

# Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre

Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung aufgespritzter  
und verputzter Zelluloseschichten

P. Kautsch, et al

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**84/2006**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>  
oder unter:

Projektfabrik Waldhör  
Währingerstraße 121/3, 1180 Wien  
Email: versand@projektfabrik.at

# Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre

Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung aufgespritzter  
und verputzter Zellosoeschichten

Ao.Univ.-Prof. DI DDr. Peter Kautsch  
Johann Engl  
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Häupl  
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Heinz  
Dipl.-Ing. Herwig Hengsberger  
Ing. Wolfgang Lackner  
Dipl.-Ing. Hans Petzold  
Dr.-Ing. Rudolf Plagge  
Dipl.-Ing. Robert Schmied  
Dipl.-Ing. Friedrich Skofitsch  
Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Wolfgang Streicher

Graz, August 2005

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines beauftragten Projekts aus der Programmlinie *Haus der Zukunft* im Rahmen des Impulsprogramms *Nachhaltig Wirtschaften*, welches 1999 als mehrjähriges Forschungs- und Technologieprogramm vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gestartet wurde.

Die Programmlinie *Haus der Zukunft* intendiert, konkrete Wege für innovatives Bauen zu entwickeln und einzuleiten. Aufbauend auf der solaren Niedrigenergiebauweise und dem Passivhaus-Konzept soll eine bessere Energieeffizienz, ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energieträger, nachwachsender und ökologischer Rohstoffe, sowie eine stärkere Berücksichtigung von Nutzungsaspekten und Nutzerakzeptanz bei vergleichbaren Kosten zu konventionellen Bauweisen erreicht werden. Damit werden für die Planung und Realisierung von Wohn- und Bürogebäuden richtungsweisende Schritte hinsichtlich ökoeffizientem Bauen und einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in Österreich demonstriert.

Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt dank des überdurchschnittlichen Engagements und der übergreifenden Kooperationen der Auftragnehmer, des aktiven Einsatzes des begleitenden Schirmmanagements durch die Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik und der guten Kooperation mit der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft bei der Projektabwicklung über unseren Erwartungen und führt bereits jetzt zu konkreten Umsetzungsstrategien von modellhaften Pilotprojekten.

Das Impulsprogramm *Nachhaltig Wirtschaften* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert, aber auch elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



## Abstract

In the course of global efforts to save energy, thermal building renovation is becoming increasingly important. Buildings from before around 1980 have the greatest potential for renovation and energy saving with regard to the standard of insulation. This group also includes numerous listed buildings that cannot be renovated with conventional outside insulation measures. In such cases, interior insulation is the only possibility of improving the energy situation. However, interior insulation makes great demands on planners and builders alike in view of the risk of water vapour condensation. The aim of this research project was to avoid harmful water vapour condensation by taking advantage of the great sorption and capillary conductivity of spray-on cellulose fibre from recycled paper.

The first step was to develop a completely new cellulose conveyor. In contrast to equipment currently available on the market, this transports the cellulose flakes as continuously and free of pulsation as possible. Parallel to this, spraying technology was also further developed with the result that a system is now available that can be used to spray a largely homogeneous body of insulation with a thickness of up to approx. 8 cm. Strength tests on the insulation material produced figures that conform both to mechanical requirements for mineral wool façade insulation panels and requirements for industrial cellulose insulation panels.

Furthermore, a special sprayed rendering was developed that excels with comparatively low weight and extremely low vapour diffusion resistance. The insulation system thus developed was applied to a west-facing façade of an approx. 200-year-old test building. The original fabric of the historical building was used for building section measurements for a period of two condensation and drying periods, partly even with slightly aggravated interior climate conditions.

The on-site measurements verified that the condensate dried out completely in both years. Despite a prolonged relatively high level of humidity, no notable mould build-up was observed. This means that the concentrations of fireproofing materials and insecticides as used in standard cellulose flakes are equally sufficient for this high-end application. There is a need for further research with regard to the long-term stability of the system in view of the repeated humidification and dehydration processes.

Validation of the hygrothermal simulation calculations against the on-site readings revealed an excellent correspondence. This means that it is now possible, with the aid of the necessary material parameters, to estimate the effects of future interior insulation measures without the need for extensive measurements and to promote the wider use of this high-end measure in order to save energy.



## Kurzfassung

Im Zuge der weltweiten Bestrebungen zur Energieeinsparung kommt der thermischen Gebäudesanierung immer stärkere Bedeutung zu. Insbesondere die Bausubstanz aus den Jahren vor etwa 1980 weist hinsichtlich des Dämmstandards die größten Sanierungs- bzw. Energieeinsparungspotenziale auf. Zu dieser Gruppe zählen auch zahlreiche denkmalgeschützte Gebäude, die nicht mittels konventioneller Außendämm-Maßnahmen zu sanieren sind. In diesen Fällen ist eine Innendämmung die einzige Möglichkeit, den energetischen Zustand zu verbessern. Innendämmungen stellen allerdings infolge der Gefahr von Wasserdampfkondensation sowohl an die Planung als auch an die Ausführenden hohe Anforderungen. Ziel des gegenständlichen Forschungsvorhabens war es, schädliche Wasserdampfkondensation unter Ausnutzung der hohen Sorptions- und kapillaren Leitfähigkeit von aufgespritzten Altpapier-Zellulosefasern zu vermeiden.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde eine völlig neuartige Zellulose-Fördermaschine entwickelt. Diese ermöglicht es im Gegensatz zu den am Markt befindlichen Geräten, die Zelluloseflocken weitestgehend kontinuierlich und pulsationsfrei zu fördern. Parallel dazu wurde die Aufspritstechnik entscheidend weiterentwickelt, sodass nun ein System zur Verfügung steht, das es ermöglicht einen weitgehend homogenen Dämmkörper von bis zu rund acht Zentimetern Dicke aufzuspritzen. Die Festigkeitsprüfungen des so hergestellten Dämmstoffes haben Werte ergeben, die sowohl die mechanischen Anforderungen an Mineralwolle-Fassadendämmplatten als auch jene an industriell hergestellte Zellulosedämmplatten erfüllen.

Weiters wurde ein Spezialspritzputz entwickelt, der sich durch vergleichsweise geringes Gewicht und einen äußerst geringen Dampfdiffusionswiderstand auszeichnet. Das entwickelte Dämmsystem wurde an einer westorientierten Fassade eines etwa 200 Jahre alten Versuchshauses aufgebracht und die Originalbausubstanz des historischen Gebäudes für Bauteilmessungen teilweise sogar unter leicht verschärften Innenraumklimabedingungen über den Zeitraum von jeweils zwei Kondensations- und Austrocknungsperioden genutzt.

Die Vor-Ort-Messungen haben in beiden Jahren die vollständige Austrocknung des angefallenen Kondensats gezeigt. Trotz relativ hoher Luftfeuchtwerte über einen längeren Zeitraum wurde kein nennenswerter Schimmelpilzbefall festgestellt. Dies bedeutet, dass die Konzentrationen von Brand- und Insektenschutzmitteln, wie sie für die Standardzelluloseflocken verwendet werden, auch für diesen anspruchsvollen Anwendungsfall ausreichend sind. Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Langzeitstabilität des Systems unter Berücksichtigung der wiederholten Befeuchtungs- und Austrocknungsvorgänge.

Die Validierung der hygrothermischen Simulationsberechnungen durch die vor Ort erhobenen Messwerte hat eine ausgezeichnete Übereinstimmung erbracht. Damit ist es nun möglich, bei Vorliegen der notwendigen Materialparameter die Auswirkungen zukünftiger Innendämmmaßnahmen ohne aufwändige Messungen abzuschätzen und die Verbreitung dieser anspruchsvollen Maßnahme zur Energieeinsparung zu unterstützen.



## **Teil A**

### **Motivation**

Unter bestimmten Umständen sind Innendämmungen die einzige Möglichkeit zur thermischen Sanierung bestehender Bausubstanz. Zum einen besteht dabei allerdings die Gefahr schädlicher Wasserdampfkondensation. Zum anderen wird der ökologischen Qualität der verwendeten Baustoffe in Zukunft verstärktes Augenmerk zu schenken sein.

Im vorliegenden Projekt sollte unter Ausnutzung der hervorragenden Feuchtespeichereigenschaften verbunden mit der hohen kapillaren Leitfähigkeit von gebundenen Zelluloseflocken ein Dämmsystem entwickelt werden, das ohne die oft fehleranfälligen Dampfsperren auskommt. Dies würde die baupraktische Akzeptanz von Innendämm-Maßnahmen beträchtlich erhöhen und dem Bedürfnis nach diffusionsoffenen Bauweisen Rechnung tragen.

### **Inhalt**

Kap. 1: Produktionsprozess und Bindemittel / Kap. 2: Weiterentwicklung der Zelluloseförderung / Kap. 3: Aufspritztechnik / Kap. 4: Entwicklung des Spezial-Innenputzes / Kap. 5: Materialkennwerte des entwickelten Putzes / Kap. 6: Versuchsobjekt und Versuchsdurchführung / Kap. 7: Messkonzept und verwendete Messtechnik / Kap. 8: Messergebnisse / Kap. 9: Festigkeitsmessungen / Kap. 10: Simulationsmodell und Korrelation mit den Vor-Ort-Messungen / Kap. 11: Bauphysik und Schimmelpilzsituation / Kap. 12: Projektergebnisse und weiterer Forschungsbedarf / Kap. 13: Literatur

### **Beabsichtigte Ziele**

Ziel des Projektes war die Untersuchung der grundsätzlichen Eignung von aufgespritzter und verputzter Zellulosedämmung als Innendämmung ohne Dampfsperre. Dabei war insbesondere die Feststellung der tatsächlichen Kondensatmenge, die zeitliche und räumliche Verteilung über den Bauteilquerschnitt sowie die Frage von Interesse, ob die in der Kondensationsperiode anfallende Feuchtigkeit in der Verdunstungsperiode wieder vollständig austrocknet. Einen weiteren Schwerpunkt bildete die simulationstechnische Modellierung der hygrothermischen Vorgänge zum Zwecke der Abschätzung zukünftiger Sanierungsvorhaben.

### **Methoden der Bearbeitung**

Anhand von Vor-Ort-Messungen unter realen Klimabedingungen über zwei Kondensations- und zwei Austrocknungsperioden wurde die Korrelation mit den hygrothermischen Simulationsberechnungen untersucht.

### **Daten**

Laborversuche zur Produktentwicklung - Bestimmung der Materialkennwerte - Vor-Ort-Messungen zweier Versuchswände unter Norm-Innenklima hinsichtlich Feuchtigkeit und Temperatur über den gesamten Bauteilquerschnitt, Sonneneinstrahlung, Niederschlag und Wind – Simulationsberechnungen mittels Softwarepaket DELPHIN 4.5.

## **Teil B**

### **Ergebnisse**

Die wichtigste Erkenntnis der knapp zweijährigen Vor-Ort-Messungen besteht darin, dass es gelungen ist, das vermutete hervorragende Feuchtetransport- und –speichervermögen von gebundener Zellulosedämmung messtechnisch nachzuweisen. Es konnte gezeigt werden, dass die in der Kondensationsphase anfallende Feuchtigkeitsmenge in der Verdunstungsphase vollständig austrocknet – es also über die Jahre nicht zu einem „Aufschaukeln“ des Wassergehaltes in der Dämmschicht kommt.

Der auf den speziellen Putzgrund abgestimmte neuartige Innenputz zeichnet sich insbesondere durch einen äußerst geringen Wasserdampf Widerstand aus – eine wesentliche Voraussetzung um den Austrocknungsprozess der Zellulosedämmung in der Verdunstungsperiode zu unterstützen. Durch die Kombination dieser beiden Neuentwicklungen steht nunmehr der Prototyp eines Innendämmsystems zur Verfügung, das infolge der besonderen Materialeigenschaften unter bestimmten Umständen die Verwendung einer Dampfsperre überflüssig macht.

Ein überaus wichtiges Ergebnis ist in der sehr guten Übereinstimmung der hygrothermischen Simulationsberechnungen mit den Vor-Ort-Messungen zu sehen. Damit kann in Zukunft nach Vorliegen der entsprechenden Materialparameter eine rechnerische Abschätzung der Auswirkungen dieser innovativen Innendämm-Maßnahmen erfolgen.

Die aufgespritzte Zellulosedämmung erfüllt die für Wärmedämmverbundsysteme wichtigen Anforderungen an die Zugfestigkeit normal zur Probenebene, wie sie beispielsweise an Mineralwolle-Dämmplatten gestellt werden. Adaptierungsbedarf besteht hinsichtlich der Vor-Ort-Messtechnik.

Obwohl die Gleichmäßigkeit der Flockenförderung durch die Entwicklung einer völlig neuartigen Fördermaschine wesentlich verbessert werden konnte, besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich des Einflusses von unterschiedlichen Förderschlauchlängen und –höhen sowie hinsichtlich verarbeiterspezifischer Unterschiede beim Aufspritzvorgang. An einem praktikablen Abzugssystem zur Erzielung gleichmäßiger Schichtdicken wird im Rahmen eines Folgeprojektes gearbeitet.

Der systematischen Entwicklung geeigneter Lösungen für Bauteilanschlüsse wie Fensterlaibungen und Holzbalkendecken sowie der Untersuchung der Langzeitstabilität – insbesondere im Hinblick auf die Beständigkeit gegen Mikroorganismen – ist besonderes Augenmerk zu schenken.

### **Schlussfolgerungen**

Aufgrund der erzielten Ergebnisse bestehen unter der Voraussetzung der Abdeckung des o.a. Forschungsbedarfes hervorragende Aussichten, das Ziel eines aufspritz- und verputzbaren ökologischen Innendämmsystems ohne Dampfsperre sowie der Vorabschätzung seiner Eignung für zukünftige Sanierungsaufgaben mittels hygrothermischer Simulationsberechnungen zu erreichen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b> .....	<b>17</b>
<b>1 Bindemittel und Mahlversuche</b> .....	<b>21</b>
<b>2 Fördertechnologie</b> .....	<b>25</b>
2.1 Ausgangssituation .....	25
2.2 Lösungsansatz .....	26
2.3 Der Prototyp .....	26
<b>3 Aufspritztechnologie</b> .....	<b>29</b>
<b>4 Putzentwicklung</b> .....	<b>33</b>
4.1 Laborversuche zur Auswahl eines geeigneten Bindemittelsystems .....	33
4.2 Applikation der Versuchsprodukte auf Musterflächen .....	34
4.3 Laborversuche zur Optimierung der Produkteigenschaften .....	36
4.4 Vor-Ort-Versuche .....	36
<b>5 Putzprüfung</b> .....	<b>39</b>
<b>6 Herstellung der Versuchswand</b> .....	<b>41</b>
6.1 Das Versuchsobjekt .....	41
6.2 Versuchswände .....	44
6.3 Haustechnik .....	45
<b>7 Vor-Ort-Messung</b> .....	<b>47</b>
7.1 Allgemeine Beschreibung des Messaufbaus .....	47
7.2 Beschreibung der Sensoren und Messgeräte .....	49
7.2.1 Kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtemessung .....	49
7.2.2 Oberflächentemperaturen .....	50
7.2.3 Wärmeflussmessung .....	51
7.2.4 Solarstrahlung .....	51
<b>8 Auswertung der Messergebnisse</b> .....	<b>53</b>
8.1 Messperiode 1 (22.12.2003 - 26.07.2004) .....	53
8.2 Messperiode 2 (16.08.2004 – 18.06.2005) .....	55
<b>9 Festigkeitswerte</b> .....	<b>57</b>
9.1 Messdurchführung .....	57
9.2 Ergebnisse .....	59
9.3 Vor-Ort-Messungen .....	61

<b>10</b>	<b>Numerische Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchteverhaltens</b>	<b>63</b>
10.1	Einleitung	63
10.2	Werkzeuge und Erfahrungen	64
10.2.1	Simulationssoftware Delphin	64
10.2.2	Erfahrungen an Versuchsobjekten	67
10.3	Materialparameter und Messungen	67
10.3.1	Materialparameter und -funktionen	67
10.3.2	Messung der aufgespritzten Zellulosedämmung und des Putzes	69
10.3.3	Ermittlung charakteristischer Materialfunktionen	71
10.4	Numerische Simulationen	72
10.4.1	Vorbemessung des Wandaufbaus am Versuchsobjekt	72
10.4.2	Vergleich Messung – Rechnung	75
10.4.3	Einfluss eventueller Farbschichten zwischen Bestandputz und Dämmung	82
10.5	Fazit	83
<b>11</b>	<b>Weitere bauphysikalische Aspekte</b>	<b>85</b>
11.1	Einleitung	85
11.2	Bauteilanschlüsse	86
11.3	Schimmelpilze	87
11.3.1	Schimmelpilzprüfung	89
11.4	Langzeitverhalten	90
<b>12</b>	<b>Ergebnisse, weiterer Forschungsbedarf und Schlussfolgerung</b>	<b>91</b>
12.1	Ergebnisse	91
12.2	Weiterer Forschungsbedarf	94
12.2.1	Prüfverfahren	94
12.2.2	Fensterlaibungen	94
12.2.3	Bauteilanschlüsse	95
12.2.4	Materialfestigkeiten	95
12.3	Schlussfolgerungen	95
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>14</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>101</b>

## Einleitung

Im Zuge der weltweiten Bestrebungen zur Energieeinsparung kommt der thermischen Sanierung bestehender Bausubstanz besondere Bedeutung zu. Man schätzt allein für Österreich 130 Millionen Quadratmeter zu sanierende Wohnnutzfläche [Schuster et al.]. Obwohl in den vergangenen Jahren durch Verschärfung der Anforderungen an die Dämmdicke bedeutende Fortschritte erzielt werden konnten, ließen sich europaweit beispielsweise durch die Anwendung der schwedischen Dämmvorschriften mit U-Werten von  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  für Wände bzw.  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  für Dächer Energieeinsparungen von weiteren 50 % erzielen.

In Europa ist der Energieeinsatz in Gebäuden für über 40 % aller  $\text{CO}_2$ -Emissionen verantwortlich. Österreich liegt mit  $1.394 \text{ t CO}_2$ -Ausstoß pro Kopf aus Wohngebäuden nach Spanien, Finnland und Italien an viertschlechtester Stelle. Hinsichtlich des Energieverlustes durch Wände liegt Österreich im Jahr 2001 mit  $133 \text{ MJ/m}^2/\text{Jahr}$  an zweitschlechtester Stelle in Europa hinter Spanien [EURIMA].

Bezogen auf die Investitionskosten kann durch das thermische Sanieren von Gebäuden mit einem niedrigen thermischen Standard der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß am effizientesten reduziert werden. Dabei war bislang die thermische Sanierung bestehender innerstädtischer, zum Teil denkmalgeschützter, Bausubstanz durch Außendämmungen mit erheblichem Aufwand verbunden, wenn nicht gar zufolge bereits erreichter Baufluchtlinien oder komplizierter Fassadengeometrien gänzlich unmöglich.

Obwohl bei Altbauten die Einhaltung der schwedischen Dämmstandards kaum realistisch erscheint, bieten Innendämmungen die Möglichkeit, den U-Wert bestehender Außenwände um rund 50 % zu senken [Häupl et al., 1999].

## Motivation

Da der ökologischen Qualität der verwendeten Baustoffe in Zukunft verstärktes Augenmerk zu schenken sein wird, war es Ziel dieses Forschungsprojektes, aufgespritzte und verputzte Zellulosedämmschichten aus Altpapier hinsichtlich ihrer mechanischen und bauphysikalischen Eignung als Innendämmung ohne Dampfsperre zu untersuchen.

Dabei wurde auf den Ergebnissen des Vorgängerprojektes „Grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulosedämmschichten mit Putzaufgabe für Außenfassaden“ aufgebaut, welches im Rahmen der ersten Ausschreibung der Programmlinie „Haus der Zukunft“ durchgeführt wurde.

Zellulosedämmstoffe können einen wertvollen Beitrag zur Programmlinie „Nachhaltig Wirtschaften“ leisten, da sie als Recyclingprodukt auf Basis der nachwachsenden Ressource Holz produziert werden. Als quasi  $\text{CO}_2$ -neutralem Dämmstoff mit äußerst geringem Primärenergieaufwand kann der Zellulosedämmung auch eine besonders positive Umweltrelevanz zugeschrieben werden.

Der innovative Charakter des Projektes wird durch die Tatsache unterstrichen, dass infolge der hervorragenden Feuchtespeichereigenschaften verbunden mit der hohen kapillaren Leitfähigkeit der gebundenen Zelluloseflocken die Anordnung einer – oftmals fehleranfälligen - Dampfsperre unter bestimmten Umständen überflüssig wird. Dies erhöht die baupraktische Akzeptanz von Innendämm-Massnahmen beträchtlich. Zudem ist in jüngster Zeit eine verstärkte Nachfrage nach Dämmmaterialien für historische Gebäude zu verzeichnen, die den originalen Oberflächencharakter bewahren. Das entwickelte aufgespritzte und mit einem Dickputz versehene Zelloosedämmsystem trägt diesem Trend in besonderem Maße Rechnung. Entsprechende Anfragen seitens der Wirtschaft sowie einiger „Haus der Zukunft“-Projekte liegen bereits vor und unterstreichen die Einbindung des vorliegenden Projekts in die Programmlinie „Nachhaltig Wirtschaften“.

### **Aufbau der Arbeit**

Im Folgenden wird der Projektverlauf anhand der antragsgemäßen Arbeitspakete dargestellt:

<b>Kap. 1</b>	<b>Bindemittel und Mahlversuche</b>	stellt den Produktionsprozess und die untersuchten Bindemittel vor
<b>Kap. 2</b>	<b>Fördertechnologie</b>	erläutert die Weiterentwicklung der getakteten Zellradschleusen- zu einer weitgehend pulsationsfreien Förderung
<b>Kap. 3</b>	<b>Aufspritztechnologie</b>	Weiterentwicklung des CSO-Spritzkopfes mit verbesserten Benetzungseigenschaften
<b>Kap. 4</b>	<b>Putzentwicklung</b>	stellt die Anforderungen und die Entwicklung des Spezial-Innenputzes vor
<b>Kap. 5</b>	<b>Putzprüfung</b>	erläutert die Materialkennwerte und die Feuchtespeicher- und Transportfunktionen des entwickelten Putzes
<b>Kap. 6</b>	<b>Versuchswand</b>	stellt das Versuchsobjekt und die Versuchsdurchführung für die erstmalige Anwendung des neuen Dämmsystems vor
<b>Kap. 7</b>	<b>Vor-Ort-Messung</b>	fasst das Messkonzept zusammen und erläutert die verwendete Messtechnik
<b>Kap. 8</b>	<b>Auswertung Messergebnisse</b>	stellt die Ergebnisse anhand charakteristischer Feuchte- und Temperaturkurven dar
<b>Kap. 9</b>	<b>Festigkeitswerte</b>	gibt einen Überblick über die Festigkeitsmessungen im Vergleich zu konventionellen Wärmedämmverbundsystemen
<b>Kap. 10</b>	<b>Simulationsberechnungen</b>	stellt das Simulationsmodell und die Korrelation mit den Vor-Ort-Messungen vor

- Kap. 11 Bauphysikalische Aspekte** gibt einen Überblick über die spezielle Problematik bei Innendämmungen und stellt die konkrete Schimmelpilzsituation dar
- Kap. 12 Ergebnisse und Ausblick** fasst die Projektergebnisse zusammen und erläutert den weiteren Forschungsbedarf

### **Methodischer Ansatz und Daten**

Nach umfangreichen Laborversuchen zur Entwicklung und Optimierung der aufgespritzten Zelluloseschicht und des Spezial-Innenputzes bestand die Hauptaufgabe des Projektes darin, das entwickelte Dämmsystem anhand von Vor-Ort-Messungen der hygrothermischen Verhältnisse über den gesamten Bauteilquerschnitt unter realen Klimabedingungen über den Zeitraum von mehr als eineinhalb Jahren (zwei Kondensations- und zwei Verdunstungsperioden) zu untersuchen.

Die Erhebung umfangreicher Materialkennwerte des entwickelten Innenputzes und der gebundenen Zellulosedämmung sowie deren Integration zu komplexen Feuchtespeicher- und Transportfunktionen diente als Basis für die begleitenden hygrothermischen Simulationsberechnungen mittels des Softwarepaketes DELPHIN 4 zur Validierung des Rechenmodells hinsichtlich der neuartigen Baustoffe. Damit wurde die Grundlage für die rechnerische Vorabschätzung zukünftiger Sanierungsmassnahmen geschaffen.



## 1 Bindemittel und Mahlversuche

Wolfgang Lackner

Im Rahmen des gegenständlichen Projektes wurden in der Produktionsanlage der Fa. CPH in Hartberg zahlreiche Mahlversuche durchgeführt. Diese hatten das Ziel, den Zelluloseflocken einerseits unterschiedliche Bindemittel zuzumahlen und andererseits die Flocken in einer für den neuartigen Anwendungsfall idealen Sieblinie zu produzieren.



Abb. 1 Mühle in der Produktionsanlage für Zellosedämmstoff mit Pulver-Zudosierer für Brand- und Insektenschutzmittel (links), Einfüllstrecke (mitte) und Austragvorrichtung (rechts)

Bei den Zumahlversuchen hat man sich aus ökologischen Gründen vorerst auf Maisstärke konzentriert. Die Anlagerung an die Faser war sehr gut, die Schimmeltests jedoch waren negativ. Damit konnten die Bedingungen der Bauproduktenrichtlinie des OIB nicht eingehalten werden. Bei den weiteren Versuchen wurden daher Borate bzw. Ammoniumphosphat als Brandschutzmittel bzw. als Fungizid zugemahlen. Bei den Aufspritzversuchen wurde der Klebstoff dem Sprühwasser zugesetzt. Als Flüssigkleber wurden Versuche mit Latexklebern verschiedener Endhärte und einem Polymerisat auf Acrylbasis (TUBICOAT ADK) durchgeführt und gute Resultate erzielt. Allerdings waren die Austrocknungszeiten trotz Verbesserung immer noch zu lang. Versuche, durch eine

entsprechende Luftvorwärmung die Austrocknungszeiten zu verkürzen, sind leider fehlgeschlagen.

Mittelfristig wird die Verwendung bereits in Erprobung befindlicher biogener Bindemittel wie beispielsweise Muschelklebern angestrebt. Deren bemerkenswerter Vorteil besteht unter anderem in der raschen Aushärtung sogar in Gegenwart von flüssigem Wasser und der anschließenden Wasserunlöslichkeit.

Beim Spritzen der Probekörper wurde ein großer Einfluss der Sieblinie auf die Qualität der Probekörper festgestellt. Durch Verstellen der Umfangsgeschwindigkeit der Mühle sowie durch die Veränderung des Mahlspaltes wurden verschiedene Mahlungen produziert, die sich im Aufbau der Sieblinie unterschieden. Diese Veränderungen sind an sich relativ einfach durchzuführen, aber um die entsprechenden Proben sortenrein aus der Anlage entnehmen zu können, ist jeweils vor Beginn eines Versuches die Anlage zu reinigen. Weiters wird der Mahlvorgang durch lange Vor- bzw. Nachlaufzeiten erschwert. Die unten dargestellten Sieblinien wurde mittels eines Satzes von acht Sieben mit 20 cm Durchmesser in den Dimensionen von 4 bis 0,045 mm ermittelt. Als ideal ergab sich ein Produkt im Bereich nachstehender Sieblinie



Abb. 2 Siebsatz

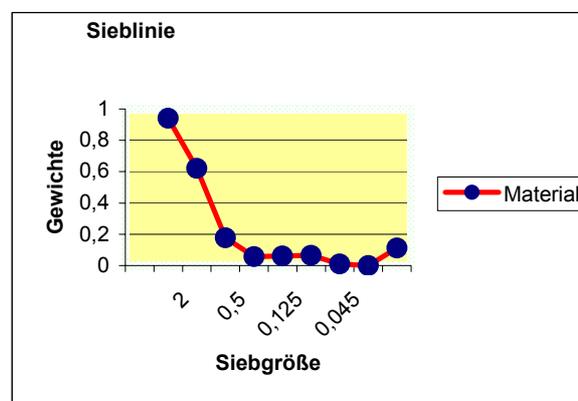


Abb. 3 Ideale Gewichtsverteilung der einzelnen Faserlängen

Zum Vergleich sind untenstehend zwei weitere Sieblinien (oberer und unterer Grenzbereich) dargestellt.

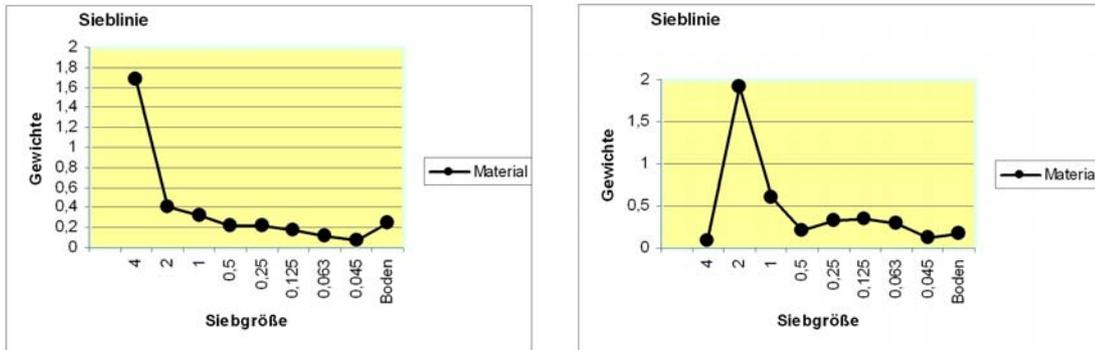


Abb. 4 Untere sowie obere Grenzsieblinien

Bei diesen Untersuchungen war festzustellen, dass die Dichte der Probekörper mit steigendem Grobstoffanteil zu-, die Wärmeleitfähigkeit jedoch abnahm. Untenstehende Graphik zeigt diesen Zusammenhang.

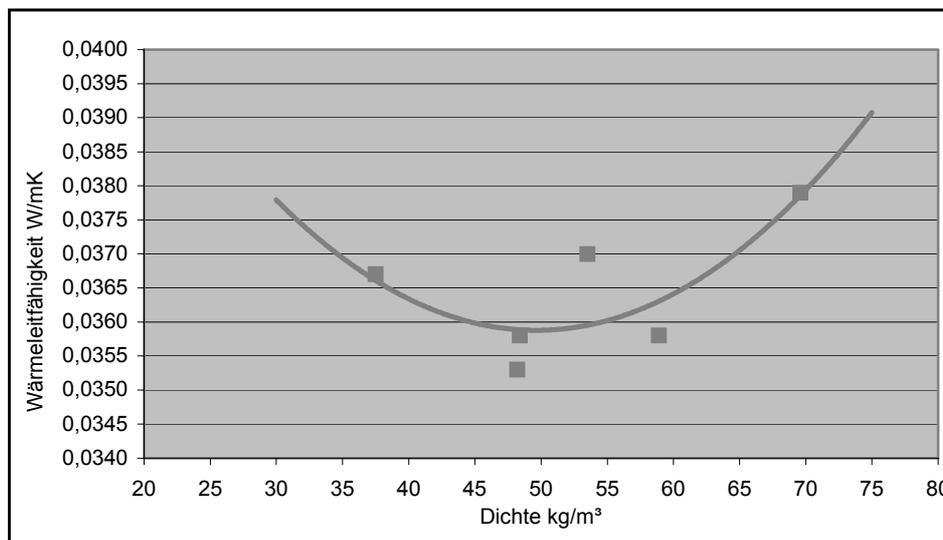


Abb. 5 Wärmeleitzahlen der CPH Einblaszellulose



## 2 Fördertechnologie

Johann Engl

### 2.1 Ausgangssituation

Zur Zeit arbeiten nahezu alle am Markt befindlichen Maschinen zum Einblasen von losen Dämmstoffen nach demselben Prinzip: das zu verarbeitende Material, das aus Transportgründen mehr oder weniger verpresst ist, wird durch eine Auflockerungseinheit, die auch als Zubringer fungiert, in eine sehr flaumige Form gebracht und in eine Zellradschleuse befördert. Diese stellt den Luftabschluss zum Auflockerungsraum her und wird mit der Förderluft, die das Material zu dem zu befüllenden Ort bringt, durchblasen.

Zellradschleusen haben meist fünf bis sieben Kammern, die durch die relativ langsame Umdrehungsgeschwindigkeit einen Takt vorgeben, wodurch eine gewisse Pulsation des Förderstromes entsteht. Diese ist beim Einblasen von Zellulose sogar gewünscht, da sie zur Verdichtung des Materials beiträgt. Beim Aufspritzen bewirkt diese Pulsation allerdings, dass der Flockenstrom im Spritzkopf ungleichmäßig befeuchtet wird und daher die Festigkeitseigenschaften des aufgespritzten Dämmkörpers örtlich stark unterschiedlich sind. Zudem werden bereits an der Wand anhaftende Zelluloseflocken durch den pulsierenden Luftstrom zum Teil wieder gelöst.

Da außer bei den Akteuren des gegenständlichen Projektes in der noch engen Branche wenig theoretisches Wissen über die Förderung von Zelluloseflocken vorhanden ist, war davon auszugehen, dass die Lösung dieses Problems nur durch Kombinationen von verschiedenen, am Markt befindlichen Fördersystemen erreicht werden kann.

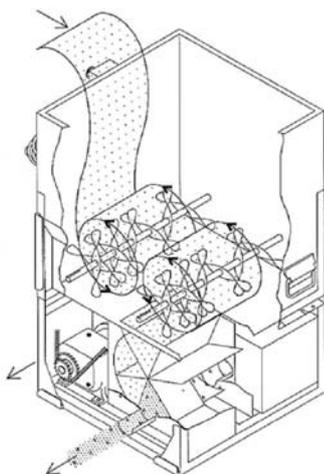


Abb. 6 Einblasmaschine mit Zellradschleuse  
(Marke Krendl)



Abb. 7 Einblasmaschine mit Zellradschleuse  
zur Befüllung von Holzfertigteilen

## 2.2 Lösungsansatz

Die oben dargestellten Probleme bei der Materialförderung wurden in einem Innovations-Workshop unter Anwendung des Problemlösungs-Tools TRIZ analysiert und einer Lösung zugeführt.

TRIZ ist eine Theorie des erfinderischen Problemlösens. TRIZ ist aber auch ein Tool aus der Gruppe der artificial intelligence Systeme. Es geht auf Genrich Saulovich Altshuller (1926 - 1998), einen russischen Patentanwalt zurück, der ab 1946 Tausende von Patenten nach den ihnen zugrundeliegenden Lösungsprinzipien untersucht und daraus allgemeine Thesen und innovative Prinzipien abgeleitet hat: das tatsächliche Problem wird über Abstraktion auf die technische (oder in weiterer Stufe auf die physikalische) Ebene zu einem Standard - Problem transformiert.

Die Lösungssuche erfolgt nun auf der technischen bzw. physikalischen Ebene, wobei dabei die Werkzeuge von TRIZ, wie „Innovation Workbench“, „Technoptimizer“ oder „TriSolver“ zur Anwendung kommen. Nach Generierung der Standardlösungen werden diese wieder auf das eigentliche Problem zurück projiziert, bewertet und favorisierte Lösungen zur weiteren Bearbeitung vorbereitet.

## 2.3 Der Prototyp

Das Ergebnis des o.a. Innovationsprozesses war, dass das für Einblasmaschinen bisher angewandte Konzept grundlegend verändert werden musste. So fällt bei der neu entwickelten Maschine das Material nicht mehr portionsweise in die Kammern einer Zellradschleuse sondern wird kontinuierlich über einen Ventilator angesaugt.



