendämmung eingesetzt werden. Außerdem sind Schilfmatten sehr gute Putzträger. Sie sind nicht winddicht, jedoch alterungs- und fäulnisbeständig. Schilf weist einen hohen Silikatgehalt auf, daher quillt es nicht und saugt auch kein Wasser auf. Dennoch sollte es vor ständig einwirkender Nässe geschützt werden.

Werden Schilfmatten als Dämmung an der Innenseite von Bauteilen eingesetzt, sind die Verarbeitung und der Einbau von handwerklich erfahrenen Personen relativ einfach durchzuführen. Quer zur Faser erfolgt der Zuschnitt der Matten mittels einer Handkreissäge mit einem feinzahnigen Sägeblatt, in Längsrichtung können die Laufdrähte mit einem Seitenschneider gekürzt und mit einer Zange umgebogen werden. In Halmrichtung sind die Schilfmatten sehr bruchstabil, sie können jedoch entlang der Verdrahtung gebogen oder geknickt werden. Die Befestigung der Matten am Untergrund erfolgt im Allgemeinen durch Tellerdübel. [BRU98], [REY05]

Schilfmatten haben als Dämmmaterial und Putzträger zahlreiche Vorzüge: [HAS10]

- Umweltfreundliches Produkt aus jährlich nachwachsenden Rohstoffen
- Ökologisch positive Gesamtbilanz durch niedrigen Energieverbrauch bei der Herstellung, Anwendung und Entsorgung
- Wärme- und schalldämmende Eigenschaften
- Hohe Lebensdauer
- Unbehandeltes Naturprodukt ohne Verwendung von Chemikalien oder künstlichen Zusätzen
- Keine Faserbildung
- Wirtschaftliches System durch schnelle und einfache Bearbeitung
- Problemlose Montage durch Verdübelung der Platten am Untergrund

- Einfaches Zurechtschneiden von Pasmstücken
- Altputze können direkt überarbeitet werden
- Umweltverträgliche Entsorgung des Verschnitts und von Restmaterial durch Kompostierung bzw. Verbrennung zur Energiegewinnung

5.2.2 Eigenschaften des Baustoffes Lehm

Lehm wird schon seit Urzeiten als Baustoff verwendet, u.a. im Mauerwerks- und Festungsbau, als Ausfachung bei Holzbauten, als Mörtel, Putz, Estrich und beim Ofenbau. Die häufige Verwendung ist neben den guten bautechnischen Eigenschaften vor allem auf die Verfügbarkeit des Lehms zurückzuführen. Fast überall auf der Erde ist Lehm vorhanden und kann daher ohne großen Transportaufwand eingesetzt werden. Lehm besteht im Wesentlichen aus Ton und Sand, allerdings unterscheiden sich die Zusammensetzung und damit auch die Eigenschaften in den einzelnen Lagerstätten deutlich voneinander. Die folgende Tabelle fasst die positiven und negativen Eigenschaften des Lehms überblicksartig zusammen. [BRU98]

Tab. 6: Positive und negative Eigenschaften des Lehms

Positive bautechnische Eigenschaften	Negative bautechnische Eigenschaften
Die Verfügbarkeit von Lehm ist sehr hoch, damit sind die Transportwege im Allgemeinen gering.	Lehm schwindet stark und weist nur eine geringe Zugfestigkeit auf.
Der Energieaufwand bei der Herstellung des Baustoffes ist gering, seine Wiederverwendbarkeit bzw. Entsorgung sind problemlos.	Lehme unterscheiden sich stark in ihren Zusammensetzungen und Eigenschaften, daher müssen sie unterschiedlich aufbereitet und verarbeitet werden.
Lehm ist sehr dauerhaft, frostbeständig und unbeschränkt lagerfähig. Mit zunehmendem Alter (Nacherhärtung) der Lehmstoffe steigen die Festigkeit und Beständigkeit gegen Erosion und Durchfeuchtung an.	Lehm verliert bei starker Durchfeuchtung seine Festigkeit, daher können ungeschützte Lehmoberflächen leicht von Regen und Wind abgetragen werden.
Gute bauphysikalische Eigenschaften: Lehm kann schnell Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben, er weist eine geringe Gleichgewichtsfeuchte (2,5 – 4,5 %) und eine gute Diffusionsfähigkeit auf. Außerdem ist er nicht brennbar, selbst wenn ihm pflanzliche Zusatzstoffe beigemischt sind.	
Lehm ist geruchsbindend und für den Menschen sehr gut verträglich.	

Lehm kann im Bauwesen sowohl für Wände und Decken, als auch als Mörtel, Putz oder Estrich verwendet werden. Aufgrund seiner geringen Witterungsbeständigkeit ist Lehmputz im Außenbereich speziell auf der Wetterseite problematisch, für den Innenbereich ist er wegen seiner feuchteregulierenden Eigenschaften jedoch sehr gut geeignet. Auf Lehmputz sollten diffusionsoffene Anstriche verwendet werden, da sonst die Feuchtaufnahmefähigkeit unterbunden wird. Im Innenausbau wird die Verwendung von Kaseinfarben empfohlen, nicht zuletzt des-

halb, weil sie schadstofffrei sind. Im Spritzwasserbereich sind Wasserglas, Silikatfarben oder Streichlehmfarben, die reich an Tonmineralen sind, empfehlenswert. [BRU98]



Abb. 24: Lehmgrube am Ostrand des Dunkelsteiner Waldes (NÖ) und Lehmputz

5.3 Versuchsaufbau und Montage der Innendämmung

5.3.1 Beschreibung und Vorbereitung der Versuchsanlage

Für die messtechnische Erfassung des hygrothermischen Verhaltens der geplanten Schilfrippendämmung mussten an bestimmten Positionen sowohl hinter als auch vor der Dämmebene die Temperatur- und Feuchteverläufe aufgezeichnet werden. Zu diesem Zweck kamen Datenlogger der T&D Corporation zum Einsatz. Nach eingehender Planung wurden vier Wandquerschnitte der Schlafzimmereußenwand ausgewählt, an denen die Temperatur- und Feuchtesensoren montiert wurden. In Summe handelt es sich um elf Stück Wireless Thermo Recorder RTR-53A. Der Datenlogger ist, wie in Abb. 25 dargestellt, über ein ca. 100 cm langes Kabel mit dem Sensor verbunden. Der Sensor besteht aus einer Kunststoffkappe mit Luftschlitzen und einer Bohrung zur Befestigung. Unter der Kunststoffkappe sitzen ein Temperaturfühler und ein Hygrometer. Die Daten werden über die Kabelverbindung zum Logger geleitet, der in programmierbaren Abständen die beiden Datenwerte aufzeichnet. Es können maximal 8000 Datenwerte pro Kanal gespeichert werden. Für das Winterhalbjahr wird ein Aufzeichnungsintervall von zehn Minuten gewählt, daraus ergibt sich ein Ausleseintervall von 55 Tagen. Da in der warmen Jahreszeit die Temperaturschwankungen infolge Fensterlüftung nicht so groß sind, ist im Sommerhalbjahr ein Aufzeichnungsintervall von 15 Minuten ausreichend. Daraus ergibt sich ein Ausleseintervall von 82,5 Tagen. Bei jedem Auslesetermin werden die Daten mithilfe eines Datacollectors, einer RTR-57U Unit, entweder per Funk oder über die optische Schnittstelle des

Datacollectors an einen Computer übermittelt. Die Daten können als TXT-Datei gespeichert und danach in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert werden.

Die Sensoren der Datenlogger sind sehr sensibel und dürfen keinesfalls mit kondensiertem Wasser in Berührung kommen. Um dies zu vermeiden und um den Sensor vor mechanischer Belastung zu schützen, wird die Kunststoffkappe jedes Sensors mit einem Hüllrohr, Durchmesser 16 mm, versehen, das durch einen Schrumpfschlauch mit dem Kabel verbunden ist. Die Einzelkomponenten und der fertig vorbereitete Sensor sind in Abb. 25 und Abb. 26 dargestellt. Das Ankleben des Schrumpfschlauches am Kabel verhindert, dass Kondenswasser entlang der Isolierung des Kabels zum Sensor einsickern kann.



Abb. 25: Datenlogger T&D RTR-53A



Abb. 26: Sensor mit Hüllrohr und Schrumpfschlauch

Nach der Inbetriebnahme der Datenlogger sowie dem Verkabeln und der Befestigung der Hüllrohre an den Sensoren der Datenlogger werden diese im Klimaschrank bestimmten Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen ausgesetzt. Die Aufzeichnung dieses bestimmten Klimas und der Vergleich mit dem eingestellten Temperatur- und Feuchteverlauf am Klimaschrank ermöglicht die Erkennung von Messungenauigkeiten. Mit Hilfe dieser Daten kann auch zu einem späteren Zeitpunkt eine Kalibrierung durchgeführt werden. Sollte einer der Sensoren während der späteren Messphase ungenaue Werte liefern, kann dieser, sofern er zugänglich ist, durch einen neuen Messsensor ersetzt werden und auf Basis der Werte des Messvorgangs im Klimaschrank kalibriert werden.

Wie bereits erwähnt, sind elf Datenlogger an vier Wandquerschnitten und jeweils einer zur Aufzeichnung der Referenztemperatur im Raum und an der Außenluft im Einsatz. Bedingt durch den Arbeitsablauf bei der Montage der Innendämmung werden die Logger zu unterschiedlichen Zeitpunkten in Betrieb genommen und in weiterer Folge die Sensoren in drei Gruppen montiert. Nach der Inbetriebnahme am 31. Mai 2007 beginnen die Sensoren CH2, CH3 und CH5, die hinter der Dämmebene zwischen Bestandswand und Dämmstoff eingebaut

wurden, am 2. Juni 2007 die Messung. Zeitgleich mit diesen Datenloggern wird auch der Logger CH4 an der Außenseite der Fassade montiert und mit einem Holzgehäuse abgeschirmt, um ihn vor Sonneneinstrahlung zu schützen (vgl. Abb. 29). Der Logger CH1 wird in der Raummitte, etwa 190 cm über dem fertigen Fußboden, montiert. Im zweiten Schritt wird der Sensor CH6 in den Lehm eingeputzt. Im Zuge des Anschlusses der Dämmung an die Außenecke (vgl. Abb. 27 und Abb. 28) wird der Sensor CH8 eingebaut. Unmittelbar nach Fertigstellung der letzten Putzschicht der Lehmoberfläche werden in einem dritten Montagevorgang die letzten vier Sensoren, CH7, CH9, CH10 und CH11, gemeinsam mit ihren Datenloggern direkt an die nasse Putzoberfläche montiert. Dadurch kann der Austrocknungsprozess anhand der Messwerte dargestellt werden. Da es sich bei den Dämm- und Verputzarbeiten um teilweise sehr staubende bzw. nasse Vorgänge handelt, war es wichtig, die Datenlogger vor Beschädigungen zu schützen. Die eingewickelten Datenlogger sind in Abb. 33 zu erkennen.

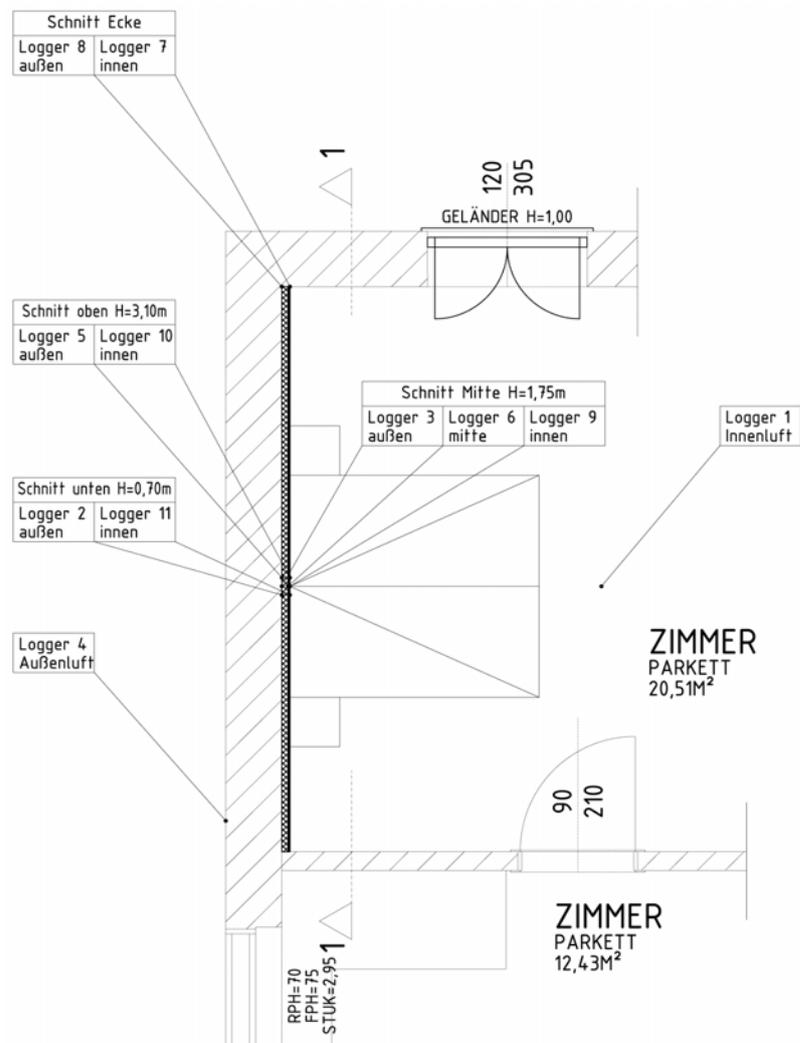


Abb. 27: Verteilung der Datenlogger im Grundriss

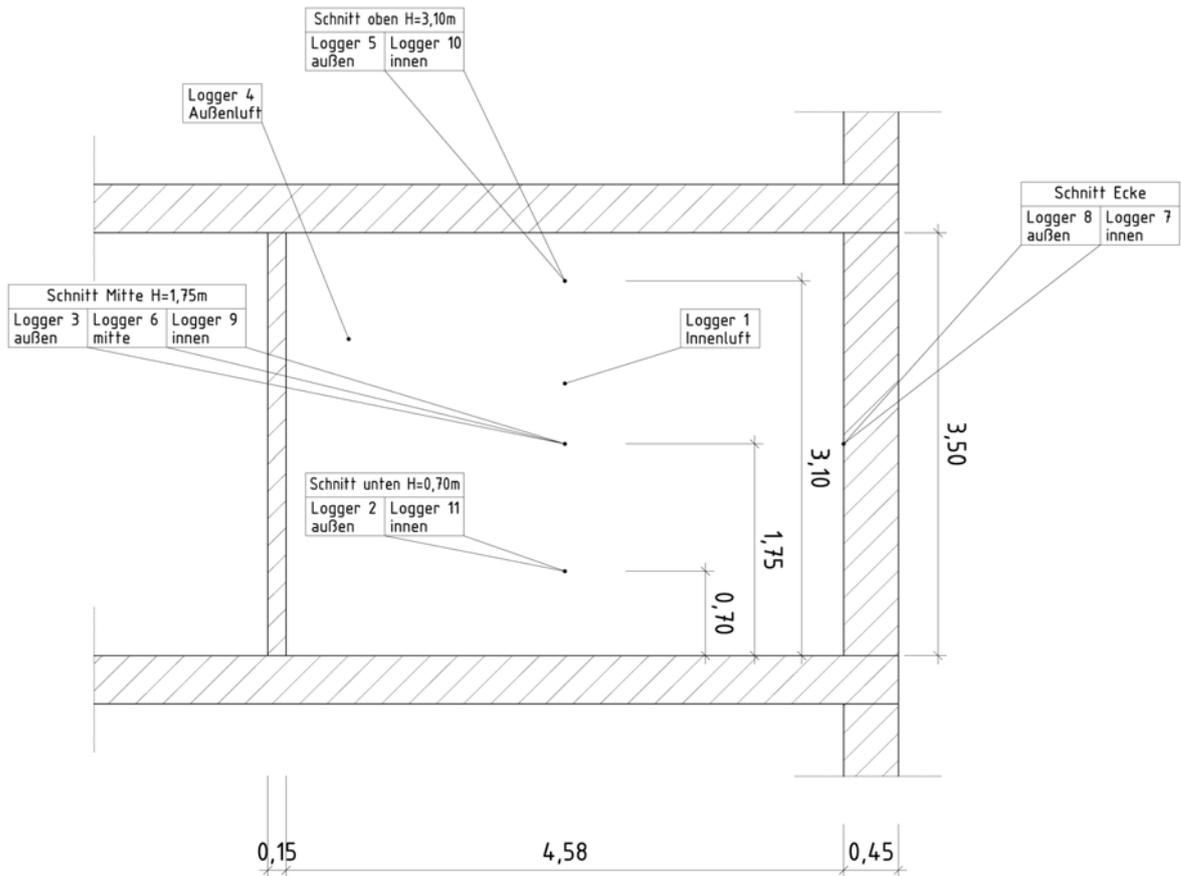


Abb. 28: Verteilung der Datenlogger in der Ansicht 1-1 von der Raumseite

Durch die entsprechende Verteilung der Datenlogger werden drei Messquerschnitte hergestellt. Der erste Querschnitt wird in einer Höhe von 75 cm angelegt, der zweite Querschnitt in einer Höhe von 175 cm und der dritte Querschnitt oberhalb der Tür- und Fensterstürze in einer Höhe von 315 cm. Außerdem wird ein Querschnitt in einer Außenecke angelegt. In diesem Bereich treffen eine ungedämmte Ziegelwand und die mit Schilfplatten gedämmte Versuchswand aufeinander. In jedem Querschnitt werden zumindest zwei Datenlogger installiert. Jeweils ein Sensor wird hinter der Dämmung appliziert und jeweils einer direkt an der Lehmputzoberfläche am Übergang zur Raumluft. Im Querschnitt Mitte wird ein Sensor in den Lehmputz eingebaut, um das Feuchteverhalten des Lehms genauer untersuchen zu können.



Abb. 29: Außensensor CH4 an der Fassade mit Witterungs- und Direktstrahlungsschutz

Im Folgenden sind die Nummern der Datenlogger vom kalten Bereich zum warmen Bereich aufgelistet. Eine genauere Darstellung der Positionierung der Datenlogger ist in Abb. 27 und Abb. 28 dargestellt.

Tab. 7: Nummerierung und Positionierung der Sensoren und Datenlogger

	Außenluft	Putz/Dämmplatte	Dämmplatte/Lehm	Lehm/Raumluft	Raumluft
QS oben H = 75 cm	CH4	CH2	–	CH11	CH1
QS Mitte H = 175 cm	CH4	CH3	CH6	CH9	CH1
QS unten H = 315 cm	CH4	CH5	–	CH10	CH1
Ecke H = 175 cm	CH4	CH8	–	CH7	CH1

5.3.2 Aufbau der Innendämmung und Anbringung der Sensoren

Die Innendämmung besteht aus Schilfdämmplatten, die 125 cm breit, 100 cm lang und 5 cm dick sind. Die Schilfrohre sind dicht aneinander gepresst und mit Drähten zu einer Platte vernäht. Diese ist in Faserrichtung des Schilfes sehr formstabil, quer dazu lassen sich die Platten jedoch leicht wölben. Auf Empfehlung des Herstellers wird die Faserrichtung der Platten horizontal angeordnet.

Die erste Plattenreihe wird auf dem Estrich aufgestellt und mit 140 mm langen Fassadendübeln aus Kunststoff an der Wand befestigt. Die letzte Platte der Reihe muss entsprechend gekürzt werden. Da in diesem Fall die Platte quer zur Faser geschnitten wird, müssen keine Drahtbügel entfernt werden und es kann ein gerader Schnitt mit einer Handkreissäge hergestellt werden.

Der Rest der Platte kann als erstes Stück der zweiten Reihe verwendet werden, was den Vorteil mit sich bringt, dass ein Versatz und somit eine Verzahnung der Platten hergestellt wird. Der Plattenversatz und die Montage mit Tellerdübeln ist in Abb. 30 dargestellt. Durch den Versatz kann außerdem eine mögliche Rissbildung im Lehmputz, die entlang einer zu langen Plattenfuge häufig auftritt, vermieden werden. Am Deckenanschluss müssen die Platten der Länge nach gekürzt werden. In diesem Fall wird das Drahtgeflecht geöffnet und die Platte geteilt. Dabei ist kein Schneiden der Schilfhalme erforderlich, da die Platte einfach durch Entnahme von Schilfrohrbündeln verkleinert wird. Wichtig ist allerdings, dass die Platte nach der Entnahme der Schilfhalme wieder fest mit den Drahtbügeln zusammengeschnürt wird, um die Dämmeigenschaften nicht negativ zu beeinflussen. Durch das Fixieren der Drahtbügel wird auch die Formstabilität der Platte wiederhergestellt und sie kann an der Wand angedübelt werden.

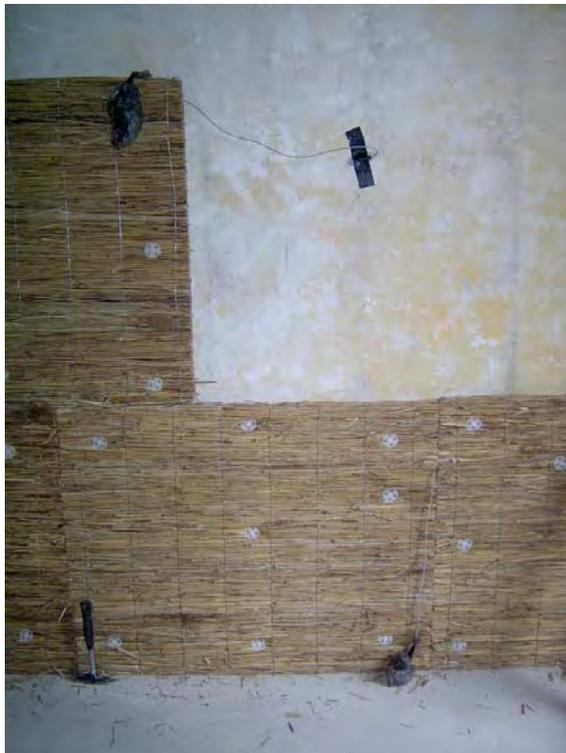


Abb. 30: Montage der Schilfdämmplatten mit Kunststofftellerdübeln

Beim Aneinanderreihen der Schilfdämmplatten muss besonderes Augenmerk auf die Stoßstellen gelegt werden, die bei ungenauer Verarbeitung eine Wärmebrücke darstellen können. Einerseits besteht die Gefahr, dass Fugen im Zuge der Verputzarbeiten mit Lehm gefüllt werden und dadurch eine materiell bedingte Wärmebrücke entsteht, andererseits kann durch luftgefüllte Fugen mehr Feuchtigkeit hinter die Dämmung diffundieren als bei einer homogenen Dämmschicht.

Gleichzeitig mit der Montage der Schilfdämmplatten müssen auch die ersten Sensoren zwischen der bestehenden Wand und den Schilfdämmplatten platziert werden. Um eine sichere

Lagerung des Sensors zu gewährleisten, wird die Rohrhülse, in der sich der Temperatur- und Feuchtesensor befindet, in eine Vertiefung im Putz der bestehenden Mauer eingebettet und mit einem Klebeband temporär befestigt.

In Abb. 31 ist zu erkennen, dass die Kerbe im Putz leicht geneigt hergestellt wird, damit die Rohrhülse des Sensors nicht horizontal gelagert ist. Dadurch soll einerseits ein Feuchtestau infolge Tauwasser vermieden werden, andererseits gewährleistet die fast horizontale Lagerung einen ausreichenden Luftwechsel. Durch das Anpressen der Dämmplatten an den Verputz der bestehenden Wand wird auch das Hüllrohr mit dem Sensor an die Wand gepresst und in seiner Lage dauerhaft fixiert. Das Verbindungskabel zwischen Sensor und Datenlogger wird an der nächstgelegenen Plattenstoßfuge an die Wandoberfläche geführt.



Abb. 31: Montage eines Sensors

In Abb. 32 ist ein Querschnitt einer Schilfdämmplatte direkt nach der Befestigung an der Bestandswand zu sehen. Die Vertiefung im Bestandsputz mit der Lage des Sensors ist rechts oben zu erkennen. Das Datenkabel vom Sensor zum Datenlogger wird durch die hier sichtbare Stoßfuge zwischen zwei Platten an die Wandoberfläche geführt. Dabei ist darauf zu achten, dass das Kabel nicht geknickt und die Isolierung nicht beschädigt wird. Im Falle eines Schadens am Sensorkabel oder direkt am Messfühler, können diese Teile ausgetauscht werden, sofern sie nach Fertigstellung der Wand noch zugänglich sind.



Abb. 32: Querschnitt einer Schilfdämmplatte

5.3.3 Vom Verputzen zur fertigen Wand

Nach dem Verlegen der Schilfdämmplatten und der Montage der Sensoren hinter der Dämmung ist die Wand bereit für die erste von mindestens drei Putzschichten. Im vorliegenden Projektbeispiel wird die Schilfdämmung mit einem Faserlehm verputzt. Da der Lehmputz auf den Schilfmatten nur sehr schlecht haftet, muss als Grundierung eine Lehmschlämme aufgebracht werden. Sie besteht hauptsächlich aus gelösten Tonmineralen ohne sandigen Zuschlag. Dieser „fette“ Lehm legt sich als dünner Überzug auf die Schilfhalme und bildet so einen Haftgrund für den Lehmputz. Wie in Abschnitt 5.2.1 bereits erwähnt, ist Schilfrohr nicht saugend und nimmt daher kein Wasser auf. Es muss vor der Grundierung stark vorgehässelt werden, damit die Schilfhalme einen vollflächigen Wasserfilm an der Oberfläche aufweisen und so eine gute Haftung der Lehmschlämme auf den Schilfrohren erzielt werden kann. Das Vornässen empfiehlt sich in diesem Fall mit einem Gartenschlauch mit feiner Düse.

Die unebene Oberfläche der Schilfdämmplatten bietet eine optimale Verzahnung und stellt somit einen idealen Putzträger dar. Der Lehmputz wird in mehreren Schichten aufgetragen, da das Material beim Trocknen Schwindrisse erzeugt, die bei zu dicken Putzschichten zu Abplatzungen führen können. Daher werden Schichten von 5 bis 15 mm Dicke aufgetragen. Der erste Schichtauftrag erfolgt nass in nass mit der Grundierung, um eine optimale Haftung auf der Schilfplatte zu gewährleisten. Im Bereich der Tellerdübel ist aufgrund der Vertiefung eine stärkere Putzschicht erforderlich. Nach dem Abziehen und Herstellen einer ersten gleichmäßi-

gen Oberfläche muss die Wand vollkommen austrocknen. Dieser Vorgang kann je nach Raumluftfeuchte und Witterungsverhältnissen mehrere Tage dauern. Es ist enorm wichtig, dass auf eine schnelle Austrocknung, nötigenfalls auch mit Hilfe von Zugluft oder Ventilatoren, geachtet wird. Dieser erste Austrocknungsvorgang des Grundputzes wird von den Datenloggern bereits aufgezeichnet und ist in Abb. 34 als erste von insgesamt drei Feuchtespitzen der dunkelroten Datenkurve „rel. Luftfeuchte – CH3“ zu erkennen. Der Logger CH3 liegt hinter der Dämmung in der Fuge zum Putz des Bestandsmauerwerks. Er ist daher nur durch die 5 cm dicke Schilfdämmplatte vor dem überwassergesättigten Lehmputz geschützt. Die Feuchtigkeit dringt relativ schnell durch die Schilfplatte, wobei jedoch an der Rückseite der Platte im Bereich des Sensors CH3 während der gesamten Verputzarbeiten niemals 100 % relative Luftfeuchte auftreten. Der höchste gemessene Wert während der Bauzeit beträgt 84 % relative Luftfeuchte.



Abb. 33: Austrocknung der ersten Lehmschicht (links) und Netzen nach dem Aufbringen der zweiten Schicht (rechts)

Zwei Wochen nach Aufbringen der ersten Putzschicht wird ein zweites Mal Lehm aufgetragen. Dieser Vorgang ist in Abb. 34 durch die dunkelblaue Kurve „rel. Luftfeuchte – CH6“ dargestellt. Der Sensor des Loggers CH6 ist in 1,75 m Höhe über dem Fussboden ca. 2 cm tief direkt in den Lehmputz eingelegt. In Abb. 35 ist zu erkennen, dass auch dieser Sensor leicht geneigt eingebaut wird. Hier ist jedoch nicht die Gefahr von einsickerndem Tauwasser gegeben, sondern es soll auf diese Weise eine mögliche Verschmutzung während des Verputzvorganges vermieden werden. Die Feuchtekurve des Loggers CH6 zeigt deutlich das Auftragen des Lehms, da in diesem Bereich die relative Luftfeuchte am Sensor mit nahezu 100 % ange-

geben wird. Gleichzeitig steigt auch die Feuchte hinter der Dämmung wieder an. Dabei ist eine gewisse Trägheit der Feuchteleitung feststellbar, weil sich zwischen den Loggern CH6 und CH3 eine Phasenverschiebung abzeichnet. Die maximale Feuchtebelastung hinter der Dämmung tritt erst dann auf, wenn der Lehmputz bereits merklich am Abtrocknen ist und die relative Luftfeuchte im Bereich des Sensors CH6 abnimmt.

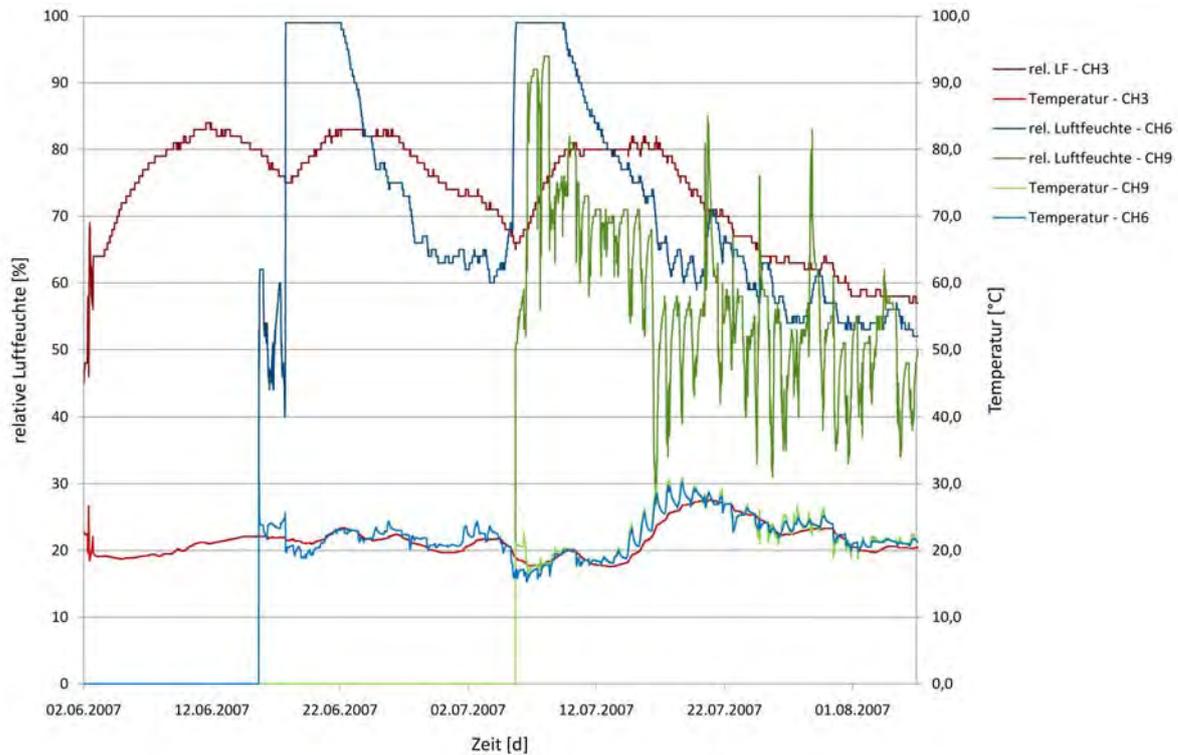


Abb. 34: Temperatur- und relative Luftfeuchteverläufe während der Lehmverputzarbeiten

Gleichzeitig mit der zweiten Putzschicht wird ein Gewebe in den Lehm eingespachtelt. Grundsätzlich wird die Verwendung von Jutegewebe empfohlen, jedoch wird im vorliegenden Fall aus Kostengründen ein Nylonfassadengitter 10/10 mm verwendet. Das wesentliche Kriterium bei der Wahl eines Armierungsgewebes ist die Maschenweite. Diese sollte nicht zu klein sein, da der Lehm zu schichtweisen, plattenförmigen Abplatzungen neigt, insbesondere dann, wenn der Untergrund nicht ausreichend vorgegast wurde.

Weitere drei Wochen nach Aufbringen der zweiten Putzschicht und Einbau des Sensors CH6 in den Lehmputz wird die dritte und letzte Schicht aufgebracht. Auch hier ist der Feuchteeintrag in die Konstruktion an den aufgezeichneten Werten von Logger CH3 und CH6 deutlich zu erkennen. Unmittelbar nach dem Aufbringen des Lehms und nach Verreiben und Glätten der Oberfläche werden die Sensoren zur Messung der Oberflächentemperatur und -luftfeuchte montiert. Im dargestellten Messquerschnitt ist es der Logger CH9, im Diagramm dunkelgrün markiert und als „rel. Luftfeuchte – CH9“ benannt, der den Trocknungsverlauf an der Wandoberfläche darstellt. Die Absackungen der relativen Luftfeuchte in der Messkurve von CH9

erklären sich durch das Stoßlüften des Raumes. Die um den 22. 7. 2007 auftretenden Feuchtespitzen, die im Abstand von jeweils vier Tagen aufeinanderfolgen, stellen den Feuchteeintrag infolge der Malerarbeiten dar. Die Lehmwand wird mit einer diffusionsoffenen Kasein-Marmormehlfarbe auf Wasserbasis in drei Arbeitsgängen bestrichen. Vor dem ersten Farbauftrag wird außerdem ein Haftgrund mittels Kaseingrundierung hergestellt.



Abb. 35: Der Sensor CH6 wird direkt in den Lehmputz eingelegt.

Wie bereits erwähnt, werden in Summe drei Putzschichten auf die Schilfdämmung aufgetragen. Nach jeder Schicht muss der Lehm vollständig austrocknen, um eine mögliche Rissbildung infolge Schwindens abzuwarten und gegebenenfalls mit der nächsten Lehmschicht zu verschließen. Die schnelle Trocknung der Lehmschichten ist sehr wichtig, da im vorliegenden Beispiel ein Faserlehm verwendet wurde. Kann der Lehm nicht rasch genug trocknen, besteht die Gefahr der Schimmelpilzbildung an den Stroh- und Hanffasern, die in den Lehmputz eingemischt sind. Diese biogenen Fasern können unter längerer Feuchteeinwirkung zu schimmeln beginnen. Auf der Versuchswand bildete sich kurzzeitig ein weißer Schimmelflaum, da das Ablüften der feuchten Raumluft wegen Regenwetters nur begrenzt möglich war. In Abb. 36 ist der Schimmelflaum an der Oberfläche des Lehmputzes zu erkennen. Im ausgehärteten Zustand ist ein Schimmeln des Lehmputzes unmöglich, da seine Gleichgewichtsfeuchte laut Bruckner [BRU98] mit nur 2,5 % bis 4,5 % sehr gering ist. Lehm hat die Eigenschaft, dass er bei Raumluftfeuchten unter 50 % Feuchte an den Raum abgibt, bei Raumluftfeuchten über 50 % nimmt er Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf.



Abb. 36: Schimmelwachstum an der Lehmputzoberfläche Abb. 37: Fertig verputzte Lehmwand mit Datenloggern

Nach dem Aufbringen der dritten Putzschicht und dem Verreiben und Glätten der Oberfläche beginnt die letzte Austrocknungsphase. Die fertiggestellte Wand mit den durch Plastikbeutel geschützten Datenloggern ist in der rechten Abbildung zu sehen.

Nach dem vollständigen Austrocknen der Wand werden die Anschlussfugen zu allen benachbarten Bauteilen mit Acrylmasse abgedichtet, um das Öffnen von Schwindrissen in diesen Bereichen zu vermeiden. Die Acrylmasse kann mit der Kaseinfarbe übermalt werden und bietet eine dauerelastische Verbindung zwischen der Dämmkonstruktion und der starren Wand.

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen das Zimmer mit der innengedämmten Lehmwand im Gebrauchszustand. Das Doppelbett verdeckt mit dem Betthaupt einen Teil der Wandfläche im unteren Bereich. Dort ist der „Messquerschnitt unten“ situiert. Es ergeben sich dadurch aber keine auffälligen Unterschiede zu den anderen Messquerschnitten in der Wandfläche. In der rechten Darstellung der Abb. 38 sind die Datenlogger, die an der Wand hängen und für gewöhnlich durch ein Ölbild verdeckt sind, erkennbar. Im Vordergrund hängt der Sensor des Loggers CH1 vom Lampenschirm. An dieser Stelle werden die Referenzraumtemperatur und die relative Raumluftfeuchte gemessen.



Abb. 38: Fertige innengedämmte Wand mit Lehmverputz und Kaseinfarbanstrich links mit Ölbild und rechts mit abgenommenem Ölbild (fotografisch bedingte verzerrte Ansicht)

5.4 Analyse der Messergebnisse

Bei der Analyse und Bewertung der Temperatur- und Feuchteverläufe in der innengedämmten Wandkonstruktion müssen einige Randbedingungen berücksichtigt werden. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist durch das Außenklima gegeben. Die folgende Abb. 39 stellt den Verlauf der Außentemperatur über den Messzeitraum von September 2007 bis April 2010 dar. Dabei sind markante Kaltlufteinbrüche im Herbst 2008 und 2009 (entspricht etwa Stunde 9000 und 18500) sowie eine längere Kälteperiode im Winter 2008/09 (um Stunde 12000) und die Kältespitzenwerte im Winter 2009/10 (um Stunden 20200 und 21000) zu erkennen. In Abb. 40 ist die relative Außenluftfeuchte für denselben Zeitraum dargestellt.

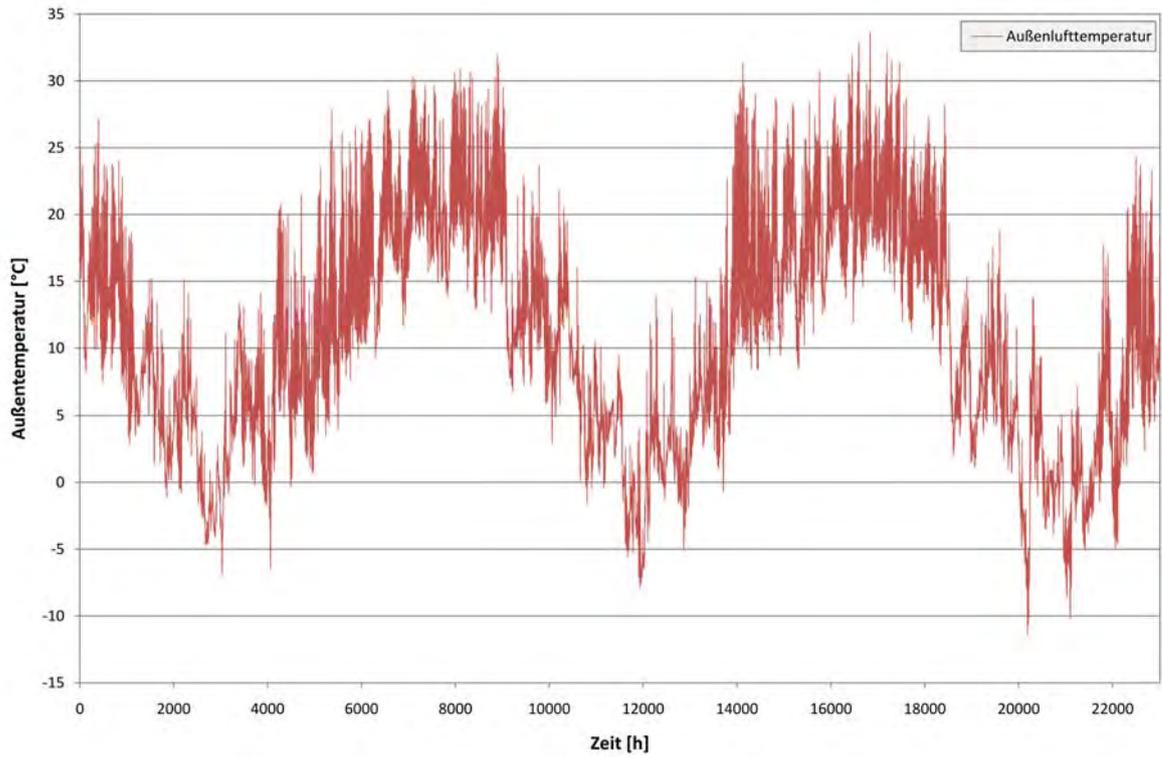


Abb. 39: Außenlufttemperatur in Wien Währing von 1.9.2007 bis 16.4.2010

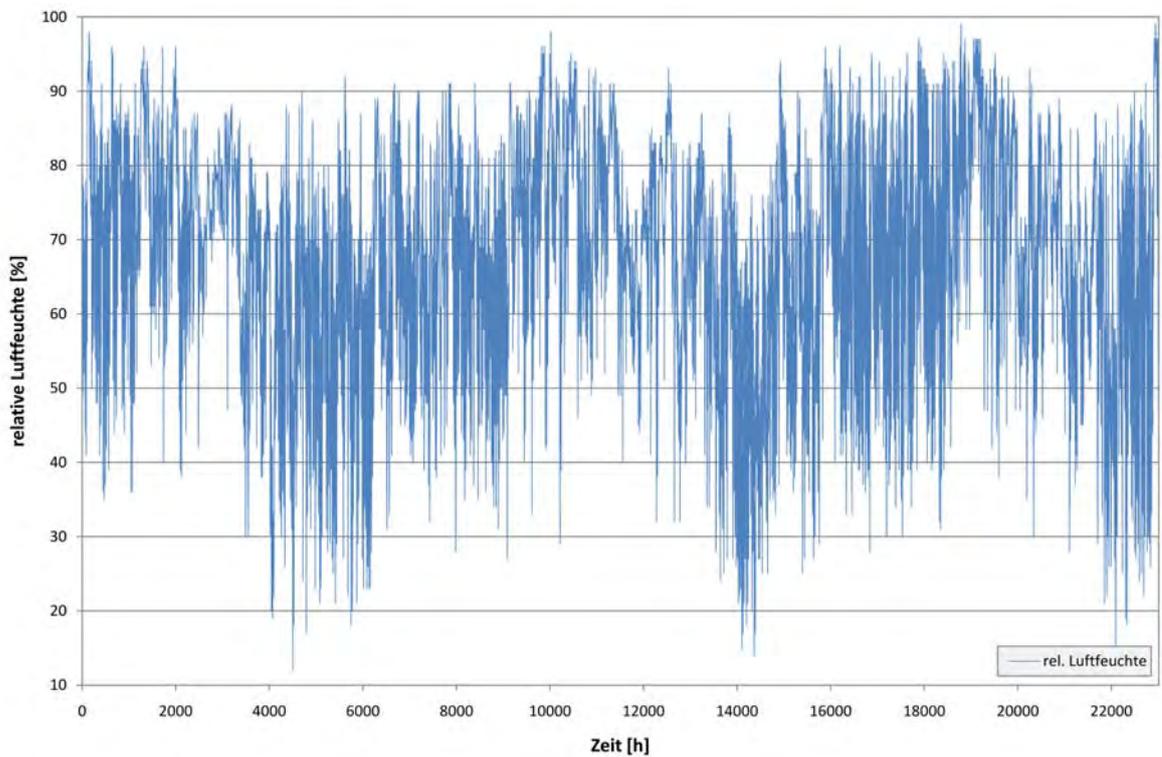


Abb. 40: Relative Außenluftfeuchte in Wien Währing von 1.9.2007 bis 16.4.2010

Neben dem Außenklima ist das Innenklima eine zweite wichtige Einflussgröße für das hygrothermische Verhalten der Innendämmung. Das Innenklima wird wiederum durch das Nutzerverhalten stark beeinflusst. Vor allem die Lüftungs- und Heizgewohnheiten spielen dabei eine wesentliche Rolle. Die Beeinflussung des Innenklimas durch das Außenklima, vor allem während längerer Regenperioden, kommt im vorliegenden Fall weniger stark zum Tragen. Grund dafür ist, dass das Innenklima durch die vorhandenen Lehmflächen positiv beeinflusst wird, wodurch Feuchtespitzen sowie Spitzenwerte bei zu trockener Luft vermieden werden. Wie in den Abschnitten zuvor erwähnt, kann Lehm aufgrund seiner geringen Ausgleichsfeuchte sehr schnell viel Feuchtigkeit aufnehmen und speichern. Zu einem späteren Zeitpunkt, wenn die Raumlufftfeuchte sinkt, gibt der Lehm die Feuchtigkeit wieder ab. Dadurch werden starke Feuchteinträge in die Raumlufft, beispielsweise durch Wäschetrocknen oder Bügeln mit einem Dampfbügeleisen, schnell ausgeglichen. Dies spiegelt sich auch in der folgenden Abbildung des Innenklimas wider.