Abb. 8 Vorversuch der Fördermaschine mit Saugventilator (links vorne) anstelle der Zellradschleuse

Lediglich die Auflockerungseinheit wurde beibehalten. Von dieser wird nun der Zellulose-dämmstoff durch eine Dosiereinheit in eine Förderschnecke eingebracht. Die Dosiereinheit

besteht aus zwei gegenläufigen Wellen, auf denen „Paddel“ aus Federstahl befestigt sind. Die Förderschnecke führt das Material einem Radialventilator zu, der den Dämmstoff ansaugt, das Material-Luftgemisch weiter homogenisiert und es durch den angeschlossenen Förderschlauch zum Spritzkopf bläst.

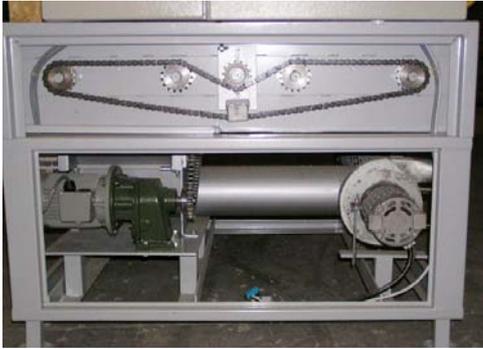


Abb. 9 Seitenansicht der Fördermaschine



Abb. 10 Zentrale Förderschnecke mit Saugventilator

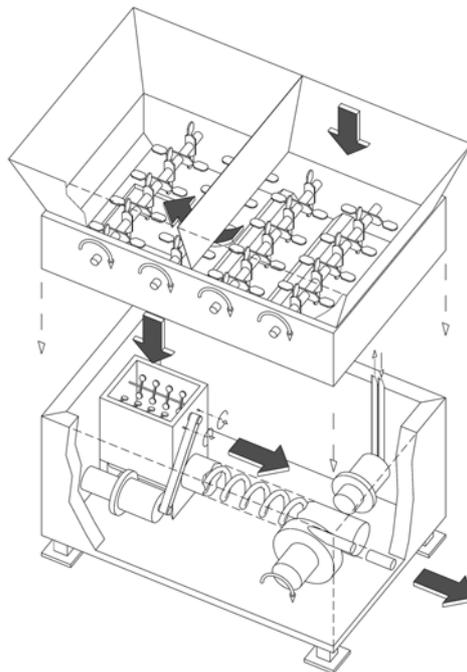


Abb. 11 Fördermaschine mit kontinuierlicher Förderung

Um die einzelnen Transporteinheiten gut aufeinander abstimmen zu können, wurde die Steuerung der Maschine sehr aufwendig gestaltet. So ist jede der Komponenten über einen Frequenzumformer bzw. der Ventilator über eine Phasenanschnittsteuerung zu regeln. Dieses hohe Maß an Regelbarkeit ist einerseits zwar sehr gut, hatte aber eine verhältnismäßig lange Abstimmzeit zur Folge, denn jede Parameteränderung hat Einfluss auf die andere Teileinheit und letztlich auf das optimale Funktionieren der Maschine.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die neue Maschine bei der Herstellung der Musterflächen im Labor und auch bei der Errichtung der Musterflächen im Versuchshaus gute Ergebnisse gebracht hat.

In beiden Fällen wurde allerdings auf einer Ebene und mit relativ kurzer Schlauchlänge gearbeitet, das heißt, dass sich die Fördermaschine und die Musterwand etwa auf gleicher Höhe befanden. Bei der Erprobung der Praxistauglichkeit und der Simulation anderer Gegebenheiten, wie beispielsweise der Förderung in höher gelegene Stockwerke, ergaben sich aber beträchtliche Schwierigkeiten. Insbesondere erhöhten sich die Einflussparameter um weitere drei, nämlich die Anzahl der Schlauchwindungen, die unterschiedliche Länge der Schläuche und die Höhendifferenz zwischen Maschine und aufzuspritzender Fläche. Diese Faktoren führten wieder zu einer teilweisen Verklumpung des, durch die neue Fördermaschine weitgehend gleichmäßig an den Förderschlauch übergebenen Zellulosestromes. Die Beherrschung dieser zusätzlichen Parameter erfordert noch einigen Forschungsaufwand.

Zwar wurden statische Mischer, wie sie zur Mischung von rieselfähigem und flüssigem Fördergut in Schläuchen und Rohren verwendet werden, sowie eine Homogenisier- vorrichtung, wie sie aus der Putzverarbeitung bekannt ist, getestet. Leider konnten diese Geräte auf das Luft-Zellulosegemisch jedoch nicht abgestimmt werden. Die Entwicklung einer auf das spezielle Material optimierten Homogenisiervorrichtung konnte im Rahmen des Projektes nicht in Angriff genommen werden. Jedoch wurde ein Anforderungsprofil skizziert mit dessen Hilfe es – ggf. im Rahmen eines Folgeprojektes - möglich sein sollte, das Ziel einer kontinuierlichen Flockenübergabe an den Spritzkopf zu erreichen.



Abb. 12 Die neue Fördermaschine im Einsatz

### 3 Aufspritztechnologie

Wolfgang Lackner

Das Hemmnis für die Optimierung beim Aufspritzen der Versuchsflächen war in der Vergangenheit der ungleichmäßige Flockenstrom, der als Basis für eine gleichmäßige Befeuchtung der Zelluloseflocken unzureichend war. Mit der neuen Aufspritzmaschine kann das Flocken/Luftgemisch wesentlich homogener produziert werden und der Materialfluss ist deutlich gleichmäßiger.

Bei der Herstellung der Probekörper wurden zwei verschiedene Methoden angewandt; zum einen ein Schaumverfahren und zum anderen das klassische Verfahren mit einem Wasser-Klebstoffgemisch.

Zur Erzeugung des Schaumes wurde ein Mischrohr entwickelt, in dem mit Druckluft ein Kleberschaum erzeugt wird, dessen Konsistenz etwa dem von Rasierschaum entspricht. An der Rezepturfindung war die Firma CHT R. Beitlich GmbH, Meiningen, bei der auch die Komponenten zur Herstellung des Schaumes bezogen wurden, wesentlich beteiligt. Über eine Schlauchleitung gelangt der Schaum zu einem modifizierten Mischkopf aus der Spritzbetontechnologie, in dem der Zellulosestrom durch den Schaum geführt und so mit diesem vermischt wird. Der von der Aufspritzmaschine erzeugte Luftdruck wirft den Zelloleschaum an die Wand.



Abb. 13 Schaumerzeugungseinheit (vorne) und umgebaute Spritzbetondüse

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der an der Wand anhaftende Zelloleschaum gut geglättet werden kann und in einem Arbeitsgang Schichtdicken von 10 bis 12 cm erzeugt werden können. Ein Nachteil ist, dass die Festigkeit der getrockneten Schicht zu niedrig ist, um als Putzträger verwendet werden zu können, was durch die Festigkeitsprüfungen dokumentiert wird.

Zur Herstellung von Dämmschichten ohne Putz ist der Zelluloseschaum möglicherweise jedoch gut geeignet. So könnte das Schaumsystem z.B. für die Kellerdeckendämmung in der Altbausanierung eine Alternative zu bestehenden Systemen darstellen.

Nach dieser Erfahrung galt die Konzentration der Weiterentwicklung des klassischen Aufspritzverfahrens mit Wasser. Die in der Branche für das so genannte CSO (Compact-Spray-On) - Verfahren verwendeten Sprühköpfe konnten dazu nicht verwendet werden, da die Benetzung mit dem Kleber nur ungenügend erfolgte.



Abb. 14 „Klassische“ CSO - Düse

So wurden in Zusammenarbeit mit dem Düsenhersteller Spraying-Systems, Wien verschiedene Sprühköpfe gebaut und getestet. Das Ergebnis und letztlich der verwendete Düsenkopf sind auf untenstehendem Bild zu sehen.



Abb. 15 Neuentwickelter Spritzkopf mit kombinierter Innen- und Außenbefeuchtung für getrennt regelbare Durchsatzmengen (vorderes Absperrventil = Mitteldüse, hinteres Absperrventil = Ringdüsen)

Zur Zerstäubung des Klebers wurde eine Kegelstrahlmitteldüse verwendet. Dadurch wird der Flockenstrom von innen nach außen benetzt. Um einen unkontrollierten Austritt der Flocken aus dem Förderschlauch zu verhindern, wurden acht Flachstrahldüsen ringförmig um das Mischrohr angeordnet, die den austretenden Zellulosedämmstoff einhüllen und gleichzeitig von außen befeuchten; dadurch wird auch eine zu hohe Staubentwicklung verhindert. Um den Wassergehalt der Proben zu reduzieren und somit den Trocknungsprozess zu verkürzen, wurde das eigentlich für die Schaumdüse konzipierte Klebergemisch verwendet. Durch die beigefügten Schaumbildner (Polyvenylalkohol und ein Tensid) wird die Oberflächenspannung des Kleber-Wassergemisches reduziert und so eine bessere Benetzung des trockenen Zellulosedämmstoffes erreicht.



Abb. 16 Musterwand – fast ohne „Marmor-Effekt“

Zur Herstellung der Muster für Orientierungsprüfungen der Zugfestigkeit normal zur Probenebene wurden aus Ziegeln ohne Mörtel Probewände aufgeschichtet und der Dämmstoff aufgespritzt. Nach der Trocknung wurde der Dämmstoff mit einer Diamantsäge allseitig beschnitten.



Abb. 17 Probekörperherstellung

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich eines geeigneten Abziehsystems zur Erzielung einer gleichmäßigen Dämmstoffdicke. Gegenwärtig werden dazu im Abstand von etwa 70 cm Leisten an der Wand montiert, an denen nach dem Aufspritzen der überschüssige Dämmstoff mittels rotierender Bürste abgezogen wird. Nach entsprechender Austrocknung der Zelluloseschicht werden die Leisten entfernt und die Fehlstellen mit feuchtem Material verfüllt. Alternativ wurde ein Verbleib der, in diesem Fall aus Karton-Kantenschutzwinkeln bestehenden Leisten in der Dämmschicht erprobt. Allerdings hatte das Schwinden der Zelluloseschicht infolge Austrocknung zur Folge, dass die Kanten der Abzugsleisten aus der fertigen Zelluloseschicht hervorstanden und abgefräst werden mussten.

Zur Zeit wird im Zuge des, ebenfalls in der Programmlinie „HausderZukunft“ durchgeführten, Projektes „Verputzte Zellulose-Schallabsorber“ an einem Rahmen gearbeitet, der vor der zu beschichtenden Wandfläche zwischen Decke und Boden verspannt wird und in dem die rotierende Abzugsbürste in einem definierten Abstand über die Zellulose geführt wird.

## 4 Putzentwicklung

Robert Schmied

Als Endbeschichtung für die Zellulosedämmschicht war die Entwicklung eines weitgehend diffusionsoffenen, feuchtigkeitsspeichernden mineralischen Leichtputzes ( $\mu$ -Wert  $< 20$ , Trockenrohichte  $< 1200 \text{ kg/m}^3$ ) erforderlich, der maschinell verarbeitbar in einem Arbeitsgang und in einer Putzstärke von 10 bis 15 mm auf die Zellulosedämmung aufgebracht werden kann. Um verschiedenen gestalterischen Anforderungen gerecht zu werden, sollte es mit diesem Putz möglich sein, eine raue, geriebene Oberflächenstruktur zu erzeugen.

Folgende Entwicklungsschritte waren dazu notwendig:

1. Laborversuche zur Auswahl eines geeigneten Bindemittelsystems, Auswahl des Leichtzuschlages und Adaptierung der Sieblinie, Erstellung von Basisrezepturen
2. Applikation der Versuchsprodukte auf Musterflächen, Beurteilung der Verarbeitungseigenschaften
3. Laborversuche zur Optimierung der Produkteigenschaften und Applikation der optimierten Putze auf Labormusterflächen
4. Messtechnische Erfassung der baustoffspezifischen Materialkennwerte und Festlegung der Putzrezeptur für die Vor-Ort-Messung
5. Verputzen der Vor-Ort-Messwand im Versuchshaus
6. Weiterentwicklung der Putzrezeptur mit dem Ziel verminderter Rissanfälligkeit
7. Beschichtung der zweiten Versuchswand
8. Herstellung der Probekörperserien für die detaillierten Materialprüfungen an der TU Dresden

### 4.1 Laborversuche zur Auswahl eines geeigneten Bindemittelsystems

Erfahrungsgemäß sind Kalk-Zement-Maschinenputze besser als Gips-Maschinenputze geeignet, die festgelegten Anforderungen an das Diffusionsverhalten zu erfüllen. Außerdem ist bekannt, dass diese Eigenschaft mit zunehmendem Anteil an Weißkalkhydrat in der Bindemittelmischung verbessert wird.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurden im Labor verschiedene Mörtelmischungen hergestellt, deren Eigenschaften noch zusätzlich durch mineralische Leichtzuschläge (Perlite, Schaumglas) variiert wurden.

Die wesentlichen Kenngrößen für die Charakterisierung der Putzeigenschaften werden nach Normvorgaben sowohl am Frischmörtel als auch am erhärteten Putz bestimmt. Im wesentlichen sind das am Frischmörtel Wasseranspruch, Luftporengehalt,

Wasserrückhaltevermögen, Frischmörtelrohddichte und das Erstarrungsverhalten. Am erhärteten Putz wurde die Festigkeitsentwicklung und die Trockenrohddichte ermittelt.

Anhand dieser Untersuchungsergebnisse wurden für die weiterführenden Versuche vier Putzvarianten mit einem Zement/Weißkalkhydrat-Verhältnis zwischen 2,0 und 3,0 und einer Trockenrohddichte zwischen 500 und 1100 kg/m<sup>3</sup> ausgewählt.

		CP1	CP2	CP3	CP4
Wasseranspruch	[M-%]	32,5	37	43,3	87
Frischmörtelrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1120	1350	1000	790
Luftporengehalt	[V-%]	33	23	27	40
Wasserrückhaltevermögen	[%]	92,2	97,3	83,6	90,9
Biegezugfestigkeit 28d	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,7	0,9	0,5	0,6
Druckfestigkeit 28d	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,4	1,9	1,1	1,0
Trockenrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	900	1130	760	500

Tab. 1 Zusammenfassung der Materialkennwerte der vier ausgewählten Putzmörtel

## 4.2 Applikation der Versuchsprodukte auf Musterflächen

Laboruntersuchungen nach genormten Verfahren geben nur einen Anhaltspunkt für die tatsächlichen Produkteigenschaften. Wesentlich sind die Materialeigenschaften bei der maschinellen Verarbeitung. Durch die kurze Mischzeit bei der Verarbeitung mit der Putzmaschine wird vor allem der Luftporengehalt minimiert, damit steigt auch die Putzfestigkeit. Bei der Rezeptierung im Labor sind daher bereits entsprechende Vorhaltemaße für die Bindemittel- und Additivgehalte zu berücksichtigen.

Grundsätzlich kann die maschinelle Verarbeitung in mehrere Arbeitsschritte unterteilt werden:

Der Kalk-Zement-Putz wird in der erforderlichen Schichtdicke aufgetragen, danach mit einer Alulatte abgezogen und ansteifen gelassen. Wenn der Putz nach einigen Stunden bereits eine gewisse Festigkeit erreicht hat, wird die Oberfläche „geschnitten“, das heißt planflächig zugerichtet und anschließend mit einem Schwammbrett verrieben oder nach Aufräumen der Oberfläche eine zweite dünne Schicht des Kalk-Zement-Putzes aufgetragen, mit einer Traufel eingeebnet und nach kurzem Ansteifen verrieben.

Die zeitliche Abfolge der einzelnen Verarbeitungsschritte wird wesentlich durch den Putzuntergrund bestimmt. Dieser sollte daher einen homogenen Aufbau und ein gleichmäßiges Saugverhalten aufweisen, Voraussetzungen die von der Zellschicht erfüllt werden.

Da die Zellulosedämmschicht allerdings wesentlich mehr und auch schneller Wasser aufnimmt als vergleichsweise ein Ziegelmauerwerk, ist der Putzmörtel genau darauf abzustimmen. Durch Additive kann das Wasserrückhaltevermögen des Putzmörtels, das heißt die Zeit in der er eine bestimmte Wassermenge an den Untergrund abgibt, beeinflusst werden.

Als Putzuntergrund für die Versuche wurde auf Gipsfaserplatten eine 3 cm dicke Zellulosedämmschicht aufgespritzt. Nach einer Trocknungszeit von mehreren Tagen wurden diese Dämmstoffplatten auf einer Versuchswand befestigt und die verschiedenen Putzmörtel aufgebracht.



Abb. 18 Unbeschichtete Dämmstoffplatten



Abb. 19 Aufspritzen des Putzmörtels



Abb. 20 Abziehen des Putzmörtels



Abb. 21 Verreiben der Oberfläche

Das maschinelle Auftragen der Putzmörtel in einer Stärke von 15 bis 20 mm funktionierte bei allen Varianten erwartungsgemäß gut, beim Abziehen allerdings waren bereits große Unterschiede festzustellen. Die Varianten CP1 und CP2 wirkten sehr klebrig und konnten nur mit einem relativ großen Kraftaufwand eingeebnet werden. Die Putzmörtel CP3 und CP4 waren hingegen leicht abzuziehen, Variante CP4 wies auch ein ausgezeichnetes Standvermögen auf. Bei den Varianten CP2 und CP3 war das Standvermögen nicht ausreichend, das heißt der Putz rutschte stellenweise leicht ab und bildete Wellen, die nur durch mehrmaliges Abziehen wieder eingeebnet werden konnten. Bei Variante CP3 bildete sich zudem ein deutlicher Wasserfilm auf der Oberfläche, der auf einen zu geringen Bindemittelgehalt schließen ließ.

Ähnliche Unterschiede zeigten sich auch beim nächsten Verarbeitungsschritt. Sowohl der Zeitraum bis zum Schneiden als auch das Verhalten beim Schneiden war bei allen Putzen verschieden, wobei hier die Variante CP1 die besten Eigenschaften aufwies. Der letzte Verarbeitungsschritt, das Verreiben der Oberfläche, verlief mit Ausnahme von Variante CP4, bei der keine gleichmäßige Oberflächenstruktur hergestellt werden konnte, wieder weitgehend zufrieden stellend. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Putzmörtelvariante CP1 für weitere Optimierungsschritte ausgewählt.

### **4.3 Laborversuche zur Optimierung der Produkteigenschaften**

Aus den Anwendungsversuchen konnten einige Ansatzpunkte für verbesserte Putzmörtelrezepturen auf Basis der Variante CP1 abgeleitet werden, die im ersten Schritt wieder in Laborversuchen getestet wurden. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf die richtige Abstimmung der Additive auf das Bindemittelsystem gelegt, um vor allem die Klebrigkeit der Mörtelmischung zu reduzieren, ohne allerdings das Wasserrückhaltevermögen zu verändern. Gleichzeitig wurde versucht die Rohdichte durch eine Variation der Leichtzuschlagstoffe weiter abzusenken. Im Vergleich zu den ersten Anwendungsversuchen auf Musterflächen zeigten sich bei der optimierten Putzrezeptur CP12 deutlich verbesserte Verarbeitungseigenschaften, die bereits weitgehend den Anforderungen an einen Kalk-Zement-Maschinenputz entsprechen.

### **4.4 Vor-Ort-Versuche**

Nach Abschluss der ersten Projektphase zur Putzentwicklung mit Labor- und Anwendungsversuchen auf Prüfwänden, Optimierung der Putzrezeptur anhand dieser Ergebnisse und messtechnischer Erfassung der baustoffspezifischen Materialkennwerte wurde die ausgewählte Putzvariante CP12 im System mit der Zellulosedämmschicht auf die Versuchswand für die Vor-Ort-Messung aufgebracht.

Dazu wurde der Putzmörtel in einer – durch das Anbringen von Metall-Putzleisten – genau definierten Dicke von 15 mm maschinell auf die Zellulosedämmschicht aufgespritzt und mit einer Alulatte abgezogen. Am nächsten Tag wurde die Oberfläche „geschnitten“, das heißt

planflächig zugerichtet und mit einem Schwammbrett verrieben. Auch hier zeigte sich die Besonderheit des Zellulose-Putzgrundes, der durch die Wasseraufnahme aus dem Putz oberflächlich aufweichte und das Verreiben daher nicht mit dem üblichen Druck ausgeführt werden konnte. Dennoch konnte eine ausreichend stabile Oberfläche erzielt werden.

In den ersten Wochen der Erhärtungsphase trat an einigen Stellen eine deutliche Rissbildung im Putz auf, die zum einen auf das ungünstige Längen-/Breitenverhältnis der einzelnen Putzfelder, zum anderen auf das Ausmaß des Schwindvorganges im Putz zurückzuführen war. Es waren daher für diesen Kalk-Zement-Leichtputz weitere Optimierungsschritte erforderlich, um in erster Linie die Festigkeitsentwicklung, den Elastizitätsmodul und das Schwindverhalten zu verbessern, ohne aber die anderen Materialkennwerte, wie die Wasserdampfdiffusion und die Wärmeleitfähigkeit nachteilig zu beeinflussen.

Durch Variation des Bindmittelverhältnisses Kalk/Zement und die Zugabe von schwindreduzierenden Additiven konnten in Labor- und Anwendungsversuchen messbare Verbesserungen erzielt werden. Diese verbesserten Rezepturen wurden anschließend auf Laborprüfwänden im System mit der Zellosedämmschicht getestet. Aus diesen Versuchen wurde die Variante CP25 für die Bestimmung der hygrothermischen Materialkennwerte ausgewählt, die entsprechenden Prüfkörper hergestellt und für die weiterführenden Untersuchungen an die TU Dresden übermittelt.

Bei der Herstellung der Prüfkörper wurde der Putzmörtel maschinell angemischt (Putzmaschine PFT G4), entweder direkt in Formen oder in einen Mörteltrog gespritzt und für die entsprechenden Prüfungen in Formen gefüllt.



Abb. 22 Putzmaschine PFT G4



Abb. 23 Probekörperherstellung für die Ermittlung der Festigkeitswerte

Mit dieser verbesserten Putzrezeptur wurde die zweite Versuchswand im Messobjekt beschichtet. Dazu wurde der Putzmörtel wiederum in einer genau definierten Dicke von 15 mm maschinell auf die Zellulosedämmschicht aufgespritzt, mit einer Alulatte abgezogen und am nächsten Tag geschnitten und verrieben. Zwar trat nach einigen Wochen der Erhärtungsphase an zwei Stellen eine Rissbildung im Putz auf, die aber aufgrund der wesentlich geringeren Rissbreite und –länge eine deutliche Verbesserung gegenüber der ersten Putzvariante darstellte.

## 5 Putzprüfung

Robert Schmied, Rudolf Plagge

Aufgrund der ersten Untersuchungsergebnisse wurde die Putzvariante CP12 für die erste Versuchswand ausgewählt. Als Grundlage für die ersten bauphysikalischen Simulationsberechnungen wurden daher von dieser Putzmörtelvariante noch folgende zusätzliche baustoffspezifische Materialkennwerte ermittelt:

- Wärmeleitfähigkeit
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
- Wasseraufnahmekoeffizient
- Sorptionsfeuchte

		CP12
Wasseranspruch	[M-%]	31
Frischmörtelrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1260
Luftporengehalt	[V-%]	25
Wasserrückhaltevermögen	[%]	91,8
Biegezugfestigkeit 28d	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,8
Druckfestigkeit 28d	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,6
Trockenrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1040
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	ca. 0,38
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[ - ]	ca. 18
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]	2,64
Sorptionsfeuchte bei 75% r.F.	[M-%]	4,8

Tab. 2 Materialkennwerte des Putzes für Versuchswand 1 (bei maschineller Verarbeitung des Putzmörtels)

In nachfolgender Tabelle sind die materialtechnischen Kennwerte der verbesserten Putzvariante bei maschineller Verarbeitung zusammengefasst:

		CP25
Wasseranspruch	[M-%]	32
Frischmörtelrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1290
Luftporengehalt im Frischmörtel	[V-%]	25

Wasserrückhaltevermögen	[%]	92,5
Biegezugfestigkeit 28d	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,65
Druckfestigkeit 28d	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,4
Trockenrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1024
Gesamtporosität	[ % ]	61,3
Elastizitätsmodul	[N/mm <sup>2</sup> ]	2330
Wasseraufnahmekoeffizient w (in Anlehnung an EN ISO 15148)	[kg/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ]	7,64
Wasserleitfähigkeit (in Anlehnung an ISO/CD 17312 und 17313)	[cm/d]	0,41
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$ (dry-cup) (in Anlehnung an EN ISO 12572)	[ - ]	6,15
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,225
Wärmekapazität	[J/kgK]	1090

Die Bestimmung der Feuchtesorption erfolgte im hygrischen Bereich in Anlehnung an ISO DIS 12571 und im überhygroskopischen Bereich an ISO DIS 11274. Die Kennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Relative Luftfeuchte %	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Mittelwert	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Minimum	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Maximum
43,2	0,0242	0,0189	0,0299
58,2	0,0270	0,0209	0,0676
75,4	0,0306	0,0260	0,0341
84,7	0,0605	0,0566	0,0643
96,0	0,0936	0,0793	0,109
97,4	0,0987	0,0807	0,118

Kapillardruck hPa	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Mittelwert	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Minimum	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Maximum
0	0,445	0,423	0,473
119	0,360	0,347	0,386
300	0,332	0,316	0,355
1500	0,222	0,194	0,252
3000	0,169	0,124	0,240
5000	0,144	0,103	0,221
8000	0,136	0,0970	0,215
14000	0,135	0,106	0,167

## 6 Herstellung der Versuchswand

Herwig Hengsberger, Wolfgang Lackner

### 6.1 Das Versuchsobjekt

Aufgrund der etwas verzögerten Beauftragung und der damit verbundenen Überschneidung von Projekt- und Sanierungszeitplan konnte das ursprünglich für die Vor-Ort-Messungen geplant gewesene und im Projektantrag vorgestellte denkmalgeschützte Gebäude in der Langegasse, Ecke Körösisstraße in Graz nicht für die Versuchsdurchführung herangezogen werden.

Dank der Unterstützung der Liegenschaftsverwaltung der Stadt Graz konnte ein - als Magistratseigentum ebenfalls denkmalgeschütztes - Ersatzobjekt gefunden werden. Dieses bot die Möglichkeit, die Messungen unbeeinflusst von zwischenzeitlich eventuell begonnenen Baumaßnahmen und durch die hofseitige Lage der Wand vandalensicherer als in der Langegasse, durchzuführen. Zudem konnten die Versuche nun an der für Grazer Verhältnisse ungünstigsten Orientierung, der Westfassade, erfolgen. Durch die Beteiligung der Liegenschaftsverwaltung der Stadt Graz blieb auch die durch den ursprünglichen Bauträger zu erwartende Multiplikatorwirkung erhalten.



Abb. 24 Lageplan des Versuchshauses

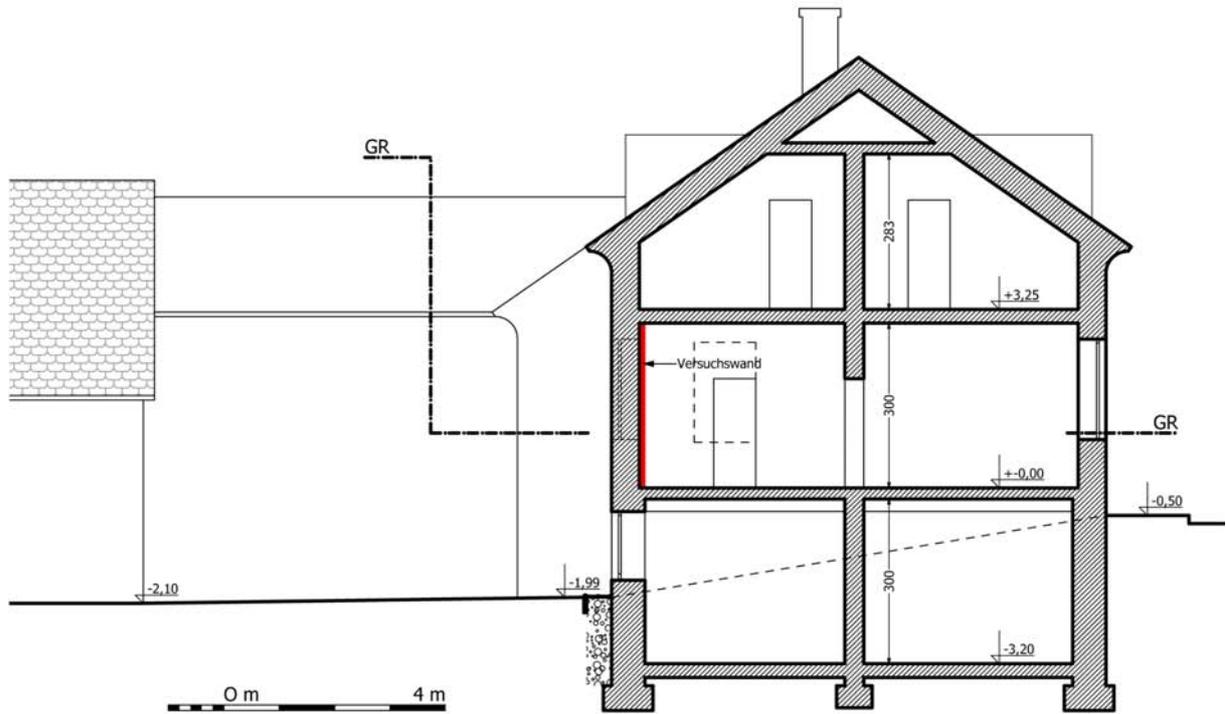
Das eingeschossige, rund 9 mal 13,5 Meter große Gebäude in der Liebenauer Hauptstraße 84 wurde im 19. Jh. erbaut und nimmt mit seiner Nord-Süd orientierten Längsseite fast die gesamte Breite der für gegründete Dörfer kennzeichnende Gewannflur ein. Bei der, seit 1949 so benannten, Nord-Süd verlaufenden Liebenauer Hauptstraße handelt es sich um einen mittelalterlichen Hauptverkehrsweg östlich der Mur, entlang dessen sich noch zahlreiche, meist eingeschossige, vielfach noch giebelseitig gestellte Häuser mit Schopfwalmdach befinden. Die meisten Häuser der Straßensiedlung entstanden am Ende des 18. Jahrhunderts und im Biedermeier. Ein hackenförmiger Anbau in Verlängerung der Nordfassade und ein freistehendes, ebenfalls eingeschossiges, rund 8 mal 16 Meter großes Gebäude an der südlichen Grundstücksgrenze bilden ein Ensemble mit einem kleinen Innenhof. Im Norden an das Grundstück angrenzend führt der im Zuge des Autobahnbaues in ein neues Bachbett verlegte Petersbach vorbei.



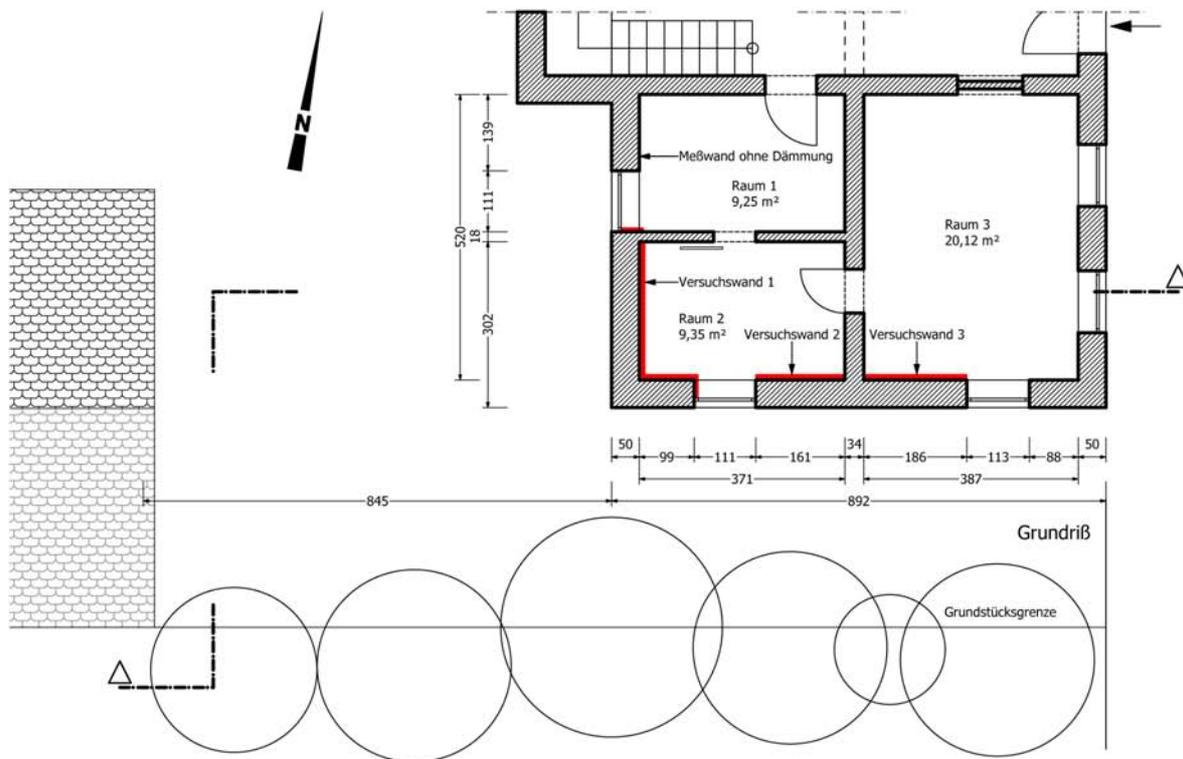
Abb. 25 Süd-Ost- und Hofansicht des Versuchshauses (mit skizzierten Versuchsräumen)

Der Grundriss des Hauptgebäudes wird durch den typischen Flur- und Stiegenhausbereich in zwei, etwa gleich große Bereiche unterteilt. Im rechten Teil befindet sich seit 1938 das Bezirksamt des siebenten Grazer Gemeindebezirkes Liebenau, in der linken Hälfte eine Hausmeisterwohnung. Die Wohnung besteht aus drei Räumen mit 9.25, 9.35 und 20.12 m<sup>2</sup>. Das Gebäude ist zur Gänze unterkellert. Unter Raum 3 der Hausmeisterwohnung befindet sich die Fernwärmeübergabestation und in dem rund 20 m<sup>2</sup> großen Raum unter den beiden anderen Räumen eine Problemstoffabgabestelle. Dieser Raum wird nicht beheizt und zwei mal täglich für je eineinhalb Stunden durch eine mechanische Abluftanlage entlüftet.

Im ausgebauten Dachgeschoss befinden sich drei Wohnungen, die nur zum Teil genutzt werden. Vor rund 13 Jahren wurden im gesamten Gebäude Isolierglasfenster eingebaut. Im Jahre 2001 wurde in dem bis dahin mittels Einzelöfen beheizten Gebäude eine Fernwärmezentralheizungsanlage mit Radiatoren unter den Fenstern installiert. Der Bauzustand ist insgesamt als gut zu bezeichnen.



Querschnitt



Grundriß

Abb. 26 Grundriß und Schnitt durch das Versuchsobjekt

## 6.2 Versuchswände

### Westwand

Für die Aufbringung der im Mittel 5 cm dicken aufgespritzten Zellulosedämmschicht wurde die westseitige, 2,50 m breite und 3,0 m hohe Außenwand des Raumes 2 ausgewählt. Dies deshalb, weil sie den hinsichtlich Schlagregenbeanspruchung ungünstigsten Fall darstellt und zum anderen den größten durch Fensteröffnungen oder Wandeinbindungen ungestörten Bereich bietet.