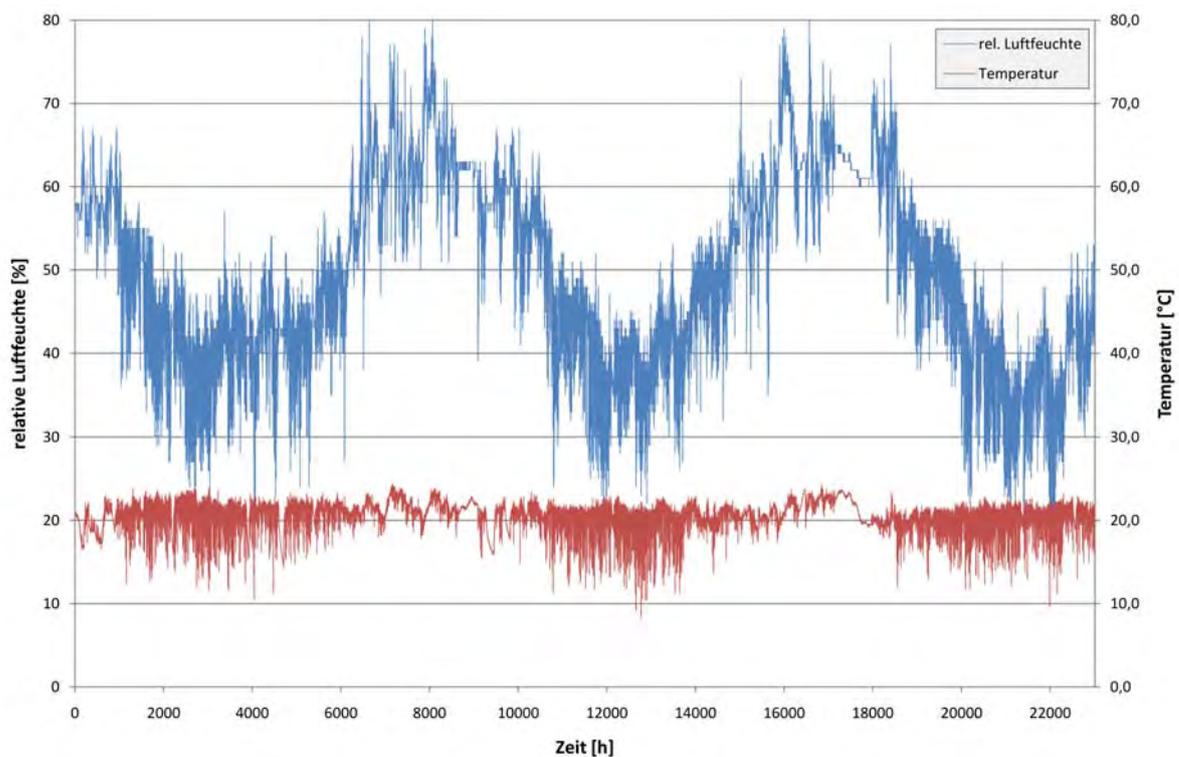


Abb. 41: Raumluffttemperatur und relative Raumlufftfeuchte von 1.9.2007 bis 16.4.2010

Das aufgezeichnete Innenklima zeigt die typischen jahreszeitlich bedingten Feuchteschwankungen, also eine starke Abnahme der relativen Luftfeuchte während der Wintermonate. Dies ist einerseits auf das Heizverhalten, andererseits auf das Lüftungsverhalten zurückzuführen. Die Temperaturkurve zeigt deutlich, dass der Luftwechsel durch Stoßlüften erfolgt. Weiters sind wiederholt kurze Perioden zu erkennen, in denen die Wohnung unbewohnt war. Durch den Wegfall des Nutzereinflusses stellt sich in diesen Phasen ein nahezu stationäres Klima ein, das

nur durch solare Einstrahlung auf die Außenwandoberfläche und durch den Infiltrationsluftwechsel beeinträchtigt wird.

Die Auswirkungen des Nutzerverhaltens auf die innengedämmte Konstruktion veranschaulichen Abb. 42 und Abb. 43. Aus der dreijährigen Aufzeichnungsphase wurde der Bereich von 9.8.2009 bis 16.4.2010 ausgewählt, um einige markante Punkte des Messverlaufes zu erörtern. Die angeführte Zeitspanne in der Grafik entspricht den Stunden 17000 bis 23000 nach Beginn der Messung.

Die hellblaue Kurve der Außenlufttemperatur in Abb. 42 weist Mitte Oktober (entspricht Stunde 18500) einen rasanten Abfall auf. Dieser erste deutliche Kaltlufteinbruch im Herbst 2009 stellt den Beginn der Heizperiode dar. Dies ist auch an den ab diesem Zeitpunkt auftretenden stark schwankenden Raumluf- und Oberflächentemperaturen zu erkennen. Gleichzeitig mit dem Absinken der Außenlufttemperatur verstärkt sich auch das Temperaturgefälle in der Wand. Die grüne Kurve, die die Temperatur zwischen Außenwand und Innendämmung darstellt, sinkt etwas zeitversetzt zur Außenlufttemperatur ebenfalls ab. Die Phasenverschiebung wird durch die Wärmekapazität des Mauerwerks hervorgerufen.

Die kältesten Außenlufttemperaturen werden am 20.12.2009 (entspricht Stunde 20200) erreicht, wobei die Temperatur unter -10 °C sinkt. Zu diesem Zeitpunkt wird auch die tiefste Temperatur hinter der Dämmung gemessen. Betrachtet man die relative Luftfeuchte in diesem Zeitabschnitt in Abb. 43, stellt man fest, dass die grüne Messkurve ihren Maximalwert erreicht. Das bedeutet, dass aufgrund der kalten Temperatur hinter der Dämmung und des daraus resultierenden größeren Temperaturunterschieds zur Raumluftein erhöhter Diffusionsstrom durch die Konstruktion stattfindet. Dies führt zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte zwischen Außenwand und Dämmschicht. Die Temperaturen an der Wandoberfläche und im Lehmputz sinken leicht ab, während die Raumlufteinteilung nahezu unverändert bleibt. Dies kann nur durch ein vermehrtes Heizen erreicht werden. Bleibt das Lüftungsverhalten gleich, kommt es während der Heizperiode zu einer Reduktion der Raumlufteinteilung. Dieser Vorgang ist an den rot, gelb und lila gefärbten Feuchtekurven in Abb. 43 zu erkennen. Grundsätzlich können relative Raumlufteinteilungen von durchschnittlich 35 – 40 % während der Heizperiode durchaus auftreten, auch wenn diese Werte in der Literatur oft als zu niedrig kritisiert werden. Im vorliegenden Beispiel zeigt sich, dass aufgrund des richtigen Lüftungsverhaltens mit zwei- bis dreimal täglichem Stoßlüften die relative Raumlufteinteilung in einem Bereich gehalten wird, der für die vorhandene Innendämmung völlig unproblematisch ist. Die Messwerte des Datenloggers CH3 (grüne Kurve) bestätigen diese Tatsache, da während der gesamten Kälteperiode die relative Luftfeuchte zwischen Schilfdämmung und Bestandswand nie über 78 % steigt. Da die gewählte Zeitspanne die niedrigsten in den drei Jahren aufgezeichneten Temperaturwerte enthält und damit die maßgebende Periode der Messung darstellt, kann davon ausgegangen werden, dass

zu keinem Zeitpunkt der bisherigen Datenaufzeichnung eine Gefahr für Schimmelpilzwachstum bestanden hat.

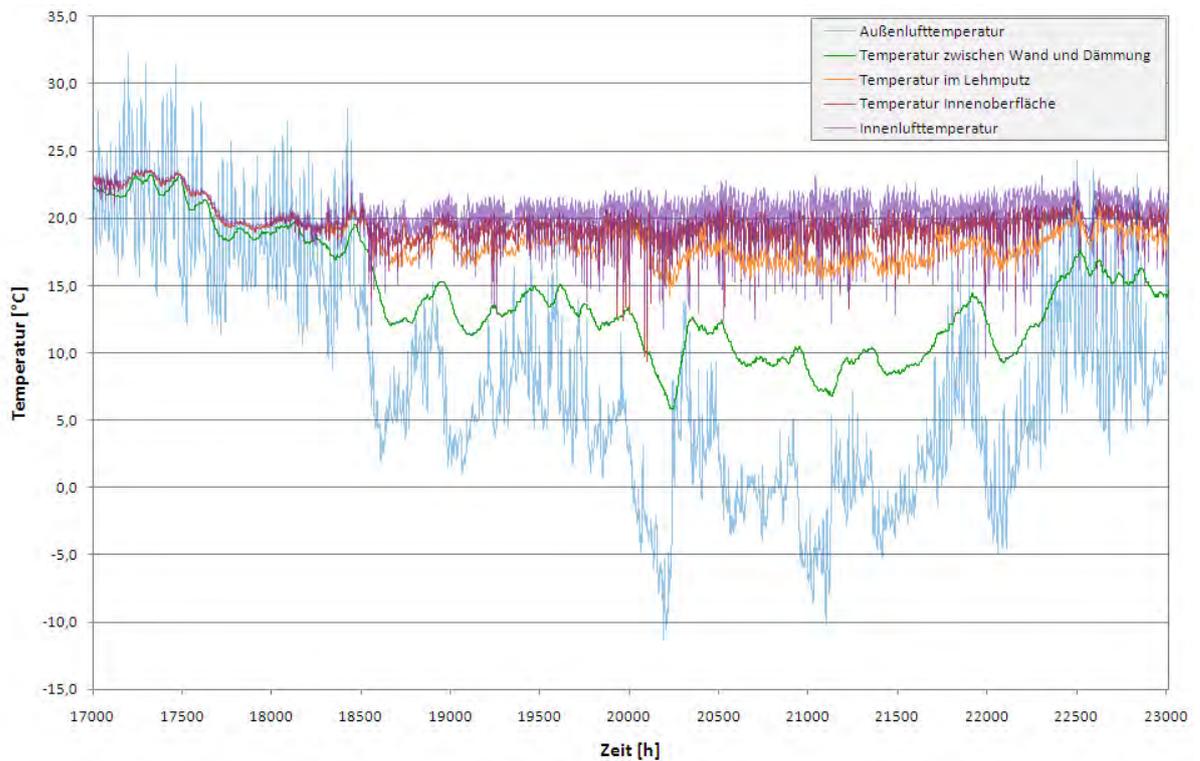


Abb. 42: Temperaturverläufe im Querschnitt Mitte von 9.8.2009 bis 16.4.2010

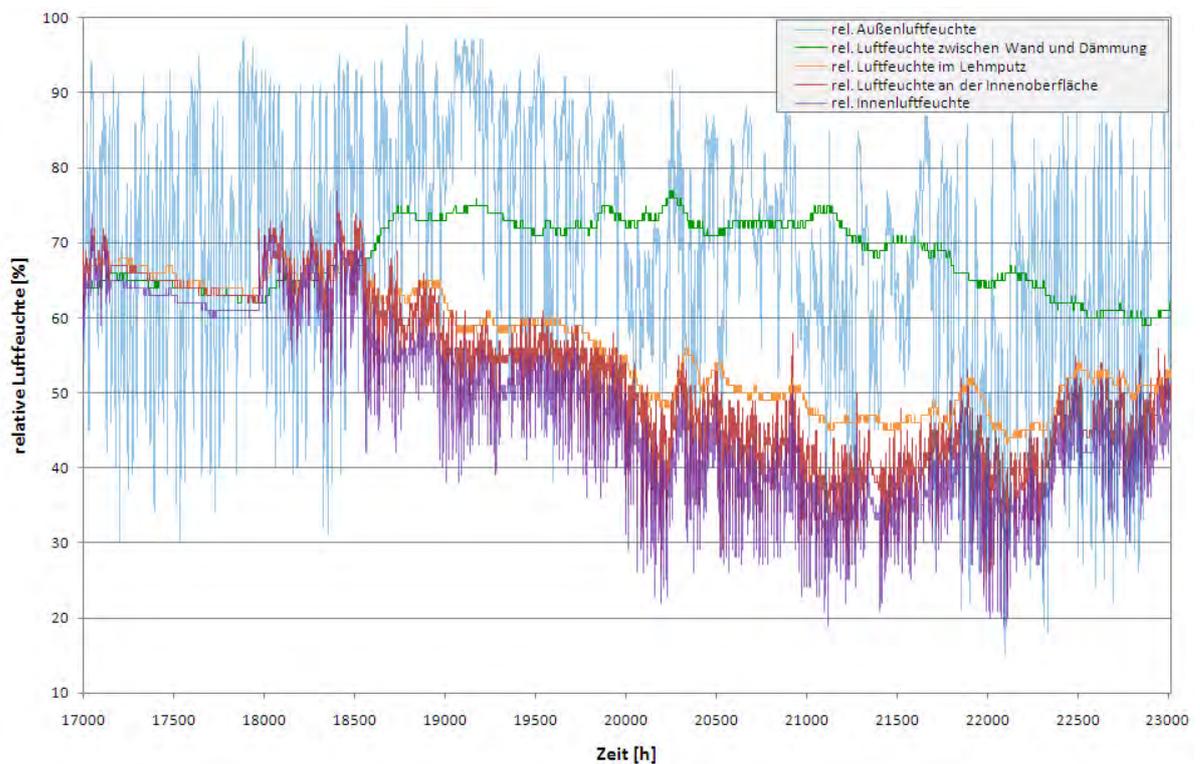


Abb. 43: Verläufe der relativen Luftfeuchte im Querschnitt Mitte von 9.8.2009 bis 16.4.2010

Neben den hygrothermischen Untersuchungen während der kalten Jahreszeit lassen sich auch einige andere durch die Nutzer verursachte Klimaschwankungen in den Aufzeichnungen der Datenlogger erkennen.

Zu Beginn des ausgewählten Messzeitraumes zeigt Abb. 43 eine Periode mit nahezu konstanten Klimabedingungen. Von 15.8.2009 bis 10.9.2009 (entspricht Stunde 17100 bis 18000) war die Wohnung wegen einer Urlaubsreise unbewohnt und es kam zu keinem beabsichtigten Luftaustausch durch Lüften oder dergleichen. Die Wandkonstruktion war in diesem Zeitraum keinem Nutzereinfluss, sondern nur äußeren Klimaeinflüssen ausgesetzt. Vor allem die solare Einstrahlung auf die Außenwandfläche, die zu einer Erwärmung der Konstruktion und in weiterer Folge zu einer Erwärmung der Raumluft führt, ist für die Klimaschwankungen, die anhand der Temperaturaufzeichnungen erkennbar sind, verantwortlich.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, wie groß der Einfluss des Nutzerverhaltens auf die hygrothermischen Prozesse in der innengedämmten Wandkonstruktion ist. Bei Planungen von Gebäudesanierungen und insbesondere bei der Planung einer Innendämmmaßnahme ist es jedoch in den wenigsten Fällen möglich, das zu erwartende Nutzerverhalten abzuschätzen. Meistens wird für thermisch-hygrische Nachweise das Normklima der ÖNORM B 8110-2 herangezogen. Um den Feuchteintrag in ein Gebäude nach der Widmung einzustufen, werden in Anhang A der EN ISO 13788 raumseitige Luftfeuchteklassen definiert und einer bestimmten Gebäudenutzung wird ein entsprechendes Raumklima zugeordnet. Dabei wird das raumseitige Dampfdruckgefälle bzw. die raumseitige Feuchtezufuhr gegen die Außenlufttemperatur, jeweils in Tages- oder Wochenmittelwerten, aufgetragen. Die Norm gibt daraufhin fünf Luftfeuchteklassen an, die bestimmten Gebäudetypen zugeordnet sind. Wohnhäuser werden in solche mit geringer Belegung und in jene mit hoher Belegung unterteilt, wobei es sich um die Luftfeuchteklassen drei und vier handelt. Der Unterschied liegt in der zulässigen Feuchtezufuhr.

In Abb. 44 wird das gemessene Innenklima in die Unterteilung der Luftfeuchteklassen eingeordnet. Aus den Tagesmittelwerten der Außen- und Innenlufttemperaturen sowie den Tagesmittelwerten der relativen Luftfeuchten wird das Dampfdruckgefälle zwischen Innen- und Außenklima bestimmt. Vergleicht man die über drei Jahre hindurch gemessenen Werte mit den Luftfeuchteklassen gemäß EN ISO 13788, kann man feststellen, dass die Trendlinie der raumseitigen Luftfeuchten großteils in den Bereich der Klasse 3 fällt. Die Klasse 3 wird laut Norm als „Wohnhäuser mit geringer Belegung“ definiert. Diese Einstufung trifft auf die tatsächliche Nutzung zu, da das untersuchte Objekt als Zweipersonenhaushalt genutzt wird.

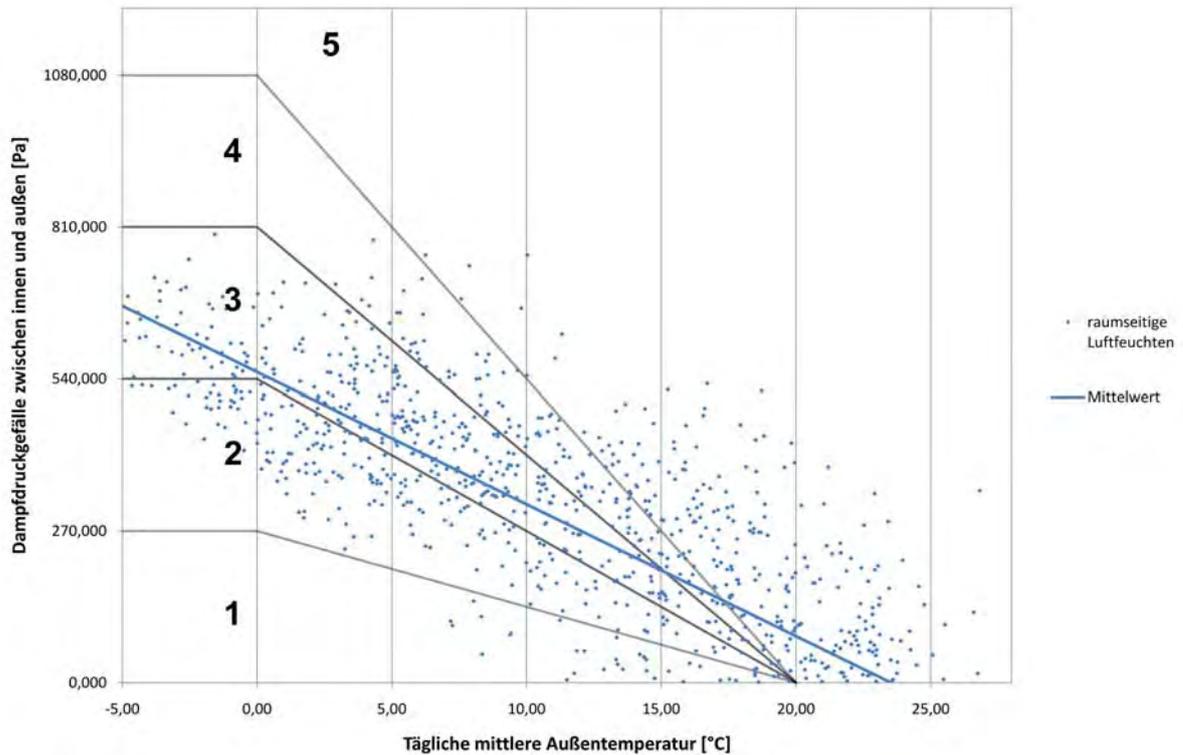


Abb. 44: Einstufung des Raumklimas in die Luftfeuchteklassen gemäß EN ISO 13788

5.5 Simulation mit HAM3D

Zur Untersuchung der Innendämmung aus Schilfdämmplatten wurden insgesamt elf Datenlogger an unterschiedlichen Positionen in die Konstruktion eingebaut. Wie bereits erwähnt, wird das hygrothermische Verhalten des Wandaufbaus anhand von vier Querschnitten analysiert. Trotzdem bleiben viele Bereiche der Konstruktion, vor allem Wärmebrücken in den Bauteilanschlüssen, unerforscht und es kann kein Urteil über die Funktionstüchtigkeit dieser Innendämmvariante in allen Bereichen abgegeben werden.

Daher wird im Folgenden versucht, die aufgezeichneten Werte in einer Simulation unter Einbeziehung des gemessenen Innen- und Außenklimas nachzustellen. Weiters wird die Möglichkeit von Schimmelpilzwachstum bei unterschiedlich dicken Dämmschichten analysiert.

5.5.1 Grundlagen des Simulationsprogramms

Das in der Abteilung Bauphysik des Instituts für Hochbau und Technologie der TU Wien entwickelte Simulationsprogramm HAM3D löst numerisch die Gleichungen für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Lufttransport in porösen Baustoffen unter Berücksichtigung vorgegebener Randbedingungen. Die Gleichungssysteme beruhen im Wesentlichen auf den Vorgaben der EN 15026. Weiters wird das Schimmelpilzpotential ermittelt, eine Größe zwischen 0 und 1, die angibt, wie hoch die Gefahr für das Einsetzen von Schimmelpilzwachstum ist. Steigt das

Schimmelpilzpotalential über 1, tritt Wachstum auf. In weiterer Folge ermittelt HAM3D das Ausmaß des Schimmelpilzwachstums. Außerdem berechnet das Programm eine mögliche Verrottung von organischem Material. Dabei wird wieder unterschieden, ob nur ein Verrottungspotential gegeben ist oder ob eine aktive Verrottung mit Massenverlust stattfindet. Die Berechnungen zu Schimmelpilzbildung und Verrottung stützen sich auf das Modell von Thelandersson und Isaksson [THE09].

5.5.2 Konstruktionsbedingte Eingabeparameter und Klimadaten

Die Simulation mit HAM3D berücksichtigt diverse Randbedingungen. Bei der Definition des zu simulierenden Wandaufbaus müssen Materialien angegeben werden, deren Kenngrößen in einer externen Materialdatenbank abgelegt sind. Das Klima kann entweder als konstant angenommen und direkt in der Eingabedatei oder durch eine Verlinkung auf eine Klimadatei definiert werden. Zum Vergleich der Simulation mit den gemessenen Daten wird das von den Datenloggern aufgezeichnete Innen- und Außenklima in Form einer externen Klimadatei herangezogen. Die zusätzlich zu den Messwerten Temperatur und relative Luftfeuchte erforderlichen Klimadaten sind in Tab. 8 zusammengefasst. Die solare Einstrahlung wurde nicht vor Ort gemessen, daher werden Messdaten von der Wetterstation des Bauphysiklabors der TU Wien verwendet. Die Werte für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, den effektiven Emissionsgrad der Wandoberfläche sowie den Absorptionsgrad werden unter Berücksichtigung der Materialien und der Witterungsverhältnisse gewählt und in der folgenden Tabelle angegeben. Da es sich um eine witterungsgeschützte, nach Süden orientierte Außenwand handelt, wird die Schlagregenbelastung vernachlässigt. Beobachtungen an der Versuchswand bestätigen diese Vorgangsweise.

Tab. 8: Klimadaten für die Simulation

	Innenklima Wandfläche	Innenklima Ecke	Außenklima Südseite	Außenklima Westseite
Lufttemperatur [°C]	aus Messung		aus Messung	
konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]	3	0	20	20
Strahlungstemperatur [°C]	wie Lufttemp.	wie Lufttemp.	Lufttemp. –3 K	Lufttemp. –5 K
effektiver Emissionsgrad [–]	0,9	0,75	0,9	0,9
solare Einstrahlung [W/m ²]	–	–	aus Messung	aus Messung
Absorptionsgrad [–]	–	–	0,6	0,6
relative Luftfeuchte [–]	aus Messung		aus Messung	

Da zwei unterschiedliche Wandquerschnitte, einer in der Wandfläche und einer in der Ecke, zur Simulation herangezogen werden, müssen auch zwei unterschiedliche Innen- und Außenklima-

ta definiert werden. Die Unterschiede im Innenklima ergeben sich durch den ungleichen Wärmeübergangskoeffizienten an der Wandfläche und in der Ecke. Die beiden Außenklimata divergieren aufgrund der unterschiedlichen solaren Einstrahlung bedingt durch die süd- bzw. westseitige Orientierung. Weiters ist die Strahlungstemperatur an der Südfassade höher, da das Gebäude in diesem Bereich großteils durch Bäume überschirmt ist.

Die Materialkennwerte wurden nicht mithilfe von Materialproben ermittelt, sondern hauptsächlich der MASEA-Datenbank entnommen, einer Materialdatensammlung für die hygrothermische Altbausanierung, zur Verfügung gestellt vom Fraunhofer Institut für Bauphysik. Dabei wurden jedoch einzelne am Bestandsobjekt gemessene Parameter, wie beispielsweise die Rohdichte des Mauerwerks, berücksichtigt. Die Wärmeleitfähigkeit von Lehmputz und jene der Schilfdämmplatten wurden aus Herstellerangaben übernommen. In der folgenden Tabelle sind die verwendeten Materialparameter zusammengefasst.

Tab. 9: Materialkennwerte

Material	λ [W/mK]	c [J/kgK]	ρ [kg/m ³]	μ [-]
Außenputz	0,2	850	850	10–18
Ziegelmauerwerk	0,7	800	1800	20–30
Innenputz	0,2	850	850	10–18
Wärmedämmputz	0,1	1000	400	6–8
Schilfdämmplatte	0,06	1300	150	2
Lehmputz	0,65	1000	1400	9–11

5.6 Vergleich von Simulations- und Messergebnissen

Die Simulation des hygrothermischen Verhaltens der Schilfennendämmung wird an zwei Querschnitten durchgeführt. Zuerst wird der ungestörte, eindimensionale Wandaufbau in der Mitte der Wandfläche untersucht. In einem zweiten Schritt wird der zweidimensionale Eckbereich, wo die Innendämmung an die ungedämmte Außenwand anschließt, simuliert. Die beiden Querschnitte sind als „Schnitt Mitte“ bzw. „Schnitt Ecke“ bezeichnet und in Abb. 27 und Abb. 28 auf den Seiten 72 und 73 dargestellt. Von diesen Querschnitten sind bereits Messdaten vorhanden, die im Folgenden mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Der Wandaufbau wurde in den Simulationen anhand der bauseitig aufgenommenen Abmessungen realitätsgetreu nachgebildet (vgl. Abb. 45). Das in der Simulation angesetzte Außen- und Innenklima entspricht den Messwerten des Außenloggers CH4 und des Raumluftloggers CH1.

Der Querschnitt in der Mitte der Wandfläche wird in der Simulation in Form eines 1 m² großen Wandflächenelements angenommen. Die adiabatischen Randbedingungen sind somit jeweils

50 cm von der Simulationsebene entfernt. Dies vermeidet mögliche Störungen der eindimensionalen Simulation.

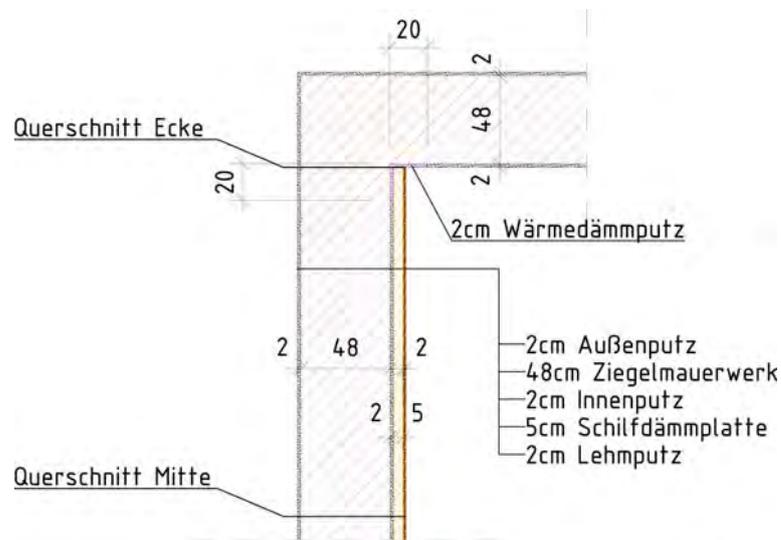


Abb. 45: Abmessungen der Bauteilschichten und Lage der Simulations- und Messquerschnitte

Vergleicht man die Werte von Messung und Simulation über drei Jahre hinweg, ist die Übereinstimmung des Temperaturverlaufs in der folgenden Abb. 46 sehr zufriedenstellend. Einzig die Temperatur auf der kalten Seite der Dämmung ist in der Simulation manchmal höher als die gemessene. Dies dürfte auf eine geringere solare Einstrahlung auf die Fassade im Vergleich zu den angenommenen Werten zurückzuführen sein, da diese nicht vor Ort, sondern an einem anderen Wiener Standort ermittelt wurden. Gleichzeitig gibt es sehr lange Perioden, in denen sich die Simulations- und Messwerte zwischen Dämmung und Bestandswand decken. Daher kann die Simulation in diesem Querschnitt als sehr realitätsnah bezeichnet werden.

Die grüne, von Logger CH6 aufgezeichnete, und die blaue, simulierte Temperaturkurve in Abb. 46 zeigen den Temperaturverlauf im Querschnitt Mitte. Die Kurven sind über große Bereiche annähernd deckungsgleich, wobei im Winter 2008 eine leichte Erhöhung der gemessenen Werte erkennbar ist. Da sich der Sensor dieses Loggers direkt im Lehmputz befindet, also nahe an der Innenoberfläche der Wand, ist der Temperaturverlauf sehr stark an die Raumlufttemperatur gebunden. Eine markante Veränderung des Wärmeübergangskoeffizienten an der Innenoberfläche dieses Bereichs kann zu einer erhöhten Temperaturdifferenz zwischen der Raumluft und dem Messfühler im Lehmputz führen. Die Tatsache, dass die Wandoberfläche in diesem Bereich zeitweise durch ein großes Ölbild verdeckt war (vgl. Abb. 38), könnte eine Erklärung für die Temperaturdifferenzen darstellen.

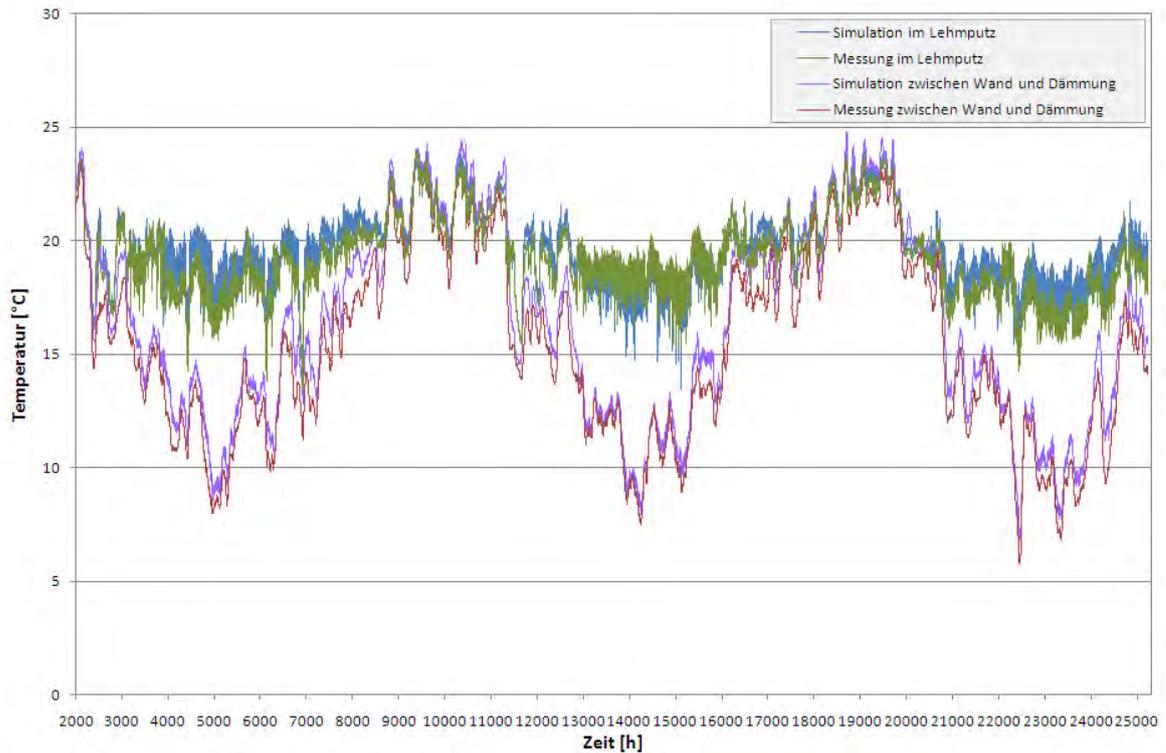


Abb. 46: Verläufe der gemessenen und simulierten Temperaturen im Querschnitt Mitte von September 2007 bis April 2010

Für den Vergleich der relativen Luftfeuchten wird zur besseren Veranschaulichung eine kürzere Zeitspanne gewählt. Es handelt sich dabei um den selben Zeitraum wie in Abschnitt 5.4, von 9.8.2009 bis 16.4.2010. Neben der Gegenüberstellung von Messung und Simulation können anhand der übereinander positionierten Abb. 47 und Abb. 48 die Temperaturen mit den zugehörigen relativen Luftfeuchten verglichen werden. In Abb. 48 ist die relative Luftfeuchte auf der kalten Seite der Dämmung, im Lehmputz sowie zusätzlich an der Innenoberfläche sowohl mit gemessenen als auch mit simulierten Werten dargestellt. In diesem Fall stimmen Messung (orange) und Simulation (grau) genau überein. Eine andere Situation tritt im Bereich des Loggers CH6 im Lehmputz auf. Die grüne Kurve (Messung im Lehmputz) zeigt um ca. 3 bis 6 % höhere Werte an als die blaue Kurve (Simulation im Lehmputz). Dies kann einerseits auf das bereits angesprochene Problem der verminderten Konvektion durch das in diesem Wandbereich hängende Ölbild zurückzuführen sein, andererseits besteht die Möglichkeit, dass in diesem Bereich eine Verzerrung des Temperaturfeldes vorliegt, was wiederum zu falschen relativen Luftfeuchtwerten führt. Um diesen Sachverhalt genauer zu erörtern, werden in Abb. 49 die aus den Simulationen und den Messwerten errechneten Partialdruckverläufe aufgetragen. Dabei kann man feststellen, dass sich die Kurven von Messung und Simulation decken. Dies bestätigt, dass die Simulation an sich schlüssig ist, jedoch haben die Ungenauigkeiten des Temperaturfeldes markante Auswirkungen auf die relativen Luftfeuchten.

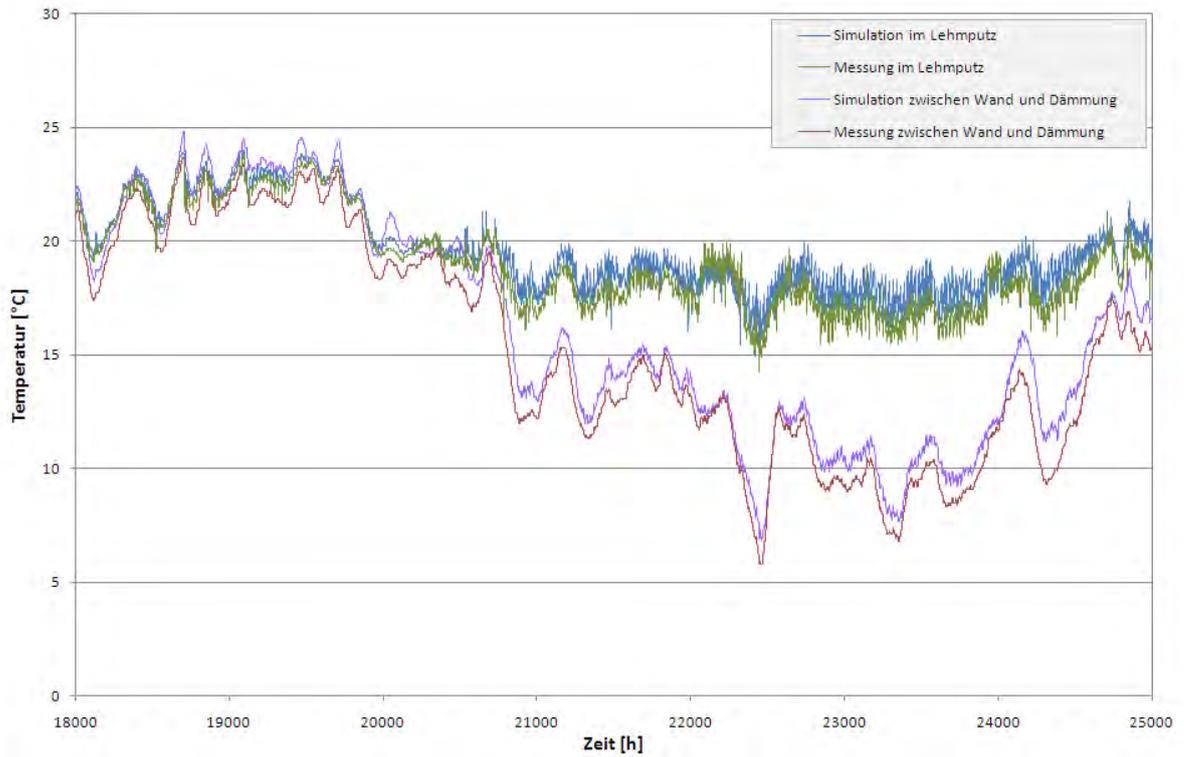


Abb. 47: Verläufe der gemessenen und simulierten Temperaturen im Querschnitt Mitte von 9.8.2009 bis 16.4.2010

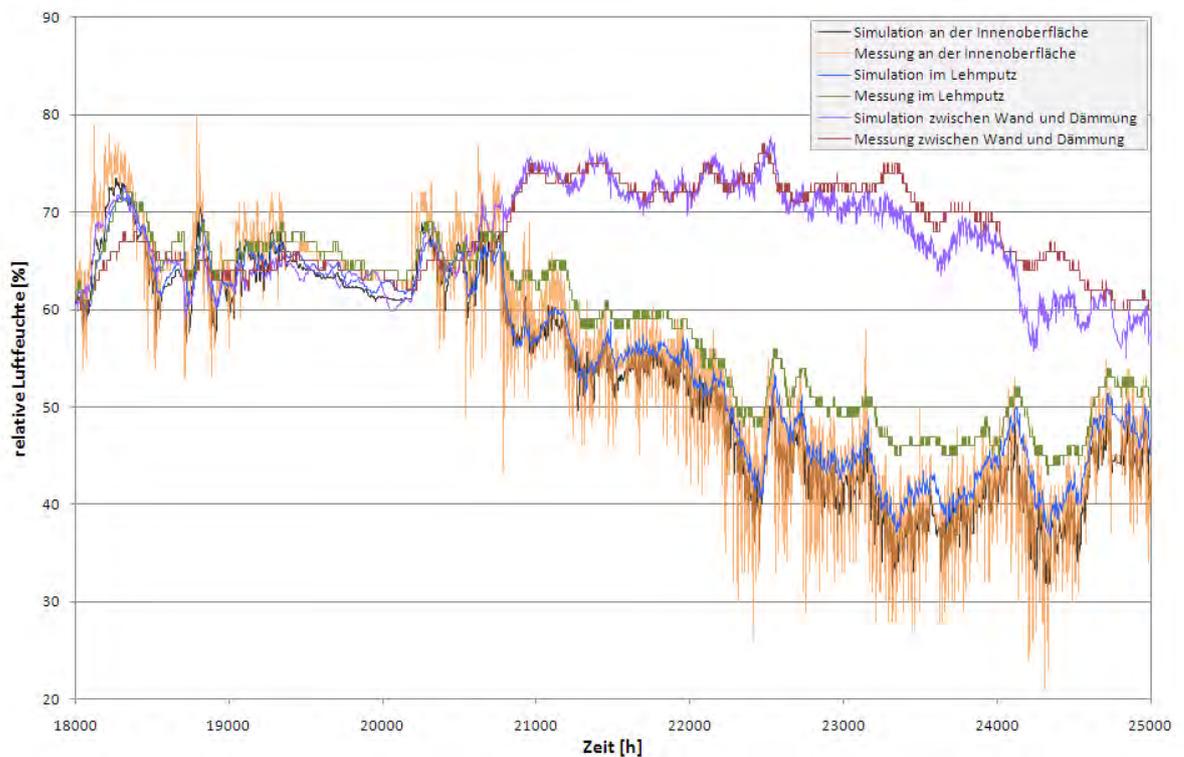


Abb. 48: Verläufe der gemessenen und simulierten relativen Luftfeuchten im Querschnitt Mitte von 9.8.2009 bis 16.4.2010

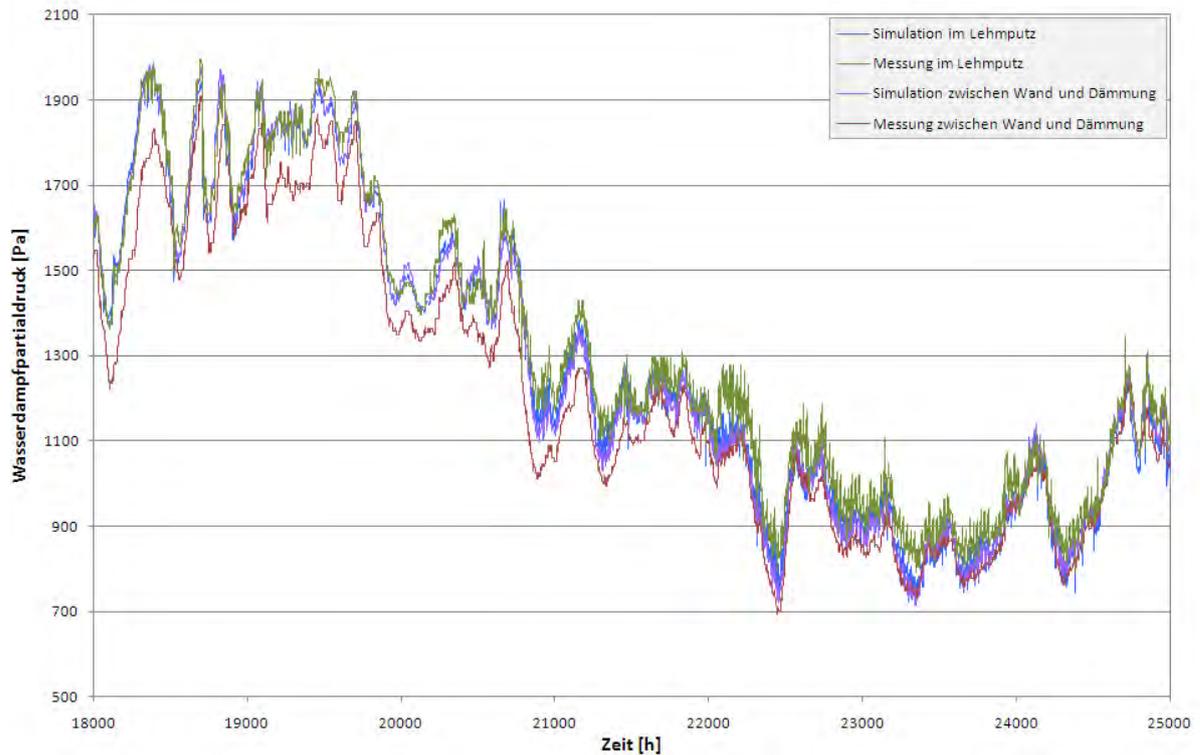


Abb. 49: Verläufe der berechneten Partialdrücke aus gemessenen und simulierten Daten im Querschnitt Mitte von 9.8.2009 bis 16.4.2010

Ein zweiter Vergleich der aufgezeichneten Messwerte mit der Simulation wird im Querschnitt Ecke durchgeführt. In diesem Bereich schließt die innengedämmte Konstruktion an eine ungedämmte Außenwand an. Abb. 51 und Abb. 52 zeigen die Temperaturverläufe im Querschnitt Ecke. Außerdem ist in den Diagrammen die gemessene Temperaturkurve des Sensors CH3, der im Querschnitt Mitte zwischen Schilfdämmplatte und Bestandswand angebracht ist, dargestellt.