Die Dämmschicht wurde dabei auf der gesamten Breite und Höhe der Wand angebracht und ermöglichte damit die messtechnische Erfassung der drei wichtigsten Situationen für Innendämmmaßnahmen:

- a) den Regelquerschnitt in Wandmitte
- b) den hinsichtlich Grenzschnitttemperatur zwischen Dämmung und Wand kritischen Bereich in der Innenkante der Außenecke
- c) den hinsichtlich Innenoberflächentemperatur und damit Kondensatbildung kritischen Bereich des Anschlusses der Innenwand an die innen gedämmte Außenwand

Da in Raum 1 das Fenster unmittelbar an die Trennwand zu Raum 2 angrenzt - was in der Praxis eher selten der Fall ist - wurde die Fensterlaibung ebenfalls mittels 5 cm dicker Zellulosedämmung versehen, um ähnliche klimatische Verhältnisse für die kritische Kante in Raum 2 zu erhalten, wie bei einer beidseitigen Innendämmung der durchlaufenden Außenwand.

Als Referenzmessung wurden in Raum 1 Temperatur und Luftfeuchte sowie der Wärmestrom in einem unbehandelten Wandquerschnitt, der denselben Außen- und Innenklimabedingungen ausgesetzt ist, aufgezeichnet.

Die Versuchswand besteht aus beidseitig verputztem, 50 cm dicken Vollziegelmauerwerk. An den Innenoberflächen befinden sich mehrere, zum Teil bereits abplatzende Farbschichten. Um einen ausreichend tragfähigen Untergrund für die Zellulosedämmung zu erhalten wurden die bis zu zehn Schichten Innenfarbe zum Großteil entfernt. Der Einfluss eines - bei einem zukünftigen Projekt eventuell tragfähigen - Farbschichtpaketes ist anhand von labortechnisch zu untersuchenden Originalproben mit Hilfe der numerischen Simulationsberechnungen zu ermitteln.

Da an der Fassade etwa in Fußbodenhöhe ein horizontaler streifenförmiger Bereich schadhaften Außenputzes festzustellen war, wurde das Messprofil in einem Abstand von rund 1,50 Meter darüber positioniert, sodass eine Beeinflussung durch eventuell aus dem Kellergeschoss aufsteigende Feuchtigkeit ausgeschlossen werden konnte.

Die Kellerdecke besteht aus einem Stichkappengewölbe aus Vollziegel. Die Holzbalkendecke des Erdgeschosses ist in den Versuchsräumen verputzt. Im Dachgeschoss wird der Bodenbelag durch eine Verlegeplatte gebildet.



Abb. 27 Der neu entwickelte Spritzkopf im Einsatz an der Versuchswand



Abb. 28 Fertige Zellulose-Innendämmung mit Abzugsleisten

## Südwand

Um den weiterentwickelten Innenputz unter vergleichbaren Messbedingungen zu testen, wurde in Raum 2 an der Innenseite der – teilweise beschatteten - Südfassade an der Grenzschicht zwischen Bestandputz und Dämmschicht ein kombinierter Temperatur-/Feuchtesensor installiert, eine ebenfalls etwa 5 cm dicke Zelloseschicht aufgebracht und diese mit dem Putz CP25 verputzt.

Zum Vergleich wurde in Raum 3 ebenfalls an der Innenseite der Südfassade nach Installation eines weiteren Temperatur-/Feuchtesensors im Abstand von 8 cm eine einfach beplankte Gipskarton-Vorsatzschale auf einer Holzunterkonstruktion montiert und mit herkömmlicher „loose-fill“-Zellulose befüllt.

## 6.3 Haustechnik

Nach Aufbringung der Dämmschicht wurde ein Entfeuchtungsgerät installiert um den Austrocknungsprozess zu beschleunigen und einen baldigen Putzauftrag zu ermöglichen. Parallel dazu wurden alle drei Räume mittels der vorhandenen Zentralheizungsradiatoren und praxisnaher Nachabsenkung der Raumtemperatur beheizt.

In der zweiten Kondensationsperiode wurde ein automatisches Raumluftbefeuchtungsgerät installiert. Zur Minimierung des Wartungsaufwandes wurde der Luftbefeuchter, der standardmäßig nur mit 12 Liter Wasser befüllt werden kann, über einen 200 Liter Vorlagebehälter versorgt, der in Abständen von etwa zwei Wochen nachgefüllt wurde.



## 7 Vor-Ort-Messung

Andreas Heinz, Wolfgang Streicher

### 7.1 Allgemeine Beschreibung des Messaufbaus

Die Bestimmung der Bauteilfeuchte erfolgte über die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit der im Bauteil bzw. im Bereich der Feuchtefühler eingeschlossenen Luft, d.h. durch die Messung der sog. Gleichgewichts-Feuchte. Über die Sorptionsisothermen des Baustoffes kann die absolute Feuchte (Wassergehalt) im Material berechnet werden. Zusätzlich kann die örtliche Taupunkttemperatur softwaremäßig ermittelt werden.

Insgesamt wurden 13 Stück kombinierte Feuchte/Temperatur-Fühler in der Wandkonstruktion, sowie je ein kombinierter Feuchte/Temperatur-Fühler für Außen- und Innenraumklima eingesetzt, wobei die besonders sensiblen Bereiche zur Erzielung höherer Messsicherheit doppelt bestückt wurden. Zwei Fühler wurden in der Außenwandkante platziert, da diese Stelle bzgl. Taupunktunterschreitung besonders kritisch einzustufen ist. Weiters wurden die Oberflächentemperaturen an der Außen- und Innenoberfläche sowohl der gedämmten als auch der nicht gedämmten Wand gemessen. Zusätzlich wurden Temperatur und Feuchte an der Anschlusskante der Dämmsystemoberfläche zur Trennwand zwischen Raum 1 und Raum 2 erfasst.

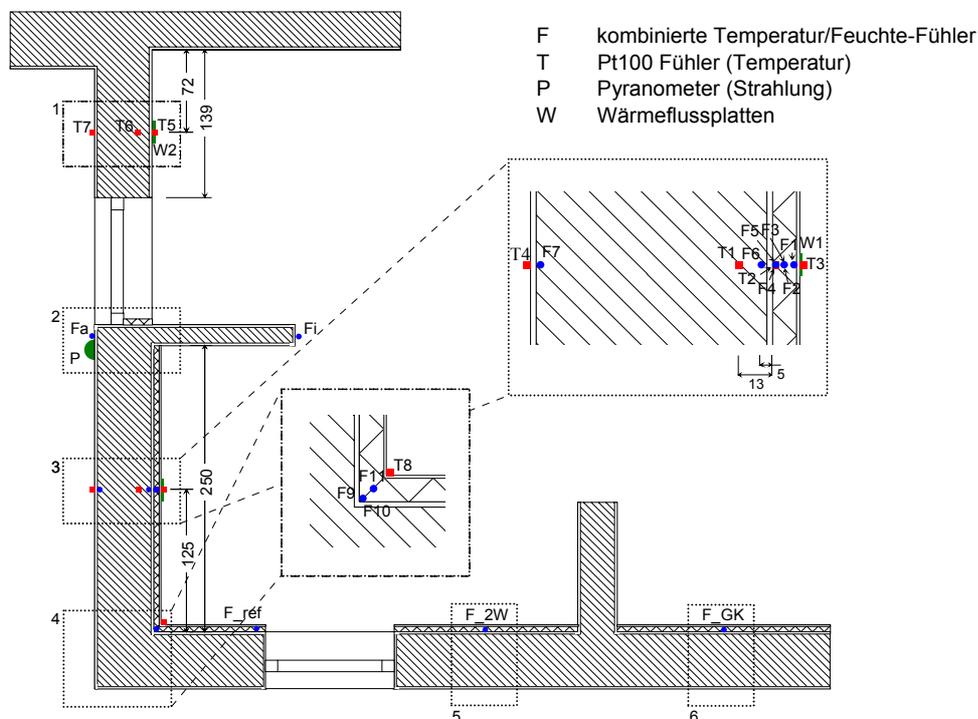
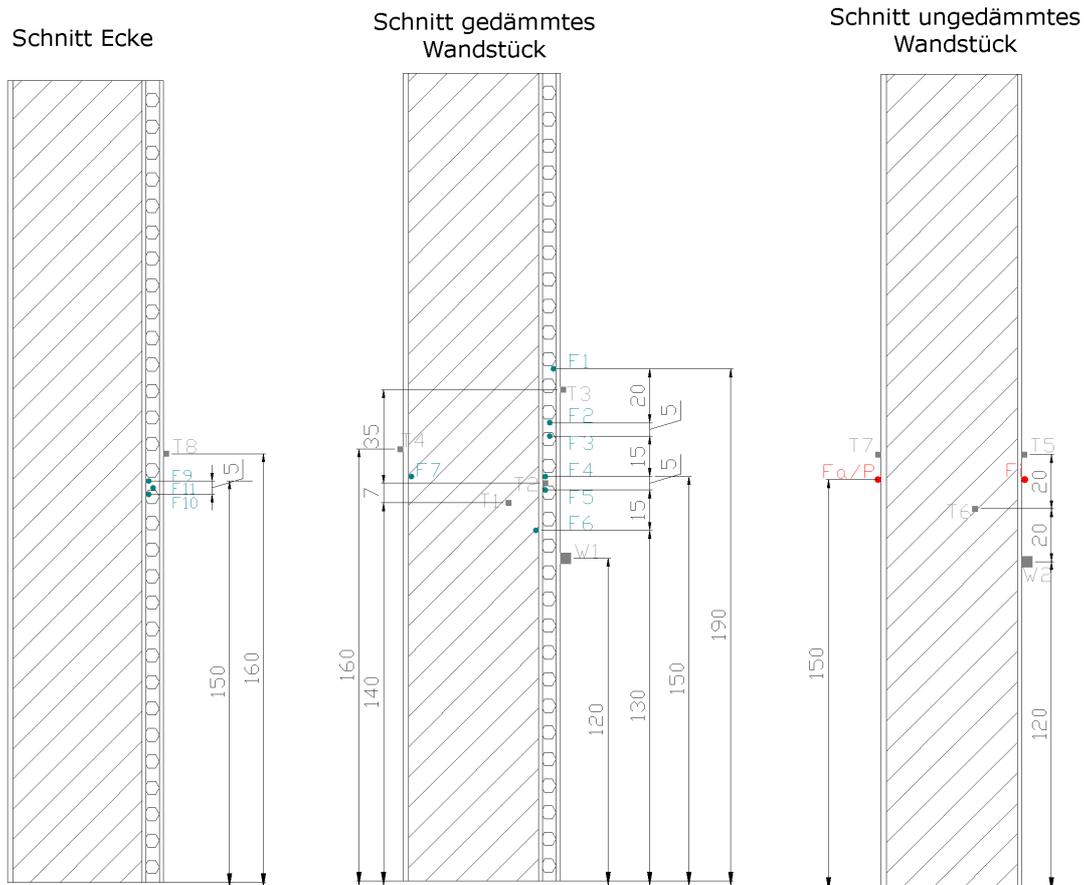


Abb. 29 Messaufbau im Versuchsraum mit gedämmtem und ungedämmtem Teil



F ... Kombinierte Temp. Feuchte Fühler  
 T ... Pt100 Fühler  
 W ... Wärmeflussplatte  
 P ... Pyranometer

Abb. 30 Höhenlage der Messfühler

Schließlich wurde die auf die Wand eingestrahlte Solarenergie, und der Wärmefluss sowohl durch die gedämmte als auch durch die ungedämmte Wand erfasst. Die Messwerte wurden über Datenlogger und PC aufgezeichnet und ausgewertet. Um Stromversorgungsschwankungen und –ausfälle überbrücken zu können, wurde eine unterbrechungsfreie Stromversorgung eingesetzt.

Die Messungen wurden kontinuierlich mit Zykluszeiten von 1 Stunde, beginnend am 22.12.2003, über zwei Winter- und zwei Sommerperioden durchgeführt. Die lange Messperiode ist wegen des instationären Wärmeleitungs-, insbesondere aber wegen des stark instationären Wärme- und Feuchtespeicherungsprozesses in den einzelnen Bauteilschichten mit Wasserdampfkondensation bei Taupunktunterschreitung, erforderlich.

## 7.2 Beschreibung der Sensoren und Messgeräte

### 7.2.1 Kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtemessung

Die Sensoren zur Messung der Temperaturen und Luftfeuchten in der Wand mussten möglichst klein sein, um eine punktuelle Messung zu ermöglichen bzw. eine möglichst geringe Störung des Wandquerschnittes an der jeweiligen Stelle zu gewährleisten. Dieser Aspekt kam vor allem bei der Messung in der Dämmung zum Tragen, da diese nur 5 cm dick ist und ein zu großer Sensor die Dämmstärke an der zu messenden Stelle zu stark beeinträchtigt hätte.

Für die Messungen wurden daher speziell adaptierte kombinierte Luftfeuchte-/Temperatur-Transmitter vom Typ LF-T60 (Fa. SCHALLER Messtechnik), die zur Außen- und Raumluftfeuchteregistrierung eingesetzt werden, verwendet. Die Firma SCHALLER Messtechnik hat diese Sensoren eigens für die vorliegende Anwendung mit einem speziellen Messkopf ausgestattet, der mit einer Dicke von nur 4,5 mm für punktuelle Messungen gut geeignet ist.

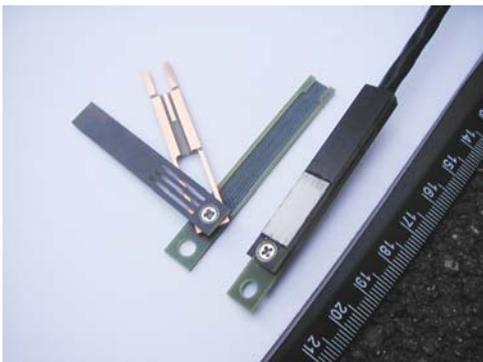


Abb. 31 Kombinierte Temperatur-/Feuchtefühler. Links das offene Gehäuse ohne Sensorteil, rechts der fertige Fühler mit GoreTex-Membran zum Schutz des Sensors vor Spritzwasser



Abb. 32 Eingebaute Temperatur-/Feuchtefühler vor dem Aufspritzen der Zellulosedämmung

Die Temperaturmessung erfolgte über Pt1000-Widerstandssensoren, die den Vorteil einer hohen Messsicherheit im Sinne einer hohen Genauigkeit und Langzeitstabilität besitzen. Zur Feuchtemessung befanden sich in den Fühlern kapazitive Dünnschichtsensoren vom Typ HC 1000 der Firma E+E. Bei diesem Messprinzip befindet sich zwischen den Elektroden eines Kondensators ein hygroskopisches Material, das Wassermoleküle aus der Umgebung in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte aufnimmt. Dadurch verändert sich die Dielektrizitätskonstante und die Kapazität des Kondensators. Die Kapazität wird gemessen und ist ein direktes Maß für die relative Feuchte der Umgebung [Wernecke, 2001].

Eine spezielle Anforderung an die Sensoren war bei dem vorliegenden Projekt dadurch gegeben, dass diese durch die feuchte Aufbringung der Dämmung durchnässt werden konnten. Dadurch können die kapazitiven Feuchtefühler einen Sensordrift im Sinne einer Veränderung der Kennlinie erleiden, vor allem wenn sie mit Fremdstoffen, insbesondere Salzen beaufschlagt werden.

Daher wurde von der Firma SCHALLER Messtechnik ein Fühler dieser Bauart in einem Vorversuch auf seine Tauglichkeit für diesen Anwendungsfall geprüft, indem der Sensor in das Zellulosematerial eingespritzt, nach dem Austrocknen der Dämmung ausgebaut und seine Kalibrierung überprüft wurde.

Der Umstand, dass über längere Zeit eine relative Feuchte von über 100%r.F. angezeigt werden kann, erklärt sich laut Hersteller durch die Elektronik der Messumformer. Diese liefern bei einer relativen Feuchte von 0 bis 100%r.F. ein analoges Signal von 4 bis 20 mA. Bei einer relativen Feuchte von 100% r.F., also bei Kondensatbildung am Sensor, kann die eingebaute Elektronik auch ein Signal von über 20 mA produzieren, woraus dann bei der Auswertung eine relative Feuchte mit Werten über 100%r.F. resultiert. Bei der Darstellung der Messdaten wurde bewusst darauf verzichtet, die Kurven bei 100%r.F. „abzuschneiden“, um eine bessere Visualisierung der Messdaten bei Kondensation zu gewährleisten.

Zusätzlich wurde ein ausbaubarer Referenzfühler in die Dämmung der Versuchswand eingebaut, um eine Langzeit-Kalibrationsüberwachung zu ermöglichen. Dadurch sollte eine mögliche Beeinflussung der Sensoren durch das Einspritzverfahren erfasst und diese gegebenenfalls korrigiert werden können. Dieser Referenzsensor wurde über den Messzeitraum zwei mal in einer überwachten Kalibrierstrecke bei vier Feuchtepunkten vermessen. Die festgestellten Abweichungen waren mit  $\pm 2\%$  r.F. nur geringfügig, bzw. innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Sensoren.

### **Temperatursensoren**

Messbereich	-20°C...+60°C
Genauigkeit	$\pm 0,3^\circ\text{C}$ (bei +25°C)

### **Feuchtesensoren**

Messbereich	0 bis 100%r.F.
Einsatzbereich	-20°C bis +105°C
Genauigkeit	$\pm 2\%$ r.F. (bei +25°C)

## **7.2.2 Oberflächentemperaturen**

Die Messung der Oberflächentemperaturen erfolgte über 8 Stück Pt100-Widerstandssensoren vom Typ AHLBORN FP0802, die in 4-Leiterschaltung ausgewertet wurden. Zusätzlich zu den Wand-Oberflächen wurden derartige Sensoren auch innerhalb der beiden Wandabschnitte an relevanten Stellen positioniert.

Bei der Anbringung der Sensoren an den Wandoberflächen, insbesondere an der Außenwand, war zu beachten, dass diese den gleichen Bedingungen (insbesondere der Solarstrahlung) ausgesetzt sein sollten, wie die Wandoberfläche selbst. Die vorteilhaft kleinen (5 x 1,5 mm) und leichten Keramik-Chip-Sensoren wurden mit einem Wärmeleit-Kleber auf die Wandoberfläche geklebt, um einen guten thermischen Anschluss zu gewährleisten.

Einsatzbereich    - 50°C bis + 400°C  
Genauigkeit        ± 0,3°C

### 7.2.3 Wärmeflussmessung

Für die Messung der Wärmestromdichte an der gedämmten und nicht gedämmten Wand wurde je eine Wärmeflussplatte vom Typ AHLBORN FQ90 119 verwendet. Dabei handelt es sich um ein Mäander vieler gegeneinander geschalteter Thermoelemente, eingebettet in ein Trägermaterial aus Epoxidharz.

Wird die Wärmeflussplatte auf die zu prüfende Messstelle gelegt, stellt sie einen, den Wärmefluss behindernden, Wärmeleitwiderstand dar. Über die Dicke der Platte bildet sich beim Durchgang des Wärmeflusses ein Temperaturgefälle, das der Wärmestromdichte proportional ist. Die Platten sind so aufgebaut, dass sich neben dem Mäander eine ausreichende Randzone befindet, die ein seitliches Umlaufen des Wärmeflusses verhindert. Die Wärmeflüsse beziehen sich stets auf die vom Mäander abgedeckte Oberfläche und bilden deren Mittelwert [AHLBORN, 2002].

Um eine gute thermische Ankopplung zu gewährleisten, sind die Wärmeleitplatten auf der Unterseite mit Wärmeleitpaste zu bestreichen; die Befestigung an der Wand erfolgte mittels Klebebändern.

Abmessungen        250 x 250 mm  
Aktive Fläche        180 x 180 mm  
Genauigkeit         5 % bei + 25 °C  
Temperaturbeständigkeit + 80°C  
Kalibrierwert        ca. 5 W/(m<sup>2</sup>.mV)

### 7.2.4 Solarstrahlung

Die Messung der Globalstrahlung auf die Außenwand erfolgte mit einem Sternpyranometer der Firma PH. SCHENK. Dieses Gerät zählt zur Gruppe der „Schwarz-Weiß-Flächen-Pyranometer“. Die Strahlungsintensität wird dabei nicht unmittelbar, sondern auf dem Umweg der Temperaturdifferenz gemessen. Bei elektrischen Pyranometern wird diese Differenz mittels Thermoelement in eine proportionale elektromotorische Größe umgesetzt. Auf diese Weise wird die Messung des Strahlungsstromes auf die einfache Messung einer

elektrischen Spannung zurückgeführt. Die strahlungsempfindliche Fläche des Sternpyranometers stellen 12 kreisförmig angeordnete, abwechselnd schwarz und weiß lackierte Kupferplättchen dar. Bei Bestrahlung erwärmen sich die schwarzen Flächen stärker als die weißen. Diese Temperaturdifferenz wird mit einer an der Unterseite der Flächen angebrachten Thermosäule gemessen, wobei bei einer Strahlung von  $67 \text{ W/m}^2$  die Spannung  $1 \text{ mV}$  beträgt. Die Empfängerfläche ist durch eine geschliffene Glasabdeckung geschützt. Ein Trockenbehälter mit Silica-Gel unterbindet Kondensatbildung im Inneren des Gerätes.

## 8 Auswertung der Messergebnisse

Andreas Heinz, Wolfgang Streicher

Im Folgenden werden die wesentlichen Messergebnisse dargestellt; bzgl. weiter führender Darstellungen siehe Anhang.

### 8.1 Messperiode 1 (22.12.2003 - 26.07.2004)

#### Relative Feuchte

Durch das Aufspritzen der Dämmung wurden zunächst alle Sensoren durchnässt. Da die Dämmschicht erst Ende November 2003 aufgebracht werden konnte, kam es bei den vorherrschenden tiefen Außentemperaturen zu einer relativ langen Austrocknungszeit; dies vor allem an der Grenzschicht zum bestehenden Mauerwerk (F4). Der Sensor an der kritischsten Stelle - in der Raumaussenkante an der Grenzschicht zwischen Mauerwerk und Dämmung (F9) - zeigte erst im April eine relative Feuchte unter 100%. Hinsichtlich der Messwerte über 100%r.F. wird auf Kap. 7.2.1 verwiesen. Abgesehen von einem 2-wöchigen Ausfall der Messdatenerfassung Ende Februar 2004 konnten in dieser Periode alle Messwerte kontinuierlich erfasst werden.

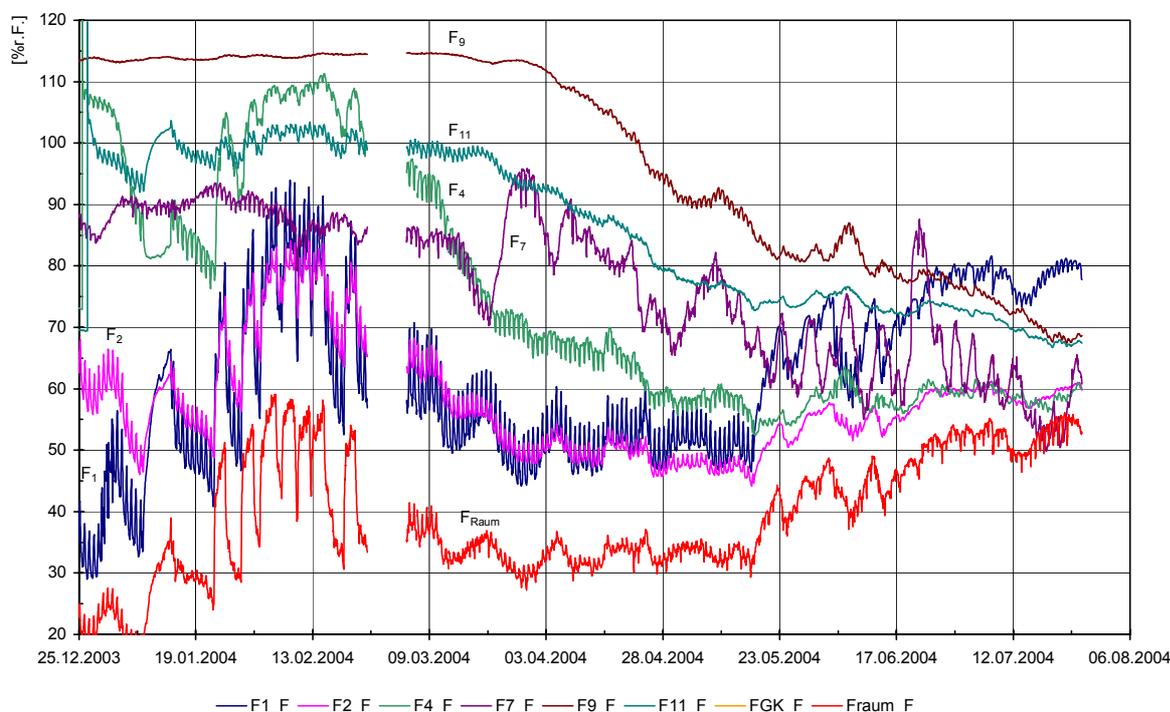


Abb. 33 Relative Feuchtigkeit an den wichtigsten Messpositionen in der Messperiode 1

Die Sensoren in der Dämmung außerhalb der Grenzschicht zum Bestandsmauerwerk zeigten aufgrund der dort rascheren Trocknung der Dämmung über den gesamten dargestellten Zeitraum plausible Werte. Lediglich das Signal des Fühlers an der Grenzschicht zwischen Dämmung und neuem Innenputz (F1) scheint auf den ersten Blick nicht ganz nachvollziehbar. Hier wurde, vor allem Mitte Mai 2004, eine relative Feuchte gemessen, die zum Teil wesentlich höher liegt, als in den darunter liegenden Schichten. Die Erklärung hierfür liegt in unterschiedlichen Dampfleitfähigkeiten der Zellulose und des neuen Innenputzes und damit – trotz des niedrigen  $s_d$  – Wertes von 0,27 m in einem geringfügigen „Aufstauen“ der Verdunstungsfeuchte im Zuge des Rückdiffusionsvorganges.

## Temperaturen

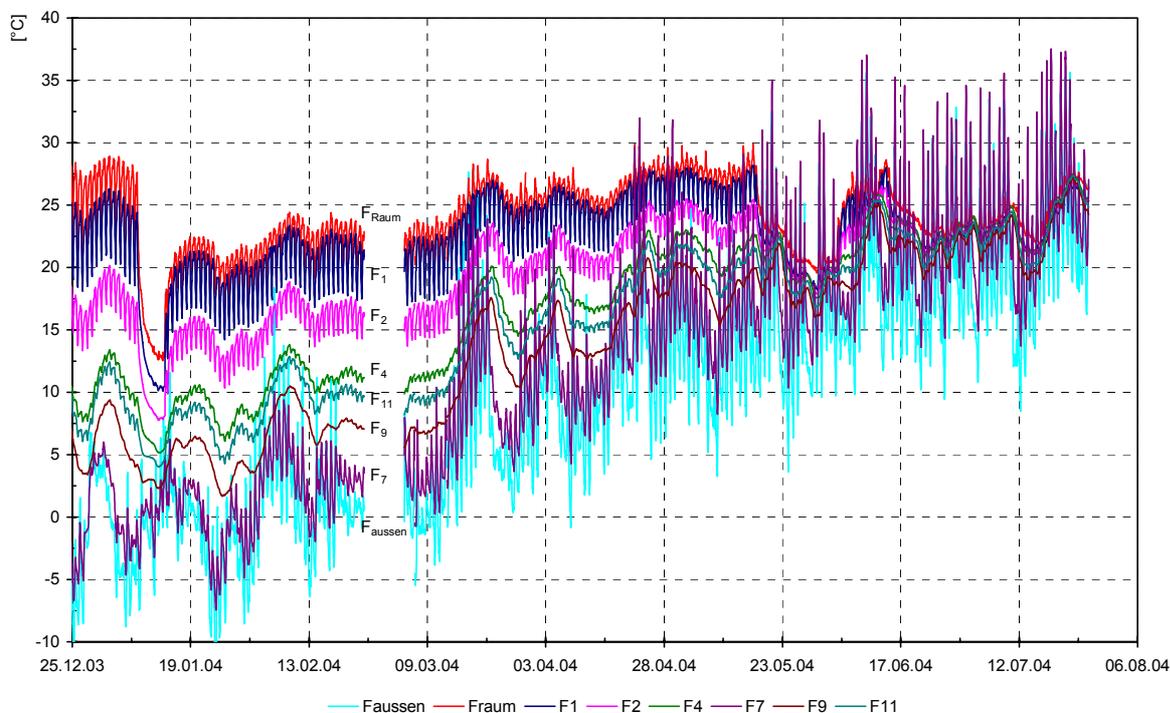


Abb. 34 Temperaturen an den wichtigsten Messpositionen in der Messperiode 1

Die Messdaten der ersten Messperiode besitzen aufgrund der Überlagerung von Austrocknungs- und Kondensationsphase nur bedingte Aussagekraft. Die Endwerte im ausgetrockneten Zustand waren allerdings als Vergleichsbasis zur zweiten Messphase von entscheidender Bedeutung, da dadurch ein „Aufschaukeln“ der Feuchtigkeit im Dämmstoff ausgeschlossen werden konnte.

## 8.2 Messperiode 2 (16.08.2004 – 18.06.2005)

### Relative Feuchte

Am Anfang dieser Messperiode war im Gegensatz zu Messperiode 1 die Dämmung vollständig trocken. Unter diesen Bedingungen konnten die Verläufe der relativen Feuchte in den einzelnen Messpunkten mit dem Sinken der Außentemperatur in der Heizperiode realistisch beobachtet werden.

Auch in dieser Messperiode kam es leider zwei mal zu längeren Ausfällen der Messdatenerfassung (Ende 08/2004 und Ende 11/2004), allerdings in Perioden, die für die Grundaussage der Messung von untergeordneter Relevanz sind.

Gegenüber der Messperiode 1 kamen hier zwei weitere Sensoren zum Einsatz, die in Versuchswand 2 (F\_2W) und Versuchswand 3 (F\_GK), jeweils an der Grenzschicht Dämmung-Bestandsputz, platziert wurden.

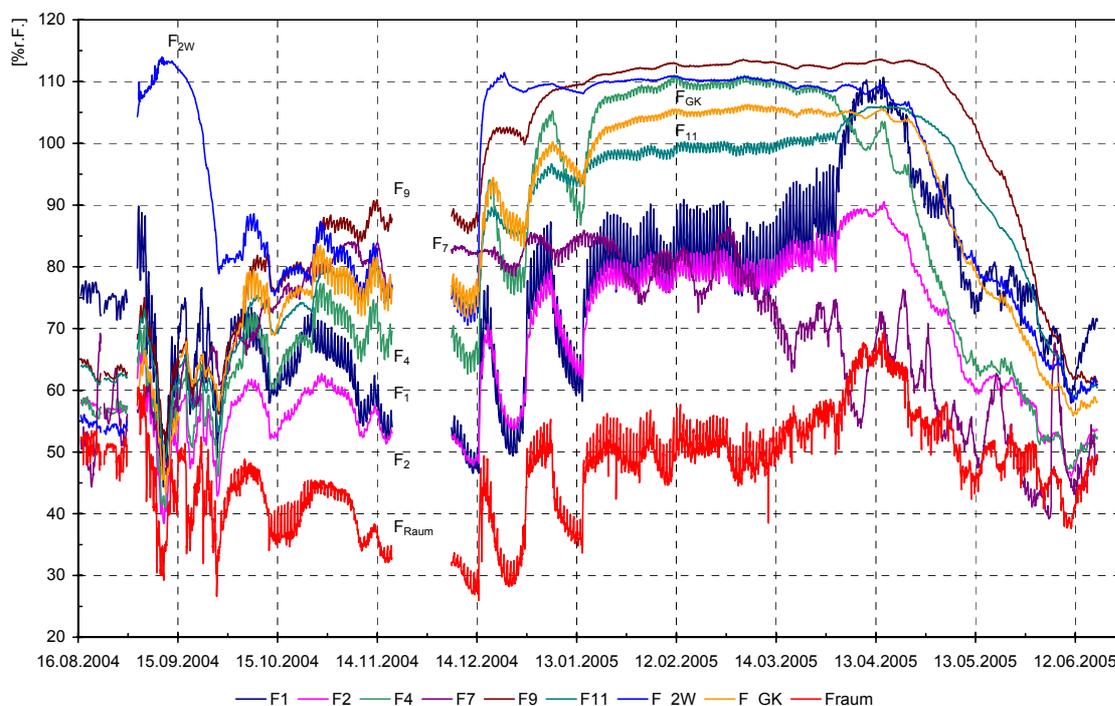


Abb. 35 Relative Feuchtigkeit an den wichtigsten Messpositionen in der Messperiode 2

Der Sensor F\_2W wurde Ende August 2004 eingespritzt (erkennbar am starken Anstieg der relativen Feuchte). Die Austrocknungsphase dauerte aufgrund der hohen Außentemperaturen lediglich 3-4 Wochen.

Etwa ab Mitte Dezember wurde der Messraum auf ca. 50%r.F. befeuchtet. Ab diesem Zeitpunkt trat an der Grenzschicht in allen Messpunkten Kondensation auf. Erst Anfang April begann die Dämmung wieder auszutrocknen. Die Befeuchtung wurde Mitte April deaktiviert.

Es wurde vermutet, dass dieser Sensor durch das Aufbringen der Putzschicht einen Sensordrift, d.h. eine Veränderung der Kennlinie erlitten hat. Um dem nachzugehen, wurde der Sensor nach den Messungen ausgebaut und zusammen mit zwei weiteren in einer überwachten Kalibrierstrecke bei 4 Feuchtepunkten vermessen. Dabei zeigte sich allerdings praktisch keine Abweichung.

## Temperaturen

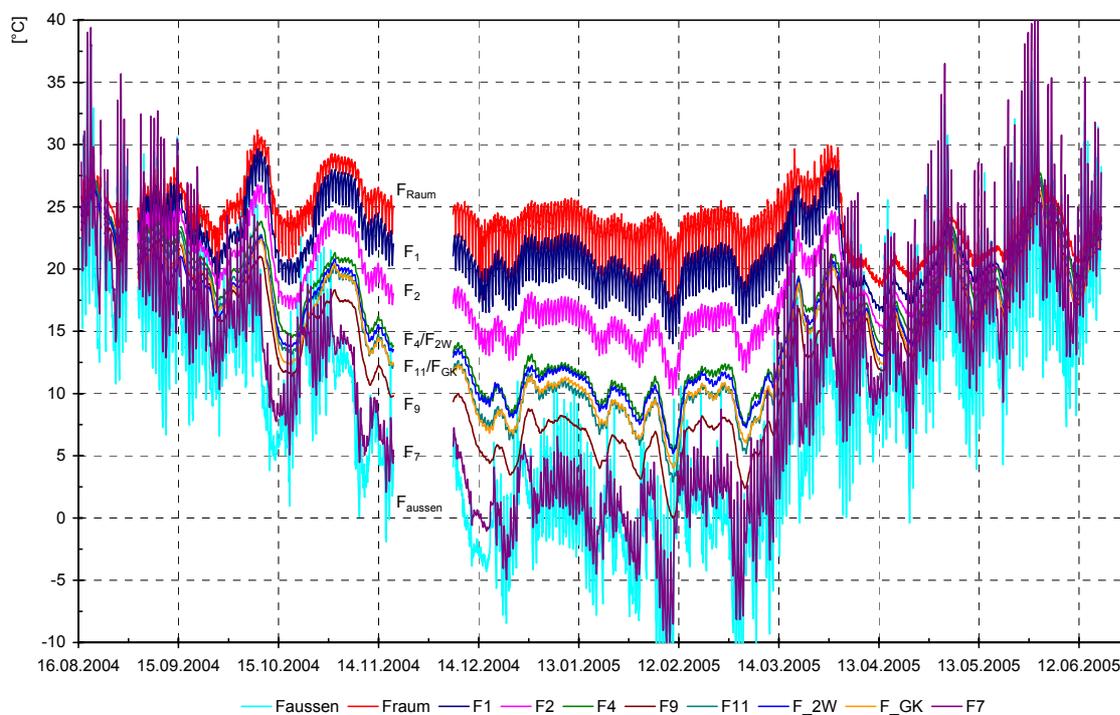


Abb. 36 Temperaturen an den wichtigsten Messpositionen in der Messperiode 2

## 9 Festigkeitswerte

Friedrich Skofitsch, Herwig Hengsberger

Aufgabe der Festigkeitsmessungen im Labor der TVFA - Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt für Festigkeits- und Materialprüfung an der TU Graz war es, an insgesamt 12 auf Ziegel aufgebrachten Zelluloseproben Zugversuche normal zur Probenoberfläche gemäß EN 1604 durchzuführen.

In einem ersten Schritt wurden je vier schaum- und klebergebundene Probekörper untersucht. Da das schaumgebundene Material im Mittel schlechtere Festigkeitswerte aufwies (wenn man den relativ hohen Wert der Probe 1 außer Acht lässt, der vermutlich durch örtliche Feuchtigkeitsanreicherungen zustande kam), wurden die Messungen in weiterer Folge und nach Verbesserung der Aufspritztechnologie mit vier kleberge bundenen Proben fortgesetzt.

Diese Messungen erbrachten – bis auf zwei, vermutlich durch die Probekörperherstellung bedingte „Ausreißer“ - Festigkeitswerte, die über der Anforderung an Mineralwollefassadendämmplatten gemäß ÖNORM B 6135 bzw. jener an werksseitig hergestellte Zellulosedämmplatten (ÖTZ – Anforderungsprofil entsprechend OIB Richtlinie) von jeweils  $\geq 12,0$  kPa liegen.

### 9.1 Messdurchführung

Ziel der Messung war nicht nur die Ermittlung der Zugfestigkeit normal zur Probenebene des Zellulosematerials selbst sondern auch die Untersuchung des Haftverbundes mit dem Untergrund. Dazu wurde das Dämmmaterial vom der Fa. CPH im Rahmen des Arbeitspaketes AP 3 auf 10 cm dicke Hochlochziegel aufgespritzt, welche unvermörtelt zu einer Versuchswand aufgeschichtet worden waren. Nach dem Trocknen der Zelluloseschicht wurde diese entsprechend den Ziegelfugen durchtrennt und die auf den einzelnen Steinen befindlichen Zelluloseschichten parallel zur Ziegelfläche auf eine Dicke von 4,5 cm beschnitten.

Anschließend wurden diese Flächen rechtwinklig zur Oberfläche bis auf die Ziegeloberfläche eingeschnitten und quadratische, auf dem Ziegel haftende, Probeflächen mit einer Seitenlänge von ca. 150 mm erzeugt. Die größte Gefahr bei diesem Arbeitsschritt lag in der Vorschädigung des Materials durch das Schneidewerkzeug, welche sich ggf. negativ auf die Festigkeitswerte auswirken kann (so geschehen vermutlich bei den Proben 1 und 3 der Serie 2). In Folge wurde auf diese quadratischen Flächen jeweils eine Stahlplatte mit Hilfe eines Zweikomponentenklebers aufgeklebt. Die Platten sind in der Mitte mit einer Gewindebohrung versehen, in die ein Kardangelenkeingeschraubt wird.



Abb. 37 Probekörpervorbereitung

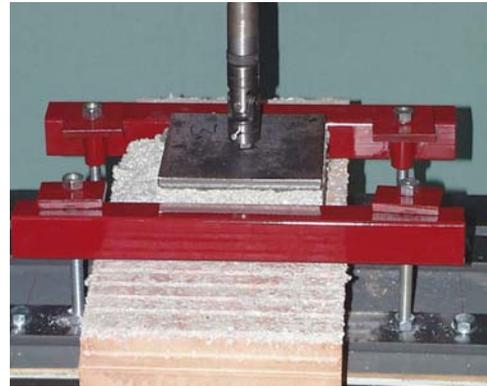


Abb. 38 Einspannvorrichtung und Kardangelenke zur zentrischen Lasteinleitung

Zum Befestigen der Ziegel in der Prüfmaschine wurde das Zellulosematerial rund um die zu prüfenden Flächen entfernt und die Ziegel mit Metallbügeln an der Basis der Prüfmaschine befestigt. Das obere Ende des Kardangelenkes wurde mit dem Querhaupt verbunden. Über dieses Kardangelenke wurde nun eine Kraft mit einer Anstiegsgeschwindigkeit entsprechend der oben genannten Norm aufgebracht, bis ein Versagen im Material, bzw. in der Verbindung Material-Ziegel auftrat.

Das Versagen trat bei der Serie 1/ Schaum einmal zum Teil im Material und zum Teil am Ziegel (Probe 2), ansonsten im Material ein. Bei der Serie 1/ Kleber versagte die Probe 10 am Ziegel, alle anderen im Material. Alle Proben der Serie 2/Kleber versagten im Material.



Abb. 39 Versagen der Probekörper im Material

Die Tatsache, dass das Versagen der Proben von Serie 2 ausschließlich im Material stattfand ist eine wichtige Produktvoraussetzung und bestätigt die erfolgreiche Optimierung der Aufspritztechnologie, da der Haftverbund mit dem Untergrund wesentlich von einer entsprechenden Vorbefeuchtung des Untergrundes im Zuge des Aufspritzvorganges abhängt.

Auf die geplante Durchführung von Druckfestigkeitsprüfungen wurde aufgrund des erheblichen Mehraufwandes bei den für derartige Kombinationssysteme entscheidenden Zugfestigkeits- und Haftzugfestigkeitsprüfungen und aufgrund der guten Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen im Vorgängerprojekt verzichtet.

## 9.2 Ergebnisse

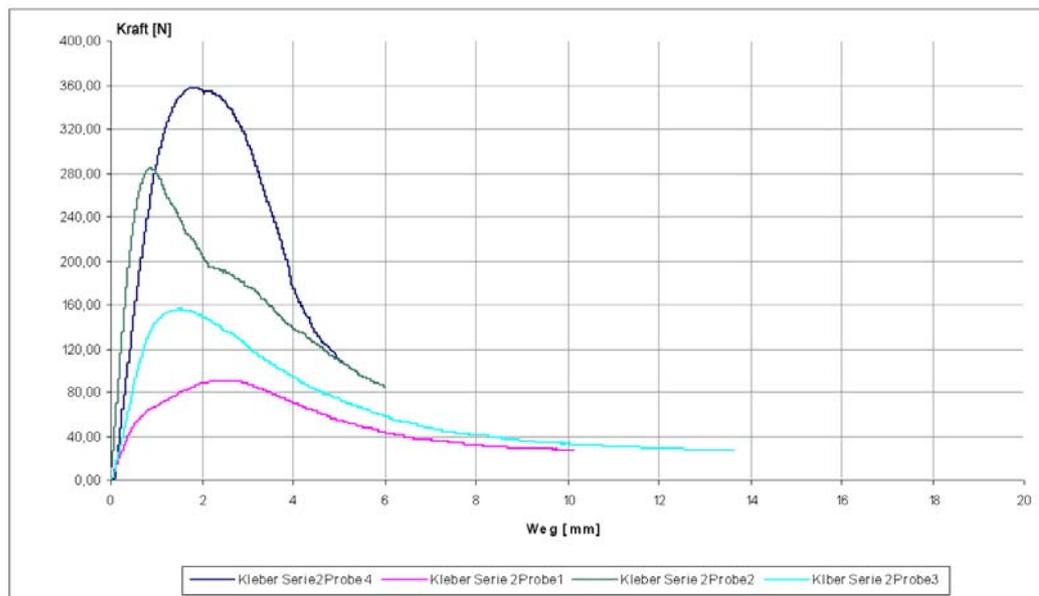


Abb. 40 Auswertung der Ergebnisse der Serie 2

### Prüfprotokoll Zellstoffzugversuch Serie 1 / Schaum

Querschnittsfläche mm <sup>2</sup>	Höchstkraft N	Zugfestigkeit kPa	
22201	279,7	13,000	Probe 1
22052	146,4	6,640	Probe 2
22201	161,5	7,270	Probe 3
22052	215,8	9,780	Probe 4
<b>22127</b>	<b>200,9</b>	<b>9,170</b>	<b>Mittelwert</b>

### Prüfprotokoll Zellstoffzugversuch Serie 1 / Kleber

Querschnittsfläche mm <sup>2</sup>	Höchstkraft N	Zugfestigkeit kPa	
22052	154,9	7,020	Probe 7
22052	201,0	9,120	Probe 8
22052	211,5	9,590	Probe 9
22052	164,2	7,450	Probe 10
<b>22052</b>	<b>182,9</b>	<b>8,290</b>	<b>Mittelwert</b>

### Prüfprotokoll Zellstoffzugversuch Serie 2 / Kleber

Querschnittsfläche mm <sup>2</sup>	Höchstkraft N	Zugfestigkeit kPa	
22350	90,8	4,060	Probe 1
22052	284,5	13,000	Probe 2
22350	153,0	6,850	Probe 3
22350	357,4	16,000	Probe 4
<b>22276</b>	<b>221,4</b>	<b>9,980</b>	<b>Mittelwert</b>

### 9.3 Vor-Ort-Messungen

Nach der erfolgten Optimierung der Zelluloseschicht war es Gegenstand dieses Arbeitsschrittes, den Haftverbund des gesamten Dämmsystems anhand von Vor-Ort-Haftzugmessungen zu untersuchen.

Dazu wurde das Dämmsystem mittels eines Trennschleifers bis auf den Bestandsputz eingeschnitten. In der ersten Versuchswand wurden auf diese Weise insgesamt acht und in der zweiten Versuchswand sechs Probeflächen der Größe 10 x 10 cm erzeugt. Anschließend wurden mittels Zweikomponentenklebstoff jeweils 8 mm dicke, mit einer zentrischen Gewindebohrung versehene Aluminiumplatten aufgeklebt. In diese Bohrungen wurde der Aufnahmebolzen des Haftzugprüfgerätes eingeschraubt.

Für die Prüfungen wurde eine Spezialhaftzugmaschine der Type F20D Easy2000 der Fa. Josef Freundl, D-30974 Wennigsen verwendet, die sich gegenüber einer Handprüfmaschine durch einen elektronisch geregelten konstanten Vorschub auszeichnet, der Voraussetzung für eine kontinuierliche Lasteinleitung und damit für vergleichbare Ergebnisse ist.



Abb. 41 Prüfkörper mit Alu-Platte und lastverteilendem Rahmen der Prüfmaschine



Abb. 42 Haftzugmessung mit der Freundl F20D Easy2000

### Ergebnisse

Trotz dieser entscheidenden Verbesserung wurde festgestellt, dass diese Art des Prüfverfahrens für das im Falle relativ kleinformatischen Prüfkörper gegen Vorschädigung empfindliche Material nur bedingt geeignet ist. Dies zeigte sich unter anderem darin, dass bereits ein geringfügiges „Verkanten“ der Prüfmaschine beim Aufsetzen auf den bereits in der Prüfplatte eingesetzten Schraubbolzen infolge des relativ großen Hebelsarmes einen Vorbruch des Zellulosematerials zur Folge hatte.

Diejenigen Probekörper, bei denen eine ordnungsgemäße Prüfung möglich war, zeigten jeweils ein Bruchverhalten innerhalb der Farbschichten, die dort auf dem Bestandsputz belassen worden waren, bei einer Spannung von 10,0 kPa. Daraus folgt zum einen, dass die Materialfestigkeiten des Dämmsystems selbst höher und damit ausgezeichnet sind.

Zum anderen bedeutet dies die Bestätigung der Tatsache, dass aus Gründen der Haftzugfestigkeit bestehende Farb- und ggf. Putzschichten vor Applikation des Dämmsystems zu entfernen sind. Dass dies auch aus hygrischen Überlegungen durchaus sinnvoll erscheint, wird in Kapitel 10.6 dargestellt.



Abb. 43 Bruch innerhalb der Farbschichten

Aus o.a. Gründen musste das Messkonzept grundlegend verändert werden. Es wurde eine Vorrichtung entworfen, bei der 50 x 50 cm große Prüfkörper verwendet werden. Da dafür keine Standard-Vor-Ort-Haftzugprüfgeräte erhältlich sind, soll die o.a., auf einer tischartigen, höhenverstellbaren Vorrichtung montierte Prüfmaschine den kontrollierten Abzug übernehmen, der über eine Kraft/Weg-Messvorrichtung und eine Gewindestange auf eine leichte, mittels Aluminiumwinkel verstärkte Prüfplatte wirkt. Zum einen sollte es durch die Vergrößerung der Prüffläche möglich sein, eventuelle Vorschädigungen des Materials hinten zu halten, zum anderen ermöglichen die wesentlich größeren notwendigen Lasten eine gesichere Aufzeichnung.

Messungen mit dieser neuartigen Prüfvorrichtung konnten im Rahmen des gegenständlichen Projektes aus Zeit- und Kostengründen nicht durchgeführt werden, sollen aber im zur Zeit laufenden Folgeprojekt erfolgen. Damit sollte es in Zukunft möglich sein, das Haftzugverhalten des Gesamtsystems Zellulose / Putz vor Ort zu prüfen, was nicht zuletzt aufgrund der vielen verschiedenen Untergründe, die im Sanierungsfall zu erwarten sind, von großer Bedeutung ist.

## 10 Numerische Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchteverhaltens

Peter Häupl, Hans Petzold, Rudolf Plagge

### 10.1 Einleitung

Das thermische und feuchtetechnische Verhalten von Baustoffen und Bauwerksteilen ist eine wesentliche Komponente für Funktion und Nachhaltigkeit eines Bauwerks. Dabei ist häufig besonders die Anwendung von Dämmsystemen Anlass für feuchtetechnische Probleme oder gar Schadensfälle. Daher ist die Anwendung innovativer Dämmmaterialien, aber auch die Verwendung bekannter Materialien in neuartigen Konstruktionen oder Kombinationen seit längerer Zeit Gegenstand wissenschaftlicher Forschung.

Um Schadensfälle von vornherein auszuschließen, muss eine Vorhersage über die langfristigen Vorgänge innerhalb der Konstruktionsteile und deren Wechselwirkung mit der Umgebung getroffen werden können. Falls dies nicht aus allgemein anerkannten Regeln der Bautechnik hervorgeht, ist die numerische Simulation dieser Vorgänge mittlerweile ein unverzichtbares Werkzeug, das dem Planer und Gutachter die Einschätzung von Konstruktionen unter verschiedenen Randbedingungen ermöglicht.

Beim nachträglichen Anbringen von Dämmung an eine bestehende Fassade ist eine detaillierte Einschätzung des Zusammenwirkens der Komponenten Dämmung – Altkonstruktion notwendig. Nachträglich aufgebrachte Innendämmungen ermöglichen für den denkmalgeschützten Altbau eine thermische Aufbesserung ohne Veränderung der historischen Außenfassade, die Arbeiten können ohne Gerüstbau und relativ unproblematisch in mehreren Arbeitsabschnitten erfolgen.

Bei einer Innendämmung ist aber immer das Risiko von innerer Kondensation zu berücksichtigen. Die Anwendung des sog. Glaser-Verfahrens ermöglicht unter vereinfachten stationären Bedingungen die Bemessung anhand einer ermittelten maximal zulässigen Kondensatmenge und überprüft die Möglichkeit der Austrocknung in der warmen Jahreszeit. Dieses Verfahren berücksichtigt allerdings nicht die Feuchtespeicherung und die Feuchteleitfähigkeit von Baustoffen.

Für einige heutzutage mögliche Dämmstoffe ergeben sich aber gerade unter Berücksichtigung dieser Parameter innovative und sowohl kostenmäßig wie auch konstruktiv günstige Wandaufbauten. So ist z.B. mit kapillaraktiven Dämmstoffen eine Innenwärmedämmung möglich, ohne dass eine Dampfsperre aufgebracht werden muss, da die stark wasserleitfähige Dämmung anfallendes Kondensat in Richtung Innenraum abführen kann und damit die Altkonstruktion schützt. Gleichzeitig ermöglicht sie im Gegensatz zu Konstruktionen mit innen liegender Dampfbremse ein Austrocknen der Wand auch nach innen (z.B. Baufeuchte, Schlagregenfeuchte bei Fachwerkwänden).

Beim Einsatz von Materialien mit großer Feuchtespeicherung kann wiederum ein erheblicher Anteil von Wasserdampf im Material „gepuffert“ werden, ohne dass er an der kalten Seite der Dämmung kondensiert.

## 10.2 Werkzeuge und Erfahrungen

### 10.2.1 Simulationssoftware Delphin

Am Institut für Bauklimatik der TU Dresden ist ein zusammenhängendes physikalisches Modell für den gekoppelten Energie- und Stofftransport in kapillarporösen Baustoffen entwickelt worden [Grunewald 1997]. Die Umsetzung erfolgt zum einen in Form des numerischen Simulationspaketes DELPHIN, zum anderen schlägt es sich in Messvorschriften und Messverfahren vornehmlich für die feuchtetechnischen Eigenschaften der Materialien nieder [Grunewald/Bomberg 2002].

Mit Hilfe des Simulationstools DELPHIN (aktuelle Version 4.5) ist die Simulation von Wärme- und Feuchtespeicherung sowie –transport unter instationären Bedingungen möglich. Es werden also alle Speicherungs- und Umwandlungsvorgänge von Feuchte einbezogen; als Randbedingungen sind sowohl modellhafte konstante Randbedingungen wie auch beliebige instationäre Klimarandbedingungen anwendbar. So kann eine Konstruktion mit verschiedenen Außenklimata (einschließlich Regen, kurz- und langwelliger Strahlungsaustausch) beaufschlagt werden oder der Einfluss verschiedener, auch vor Ort gemessener nutzerbedingter Innenklimata untersucht werden.

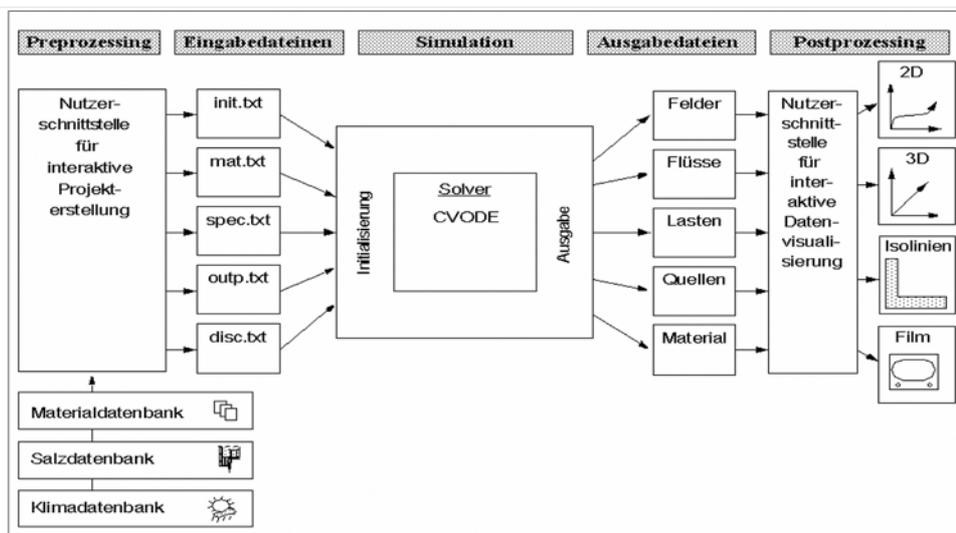


Abb. 44 Aufbau des numerischen Simulationsprogrammes DELPHIN 4

Während thermische Prozesse vergleichsweise einfach zu formulieren und zu berechnen sind, erweist sich das Gebiet der gekoppelten Transportprozesse als eine weitaus komplexere Materie. Die dem numerischen Simulationsprogramm DELPHIN 4 zugrunde liegende Theorie wurde von thermodynamischen Prinzipien abgeleitet. Bei einer genauen Betrachtung ergibt sich eine größere Zahl von Transportvorgängen und zugehörigen Diffusions- bzw. Advektionstransportkoeffizienten, deren vollständige experimentelle Bestimmung einen unvermeidbar hohen Aufwand bedeuten würde (z.B. Thermodiffusion).

Einer der Vorteile des DELPHIN 4-Modells ist darin zu sehen, dass unter Beibehaltung korrekter thermodynamischer Transportpotentiale wesentliche Prozesse von vernachlässigbaren Effekten getrennt wurden. Basierend auf wissenschaftlichen Ergebnissen konnte so ein anwenderfreundliches Modell entwickelt werden.

Um einerseits dem vielschichtigen Verhalten der Baumaterialien gerecht zu werden und auf der anderen Seite den labortechnischen Aufwand möglichst gering zu halten, wurde in DELPHIN 4 ein Engineering-Modell [Grunewald/Bomberg 2002] zur hygrothermischen Materialcharakterisierung implementiert. Es bietet den Vorteil, komplexe Materialfunktionen aus einfachen, bekannten Materialkennwerten generieren zu können.

Für die Modellierung realer Prozesse stellen die Feuchteleitfähigkeit und die Feuchtespeicherfunktion wichtige Bausteine dar. Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt die Speicherung von Feuchte in kapillar-porösen Materialien in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte (in den Poren) bzw. dem Kapillardruck.

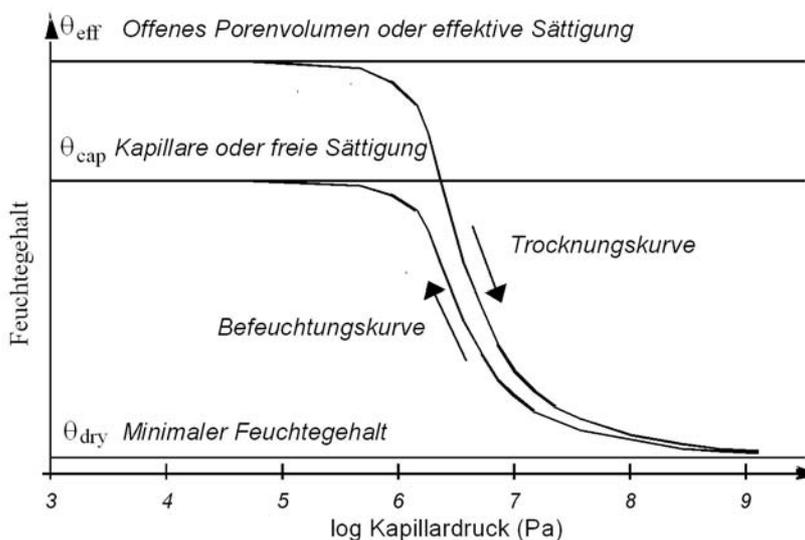


Abb. 45 Beispielhafte Darstellung einer Feuchtespeicherfunktion

Bei der Feuchtespeicherfunktion handelt es sich nicht um eine eindeutige Funktion, d. h. einer bestimmten relativen Luftfeuchte – bzw. einem bestimmten Kapillardruck - können mehrere Feuchtegehalte zugeordnet werden. Dieses Verhalten wird mit Hysterese bezeichnet.

Zweckmäßig ist deshalb die Darstellung der beiden begrenzenden Kurven: Die extreme Trocknungskurve beginnt bei  $\theta_{\text{eff}}$  und wird bis zum Erreichen von  $\theta_{\text{dry}}$  fortgeführt. Der Wert der effektiven Sättigung  $\theta_{\text{eff}}$  kann nur mittels Aufsättigung ohne Lufteinschlüsse, wie bspw. durch eine Vakuumsättigung, erreicht werden. Das Befeuchtungsexperiment startet bei dem minimalen Feuchtegehalt  $\theta_{\text{dry}}$  (mono- und multimolekulare Bedeckung der Porenwände mit Wasser) und endet mit  $\theta_{\text{cap}}$  bei der maximalen, freien Wassersättigung, d.h. es wird kein äußerer Druck angelegt. Es unterscheiden sich folglich nicht nur die Feuchtespeicherfunktionen verschiedener Baustoffe, der Feuchtegehalt eines Baustoffes ist ebenso davon abhängig, ob es sich um einen Befeuchtungs- oder Trocknungsvorgang handelt: Die „Vorgeschichte“ des Wassergehalts spielt eine entscheidende Rolle für den Momentanwert. In der Realität laufen Feuchtespeicherprozesse immer zwischen den beiden abgebildeten, begrenzenden Kurven ab.

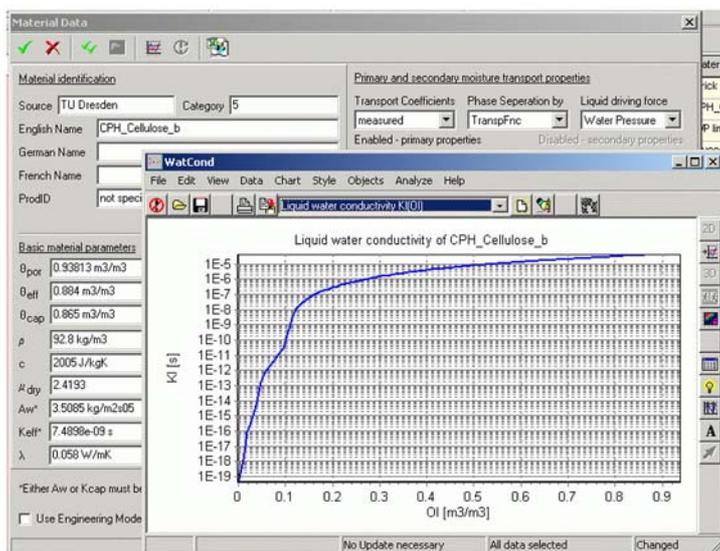


Abb. 46 Materialdialog mit Kapillarwasserleitfähigkeit der Zellulose

Die Feuchtespeicherfunktion wird durch Druckplatten- und Sorptionsmessungen ermittelt. Eine ergänzende Bestimmung der Feuchtespeicherung kann auch – unter Zuhilfenahme eines geeigneten Porenmodells – mittels einer Porenstrukturanalyse (Quecksilberdruckporosimetrie, Stickstoff-BET- und optische Methoden) vorgenommen werden. Schließlich folgt aus der Porenstruktur und der Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten ( $A_W$ -Wert) sowie des Wasserwiderstandes im Bereich der freien Sättigung die Kapillarwasserleitfähigkeit

## 10.2.2 Erfahrungen an Versuchsobjekten

Die Verifizierung der Modelle und des Simulationsprogramms erfolgte in mehreren Testhauseanwendungen, wobei Innen- und Außenklimata sowie Temperaturen, Luftfeuchten, Stofffeuchtegehalte und Wärmeströmung in der Konstruktion gemessen wurden [Häupl et al. 2002]. Mit der Simulation wurden begleitend unter Ansatz der real gemessenen Klimaparameter (meist als Stundenwerte) die wärme- und feuchtetechnischen Werte nachvollzogen. Diese Anwendungen konzentrierten sich meist auf Innendämmung mit verschiedensten Materialien, wie beispielsweise kapillaraktive Dämmplatten, Porenbetonschaum, Mineralwolle, organische Dämmstoffe, mit und ohne Dampfbremse.

Interessante Erfahrungen in Bezug auf organische Dämmstoffe konnten z.B. an einem denkmalgeschützten Umgebinderhaus in Ostsachsen (siehe [Fechner et al. 1998]) gesammelt werden. Hier wurden an der massiven Bohlenwand im Erdgeschoss acht verschiedene Innendämmvarianten über mehrere Jahre untersucht. Im Fachwerkbereich erfolgte weiterhin eine Innendämmung mit drei ausgewählten Innendämmkonstruktionen. An der Blockwand wurde u.a. eine Innendämmung mit Zelluloseflockenschüttung und eine Holzweichfaserdämmplatte angebracht.

Andere repräsentative Objekte sind u.a. der Wiederaufbau der Frauenkirche Dresden (Anwendung eines Innenputzsystems im Wendelgang zur Dämpfung von Schwankungen der Innenluftfeuchte), das Herrenschießhaus Nürnberg (Innendämmung mit kapillaraktivem Calciumsilikat) und die Gebäude in der Bahnmeistergasse Senftenberg (fünf verschiedene Innendämmsysteme).

## 10.3 Materialparameter und Messungen

### 10.3.1 Materialparameter und -funktionen

Für die numerische Simulation sind detaillierte Erfahrungen über die thermischen und hygri-schen Eigenschaften der verwendeten Materialien notwendig. Neben grundlegenden Eigenschaften wie Rohdichte, Wärmekapazität und Dampfleitfähigkeit ( $\mu$ -Wert in mehreren Feuchtebereichen) ist die Kenntnis der Feuchtespeicherung und der Kapillarwasserleitfähigkeit wesentlich für die Qualität der mit Hilfe von Simulationen möglichen Ergebnisse. Da die Feuchteleitfähigkeit eine stark nichtlineare Funktion über mehrere Zehnerpotenzen ist, können Unterschiede hier je nach Anwendungsfall zu grundlegend anderen Ergebnissen und Urteilen führen. Aus diesem Grund ist an der TU Dresden in den letzten Jahren ein hochwertig ausgerüstetes Labor eingerichtet worden, in dem die oben genannten Materialeigenschaften gemessen werden (siehe [Plagge et al. 2003]). Hierbei wird auf Standardverfahren zurückgegriffen, es kommen aber auch instationäre Messverfahren und erweiterte Messtechnik zum Einsatz. Die grundlegenden Materialeigenschaften werden dann als feuchteabhängige Funktionen repräsentiert und in eine Materialdatenbank übernommen. Die zur Modellierung der Materialparameter verwendeten Grundfunktionen sind nachfolgend kurz dargestellt.

**Wärmeleitfähigkeit (LIN\_M)**

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_l \cdot w$$

**Feuchtespeicherung**Sorptionsisotherme: (Typ *ROOT*)

$$w = w_{hyg} \left( 1 - \sqrt{\frac{\varphi_{hyg} - \varphi}{\varphi_{hyg}}} \right) \quad 0 < \varphi \leq \varphi_{hyg}$$

$$w = w_{por} - \frac{w_{por} - w_{hyg}}{1 - \varphi_{hyg}} (1 - \varphi) \quad \varphi_{hyg} \leq \varphi < 1$$

mit  $\varphi_{hyg} = 0.98$  $w_{por}$  : Porenvolumen**Feuchtetransport**a) Wasserdampf-Diffusivität ( Typ *NEWCLASS*)

$$Dv(w) = \frac{D(T)}{\mu_{dry}} \cdot \frac{1 - \frac{w}{w_{por}}}{(1-p) \cdot \left(1 - \frac{w}{w_{por}}\right)^2 + p}$$

mit  $p$  : paralleler Porenanteil für den Feuchtetransportund  $D(T) = 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{T}{273,15K}\right)^{1,81} \text{ m}^2/\text{s}$  (Wasserdampf-Diffusivität in Luft)b) Flüssigwasser-Diffusivität (Kapillarwasserleitfunktion, Typ *STAND*)

$$\text{hygroskopischer Bereich} \quad Dl_h(w) = Dl_{oh}(w_{hyg}) \cdot \left[ 1 - \left(1 - \frac{w}{w_{hyg}}\right)^{k_1} \right] \quad 0 < w < w_{hyg}$$

$$\text{überhygroskopischer Bereich} \quad Dl_{oh}(w) = Dl_{cap} \left[ 1 - \left(\frac{w - w_0}{w_{cap} - w_0}\right)^{\frac{1}{k_1} - 1} - \left(1 - \frac{w - w_0}{w_{cap} - w_0}\right)^{\frac{2}{k_2}} \right] \quad w_{hyg} < w < w_{cap}$$

mit  $w_0$  :  $Dl_{oh}(w_0) = 0$  $w_{cap}$  : freie Wassersättigungsfeuchte

$$Dl_{cap} = Dl \left( \frac{w_0 + w_{cap}}{2} \right)$$

### 10.3.2 Messung der aufgespritzten Zellulosedämmung und des Putzes

Von den Materialien des Systems Zellulose und Innenputz wurden Probekörper in unterschiedlichen Dimensionen gefertigt, um im IBK-Labor der TU Dresden die Messungen der Stoffeigenschaften vorzunehmen. Damit konnte anschließend durch numerische Simulation zum einen die Situation im untersuchten Referenzobjekt nachvollzogen und eine Verifizierung der Materialmessungen und der Modellierung vorgenommen werden. Zum anderen ist dadurch die Möglichkeit gegeben, in Zukunft die Anwendbarkeit des Materials in anderen Konstruktionsvarianten und unter anderen Klimarandbedingungen oder Anwendungsfällen durch Simulationsberechnungen abzuschätzen.

Zur Messung wurden die Baustoffe in den Messzyklus des IBK-Labors eingefügt und nach der Dimensionierung und Ummantelung der Probekörper die folgenden relevanten hygrothermischen Kennwerte gemessen [Plagge et al. 2003]:

- **Basiseigenschaften:** Matrixdichte, Trockenraumdichte, totale und offene Porosität
- **thermale Eigenschaften:** Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität
- **hygrische Eigenschaften:** Feuchtespeicherung im hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich (Sorptionisotherme und Wasserretention), Wasserdampfdiffusionswiderstand, Feuchteleitfähigkeit, Wasseraufnahmekoeffizient und Trocknungscharakteristik

Nachfolgend sind einige wesentliche Messapparaturen zur Bestimmung der überhygroskopischen Materialeigenschaften abgebildet. Die Analyse der überhygroskopischen Eigenschaften sind von besonderer Relevanz zur Beurteilung der anfallenden Kondensatmenge und zur Abschätzung der Trocknungsdauer des Kondensatanfalls.



Abb. 47 Messapparatur zur Bestimmung der Wasserretention im überhygroskopischen Bereich.



Abb. 48 Messapparatur zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

### Zelluloseflocke der Cellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH

Gesamtporosität		93,8 %
Trockenraumdichte im ausgehärteten Zustand		92,8 kg/m <sup>3</sup>
Wasseraufnahmekoeffizienten (in Anlehnung an EN ISO 15148):	$A_w =$	210,5 kg/m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup>
Wasserleitfähigkeit (in Anlehnung an ISO/CD 17312 und 17313):	$k_s =$	0,631 cm/d
Wasserdampfdiffusionswiderstand (in Anlehnung an EN ISO 12572):	$\mu$ -Wert (dry-cup) =	2,42 [ - ]
Wärmeleitfähigkeit		0,052 W/m K
Wärmekapazität		2005 J/kg K

Die Bestimmung der Feuchtesorption erfolgte im hygrischen Bereich in Anlehnung an ISO DIS 12571 und im überhygroskopischen Bereich an ISO DIS 11274. Die Kennwerte können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Relative Luftfeuchte %	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Mittelwert	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Minimum	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Maximum
32,9	0,00242	0,00155	0,00285
43,2	0,00343	0,0027	0,00381
58,2	0,00492	0,00407	0,00527
75,4	0,00763	0,00647	0,00839
84,7	0,0103	0,00945	0,0114
90,0	0,01303	0,0123	0,0139
96,0	0,0228	0,0202	0,0249
97,4	0,0316	0,0216	0,0386

Kapillardruck hPa	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Mittelwert	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Minimum	Feuchtegehalt m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Maximum
0	0,884	0,788	0,884
12	0,567	0,517	0,620
14	0,361	0,310	0,411
300	0,0993	0,0881	0,115
3000	0,0476	0,0443	0,0523
8000	0,0376	0,0313	0,0505

### 10.3.3 Ermittlung charakteristischer Materialfunktionen

Die gemessenen Materialkennwerte wurden zur unmittelbaren Verwendung in den Simulationsmodellen aufbereitet. Letztere benötigen kontinuierlich differenzier- und integrierbare Funktionen und keine Zahlenwerte. Über ein physikalisches Materialmodell werden daher die Kennwerte funktionalisiert, wobei die Wasserretentionscharakteristik, die Flüssigwasserleitfähigkeit, der Wasserdampfdiffusionswiderstand und die Wärmeleitfähigkeit funktional abgebildet werden.