Die an den Wandaufbau angrenzenden adiabatischen Randbedingungen sind im Simulationsmodell des Querschnitts Ecke jeweils 1 m vom Berechnungsquerschnitt entfernt definiert. Dadurch wird sichergestellt, dass keine störenden Einwirkungen die Simulation in der Ecke verfälschen. Zur Überprüfung der Korrektheit der Simulation in der Ecke wird auch in diesem Simulationsmodell das eindimensionale hygrothermische Verhalten in der Wandfläche berechnet und mit den Werten des Querschnitts Mitte verglichen. Zu diesem Zweck werden zusätzliche Recorderpositionen in einem „Referenzquerschnitt Mitte“ definiert, wie in Abb. 50 veranschaulicht. Stimmen die Simulationswerte an diesen Positionen mit den Werten aus der Simulation des Querschnitts Mitte überein, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Simulationswerte in der Ecke korrekt sind. Diese Validierung beschränkt sich jedoch auf die beiden Simulationsmodelle und gibt kein Urteil über den Vergleich zwischen Messung und Simulation ab.

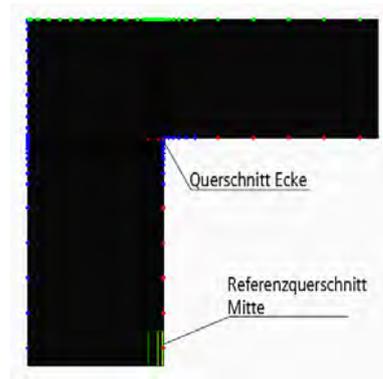


Abb. 50: Recorderpositionen der Simulation im Querschnitt Ecke

Die rote Datenkurve der Messung zwischen Wand und Dämmung in der Wandfläche (vgl. Abb. 52), also im Querschnitt Mitte, ist ziemlich deckungsgleich mit der violetten Kurve der Simulation im Referenzquerschnitt Mitte. Daher ist die im letzten Absatz angesprochene Validierung der Simulation in der Ecke bestätigt.

Betrachtet man den Vergleich von Messung und Simulation in der Ecke in Abb. 51 und Abb. 52 genauer, stellt man fest, dass die Kurven der Oberflächentemperaturen trotz ihrer großen Schwankungsbreiten fast gänzlich übereinander liegen. Die orange Messkurve überdeckt fast gänzlich die hellblaue Simulationskurve. Auffällig ist, dass die starken Temperaturabfälle infolge des Stoßlüftens im Winter (vgl. Abb. 52) in der Messung deutlicher auftreten als in der Simulation. Weiters ist eine erhöhte gemessene Oberflächentemperatur in den Messstunden 4900 bis 5400 zu erkennen. Da dieser Messbereich die kältesten Tage des Jahres umfasst und in diesem Zeitraum die Innenoberflächentemperatur generell das niedrigste Niveau des Jahres aufweist, liegt hier die Vermutung nahe, dass der Temperatureinfluss in der Messung von einem 30 cm vom Messsensor der Ecke entfernten Heizkörper herrührt. Für gewöhnlich ist der Radiator nicht in Betrieb, jedoch besteht die Möglichkeit, dass sich infolge der niedrigen Oberflächentemperaturen das Thermostatventil geöffnet und zumindest eine geringe Temperierung des Heizkörpers stattgefunden hat.

Eine weitaus auffälligere Divergenz zeigen die Mess- und Simulationskurven an der Position zwischen Dämmung und Wand. Die gelbe Simulationskurve weist durchwegs um 1 – 4 Kelvin geringere Temperaturwerte auf als die tatsächlich im Zuge der Messung aufgezeichneten. Das bedeutet, dass die Temperatur zwischen Dämmung und Wand in der Realität deutlich höher war, als die Simulation sie berechnet. Wie die folgenden zwei Abbildungen zeigen, nimmt der Unterschied zu, je größer die Spreizung zwischen Außen- und Innenlufttemperatur ist. Dieses Phänomen tritt in allen drei Wintern auf, was einen temporären Wärmeeinfluss auf die Messung ausschließt.

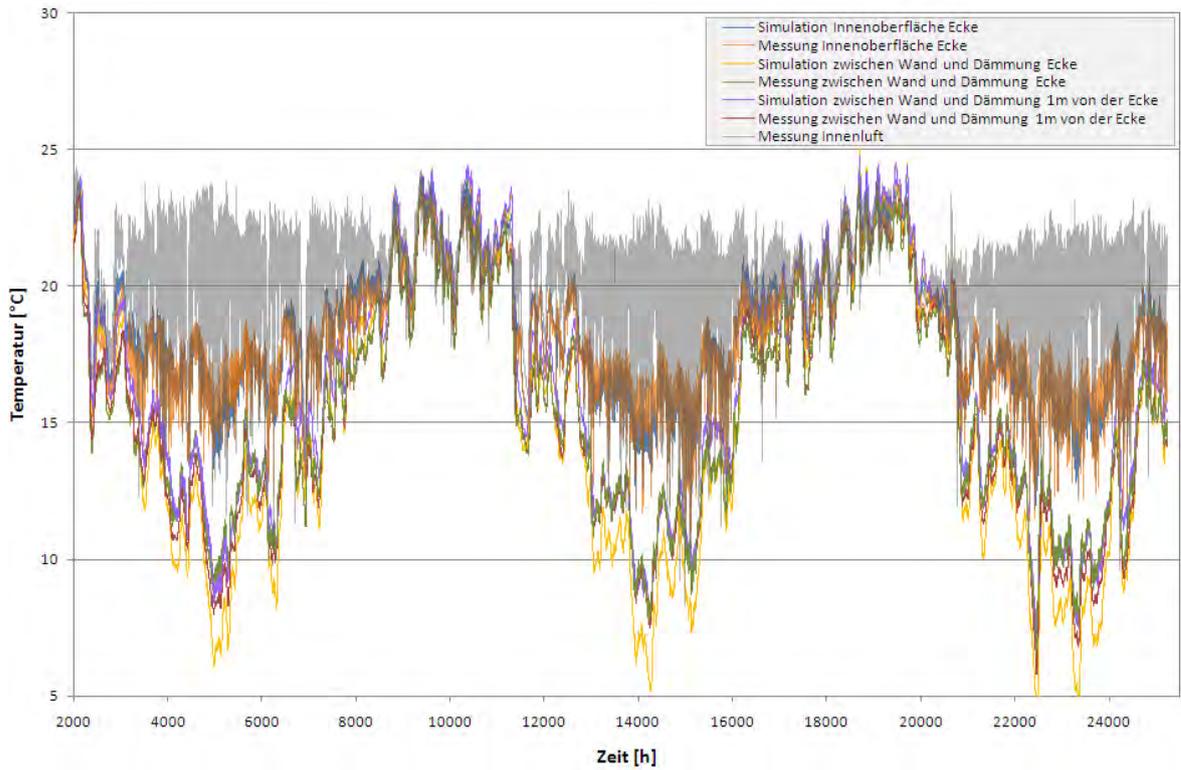


Abb. 51: Verläufe der gemessenen und simulierten Temperaturen im Querschnitt Ecke von September 2007 bis April 2010

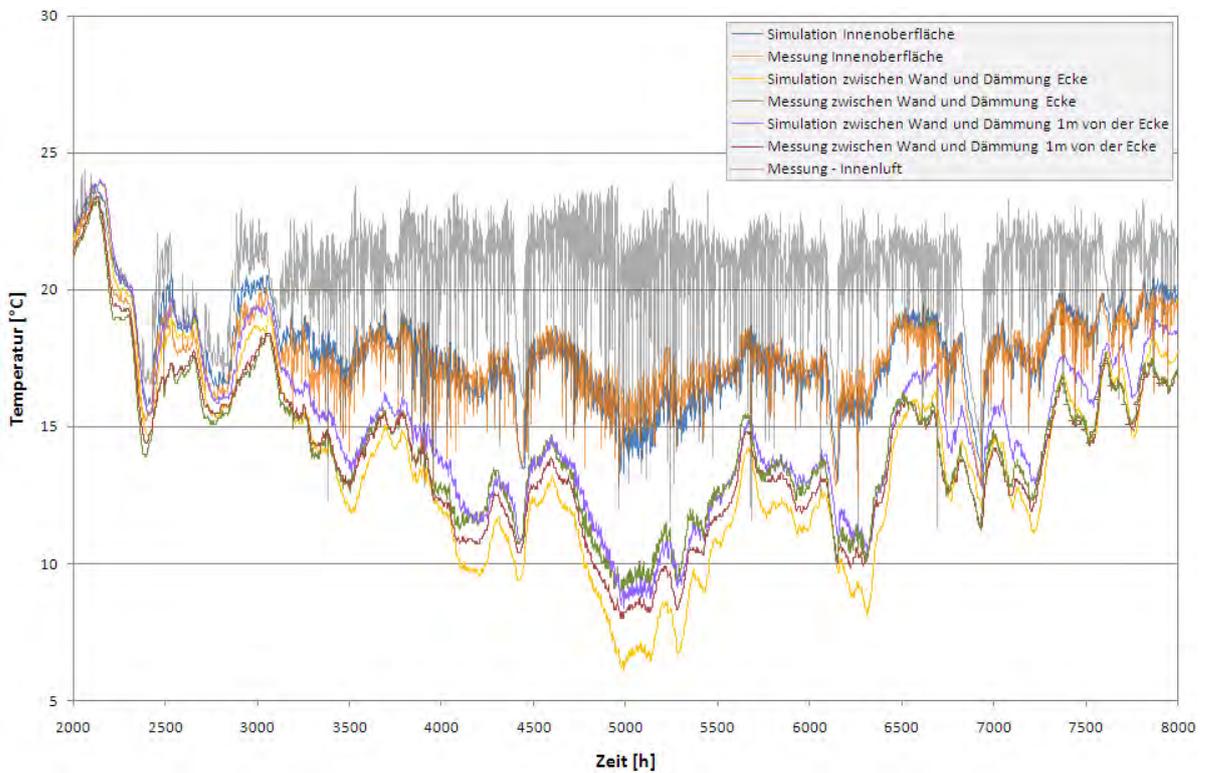


Abb. 52: Verläufe der gemessenen und simulierten Temperaturen im Querschnitt Ecke von 22.8.2007 bis 28.4.2008

Um die Ursache für die Divergenz der Temperaturkurven im kalten Bereich der Dämmung zu erforschen, werden im Folgenden die relativen Luftfeuchten im betrachteten Zeitraum dargestellt. Dabei zeigt sich, dass zwar wie in Abb. 51 und Abb. 52 die Messung und die Simulation an der Innenoberfläche nahezu deckungsgleich sind, die Kurven der relativen Luftfeuchten zwischen Dämmung und Wand jedoch stark voneinander abweichen.

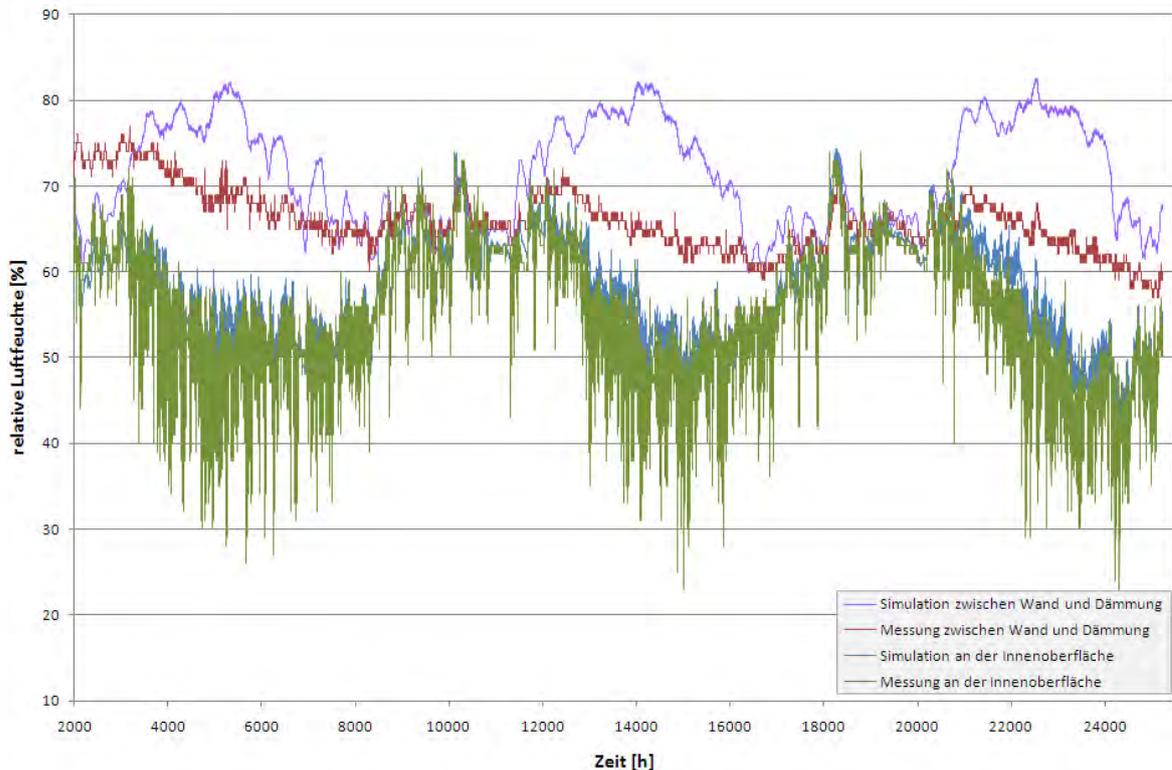


Abb. 53: Verläufe der gemessenen und simulierten relativen Luftfeuchten im Querschnitt Ecke von September 2007 bis April 2010

Aufgrund des Zusammenhangs von Temperatur und relativer Luftfeuchte sind die Abweichungen in Abb. 53 eindeutig erklärbar. Im Winter, wenn die simulierte Temperatur unter die tatsächlich gemessenen Werte absinkt, muss unter der Annahme einer korrekten Berechnung und gleich großer absoluter Luftfeuchten die relative Luftfeuchte der Simulation im selben Bereich höher sein als jene der Messung. Um diesen Sachverhalt zu bestätigen, werden in Abb. 54 die errechneten Partialdruckverläufe der Mess- und Simulationswerte dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Partialdruckkurven gut übereinstimmen und dass die Simulation daher als korrekt angesehen werden kann.

Bezugnehmend auf das in Abb. 44 beschriebene Partialdruckgefälle werden in Abb. 54 die Partialdruckverläufe der Außen- und Innenluft dargestellt. Dabei wird der vor allem in den Wintermonaten vorherrschende Partialdruckunterschied deutlich sichtbar.

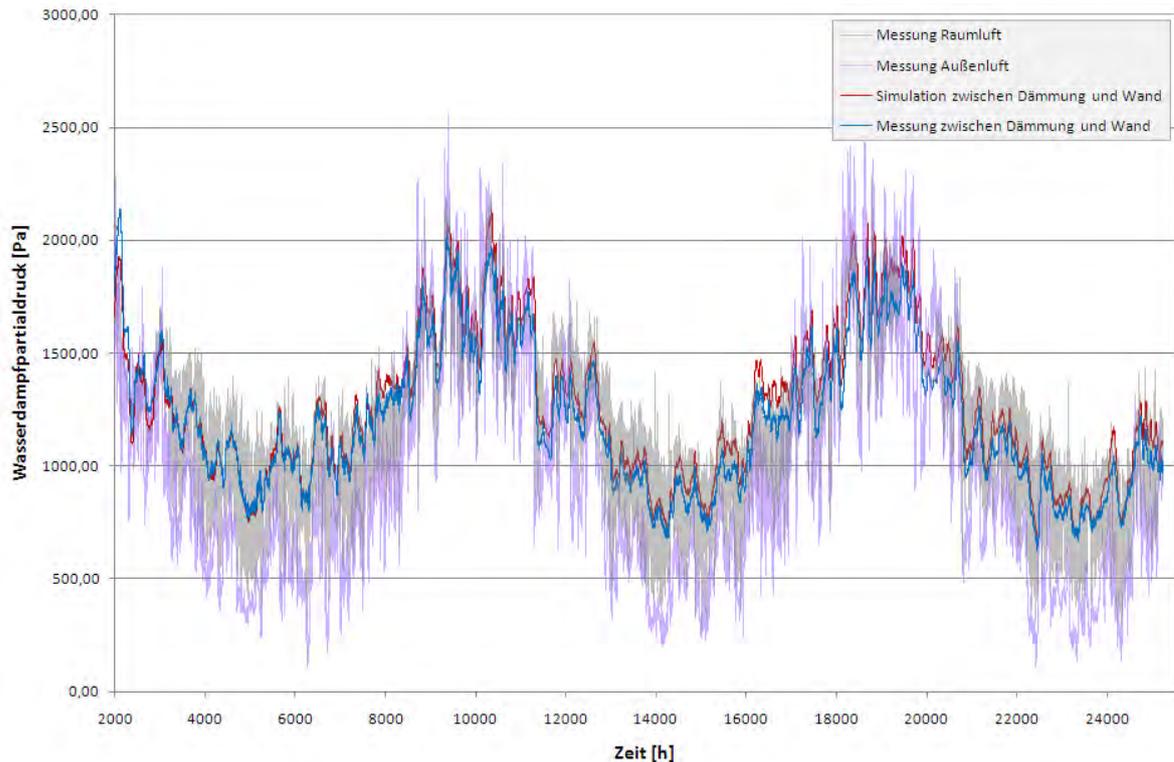


Abb. 54: Verläufe der berechneten Partialdrücke aus gemessenen und simulierten Daten im Querschnitt Ecke von September 2007 bis April 2010

Nach der Klärung der Ursache für die Abweichungen bei Temperatur und relativer Luftfeuchte zwischen der Simulation und den Messergebnissen im Querschnitt Ecke sollen nun die Gründe für die Temperaturunterschiede im Eckbereich hinter der Dämmung eruiert werden.

Da die Partialdrücke von Messung und Simulation übereinstimmen und ein Berechnungsfehler von Seiten des Simulationsprogramms ausgeschlossen werden kann, muss der Temperaturunterschied entweder durch Randbedingungen oder Materialkennwerte, die nicht der Realität entsprechen, hervorgerufen werden. Ein Wärmeeintrag durch Installationsleitungen kann in diesem Wandbereich ausgeschlossen werden, da weder Elektro- noch Sanitär- oder Heizungsinstallationen in dieser Wand verlegt wurden. Ein konvektiver Wärmeeintrag durch die Anschlussfuge der Dämmung an die ungedämmte Außenwand ist nach eingehender Untersuchung am Bestandsobjekt ebenfalls auszuschließen. Die Anschlussfuge wurde im Zuge der Malerarbeiten mit Acrylmasse abgedichtet und weist nach drei Jahren keine Risse auf.