Zur Kontrolle der Materialmessungen im Labor und der Funktionsanpassungen am Computer wurden typische Aufsaugexperimente und Verdunstungsexperimente mit einem physikalisch basierten, wissenschaftlichen Simulationsprogramm nachgerechnet und so der Funktionssatz justiert und das Material verifiziert.

Die Materialkennwerte und die hygrothermischen Funktionen wurden in einem relationalen Datenbanksystem abgelegt. In der Datenbank werden die Materialfunktionen graphisch übersichtlich visualisiert und zur einfachen Auswahl gegenübergestellt.

Die Datenstruktur wurde dabei so gewählt, dass auch künftige Ergänzungen, Anpassungen und Aktualisierungen möglich sind. Eine Aufnahme weiterer Stoffeigenschaften, die für die Planung von Sanierungsmaßnahmen wichtig sind, als auch deren integrierte Beurteilung, ist zudem möglich.

Die für die EnSan-Simulation erforderlichen Daten lassen sich über eine definierte Schnittstelle in die jeweiligen Simulationsprogramme und Software-Planungstools integrieren oder mit ihnen verknüpfen, um sicherer als je zuvor den Einfluss von Sanierungsmaßnahmen auf das hygrothermische Verhalten des Gebäudes zu quantifizieren, Schadensrisiken zu beurteilen und Schäden zu vermeiden helfen.

Die gefundenen Materialfunktionen liegen in graphischer Form dem Anhang bei.

Durch die Wärmeleitfähigkeit von 0,052 W/m K eignet sich die Zellulose sehr gut als Dämmstoff. Der Dampfdiffusionswiderstand  $\mu$  (dry-cup) liegt mit etwa 2,5 [ - ] erwartungsgemäß relativ niedrig. Die Messungen ergaben gleichzeitig eine überraschend hohe Flüssigwasserleitfähigkeit. Das bedeutet, dass bei einer Innendämmung eventuell anfallendes Kondensat im Inneren der Wand kapillar entspannt werden kann.

Der auf die aufgespritzte Zellulose abgestimmte poröse Innenputz besitzt einen relativ niedrigen  $\mu$ -Wert von etwa 6 [ - ]. Das System Zellulose-Putz stellt damit ein kapillaraktives und diffusionsoffenes Innendämmsystem dar.

## 10.4 Numerische Simulationen

### 10.4.1 Vorbemessung des Wandaufbaus am Versuchsobjekt

Mit dem Programm DELPHIN wurde vor dem Einbau der Dämmung eine Vorbemessung für den Wandaufbau im Versuchshaus Graz-Liebenau durchgeführt. Dabei wurden als Außenklima vorhandene Stundenwerte von Temperatur und Luftfeuchte für das Klima Mitteldeutschland angesetzt. Im Gang der Messungen konnten diese fortlaufend durch die vor Ort gemessenen Klimadaten ersetzt werden. Das Innenklima wurde mit den relativ hohen Werten von konstant 20°C und 60% relativer Luftfeuchte angenommen.

Dabei werden hier vier Varianten dargestellt, ausgehend von folgender Überlegung: Bei einer Innendämmung ohne Dampfbremse tritt unter bestimmten Bedingungen Kondensat auf. Besitzt die Dämmung eine hohe Leitfähigkeit für Flüssigwasser, so kann anfallendes Kondensat von der Kondensationsebene in Richtung Innenraum zurücktransportiert werden, wodurch sich die Situation entspannt.

Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusionskoeffizient der Dämmung sowie der weiteren Materialien waren zum Zeitpunkt der Vorbemessung größenordnungsmäßig bekannt. Die Kapillarwasserleitfähigkeit war noch nicht bestimmt. Da sie Werte über mehrere Zehnerpotenzen hinweg annehmen kann, hat sie einen wesentlichen Einfluss auf die Eignung des Systems Zellulosedämmung-Putz als Innendämmsystem.

Aus diesem Grund wurde jeweils einmal eine relativ hohe und eine eher niedrige Flüssigwasserleitfähigkeit für die Zellulosedämmung angenommen. Um einen eingeschwungenen Zustand zu erreichen, wurde zyklisch über mehrere Jahre gerechnet. Um den Einfluss des Außenklimas sichtbar zu machen, wurde zusätzlich für jede Variante noch einmal die Außentemperatur um 5 K reduziert.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Feuchteleitfähigkeit auf die Luftfeuchten in der Kondensationsebene wesentlich stärker ist, als der der Außentemperaturabsenkung um 5 K.

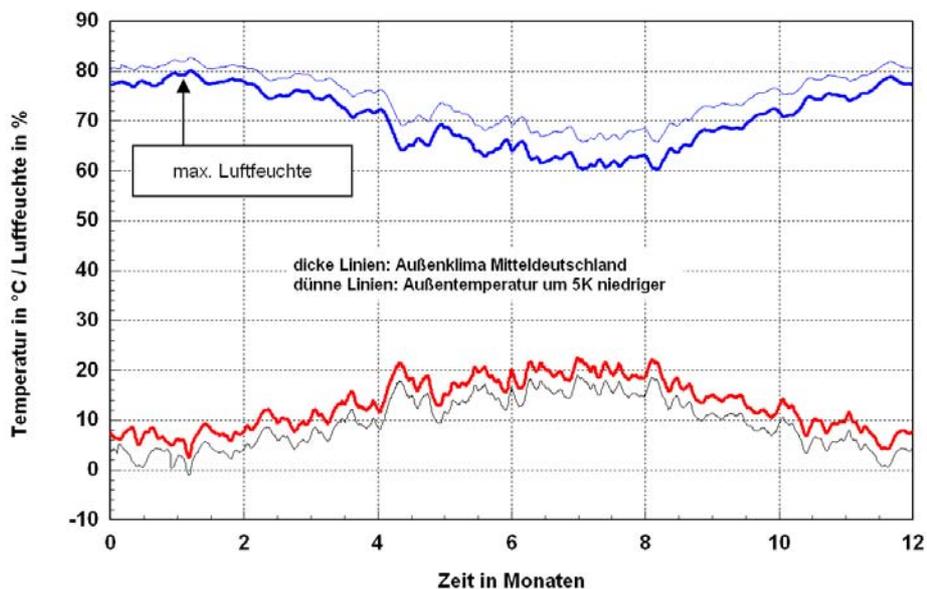


Abb. 49 Temperatur und Luftfeuchte in der Ebene Dämmung-Bestandsputz bei hoher Leitfähigkeit des Dämmmaterials

Obige Abbildung zeigt zunächst für die höhere Leitfähigkeit der Dämmung Luftfeuchte und Temperatur in der kritischen Ebene hinter der neu aufgetragenen Dämmung. Im Winter steigt die Feuchtigkeit aufgrund der niedrigen Temperaturen an, die Maximalwerte liegen jedoch nicht wesentlich über 80%. Dabei liegt die tiefste Temperatur in der Zwischenebene bei abgesenkter Außentemperatur noch knapp über  $\pm 0^{\circ}\text{C}$ .

Nachfolgende Abbildung stellt das Luftfeuchteprofil in der Konstruktion am Tag mit der maximalen Luftfeuchte in der Ebene Dämmung – Altkonstruktion dar. Deutlich ist die Zunahme der Feuchtigkeit in der Dämmung nach außen zu erkennen. Die höheren Feuchtigkeiten auf der Außenseite des Mauerwerks sind durch das Außenklima bedingt, das naturgemäß stärker und schneller schwingt. Diese Schwankungen finden in den äußeren Bauteilschichten (vor allem im Außenputz) statt und dringen nicht nach innen durch.

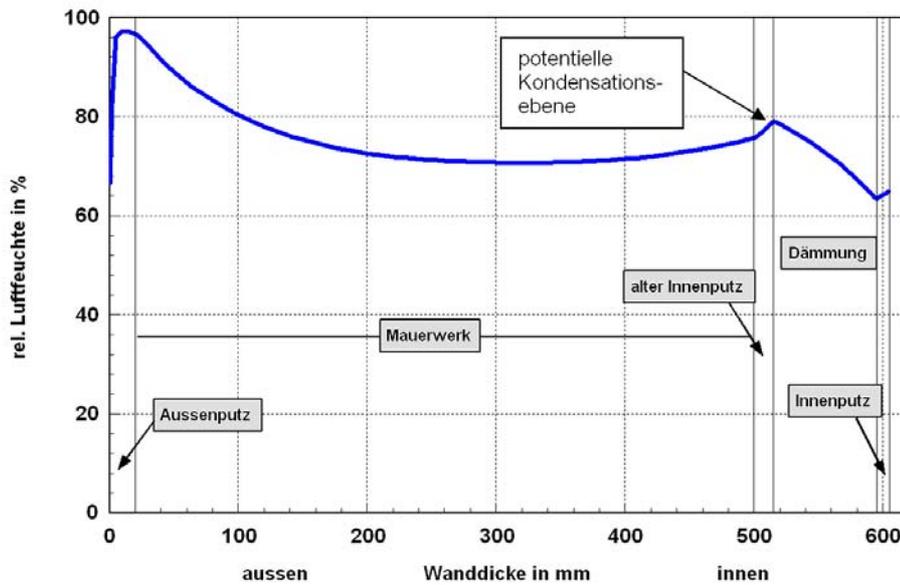


Abb. 50 Luftfeuchteprofil in der Konstruktion am Tag mit der maximalen relativen Luftfeuchte hinter der Dämmung (79%) bei hoher Leitfähigkeit des Dämmmaterials und Klima Mitteledeutschland

Wird eine niedrige Kapillarwasserleitfähigkeit für den Dämmstoff angesetzt, so treten in der kalten Jahreszeit längere Perioden auf, in denen die Luftfeuchte Werte um 95% erreicht.

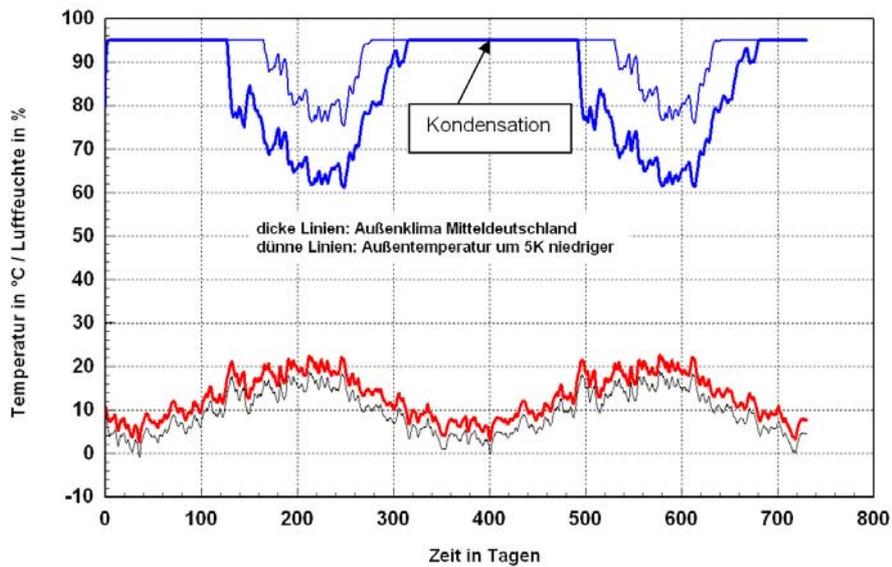


Abb. 51 Temperatur und Luftfeuchte in der Ebene Dämmung-Bestandsputz bei niedriger Leitfähigkeit des Dämmmaterials für zwei Jahre

Hier liegt bereits Kondensation vor, wobei das Austrocknen durch die geringe Leitfähigkeit entsprechend lange dauert.

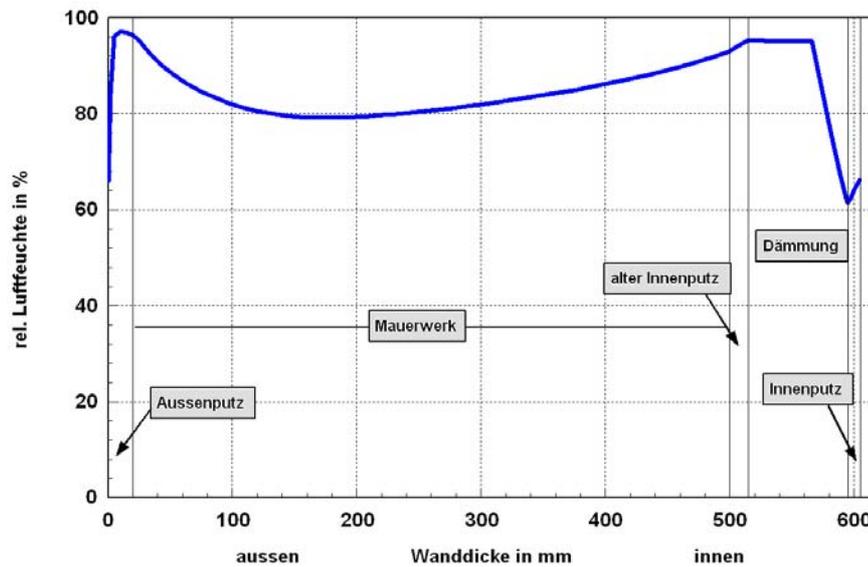


Abb. 52 Feuchteprofil in der Konstruktion am Tag mit der maximalen relativen Luftfeuchte hinter der Dämmung (95%) bei niedriger Leitfähigkeit des Dämmmaterials

Das Feuchteprofil zeigt, dass etwa über die Hälfte der Dämmschicht überhygroskopische Feuchte vorliegt. Die maximale Kondensatmenge beläuft sich auf  $350 \text{ g/m}^2$ , was noch unter den zulässigen Werten von  $0,5$  bzw.  $1,0 \text{ kg/m}^2$  liegt.

#### 10.4.2 Vergleich Messung – Rechnung

Nach Vorliegen der Messungen von Außen- und Innenklima am Versuchshaus sowie der Messungen an und innerhalb der Konstruktion wurden fortlaufend Vergleiche der Simulationsrechnungen mit den gemessenen Werten durchgeführt. Dabei wurden die gemessenen Klimawerte als instationäre Randbedingungen für die Simulation verwendet, woraus sich die Zustandsgrößen in der Konstruktion ergaben. Für die Materialien konnten die im Labor bestimmten Parameter verwendet werden. Ausgewählte Vergleiche sollen im folgenden dargestellt werden.

#### Ungestörtes Wandfeld: Eindimensionale Berechnung

Die Verhältnisse im ungestörten Wandfeld können durch eine eindimensionale Berechnung erfasst werden. Nachfolgende Abbildung vergleicht die gemessenen und berechneten Temperaturen in der Grenzschicht Dämmung – Altkonstruktion.

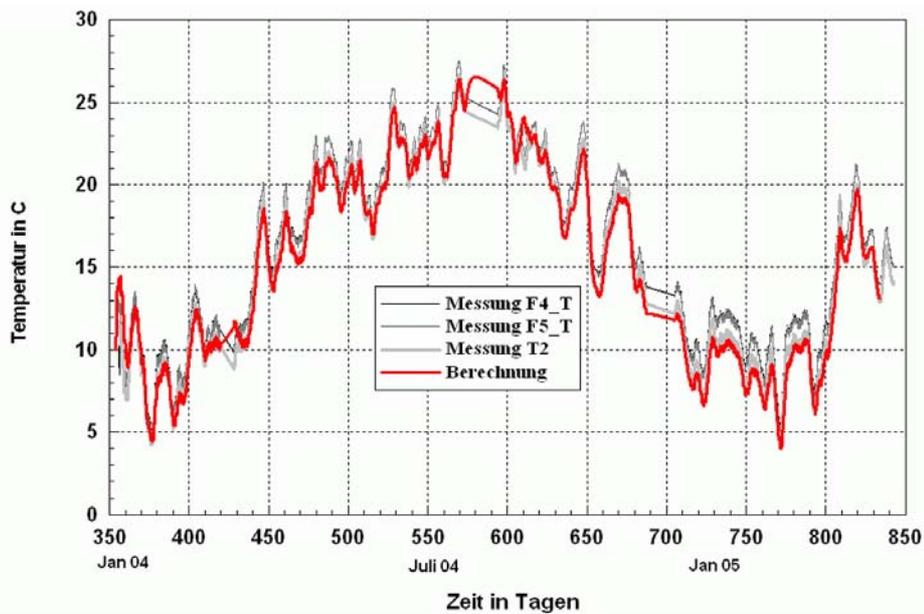


Abb. 53 Temperatur in der Ebene Dämmung-Bestandsputz – Vergleich Messung / Rechnung

Bei den Temperaturen treten zwischen den verschiedenen Messungen (zwei kombinierte Temperatur-Feuchte-Sensoren und ein PT100-Element) Differenzen von max. 1 bis 2 K auf. Dies lässt sich mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Störung der Dämmschicht durch die Sensoren zurückführen – die größeren Kombi-Fühler bewirken, dass am Messort die Dämmschicht etwas dünner und die Temperatur daher im Winterfall etwas erhöht ist. Die Werte des kleineren PT100-Sensor stimmen mit der Berechnung besser überein.

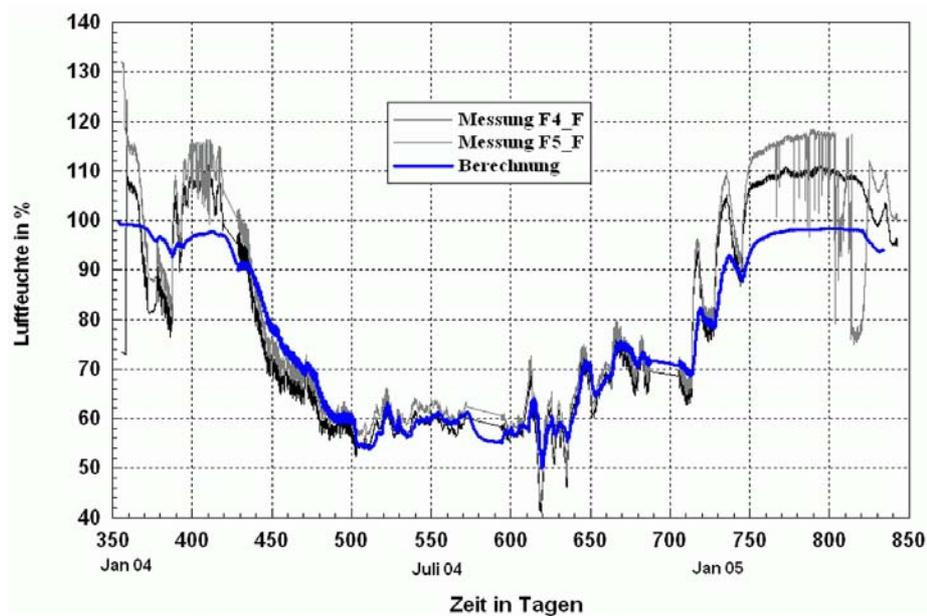


Abb. 54 Luftfeuchte in der Ebene Dämmung-Bestandsputz – Vergleich Messung / Rechnung

Die in der Messung auftretenden Luftfeuchten über 100% sind durch die Sensorart bedingt (siehe Kap. 7.2.1).

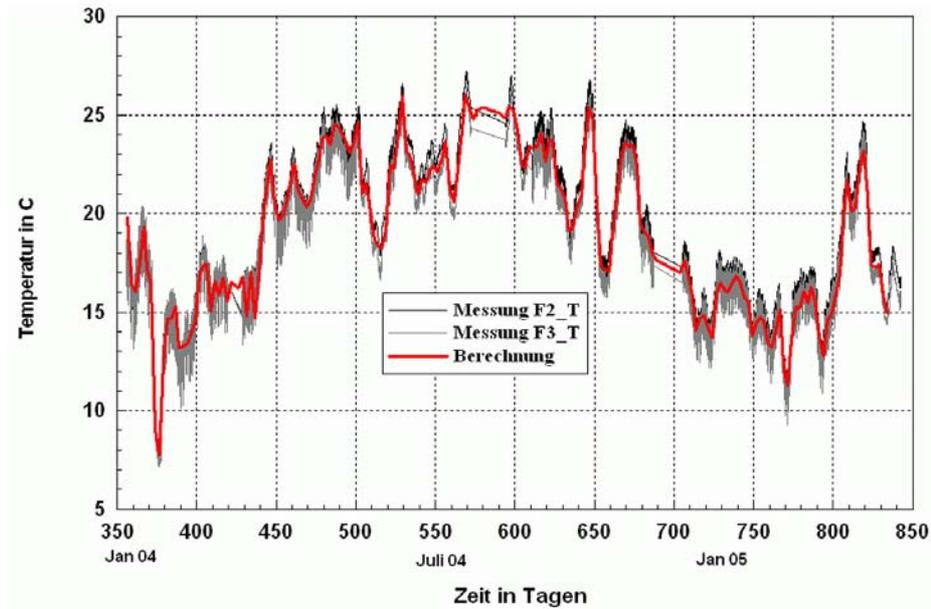


Abb. 55 Temperatur in der Mitte der Dämmung – Vergleich Messung / Rechnung

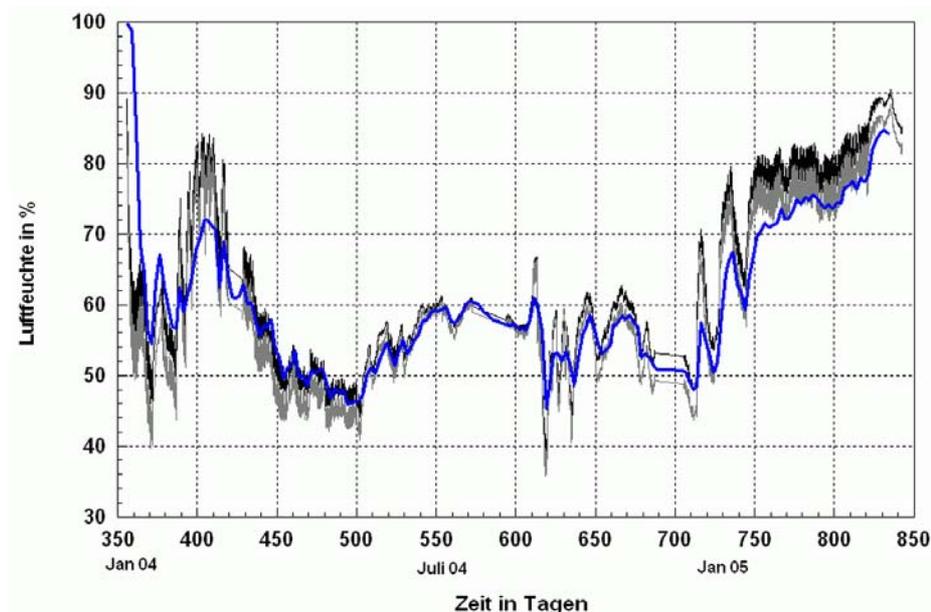


Abb. 56 Luftfeuchte in der Mitte der Dämmung – Vergleich Messung / Rechnung

Der Vergleich der Temperaturen und Luftfeuchten in der Mitte der Dämmung zeigt thermisch ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Die Luftfeuchten liegen in der Messung etwas über den berechneten Werten und zeigen größere Amplituden. Die Abweichungen liegen aber mit etwa 5% relativer Luftfeuchte noch im Bereich der Messgenauigkeit. Generell schwanken die gemessenen Luftfeuchten stärker als die durch die Berechnung dargestellten. Die Ursache dieses Effektes ist darin zu vermuten, dass die Luftfeuchtemessungen in einem kleinen Luftraum stattfinden, während die Simulation die Verhältnisse im Material selbst repräsentiert.

### Kantenbereich: Zweidimensionale Berechnung

Der Bereich der Außenkante erfährt im Winter als geometrische Wärmebrücke eine stärkere Abkühlung, so dass die hier gemessenen Werte getrennt betrachtet werden müssen. Die Temperaturen auf der Außenseite der Dämmung weisen im Winter 2004 / 2005 im Eckbereich ein Minimum von  $\pm 0^{\circ}\text{C}$  auf (im ungestörten Wandbereich treten minimal  $+4^{\circ}\text{C}$  auf). Die relative Luftfeuchte zeigt nach dem Einbau ein langsames Trocknen der Baufeuchte. Im zweiten Winter steigt die Luftfeuchte allerdings trotz geringerer Kantentemperaturen durch die im Vergleich zum Wandbereich geringere Feuchteintragsfläche bei größerer Querverteilung verzögert an.

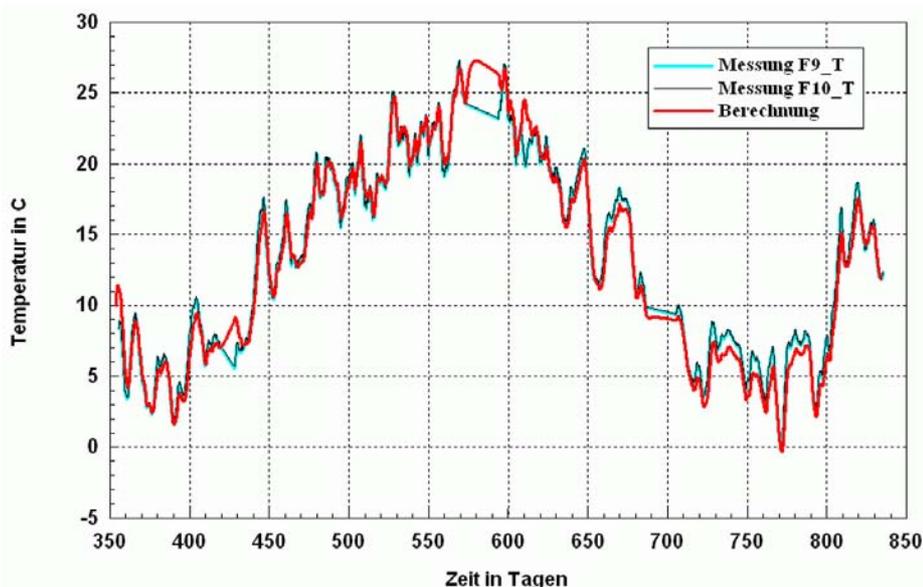


Abb. 57 Temperatur auf der Außenseite der Dämmung in der Außenwandkante – Vergleich Messung/Berechnung (2D)

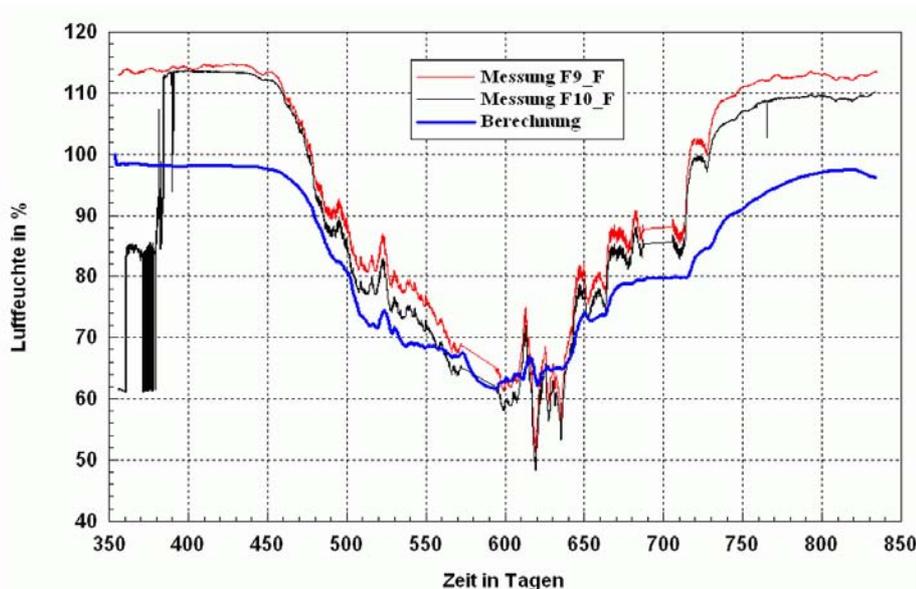


Abb. 58 Luftfeuchte auf der Außenseite der Dämmung in der Außenwandkante – Vergleich Messung/Berechnung (2D)

Auch bei der zweidimensionalen Berechnung ist eine größere Amplitude der Messung gegenüber der Simulation festzustellen. Im Eckbereich tritt auch eine höhere Abweichung der Luftfeuchte von etwa 10% zwischen Messung und Rechnung auf. Die Ursachen liegen zum einen in der deutlich geringeren Dichte der Dämmschicht im Kantenbereich. Zum anderen traten entlang der Kante zwei parallele Risse auf, die einen zusätzlichen konvektiven Feuchteintrag in die Dämmschicht und damit höhere Luftfeuchtigkeiten an der Grenzfläche zum Bestandputz bewirkten. Die Werte über 100% sind wieder durch die Sensorik bedingt, wurden aber aufgrund der Anschaulichkeit der Kurvenverläufe mit dargestellt.

Aufgrund der insgesamt guten Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen können aus den Simulationsberechnungen somit weitere nicht direkt messbare Werte wie Feuchtemasse in der Konstruktion und Feuchteprofil zur Beurteilung des Verhaltens der Konstruktion herangezogen werden.

Die Gesamtmasse der überhygroskopischen Feuchte in der Konstruktion über die Messperiode ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Sie liegt zu Beginn durch die Einbaufeuchte über  $3 \text{ kg/m}^2$ . Die Austrocknung verläuft relativ zügig, wird aber durch winterliche Kondensation überlagert und dadurch verzögert. Im zweiten Winter treten unter den real gemessenen Klimabedingungen etwa  $350 \text{ g/m}^2$  Kondensat auf.

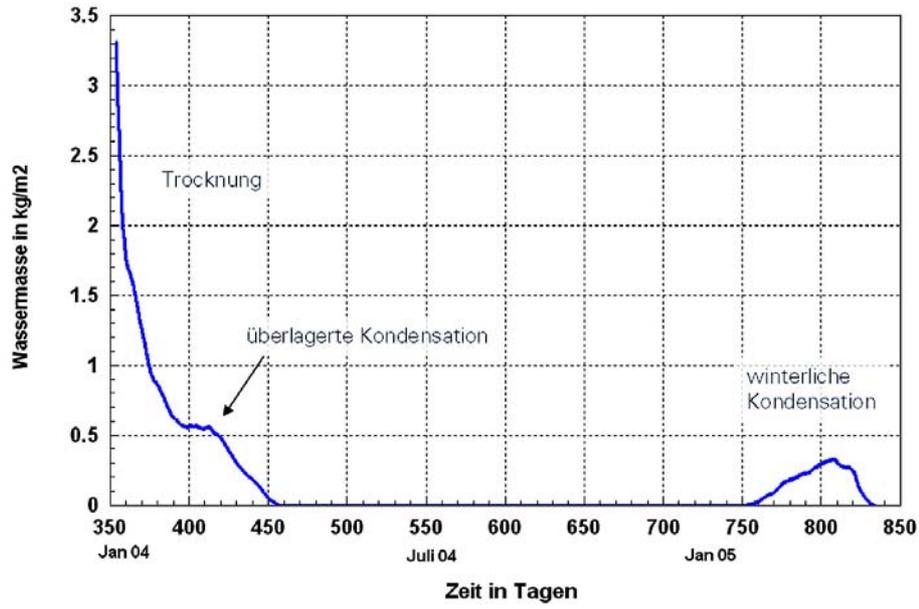


Abb. 59 Überhygroskopischer Wassergehalt (kg/m²) in der Konstruktion (1D)

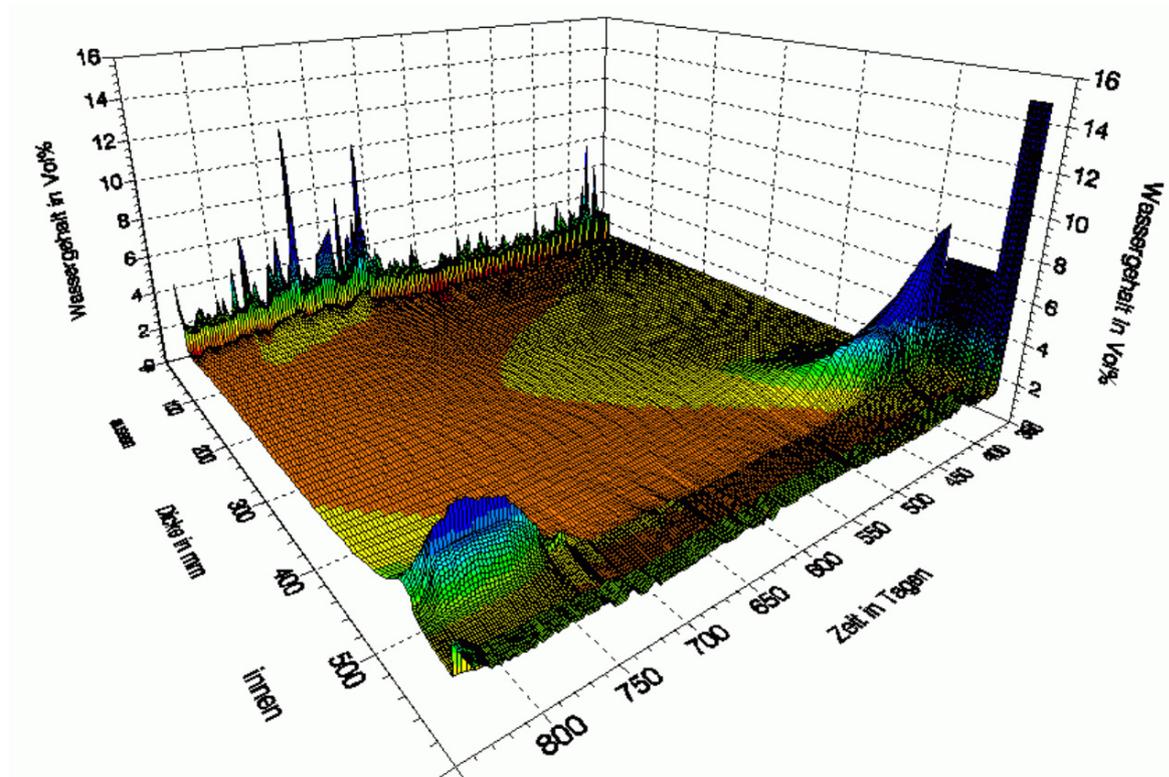


Abb. 60 Zeitlicher Verlauf des Feuchteprofils in der Konstruktion (1D)

Die örtliche Verteilung der Feuchte ist im zeitlichen Verlauf des Feuchteprofils in obiger Abbildung zu erkennen (Innenseite rechts vorn, Außenseite hinten). Sie zeigt nochmals als Gesamtbild das Austrocknen der Anfangsfeuchte sowie den Kondensatbereich im zweiten Winter mit maximalen Feuchtegehalten um 5 Vol.-% (im Bild vorn). Die Feuchtespitzen im Außenputz sind durch das äußere Klima bedingt.

Unten stehende Abbildung stellt abschließend ein 2D-Feuchtefeld des Eckbereichs am 21.03.2005 (Tag 810) dar. An diesem Tag tritt die maximale Flüssigwassermenge im zweiten Winter auf. Der erwähnte maximale Feuchtegehalt von etwas über 5 Vol.-% ist in der Grenzschicht Dämmung-Bestandsputz zu erkennen.

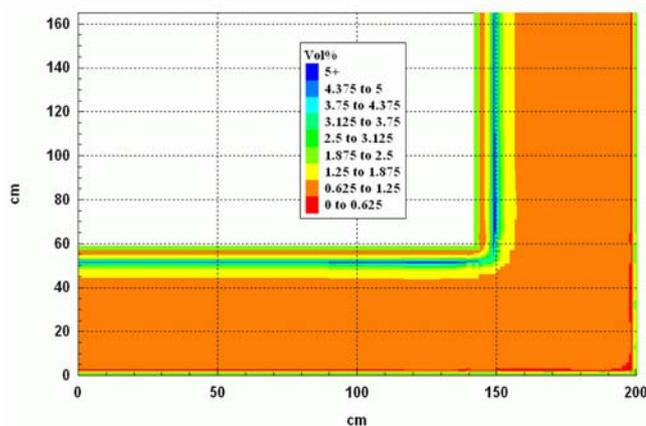


Abb. 61 Wassergehaltsfeld in der Konstruktion am 21.03.2005

**Berechnung mit Konstantklima**

Zum Vergleich wurde eine Berechnung mit Konstantklima – innen +20°C / 50%, außen - 10°C / 80% über 60 Tage – durchgeführt. Die dabei entstehende Menge an überhygroskopischem Wasser beträgt 580 g/m<sup>2</sup>.

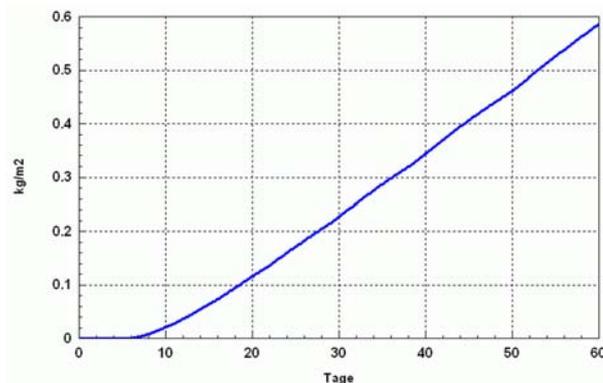


Abb. 62 Entwicklung der Kondensatmenge bei Berechnung mit 60 Tagen Konstantklima

### 10.4.3 Einfluss eventueller Farbschichten zwischen Bestandsputz und Dämmung

Auf der Wand im Versuchshaus befanden sich Reste mehrerer Farbschichten. Obwohl diese nicht näher bestimmt wurden, stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, wie sich ggf. wasser- und dampfsperrende Farbschichten auf den Feuchtehaushalt der Wand nach dem Einbau einer Innendämmung aus aufgespritzter Zellulose auswirken.

Dazu wurde in einer Berechnung zwischen Zellulose und Altkonstruktion eine Schicht mit extrem niedriger Wasserleitfähigkeit und einer äquivalenten Luftschichtdicke von  $s_d = 2$  m angenommen. Flüssiges Wasser (Baufeuchte und Kondensat) kann nun nicht oder nur in sehr geringem Maße in die Altkonstruktion übergehen. Tritt Kondensat auf, so muss es sich in der Dämmung verteilen.

Die folgenden Abbildungen zeigen dies anhand der Wassergehaltsprofile an einem Tag gegen Ende der zweiten Winterperiode (28.02.2005). Ohne Farbschicht fällt das Feuchteprofil von der Kondensatebene nach beiden Seiten ab. Mit Farbschicht bleibt die Altkonstruktion an dieser Stelle trocken.

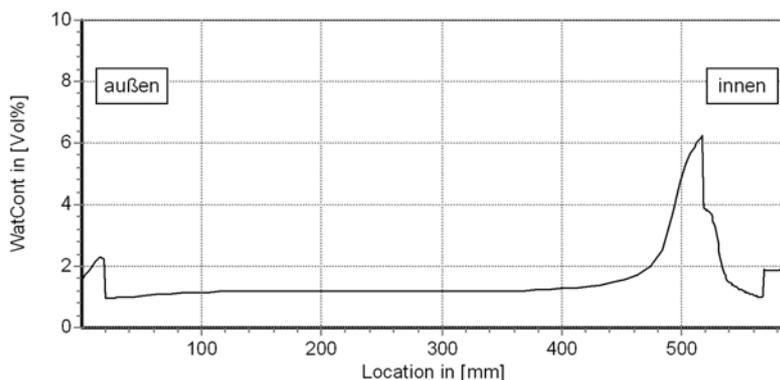


Abb. 63 Wassergehaltsprofil am Tag 789 (28.02.2005) ohne Farbschicht

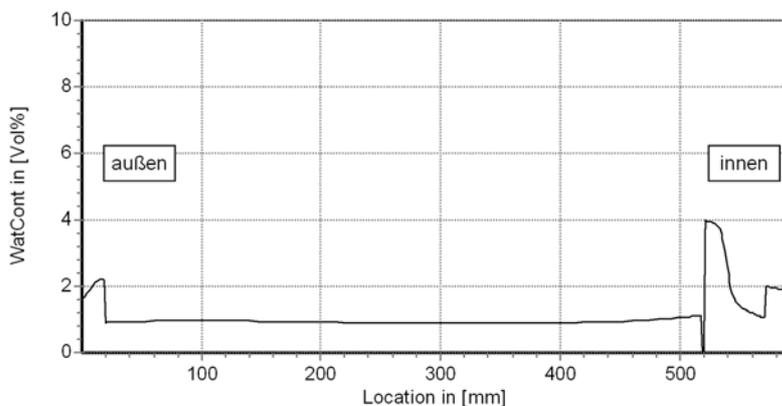


Abb. 64 Wassergehaltsprofil am Tag 789 (28.02.2005) mit Farbschicht

Die Auswirkung dieser Schicht auf die integrale Wassermasse wird in untenstehender Abbildung deutlich:

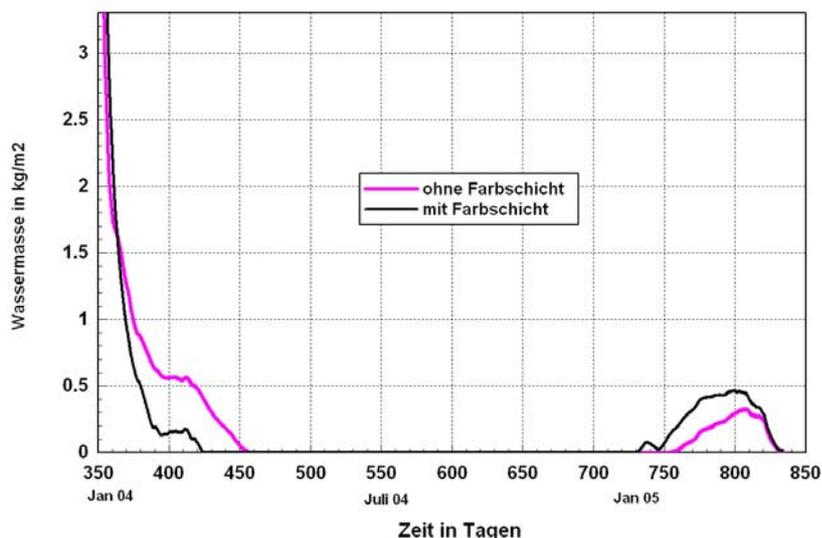


Abb. 65 Integrale Wassermasse in der Konstruktion

Hier sind zwei Phasen zu unterscheiden. Zum einen beschleunigt sich das Austrocknen der Zellooseschicht nach dem Aufspritzen, da Putz und Ziegel kein Wasser aufnehmen und die Austrocknung zum Raum hin entsprechend schneller verläuft. Die Kondensatperiode dagegen zeigt eine höhere Feuchtemenge von knapp unter  $0,5 \text{ kg/m}^2$ , da durch die dichte Schicht auch die Speicherung von Feuchte im hygroskopischen Bereich im alten Innenputz und Ziegel unterbunden wird. Diese Feuchte wird jetzt auch als Kondensat sichtbar.

Die Annahme einer komplett wasserdichten Schicht stellt sicherlich eine Art „worst case“ dar. Die wahren Verhältnisse dürften also im Zwischenbereich der beiden dargestellten Kurven liegen, wobei auch im simulierten Fall die Grenze von  $0,5 \text{ kg/m}^2$  nicht überschritten wird. Dennoch zeigt diese Variantensimulation, dass sich der Feuchtehaushalt durchaus ändern kann. Im der untersuchten Konstruktion wäre im Hinblick auf den Kondensatfall das Entfernen der alten Farbschicht sinnvoll.

## 10.5 Fazit

Die durchgeführten numerischen Simulationen stimmen mit den gemessenen Werten gut überein. Die daraus abgeleiteten Feuchteprofile zeigen unter den im Versuchshaus real aufgetretenen Innen- und Außenklimawerten in ein- und zweidimensionalen Berechnungen einen maximalen Feuchtegehalt von etwas über 5 Vol.-%.

Sowohl im Wand- als auch im Kantenbereich treten in der Kälteperiode Luftfeuchten von über 80% über einen längeren Zeitraum auf. Die Temperaturen sind dabei jedoch relativ niedrig, sodass diese Luftfeuchtwerte nicht mit einer so hohen Schimmelgefahr verbunden

sind, wie sie beim Erreichen der 80%-Grenze an raumseitigen Oberflächen mit entsprechender Exposition von Sporen besteht. Unter welchen Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen langfristig Schimmelbefall zu befürchten ist, wird im Detail noch zu untersuchen sein. Die Proben aus dem Versuchshaus haben jedenfalls bei lichtmikroskopischer Untersuchung keinen Befall gezeigt (siehe auch Kap.11.2)

Der DIN 4108-äquivalente Nachweis mit Konstantklima weist zwar Kondensat aus, dieses ist aber mit rund 0,6 kg/m<sup>2</sup> noch im zulässigen Bereich und kann zur Gänze austrocknen.

Das System aus Putz und aufgespritzter Dämmung kann somit vom hygrothermischen Standpunkt positiv beurteilt werden. Durch die hohe kapillare Leitfähigkeit der Zellulose kann auftretendes Kondensat kapillar entspannt werden. Mit Hilfe der gemessenen Materialfunktionen können die gewonnenen Erkenntnisse durch hygrothermische Simulationsberechnungen auf andere Konstruktionen und andere Klimata übertragen werden.

## 11 Weitere bauphysikalische Aspekte

### 11.1 Einleitung

Neben den bereits erwähnten festigkeitstechnischen und hygrothermischen Aspekten soll im Folgenden auf einige weitere bauphysikalischen Aspekte eingegangen und insbesondere die Schimmelpilzsituation erläutert werden.

Wärmedämmende Maßnahmen an den Außenbauteilen (Außen-, Kern- oder Innendämmung) erhöhen die behaglichkeitsrelevante innere Oberflächentemperatur. Da der Mensch jene Temperatur empfindet, die in etwa dem Mittelwert aus Lufttemperatur und Temperatur der ihn umgebenden Oberflächen entspricht, muss für gleich bleibenden Komfortanspruch bei höheren Oberflächentemperaturen kein Ausgleich durch erhöhte Lufttemperaturen erfolgen.

Außenwände typischer Altbauten haben einen U-Wert von etwa  $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Mit einer 5 cm dicken Innendämmung kann der U-Wert unter  $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  gesenkt werden, womit die Transmissionswärmeverluste um 60 % sinken und die inneren Oberflächentemperaturen um 4 K steigen. Kondenswasserbildung bzw. Schimmelpilzwachstum tritt damit an der „neuen“ Innenoberfläche der Außenbauteile nicht mehr auf und ist bei richtiger Materialauswahl auch übermäßige Feuchtebelastung im Inneren der Konstruktion nicht zu befürchten [Fechner, 2002]

Zwar wird durch die Innendämmung der Außenwand auf deren Wärme speichernde Masse verzichtet, mit massiven Innenwänden und Mobiliar bleiben jedoch ca. 80 % der Wärmespeichermasse des Raumes erhalten. Mögliche Auswirkungen auf den Schallschutz und Brandschutz in positiver, ggf. aber auch in negativer Hinsicht seien an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt, ebenso wie der Vorteil der individuellen Möglichkeit zur thermischen Verbesserung unabhängig von Baufluchtlinien oder –vorschriften aber auch Nachteile wie reduzierte Nutzfläche, der eingeschränkten Befestigungsmöglichkeit schwerer Gegenstände oder der größeren temperaturbedingten Formänderungen der Außenbauteile. Wärmebrücken und Anschlüssen (z.B. von Holzbalkendecken) ist besonderes Augenmerk zu schenken.

Kommt es zu Kondensatausfall, sind folgende Problempunkte zu bedenken:

- Schimmelpilzbildung (z.B. an Wärmebrücken oder in der Grenzschicht zwischen Bestandsmauerwerk und Wärmedämmung)
- Salzschäden (z.B. Salzausblühungen an den Grenzflächen)
- Frostschäden (z.B. Abplatzungen im Fassadenbereich)
- Korrosion (z.B. von Befestigungselementen)
- Fäulnis (z.B. von Deckenbalkenköpfen oder Fachwerkhölzern).

Gegenstand weiterer Untersuchungen muss es auch sein, ggf. Material schädigende Auswirkungen von Schimmelpilzbildung, Salztransport oder Frost durch wiederkehrende Befeuchtungsphasen zu quantifizieren.

Frostschäden beruhen auf der 9 %-igen Volumenzunahme des Wassers beim Gefriervorgang. Damit darf der Füllungsgrad der Poren 91,7 % nicht übersteigen, widrigenfalls das Eis nicht mehr in den leeren Porenraum ausweichen kann. Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass einerseits vor allem Poren mit einem Durchmesser bis 3 µm das Frostrisiko erhöhen, andererseits bis zu einem gefüllten Porenvolumen bzw. Feuchtigkeitsgehalt von 45 ml/kg keine Frostgefährdung zu erwarten ist, auch wenn beispielweise ein Ziegel ausschließlich diese kleinen Porendurchmesser aufweisen würde [Maage, 1990]. Somit Feuchtigkeitsmengen, die aufgrund von Diffusionsvorgängen kaum auftreten, an schlagregengefährdeten Wänden jedoch problematisch werden können.

## 11.2 Bauteilanschlüsse

Innenbauteile, die in innen gedämmte Außenwände einbinden stellen besondere Wärmebrücken dar. Kann bei homogenen Bauteilen (z.B. Innenwänden) analog zu homogenen Außenwänden mit fachgerecht abgestimmter Zusatzdämmung kritische Bauteilkondensation vermieden werden, sind bei inhomogenen Bauteilen (z.B. Holzbalkendecken) ggf. intensive Feuchtebelastungen zu beachten.

Aufgrund der im Vergleich zum Ziegelmauerwerk relativ guten Wärmedämmeigenschaft von Holz kommt es über die Holzbauteile zu keiner Wärmeleitung vom Innenraum zum Deckenauflegerbereich in der kalten Außenwand, deren Temperatur durch eine Innendämmung noch näher an die Außenlufttemperatur herangeführt wird. Damit steigt bereits durch die niedrige Temperatur in der Auflagernische des Holzbalkens die relative Luftfeuchtigkeit – woher auch immer diese kommen mag. Von außen durch Schlagregen oder von innen durch dreidimensionale Wasserdampfdiffusion und ev.

Wasserdampfkongvektion. Beiden Vorgängen wird ob der konstruktiven Eigenheit von Holzbalkendecken mit ihren großen Hohlräumen zwischen den Balken ein geringer Widerstand entgegengesetzt; intensiver Feuchtezustrom ist die Folge - das „Todesurteil“ für die Balkenköpfe durch Holzvermorschung. Ist der bestehende Balkenkopf bereits derart geschädigt, dass dieser zu sanieren ist, steht z.B. neben der konventionellen Verstärkung mittels Stahlträger ein thermisch von der Außenwand getrenntes Auflager im warmen Innenraum zur Auswahl. Was jedoch bei intaktem bestehendem Balkenkopf?

Überlegungen gehen dahin, dass in Auflagernähe Materialien mit schlechteren Dämmeigenschaften zum Einsatz kommen, um die Temperatur in der Auflagernische wieder anzuheben; oder dass mittels Begleitheizung oder hoch leitender Elemente der Balkenkopf beheizt wird; oder sogar, dass warme Raumluft intensiv in die Auflagernische geführt wird. Weitere Möglichkeiten könnten eine Entlüftung der Auflagernische in die Außenluft sein mit einer innenseitigen, an die Holzbalken gut angearbeiteten Luft- und Dampfsperre im warmen Bereich der Dämmebene.

### 11.3 Schimmelpilze

Der Vermeidung gesundheitsschädlicher Freisetzung von Schimmelpilzen und deren Stoffwechselprodukten kommt nicht zuletzt infolge des durch die gestiegenen Umweltbelastungen erhöhten Allergenpotenzials immer größere Bedeutung zu. Kurze Neubauzeiten, unsachgemäße thermische Sanierungen bestehender Bausubstanz und die Zunahme von mehrschichtigen Bauteilen führen zu verstärktem Risiko sowohl von sichtbarem Schimmelpilzbefall als auch nicht entdeckten Kontaminationsherden, die in weiterer Folge durch kontinuierliche Freisetzung von Schadstoffen an die Raumluft Gefahrenquellen für die Gesundheit der Nutzer darstellen.

Aus der Literatur sind weit entwickelte Verfahren zur Vorhersage der Wahrscheinlichkeit von Schimmelpilzbefall infolge Oberflächen- und/oder Bauteilkondensation bekannt [Sedlbauer, 2001]. Hinsichtlich der Beurteilung des Gefährdungspotenzials von „sanierten“ oder „ruhenden“ Schimmelpilzherden besteht aber nach wie vor erheblicher Forschungsbedarf (siehe z.B. [Mücke/Lemmen, 2004]).

Bis heute gibt es in der Fachwelt keine schlüssige Antwort auf die schwierige Frage, wie Schimmelpilzschäden methodisch sicher und auf einheitliche Weise zu erfassen sind und wie man insbesondere verdeckte Schäden feststellen kann. Auch die gesundheitliche Bewertung der Schimmelpilzbelastungen geschieht wegen einer Reihe offener Fragen nicht immer sicher. Ein wichtiger Beitrag zur Sichtung und Vereinheitlichung der – oftmals divergierenden – Aussagen in der Literatur ist durch den „Schimmelpilz-Leitfaden“ des deutschen Umweltbundesamts, Berlin, geleistet worden [Umweltbundesamt, 2002].

Schimmelpilze sind ein natürlicher Teil unserer belebten Umwelt und ihre Sporen sind daher auch in Innenräumen vorhanden. Die Vermehrung von Schimmelpilzen in Innenräumen kann dagegen ein hygienisches Problem darstellen.

„Schimmelpilz“ ist ein Sammelbegriff für Pilze, die typische Pilzfäden und Sporen ausbilden können und dadurch makroskopisch als (oft gefärbter) Schimmelbelag sichtbar werden. Es handelt sich dabei aber nicht um eine einheitliche Gruppe von Pilzen, vielmehr sind unter dem Begriff „Schimmelpilze“ Fadenpilze aus mehreren Pilzgruppen (Zygomycetes, Ascomycetes, Fungi imperfecti) zusammengefasst.

Die einzelnen Schimmelpilze werden mit einem lateinischen Doppelnamen bezeichnet. Dabei steht der erste Teil des Namens für die übergeordnete Pilzgattung (z.B. *Aspergillus* oder *Penicillium*), der zweite Teil benennt die einzelne Pilzart (z.B. *Aspergillus fumigatus* oder *Penicillium chrysogenum*).

Schimmelpilze bilden in der Wachstumsphase Zellfäden (Hyphen), deren Gesamtheit man als Myzel bezeichnet. Da diese Fäden meist farblos sind, ist der Schimmelpilz in dieser Phase normalerweise mit dem bloßen Auge nicht sichtbar. Zur Vermehrung und Verbreitung bilden Schimmelpilze asexuelle Verbreitungsorgane (Sporangiosporen und Konidien) und, viel seltener, sexuelle Verbreitungsorgane (Zygosporen, Ascosporen). Alle Verbreitungsorgane werden im folgenden unter dem Begriff „Sporen“ zusammengefasst.

Da die asexuellen Sporen meist in großer Zahl produziert werden und oft gefärbt sind, werden die Schimmelpilze in diesem Stadium mit bloßem Auge (z.B. als Schimmelpilzflecken) sichtbar.

Schimmelpilzsporen umfassen mit wenigen Ausnahmen den Größenbereich von 3 bis 20 µm (maximaler Bereich 2 - 100 µm). Die meisten Sporen haben Durchmesser unter 10 µm, wobei nach [Mücke/Lemmen, 2004] Sporen > 5 µm als nicht lungengängig, solche < 5 µm als lungengängig und Sporen < 2 µm als alveolengängig bezeichnet werden.

Schimmelpilze sind an der Zersetzung von organischem Material beteiligt und spielen damit eine wichtige Rolle im Kohlenstoffkreislauf der Natur. Ihre Konzentration in der Außenluft ist je nach Ort, Klima, Tages- und Jahreszeit großen Schwankungen unterworfen. Diese Schwankungen werden zum einen durch natürliche Einflüsse hervorgerufen, beispielsweise durch Änderung der Temperatur und Feuchtigkeit im Jahresverlauf. So kann die städtische Konzentration in den Monaten Juli / August bis zu 4000 KBE/m<sup>3</sup> (Kolonie bildende Einheiten) betragen - im Vergleich zu etwa 100 – 200 KBE/m<sup>3</sup> in den Monaten November bis Mai [Umweltbundesamt, 2002]. Weitere Faktoren sind die geographische Lage, eventuelle Ansammlungen von verrottendem Material oder Aufwirbelung von Erde. Schimmelpilze können auch durch Produktionsprozesse freigesetzt werden, wie z.B. in Kompostierungs- oder, Wertstoffsortierungsanlagen, bei der Tierhaltung oder in der Getreideverarbeitung.

Schimmelpilze, die in der Innenraumluft nachgewiesen werden, können zum einen über Lüftungsvorgängen aus der Außenluft in den Innenraum gelangt sein; zum anderen können sie aus Quellen im Innenraum stammen. Um hier unterscheiden zu können, ist es notwendig, bei Untersuchungen der Innenraumluft immer eine vergleichende Messung der Außenluft durchzuführen.

Das Schimmelpilzwachstum im Innenraum wird hauptsächlich durch drei Faktoren bestimmt: Feuchtigkeit, Nährstoffangebot und Temperatur. Weitere Faktoren, die das Wachstum oder bestimmte Stoffwechselfvorgänge beeinflussen können, sind der pH-Wert des Substrates, Licht (Sporenbildung), der Sauerstoffgehalt der Luft sowie chemische Substanzen. Nach der Höhe der Wachstumsoptimumtemperatur unterscheidet man thermophile, thermotolerante und, die speziell in unseren Breiten vorkommenden, mesophilen Schimmelpilze.

Zahlreiche epidemiologische Studien zu gesundheitlichen Auswirkungen durch Schimmelpilze belegen einen Zusammenhang zwischen einer Exposition der Normalbevölkerung gegenüber Luft getragenen mikrobiologischen Stoffen in der Umwelt – auch durch Feuchtigkeit sowie Schimmelbildung im Innenraum – und Atemwegsbeschwerden. In keiner dieser umweltepidemiologischen Studien konnte jedoch bislang aufgrund der vielen möglichen Einflussfaktoren eine gesicherte Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen der Konzentration an Schimmelpilzen in der Luft und gesundheitlichen Auswirkungen aufgestellt werden.

Sporen und Stoffwechselprodukte von Schimmelpilzen können, über die Luft eingeatmet, allergische und reizende Reaktionen bzw. Symptomkomplexe beim Menschen auslösen. In seltenen Fällen können einige Schimmelpilzarten darüber hinaus bei bestimmten

Risikogruppen auch Infektionen hervorrufen (sog. Mykosen). Die häufigsten bei Schimmelpilz-belastungen im Innenraum beschriebenen Symptome sind unspezifisch, so z.B. Bindehaut-, Hals- und Nasenreizungen sowie Husten, Kopfweh oder Müdigkeit.

Die Ursachen derartiger Wirkungen von Schimmelpilzen sind im Einzelnen nicht bekannt. Es wird vermutet, dass von Schimmelpilzen abgegebene giftige Stoffe, sog. Mykotoxine, sowie 1,3- $\beta$ -D-Glucan und möglicherweise MVOC (Microbial Volatile Organic Compounds) und andere bisher unbekannte Stoffwechselprodukte oder Bestandteile von Schimmelpilzen beteiligt sind. Prinzipiell sind alle Schimmelpilze (und Bakterien) in der Lage, solche Symptome auszulösen.

### 11.3.1 Schimmelpilzprüfung

Das im Entwurf der ersten „Zellulosenorm“ (ÖNORM) [prEN 15101-1, 2005] für LCFI (Loose Fill Cellulose Insulation) - dem Rohstoff für die aufgespritzte Innendämmung - festgelegte Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen biologische Wirkstoffe nach [ASTM C 1338-96] wird - wie auch in Fachkreisen - kritisch hinterfragt. Das dort angeführte Prüfverfahren scheint aus dem Hochreinheitsbereich der Pharmaindustrie zu stammen und wird für Baumaterialien als überzogen erachtet. Ähnliches gilt für die für die deutsche Zulassung von Zellulosedämmstoffen vorgeschriebene Prüfung in Anlehnung an [DIN IEC 68, 1991].

Aufgrund dieser uneinheitlichen, zum Teil zu scharfen Prüfvorschriften wurde die Beurteilung der mykologischen Situation in der aufgespritzten Zellulosedämmung durch das ACBR – Austrian Centre of Biological Resources and Applied Mycology an der Universität für Bodenkultur, Wien, nach den dort für baupraktische Materialprüfungen verwendeten Standards durchgeführt.

Dazu wurden nach Ende der zweiten Austrocknungsperiode jeweils drei Proben aus der Dämmschicht und der unmittelbar angrenzenden Farbschicht aus der Wandmitte und der Wandkante entnommen.

Die mykologischen Untersuchungen wurden durch Beimpfung dreier Nährmedien (MEA, DG 18; DRBC, alle Ansätze erfolgten 3-fach) und siebentägiger Inkubation bei 20°C durchgeführt. Das Ausschütteln der Proben in 0,9% NaCl oder Tween80-Lösung wurde wegen der Wasserlöslichkeit der in der Zellulosedämmung vorhandenen Biozide (Borsäure und Borpentahydrat) vermieden. Daher wurde keine quantitative Bestimmung der Schimmelpilze durchgeführt.

In der auf- und durchlichtmikroskopischen Analyse der Proben konnten sowohl bei 640- als auch bei 1000-facher Vergrößerung keine Pilzmyzelien festgestellt werden. Nach o.a. Inkubation wurde lediglich in einer Zellulose-Probe (K1) aus der Außenwandkante ein lebensfähiger Schimmelpilz nachgewiesen. Dieser wurde als *Penicillium janthinellum* identifiziert (nach [Pitt, 2000]). *Penicillium janthinellum* ist ein weit verbreiteter Schimmelpilz, der in der Luft und im Boden vorkommt.

Da in der lichtmikroskopischen Analyse keine Myzelienbildung nachgewiesen werden konnte, erscheint es wahrscheinlicher, dass die Sporen beispielsweise mit dem Altpapier eingetragen wurden, als dass die besondere Einbausituation ihr Vorhandensein begünstigt hätte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aller Voraussicht nach bereits die Standard-Einblaszellulose ohne zusätzliche chemische Ausstattung den weitaus höheren Anforderungen, die an ein Innendämmsystem gestellt werden, genügt. Unbeschadet dessen sind aus o.a. Gründen, Langzeituntersuchungen durchzuführen.

#### **11.4 Langzeitverhalten**

Neben der standardisierten Erfassung ev. vorhandener Kolonien sollte besonderes Augenmerk auf die Untersuchung von Phänomenen wie Biofouling (Auftreten von mikrobiellem Belag auf Werkstoffoberflächen mit chemisch-physikalischen Auswirkungen, wie z.B. Veränderungen des Diffusionsverhaltens) und Biokorrosion (Veränderung der Struktur und Stabilität eines Baustoffs durch Ausscheidung direkt korrosiv wirkender Stoffwechselprodukte, bis hin zum enzymatischen Abbau der betreffenden Materialien) gelegt werden (nach [Sedlbauer, 2001]).

Für das zu entwickelnde Zellulose-Innendämmsystem bedeutet dies in erster Linie die Untersuchung der Langzeitstabilität des aufgespritzten Dämmkörpers unter dem Gesichtspunkt wiederholter Befeuchtungs- und Austrocknungszyklen. Eventuelle, damit zusammenhängende, Salztransportvorgänge könnten sich unter Umständen infolge der Verfrachtung von Fungiziden innerhalb der Dämmschicht von der inneren Bestandsoberfläche in Richtung Raumseite nachteilig auf die Pilzbeständigkeit des Systems auswirken.

## 12 Ergebnisse, weiterer Forschungsbedarf und Schlussfolgerung

Im folgenden werden die Projektergebnisse anhand der einzelnen Arbeitspakete zusammengefasst sowie der weitere Forschungsbedarf dargestellt.

### 12.1 Ergebnisse

#### Bindemittel und Mahlversuche

Nach umfangreichen Versuchen mit verschiedenen ökologischen Bindemitteln musste zufolge der vorläufig noch nicht geklärten verstärkten Schimmelpilzgefahr durch die „nachwachsenden“ Bindemittel auf ein Polymerisat auf Acrylbasis zurück gegriffen werden. Mittelfristig wird jedoch die Verwendung biogener Bindemittel wie beispielsweise Muschelklebern angestrebt. Aufgrund zahlreicher Mahlversuche mit unterschiedlichen Mühleneinstellungen konnte eine für den neuartigen Einsatzzweck besonders geeignete Verteilung der Faserlängen identifiziert werden und wurde das Rohmaterial für die Vor-Ort-Versuche nach dieser Sieblinie produziert.

#### Fördertechnologie

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Weiterentwicklung der konventionellen, getakteten Zellradschleusen-Förderung, die eine ungleichmäßige Benetzung des Flockenstroms mit dem Bindemittel/Wasser-Gemisch zur Folge hat. Die im Rahmen des Projektes entwickelte völlig neuartige Fördermaschine arbeitet dagegen mit einer Schneckenförderung die das Material an einen Radialventilator übergibt, von dem es weiter homogenisiert und in den Förderschlauch geblasen wird. Obwohl sich die so erzielte Zelluloseförderung durch weitgehende Gleichmäßigkeit auszeichnet und gute Ergebnisse bei kurzen Schlauchlängen gezeigt hat, besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Homogenität bei großen Schlauchlängen oder Höhenunterschieden.

#### Aufspritztechnologie

In diesem Arbeitsschritt wurde versucht, den Wassergehalt der aufgespritzten Dämmschicht durch Entwicklung eines Schaumverfahrens zu reduzieren. Dabei wurde in einer speziellen Mischvorrichtung ein Bindemittelschaum erzeugt und in einer modifizierten Spritzbetondüse mit dem Zelluloseflockenstrom vermischt. Die so erzeugten, 10 bis 12 cm dicken Dämmschichten wiesen einen deutlich geringeren Wassergehalt als die mit Wasser gespritzten auf und konnten sogar mit der Traufel geglättet werden. Allerdings waren die erzielten Zugfestigkeiten normal zur Probenebene deutlich geringer als die der Bindemittel/Wasser-gebundenen Proben. Zur Dämmung etwa der Kellerdeckenunterseite sind die so hergestellten Dämmschichten jedoch hervorragend geeignet. In weiterer Folge wurden konventionelle CSO (Compact-Spray-On) – Spritzköpfe zu einem kombinierten Innen- und Außenbefeuchtungssystem weiterentwickelt mit dem gute Ergebnisse hinsichtlich der Gleichmäßigkeit der Befeuchtung erzielt wurden.

## **Putzentwicklung**

Das Ziel dieses Arbeitsschrittes war die Entwicklung eines möglichst leichten, diffusionsoffenen Spezial-Maschinenputzes der auf den neuartigen Zellulose-Putzgrund abzustimmen war. Dabei waren insbesondere die Einstellung des Wasserrückhaltevermögens und die Reduktion der Neigung zu Schwindrissen von Bedeutung. Vor allem die verbesserte Variante CP25 zeichnet sich durch einen geringen Wasserdampfdiffusionswiderstand und ein geringes Schwindmaß aus, zeigte bei der Vor-Ort-Anwendung gute Verarbeitungseigenschaften und konnte optimal auf die Zellulosedämmung abgestimmt werden.

## **Putzprüfung**

Von der Variante CP25 wurden im Labor der TU Dresden sämtliche für die hygrothermischen Simulationsberechnungen relevanten Materialkennwerte und –funktionen ermittelt. Die umfangreichen Untersuchungen haben eine sehr gute Eignung des entwickelten Putzes für das zu entwickelnde Gesamtsystem ergeben und die erfolgreiche Produktentwicklung bestätigt.

## **Vor-Ort-Versuchswand**

Dank der Unterstützung durch die Liegenschaftsverwaltung der Stadt Graz konnte ein etwa 200 Jahre altes denkmalgeschütztes Objekt in der Liebenauer Hauptstraße in Graz für die Vermessung des entwickelten Dämmsystems unter realen Klimabedingungen verwendet werden. Dazu wurde die Innenseite der westseitigen, 50 cm dicken und etwa 2,50 x 3,0 m großen Außenwand aus verputzten Vollziegeln mit dem neuartigen Innendämmsystem versehen. Die Versuchsräume wurden in der Heizperiode mittels Warmwasserradiatoren beheizt und in der zweiten Kondensationsperiode zusätzlich mittels eines automatischen Raumluftbefeuchtungsgerätes befeuchtet.

## **Vor-Ort-Messung**

Zur Validierung des hygrothermischen Simulationsmodells wurden Messungen der Temperatur und der Luftfeuchte über den gesamten Bauteilquerschnitt der gedämmten Wandregelfläche sowie an besonders interessanten Positionen in der gedämmten Außenwandkante, der Einbindung der Innenwand und der ungedämmten Wandfläche über zwei Kondensations- und zwei Verdunstungsperioden vorgenommen.

Die Bestimmung der Bauteilfeuchte erfolgte über die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit der im Bauteil bzw. im Bereich der Feuchtefühler eingeschlossenen Luft, d.h. durch die Messung der sog. Gleichgewichtsfeuchte. Insgesamt wurden 13 Stück kombinierte Feuchte/Temperatur-Fühler in der Wandkonstruktion, sowie je ein kombinierter Feuchte/Temperatur-Fühler für das Außen- und Innenraumklima eingesetzt; die besonders sensiblen Bereiche wurden zur Erzielung höherer Messsicherheit doppelt bestückt. Weiters wurden die Oberflächentemperaturen an der Außen- und Innenoberfläche sowohl der gedämmten als auch der nicht gedämmten Wand gemessen. Schließlich wurde die auf die Wand eingestrahlte Solarenergie, und der Wärmefluss sowohl durch die gedämmte als auch durch die ungedämmte Wand erfasst.

## Messergebnisse

Die Messdaten wurden kontinuierlich ausgewertet und flossen laufend in die Simulationsberechnungen ein. Als besonders erfreulich ist die Tatsache zu sehen, dass bei den kombinierten Temperatur/Feuchte-Sensoren infolge der Adaptierung speziell für diesen Zweck keine Beeinträchtigung durch den Aufspritzvorgang festzustellen war. Abgesehen von der ersten Kondensationsperiode, die mit der Austrocknungsphase des Dämmsystems zusammenfiel lieferten alle Sensoren plausible Werte und konnte festgestellt werden, dass die angefallenen Kondensatmengen in den Verdunstungsperioden wieder vollständig austrockneten, es also nicht zu dem gefürchteten „Aufschaukeln“ der Feuchtigkeitsgehalte über die Jahre kommt.

## Festigkeitswerte

Als dem wesentlichsten Festigkeitskriterium für Wärmedämmverbundsysteme wurden die Messungen der Zugfestigkeit normal zur Probenebene der Zelluloseschicht anhand von Probekörpern durchgeführt, die auf Hochlochziegel aufgespritzt worden waren. Die erzielten Werte liegen über den Anforderung an Mineralwollefassadendämmplatten gemäß ÖNORM B 6135 bzw. jenen an werksseitig hergestellte Zellulosedämmplatten (ÖTZ – Anforderungsprofil entsprechend OIB Richtlinie) von jeweils  $\geq 12,0$  kPa.

In einem zweiten Schritt wurde der Verbund des aufgespritzten Gesamtsystems anhand von Vor-Ort-Haftzugmessungen ermittelt. Dabei zeigte sich, dass die zur Zeit verfügbare Messtechnik nur bedingt für die besonderen Anforderungen eines, im Falle kleinformatiger Prüfkörper sehr sensibel auf Vorschädigungen durch die Probenvorbereitung reagierenden Materials geeignet ist. Bei nahezu allen erfolgreich durchgeführten Prüfungen erfolgte der Bruch innerhalb der Farbschichten, welche bewusst auf dem Bestandsputz belassen worden waren um ihre Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten zu ermitteln. Für die praktische Anwendung des Dämmsystems sind daher und zudem aus hygrischen Überlegungen Farb- und lose Putzschichten zu entfernen.

## Hygrothermische Simulationsberechnungen

Nach ersten Vorabsimulationsberechnungen mit Standardmaterial- und -Klimadatensätzen wurden die Berechnungen mittels des Softwarepakets DELPHIN 4.5 schrittweise mit den vor Ort gemessenen Daten und den aufwändig bestimmten Materialkennwerten und -funktionen aktualisiert. Neben Basiseigenschaften wie Trockenrohdichte, Porosität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität ist die Kenntnis der Feuchtespeicherung im hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich, der Feuchteleitfähigkeit, des Wasseraufnahmekoeffizienten und der Trocknungscharakteristik sowie des feuchteabhängigen Wasserdampfdiffusionswiderstandes unabdingbar für die korrekte simulationstechnische Abbildung der realen Vorgänge.

Die durchgeführten numerischen Simulationen stimmen mit den vor Ort gemessenen Werten gut überein. Die daraus abgeleiteten Feuchteprofile zeigen unter den real aufgetretenen Innen- und Außenklimawerten in ein- und zweidimensionalen Berechnungen einen maximalen Feuchtegehalt von etwas über 5 Vol.-%. Sowohl im Wand- als auch im Kantenbereich treten in der Kälteperiode Luftfeuchten von über 80% über einen längeren

Zeitraum auf. Die Temperaturen sind dabei jedoch relativ niedrig, sodass diese Luftfeuchtwerte nicht mit einer so hohen Schimmelgefahr verbunden sind, wie sie beim Erreichen der 80%-Grenze an raumseitigen Oberflächen mit entsprechender Exposition von Sporen besteht.

Das System aus Putz und aufgespritzter Zellulosedämmung kann somit vom hygrothermischen Standpunkt positiv beurteilt werden. Durch die hohe kapillare Leitfähigkeit der Zellulose kann auftretendes Kondensat kapillar entspannt werden. Mit Hilfe der gemessenen Materialfunktionen können die gewonnenen Erkenntnisse durch hygrothermische Simulationsberechnungen auf andere Konstruktionen und andere Klimata übertragen werden

## **12.2 Weiterer Forschungsbedarf**

### **12.2.1 Prüfverfahren**

Nicht zuletzt unter dem Gesichtspunkt des vermehrten Einsatzes nachwachsender Rohstoffe im Bauwesen erscheint die Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur einfachen Erfassung und Analyse insbesondere nicht unmittelbar sichtbarer, in der Baukonstruktion „versteckter“ Schimmelpilzkontaminationen unbedingt erforderlich. Der Vollständigkeit halber sei in diesem Zusammenhang erwähnt, dass je nach Substratgruppenzuordnung der Zellulosedämmung anorganische Baustoffe wie Mineralwolle sogar eine etwas höhere Schimmelpilzwahrscheinlichkeit aufweisen können [Krus, Sedlbauer, 2001].

### **12.2.2 Fensterlaibungen**

Fenster- und Tür laibungen stellen im Falle einer Innendämmung der Außenwandflächen eine besondere Herausforderung dar. Zum einen weil die Beschichtung relativ kleiner Flächen mit der zur Zeit verfügbaren Aufspritztechnologie schwierig ist, zum anderen weil der zur Verfügung stehende Raum Dämmstärken von 5 cm meist nicht zulässt. Um diese hinsichtlich Unterschreitung der Taupunkttemperatur allerdings besonders kritischen Bereiche dennoch wirkungsvoll zu dämmen, wird in vielen Fällen ein Material- oder Systemwechsel unumgänglich sein.

Neben 2 bis 3 cm dicken Calciumsilikat- oder Schaumglasplatten bieten sich in Zukunft möglicherweise Vakuumverbunddämmplatten an. Der vakuumversiegelte Kern dieser Platten bildet eine Dampfsperre – welche allerdings im Gegensatz zu Schaumglasplatten nicht fugenlos ist. Dagegen beruhen Calciumsilikatplatten auf demselben Prinzip der Pufferung und Weiterverteilung ev. anfallenden Kondensats durch Kapillaraktivität wie die Zellulosedämmung.

### **12.2.3 Bauteilanschlüsse**

Der Entwicklung geeigneter Anschlüsse insbesondere inhomogener und organischer Bauteile an innen gedämmte Außenwände wird im Zuge der Weiterentwicklung des gegenständlichen Dämmsystems besonderes Augenmerk zu schenken sein. So besteht beispielsweise bei der Einbindung von Holzbalkendecken die Gefahr von schädlicher Erhöhung der Luftfeuchtigkeit im Auflagerbereich und damit die Gefahr von Holzzerstörung.

### **12.2.4 Materialfestigkeiten**

Nach der Feststellung der grundsätzlichen hygrothermischen Eignung des neuen Dämmsystems besteht weiterer Forschungsbedarf neben der o.a. Langzeitstabilität insbesondere hinsichtlich der Schlag- und Dübelauszugsfestigkeit des Systems. Ein weiteres interessantes Forschungsgebiet stellt im Falle der Deckenmontage die Herstellung einer ebenflächigen, gleichmäßig dicken Dämmstoffschicht dar.

## **12.3 Schlussfolgerungen**

Aufgrund der erzielten Ergebnisse bestehen unter der Voraussetzung der Abdeckung des o.a. Forschungsbedarfes hervorragende Aussichten, das Ziel eines aufspritz- und verputzbaren ökologischen Innendämmsystems ohne Dampfsperre sowie der Vorabschätzung seiner Eignung für zukünftige Sanierungsaufgaben mittels hygrothermischer Simulationsberechnungen zu erreichen.



## 13 Literaturverzeichnis

1. Achtziger J., Praktische Untersuchungen der Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen mit Innendämmung, Proc. Innendämmung - Theorie und Praxis, Bremer Impulse: Bauen + Energie ; Fachseminar, 18. Mai 2000, Bremen 2000
2. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, ALMEMO-Handbuch, 2002
3. Allinger-Csollich W., et al., Papierrecycling / Wald – Darstellung möglicher Zusammenhänge, Umweltbundesamt Monographien, Bd. 131, Wien 2000
4. Amann, W., Förderungsmodell als Masseneffekt zur Erreichung der Kyoto-Ziele, Schriftenreihe der FGW Bd.147, Forschungsgesellschaft für Wohnen, Bauen und Planen, Wien 2002
5. Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Anforderungsprofil für Zelluloseplatten, Graz 2001
6. ASTM C 1338, Standard test method for determining fungi resistance of insulation materials and facings, 06/1996 (bzw. 05/2000)
7. Borsch-Laaks R., Bauphysik der Innendämmung, Proc. Forum Innendämmung Schloß Raesfeld, Energieagentur NRW, Wuppertal 1997
8. Borsch-Laaks R., Die „kleinen“ Innendämmungen, Proc. Innendämmung - Theorie und Praxis, Bremer Impulse: Bauen + Energie ; Fachseminar, 18. Mai 2000, Bremen 2000
9. Czedik-Eysenberg P. / Bundesministerium f. Umwelt, Jugend und Familie (Hrsg.), Chemie nachwachsender Rohstoffe, Proc., Wien 09./10.09.1997
10. Dehio Graz, Inst. für österr. Kunstforschung des Bundesdenkmalamtes (Hrsg.), Wien 1979
11. Dienes G.M., et al., Liebenau - Geschichte und Alltag, Verlag für Sammler, Graz 1992
12. DIN IEC 68 - Teil 2 – 10, Elektrotechnik – Grundlegende Umweltprüfverfahren, 04/1991
13. EN ISO 12572, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, 09/2001
14. EN ISO 15148, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, 03/2002
15. EOTA - European Organisation for Technical Approvals, ETAG Nr. 004 - Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht, Brüssel, 03.2000
16. EURIMA – European Insulation Manufacturers Association, Die maßgebliche Bedeutung der Gebäudedämmung für die Umwelt, Brüssel 2001
17. Fechner, Häupl, Martin, Neue, Petzold, Thermische Sanierung von Fachwerkbauten mittels Innendämmung. Dresdner Bauklimatische Hefte. Heft 5. Eigenverlag TU Dresden 1998
18. Fechner, J. (Hrsg.), Altbaumodernisierung - Der praktische Leitfaden, Springer, Wien 2002
19. Geißler A., Blower Door und Thermographie – Möglichkeiten und Fallstricke, Proc. 10. EUZ – Baufachtagung – Energetische Gebäudemodernisierung Hannover 18./19. 10. 2001, Energie und Umweltzentrum am Deister, Springer 2001
20. Großmann H. (Hrsg.), Grundlagen der Altpapieraufbereitungstechnik, PTS Verlag, München 1993
21. Grün L., Schimmelpilzbefall in Gebäuden – Innenraumhygienische und arbeitsschutzrechtliche Aspekte, Proc. 10. EUZ – Baufachtagung – Energetische Gebäudemodernisierung Hannover 18./19. 10. 2001, Energie und Umweltzentrum am Deister, Springer 2001
22. Grunewald J., Diffuser und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen, Diss. TU Dresden, 1997
23. Grunewald, Bomberg, An engineering approximation of material characteristics for input to Heat, Air and Moisture simulations. In: Tagungsband zum 11. Bauklimatischen Symposium Dresden 2002. Eigenverlag TU Dresden 2002

24. Häupl P., et al., Hygrisch motivierter Wärmeschutz – Thermische Sanierung eines Gründerzeithauses mit einer kapillaraktive Calciumsilikatinnendämmung, Dresden 1999
25. Häupl, Fechner, Petzold, Jurk, Sanierung historischer Gebäude mit Calciumsilikatinnendämmung. In: Tagungsband zum 11. Bauklimatischen Symposium Dresden 2002. Eigenverlag TU Dresden
26. Herlyn J.W., Verbesserung des Wärmeschutzes von Fachwerkwänden mit Innendämmungen, Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Braunschweig 1995
27. ISO 11274, Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren, 01/2001
28. ISO 12571, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften, 04/2000
29. ISO 17312, Soil quality - Determination of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a rigid-wall permeameter, 03/2005
30. ISO 17313, Soil quality - Determination of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter, 07/2004
31. Kehrer M., et al., Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte an Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, IBP-Bericht HTB-12/2001
32. Kießl K.; Wärmeschutzmaßnahmen durch Innendämmung – Beurteilung und Anwendungsgrenzen aus feuchtetechnischer Sicht, Proc. Innendämmung - Theorie und Praxis, Bremer Impulse: Bauen + Energie ; Fachseminar, 18. Mai 2000, Bremen 2000
33. Krus M., Sedlbauer K., Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen hygrothermisch unter die Lupe genommen, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Valley/Oberlindern, 2001
34. Kubinsky K.A., Wentner A.M., Grazer Straßennamen, Leykam Verlag, Graz 1996
35. Lamers R., Erfahrungen aus der Bauschadensforschung, Proc. Forum Innendämmung Schloss Raesfeld, Energieagentur NRW, Wuppertal 1997
36. Maage, M., Frostbeständigkeit und Porengrößenverteilung in Ziegeln, Ziegelindustrie International, 9/1990
37. Mandl M., Kautsch, P., Hengsberger H., et al., Grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulosedämmschichten mit Putzaufgabe für Außenfassaden, Endbericht Haus der Zukunft, 2001
38. Mücke W., Lemmen CH., Schimmelpilze, 3. Auflage, ecomed, Landsberg/Lech 2004
39. Oswald, R., Nachträglicher Wärmeschutz für Bauteile und Gebäude, Bau-Verlag, 1995
40. ÖNORM B 6135 „Außenwand-Wärmedämmverbundsysteme aus Mineralwolle-Dämmplatten MW-PT und Deckschichte“, 10/1998
41. Österreichische Technische Zulassung – Anforderungsprofil für Zellulosefaserplatten entsprechend der OIB-Richtlinie „Brennbare Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz“, 02/2000
42. Pitt, J. I., Samson, R., Integration of Modern Taxonomic Methods for Penicillium and Aspergillus Classification, CRC Press, 2000
43. Plagge, Cerny, Matiasovsky, Laboratory measurements. In: Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation, EU-Projekt, TU Dresden 2003
44. prEN 15101-1, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – An der Anwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus Zellulosefasern (LFCI) – Teil 1: Spezifikationen für die Produkte vor dem Einbau, Entwurf, 01-05-2005
45. prEN 15101-2, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – An der Anwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus losem Zellulosefüllstoff – Teil 2: Spezifikationen für die eingebauten Produkte, Entwurf, 01-05-2005
46. Prior D., Das Mensch-Haus-Umwelt Gebäude, Proc. World Sustainable Energy Day, Wels 2003
47. Salthammer T., Organic Indoor Air Pollutants, WILEY-VCH, Weinheim 1999

48. Schuster G., Szeider G., Wölfl M.: Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden, Zentrum für Bauen und Umwelt, Donau-Universität Krems, 1999
49. Sedlbauer K., Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Diss. Universität Stuttgart, 2001
50. Simons P., Fachwerksanierung mit 12 cm Innendämmung – vierjährige Messung zum feuchtetechnischen Verhalten, Proc. Innendämmung - Theorie und Praxis, Bremer Impulse: Bauen + Energie ; Fachseminar, 18. Mai 2000, Bremen 2000
51. Umweltbundesamt – Innenraumlufthygiene-Kommission, Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen, Berlin 2002
52. Venzmer, H. (Hrsg.), Altbauinstandsetzung - Fortschritte bei Verfahren und Produkten, Altbau-Symposium, 2000, Berlin, Verl. Bauwesen , 2000
53. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Proc. Temperatur 2003, Berlin 8./9. Sept. 2003, VDI Berichte 1784, VDI Verlag Düsseldorf 2003
54. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), Umgang mit Fasermaterialien, Kolloquium Berlin 1./2. Okt.2003, VDI Berichte 1776, VDI Verlag Düsseldorf 2003
55. Walther W., Innendämmung – 6 Weisheiten und 3 Erkenntnisse, Proc. 10. EUZ – Baufachtagung – Energetische Gebäudemodernisierung Hannover 18./19. 10. 2001, Energie und Umweltzentrum am Deister, Springer 2001
56. Walther W., Innendämmung ohne Dampfbremse, Energie- und Umweltzentrum am Deister, 1997
57. Wernecke R., Industrielle Feuchtemessung, WILEY-VCH, Weinheim, 2003



## 14 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Mühle in der Produktionsanlage für Zellulosedämmstoff .....	21
Abb. 2	Siebsatz .....	22
Abb. 3	Ideale Gewichtsverteilung der einzelnen Faserlängen .....	22
Abb. 4	Untere sowie obere Grenzsieblinien .....	23
Abb. 5	Wärmeleitzahlen der CPH Einblaszellulose .....	23
Abb. 6	Einblasmaschine mit Zellradschleuse .....	25
Abb. 7	Einblasmaschine mit Zellradschleuse zur Befüllung von Holzfertigteilen .....	25
Abb. 8	Vorversuch der Fördermaschine mit Saugventilator .....	26
Abb. 9	Seitenansicht der Fördermaschine .....	27
Abb. 10	Zentrale Förderschnecke mit Saugventilator .....	27
Abb. 11	Fördermaschine mit kontinuierlicher Förderung .....	27
Abb. 12	Die neue Fördermaschine im Einsatz .....	28
Abb. 13	Schaumerzeugungseinheit und umgebaute Spritzbetondüse .....	29
Abb. 14	„Klassische“ CSO - Düse .....	30
Abb. 15	Neuentwickelter Spritzkopf mit kombinierter Innen- und Außenbefeuchtung .....	30
Abb. 16	Musterwand – fast ohne „Marmor-Effekt“ .....	31
Abb. 17	Probekörperherstellung .....	31
Abb. 18	Unbeschichtete Dämmstoffplatten .....	35
Abb. 19	Aufspritzen des Putzmörtels .....	35
Abb. 20	Abziehen des Putzmörtels .....	35
Abb. 21	Verreiben der Oberfläche .....	35
Abb. 22	Putzmaschine PFT G4 .....	37
Abb. 23	Probekörperherstellung für die Ermittlung der Festigkeitswerte .....	38
Abb. 24	Lageplan des Versuchshauses .....	41
Abb. 25	Süd-Ost- und Hofansicht des Versuchshauses mit skizzierten Versuchsräumen .....	42
Abb. 26	Grundriss und Schnitt durch das Versuchsobjekt .....	43
Abb. 27	Der neu entwickelte Spritzkopf im Einsatz an der Versuchswand .....	45
Abb. 28	Fertige Zellulose-Innendämmung mit Abzugsleisten .....	45
Abb. 29	Messaufbau im Versuchsraum mit gedämmtem und ungedämmtem Teil .....	47
Abb. 30	Höhenlage der Messfühler .....	48
Abb. 31	Kombinierte Temperatur-/Feuchtefühler .....	49
Abb. 32	Eingebaute Temperatur-/Feuchtefühler vor dem Aufspritzen der Zellulosedämmung .....	49
Abb. 33	Relative Feuchtigkeit an den wichtigsten Messpositionen in der Messperiode 1 .....	53
Abb. 34	Temperaturen an den wichtigsten Messpositionen in der Messperiode 1 .....	54
Abb. 35	Relative Feuchtigkeit an den wichtigsten Messpositionen in der Messperiode 2 .....	55
Abb. 36	Temperaturen an den wichtigsten Messpositionen in der Messperiode 2 .....	56
Abb. 37	Probekörpervorbereitung .....	58
Abb. 38	Einspannvorrichtung und Kardangelenk zur zentrischen Lasteinleitung .....	58
Abb. 39	Versagen der Probekörper im Material .....	58

Abb. 40	Auswertung der Ergebnisse der Serie 2 .....	59
Abb. 41	Prüfkörper mit Alu-Platte und lastverteilendem Rahmen der Prüfmachine .....	61
Abb. 42	Haftzugmessung mit der Freundl F20D Easy2000 .....	61
Abb. 43	Bruch innerhalb der Farbschichten .....	62
Abb. 44	Aufbau des numerischen Simulationsprogrammes DELPHIN 4.....	64
Abb. 45	Beispielhafte Darstellung einer Feuchtespeicherfunktion.....	65
Abb. 46	Materialdialog mit Kapillarwasserleitfähigkeit der Zellulose.....	66
Abb. 47	Messapparatur zur Bestimmung der Wasserretention im überhygroskopischen Bereich.....	69
Abb. 48	Messapparatur zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten .....	70
Abb. 49	Temperatur und Luftfeuchte in der Ebene Dämmung-Bestandsputz bei hoher Leitfähigkeit des Dämmmaterials.....	73
Abb. 50	Luftfeuchteprofil in der Konstruktion am Tag mit der maximalen relativen Luftfeuchte hinter der Dämmung (79%) bei hoher Leitfähigkeit des Dämmmaterials .....	74
Abb. 51	Temperatur und Luftfeuchte in der Ebene Dämmung-Bestandsputz bei niedriger Leitfähigkeit des Dämmmaterials für zwei Jahre .....	74
Abb. 52	Feuchteprofil in der Konstruktion am Tag mit der maximalen relativen Luftfeuchte hinter der Dämmung (95%) bei niedriger Leitfähigkeit des Dämmmaterials .....	75
Abb. 53	Temperatur in der Ebene Dämmung-Bestandsputz – Vergleich Messung / Rechnung.....	76
Abb. 54	Luftfeuchte in der Ebene Dämmung-Bestandsputz – Vergleich Messung / Rechnung.....	76
Abb. 55	Temperatur in der Mitte der Dämmung – Vergleich Messung / Rechnung .....	77
Abb. 56	Luftfeuchte in der Mitte der Dämmung – Vergleich Messung / Rechnung .....	77
Abb. 57	Temperatur auf der Außenseite der Dämmung in der Außenwandkante – Vergleich Messung / Berechnung (2D) .....	78
Abb. 58	Luftfeuchte auf der Außenseite der Dämmung in der Außenwandkante – Vergleich Messung / Berechnung (2D) .....	79
Abb. 59	Überhygroskopischer Wassergehalt (kg/m <sup>2</sup> ) in der Konstruktion (1D) .....	80
Abb. 60	Zeitlicher Verlauf des Feuchteprofils in der Konstruktion (1D) .....	80
Abb. 61	Wassergehaltsfeld in der Konstruktion am 21.03.2005 .....	81
Abb. 62	Entwicklung der Kondensatmenge bei Berechnung mit 60 Tagen Konstantklima .....	81
Abb. 63	Wassergehaltsprofil am Tag 789 (28.02.2005) ohne Farbschicht.....	82
Abb. 64	Wassergehaltsprofil am Tag 789 (28.02.2005) mit Farbschicht .....	82
Abb. 65	Integrale Wassermasse in der Konstruktion .....	83

# Anhang

## Materialfunktionen des Kalk/Zement-Leichtputzes CLP 25

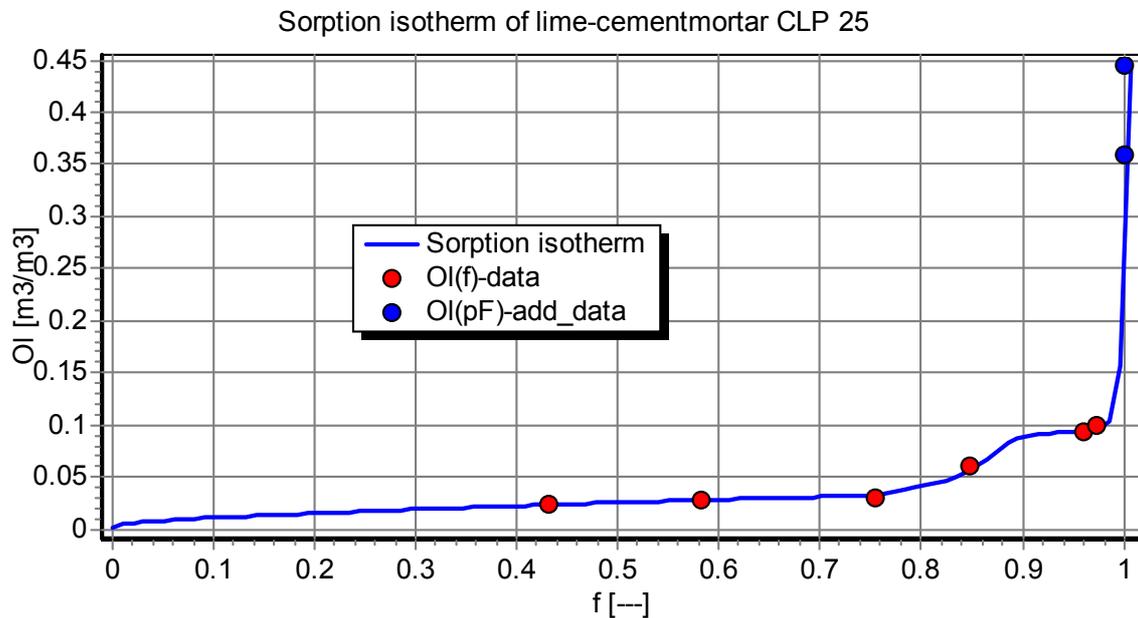


Abb. A-1 Hygrische Sorptionsisotherme des Kalk/Zement-Leichtputzes „CLP 25“ der Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke.

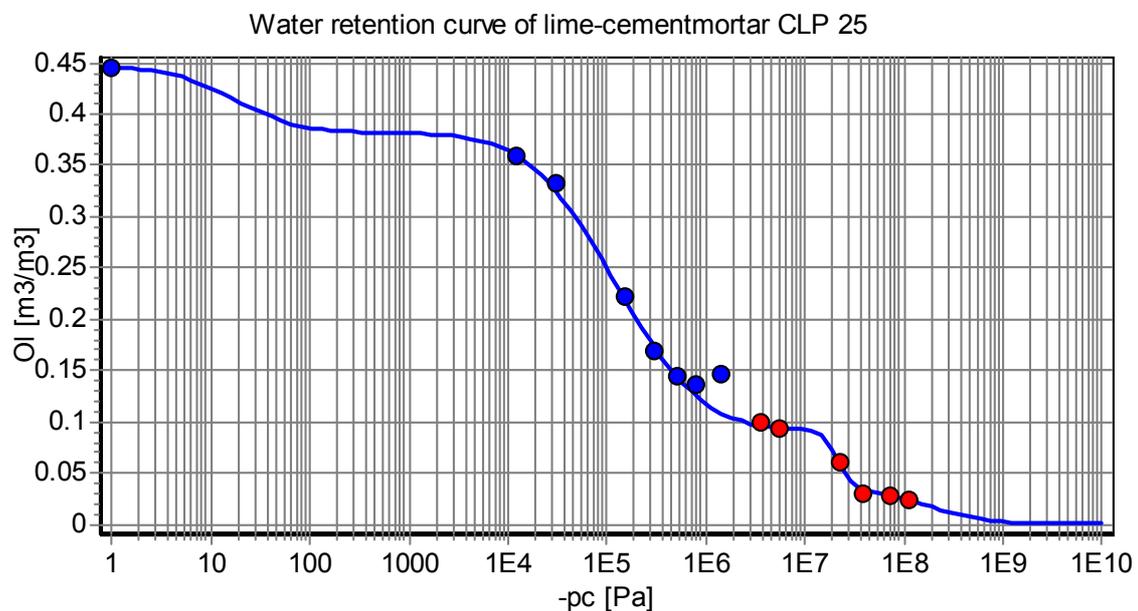


Abb. A-2 Wasserspeicherfunktion des Kalk/Zement-Leichtputzes „CLP 25“ der Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke im hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich.

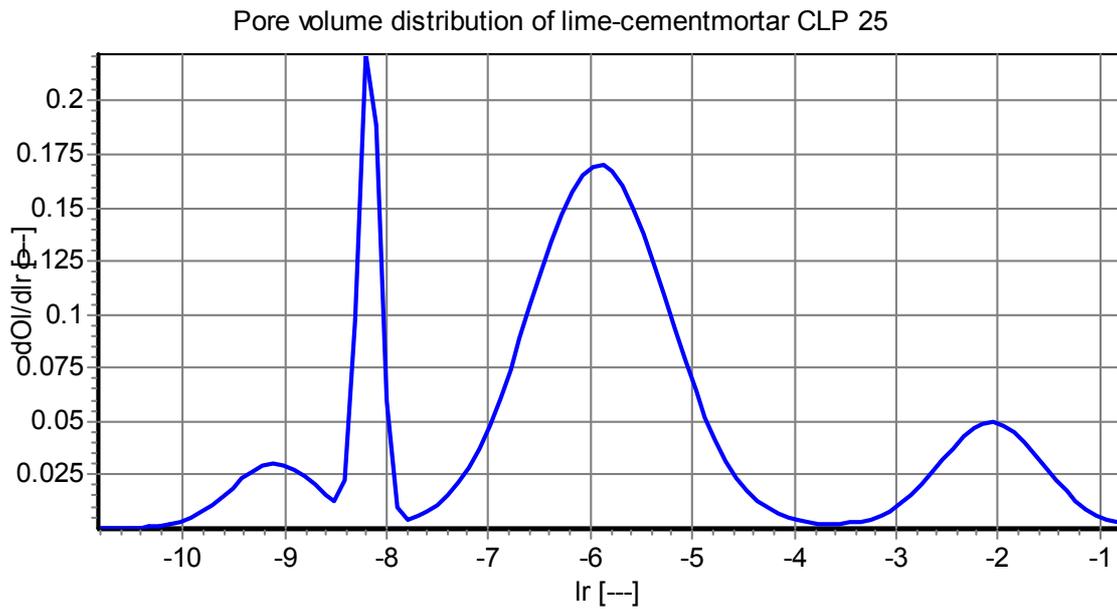


Abb. A-3 Porenvolumenverteilungsfunktion des Kalk/Zement-Leichtputzes „CLP 25“ der Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke.

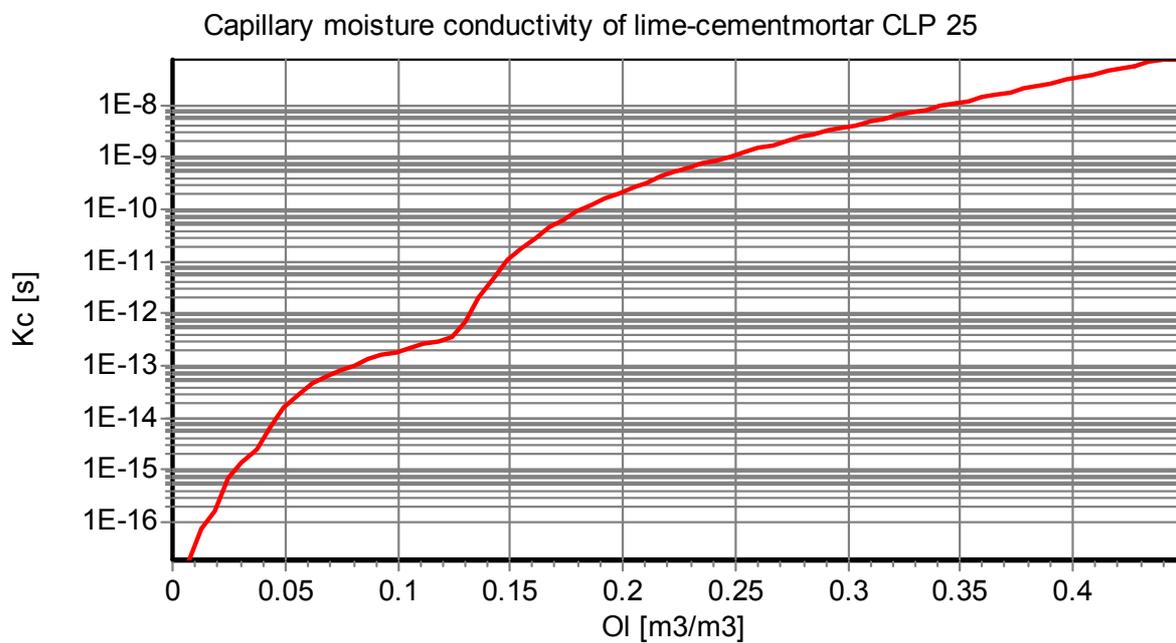


Abb. A-4 Kapillare Flüssigwasserleitfähigkeitsfunktion des Kalk/Zement-Leichtputzes „CLP 25“ der Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke.

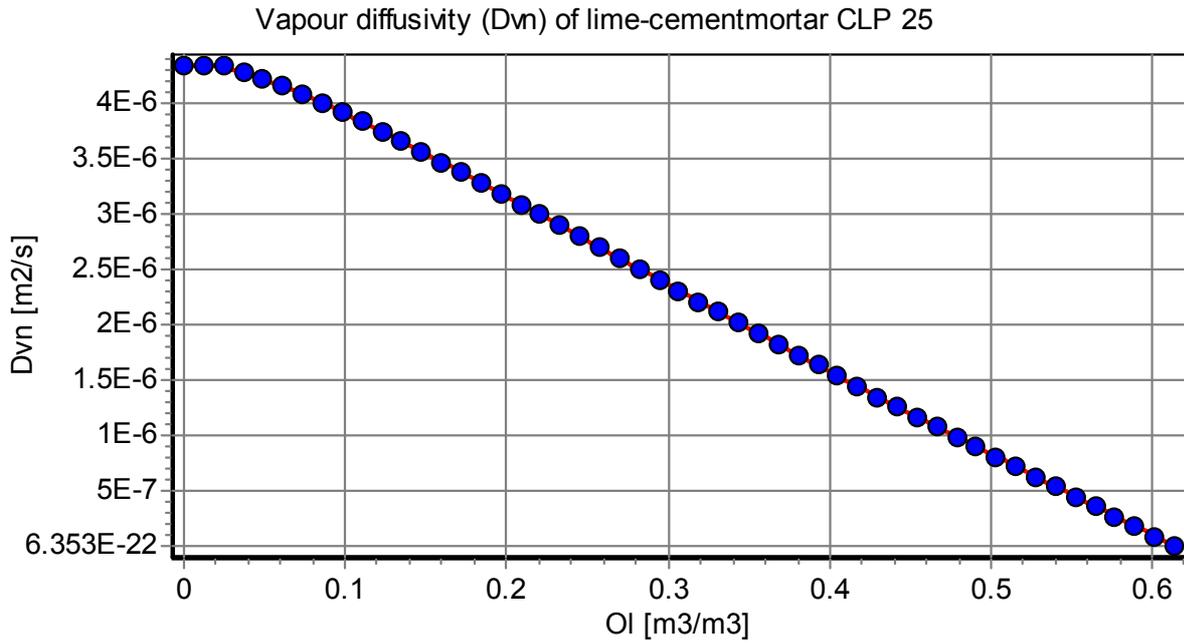


Abb. A-5 Wasserdampfdiffusivitätsfunktion des Kalk/Zement-Leichtputzes „CLP 25“ der Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke.

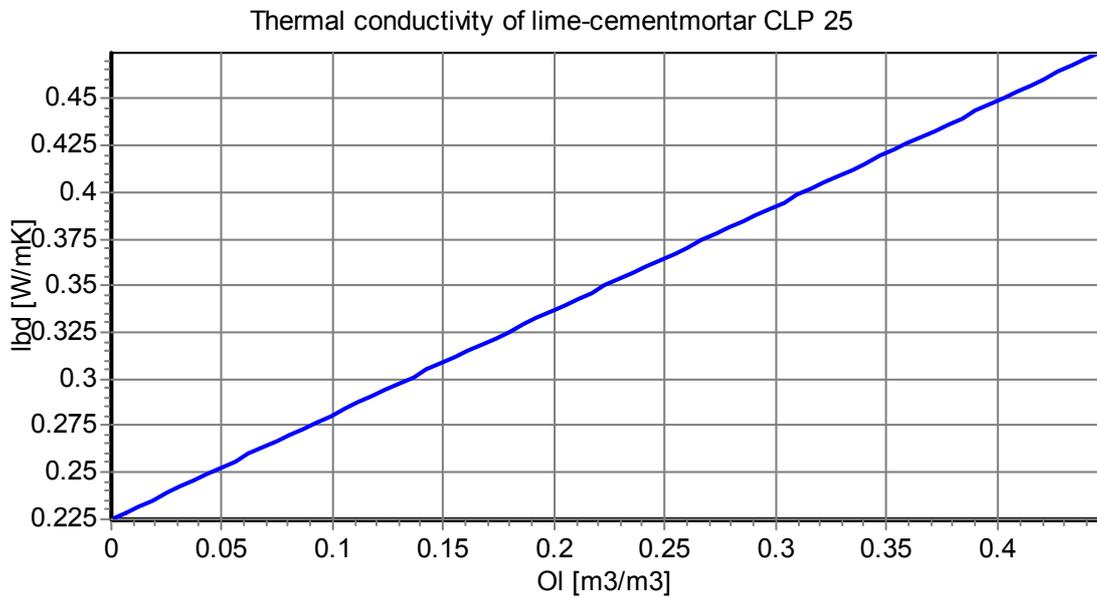


Abb. A-6 Wärmeleitfähigkeitsfunktion des Kalk/Zement-Leichtputzes „CLP 25“ der Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke.

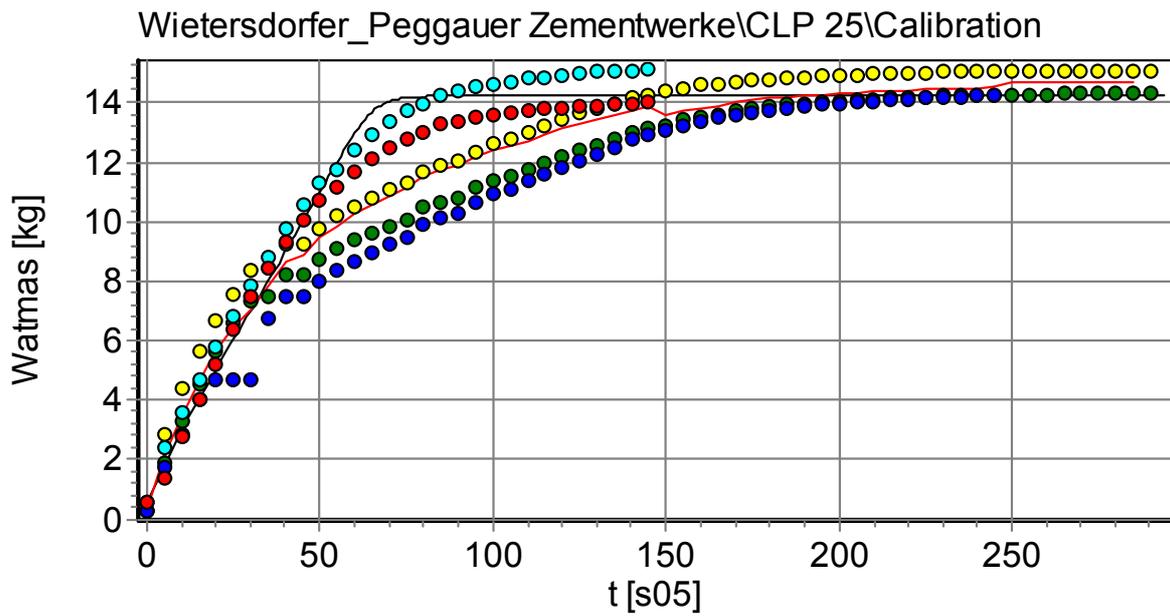


Abb. A-7 Verifizierung der Materialfunktionen anhand von 5 Aufsaugexperimenten für den Kalk/Zement-Leichtputz „CLP 25“ der Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke.

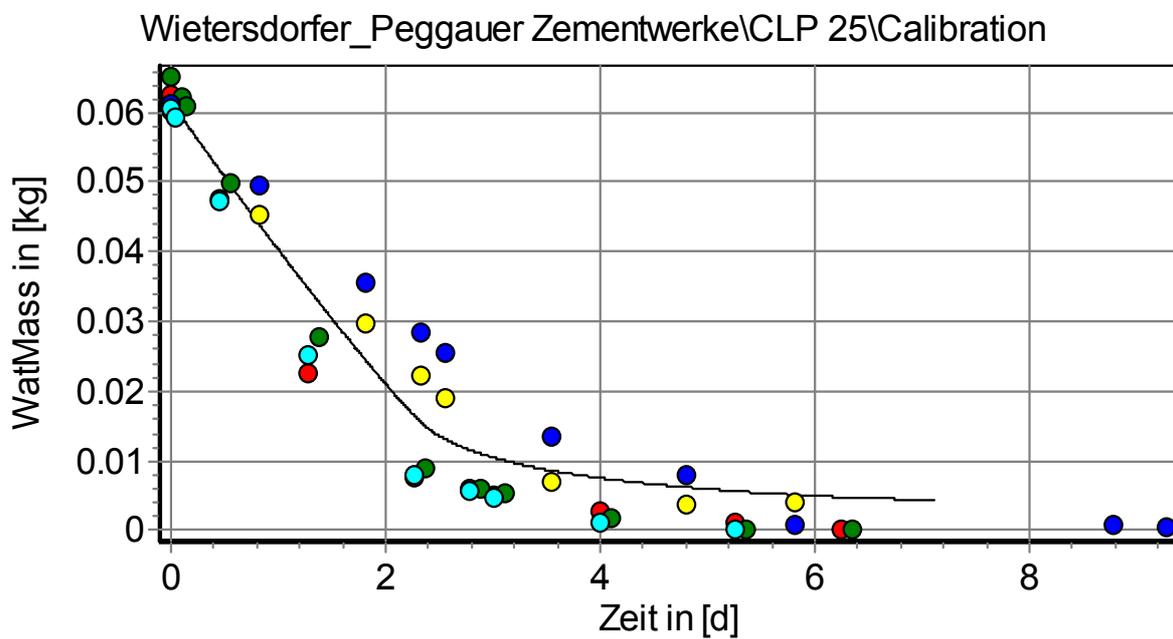


Abb. A-8 Verifizierung der Materialfunktionen anhand von 5 Verdunstungsexperimenten für den Kalk/Zement-Leichtputz „CLP 25“ der Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke.

## Materialfunktionen der Zellulose-Innendämmung

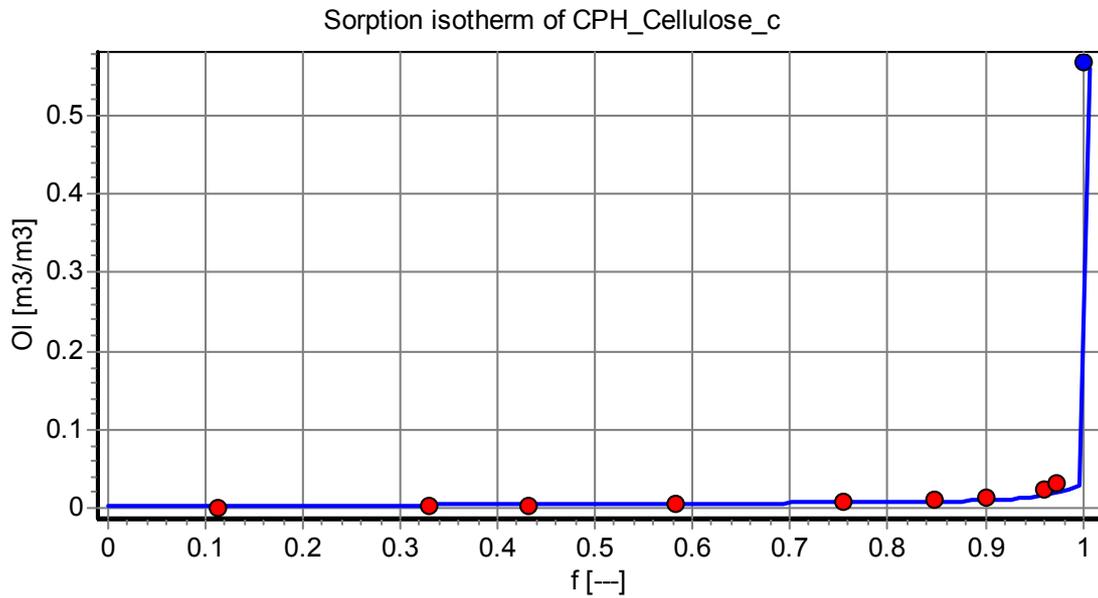


Abb. A-9 Hygrische Sorptionsisotherme der Zellulose-Innendämmung „CPH“ der Zellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH.

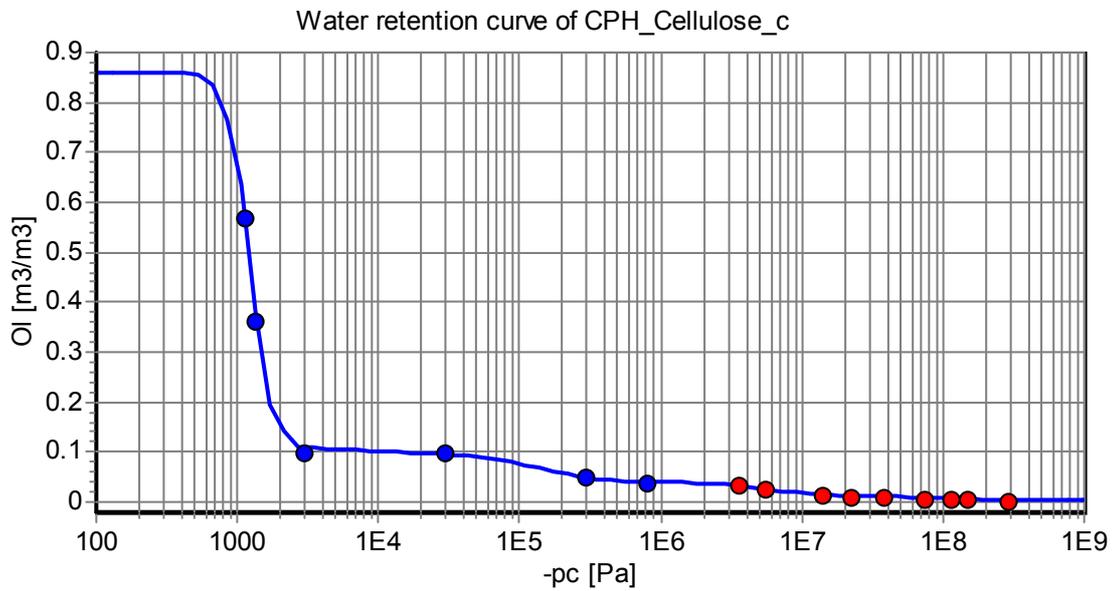


Abb. A-10 Wasserspeicherfunktion der Zellulose-Innendämmung „CPH“ der Zellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH im hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich.

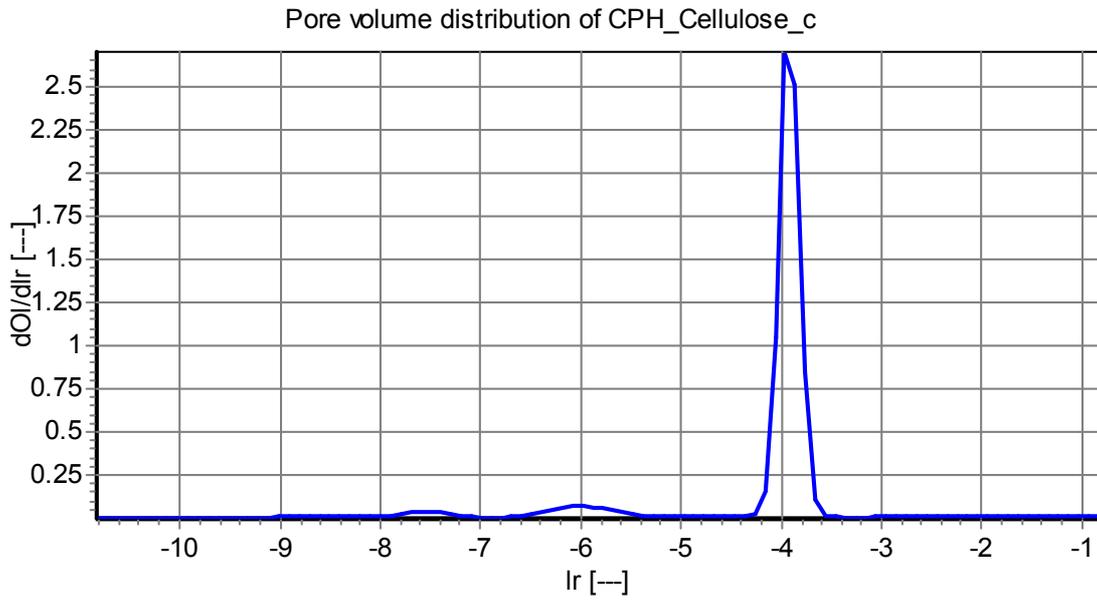


Abb. A-11 Porenvolumenverteilungsfunktion der Zellulose-Innendämmung „CPH“ der Zellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH.

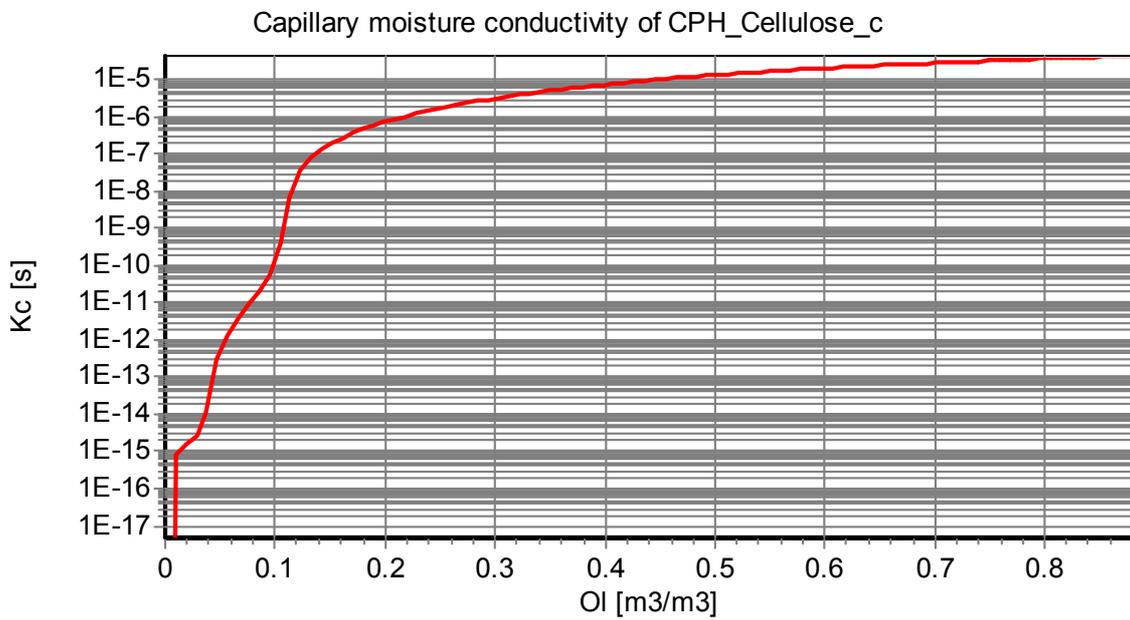


Abb. A-12 Kapillare Flüssigwasserleitfähigkeitsfunktion der Zellulose-Innendämmung „CPH“ der Zellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH.

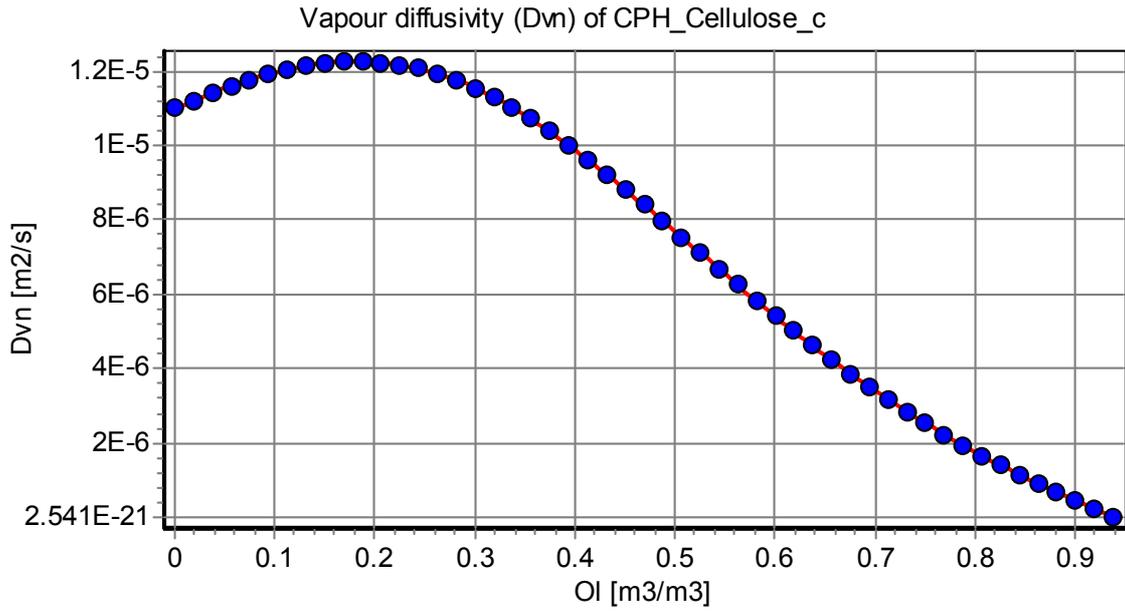


Abb. A-13 Wasserdampfdiffusivitätsfunktion von Zellulose-Innendämmung „CPH“ der Zellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH.

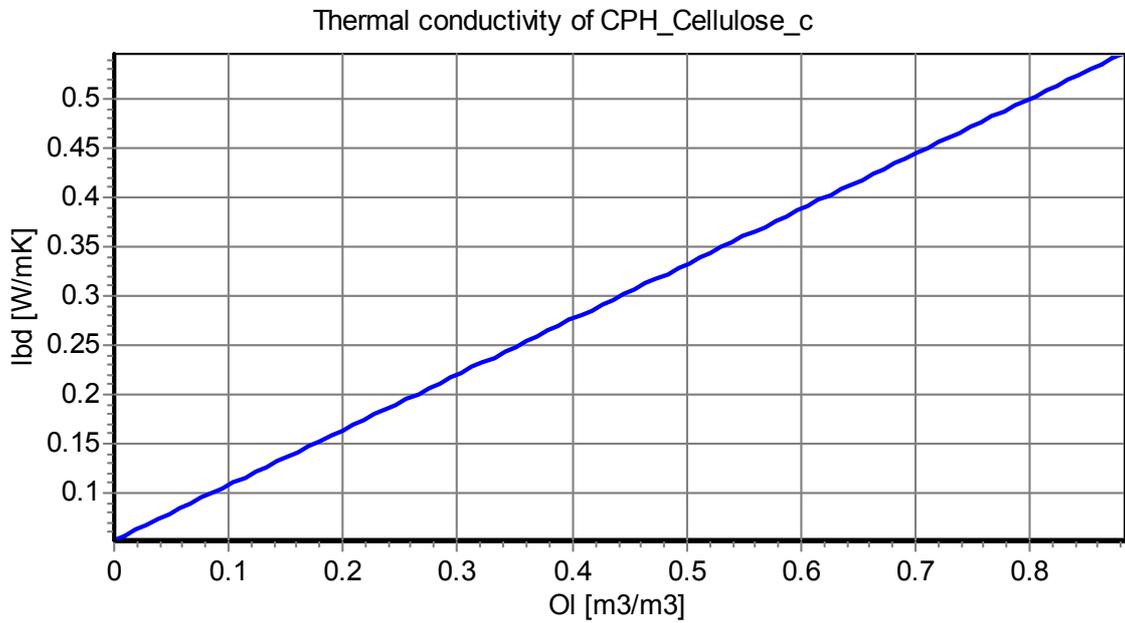


Abb. A-14 Wärmeleitfähigkeitsfunktion von Zellulose-Innendämmung „CPH“ der Zellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH.

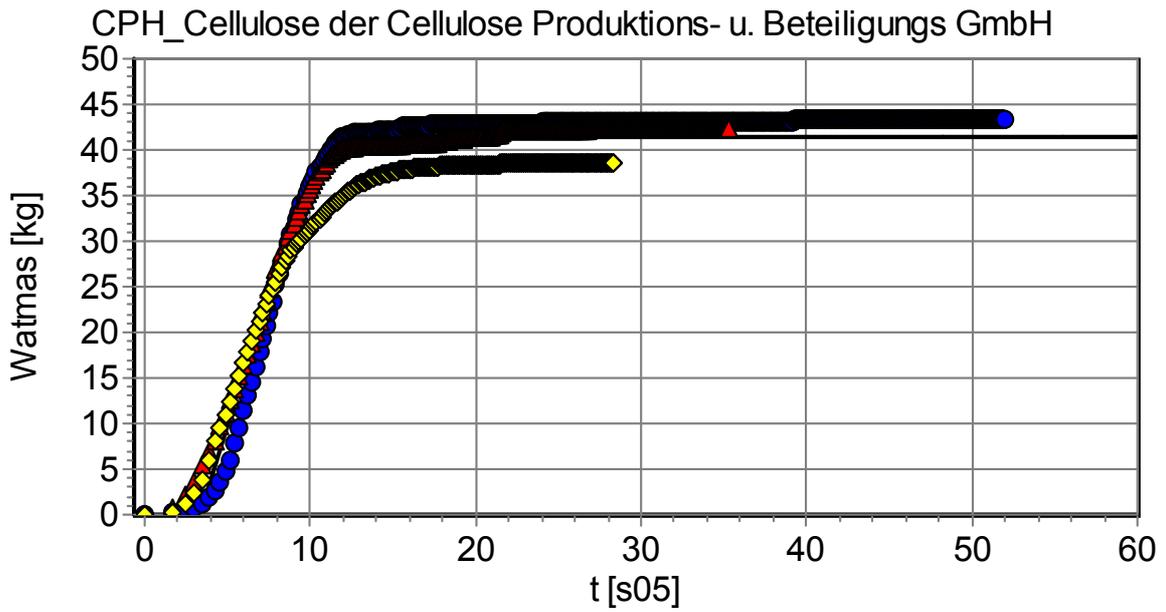


Abb. A-15 Verifizierung der Materialfunktionen anhand von 3 Aufsaugexperimenten für die Zellulose-Innendämmung „CPH“ der Zellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH.

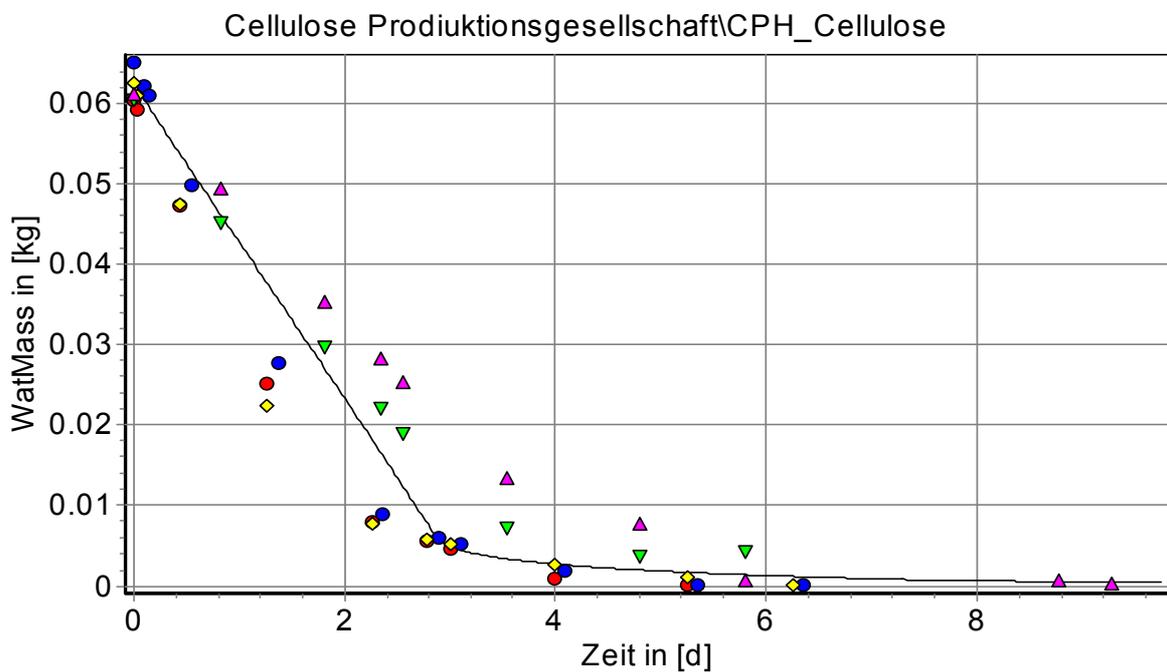


Abb. A-16 Verifizierung der Materialfunktionen anhand von 5 Verdunstungsexperimenten für die Zellulose-Innendämmung „CPH“ der Zellulose Produktions- u. Beteiligungs GmbH.

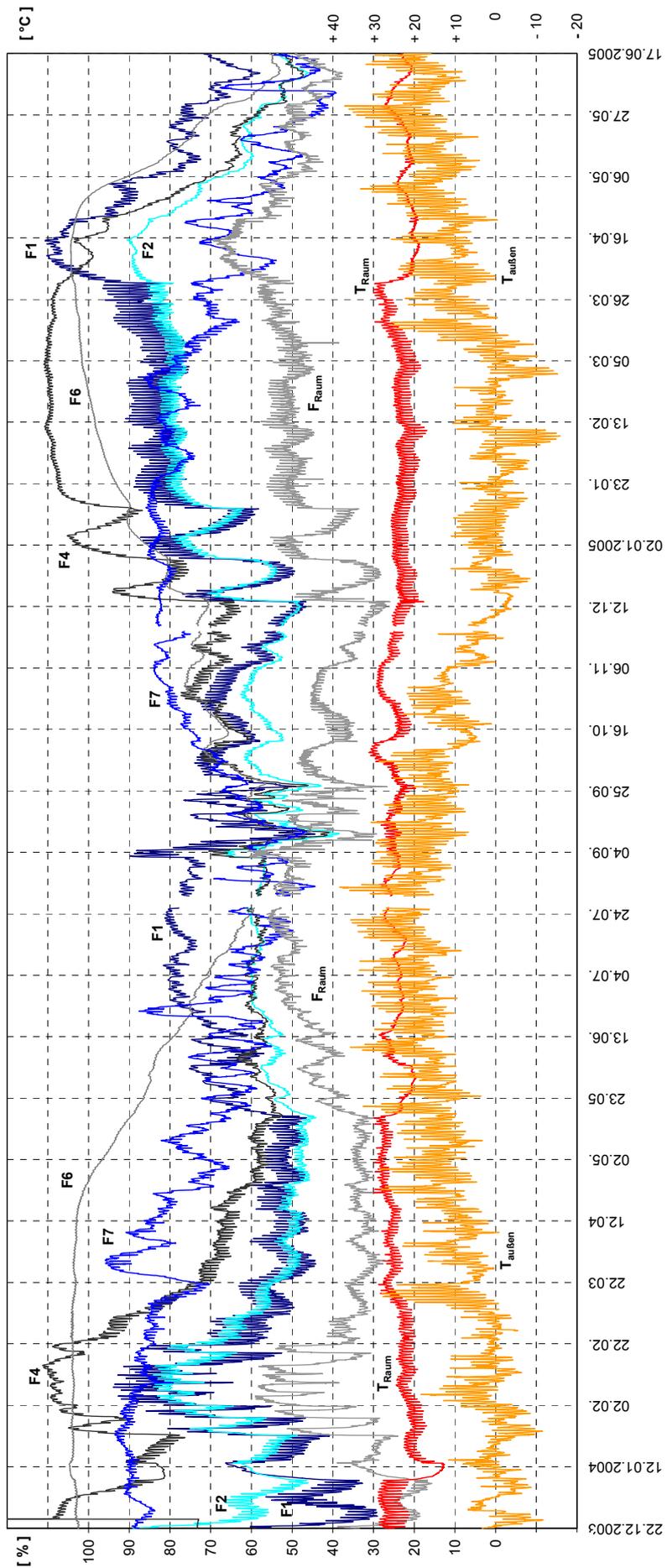


Abb. A-17 Relative Luftfeuchtigkeiten im Wandquerschnitt in Wandmitte über den gesamten Messzeitraum vom 22.12.2003 bis 17.06.2005 sowie Innenraum- und Außentemperaturen ( $T_{\text{Raum}}$  bzw.  $T_{\text{außen}}$ ). Die Positionen der einzelnen Sensoren sind in Abb. 29 / 30 (Seite 47 / 48) dargestellt, die Messwerte > 100% gerätebedingt (siehe auch Kap. 7.2.1).

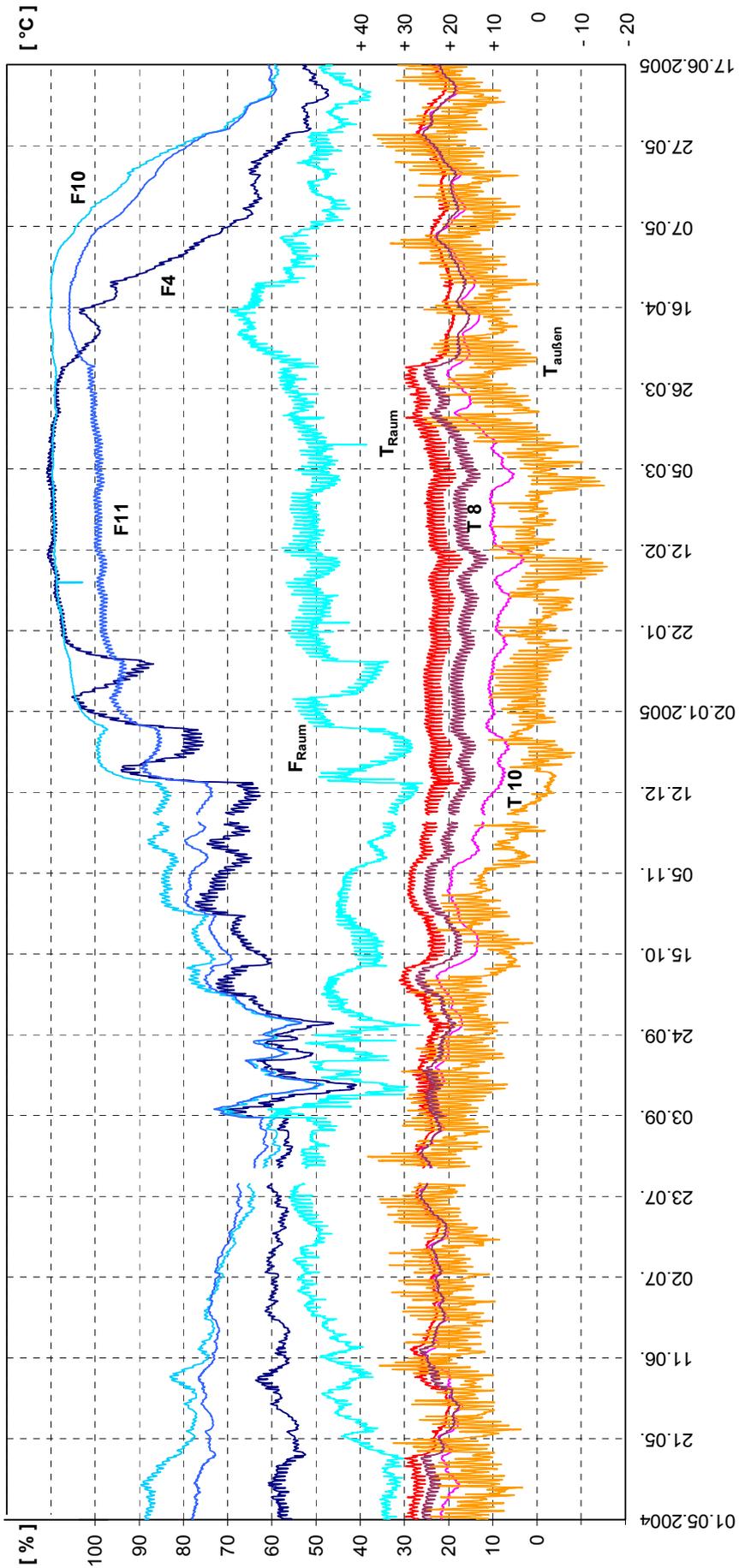


Abb. A-18 Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeiten an der Grenzschicht Bestandsputz / Dämmung in Wandmitte (F4) zu Wandaußenkante (F10). Weiters in der Mitte der Dämmschicht in der Wandaußenkante (F11) sowie Innenraumluffteuchte (F\_Raum). Ergänzend dargestellt sind die Innenraum- und Außentemperaturen (T\_Raum bzw. T\_aussen).

**Antragsteller:****Ing. Wolfgang Lackner**

Zellulosedämmstoffproduktion -  
CPH-Beteiligungs GmbH & Co KG  
A-8230 Hartberg, Ökopark 6  
Tel: +43-(0)3332 – 66680; Fax: / 66681  
Email: info@cph.at / www.cph.at

**Projektleiter:****Ao.Univ.-Prof. DI DDr. Peter Kautsch**

Technische Universität Graz - Institut für Hochbau  
A-8010 Graz, Rechbauerstraße 12  
Tel: +43-(0)316 – 873 / 6245; Fax: / 6083  
Email: kautsch@tugraz.at / www.TUgraz.at

**Koordination:****Dipl.-Ing. Herwig Hengsberger**

Tel.: +43-(0)316 –873 / 6807; Fax: / 4999  
Email: hengsberger@tugraz.at

**Projektpartner:****Johann Engl**

Schlosserei und Maschinenbau  
A-5202 Neumarkt/Wallersee, Pongau 3  
Tel: +43-(0)6216 – 7329; Fax: / 7329-4  
Email: engl-schlosserei@eunet.at

**Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Häupl**

Technische Universität Dresden - Institut für Bauklimatik  
D-01069 Dresden, Mommsenstraße 13  
Tel: +49-(0)351 - 4633 / 5259; Fax: / 2627  
Email: haeupl@ibk.arch.tu-dresden.de  
www.tu-dresden.de/aribk

**Dipl.-Ing. Robert Schmied**

Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke AG  
A-8120 Peggau, Alois-Kern-Strße 1  
Tel: +43-(0)3127 – 201 / 2290; Fax: / 2289  
Email: r.schmied@wup.baumit.com / www.baumit.com

**Dipl.-Ing. Friedrich Skofitsch**

Technische Universität Graz  
Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie  
A-8010 Graz, Stremayrgasse10/1  
Tel: +43-(0)316 – 873 / 7160; Fax: / 7650  
Email: office@tvfa.tugraz.at / www.tvfa.tugraz.at

**Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Wolfgang Streicher**

Technische Universität Graz - Institut für Wärmetechnik  
A-8010 Graz, Inffeldgasse 25/B  
Tel: +43-(0)316 - 873 / 7306; Fax: / 7305  
Email: w.streicher@tugraz.at / www.iwt.tugraz.at

**Mit freundlicher Unterstützung von****CHT R. Beitlich GmbH, Meiningen****Eisbär - Entfeuchtung u. Klima GmbH, A-8010 Graz****Liegenschaftsverwaltung der Stadt Graz****Messtechnik Schaller GmbH, A-8200 Gleisdorf****Slanina + Partner, Elektrotechnik GmbH, A-8010 Graz**