Mögliche Unterschiede zwischen dem Simulationsmodell und der Realität zeichnen sich bei den Materialparametern ab. Wie bereits erwähnt, wurden die Materialkennwerte nicht gemessen, sondern entweder von Herstellerangaben übernommen oder aus der MASEA-Datenbank des Fraunhofer Instituts für Bauphysik entnommen. Die auftretenden Ungenauigkeiten bei der Temperatur sind vermutlich auf die Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen, denn wie in Tab. 9 ersichtlich, werden bei der Simulation isotrope Baustoffe angenommen, das heißt, die Wärme-

leitfähigkeit ist in allen drei Dimensionen gleich groß. Es stellt sich jedoch im vorliegenden Fall heraus, dass die Schilfdämmplatte ein anisotropes Werkstoffverhalten aufweist, das vor allem bei der Wärmeleitfähigkeit beachtet werden muss. Aufgrund der parallelen Anordnung der Schilfrohre, die im Wesentlichen mit Luft gefüllt sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit in Richtung der Schilfhalme höher ist als quer zu den Fasern. Diese Vermutung wird durch die höheren Temperaturen, die im Eckbereich zwischen Dämmung und Außenwand gemessen wurden, bestätigt.

Die Abb. 55 zeigt den Anschluss der Schilfdämmplatten an die Außenwand in der Ecke. Dabei ist zu erkennen, dass durch die horizontal liegenden Schilfrohre Wärme in die Ecke eingeleitet und so die Temperatur an der kalten Seite der Dämmung angehoben werden könnte. Grundsätzlich ist HAM3D in der Lage, auch anisotrope Baustoffe zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden jedoch keine Werkstoffparameter erhoben, daher kann die vorliegende Hypothese nicht verifiziert werden. Eine eingehende Analyse der Werkstoffparameter würde den Umfang dieser Arbeit sprengen, sollte jedoch Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.



Abb. 55: Anschluss der Schilfdämmung in der Außenecke

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die durchgeführten numerischen Simulationen mit HAM3D mit den gemessenen Werten der letzten drei Jahre gut übereinstimmen. Die relativen Luftfeuchten zwischen Dämmung und Bestandswand bleiben mit wenigen kurzzeitigen Überschreitungen durchwegs unter 80 %. Die Temperaturen sind dabei relativ niedrig,

sodass die Gefahr von Sporenwachstum de facto nicht gegeben ist. Das Risiko von Schimmelpilzbildung anhand von Simulationen verschiedener Dämmstärken wird im folgenden Abschnitt genauer analysiert.

Die Divergenzen des Temperaturfeldes zwischen Messung und Simulation an der kalten Seite der Dämmung im Eckbereich werden vermutlich durch einen Wärmeeintrag infolge Anisotropie der Schilfdämmplatten hervorgerufen. Wegen der niedrigeren Temperaturen liegt die Simulation bezogen auf das Schimmelpilzrisiko in diesem Bereich jedenfalls auf der sicheren Seite, da sie ungünstigere Bedingungen darstellt als die tatsächlich vorherrschenden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass es in der Realität zu keinem Schimmelpilzwachstum kommt, wenn HAM3D für eine bestimmte Dämmstärke kein Gefahrenpotential ermittelt.

5.7 Simulation unterschiedlicher Dämmstärken bei gemessenem Klima und Konstantklima im Vergleich

Die beschriebenen Simulationen beruhen auf der Überlegung, dickere Dämmschichten aus Schilfdämmplatten herzustellen, um die Transmissionswärmeverluste zu minimieren. Da der Dämmstoff in Plattenstärken von 2 cm und 5 cm am Markt verfügbar ist, werden folgende mögliche Dämmstärken als Kombination dieser beiden Plattendicken behandelt. Neben der im Versuchsprojekt eingebauten Dämmung von 5 cm Dicke werden weiters Wandaufbauten mit 7 cm, 10 cm und 12 cm Dämmstärke simuliert. Die Bauteilabmessungen sowie die übrigen Materialien und deren Kennwerte bleiben unverändert.

Zusätzlich zum gemessenen Raumklima wird eine Simulation mit einem Konstantklima durchgeführt. Dabei werden eine konstante Innenlufttemperatur von 20 °C und eine konstante relative Raumluftfeuchte von 50 % angenommen. Das Außenklima bleibt bei diesen Simulationen unverändert.

5.7.1 Entwicklung der relativen Luftfeuchte an der kalten Seite der Dämmung in Abhängigkeit von Dämmstärke und Klima

Aus den hygrothermischen Zusammenhängen ergibt sich, dass bei zunehmender Dämmstärke die Temperatur zwischen Dämmung und Außenwand abnimmt. Gleichzeitig steigt in diesem Bereich die relative Luftfeuchte an. In Abhängigkeit dieser beiden Parameter kann die Gefahr für Sporenauskeimung bzw. Myzelwachstum und Schimmelpilzbildung ermittelt werden. Darauf wird in Abschnitt 5.7.2 genauer eingegangen.

In den folgenden vier Diagrammen (Abb. 56 bis Abb. 59) werden die relativen Luftfeuchten an der kalten Seite der Dämmung bei gemessenem und bei Konstantklima in den vier zuvor erwähnten Dämmstärken gegenübergestellt.

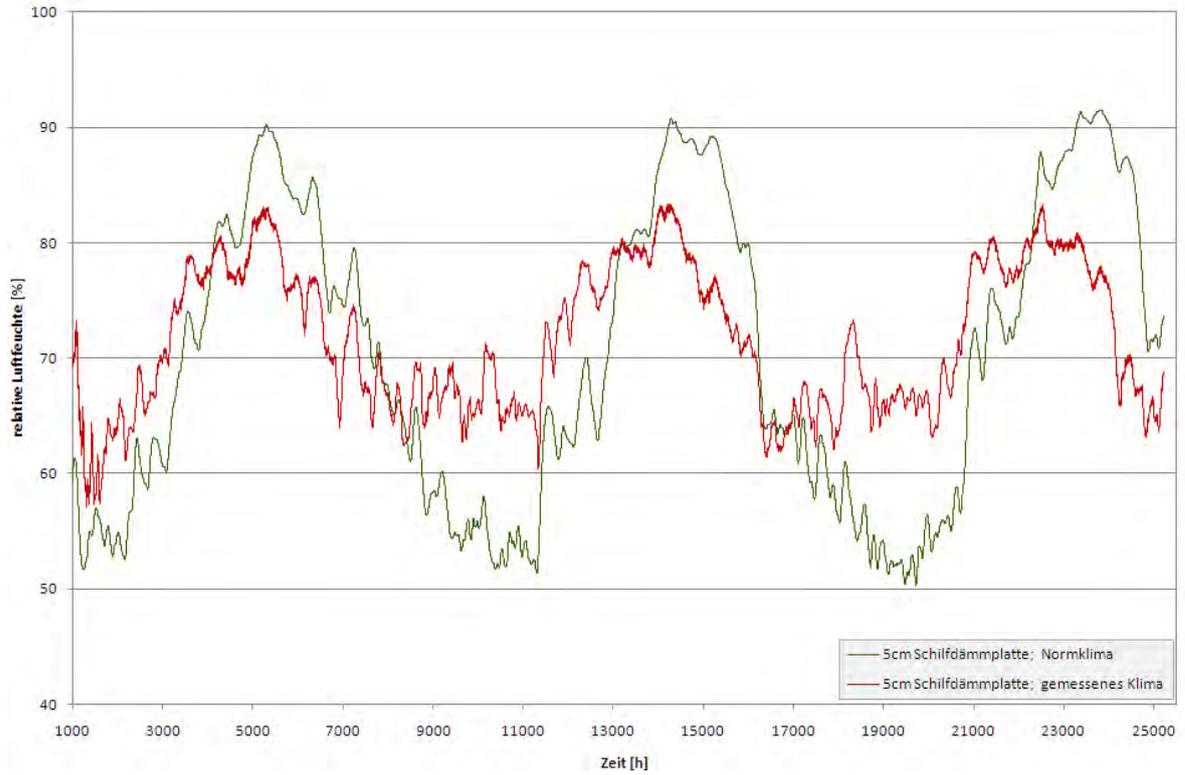


Abb. 56: Vergleich der relativen Luftfeuchten an der kalten Seite einer 5 cm dicken Schilfdämmung in der Ecke bei gemessenem Raumklima und Normklima von 12.7.2007 bis 16.4.2010



Abb. 57: Vergleich der relativen Luftfeuchten an der kalten Seite einer 7 cm dicken Schilfdämmung in der Ecke bei gemessenem Raumklima und Normklima von 12.7.2007 bis 16.4.2010



Abb. 58: Vergleich der relativen Luftfeuchten an der kalten Seite einer 10 cm dicken Schilfdämmung in der Ecke bei gemessenem Raumklima und Normklima von 12.7.2007 bis 16.4.2010



Abb. 59: Vergleich der relativen Luftfeuchten an der kalten Seite einer 12 cm dicken Schilfdämmung in der Ecke bei gemessenem Raumklima und Normklima von 12.7.2007 bis 16.4.2010

Der Vergleich der relativen Luftfeuchten zeigt, dass das reale, gemessene Klima (rote Kurve) in den Wintermonaten geringere und in den Sommermonaten höhere Luftfeuchten zwischen Dämmung und Bestandswand hervorruft als das Konstantklima (grüne Kurve). Weiters ist festzustellen, dass mit zunehmender Dämmstärke die Differenz der Luftfeuchtespitzen geringer wird. Während sich die Spitzenwerte im ersten aufgezeichneten Winter bei 5 cm Dämmung um 7,3 % relative Luftfeuchte unterscheiden, beträgt die Differenz bei 12 cm Schilfdämmung im selben Vergleichszeitraum nur mehr 4,0 %. Ein ähnliches Bild zeichnet sich in den anderen beiden Kälteperioden ab.

Vergleicht man nun die unterschiedlichen Dämmstärken miteinander, jedoch für jedes Klima getrennt, zeichnet sich bei zunehmender Dämmstärke eine Zunahme der relativen Luftfeuchte auf der kalten Seite der Dämmung ab. Hier fallen die Unterschiede bei geringen Dämmstärken größer aus als bei dickeren Dämmschichten. Beim direkten Vergleich der Abb. 60 mit der Abb. 61 wird außerdem offenbar, dass die Differenzen im Feuchteverlauf unter den gemessenen, realen Klimabedingungen wesentlich größer sind als unter den konstanten Klimaverhältnissen. Weiters liegt bei einer dünnen Dämmung unter realen Klimabedingungen eine verhältnismäßig geringere relative Luftfeuchte vor als bei konstantem Klima. Es wird dadurch bestätigt, dass kleine Dämmstärken von 5 cm bis 7 cm in Kombination mit einem richtigen Nutzerverhalten ein wesentlich geringeres Schadensrisiko bergen als größere Dämmstärken.

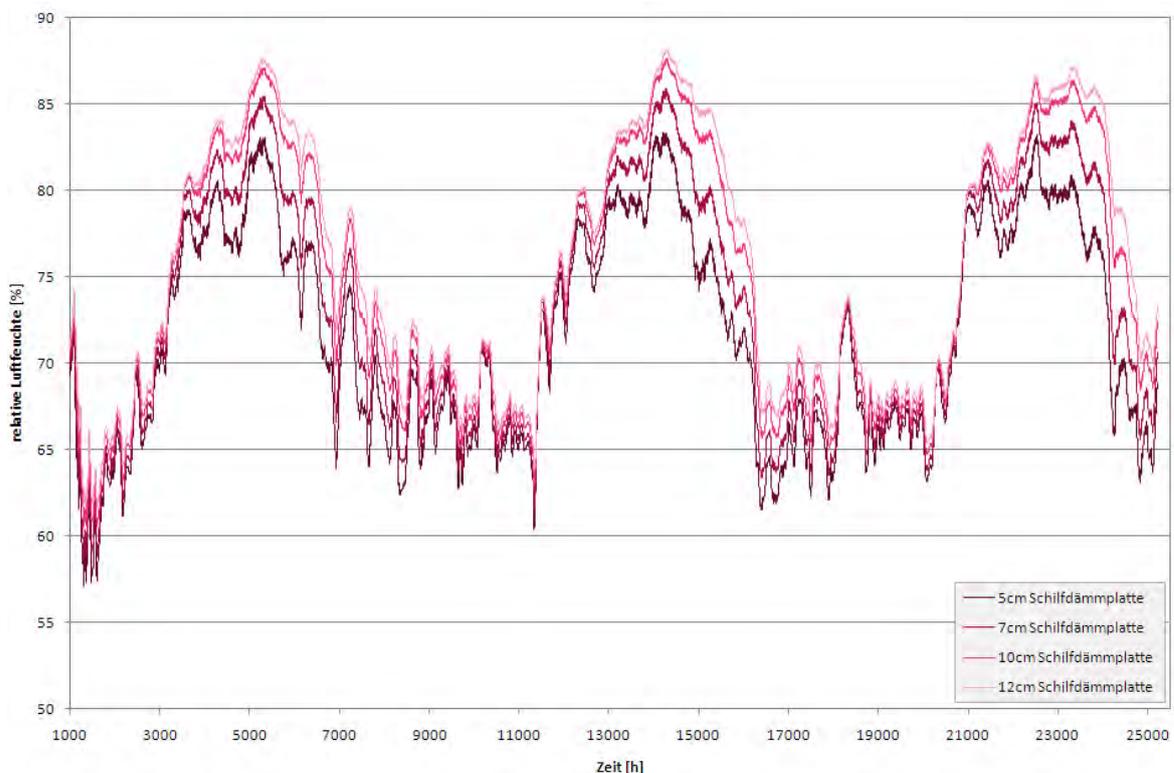


Abb. 60: Vergleich der relativen Luftfeuchten an der kalten Seite Schilfdämmung in der Ecke bei gemessenem Raumklima von 12.7.2007 bis 16.4.2010

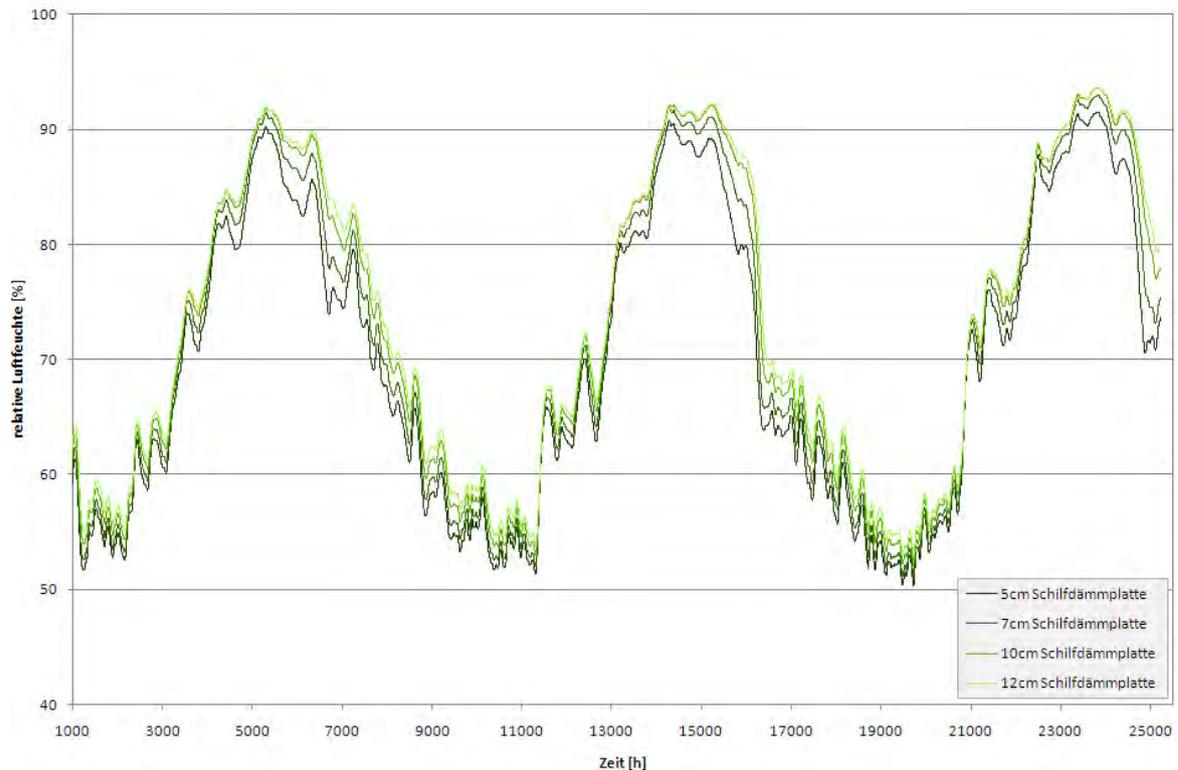


Abb. 61: Vergleich der relativen Luftfeuchten an der kalten Seite der Schilfdämmung in der Ecke bei Normklima von 12.7.2007 bis 16.4.2010

5.7.2 Ermittlung des Schimmelpilzpotentials bei unterschiedlichen Dämmstärken

Wie in den Abschnitten zuvor beschrieben, steigt bei dickeren Dämmstärken die relative Luftfeuchte auf der kalten Seite der Dämmung an. Das dadurch erhöhte Schimmelpilzrisiko wird weiters von den vorherrschenden Temperaturverhältnissen und der Dauer dieses Zustandes beeinflusst.

Im Folgenden wird die Sporenauskeimung anhand des Isolethenmodells untersucht. Dabei werden jeweils die Tagesmittelwerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte gegeneinander aufgetragen. Das Ergebnis ist eine Punktwolke, die durch die LIM-Kurve (Lowest Isoleth for Mould) nach Sedlbauer [SED01] bewertet wird. Alle Punkte, die über der LIM-Kurve liegen, weisen auf Tagesmittelwerte hin, an denen die Klimabedingungen für eine Sporenauskeimung vorhanden sind. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es an diesen Tagen wirklich zu einem Schimmelpilzwachstum kommt. Zur genaueren Analyse werden zusätzlich Diagramme erstellt, die das Schimmelpilzpotential, das HAM3D in einer Simulation ermittelt, wiedergeben. Erreicht das Schimmelpilzpotential infolge der Randbedingungen den Wert 1, dann tritt Wachstum auf. Damit das Schimmelpilzwachstum über eine längere Zeitdauer auftreten und somit auch eine Sporenauskeimung stattfinden kann, muss das Potential mit dem Wert 1 für eine bestimmte Zeitdauer, die vom Material und von der Pilzspezies abhängig ist, bestehen bleiben.

Abb. 62 bis Abb. 69 zeigen zuerst die Isoplethenmodelle für die jeweilige Dämmstärke und das jeweilige Klima, links die Berechnung mit dem gemessenen Klima unter Nutzerverhalten und rechts die Berechnung mit Konstantklima bei 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte. Darunter sind die dazugehörigen Diagramme mit dem Schimmelpilzpotalential abgebildet. Anhand dieser Darstellungen wird deutlich, dass die erforderlichen Wachstumsbedingungen immer nur sehr kurz auftreten. Außerdem ist das Potential für das Wachstum sehr gering und liegt nur zwischen 0 und 1,5 % bei 5 cm Dämmstärke bzw. zwischen 1,2 und 5,0 % bei 12 cm Dämmstärke. Die Maximalwerte nehmen mit der Dicke der Dämmung zu und sind generell bei Verhältnissen unter dem angenommenen konstanten Klima höher als beim gemessenen realen Klima.

Aufgrund des geringen Schimmelpilzpentials und des immer nur kurzfristigen Vorherrschens der Wachstumsbedingungen tritt während der gesamten Simulationsdauer kein Schimmelpilzwachstum in der Konstruktion auf.

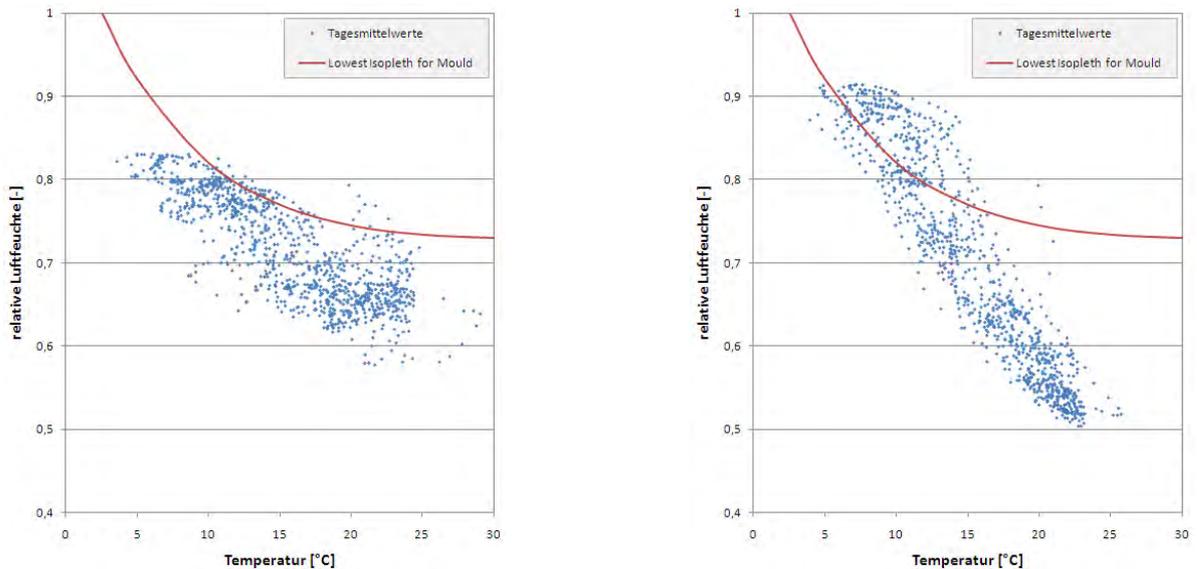


Abb. 62: LIM-Kurve für die Sporenauskeimung bei gemessenem Klima (links) und bei Konstantklima (rechts) bei 5 cm Dämmstärke

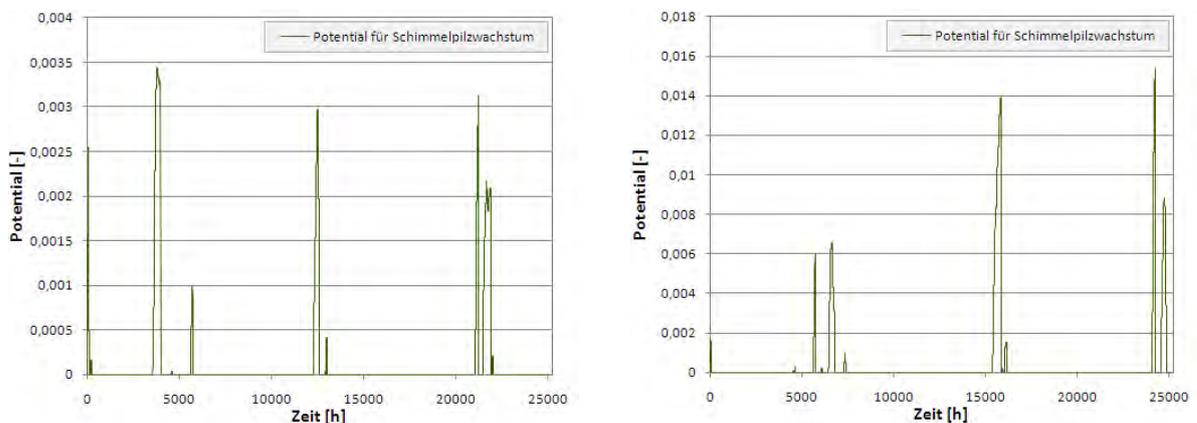


Abb. 63: Schimmelpilzpotalential zwischen Dämmung und Wand in der Ecke bei 5 cm Dämmstärke bei gemessenem Klima (links) und bei Konstantklima (rechts)

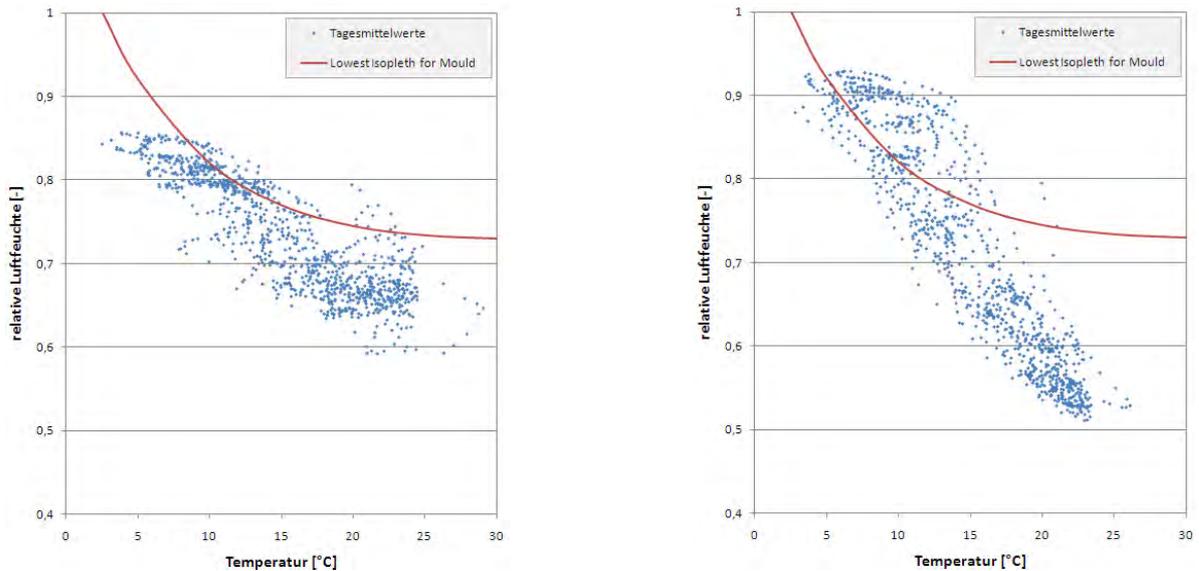


Abb. 64: LIM-Kurve für die Sporenauskeimung bei gemessenem Klima (links) und bei Konstantklima (rechts) bei 7 cm Dämmstärke

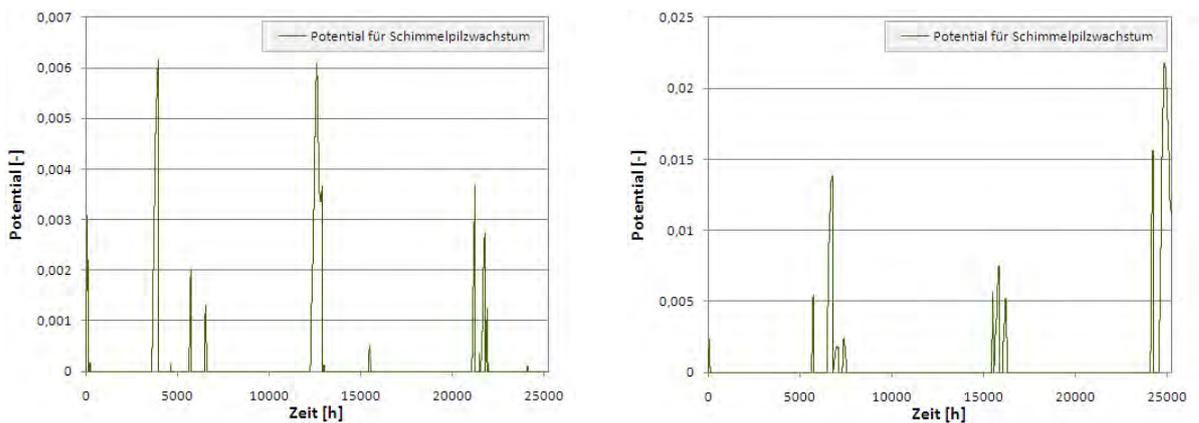


Abb. 65: Schimmelpilzpotential zwischen Dämmung und Wand in der Ecke bei 7 cm Dämmstärke bei gemessenem Klima (links) und bei Konstantklima (rechts)

Vergleicht man das gemessene mit dem konstanten Klima, zeigt sich bei konstanten Klimaverhältnissen eine deutlich höhere Sporenauskeimung als beim gemessenen Klima. Daher lässt sich anhand dieser Abbildungen ein weiteres Mal belegen, wie wesentlich ein richtiges Nutzerverhalten, vor allem in Bezug auf das Lüftungsverhalten, ist. Denn durch ein regelmäßiges Stoßlüften während der kalten Jahreszeit sinkt die Raumlufffeuchte bei jedem Lüftungsvorgang markant ab, um sich danach wieder langsam anzupassen. Dadurch entsteht, wie im vorliegenden Beispiel gemessen, ein geringerer Feuchteintrag in die Wandkonstruktion und das Schimmelpilzrisiko an der kalten Seite der Dämmung wird minimiert.

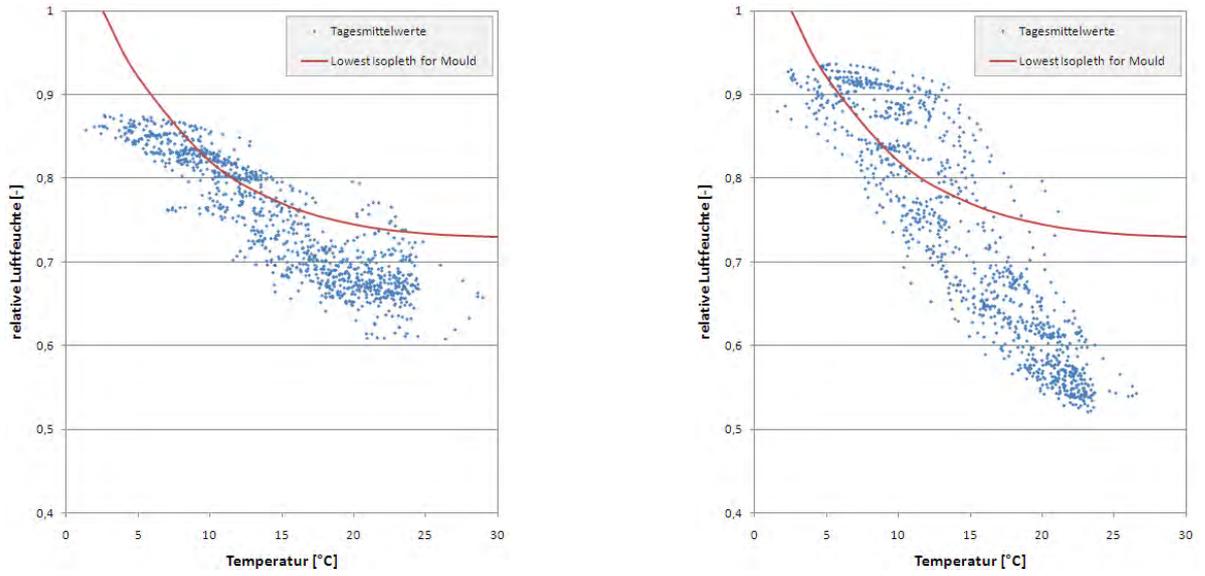


Abb. 66: LIM-Kurve für die Sporenauskeimung bei gemessenem Klima (links) und bei Konstantklima (rechts) bei 10 cm Dämmstärke

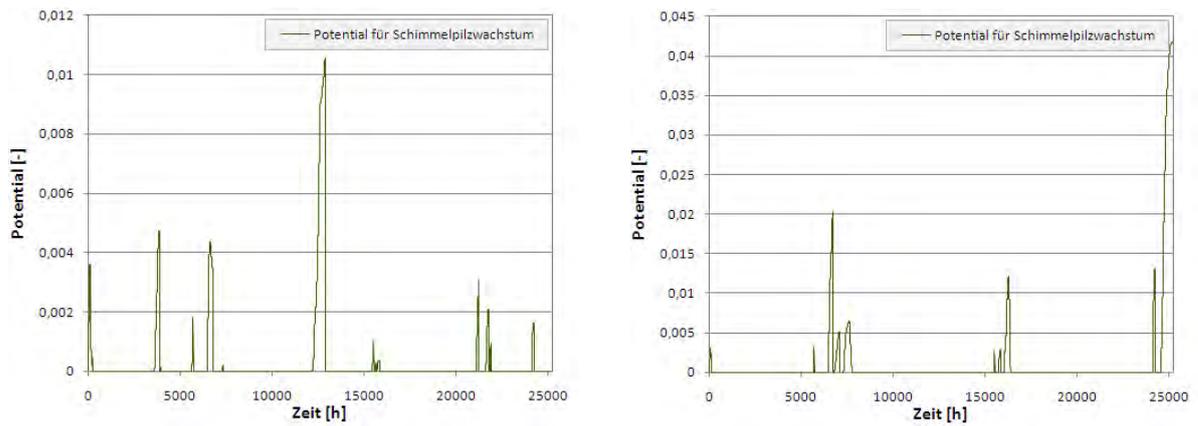


Abb. 67: Schimmelpilzpotential zwischen Dämmung und Wand in der Ecke bei 10 cm Dämmstärke bei gemessenem Klima (links) und bei Konstantklima (rechts)

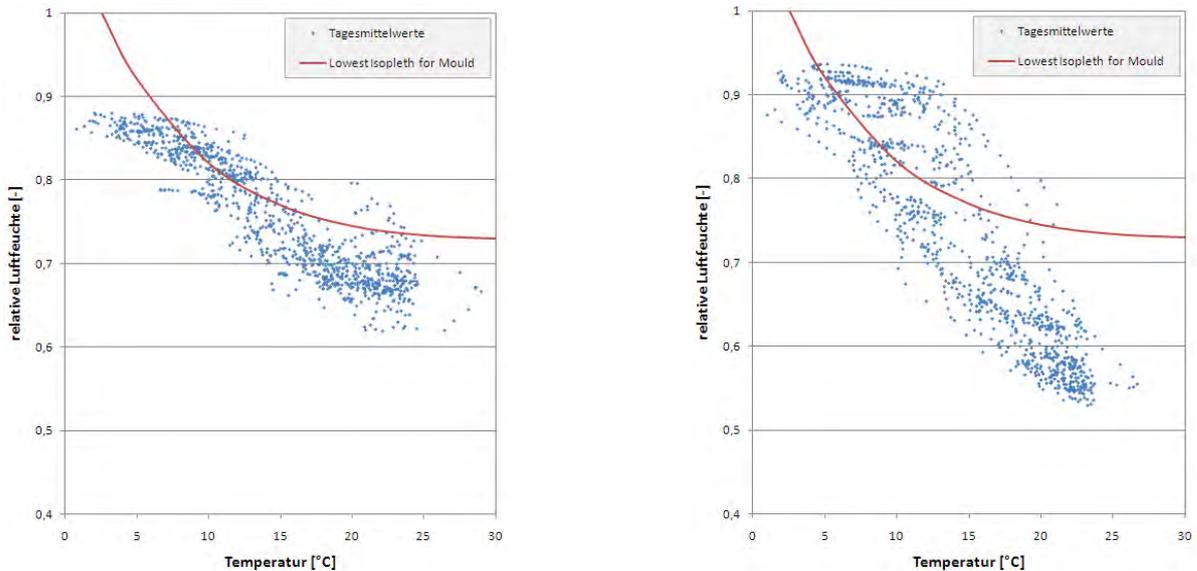


Abb. 68: LIM-Kurve für die Sporenauskeimung bei gemessenem Klima (links) und bei Konstantklima (rechts) bei 12 cm Dämmstärke

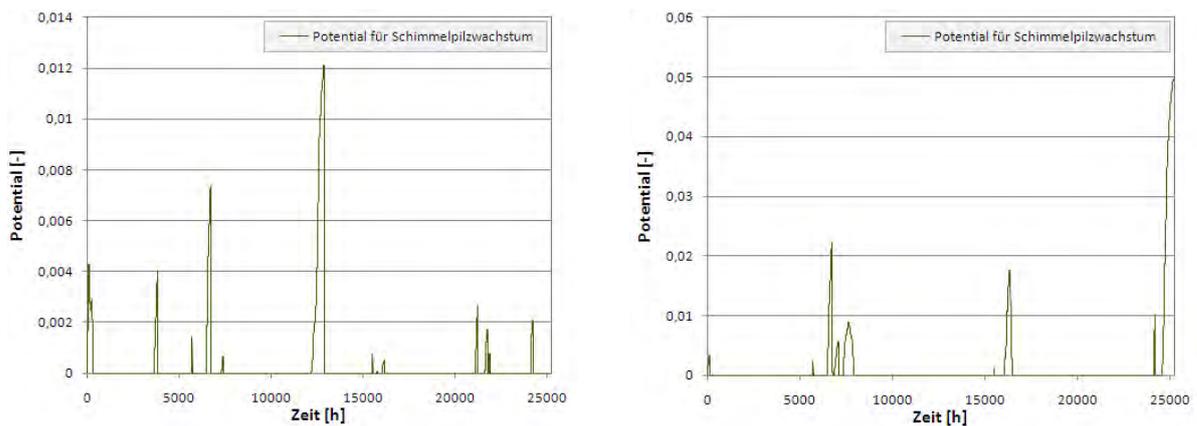


Abb. 69: Schimmelpilzpotential zwischen Dämmung und Wand in der Ecke bei 12 cm Dämmstärke bei gemessenem Klima (links) und bei Konstantklima (rechts)

Es zeigt sich, dass die Simulationen der Innendämmung aus Schilfdämmplatten teilweise sehr unerwartete Ergebnisse liefern. Da die Korrektheit der Simulationen anhand der Messergebnisse überprüft wurde, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Ergebnisse der Simulationen von dickeren Dämmschichten die realen Verhältnisse korrekt abbilden. Bemerkenswert ist, dass selbst bei großen Dämmstärken von 12 cm das Schimmelpilzpotential gering bleibt. Es könnten nun Vermutungen angestellt werden, warum diese Konstruktion solche Ergebnisse liefert.

Eine wesentliche Rolle dürfte die Kombination von Schilfdämmplatten und Lehmputz spielen. Wie bei [BRU98], [HAS06] und [FIG04] erwähnt, weist Lehm spezielle Materialeigenschaften auf, die dazu führen, dass die Raumlufteuchte ständig ausgeglichen wird. Aufgrund ihrer sehr niedrigen Ausgleichsfeuchte von nur 2,5 – 4,5 % bewirken Lehmbaumstoffe eine permanente

kapillare Entfeuchtung der Umgebungsluft. Dadurch wird der direkt anschließende Dämmstoff, im vorliegenden Fall die diffusionsoffene Schilfdämmplatte, auf einem relativ trockenen Niveau gehalten. Infolge dessen könnte vermehrt Feuchtigkeit von der kalten Seite der Dämmung in den Lehmputz zurückdiffundieren. Der Lehmputz wirkt zugleich als Luftdichtheitsebene und möglicherweise zusätzlich als eine Art Dampfbremse. Dies bestätigt der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ , der zwischen 9 und 14 liegt. Zusätzlich zu diesen dampfbremsenden Eigenschaften kann Lehmverputz als Feuchtepuffer funktionieren.

Die genannten Eigenschaften stellen gemeinsam mit der diffusionsoffenen Schilfdämmplatte eine sehr feuchtetolerante Konstruktion dar, die vielseitig und relativ einfach herstellbar ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Wärmeschutz historischer Bauwerke ist in der Regel nach heutigem Maßstab schlecht und die Zahl an sanierungsbedürftigen Objekten dementsprechend hoch. Um erhaltenswerte oder sogar denkmalgeschützte Fassaden thermisch zu sanieren, kommt häufig nur eine Innendämmung in Frage. Auch wenn viele Gründe für die Realisierung einer Innendämmmaßnahme sprechen, so darf nicht außer Acht gelassen werden, dass diese bauphysikalisch eine sehr komplexe Lösung darstellt und daher eine intensive und genaue Planung erfordert.

Die Basis für die Planung und Ausführung einer thermischen Sanierung mittels Innendämmung stellt eine detaillierte Bauaufnahme des Sanierungsobjekts dar. Dabei müssen einerseits bestehende Schäden und Baumängel richtig erkannt und analysiert werden, andererseits gilt es, die Randbedingungen, vor allem die Einflüsse auf das Bestandsobjekt, so genau wie möglich zu erfassen. Hier spielen sowohl die Befeuchtung von außen durch Schlagregen oder aufsteigende Feuchte als auch die Befeuchtung von innen durch Dampfkonnektion und -diffusion eine wichtige Rolle. Oft sind auch mehrere Parameter in Kombination zu betrachten. So ist neben der Schlagregenbeanspruchung das Austrocknungsverhalten ein maßgeblicher Faktor bei der Beurteilung äußerer Einflüsse. Gleichzeitig können einzelne Parameter ein KO-Kriterium für die geplante Innendämmung darstellen. Beispielsweise müssen bei aufsteigender Feuchte Begleitmaßnahmen getroffen werden, ohne die eine Anbringung eines Innendämmsystems ausgeschlossen ist. In diesem Zusammenhang muss abgeklärt werden, ob es eine Prüfmöglichkeit oder ein Messverfahren für die vorliegende Einflussgröße gibt, und ob ein Grenzwert vorhanden ist, der das Ergebnis einer Prüfung oder Messung bewertet. Nur so können bestimmte Einflüsse wie Schlagregen oder aufsteigende Feuchtigkeit objektiv beurteilt werden. Für viele Einflussgrößen, wie beispielsweise die Schlagregenbelastung, gibt es zwar Prüf- und Messverfahren, doch diese sind größtenteils nicht genormt und können nicht mit anerkannten Grenzwerten verglichen werden. Diese Grundlagen für die Bestandsaufnahme stellen daher einen umfangreichen Forschungsbedarf für die Zukunft dar und sind der nächste wichtige Schritt bei der Erstellung einer Bewertungsmatrix für Innendämmsysteme. Nur mit Grenzwerten kann klar definiert werden, wann eine Einflussgröße und eine bestimmte Konstruktionsart inkompatibel sind.

Wärmebrücken und Bauteilanschlüsse spielen ebenfalls eine wesentliche Rolle bei der Planung einer Innendämmmaßnahme. Die Art der Bestandskonstruktion und das geplante Innendämmsystem müssen genau aufeinander abgestimmt sein, um Bauschäden zu vermeiden. Grundsätzlich ist eine Nachweisführung in Form einer Berechnung der Wärmebrücken oder einer Simulation durch einen Fachplaner immer sinnvoll. Bei Dämmstärken über 5 cm ist das Zuziehen eines

Fachplaners zwingend erforderlich. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Anbringung einer Innendämmung im Einzelfall möglich und zielführend ist.

Für viele unterschiedliche Dämmstoffe, die sich für Innendämmungen grundsätzlich eignen, sowie für die Ausführungsmöglichkeiten liegen bereits Untersuchungen vor. Allerdings findet man kaum Quellen, die sich mit möglichen Schadensbildern und dem Versagen von Innendämmsystemen genauer beschäftigen. Tatsache ist jedoch, dass hauptsächlich Feuchteprobleme den Ausgangspunkt für weitere Schadensfälle bei Innendämmungen darstellen. Schimmelpilzbildung an Bauteilkanten oder zwischen Innendämmung und Bestandswand ist das am häufigsten auftretende Schadensbild. Oft ist ein falsches Nutzerverhalten, ein zu hoher Feuchteeintrag in die Raumluft bzw. ein unzureichendes Lüftungs- und Heizverhalten, mit ausschlaggebend für diese Entwicklung. Daher erscheint es wichtig, anhand von hygrothermischen Simulationen die geplante innengedämmte Konstruktion in Kombination mit einem bestimmten Nutzerverhalten und eines definierten Raumklimas zu analysieren. Aus den Ergebnissen können einerseits wichtige Erkenntnisse bezüglich der Feuchtetoleranz von Konstruktionen gewonnen werden, andererseits stehen dadurch Möglichkeiten zur Erforschung neuer Bauweisen von Innendämmkonstruktionen zur Verfügung.

Insbesondere das Feuchtemanagement von diffusionsoffenen Wandaufbauten wurde in den vergangenen Jahren mithilfe von Simulationsprogrammen vermehrt analysiert. Der Grundgedanke, dass Feuchtigkeit, die während der Tauperiode in einem Bauteil kondensiert, in der nächsten Austrocknungsperiode wieder vollständig abtrocknet, ist genial wie risikoreich zugleich. Hygrothermische Simulationen können die Funktionalität von Aufbauten ohne Dampfbremse gut vorhersagen und bieten dadurch weiteres Forschungspotential in diesem Bereich.

Das im letzten Kapitel vorgestellte Projekt zeigt deutlich, dass es noch viele weitgehend unerforschte Materialien gibt, die einen idealen Innendämmstoff darstellen würden. Die Ergebnisse von Messung und Simulation zeigen in diesem Fall, dass die Schilfdämmplatte nicht von vornherein als isotroper Baustoff angenommen werden darf. Der im Zuge des Vergleichs von Messung und Simulation festgestellte Wärmeeintrag in die Bauteilecke ist vermutlich auf eine Anisotropie der Schilfdämmplatte zurückzuführen. Diese bietet gleichzeitig neben den ökologischen Aspekten einen weiteren Vorteil dieses Dämmstoffes, muss aber in Werkstoffanalysen noch genauer untersucht werden. Durch den Wärmeeintrag wird die Wärmebrücke im Eckbereich gänzlich entschärft, sodass kein Schimmelpilzrisiko bei dieser Innendämmvariante auftritt. Selbst bei Dämmstärken von über 10 cm Dicke ist kein Schimmelpilzwachstum zu erwarten, da die relative Luftfeuchte nie lang genug im Wachstumsbereich liegt. Hier dürfte der Lehmputz eine wichtige Rolle spielen, der aufgrund seiner starken saugenden Wirkung keine lang andauernden erhöhten Feuchtezustände in der Dämmung zulässt. Die Verifizierung dieser Theorien

stellt ebenfalls ein weiteres Forschungspotential dar, da bislang weder die hygrischen Eigenschaften des Lehmputzes noch sein Verhalten in Kombination mit der diffusionsoffenen Schilfdämmplatte ausreichend erforscht wurden.

Die hier vorgestellten Naturbaustoffe Lehm und Schilf wurden zwar schon oft in Projekten eingesetzt, bieten jedoch umfassendere Einsatzmöglichkeiten als bisher angenommen. Die Forschung an kapillaraktiven Materialien, vor allem an Lehmprodukten, muss erweitert werden und der Einsatz von Lehmputzen als Feuchtepuffer sollte unter Nutzereinfluss analysiert werden. So könnten Lehmputze auch an der kalten Seite der Dämmung eingesetzt werden, um bei extremen Raumklimabedingungen eine Tauwasserbildung durch Feuchtepufferung zu vermeiden. Die parallele Untersuchung eines Wandaufbaus mit Messverfahren und hygrothermischen Simulationen bietet neben dem Vorteil der Überprüfbarkeit der Ergebnisse die Möglichkeit zur Analyse eines nutzerbeeinflussten Raumklimas. Im vorliegenden Projekt konnten dadurch wesentliche neue Erkenntnisse und Ansätze für weitere Forschungsarbeit gewonnen werden.

Literaturverzeichnis

Bücher und Artikel

- [ANL07] Anlauff, Eva: Die energetische Generalsanierung eines Baudenkmals zum Niedrigenergiehaus mittels Innendämmung. In: 12. Bauklimatisches Symposium, Tagungsbeiträge Band 2. Dresden 2007, S. 480-487.
- [BED08] Riccabona, Christof; Bednar, Thomas: Baukonstruktionslehre 4 - Bauphysik. 7., völlig neu überarbeitete Auflage, Wien 2008.
- [BOR05] Borsch-Laaks, Robert: Innendämmung – Risikokonstruktion oder Stand der Technik. In: Bauen im Bestand – eine perspektivische Aufgabe. 6. Leipziger Bauschadenstag 27. September 2005. Erkennen, Analysieren, Bewerten, Vermeiden – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Selbstverlag 2005, S. 93-111.
- [BOR06] Borsch-Laaks, Robert: Wie dick darf die Innendämmung sein? In: WTA-Journal 3/2006, S. 413-428.
- [BOR06a] Borsch-Laaks, Robert: Innendämmung – Wo ist das Risiko? In: WTA-Journal 1/2006, S. 19-42.
- [BOR08] Borsch-Laaks, Robert; Walther, Wilfried: Innendämmung mit und ohne Dampfbremse. Teil 2: Innovative Systeme – Erfahrungen mit der Verarbeitung und erste Feuchtemessungen. In: Holzbau – Die neue quadriga 4/2008, S. 35-42.
- [BRA04] Brachmann, Andrea: Im Zwischenraum. Fugensanierung von altem Mauerwerk. In: Bauhandwerk 7-8/2004, S. 56-59.
- [BRU98] Bruckner, Heinrich; Schneider, Ulrich: Naturbaustoffe. Werner, Düsseldorf 1998.
- [CZI05] Cziesielski, Erich: Bauphysik-Kalender 2005. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2005.
- [FAL09] Falk, Ute; Aschenbrenner, Helmut: Feuchtigkeits- und Schimmelschäden. Haufe, München 2009.
- [FIG04] Figgemeier, M.: Lehmputz: Renaissance eines alten Baustoffes. In: WTA-Journal 1/2004, S. 27-38.
- [FIS02] Fischer-Uhlig, Horst: Raumklima & Lüftung der Wohnung. Wege zum Wohlfühlen; bauliche Voraussetzungen; richtiges Verhalten. Blottner, Taunusstein 2002.
- [GÄN08] Gänßmantel, Jürgen; Geburtig, Gerd: Richtig dämmen. Handbuch für zeitgemäßes Bauen im Bestand. Praxis kompakt 3. Geislingen 2008.
- [GÄN09] Gänßmantel, Jürgen: Immer nur die zweitbeste Lösung. In: dds das magazin für möbel und ausbau 5/2009, S. 100-101.
- [GÄN10] Gänßmantel, Jürgen: Der Pelz unter der Haut. In: Mappe 1/2010, S. 44-46.

- [GEB10] Geburtig, Gerd (Hrsg.): Innendämmung im Bestand. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2010.
- [GEI01] Geisler, R: Zellulose-Innendämmung auf dem Prüfstand. In: Bauhandwerk/mit Bau-Sanierung 12/2001, S. 41-43.
- [GET05] Getz, Martina: Innendämmung von Außenwandmauerwerk. Diplomarbeit, TU Wien 2005.
- [GRU99] Grunewald, J.; Häupl, P.; Martin, R.; Petzold, H.: Hygrothermisches Verhalten von Bauwerksteilen mit zusätzlicher Innendämmung. In: Dreyer, Jürgen [Hrsg.]: Nachhaltige Instandsetzung. WTA-Schriftenreihe Heft 20. Freiburg, Zürich 1999, S. 155-177.
- [HÄU99] Häupl, Peter; Fechner, Heiko; Martin, Roland; Neue, Joachim: Energetische Verbesserung der Bausubstanz mittels kapillaraktiver Innendämmung. In: Bauphysik 21, 4/1999, S. 145-154.
- [HÄU06] Häupl, Peter; Jurk, Karsten: Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens innen-gedämmter Konstruktionen an Gebäuden mit historischer Fassade. Erfahrungsbericht über die Anwendung von kapillaraktiven, diffusionsoffenen Calciumsilikats als Innendämmstoff unter Nutzungsbedingungen. In: WTA-Journal 1/2006, S. 73-90.
- [HEC06] Hecht, Clemens; Getz, Martina: Materialien für die Innendämmung. In: WTA-Journal 1/2006, S. 1-18.
- [HHJ09] Holle, Hans-Jürgen: Innendämmung bei erhaltenswerten Fassaden – ein baukon-struktives Projektbeispiel. In: Bauphysik 31, 4/2009, S. 227-234.
- [HÖL07] Hölscher, Tobias: Calsitherm Klimaplatte – eine kapillaraktive, diffusionsoffene Innendämmung zur Sanierung von schimmelbelasteten Räumen. In: 12. Bauklima-tisches Symposium, Tagungsbeiträge Band 2. Dresden 2007, S. 505-512.
- [HOL09] Holm, Andreas: Hygrothermische Optimierung eines kapillaraktiven Dämmstoffes. In: Fraunhofer-Institut für Bauphysik – Jahresbericht 2008. Stuttgart 2009, S. 74-75.
- [JEN01] Jenisch, Richard; Stohrer, Martin: Tauwasserschäden. Schadenfreies Bauen, hgg. von Günter Zimmermann, Band 16. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2001.
- [KEH06] Kehl, Daniel: Wärmebrücken im Bestand. Was gibt es bei der Innendämmung zu beachten? In: WTA-Journal 1/2006, S. 55-72.
- [KEH07] Kehl, Daniel: Wärmebrücken im Bestand. Teil 1: Energetische Bedeutung nach neuer EnEV. In: Holzbau 2/2007, S. 13-16.
- [KEH07a] Kehl, Daniel: Wärmebrücken im Bestand. Teil 2: Der Schimmel steckt im Detail. In: Holzbau 6/2007, S. 42-44.

- [KOR03] Korjenic, Azra; Dreyer, Jürgen; Bednar, Thomas; Hecht, Clemens: Kapillaraufsteigende Mauerwerksfeuchtigkeit – Performancebewertung von Sanierungsvarianten. In: WTA-Journal 3/2003, S. 229-271.
- [KOR07] Korjenic, Sinan; Dreyer, Jürgen; Kolbitsch, Andreas; Korjenic, Azra: Vermeidung von Schimmelpilzbildung in Wohnungen – Analyse von Schadensfällen zur Überprüfung bestehender Regelungen. In: 12. Bauklimatisches Symposium, Tagungsbeiträge Band 2. Dresden 2007, S. 831-838.
- [KRU04] Krus, M.; Künzel, H. M.: Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Fassaden nach Hydrophobierungsmaßnahmen. In: WTA-Journal 2/2003, S. 149-166.
- [KRU06] Krus, M.; Fitz, C.: Sichtfachwerk mit innenliegender Dämmung. Neuartiges Messverfahren zur Ermittlung der Fugendichtheit und rechnerische Beurteilung des Konvektionseinflusses. In: WTA-Journal 3/2006, S. 429-452.
- [KRU95] Krus, Martin: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart – Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik 1995.
- [KÜN03] Künzel, Hartwig M.: Richtiger Einsatz von Dampfbremsen bei der Altbausanierung. In: WTA-Journal 1/2003, S. 6-25.
- [KÜN03a] Künzel, H.M.; Holm A.; Kaufmann A.: Raumluftbedingungen für die Feuchteschutzbeurteilung von Wohngebäuden. IBP-Mitteilung 427, Holzkirchen 2003.
- [KÜN04] Künzel, Hartwig M.: Energetische Altbausanierung durch Innendämmung. In: WTA-Journal 4/2004, S. 361-374.
- [KÜN06] Künzel, Hartwig M.; Fitz, Cornelia: Bauphysikalische Eigenschaften und Beanspruchung von Putzoberflächen und Anstrichstoffen. In: WTA-Schriftenreihe Heft 28. München 2006, S. 49-72.
- [KÜN08] Künzel, Hartwig M.; Zirkelbach, Daniel; Bludau, Christian: Feuchteverhalten von Kellerwänden mit Innendämmung. In: wksb 60/2008, S. 17-24.
- [KÜN08a] Künzel, Hartwig M.; Sedlbauer, Klaus: Feuchteschutzbeurteilung von Baukonstruktionen in Abhängigkeit von Beanspruchung und Verarbeitung. In: Fouad, Nabil A. (Hg.): Bauphysik-Kalender 2008. Berlin 2008, S. 302-306.
- [LOR05] Lorenz, Wolfgang; Hankammer, Gunter; Lassel, Karl: Sanierung von Feuchte- und Schimmelpilzschäden. Diagnose, Planung und Ausführung. Köln 2005.
- [MOR07] Moriske, Heinz-Jörn: Schimmel, Fogging und weitere Innenraumprobleme. Können wir in Zukunft noch „gesund“ wohnen und arbeiten? Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2007.
- [ORT05] Ortler, A.; Krismer, R.; Wimmers, G.: Energetische Sanierung in Schutzzonen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 27/2005.

- [OST07] Oster, Nils; Bredemeyer, Jan; Schmidt, Thomas: Nutzereinfluss auf Schäden an Gebäuden. Schadenfreies Bauen, hgg. von Günter Zimmermann und Ralf Ruhnau, Band 42. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2007.
- [REY05] Reyer, Eckhard; Schild, Kai; Völkner, Stefan: Wärmedämmstoffe und -systeme. In: Cziesielski, Erich (Hg.): Bauphysik-Kalender 2005. Berlin 2005, S.59-152.
- [SCH02] Scheffler, Gregor; Grunewald, John; Häupl, Peter: Beurteilung des hygrothermischen Verhaltens kapillaraktiver Innendämmung auf Calciumsilikatbasis durch numerische Simulation. In: 11. Bauklimatisches Symposium, Tagungsbeiträge Band 2. 26.-30. September 2002. Dresden 2002, S. 671-681.
- [SCH07] Schrepfer, Thomas; Gscheidle, Harald: Schäden beim Bauen im Bestand. Schadenfreies Bauen, hgg. von Günter Zimmermann und Ralf Ruhnau, Band 41. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2007.
- [SED01] Sedlbauer, Klaus: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation, Universität Stuttgart 2001.
- [SED03] Sedlbauer, Klaus; Kurs, Martin: Schimmelpilz in Gebäuden – Biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. In: Cziesielski, Erich (Hg.): Bauphysik-Kalender 2003. Berlin 2003, S. 435-530.
- [SED05] Sedlbauer, Klaus; Krus, Martin: Möglichkeiten der Innendämmung beim Fachwerkbau. In: Tagungsreader zur Fachtagung Innendämmung – eine bauphysikalische Herausforderung, Münster 2005 , S. 1-23.
- [SIS07] Šišković, Srdjan: Auswahl und Bewertung geeigneter Innendämmsysteme im Bestand. Diplomarbeit, TU Wien 2007.
- [STO10] Stopp, Horst; Strangfeld, Peter; Toepel, Torsten; Anlauff, Eva: Messergebnisse und bauphysikalische Lösungsansätze zur Problematik der Holzbalkenköpfe in Außenwänden mit Innendämmung. In: Bauphysik 32, 2/2010, S. 61-72.
- [THE09] Thelandersson, Sven; Isaksson, Tord: Modelling of onset of mould growth for wood exposed to varying climate conditions. Paper prepared for the 40th Annual Meeting Beijing, China 24-28 May 2009.
- [VIIT96] Viitanen, Hannu A.: Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Dissertation, Uppsala 1996.
- [VIIT97] Viitanen, Hannu A.: Modelling the Time Factor in the Development of Mould Funghi – the Effect of Critical Humidity an Temperature Conditions on Pine an Spruce Sapwood. In: Holzforschung 51/1997, S. 6-14.
- [VIIT97a] Viitanen, Hannu A.: Modelling the Time Factor in the Development of Brown Rot Decay in Pine an Spruce Sapwood – The Effect of Critical Humidity an Temperature Conditions. In: Holzforschung 51/1997, S. 99-106.

- [WOR06] Worch, Anatol: Innendämmung: Eine Anwendung moderner Rechenverfahren zum gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport. In: WTA-Journal 1/2006, S. 43-54.
- [WOR08] Worch, Anatol: Innendämmung – gewusst wie. Baustoffe, Umwelt und natürliche Ressourcen. In: Deutscher Holz- und Bautenschutzverband (Hg.): Dokumentation zum Kongress des Deutschen Holz- und Bautenschutzverbandes in Kooperation mit der WTA. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2008, S. 109-116.
- [WOR10] Worch, Anatol: Innendämmung und ihre Folgen. In: Informationsdienst Bauen + Energie 1/2010, S. 2-6.

Internetquellen

- [CAS10] Praxisleitfaden Innendämmung für Architekten, Planer und Verarbeiter
Link: www.casipius.de/Leitfaden_Innendaemmung.pdf
Stand: 5/2010
- [ENG10] Engel, Jens: Wie eine kapillaraktive Innendämmung funktioniert
Link:
www.bauhandwerkonline.info/download/233649/Wie_funktioniert_eigentlich.pdf
Stand: 5/2010
- [FEI10] Feist, Wolfgang: Innendämmung: Kompetenz und Sorgfalt unverzichtbar
Link: www.passiv.de/04_pub/Literatur/ProtokB/Phase_III/2004-2005/AK32/Inh_AK32/01-WF_F.htm
Stand: 4/2010
- [HAS06] Haselsteiner, Edeltraud: Alternative Baumaterialien und -techniken
Link: www.nachhaltigwirtschaften.at/hdz_pdf/forum_planen_200611.pdf
Stand: 5/2010
- [HAS10] Schilf-Dämmplatte WLS 055 – Putzträger aus natürlichem Rohstoff
Link: www.hasit.de
Stand: 5/2010
- [HIS10] HISS REET Schilfrohrhandel GmbH: Innendämmung
Link: www.hiss-reet.de/bauen-mit-reet/naturbau/architektur/wanddaemmung/innendaemmung.html
Stand: 4/2010
- [IBP01] IBP: Feuchtetransport durch Bauteile. Rechnerische Simulation mit Hilfe des Modells WUFI.
Link: www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/grundl_ueberblick.html
Stand: 4/2010
- [IFL10] isofloc®; Für dünne Wanddämmungen: Das Sprühverfahren CSO.
Link: <http://isofloc.de/cso-spruehtechnik.phtml>
Stand: 5/2010

- [KOR07a] Korjenic, Sinan; Dreyer, Jürgen; Korjenic, Azra; Kolbitsch, Andreas: Investigations thermal-hygral suitability of inside insulation for redevelopment of old buildings (experience with different problems). Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering; 8th Scientific International Conference May, 28-30, 2007.
Link: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_148706.pdf
Stand: 5/2010
- [KRU10] Krus, Martin; Sedlbauer, Klaus; Künzel, Hartwig: Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht.
Link: www.ibp.fhg.de/literatur/konfe/05_Innendaemmung-aus-bauphysikalischer_f-HBZ-Fachwerk.pdf
Stand: 4/2010
- [MET10] Metzemacher, Heinrich: Wärmebrücken; baupraktische ziegeltypische Nachweise. Fachbeitrag zu den Wienerberger Mauerwerkstagen 2004.
Link: www.wienerberger.com...;filename=Metzem_Waermebruecken_2004.pdf
Stand: 5/2010
- [NAT10] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Innendämmung
Link: www.natur-baustoffe.info/daemmstoffe/verwendung/innendaemmung.html
Stand: 4/2010
- [PLA08] Plagge, Rudolf: Bauphysikalische Grundlagen in der energetischen Sanierung – Problemstellung innenliegende Wärmedämmung. KEIM-Symposium „Energetisches Sanieren in Theorie und Praxis“, 20.-22. November 2008.
Link:
www.keimfarben.de/fileadmin/pdf/vortraege_denkmal/Plagge_Denkmal_2008.pdf
Stand: 5/2010
- [PRO10] pro clima: Berechnung des Bauschadensfreiheitspotentials von Wärmedämmkonstruktionen in Holzbau- und Stahlbauweise – Dach, Wand, Decke – Feuchtevariable Dampfbremsen pro clima DB+ und INTELLO mit intelligentem Feuchtemanagement.
Link: http://download.proclima.com/de/de_w_Bauphysik-Studie.pdf
Stand: 5/2010
- [RUI10] Ruisinger, Ulrich; Petzold, Hans; Grunewald, John; Häupl, Peter: Energetische Bewertung von Gebäuden mit raumseitiger Wärmedämmung aus Calciumsilikat.
Link: www.calsitherm.de/pdf/20100303-energiefachtagung.pdf
Stand: 5/2010
- [SED10] Sedlbauer, Klaus: Schimmelpilze innen, Algen außen – gibt es Lösungen?
Link: www.ibp.fhg.de/literatur/konfe/05-Schimmel-Algen_f-Otti-Seminar.pdf
Stand: 5/2010
- [WIK10] WIKIPEDIA – Die freie Enzyklopädie; Schlagwort: Wärmedämmung
Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmed%C3%A4mmung>
Stand: 5/2010

- [XEL10] YTONG Multipor Mineraldämmplatte, Innendämmung
Link: www.xella.at/downloads/aus/brochures/Innendaemmung_mit_YTONG_Multipor.pdf
Stand: 5/2010

Normen und Merkblätter

- [WTA05] WTA-Merkblatt 6-3-05/D: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos.
- [WTA08] WTA-Merkblatt 8-5-08/D: Fachwerkinstandsetzung nach WTA V: Innendämmungen.
- [WTA09] WTA-Merkblatt 6-4-09/D: Innendämmung nach WTA I – Planungsleitfaden.
- DIN 4108 Teil 3: 2001-07-01: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- DIN EN 15026: 2007-04: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation
- DIN EN ISO 13788: 2001-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren
- DIN EN ISO 10211-1: 2008-04: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen
- ÖNORM B 6000: 2010-01-01: Werkmäßig hergestellte Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau - Arten, Anwendung und Mindestanforderungen;
- ÖNORM B 8110 Teil 2: 2003-07-01: Wärmeschutz im Hochbau – Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz