

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.



N WIEN

Diplomarbeit

Bestimmung ausgewählter Eigenschaften eines diffusionsoffenen Putzes sowie Evaluierung seiner Performance

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic (E 206/2, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

Christian Bachmann

Matr.Nr. 9326911 / E600

Hadikgasse 72/1/4

1140 Wien

Wien, im September 2015

Christian Bachmann



Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei Frau Professor Dipl.-Ing. Dr. techn. Azra Korjenic bedanken, dafür dass sie mir diese Diplomarbeit ermöglicht und mich stets gut gelaunt mit Rat und Tat in dieser Zeit begleitet hat.

Ebenso möchte ich mich für die Unterstützung der Assistenten und Mitarbeiter des Institutes bedanken, insbesondere bei Mag.rer.nat. David Tudiwer, Dipl.Ing. Manfred Grüner und Ing. Harald Hofbauer, ohne die diese Diplomarbeit kaum möglich gewesen wäre.

Kurzfassung

Ökologisches Bauen ist eine der der großen Herausforderungen unserer Zeit.

Als Hauptursache des Klimawandels wird der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre gesehen. Rund 42% des gesamten Energieverbrauchs sowie rund 35% der Treibgasemissionen der EU werden durch Gebäude verursacht.

Einerseits durch den Betrieb dieser Gebäude, andererseits jedoch auch durch deren Errichtung und die Herstellung der Baustoffe.

Dass aus diesen Gründen versucht wird, die Wärmeverluste eines Gebäudes zu minimieren, liegt auf der Hand, zumal das auch aus ökonomischen Gründen im Interesse der Errichter bzw. Betreiber liegt.

Zudem ist auch die Verwendung leistungsfähiger, ökologischer Baustoffe, die auch ökonomisch für den Bauherrn vertretbar sind, ein wesentlicher Aspekt für die Entwicklung moderner Baustoffe und Systeme.

Bisher wurden in Ermangelung geeigneter Alternativen hauptsächlich Dämmstoffe auf Mineralölbasis (EPS, XPS, PUR) oder mineralische Dämmsysteme mit entsprechend hohem Energieeinsatz bei deren Herstellung verwendet. Dämmsysteme aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holz, Stroh, Hanf, Flachs u.dgl. erwiesen sich in Punkto Dauerhaftigkeit als problematisch, da keine geeigneten Putzsysteme verfügbar sind, die die erforderlichen bauphysikalischen Eigenschaften aufweisen und ausreichend dauerhaft sind.

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Überprüfung und Bestimmung ausgewählter Eigenschaften eines in Entwicklung befindlichen diffusionsoffenen Putzes in 2 unterschiedlichen Mischungen, der einerseits für die Sanierung von feuchtem, bakterien- und schimmelbelastetem Mauerwerk, und andererseits als Putz für Wärmedämmungen und Konstruktionen aus nachwachsenden Rohstoffen Anwendung finden soll.

Es wurden die bauphysikalischen und mechanischen Eigenschaften, sowie auch die Dauerhaftigkeit untersucht, und mit einem bereits für die Sanierung von feuchtem Mauerwerk etablierten und bewährten Putzsystem verglichen.

Der Unterschied zwischen diesem in Entwicklung befindlichen Putzes, dessen Performance in dieser Diplomarbeit ermittelt wurde, und dem bereits etablierten Putzsystem liegt darin, dass bei dem neuen Putzsystem ein nur sehr geringer Anteil (ca. 10%) an Weißzement enthalten ist, was für die Eignung des Putzes für die Anwendung auf Konstruktionen und Dämmsystemen aus nachwachsenden Rohstoffen erforderlich ist.

Abstract

Ecological construction and engineering belong to the biggest challenges of our times.

The CO₂ content in our atmosphere is seen as the chief cause for climate change. Around 42% of the EU energy consumption and 35% of propellant gas emissions are caused by buildings, considering the manufacturing of construction material, the construction itself, and the operation of the building. To minimize heat loss is therefore not only in the economical interest of the operator but also of utmost environmental importance.

The producers of up-to-date construction material and building systems have to consider both of these aspects: the use of high-performance ecological material needs to meet economic reasonability.

So far, in lack of suitable alternatives, mainly insulation material and insulation systems based on mineral oil are beeing used (EPS,XPS,PUR). But their production demands a high level energy consumption. Then again insulation systems based on regrowing materials. such as wood, flax, raw straw or hemp, proved to be problematic regarding constancy mainly because the plaster-systems do not have the required physical properties.

The aim of this diploma thesis is the examination and determination of a newly developed diffusion open plaster considering selected characteristics.

Two different intermixtures were examined which are intended for restoration of humid walling with bacterial load and mould and particulary for insulation systems made of regrowing raw materials.

Criteria of the examination were the building-physical and mechanical properties as well as constancy. Both intermixtures of the newly developed plaster were compared to an established and approved plaster used for restoration of humid brickwork.

In comparison with the latter, the unique specific of the newly developed plaster examined in this thesis is the low proportion of white cement (10%) which benefits the use on insulation systems made of regrowing raw materials.

Inhaltsverzeichnis

D	anksa	gun	g 2
K	urzfas	sung	g 3
A	bstrac	t	
In	haltsv	erze	ichnis 5
1	Ein	leitu	ng7
	1.1	Pro	blemstellung, Zielsetzung7
	1.2	Rał	nmenbedingungen
	1.3	Her	angehensweise
2	Gru	Indla	gen- / Theorieteil10
	2.1 mech	Dur anis	chgeführte Untersuchungen zur Bestimmung des hygrothermischen und chen Verhaltens11
	2.1	.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl µ11
	2.1	.2	Wärmeleitfähigkeit λ 11
	2.1	.3	Haftzugfestigkeit11
	2.1	.4	Biegezug- und Druckfestigkeit11
	2.1	.5	Wasserrückhaltevermögen von Frischmörtel12
	2.1	.6	Sorptionsverhalten
	2.1	.7	Wasseraufnahmekoeffizient Ww12
	2.1	.8	Bestimmung der Porenradiusverteilung12
	2.1	.9	Dauerhaftigkeit
3	Bes	stimr	nung der Eigenschaften14
	3.1	Wa	sserdampfdurchlässigkeit15
	3.1	.1	Prüfaufbau15
	3.1	.2	Prüfbedingungen17
	3.1	.3	Messergebnisse
	3.1	.4	Bestimmung der Ergebnisse
	3.1	.5	Ergebnisse Wasserdampfdiffusionswiderstand24
	3.1	.6	Interpretation der Messergebnisse25
	3.2	Wä	rmeleitfähigkeit26
	3.2	.1	Prüfaufbau

		3.2.	.2	Messergebnisse	28
	3.	3	Haf	tzugfestigkeit	29
		3.3.	.1	Prüfaufbau	29
		3.3.	.2	Messergebnisse	33
	3.	4	Bie	gezug- und Druckfestigkeit	36
		3.4.	.1	Biegezugfestigkeit	36
		3.4.	.2	Druckfestigkeit	37
	3.	5	Wa	sserrückhaltevermögen von Frischmörtel	44
	3.	6	Sor	ption	45
		3.6.	.1	Prüfaufbau	45
		3.6.	.2	Messergebnisse	52
	3.	7	Wa	sseraufnahmekoeffizient	56
		3.7.	.1	Prüfaufbau	56
		3.7.	.2	Messergebnisse	59
		3.7.	.3	Interpretation der Messergebnisse	69
	3.	8	Bes	stimmung der Porenradiusverteilung	70
	3.	8 3.8. Por	Bes .1 enra	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung	70 der 70
	3.	8 3.8. Por 3.8.	Bes .1 enra .2	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau	70 der 70 72
	3.	8 3.8. Por 3.8. 3.8.	Bes .1 enra .2 .3	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse	70 der 70 72 76
	3.	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8.	Bes 1 enra 2 .3 .4	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse	70 der 70 72 76 80
	3.	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8. 9	Bes 1 enra 2 .3 .4 Dau	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse	70 der 70 72 76 80 82
	3.	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8. 9 3.9.	Bes 1 enra 2 .3 .4 Dau	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse uerhaftigkeit Messergebnisse	70 der 70 72 76 80 82 85
	3.	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8. 3.9. 3.9.	Bes .1 .2 .3 .4 Dau .1	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse	70 der 70 72 76 80 82 85 87
4	3.	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8. 3.9. 3.9. Zus	Bes 1 enra 2 .3 .4 Dau .1 .2 samr	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse werhaftigkeit Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse	70 der 70 72 76 80 82 85 87 88
4	3. ⁻ 3. ⁻	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8. 3.9. 3.9. 3.9. Zus 1	Bes 1 enra 2 .3 .4 Dau .1 .2 samr Zus	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse uerhaftigkeit Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse enenfassung	70 der 70 72 76 80 82 85 87 88
4	3. 3. 4. 4.	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8. 3.9. 3.9. 3.9. Zus 1 2	Bes 1 enra 2 .3 .4 Dau .1 .2 samr Zus Sch	stimmung der Porenradiusverteilung. Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung. Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse uerhaftigkeit Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse anmenfassung.	70 der 70 72 76 80 82 85 87 88 88 88
4	3. 3. 4.	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8. 3.9. 3.9. Zus 1 2 Abb	Bes 1 enra 2 .3 .4 Dau .1 .2 samr Zus Sch	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse uerhaftigkeit Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse nenfassung sammenfassung der Messergebnisse: nussfolgerung	70 der 70 72 76 80 82 85 87 88 88 88 90
4 5 6	3. ¹ 3. ¹ 4.	8 3.8. Por 3.8. 3.8. 3.8. 3.9. 3.9. 3.9. Zus 1 2 Abb Dia	Bes 1 enra 2 .3 .4 Dau .1 .2 .2 samr Zus Sch oildu gran	stimmung der Porenradiusverteilung Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung adienverteilung Prüfaufbau Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse uerhaftigkeit Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse Interpretation der Messergebnisse interpretation der Messergebnisse nenfassung sammenfassung der Messergebnisse : ilussfolgerung ngsverzeichnis	70 der 70 72 76 80 82 85 87 88 88 90 92 94

1 Einleitung

1.1 Problemstellung, Zielsetzung

Gebäude aus nachwachsenden Rohstoffen, sowie Gebäude, die mit nachwachsenden Rohstoffen gedämmt sind, haben spezielle Anforderungen an das Putzsystem, insbesondere im Außenbereich.

Nachwachsende Rohstoffe sind meist durch Bakterien und Kleintiere belastet. Die organischen Anteile und Feuchtigkeit führen dazu, dass sich bei herkömmlichen Putzsystemen aus Lehm oder Zement rasch Risse bilden, oft kommt es zudem zu Schimmelbildung, da die Feuchtigkeit nicht abtransportiert werden kann.

Es ist ein in Entwicklung befindliches Putzsystem, in 2 unterschiedlichen Zusammensetzungen, hinsichtlich der bauphysikalischen Eigenschaften sowie in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit zu untersuchen, ob dieses für die Applikation auf Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen und auf feuchtigkeits- bzw. bakterienund schimmelbelastetem Mauerwerk im Bereich der Sanierung geeignet ist.

1.2 Rahmenbedingungen

Ein bereits am Markt etabliertes Putzsystem, welches insbesondere im Bereich von feuchtigkeitsbelastetem Mauerwerk in den vergangenen Jahren bereits erfolgreich eingesetzt wurde, war das Referenz-/Ausgangsprodukt für die Entwicklung eines Putzes, der aufgrund seiner geänderten Zusammensetzung und seiner Eigenschaften auch als ökologisches, zementfreies Putzmaterial für Bau- und Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen geeignet ist. Im Zuge der Untersuchungen seitens des Herstellers stellte sich jedoch heraus, dass ein Putzsystem ohne jeden Zementanteil aufgrund der nicht ausreichenden Dauerhaftigkeit als ungeeignet anzusehen ist. Aus diesem Grund wurden die untersuchten Putzproben mit NHL-Kalk (natürlich hydraulischem Kalk) und ca. 10% Weißzement als hydraulische Bindemittel verwendet. Es wurde eine repräsentative Zahl von Putzproben für die verschiedenen Versuche hergestellt und vorbereitet.

Wesentlich für die Entwicklung des neuen Putzsystems waren die positiven Eigenschaften des bereits am Markt etablierten Putzes (mit Zement als Bindemittel), wie das nachfolgende Bild veranschaulicht.



Abbildung 1-1: Probefläche Sanierputzsysteme - links Probe 4, rechts Feuchtmauerputz

Im Rahmen eines Versuchsprojektes wurde eine durch aufsteigende Feuchtigkeit stark belastete frei stehende Wand im Bereich des Schloss Schönbrunn mit unterschiedlichen am Markt befindlichen Feuchtmauerputzen verputzt. Einzig der für den Vergleich in dieser Diplomarbeit herangezogene Putz (Probe 4) weist bis heute keine Salzausblühungen auf.

1.3 Herangehensweise

Bei der Bestimmung der Eigenschaften wurden 2 unterschiedliche Putzmischungen des neu entwickelten Putzes sowie das bereits im Sanierungsbereich etablierte Produkt herangezogen, und die Ergebnisse bewertet und verglichen.

Die Bezeichnung der Proben im Weiteren lautet:

- Probe 1 Mischung 1 des in Entwicklung befindlichen Putzsystems
- Probe 2 Mischung 2 des in Entwicklung befindlichen Putzsystems
- Probe 4 Das bereits etablierte Putzsystem

Es wurden folgende relevante Eigenschaften der 3 Putze bestimmt und verglichen:

- Wasserdampfdiffusionsfähigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Haftzugfestigkeit
- Biegezug- und Druckfestigkeit
- Wasserrückhaltevermögen von Frischmörtel
- Sorptionsverhalten
- Wasseraufnahmevermögen
- Porenradiusverteilung
- Dauerhaftigkeit

Die Ergebnisse der Messungen wurden einander gegenübergestellt, um eine Aussage über die zu erwartende Performance treffen zu können.

2 Grundlagen- / Theorieteil

Ökologische Bauweise:

Als Hauptursache des Klimawandels, neben vielen anderen Treibhausgasen, wird der CO2-Gehalt in der Atmosphäre gesehen. 42% des gesamten Energieverbrauchs der EU und rund 35% der Treibgasemissionen Europas werden von Gebäuden verursacht. Verständlich, dass "Nachhaltiges Bauen" einen der sechs Leitmärkte der Zukunft in der EU darstellt¹. Bei der Produktion eines Baumaterials setzen wir unseren Lebensraum Substanzen aus, die dieser in ihrer Vielfältigkeit und ihrem Ausmaß aufnehmen muss. Sie verbleiben in unserer Luft, im Boden und im Wasser.

Nur durch Verwendung von umweltfreundlichen und ökologischen Materialien kann gewährleistet werden, dass die Umweltbelastung während der Erzeugung, Nutzungsphase aber auch zukünftig beim Recycling auf ein Minimum reduziert wird. Aufgrund vieler Vorurteile und Ängste, betreffend Funktionsfähigkeit, Dauerhaftigkeit, Feuchte/Schimmel etc., setzt sich die ökologische Bauweise immer noch nicht durch. Für das Verrotten oder Verschimmeln von ökologischen Konstruktionen sind die ungeeigneten Putzsysteme hauptverantwortlich. Sie sind oft außen dichter als innen, nicht diffusionsoffen, unzureichend wasserabweisend, etc. Um die mögliche, dauerhafte und schadensfreie Anwendung, eines Putzsystems für die ökologische Bauweise wissenschaftlich zu erläutern, werden am Institut für Hochbau und Technologie der TU Wien verschiedenste Untersuchungen, sowohl im Labor, als auch an einem Freiland-Prüfstand durchgeführt. Sollten sich die vielversprechenden Performances dieses Putzes bestätigen, wird ein flächendeckendes, schadensfreies und fehlertolerantes Bauen und Sanieren mit ökologischen Materialien ermöglicht. Daraus abgeleitet, würden enorme CO₂ und Primärenergie Einsparungen ermöglicht.

Bei ökologischen Baukonstruktionen dürfen nur Putze eingesetzt werden, die möglichst diffusionsoffen sind (innen dichter als außen), damit die Feuchtigkeit, die ev. in die Konstruktion eindringt, wieder ausdiffundieren kann und keine Feuchteeinreicherung eintritt. Außerdem müssen die Außenputzsysteme wasserabweisend sein, um die Konstruktion vor dem Eindringen von Regenwasser zu schützen. Daher sind die genaue Bestimmung aller bauphysikalischen Parameter sowie deren Langzeituntersuchungen unumgänglich.

¹ Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament – Leitmarktinitiative für Europa, 21.12.2007

2.1 Durchgeführte Untersuchungen zur Bestimmung des hygrothermischen und mechanischen Verhaltens

2.1.1 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl µ

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand ist eine der wichtigsten bauphysikalischen Eigenschaften eines funktionierenden Putzes und beschreibt die Fähigkeit eines Baustoffes, Wasserdampf durch Diffusion zu transportieren.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ muss möglichst gering, gemäß DIN EN 998-1:2010-12 Tabelle 2 für Sanierputzmörtel jedenfalls unter 15, gemäß ÖNORM B3345:2009 Tabelle 3 – Anforderungen an Sanierputzmörtel, unter 12 liegen. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand muss für Außenputze geringer sein als für Innenputze.

Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ erfolgt gemäß EN ISO 12572.

2.1.2 Wärmeleitfähigkeit λ

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine bauphysikalische Eigenschaft, die zur Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstandes eines gesamten Bauteiles für jede Bauteilschicht bekannt sein muss. Grenzwerte für die Wärmeleitfähigkeit eines Putzes sind nur für Wärmedämmputze genormt.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ist in der ÖNORM B 6015-6 definiert.

2.1.3 Haftzugfestigkeit

Die Messung der Haftzugfestigkeit dient zur Bestimmung der Haftfestigkeit zwischen Mauerwerk und Putz und Putzgrund. Die Prüfung zeigt an, ob die Haftung zwischen dem Putz und dem Untergrund ausreichend ist.

Die Haftfestigkeit wird nach DIN EN 1015-12 geprüft.

2.1.4 Biegezug- und Druckfestigkeit

Die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit dient der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Putzsysteme und wird in Anlehnung an ÖNORM EN 1015-11 bestimmt.

2.1.5 Wasserrückhaltevermögen von Frischmörtel

Das Wasserrückhaltevermögen eines Putzmörtels ist entscheidend für den Verbund zwischen Putz und Putzträger und wird auch durch die Eigenschaften des Putzträgermaterials beeinflusst.

Die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens von Frischmörtel erfolgt in Anlehnung an ÖNORM EN 1015-8.

2.1.6 Sorptionsverhalten

Die Sorption beschreibt die Anlagerung von Wassermolekülen auf den inneren Oberflächen poröser Baustoffe. Die Sorptionsfeuchten des jeweiligen Baustoffes sind von der umgebenden Luftfeuchte und der Temperatur abhängig. Die Feuchtigkeitsaufnahme durch den Baustoff in Abhängigkeit von der Luftfeuchte bei konstanter Temperatur wird durch die Sorptionsisotherme beschrieben. Die Sorptionsisothermen werden bei 23 °C bestimmt. Dabei werden unterschiedlichen relativen Luftfeuchten (33 %, 53%, 75% und 93 %) eingestellt.

Die Bestimmung des Sorptionsverhaltens erfolgt nach EN ISO 12571.

2.1.7 Wasseraufnahmekoeffizient Ww

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten dient zur Beurteilung der Intensität der Wasseraufnahme aufgrund von Kapillarkräften über kurze Zeiträume, beispielsweise durch Schlagregen oder anhaltende Beregnung.

Die Wasseraufnahmefähigkeit ist für das Verhalten und die Eignung eines Baustoffes bei Bewitterung wesentlich.

Der Wasseraufnahmekoeffizient sollte < 0,5 kg/($m^{2}h^{0,5}$) für die Spezifikation "Wasserabweisend" sein, mindestens jedoch "Wasserhemmend", d.h. 0,5<=W<=2 kg/($m^{2}h^{0,5}$)

Der Wasseraufnahmekoeffizient wird gemäß EN ISO 15148:2002 bestimmt.

2.1.8 Bestimmung der Porenradiusverteilung

Um die Funktionsfähigkeit dieses Putzes richtig untersuchen bzw. die Materialdaten für eine bauphysikalische Simulation benutzen zu können, ist die Bestimmung der Porenradiusverteilung erforderlich.

Nach dem Erstarren und Erhärten des Bindemittels bleiben Luftporen zurück, die von festigkeitsbildenden Bindemittelmatrix Die der umgeben werden. Feuchtespeicherfunktion im Kapillarwasserbereich wird mit Hilfe einer Saugspannungsmessanlage bestimmt. Für den Bereich der überhygroskopischen Feuchte ergibt sich eine charakteristische Abhängigkeit, die sogenannte Kapillardruckoder Saugspannungskurve. Mit Hilfe der Saugspannungsmessanlage wird diese Kurve durch Entfeuchtung anfänglich gesättigter Proben durch das Aufbringen verschiedener Überdrücke ermittelt, indem für jede Druckstufe der entsprechende Gleichgewichtswassergehalt bestimmt wird. Jedem Druck kann ein Kapillarradius zugeordnet werden, bis zu dem alle größeren Poren durch den jeweiligen Druck entleert sind.

Die Bestimmung der Porenradiusverteilung ist für die Fähigkeit eines Putzsystems verantwortlich, Wasser kapillar (d.h. mit den darin gelösten Schadsalzen) oder nur durch Diffusion zu transportieren.

Ziel ist es, ein Putzsystem zu entwickeln, das aufgrund seiner Porenradiusverteilung möglichst keinen kapillaren Wassertransport ermöglicht, bei gleichzeitig möglichst geringem Dampfdiffusionswiderstand.

Die Porenradiusverteilung wird mit Hilfe einer Saugspannungsprüfanlage bestimmt.

2.1.9 Dauerhaftigkeit

Das hier untersuchte Putzsystem wird auf einer Fassade eines Freiland-Prüfstandes der TU Wien aufgebracht und mit Sensoren (Temperatur, Feuchte, Wärmestrom etc.) detailliert und langfristig vermessen. Die Konstruktion dieses Prüfstandes besteht aus Holzträgern und Strohballen. Die Innenseite ist mit Lehm verputzt. Die Fassade wird unter realen Bedingungen natürlich bewittert und sowohl die Winterperiode, als auch die kritische Übergangszeit, wird detailliert erfasst. Da die Strohballen-Konstruktion als empfindlich und Feuchteintolerant gesehen wird, stellt die Konstruktion optimale Prüfbedingungen, um die Funktionalität und Dauerhaftigkeit des neuen Putzes zu untersuchen.

Von entscheidender Bedeutung ist der Verlauf der absoluten und der relativen Feuchtigkeit im Dämmstoff/Stroh.

3 Bestimmung der Eigenschaften

In diesem Kapitel werden die Zielewerte und Methoden zur Bestimmung der Eigenschaften beschrieben sowie die Messergebnisse der einzelnen zu untersuchenden Eigenschaften dargestellt und ausgewertet.

Aufgrund der Messergebnisse wird das Erreichen oder Nichterreichen der Soll-Eigenschaften dokumentiert.

Es sind die erforderlichen Maßnahmen, die zur Erreichung der gewünschten Ergebnisse führen, beschrieben.

Für alle Messungen wurde eine repräsentative Anzahl von Proben in unterschiedlichen Größen, je nach Anforderung der Prüfbedingungen, hergestellt.

Die Proben werden, entsprechend den Anforderungen durch die für die einzelnen Messungen zugrundeliegenden Normen, vor Prüfbeginn konditioniert.

Geometrische und physikalische Eigenschaften werden dokumentiert, die Konditionierungsvorgänge protokolliert.

3.1 Wasserdampfdurchlässigkeit

Es wurde die Wasserdampfdurchlässigkeit der 3 Putze gemessen, ausgewertet und gegenübergestellt.

Es wurden je 3 Proben der 3 zu untersuchenden Putze geprüft.

Ziel waren die Bestimmung und der Vergleich der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ aller 9 Proben.

Die Wasserdampfdurchlässigkeit der Putzproben wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 12572:2001 bestimmt.

Für ein positives Prüfergebnis muss die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl µ gemäß DIN EN 998-1:2010-12 für Sanierputzmörtel unter 15 liegen, gemäß ÖNORM B 3345:2009 unter 12. Anzustreben ist eine möglichst geringe Dampfdiffusionswiderstandszahl.

3.1.1 Prüfaufbau

Der Probekörper wird nach Konditionierung in die offene Seite eines Prüfgefäßes eingebaut, welches eine wässrige gesättigte Lösung (nasses Prüfgefäß gemäß EN ISO 12572) enthält. Die Anordnung wird dann in einen Prüfraum gestellt, dessen Temperatur und Luftfeuchte geregelt werden. Wegen der unterschiedlichen Wasserdampfteildrücke Prüfraum zwischen Prüfgefäß und entsteht ein Dampfdiffusionsstrom durch die durchlässigen Putzprobekörper. Periodische Anordnung werden durchgeführt, die Wägungen der um Wasserdampfdiffusionsstromdichte im stationären Zustand zu bestimmen.

Prüfaufbau im Detail:

Alle Proben wurden über einen Zeitraum von >30 Tagen in einem klimatisierten Labor bis zur Erreichung der Massekonstanz konditioniert:

Klimadaten:

Durchschnittliche Temperatur:	22°C	+/- 0,5°C
Durchschnittliche rel. Luftfeuchtigkeit:	46%	+/- 1%

Nach Erreichen der Massekonstanz wurden die Proben in Glasbehälter mit gesättigter wässriger Salzlösung (KOH) eingebaut. Die Ränder wurden mit Silikon versiegelt und die Proben gegenüber dem Glasbehälter ebenfalls mittels Silikon abgedichtet. Der Abstand zwischen Probenunterseite und der Oberfläche der gesättigten Lösung wurde auf 15 +/- 5mm eingestellt.

Durch die gesättigte Salzlösung stellt sich unterhalb der Putzproben eine rel. Luftfeuchtigkeit von 9% ein.

Die Proben wurden nun unter den gleichen klimatischen Bedingungen wie während der Lagerung bis zur Erreichung der Massekonstanz, eingebaut in die Glasgefäße, gelagert und in regelmäßigen Abständen gewogen.

Die Masseänderung (Messung im eingebauten Zustand, mit Prüfgefäß) wurde protokolliert und ist die Grundlage für die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit bzw. des Wasserdampfdiffusionswiderstandes.

Herstellung der Proben:



Abbildung 3-1: Lagerung der Proben im Klimaraum bis zur Massekonstanz



Abbildung 3-2: Herstellung der gesättigten KOH-Lösung



Abbildung 3-3: Einbau der Proben in die Gefäße mit der Salzlösung



Abbildung 3-4: Fertige Probe

Nach dem Einbau verbleiben die Proben für 24 Stunden im Klimaraum, anschließend (nachdem das Silikon ausgehärtet ist) wurden diese mit den Gefäßen regelmäßig gewogen.

3.1.2 Prüfbedingungen

d =	0,0175	m	Probendicke
b =	137	mm	
l =	137	mm	
A =	0,01877	m ²	Probenfläche
Q =	21,95	°C	Durchschnittliche Temperatur im Klimaraum
$\varphi =$	46%		Durchschnittliche rel. Luftfeuchtigkeit im Klimaraum
p _{s a,i} =	2644,42	hPa	Sättigungsdampfdruck für 22°C
pe =	1216,43	hPa	Wasserdampfteildruck außerhalb des Prüfgefäßes
φ =	9%		rel. Luftfeuchtigkeit im Prüfgefäß
pi =	238,00	hPa	Wasserdampfteildruck innerhalb des Prüfgefäßes
Δp =	978,44	hPa	Dampfdruckdifferenz
p ₀	1013,25	hPa	Normaler Luftdruck
$R_{ m v}$	462		Gaskonstante für Wasserdampf
			thermodynamische
Т	295,10	K	Temperatur
р	997,1	hPa	Durchschnittlicher Luftdruck während des Prüfzeitraumes ²

Die nachfolgenden Prüfbedingungen gelten für alle Proben:

Tabelle 3-1: Prüfbedingungen Wasserdampfdurchlässigkeit

² Daten zur Verfügung gestellt von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

3.1.3 Messergebnisse

Probe 1.1

Datum			Masse (incl.	m2-m1
	Zeit	Zeit	Behälter)	$\Delta m_{12} = \frac{1}{t^{2-t_{1}}}$
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 334,60	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 339,20	2,81552E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 347,16	3,08527E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 355,14	3,06593E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 357,96	3,54182E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 366,58	3,06456E-08
18.06.2015 10:30	14,84931	356,38	1 373,54	2,89493E-08
22.06.2015 12:00	18,91181	453,88	1 383,08	2,71795E-08
25.06.2015 12:30	21,93264	526,38	1 389,58	2,49042E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 391,36	2,26463E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 399,74	2,39565E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 404,04	2,47982E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 412,59	2,48691E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 418,80	2,45843E-08
13.07.2015 13:20	39,96736	959,22	1 426,62	2,17222E-08

Tabelle 3-2: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 1.1

Probe 1.2.

Datum			Masse (incl.	<i>m</i> 2- <i>m</i> 1
	Zeit	Zeit	Behälter)	$\Delta m_{12} = \frac{1}{t^{2-t_{1}}}$
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 308,42	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 313,24	2,95018E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 321,72	3,28682E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 330,06	3,20424E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 333,16	3,89349E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 342,28	3,24232E-08
18.06.2015 10:30	14,84931	356,38	1 349,88	3,16113E-08
22.06.2015 12:00	18,91181	453,88	1 360,12	2,91738E-08
25.06.2015 12:30	21,93264	526,38	1 367,22	2,72031E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 369,22	2,54453E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 378,44	2,63579E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 383,20	2,7451E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 392,48	2,69924E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 399,48	2,77118E-08
13.07.2015 13:20	39,96736	959,22	1 407,94	2,35E-08

Tabelle 3-3: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 1.2

Pro	be 1	١.3.

Datum			Masse (incl.	$Am_{10} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_1}$
	Zeit	Zeit	Behälter)	$\Delta m_{12} = \frac{1}{t_{2}-t_{1}}$
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 298,86	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 303,98	3,1338E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 313,12	3,54264E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 322,48	3,59613E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 325,96	4,37076E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 336,40	3,7116E-08
18.06.2015 10:30	14,84931	356,38	1 345,36	3,72681E-08
22.06.2015 12:00	18,91181	453,88	1 357,94	3,58405E-08
25.06.2015 12:30	21,93264	526,38	1 366,44	3,2567E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 368,86	3,07888E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 380,10	3,21326E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 385,82	3,29873E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 397,04	3,26353E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 405,44	3,32542E-08
13.07.2015 13:20	39,96736	959,22	1 415,72	2,85556E-08

Tabelle 3-4: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 1.3

Datum			Masse (incl	<i>m</i> 2- <i>m</i> 1
	Zeit	Zeit	Behälter)	$\Delta m_{12} = \frac{1}{t^{2}-t^{1}}$
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 374,20	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 379,44	3,20725E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 388,56	3,53488E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 397,64	3,48855E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 400,98	4,19493E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 411,22	3,6405E-08
18.06.2015 10:30	14,84931	356,38	1 420,00	3,65194E-08
22.06.2015 12:00	18,91181	453,88	1 432,00	3,4188E-08
25.06.2015 12:30	21,93264	526,38	1 440,42	3,22605E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 442,80	3,02799E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 453,82	3,15037E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 459,36	3,19493E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 470,40	3,21117E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 478,68	3,27791E-08
13.07.2015 13:20	39,96736	959,22	1 488,76	2,8E-08

Tabelle 3-5: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 2.1

Probe	2.	2.
-------	----	----

Datum		Masse (incl.		$Am_{40} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_1}$
	Zeit	Zeit	Behälter)	$\Delta m_{12} - \frac{1}{t_{2}-t_{1}}$
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 383,74	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 389,62	3,59897E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 399,04	3,65116E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 408,72	3,71907E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 412,36	4,57172E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 423,10	3,81826E-08
18.06.2015 10:30	14,84931	356,38	1 432,40	3,86823E-08
22.06.2015 12:00	18,91181	453,88	1 445,52	3,73789E-08
25.06.2015 12:30 21,93264		526,38	1 455,06	3,65517E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 457,78	3,46056E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 470,12	3,52773E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 476,50	3,67935E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 489,60	3,81035E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 499,70	3,99842E-08
13.07.2015 13:20	39,96736	959,22	1 512,68	3,60556E-08

Tabelle 3-6: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 2.2

Probe 2.3.

Datum			Masse (incl.	$Am_{12} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_1}$
	Zeit	Zeit	Behälter)	$\Delta m_{12} - \frac{1}{t^2 - t^1}$
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 306,58	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 311,04	2,72983E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 317,94	2,67442E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 325,02	2,72015E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 327,76	3,44135E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 335,54	2,76593E-08
18.06.2015 10:30	18.06.2015 10:30 14,84931		1 342,18	2,76183E-08
22.06.2015 12:00	6.2015 12:00 18,91181		1 351,72	2,71795E-08
25.06.2015 12:30	25.06.2015 12:30 21,93264		1 358,60	2,63602E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 360,68	2,64631E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 369,98	2,65866E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 375,00	2,89504E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 384,68	2,81559E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 392,24	2,99287E-08
13.07.2015 13:20	39,96736	959,22	1 401,42	2,55E-08

Tabelle 3-7: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 2.3

Probe	e 4.1.
-------	--------

Datum	Zeit	Zeit	Masse (incl. Behälter)	$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 255,78	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 262,88	4,3457E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 275,16	4,75969E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 287,72	4,82557E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 292,36	5,82768E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 306,34	4,97014E-08
18.06.2015 10:30	14,84931	356,38	1 318,14	4,90808E-08
22.06.2015 12:00	18,91181	453,88	1 334,28	4,59829E-08
25.06.2015 12:30	21,93264	526,38	1 345,40	4,26054E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 348,50	3,94402E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 362,70	4,05946E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 369,86	4,12918E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 383,62	4,00233E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 393,72	3,99842E-08
13.07.2015 13:20	39,96736	959,22	1 405,78	3,35E-08

Tabelle 3-8: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 4.1

Datum	Zeit	Zeit	Masse (incl. Behälter)	$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 262,20	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 268,44	3,81932E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 279,12	4,13953E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 289,66	4,04949E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 293,40	4,69731E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 304,46	3,93203E-08
18.06.2015 10:30	14,84931	356,38	1 313,50	3,76009E-08
22.06.2015 12:00	18,91181	453,88	1 325,36	3,37892E-08
25.06.2015 12:30	21,93264	526,38	1 333,50	3,11877E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 335,70	2,79898E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 346,12	2,97885E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 351,44	3,06805E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 361,66	2,97266E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 369,38	3,05622E-08
13.07.2015 13:20	39,96736	959,22	1 378,40	2,50556E-08

Probe 4.2.

Tabelle 3-9: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 4.2

			Masse (incl.	$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_1}$
Datum	Zeit	Zeit	Behälter)	t2-t1
	[d]	[h]	[g]	[g/s]
03.06.2015 14:07	-	-	1 194,39	
05.06.2015 11:30	1,89097	45,38	1 201,16	4,14371E-08
08.06.2015 11:10	4,87708	117,05	1 212,84	4,52713E-08
11.06.2015 11:28	7,88958	189,35	1 224,84	4,61042E-08
12.06.2015 09:35	8,81111	211,47	1 229,22	5,50113E-08
15.06.2015 15:43	12,06667	289,60	1 242,62	4,76394E-08
18.06.2015 10:30	14,84931	356,38	1 254,12	4,7833E-08
22.06.2015 12:00	18,91181	453,88	1 269,76	4,45584E-08
25.06.2015 12:30	21,93264	526,38	1 280,46	4,09962E-08
26.06.2015 10:20	22,84236	548,22	1 283,40	3,74046E-08
30.06.2015 11:30	26,89097	645,38	1 297,04	3,89937E-08
02.07.2015 11:40	28,89792	693,55	1 303,88	3,94464E-08
06.07.2015 11:10	32,87708	789,05	1 317,10	3,84526E-08
09.07.2015 09:20	35,80069	859,22	1 326,88	3,87173E-08
13.07.2015 13:20	39.96736	959.22	1 338.40	3.2E-08

Probe 4.3.

Tabelle 3-10: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 4.3



Diagramm 3-1: Veranschaulichung der Massenänderung

3.1.4 Bestimmung der Ergebnisse

Wasserdampfdiffusionsstrom durch den Probekörper

G [kg/s]

Wasserdampfdiffusionsstromdichte

$$g = \frac{G}{A} \qquad [kg/(m^{2*}s)]$$

Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffizient

$$W = \frac{G}{(A * \Delta pv)} \qquad [kg/(m^2 * s * Pa)]$$

Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand

$$Z = \frac{1}{W} \qquad [m^{2*}s^*Pa/kg]$$

Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient

 $\delta = W * d \qquad [kg/(m^*s^*Pa)]$

Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft

$$\delta_a = \frac{0.083 * p_0}{R_V * T * p} * \left(\frac{T}{273}\right)^{181} * \frac{1}{3600} \qquad [kg/(m^*s^*Pa)]$$

Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta}$$
[-]

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke

$$S_D = \mu * d \qquad [m]$$

3.1.5 Ergebnisse Wasserdampfdiffusionswiderstand

Probe 1.1.					
			W =	1,4649E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	6,8266E+08	Pa*m ² *s/kg
			δ =	2,56351E-11	kg/Pa*m*s
	μ=	7,72			0,
Probe 1.2.	•	· · ·			
			W =	1.5880E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	6.2974E+08	$Pa^*m^{2*}s/kg$
			δ =	2.7789E-11	kg/Pa*m*s
	u =	7.12		_,,,,,,,,	
Probe 1.3.	•				
			W =	1.8519E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	5.3997E+08	$Pa^*m^{2*}s/kg$
			δ =	3.2409E-11	kg/Pa*m*s
	u =	6,10		-)	
Probe 2.1.	r -				
			W =	1,8159E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	5,5068E+08	Pa*m ² *s/kg
			δ =	3,1779E-11	kg/Pa*m*s
	u =	6,23		-, -	01
Probe 2.2.					
			W =	2.0352E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	4.9136E+08	$Pa^*m^{2*}s/kg$
			δ =	3.5615E-11	kg/Pa*m*s
	μ=	5,56		-,	
Probe 2.3.	•	·			
			W =	1,5063E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	6,6390E+08	Pa*m ² *s/kg
			δ =	2,6359E-11	kg/Pa*m*s
	μ=	7,51			0,
Probe 4.1.	•	-			
			W =	2,4107E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	4,1482E+08	Pa*m ² *s/kg
			δ =	4,2187E-11	kg/Pa*m*s
	μ=	4,69			
Probe 4.2.					
			W =	1,8642E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	5,3642E+08	Pa*m ² *s/kg
			δ =	3,2624E-11	kg/Pa*m*s
	μ=	6,06			
Probe 4.3.	•				
			W =	2,2933E-09	kg/Pa*m ² *s
			Z =	4,3606E+08	Pa*m ² *s/kg
			δ =	4,0132E-11	kg/Pa*m*s
	ц.=	4.93			
	— س	-,,,0			

Tabelle 3-11: Bestimmung Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

3.1.6 Interpretation der Messergebnisse

Durchschnittliche Werte für den Wasserdampfdiffusionswiderstand µ:

Probe 1:	6,98
Probe 2:	6,43

Probe 4: 5,23

Durchschnittliche Werte für die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke SD

(Probendicke 17,5mm)

Probe 1:	0,12 m
Probe 2:	0,11 m
Probe 4:	0,09 m

Für sämtliche Putzproben wurde das gewünschte Ergebnis (Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl für Sanierputzmörtel μ < 15) erreicht, der Grenzwert wurde deutlich unterschritten.

Somit gelten alle 3 Putze als diffusionsoffen.

3.2 Wärmeleitfähigkeit

Es wurde die Wärmeleitfähigkeit der 3 Putzsysteme gemessen und gegenübergestellt.

Je 5 Proben der 3 zu untersuchenden Putze wurden geprüft.

Ziel waren die Bestimmung und der Vergleich der Wärmeleitfähigkeit aller 15 Proben.

Die Wärmeleitfähigkeit der Putzproben wurde nach ÖNORM B 6015-6 mit dem QTM500 Gerät bestimmt. Das Gerät wird vor jeder Anwendung mittels Referenzproben kalibriert.

3.2.1 Prüfaufbau



Abbildung 3-5: Plattengerät mit Referenzprobe



Abbildung 3-6: Proben



Abbildung 3-7: Messung der Wärmeleitfähigkeit

3.2.2 Messergebnisse

Messwerte	Messwerte Wärmeleitfähigkeit gem. ÖNORM B6015-6						
	I	b	h		λ		
Probe	[mm]	[mm]	[mm]	m [g]	[W/mK]		
1.1.	101,3	51,5	121,5	744,605	0,474		
1.2.	100,9	48,3	121,5	693,64	0,4135		
1.3.	101,2	50,2	121,3	731,271	0,5103		
1.4.	101,1	51,9	121,6	830,492	0,6866		
1.5.	100,6	50,1	121,6	792,917	0,5259		
2.1.	100,7	51,2	121,4	755,728	0,4732		
2.2.	102,1	50,9	121,3	770,876	0,4995		
2.3.	101,9	49,8	121,1	760,433	0,4629		
2.4.	100,9	49,9	121,1	739,484	0,4699		
2.5.	100,8	50,6	121,0	746,317	0,4759		
4.1.	101,5	48,4	121,2	675,077	0,3917		
4.2.	101,6	48,6	121,4	663,457	0,4179		
4.3.	101,0	53,4	122,3	684,027	0,3918		
4.4.	101,2	50,8	121,5	863,871	0,6654		
4.5.	101,7	50,0	121,3	698,116	0,3728		

Tabelle 3-12: Bestimmung Wärmeleitfähigkeit

Die Schwankungen der Wärmeleitfähigkeit liegen im Bereich von (besser) +/- 10%, mit Ausnahme der Proben 1.4. und 4.4. Bei diesen beiden Proben ist auch eine deutlich höhere Dichte festzustellen, die zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit führt.

Dadurch wird erkennbar, dass sich die Verarbeitung des Putzsystems auf die bauphysikalischen Eigenschaften deutlich auswirkt.

Mittelwerte:

 $Probe \ 1 \qquad \lambda = 0,52 \ W/mK$

 $Probe \ 2 \qquad \lambda = 0,48 \ W/mK$

 $Probe~4 \qquad \lambda = 0,45~W/mK$

3.3 Haftzugfestigkeit

Es wurde die Haftzugfestigkeit der 3 Putzsysteme bestimmt und gegenübergestellt.

Je 3 Proben der 3 zu untersuchenden Putze wurden geprüft.

Ziel waren die Bestimmung und der Vergleich der Haftzugfestigkeit aller 9 Proben.

Die Prüfung dient zur Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Mauerwerk und Putz. Auf die Proben wird ein Stempel mittels Kunstharzklebers aufgebracht. Nach der Aushärtung wird der Stempel mit Hilfe eines mechanischen Prüfgerätes abgezogen, die erforderliche Kraft entspricht der Haftzugfestigkeit des Putzes.

Die Haftzugfestigkeit der Putzproben wurde nach ÖNORM EN 998-1 bestimmt.

3.3.1 Prüfaufbau



Abbildung 3-8: Putzproben auf Ziegel aufgebracht, noch in der Schalung



Abbildung 3-9: Putzproben nach dem Ausschalen

Bereits beim Ausschalen löste sich eine Putzprobe vom Untergrund



Abbildung 3-10: Putzproben mit aufgeklebtem Stempel



Abbildung 3-11: Probe ins Messgerät eingebaut, vor dem Abziehen



Abbildung 3-12: Messaufbau



Abbildung 3-13: Probe nach Abziehversuch – gerissen (Kohäsionsbruch)

Bereits beim Ausschalen war erkennbar, dass insbesondere die Putzproben "4" keine hohe Festigkeit aufweisen, was sich auch bei den Abziehversuchen bestätigte.

3.3.2 Messergebnisse

		Bruchlast F _u	Prüffläche A	Haftfestigkeit fu	Bruchbild
		[N]	[mm ²]	[N/mm ²]	
Probe 1					
	Probe 1.1	140	2042,8	0,069	a - Adhäsionsbruch
	Probe 1.2	75	2042,8	0,037	a - Adhäsionsbruch
	Probe 1.3	_ 1)	2042,8	_ 1)	

Mittelwert der Haftzugfestigkeit

0,053 N/mm²

0,047 N/mm²

Probe 2

Probe 2.1	100	2042,8	0,049	a - Adhäsionsbruch
Probe 2.2	90	2042,8	0,044	a - Adhäsionsbruch
Probe 2.3	_ 2)	2042,8	_ 2)	

Mittelwert der Haftzugfestigkeit

Probe 4

Probe 4.1	_ 3)	2042,8	_ 3)	b - Kohäsionsbruch
Probe 4.2	_ 3)	2042,8	_ 3)	b - Kohäsionsbruch
Probe 4.3	_ 3)	2042,8	- 3)	b - Kohäsionsbruch

Mittelwert der Haftzugfestigkeit

keine Messergebnisse

¹⁾ Probe löste sich bei der Einrichtung des Prüfaufbaus vom Ziegel

²⁾ Probe löste sich beim Ausschalen vom Ziegel

³⁾ Kohäsionsbruch im Mörtel selbst vor messbarer Zugkraft

Tabelle 3-13: Messergebnisse Haftzugfestigkeit



- 1 Zugplatte
- 2 Kleberschicht
- 3 Mörtel
- 4 Untergrund

Bild 2: Bruchbild a — Adhäsionsbruch — Bruch in der Berührungsfläche zwischen Mörtel und Untergrund. Der Prüfwert ist gleich der Haftfestigkeit



Bild 3: Bruchbild b -- Kohäsionsbruch -- Bruch im Mörtel selbst. Die Haftfestigkeit ist größer als der Prüfwert



Bild 4: Bruchbild c — Kohäsionsbruch — Bruch im Untergrund. Die Haftfestigkeit ist größer als der Prüfwert

Abbildung 3-14: Bruchbilder; Quelle: EN1015-12:2000

Die Prüfung der Haftzugfestigkeit sollte mit weiteren Proben und anderer Schalung nochmals geprüft werden. Bei den vorhandenen Proben zeigte sich, dass die verwendete Schalung nicht gut geeignet ist, da sich bereits beim vorsichtigen Ausschalen eine Putzprobe vom Ziegel löste.

Zudem lösten sich die Putzproben bereits unter sehr geringen Zugkräften vom Untergrund.

Bei Probe 4 scheint die Mischungskonsistenz sehr empfindlich zu sein, der Putz "zerbröselte" bei geringsten Berührungen, bei den Messungen kam es zum Kohäsionsbruch bereits bei geringsten Zugkräften.

Für diesen Putz muss der Wasseranteil genau definiert werden bzw. die Vornässung des Untergrundes der Putzkonsistenz angepasst werden.
3.4 Biegezug- und Druckfestigkeit

Die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit orientiert sich an der ÖNORM EN 1015-11. Dem entsprechend werden prismenförmige Prüfkörper mit den Abmessungen 160 x 40 x 40 mm hergestellt und unter Normklima konditioniert.

3.4.1 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit wird dann aktiviert, wenn die verputzte Wandfläche senkrecht zu ihrer Ebene belastet wird. Sie gibt an, bei welcher Last der Putz auf Durchbiegung bricht. Die Biegezugfestigkeit wird geprüft, indem gehärtete, in Formen hergestellte Mörtelprismen mittels einer Dreipunktbelastung bis zum Bruch beansprucht wurden. Der Prüfkörper wird auf zwei, im Abstand von 100 mm angeordneten, Stahlrollen aufgelagert und durch eine dritte mittig bis zum Bruch belastet. Die dazu erforderliche von der Prüfmaschine angezeigte Bruchlast wird durch das Widerstandsmoment des Bruchquerschnittes dividiert und als Biegezugfestigkeit in N/mm² angegeben. Die Prüfung wurde in Anlehnung an die ÖNORM 1015-11 durchgeführt.

Die im Laufe der Untersuchung ermittelten Werte der Biegezugfestigkeit sind im Anhang zu sehen.



Abbildung 3-15: Probekörper nach Durchführung der Biegezugprüfung

3.4.2 Druckfestigkeit

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit werden die zuvor in der Biegezugfestigkeitsprüfung mittig zerbrochenen Mörtelprismen verwendet. Für die Prüfung der Druckfestigkeit sind die Prismen in zwei Hälften zu brechen, sodass sechs halbe Prismen zur Verfügung stehen. Auf die Probe wird eine Lasteintragungsplatte 40x40mm aufgesetzt und mit definierter Geschwindigkeit bis zum Bruch belastet. Ein zwischen den beiden sich aufeinander zu bewegenden Druckplatten einer Druckprüfmaschine befindlicher Prüfkörper wird bis zum Bruch zusammengedrückt. Die dazu erforderliche, von der Prüfmaschine angezeigte Bruchlast wird durch die Querschnittfläche des Prüfkörpers dividiert und als Druckfestigkeit in N/mm² angegeben.



Abbildung 3-16: Probekörper nach Durchführung des Druckversuches

	Probedaten										
Mischgutbezeichnung:	Probe 1										
Gesteinsart:	Quarzsand		Lagerung : bis Massenkonstanz bei 23°C und 50% rel.	F.							
Rohdichte	1,43 kg/dm ³		Ausbreitmaß 175 mm								
Zusatzmittel:	Porenbildner		Alter des Mörtels: 28 Tage								
Probekörpernummer:	1 bis 6										
		Prüfei	rgebnisse								
		Druckfestigke	eiten [N/mm²]								
4,00											
3,50		3,30	6 3,70								
3,00	2,	91	2,99 2,96								
2,50											
2,00											
1,50											
1,00		Druckfestigkeit (un	ngerundet)								
0,50											
0,00	. 7	L .3	AA A5 A6								
PROBE 1.	PROBE 1.	PROBE 1.	BROBE L. BROBE L. BROBE L.								
	5 1 1	1	2 3								
N	⊢ = 48	24,4 ⊢ _u =	$F_u = 5031,4$								
N/mm ²	f = 3	,18 <i>f</i> _u=	$f_{u} = 3,36$								
		4	5 6								
N	F = 54	98.6 F., =	• 4397.4 F _u = 4431.7								
N/mm ²	f = 3	70 f.=	- 299 <i>f</i> = 296								
)	,,,o ju	2,00 90 2,00								
	Mittelwert der Druckfestigkeit										
f (N/mm²) 3,18			Bemerkungen:								
gerundet nach EN 10)15-11	3,2									

Abbildung 3-17: Druckfestigkeit Probe 1

		Probedaten										
Mischgutbezeichnung:	Probe 2											
Gesteinsart:	Quarzsand	Lagerung : bis Massenkonstanz bei 23°C und 50% rel.F.										
Rohdichte	1,33 kg/m³	Ausbreitmaß 178 mm										
Zusatzmittel:	Probenbildner	Alter des Mörtels: 28 Tage										
Probekörpernummer:	1 bis 6											
		A-116										
	F	rutergebnisse										
	Druckfestigkeiten [N/mm²]											
3,00												
2,50 2	,43 2,43	2,/1 2,/1										
2,00		2,29 2,25										
1.50												
1.00												
1,00	Druckfestig	keit (ungerundet)										
0,50												
0,00												
POBE 2	12 00BE 2.12	DEE 2.3 POBE 2.4 POBE 2.5 POBE 2.6										
	ψ	şı. şı.										
	1	2 3										
N	I F = 3601,8	$F_u = 3733,8$ $F_u = 4048,6$										
N/mm²	<i>f</i> = 2,43	$f_{u} = 2,43$ $f_{u} = 2,71$										
N	F = 4037.5	$F_{u} = \begin{bmatrix} 3429.6 \\ F_{u} = \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 33.5 \\ F_{u} = \end{bmatrix}$										
N/mm ²	f = 2.71	$f_{\rm u} = 2.29$ $f_{\rm u} = 2.25$										
	J _,	yu _,										
Mittelwert der Druckfestigkeit												
f (N/mm²)	2,47	Bemerkungen:										
gerundet nach EN 1	015-11 2.5											

Abbildung 3-18: Druckfestigkeit Probe 2

	Probedaten										
Mischgutbezeichnung:	Probe 4										
Gesteinsart:	Quarzsan	1	Lage	erung : I	bis Mass	senkonstanz	bei 23°C und 50% rel.F.				
Rohdichte	1,11 kg/dm ³			oreitmaß		180 mm					
Zusatzmittel:	Porenbildn	er	Alter	des Mörte	ls:	28 Tage					
Probekörpernummer:	1 bis 6										
		Pri	ferge	bnisse							
		Druckfesti	gkeite	n [N/mm²]						
1,00											
0,98		0,98					0,98				
0,96			0,96	0,	96						
0,94			—								
0,92 0	.92					0,93					
0.90		 Druckfestigkei 	t (ungeru	ndet)							
0.88											
0,00	7	. 2	13	N	*	15	6				
PROBE	PRO	BE	M -	PROBE		PROBE	PROBE				
		1		2		3					
N	F = 1	1384,9 F,	= 15	17,5	F	u= 1141,1					
N/mm ²	f=	0,92 f	,= ` (,98	f	°_= 0,96					
	-				-						
N	F=	1161.9 F	= 11	01.5	F	= 1122 /					
N/mm ²	r='	0.96	- 6	01,5		c = 0.08					
19/11011	<i>J</i> –	0,30 J	,- ·	,55)	u [_] 0,30					
		Mittelwert	der 🛙	ruckfes	tigkeit	t					
f (N/mm²) 0,96			Ben	erkungen:							
gerundet nach EN 1015-11 10											

Abbildung 3-19: Druckfestigkeit Probe 4

	Probedaten											
Mischgutbezeichn	ung: I	Probe 1										
Gesteinsart:	(Quarzsan	ł		Lagerung : bis Massenkonstanz bei 23°C und 50% rel.F.							
Rohdichte	1	1,43 kg/dm	1 ³		Ausbreitr	naß	1	75 mm				
Zusatzmittel:	F	Porenbildn	er		Alter des	Mörtels:	2	8 Tage				
Probekörpernummer: 1 bis 3												
					<u> </u>							
	Fruiergebnisse											
	Biegezugugfestigkeiten [N/mm²]											
1,40							Biegezi	ugfestigke	it (ungeru	ndet)		
1,35		1,35					Dieger	agresegie	in (dinger d	nocy		
1,30					1,30							
1,25											-	
1,20											-	
1,15									1,15		_	
1,10									T		_	
1,05 -												
	6	PROBE 1.1			PROBE 1.2			PROBE	1.3			
N	N /mm²	F = ' f = '	1 532,5 1,35	F _u = <i>f</i> u ⁼	2 508,7 1,30		F _u = <i>f</i> u ⁼	3 441,7 1,15				
	mm	b=	38,8	b=	38,2		b=	38,2				
	mm	d=	39,0	d=	39,2		d=	38,5				
	mm	I=	100,0	=	100,0		=	100,0				
			Mittelv	vert der	Biegez	ugfesti	gkeit					
f (N/mm²) 1,27			27	Bemerku	ngen:							
gerundet nach	EN 10'	15-11	1,	3								

Abbildung 3-20: Biegezugfestigkeit Probe 1

		I	Probeda	ten								
Mischgutbezeichnung	Probe 2											
Gesteinsart:	Quarzsan	d	Lageru	Lagerung : bis Massenkonstanz bei 23°C und 50% rel.F.								
Rohdiche	1,33 kg/dn	n³	Ausbre	itmaß	178 mm							
Zusatzmittel:	Porenbildr	ner	Alter de	es Mörtels:	28 Tage							
Probekörpernummer:	Probekörpernummer: 1 bis 3											
		Pr	üfergeb	nisse								
		Biegezugu	gfestigke	iten [N/mm²]								
1,00			0,	98 • Bie	gezugfestigkeit	(ungerundet)						
0,95	0,95											
0,90												
0,85						0,86						
0,80												
	PROBE 2.1		PROBE 2.	1	PROBE	L ³						
N/mn	N F= n² f=	1 363,3 F 0,95 <i>f</i>	2 u = 376, u = 1,00	7 F _u) ƒ _u	3 = 331,4 = 0,85							
m	m b=	38.3	b= 38.	7 b	= 38.8							
m	m d=	38.7	d= 38.6	b 6	= 38.6							
m	m l=	100.0	I= 100	0 1	= 100.0							
		100,0		- · ·	100,0							
	Mittelwert der Biegezugfestigkeit											
f (N/mm ²	;)	0,93	Bemer	kungen:								
gerundet nach EN	1015-11	0,9										

Abbildung 3-21: Biegezugfestigkeit Probe 2

		P	ro	bedaten					
Mischgutbezeichnung:	Probe 4								
Gesteinsart:	Quarzsand			Lagerung : bis Massenkonstanz bei 23°C und 50% rel.F.					
Rohdichte	1,11 kg/dm	1 ³		Ausbreitmaß 180 mm					
Zusatzmittel:	Pornbildne	r		Alter des Mörtels:	2	8 Tage			
Probekörpernummer:	1 bis 3								
		Prü	ife	rgebnisse					
		Biegezugu	gfe	stigkeiten [N/mn	n²]				
0,68 p	0.67			0			P		
0,66	0,07				Biegezu	ugfestigkei	t (ungerundet)		
0,64									
0,62									
0,60 0									
0,58				0,57			0,58	Π	
0.54									
0,52									
	- A.1			c. 4.2			A.3		
	PROBE		1	PROBE		PROBL			
Ľ									
		1		2		3			
N	F=	360.1 F.	='	223.1	F.,="	230.5			
N/mm ²	· +='	090 f	' ='	0.55	£ =	0.60			
	<i>J</i>	0,00)	u	0,00	Ju	0,00			
mm	b=	38,6)=	38,4	b=	38,2			
mm	d=	39,0 0	d=	39,1	d=	39,5			
mm	I=	100,0	=	100,0	=	100,0			
		Mittelwert d	er	Biegezugfesti	gkeit				
f (N/mm²)		0,68		Bemerkungen:					
gerundet nach EN 1	015-11	0,7							

Abbildung 3-22: Biegezugfestigkeit Probe 4

Nach DIN EN 998-1:2010-12 wird für Normalputz Kategorie CS I bis CS IV und für Sanierputzmörtel Kategorie CS II für die Druckfestigkeit gefordert.

Die Putzproben 1 und 2 erreichen die Druckfestigkeitsklasse CS II, die Proben 4 fällt in Kategorie CS I.

3.5 Wasserrückhaltevermögen von Frischmörtel

Das Wasserrückhaltevermögen wurde in Anlehnung an die ÖNORM EN 1015-8 bestimmt. Dabei wird der Frischmörtel in einen Kunststoffring gefüllt, der auf einem Faservlies und einer Filterplatte aufliegt. Nach fünf Minuten Gesamtsaugzeit wird die Masse der Filterplatte bestimmt.

Das Wasserrückhaltevermögen von Frischmörtel ist der in Prozent ausgedrückte Wasseranteil, der nach dem kurzzeitigen Wasserentzug durch Filterpapier im Mörtel verbleibt. Ein auf eine definierte Konsistenz eingestellter Frischmörtel wird einer Saugbeanspruchung ausgesetzt, wobei genormtes Filterpapier als Unterlage verwendet wird.

Das Wasserrückhaltevermögen einer definierten Mörtelprobe wird durch die Wassermenge bestimmt, die nach der Norm-Saugbeanspruchung noch im Mörtel verbleibt. Es wird als prozentueller Anteil des ursprünglichen Wassergehaltes ausgedrückt.

Es wurden folgende Wasserrückhaltevermögen – WRV nach ÖNORM EN 1015-8 ermittelt:

- Probe 1 WRV = 61,5 %
- Probe 2 WRV = 60,5 %
- Probe 4 WRV = 60,8 %

3.6 Sorption

Die Sorption beschreibt quantitativ die Anlagerung von Wassermolekülen auf den inneren Oberflächen poröser Baustoffe.

Auch das Sorptionsverhalten ist mit entscheidend für das Raumklima.

Es wurde das Sorptionsverhalten der 3 Putzsysteme bestimmt und gegenübergestellt.

Es wurden je 4 Proben der 3 zu untersuchenden Putze unter jeweils 4 unterschiedlichen klimatischen Bedingungen geprüft.

Ziel waren die Bestimmung und der Vergleich des Sorptionsverhaltens der 3 Putze.

Das Sorptionsverhalten der Putzproben wurde nach EN ISO 12571 bestimmt.

3.6.1 Prüfaufbau

Es war das Sorptionsverhalten von "getrockneten" Putzproben unter 4 verschiedenen klimatischen Bedingungen zu bestimmen:

- 33% rel. Luftfeuchtigkeit
- 53% rel. Luftfeuchtigkeit
- 75% rel. Luftfeuchtigkeit
- 93% rel. Luftfeuchtigkeit

Die jeweiligen relativen Luftfeuchtigkeiten wurden durch gesättigte Salzlösungen eingestellt, die gemeinsam mit den Proben in luftdicht verschlossene Kunststoffbehälter gestellt wurden.

Die Klimawerte (rel. Luftfeuchtigkeit, Temperatur) wurden kontinuierlich überwacht und protokolliert.

Die relative Luftfeuchtigkeit wurde durch gesättigte Lösungen mit folgenden Salzen hergestellt:

- 33% rel. Luftfeuchtigkeit Magnesiumchlorid MgCl2.6H2O
- 53% rel. Luftfeuchtigkeit Magnesiumnitrat Hexahydrat Mg(NO₃)₂·6H₂O
- 75% rel. Luftfeuchtigkeit Natriumchlorid NaCl
- 93% rel. Luftfeuchtigkeit Kaliumnitrat KNO3

Bei der Herstellung der gesättigten Lösung mit Magnesiumchlorid wurde zu wenig Wasser verwendet, wodurch sich nicht die gewünschte Luftfeuchtigkeit von 33% einstellte, sondern lediglich eine Luftfeuchtigkeit von 9%. Da diese jedoch über den Messzeitraum konstant blieb, wurde daher die Luftfeuchtigkeit von 9% für die Betrachtung der Ergebnisse herangezogen. Es wurden für jede der 4 relativen Luftfeuchten jeweils 4 Proben der 3 Putze vorbereitet, indem diese im Trockenschrank bis zur Massekonstanz bei 105°C getrocknet wurden.

Da die Proben für die Bestimmung des Sorptionsverhaltens mit einer Größe von ca. 25/25/25mm sehr klein sind und durch Ungenauigkeiten beim Messen der Geometrie große Fehler zu erwarten waren, wurde die Trockenrohdichte mit gleichzeitig bis zur Massekonstanz mitgetrockneten Putzproben derselben Herstellungscharge, jedoch mit einer Masse von ca. 250g (37/52/100mm), bestimmt.

Die Massekonstanz wurde durch regelmäßiges Wägen festgestellt.



Abbildung 3-23: Trockenschrank, 105°C



Abbildung 3-24: Proben im Trockenschrank

Probe		Masse [g]	
	02.07.2015	06.07.2015	09.07.2015
1	258,321	256,434	256,39
2	211,077	209,685	209,66
4	265,944	263,852	263,84

Probe Massendifferenz [g] $\Delta m_{zul.}(0,1\%)$ 06.07.2015 09.07.2015 0,256434 1,887 0,044 1 2 0,209685 1,392 0,025 4 0,263852 2,092 0,012

Tabelle 3-14: Trocknung bis Massekonstanz



Abbildung 3-25: Trockenrohdichte Probe 1



Abbildung 3-26: Trockenrohdichte Probe 2



Abbildung 3-27: Trockenrohdichte Probe 4



Abbildung 3-28: Putzproben im Trockenschrank



Abbildung 3-29: Putzproben mit gesättigter Salzlösung

Nach Erreichen der Massekonstanz wurden die Proben in die vorbereiteten Kunststoffbehälter mit den gesättigten Salzlösungen für die jeweilige rel. Luftfeuchtigkeit gelegt und die Deckel luftdicht verschlossen.

Die Proben wurden regelmäßig bis zur Massekonstanz gewogen sowie Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den Behältern gemessen.



Abbildung 3-30: Wägen der Proben



Abbildung 3-31: Messung Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den Probenbehältern

3.6.2 Messergebnisse

	18.06.2015 ,		22.06.2015 ,		25.06.2015 ,		26.06.2015 ,		₀m-(m-m₀)/m₀	Durchschnitt
Probe	m ₀	rel. F.	m	Δm	m	∆m	m	Δm		
	[g]	%	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]		
·1	27,383	9%	27,400	0,017	27,402	0,002	27,405	0,003	0,0007	
1	25,068	9%	25,076	0,008	25,077	0,001	25,082	0,005	0,0004	
1	15,948	9%	15,940	-0,008	15,940	0,000	15,942	0,002	-	
····1	14,916	9%	14,905	-0,011	14,905	0,000	14,907	0,002	-	0,0003
1.	26,09	53%	26,227	0,137	26,223	-0,004	26,224	0,001	0,005	
1	25,102	53%	25,226	0,124	25,224	-0,002	25,222	-0,002	0,005	
1	15,088	53%	15,182	0,094	15,181	-0,001	15,177	-0,004	0,006	
1	16,156	53%	16,243	0,087	16,240	-0,003	16,240	0,000	0,005	0,00533
.1	25,368	75%	25,521	0,153	25,519	-0,002	25,516	-0,003	0,006	
1	26,944	75%	27,121	0,177	27,120	-0,001	27,117	-0,003	0,007	
1	25,205	75%	25,366	0,161	25,363	-0,003	25,365	0,002	0,006	
1	16,145	75%	16,264	0,119	16,267	0,003	16,265	-0,002	0,008	0,00658
1.	26,189	93%	26,820	0,631	26,871	0,051	26,869	-0,002	0,026	
1	25,964	93%	26,241	0,277	26,258	0,017	26,259	0,001	0,011	
1	24,169	93%	24,420	0,251	24,434	0,014	24,434	0,000	0,011	
1	17,261	93%	17,525	0,264	17,537	0,012	17,532	-0,005	0,016	0,01608

Tabelle 3-15: Messwerte Sorption Probe 1

	18.06.2015		22.06.2015		25.06.2015		26.06.2015		n=(m-m₀)/m₀	Durchschnitt
Probe	m₀	rel. F.	m	∆m	m	Δm	m	∆m		
	[g]	 %	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]		
·2	28,789	9%	28,788	- 0,001	28,787	- 0,001	28,790	0,003	- 0,000	
2	27,086	9%	27,071	۔ 0,015	27,070	- 0,001	27,073	0,003	- 0,001	
2	29,076	9%	29,065	- 0,011	29,070	0,005	29,075	0,005	- 0,000	
····2	13,822	9%	13,800	- 0,022	13,800	0,000	13,801	0,001	- 0,002	0
2 [.]	28,201	 53%	28,329	0,128	28,324	- 0,005	28,320	- 0,004	0,004	
2	29,543	53%	29,675	0,132	29,673	- 0,002	29,671	- 0,002	0,004	
2	27,525	53%	27,732	0,207	27,729	- 0,003	27,730	0,001	0,007	
2	13,838	53%	13,886	0,048	13,883	- 0,003	13,885	0,002	0,003	0,004856
						-				
.2	27,019	75%	27,163	0,144	27,162	0,001	27,164	0,002	0,005	
2	27,415	75%	27,563	0,148	27,562	- 0,001	27,563	0,001	0,005	
2	15,416	75%	15,518	0,102	15,516	- 0,002	15,518	0,002	0,006	
2	14,79	 75%	14,879	0,089	14,876	- 0,003	14,876	0,000	0,006	0,005739
2.	27,099	93%	27,359	0,260	27,385	0,026	27,383	- 0,002	0,011	
2	27,518	93%	27,794	0,276	27,817	0,023	27,818	0,001	0,011	
2	12,047	93%	12,175	0,128	12,184	0,009	12,177	- 0,007	0,011	
2	12,539	93%	12,669	0,130	12,680	0,011	12,677	- 0,003	0,011	0,011009

Tabelle 3-16: Messwerte Sorption Probe 2

	3.06.2015		.06.2015		.06.2015		5.06.2015		n-m₀)/m₀	chscnitt
	18		22		25		26		n=(r	Dur
Probe	m ₀	rel. F.	m	∆m	m	∆m	m	∆m		
	[g]	%	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]		
·4	21,453	9%	21,414	- 0,039	21,413	- 0,001	21,419	0,006	- 0,002	
4	23,621	9%	23,591	- 0,030	23,590	- 0,001	23,592	0,002	- 0,001	
4	17,769	9%	17,736	- 0,033	17,735	- 0,001	17,731	- 0,004	- 0,002	
4	17,153	9%	17,127	- 0,026	17,125	- 0,002	17,127	0,002	- 0,002	0
4 [.]	20,619	53%	20,643	0,024	20,614	- 0,029	20,595	- 0,019	0,001	
4	23,051	53%	23,105	0,054	23,099	- 0,006	23,099	0,000	0,002	
4	17,367	53%	17,472	0,105	17,472	0,000	17,469	- 0,003	0,006	
4	18,494	53%	18,616	0,122	18,615	- 0,001	18,614	- 0,001	0,007	0,003959
.4	25,915	75%	26,016	0,101	26,014	- 0,002	26,013	- 0,001	0,004	
4	22,608	75%	22,695	0,087	22,692	- 0,003	22,691	- 0,001	0,004	
4	17,66	75%	17,856	0,196	17,859	0,003	17,864	0,005	0,011	
4	16,75	75%	16,837	0,087	16,834	- 0,003	16,836	0,002	0,005	0,005955
4.	25,106	93%	25,316	0,210	25,339	0,023	25,336	0,003	0,009	
4	21,97	93%	22,452	0,482	22,487	0,035	22,483	- 0,004	0,024	
4	22,473	93%	22,957	0,484	22,993	0,036	22,990	- 0,003	0,023	
4	19,343	93%	19,711	0,368	19,739	0,028	19,741	0,002	0,020	0,019106

Tabelle 3-17: Messwerte Sorption Probe 4

Veranschaulichung der Ergebnisse:



Diagramm 3-2: Sorptionsisotherme



Diagramm 3-3: Sorptionsisotherme von Lehmputz im Vergleich zu konventionellen Putzen³

Anhand *Diagramm 3-2: Sorptionsisotherme* ist gut erkennbar, dass alle 3 untersuchten Putze ein wesentlich besseres Sorptionsverhalten als herkömmliche Gips- oder Kalk-Zement-Putze aufweisen, und auch über den Werten des Lehmputzes liegen. Dies zeigt sich im für Wohnräume relevanten Luftfeuchtebereich von 50% – 70% rel. Feuchte.

³ Moderner Lehmbau – Tagungsband 2002, Holl / Ziegert: Vergleichende Untersuchungen zum Sorptionsverhalten von Werktrockenmörteln, Fraunhofer IRB Verlag

3.7 Wasseraufnahmekoeffizient

Als eine für die Funktionsfähigkeit des Putzes entscheidende Größe wurde auch der Wasseraufnahmekoeffizient der 3 Putzsysteme bestimmt und gegenübergestellt.

Es wurden je 3 Proben der 3 zu untersuchenden Putze geprüft.

Ziel waren die Bestimmung und der Vergleich des Wasseraufnahmekoeffizienten der 3 Putze.

Der Wasseraufnahmekoeffizient der Putzproben wurde nach EN ISO 15148 bestimmt.



3.7.1 Prüfaufbau

Abbildung 3-32: Messaufbau Wasseraufnahmekoeffizient

Der Prüfaufbau besteht aus einem Traggestell mit dem Wiegebalken, einem Wasserbecken mit Überlauf, einem Ausgleichsgefäß und einer Pumpe.

Der Wiegebalken ist mit einem Computer verbunden, der alle 10s die Daten speichert.

Durch das Ausgleichsgefäß und die Pumpe ist sichergestellt, dass der Wasserspiegel im Prüfbecken während der gesamten Messdauer konstant ist.



Abbildung 3-33: Einrichten der Probe



Abbildung 3-34: Probe mit ALU- und Kunststoffolie beim Einrichten über dem Wasserbecken



Abbildung 3-35: Einrichten der Probe



Mit Hilfe des Metalltisches, der in das Wasserbecken unterhalb der auf Nylonfäden am Wiegebalken aufgehängten Probe aufgestellt wird, kann die Probe eingerichtet werden.

Die Probe muss waagrecht ca. 5 mm ins Wasser eintauchen.

Die Proben wurden zuvor bis ca. 10 mm oberhalb der Fläche, die ins Wasser eintaucht, mit ALU-Folie und Frischhaltefolie eingewickelt, um Masseänderungen aufgrund oberflächlicher Verdunstung an den Seitenflächen der Proben zu verhindern.

Die Messung muss gemäß EN ISO 15148 für mindestens 24 Stunden andauern.

3.7.2 Messergebnisse

Probe 1.5										
Im Klimaraun	n bei 46% 22	°C gelagert								
792,92g, 100.6 mm x 50.1 mm										
121.6 mm Höhe										
Mit Alufolie u	und Frischha	ltefolie umhül	lt.							
Datum	Zeit	Zeit [min]	Masse [g]							
18.06.2015	10:13:12	0	994							
18.06.2015	10:14:52	2	985,3							
18.06.2015	10:16:32	3	987,5							
18.06.2015	10:18:12	5	988,7							
18.06.2015	10:19:52	7	989,6							
18.06.2015	10:21:32	8	990,3							
18.06.2015	10:23:12	10	991							
18.06.2015	10:24:52	12	991,6							
18.06.2015	10:26:32	13	992,1							
18.06.2015	10:28:12	15	992,6							
18.06.2015	10:29:52	17	992,9							
18.06.2015	10:31:32	18	993,4							
18.06.2015	10:33:12	20	993,7							
18.06.2015	10:34:52	22	994,1							
18.06.2015	10:36:32	23	994,2							
18.06.2015	10:38:12	25	994,4							
18.06.2015	10:39:52	27	994,4							
18.06.2015	10:41:32	28	994,6							
18.06.2015	10:43:12	30	994,8							
18.06.2015	10:44:52	32	995							
18.06.2015	10:46:32	33	995							
18.06.2015	10:48:12	35	995 <i>,</i> 3							

Tabelle 3-18: Gekürzter Auszug aus dem Wiegeprotokoll



Diagramm 3-4: Masseänderung Probe 1.1



Diagramm 3-5: Wasseraufnahme Probe 1.1, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasser	Wasseraufnahmekoeffizient								
Δm		Δm_t							
[kg]	[h ^{0,5}]	[kg/m²]							
	0	1,196							
0,0068	0,577	1,303							
0,0105	1,000	2,013							
0,0129	1,414	2,473							
0,0159	2,000	3,048							
0,0188	2,828	3,604							
0,0226	4,000	4,332							
0,026	4,899	4,984							
w _w =	0,77	kg/(m ² h ^{0,5})							



Diagramm 3-6: Masseänderung Probe 1.3



Diagramm 3-7: Wasseraufnahme Probe 1.3, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasseraufnahmekoeffizient						
Δm	Δm _t					
[kg]	[h ^{0,5}]	[kg/m²]				
	0	2,095				
0,0115	0,577	2,185				
0,0162	1,000	3,078				
0,0188	1,414	3,573				
0,0224	2,000	4,257				
0,0256	2,828	4,865				
0,0304	4,000	5,777				
0,034	4,899	6,461				
w _w =	W _w = 0,89 kg/(m ² h ^{0,5})					

Tabelle 3-20: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 1.3







Diagramm 3-9: Wasseraufnahme Probe 1.5, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasseraufnahmekoeffizient					
Δm	Δm_t				
[kg]	[h ^{0,5}]	[kg/m²]			
	0	1,394			
0,0084	0,577	1,667			
0,013	1,000	2,579			
0,0153	1,414	3,036			
0,0206	2,000	4,087			
0,0258	2,828	5,119			
0,0305	4,000	6,052			
0,0346	4,899	6,865			
W _w = 1,12 kg/(m ² h ^{0,5})					



Diagramm 3-10: Masseänderung Probe 2.1



Diagramm 3-11: Wasseraufnahme Probe 2.1, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasseraufnahmekoeffizient						
Δm	Δm _t					
[kg]	[h ^{0,5}] [kg/m ²]					
	0	0,891				
0,006	0,577	1,164				
0,0106	1,000	2,056				
0,0139	1,414	2,696				
0,0183	2,000	3,549				
0,0232	2,828	4,500				
0,0289	4,000	5,605				
0,0332	4,899	6,439				
w _w =	W _w = 1,13 kg/(m ² h ^{0,5})					



Diagramm 3-12: Masseänderung Probe 2.4



Diagramm 3-13: Wasseraufnahme Probe 2.4, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasseraufnahmekoeffizient						
Δm		Δm_t				
[kg]	[h ^{0,5}]	[kg/m²]				
	0	1,949				
0,012	0,577	2,327				
0,0177	1,000	3,433				
0,0223	1,414	4,325				
0,0295	2,000	5,722				
0,0372	2,828	7,215				
0,0439	4,000	8,515				
0,0487	4,902	9,446				
W _w = 1,53 kg/(m ² h ^{0,5})						



Diagramm 3-14: Masseänderung Probe 2.5



Diagramm 3-15: Wasseraufnahme Probe 2.5, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasseraufnahmekoeffizient							
Δm	Δm _t						
[kg]	[h ^{0,5}]	[kg/m²]					
	0	1,257					
0,0078	0,577	1,529					
0,0121	1,000	2,372					
0,0156	1,414	3,059					
0,0191	2,000	3,745					
0,0243	2,828	4,764					
0,0301	4,000	5,901					
0,0336	4,899	6,588					
w _w =	W _w = 1,09 kg/(m ² h ^{0,5})						



Diagramm 3-16: Masseänderung Probe 4.1



Diagramm 3-17: Wasseraufnahme Probe 4.1, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasseraufnahmekoeffizient						
Δm	Δm_t					
[kg]	[h ^{0,5}]	[kg/m²]				
	0	0,055				
0,0008	0,577	0,163				
0,0012	1,000	0,244				
0,0017	1,414	0,346				
0,0025	2,000	0,509				
0,0034	2,828	0,692				
0,0047	4,000	0,957				
0,0051	4,899	1,038				
W _w = 0,20 kg/(m ² h ^{0,5})						



Diagramm 3-18: Masseänderung Probe 4.2



Diagramm 3-19: Wasseraufnahme Probe 4.2, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasseraufnahmekoeffizient						
Δm	Δm _t					
[kg]	[h ^{0,5}]	[kg/m²]				
	0	0,891				
0,006	0,577	1,164				
0,0106	1,000	2,056				
0,0139	1,414	2,696				
0,0183	2,000	3,549				
0,0232	2,828	4,500				
0,0289	4,000	5,605				
0,0332	4,899	6,439				
W _w = 1,13 kg/(m ² h ^{0,5})						



Diagramm 3-20: Masseänderung Probe 4.5



Diagramm 3-21: Wasseraufnahme Probe 4.5, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 15148:2002

Wasseraufnahmekoeffizient						
Δm	Δm _t					
[kg]	[h ^{0,5}]	[kg/m²]				
	0	0,331				
0,0009	0,577	0,175				
0,0032	1,000	0,621				
0,007	1,414	1,358				
0,0084	2,000	1,629				
0,0094	2,828	1,823				
0,0101	4,000	1,959				
0,013	4,899	2,521				
W _w = 0,45 kg/(m ² h ^{0,5})						

3.7.3 Interpretation der Messergebnisse

Entsprechend DIN 4108-3:2012 (Punkt 6.2 – Beanspruchungsgruppen) sollten für den Alpenraum, Alpenvorland, Gegenden mit Niederschlägen > 800 mm/a oder windreiche Gebiete (Beanspruchungsgruppe III – starke Schlagregenbeanspruchung) wasserabweisenden Putze ($W_w < 0.5 kg/(m^2h^{0.5})$), und für Beanspruchungsgruppe II - mittlere Schlagregenbeanspruchung - wasserhemmende Putze ($0.5 < W_w < 2.0 kg/(m^2h^{0.5})$) verwendet werden.

Die erforderlichen Werte für Beanspruchungsgruppe III erreichen nur Proben 4.1 und 4.5.

Die restlichen Proben fallen unter die Kategorie "wasserhemmende Putze."

Diese Putze sollte daher durch eine diffusionsoffene, wasserabweisende Deckschicht geschützt werden.

Mittelwerte:

Probe 1:	0,93 kg/(m²h ^{0,5})

Probe 4: 0,59 kg/(m²h^{0,5})

3.8 Bestimmung der Porenradiusverteilung

Die Porenradiusverteilung eines Baustoffes dient der Beschreibung seiner kapillaren Leitfähigkeit und ist maßgeblich für den Feuchtigkeitstransport verantwortlich.

Für Putze auf Wand- oder Dämmsystemen aus nachwachsenden Rohstoffen ist die Porenradiusverteilung insofern besonders wichtig, weil diese ein Maßstab für die Fähigkeit eines Putzes ist, eingedrungene Feuchtigkeit möglichst rasch aus kritischen Bereichen abzutransportieren.

Die Porenradiusverteilung der 3 Putzsysteme wurde mit Hilfe einer Saugspannungsanlage bestimmt.

Es wurden je 3 Proben der 3 zu untersuchenden Putze geprüft.

Ziel waren die Bestimmung und der Vergleich der Porenradiusverteilung der 3 Putze.

3.8.1 Grundlagen zur Messung der Saugspannung – Bestimmung der Porenradienverteilung⁴

Der Feuchtehaushalt poröser mineralischer Baustoffe wird durch die Feuchtespeichereigenschaften sowie die im Baustoff in flüssiger und gasförmiger Phase ablaufenden Feuchtetransportvorgänge bestimmt. Da unter natürlichen bauphysikalischen Bedingungen eine Befeuchtung mineralischer Baustoffe über die freie Sättigung nur in Ausnahmefällen auftritt, sind der Sorptionsfeuchtebereich und der Kapillarwasserbereich von besonderer Bedeutung. Die Bestimmung der Sorptionsisotherme ist bereits hinlänglich bekannt und das Messverfahren bereits normiert. Die Feuchtespeicherfunktion im Kapillarwasserbereich wird mit Hilfe einer Saugspannungsmessanlage bestimmt.

Bei kapillarporösen, hygroskopischen Materialien mit steigender Porengrößenverteilung kann jedem Wassergehalt bis hin zur freien Sättigung jeweils eine maximal noch mit Wasser gefüllte Porengröße zugeordnet werden. Für den Bereich der überhygroskopischen Feuchte ergibt sich eine charakteristische Abhängigkeit, die sogenannte Kapillardruck- oder Saugspannungskurve. Mit Hilfe der Saugspannungsmessanlage wird diese Kurve durch Entfeuchten anfänglich gesättigter Proben durch das Aufbringen verschiedener Überdrücke ermittelt, indem für jede Druckstufe der entsprechende Gleichgewichtswassergehalt bestimmt wird. Jedem Druck kann ein Kapillarradius zugeordnet werden. Es ergibt sich für Wasser in den zu untersuchenden Stoffen folgende Näherungsgleichung 1:

⁴ u.a. nach Krus, M.: *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken,* Universität Stuttgart, Dissertation, 1995

$$r = 1,5.10^{-6} / P_{\ddot{U}}$$
 (1)

r [m] Porenradius

Pü [bar] angelegter Überdruck

Jedem Druck kann ein Radius zugeordnet werden, bis zu dem alle größeren Poren durch den jeweiligen Druck entleert sind (siehe Gleichung 1). In Tabelle 1 sind beispielhaft einige Porenradien in Abhängigkeit vom angelegten Druck zusammengefasst.

Druck	0	10	30	50	75	100
[bar]	0	10	30	50	75	100
Porenradius					0.05.00	
[m]	1.0E-03	1.5E-07	5.0E-08	3.0E-08	2.0E-08	1.5E-08

Tabelle 3-28: Anhand der Formel 1 ermittelte Porenradien

Anhand der Ergebnisse der Saugspannungsmessung kann die Feuchtespeicherfunktion für den überhygroskopischen Bereich berechnet werden, die für die rechnerische Erfassung und Simulation von Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen und Bauteilen unerlässlich ist. Bei der Saugspannungsmessung ist es möglich, im Gegensatz zur ebenfalls einsetzbaren Quecksilberdruckporosimetrie, nur den für natürliche Feuchtespeichervorgänge zur Verfügung stehenden Porenraum zu erfassen, indem von frei wassergesättigten Proben ausgegangen wird.

Die Feuchtespeicherfunktion kann messtechnisch zusammengesetzt werden aus Sorptionsisothermen bis ca. 0,9 relative Feuchtigkeit und Saugspannungsmessungen über 0,95 relative Feuchtigkeit. Die Hysterese zwischen Absorptions- und Desorptionsisothermen ist meistens so gering ausgeprägt, dass die Verwendung der Absorptionsisotherme ausreichend ist. Ggf. kann eine mittlere Sorptionsisotherme verwendet werden. Bei den Saugspannungsmessungen handelt es sich messtechnisch bedingt um Desorptionswerte.
3.8.2 Prüfaufbau

Das Probenmaterial hat einen Durchmesser von ca 50mm und eine Dicke von ca 10mm. Es wurden je Putzmischung 3 Proben verwendet.

Von den Proben wird die Trockenmasse bestimmt, danach werden die Proben für 24 Stunden in destilliertes Wasser eingelegt, bis diese unter Normaldruck gesättigt sind.



Abbildung 3-37: Proben in destilliertem Wasser

Druck bis 5 bar:

Der Prüfaufbau besteht aus einem 5 bar - Drucktopf, der von einem Kompressor und einer Druckregeleinrichtung mit Druckluft versorgt wird.



Abbildung 3-38: Drucktopf bis 5 bar, Druckregeleinrichtung



Abbildung 3-39: Keramikplatte nach dem Wässern, mit Kaolin und Abdecktuch

In den Drucktopf wird eine Keramikplatte gelegt, die zuvor ebenfalls 24 Stunden in destilliertem Wasser liegen muss. Auf die Keramikplatte wird eine dünne Schicht Kaolin aufgebracht.

Das Kaolin wird mit feuchtem Stoff abgedeckt, damit kein Material an den Proben haften bleiben, die das Messergebnis verfälschen würden.



Abbildung 3-40: Proben im Drucktopf

Bevor die Proben auf die abgedeckte Keramikplatte gelegt werden, werden diese vorsichtig abgetupft und gewogen.



Abbildung 3-41: Wiegen der Proben

Nachdem die Proben in den Drucktopf eingebracht sind und dieser dicht verschlossen ist, wird Druck angelegt, der für mindestens 24 Stunden aufrecht erhalten wird.

Durch den Überdruck wird aus den Proben Kapillarwasser ausgepresst, das über den Entwässerungsschlauch abrinnt. Wenn kein Wasser mehr austritt, sind alle Poren, die dem eingestellten Druck entsprechen, geleert.

Wenn kein Wasser mehr austritt, wird der Druck abgelassen, die Proben werden gewogen und wieder in den Drucktopf gelegt. Durch die Wägung ergibt sich der der Druckstufe entsprechende Wasserverlust. Nach dem Verschließen wird die nächsthöhere Druckstufe eingestellt.

Für Drücke über 5 bar wird ein 100 bar - Drucktopf verwendet, der Druck wird von einer Stickstofflasche bereitgestellt.



Abbildung 3-42: 100 bar Drucktopf mit Zellulosefolie, Kaolin, Proben und Abdecktuch



Abbildung 3-43: Verschlossener Drucktopf, Manometer der Stickstofflasche

Beim 100 bar – Drucktopf wird anstelle der Keramikplatte eine Zellulosefolie, die ebenfalls zumindest 24 Stunden in destilliertem Wasser eingeweicht werden muss, verwendet. Diese wird auf eine Membran gelegt und mittels einer Dichtung beim Verschießen des Drucktopfes dicht angeschlossen.

Durch diese eingeweichte Zellulosefolie kann nun nur noch Wasser, jedoch keine Luft dringen.

Aus den Messwerten für den Gewichtsverlust lässt sich für jede Druckstufe und nach Gleichung 1 für den entsprechenden Kapillarradienbereich das zugehörige Porenvolumen bzw. bezogen auf die Gesamtporosität der relative Porenanteil bestimmen.

Es wurden folgende Druckstufen eingestellt:

- 0,2 bar
- 0,5 bar
- 1,0 bar
- 5,0 bar
- 10,0 bar
- 20,0 bar
- 30,0 bar
- 40,0 bar
- 50,0 bar

3.8.3 Messergebnisse



Tabelle 3-29: Veranschaulichung der Messergebnisse















Tabelle 3-33: Wassergehalt in Abhängigkeit vom Druck, Probe 1



Tabelle 3-34: Wassergehalt in Abhängigkeit vom Druck, Probe 2



















Tabelle 3-39: Gegenüberstellung der Mittelwerte, Wassergehalt/Porenradius

3.8.4 Interpretation der Messergebnisse

Poren mit einem Radius kleiner als 10⁻⁷ m werden als Mikroporen bezeichnet und Poren mit einem kleineren Radius als 10⁻⁹ m als Gelporen. Für die kapillare Wasseraufnahme und den -transport sind sie nicht geeignet. Wasser kann in diese Porenräume nur als Wasserdampf eindringen. Die Baustoffe mir diesen Poren können als kapillarwasserundurchlässig eingestuft werden, da sie nicht in der Lage sind, Wasser auf kapillarem Weg aufzunehmen.

Poren mit einem Radius zwischen 10⁻⁷ und 10⁻⁴ m werden als Makro- oder Kapillarporen bezeichnet. Diese Poren sind für die kapillare Wasseraufnahme geeignet und in der Lage, Wasser und andere Flüssigkeiten im Baustoff zu transportieren. Das bedeutet andererseits, dass diese Baustoffe nicht nur kapillarem Wasser zugänglich sind, sondern auch ohne großen Aufwand imprägniert oder injiziert werden können.

Als Luftporen werden Poren bezeichnet, die einen Radius größer als 10-4 m besitzen, der sich demnach im Millimeterbereich befindet. Diese Poren sind für die kapillare Wasseraufnahme ebenfalls ungeeignet. Wie bei den Micro- und Gelporen kann auch in den Luftporen ein Feuchtetransport nur durch gasförmigen Wasserdampf stattfinden oder unter Druck in flüssiger Form (z.B. Schlagregen).

Bei den Porensystemen wird im Allgemeinen zwischen geschlossenen und offenen Poren und zwischen durchgehenden und den so genannten Sackporen unterschieden; in zementgebundenen Werkstoffen außerdem noch zwischen den gewöhnlichen und den künstlichen Luftporen. Das Porenvolumen allein genügt aber noch nicht zur Charakterisierung der Porosität eines Baustoffes. Die Porengrößenverteilung ist eines der wesentlichen Merkmale, das Aussagen über den Feuchtetransport in den Baustoffen zulässt. Das gleiche Porenvolumen zweier verschiedener Werkstoffe kann auf viele kleine (Mikroporen) oder wenige große Poren (Makroporen) verteilt sein. Durch Kapillarkondensation können Poren bis zu einem Radius von 10^{-7} m (0,1 µm) mit Wasser gefüllt werden. Dieser Porenradius wird deshalb im Allgemeinen als Grenzporenradius verwendet, um die Mikroporen von den Makroporen zu unterscheiden.

Die Porengeometrie und die Porengrößenverteilung eines Baustoffes können demzufolge bereits im Vorfeld Aufschluss darüber geben, über welchen Wasseraufnahmemechanismus ein Baustoff durchfeuchtet wurde und ob dieser imprägniert oder injiziert werden kann. Die physikalischen und insbesondere die hygrischen Eigenschaften eines Baustoffes werden also wesentlich durch die Porengröße beeinflusst.

Ein weiteres Charakterisierungsmerkmal ist die Porengeometrie. Die Poren können zylinderförmig, keilförmig, spaltenförmig oder kugelförmig angeordnet sein. Sie können mehr oder weniger miteinander verbunden sein, sodass zwischen offenen Poren mit mindestens zwei Öffnungen, Sackporen mit mindestens einer Öffnung und geschlossenen Poren ohne Verbindung mit der Umgebung unterschieden werden kann.

Für den Feuchtehaushalt sind die Sackporen und die offenen Poren von Bedeutung, da das Wasser nur durch diese Porenarten eindringen kann. Für die Baustoffeigenschaften allgemein und speziell für die Wasserbzw. Wasserdampfaufnahme und -abgabefähigkeit der Baustoffe ist es daher im Rahmen der Bauphysik und der Werkstoffkunde von großem Interesse, den für Wasser zugänglichen (offenen) Porenraum zu ermitteln⁵.

Die Messergebnisse zeigen, dass alle untersuchten Putzproben hinsichtlich der Porenradienverteilung sehr gut als Feuchtmauer/Sanierputz geeignet sind, da durch den geringen Anteil an Kapillarporen kein nennenswerter Salztransport stattfindet bzw. die Salze in den Poren gespeichert werden.

	Durchschnittliche Porenradiusverteilung		
	Poren > 10⁻⁴m	Poren < 10 ⁻⁴ m und > 10 ⁻⁷ m (Kapillarporen)	Poren < 10 ⁻⁷ m
Probe 1	39%	10%	50%
Probe 2	38%	10%	52%
Probe 4	58%	7%	35%

Tabelle 3-40: Porenradius - Anteile

⁵ F. Frössel: Mauerwerkstrockenlegung und Kellersanierung, 2.4 Porosität von Baustoffen, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 978-3-8167-7164-7

3.9 Dauerhaftigkeit

Das untersuchte Putzsystem wurde auf der Nord-Fassade eines Freiland-Prüfstandes der TU Wien aufgebracht und mit Sensoren (Temperatur, Feuchte, Wärmestrom etc.) detailliert und langfristig vermessen. Die Konstruktion dieses Prüfstandes besteht aus Holzträger und Strohballen. Innenseite ist mit Lehm verputzt. Die Fassade wird unter realen Bedingungen natürlich bewittert. Sowohl die Winterperiode als auch die kritische Übergangszeit wird detailliert erfasst. Da die Strohballen-Konstruktion als empfindlich und Feuchteintolerant gesehen wird, stellt die Konstruktion optimale Prüfbedingungen um die Funktionalität und Dauerhaftigkeit des neuen Putzes zu untersuchen.

Beim Einsatz der Naturbaustoffe im Bauwesen ist die Problematik der Schimmelpilzbildung von großer Bedeutung. Somit ist die Kenntnis des Verhaltens von einzelnen Materialien unter Beanspruchung verschiedener Feuchte- und Temperaturkombination unverzichtbar.

Zur Darstellung des Verhaltens von Baustoffen unter unterschiedlichen Kombinationen Temperatur und Luftfeuchte in Bezug von auf die Resistenz gegen Schimmelpilzbildung eignen sich die so genannten Isoplethensysteme besonders gut. Sie sind die im Moment am häufigsten eingesetzten Methoden zu Risikoabschätzung des unerwünschten mikrobiologischen Befalls (Schimmelpilzwachstum). Das sind Kurvenverläufe gleicher Auskeimzeit bzw. gleichen Wachstums von Schimmelpilzen bei unterschiedlichen Temperaturen und Feuchte. Die unterste Grenze aller ermittelten Verläufe ist der LIM 0 (LIM: Lowest Isopleth of Mould). Für jede Kombination der Feuchte- und Temperaturparameter, die eine Lage im Diagramm unterhalb der LIM 0 Kurve annimmt, bedeutet es, dass kein Risiko für Pilzwachstum vorhanden ist. Die bisherigen praktischen Erfahrungen zeigten jedoch günstigeres Verhalten von mit Stroh gedämmten Konstruktionen. Deswegen wurde in der vorliegenden Arbeit als unterstes Kriterium für die Schimmelpilzwachstum die untere Grenze des schraffierten Bereichs aus Abbildung 3-44: LIM-Kurve herangezogen.



Abbildung 3-44: LIM-Kurve



Abbildung 3-45: Aussenprüfstand



Abbildung 3-46: Innenputz mit Messsonden

3.9.1 Messergebnisse



Diagramm 3-22: Probe 1, Verlauf der Absoluten Feuchte



Diagramm 3-23: Probe 2, Verlauf der Absoluten Feuchte



Diagramm 3-24: Probe 1, Verlauf der rel. Feuchte und der Temperatur



Diagramm 3-25: Probe 2, Verlauf der rel. Feuchte und der Temperatur



Diagramm 3-26: Absolute Feuchte im Stroh Probe 1



Diagramm 3-27: Relative Feuchte im Stroh



Diagramm 3-28: Wärmestrom Probe 2

3.9.2 Interpretation der Messergebnisse

Probe 1:

Es wurde zuerst ein zementgebundener Porenputz aufgebracht, und messtechnisch detailliert untersucht. Über den betrachteten Zeitraum bleibt die relative Feuchtigkeit über 80 %. Diese Probe zeigt sich deshalb trotz der niedrigen Temperatur als problematisch. Der betrachtete Zeitraum liegt nur im Winter. Trotz trockener Luft im Winter und der Möglichkeit für die Baufeuchte auszudiffundieren, nimmt auch die absolute Feuchte im Stroh, das direkt hinter dem Putz liegt, tendenziell zu. Der betrachtete Zeitraum im Stroh ist jedoch länger (Anfang Dezember bis Mitte Juli). Somit steigen die Temperaturen während der Messungen an, was ein gegensätzliches Bild von relativer und absoluter Feuchte zeigt. Die relative Feuchte nimmt aufgrund höherer Temperatur ab, die absolute Feuchte zu. Da die rel. Feuchte rasch unter 80% fällt, ist davon auszugehen, dass keine Gefahr von Schimmelbildung im Stroh besteht. Um sichere Aussagen treffen zu können, müsste die Situation jedoch mindestens 2 Jahre beobachtet werden.

Probe 2:

Hier wurde Probe 2 aufgebracht, der hier präsentierte Zeitraum ist Ende Frühling bis Anfang Sommer, da diese Zeit bauphysikalisch sehr interessant ist. Die Absolute und relative Feuchte sind tendenziell konstant. Bei der relativen Feuchte ist die starke Abhängigkeit von der der Temperatur sichtbar. Das Niveau der relativen Feuchte pendelt sich um 60% ein, was die gestellten Anforderungen erfüllt.

Der gemessene Wärmestrom ist niedrig, was bei einer so gut gedämmten Konstruktion üblich ist. Meist liegt er zwischen +2 und -2 W/m².

Die Messungen werden weiterhin fortgesetzt, um die Messergebnisse zu bestätigen und die gezogenen Schlussfolgerungen abzusichern.

4 Zusammenfassung

4.1 Zusammenfassung der Messergebnisse:

				Probe 1	ď	obe 2	Probe 4	
Wasserdampfdiffusionswiderstand	크			6,98		6,43	5,23	
Wärmeleitfähigkeit	~	[W/mK]	DIN EN 998-1	0,52		0,48	0,45	
Haftzugfestigkeit	f	[N/mm ²]	EN 1015-12	0,053	0	,047		
Druckfestigkeit	f	[N/mm ²]	DIN EN 998-1	3,2		2,5	1	
Biegezugfestigkeit	f	[N/mm ²]		1,3		6'0	0,7	
Wasserrückhaltevermögen			ON B 3345	61,50%	9	,50%	60,80%	
Sorptionsverhalten			EN ISO 12571	sehr	gut, gutes Fei	uchteausgleichs	verhalten	
Wasseraufnahmekoeffizient	Ww	kg/(m ² h ^{0,5})	DIN 4108-3	0,93		1,25	0,59	
Porenradiusverteilung				sehr gut, geringer	kapillarer Wa	assertransport,	geringer Salztransport	
Dauerhaftigkeit				gut		gut	gut	

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Messergebnisse

In *Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Messergebnisse* - werden die Durchschnittswerte der Messergebnisse der 3 Putze zusammengefasst.

Vorteile Proben 1 und 2:

- Diffusionsoffen
- Sehr gute Porenradienverteilung, dadurch geringer kapillarer Feuchtigkeits und geringer Salztransport
- Gutes Sorptionsverhalten
- Geringer Zementanteil, dadurch gut geeignet als Putz für Konstruktionen und Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

Nachteile Proben 1 und 2:

- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Nicht wasserabweisend, nur wasserhemmend

Vorteile Probe 4:

- Diffusionsoffen (kein Sperrputz)
- Sehr gute Porenradienverteilung, dadurch geringer kapillarer Fechtigkeits und geringer Salztransport
- Gutes Sorptionsverhalten
- Wasserabweisend
- Rel. geringe Wärmeleitfähigkeit

Nachteile Probe 4:

• Zementputz, dadurch keine gute Eignung auf Untergründen aus nachwachsenden Rohstoffen

4.2 Schlussfolgerung

Probe 4 als Feuchtmauerputz wurde für feuchtes und salzbelastetes Mauerwerk entwickelt. Die Porengröße und -verteilung ist dabei gezielt für die Aufnahme und Einlagerung von größeren Salzmengen abgestimmt (großer Anteil von geschlossenen Poren oder Flaschenporen). Das Bindemittel von Probe 4 ist Zement.

Im Gegensatz dazu ist bei den Proben 1 und 2 Zement als Bindemittel durch NHL-Kalk (natürlich hydraulischer Kalk) und einem Anteil von ca. 10% Weißzement ersetzt worden. Kalkputze haben die benötigten fungiziden und bakteriziden Eigenschaften, um Bau- und Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffe vor Befall zu schützen. Das Wichtigste, auch bei Kalk als Bindemittel, ist es, das Porensystem des Putzes so zu gestalten, dass eine möglichst hohe Diffusionsoffenheit gewährleistet wird, um die Atmungsaktivität der ökologischen Konstruktion zu ermöglichen bei geringst möglichem kapillarem Wassertransport. Außerdem ist es wichtig, dass der Putz wasserabweisend ist, um das Eindringen von Wasser von außen (z.B. Schlagregen) zu verhindern.

Die zurzeit für die ökologische Bauweise eingesetzten Lehmputze eignen sich nicht für diese speziellen Bereiche, was eine neue Lösung unumgänglich macht.

Dies gilt in feuchtebelasteten Bereichen wie im Erdgeschoß, aber auch in den oberen Geschoßen, da ökologische Konstruktionen extrem feuchteempfindlich sind. Die Diffusionswiderstandszahl der Proben 1 und 2 bewegen sich in einem niedrigen Bereich (diffusionsoffen), sodass das Ausdiffundieren der eventuell kurz angesammelten Tauwassermenge schnell ermöglicht wird. Die Putzoberfläche bleibt trocken und frei von Beschädigungen. Jedoch ist die wasserhemmende Wirkung der Proben 1 und 2 für stark feuchtebelastetes Mauerwerk zu gering bzw. das Wasseraufnahmevermögen zu hoch und diese sollten in der derzeitigen Mischung daher nicht in Erdgeschoßzonen angewendet werden, hier ist Probe 4 das geeignete Putzsystem.

Die bisherigen Ergebnisse bestätigen jedoch, dass Proben 1 und 2 sowohl Innen als auch Außen eingesetzt werden können, und einen geeigneten Schutz für die Unterkonstruktion bilden.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die beschriebenen Ziele nicht in jedem Fall erreicht werden können, wenn Kalk das einzige Bindemittel ist. Das zeigt sich alleine schon durch die nicht ausreichende Dauerhaftigkeit. Unter Zugabe von ca. 10% Weißzement können die Ziele in vielen Bereichen jedoch erreicht werden.

Die Putze sind aus mehreren Schichten aufgebaut. Die erste Schicht besteht aus einem vollflächig aufgetragenen Spritzbewurf, der den Haftverbund zum Putzgrund sichern soll. Danach wird als Ausgleichsschicht ein Grundputz aufgebracht. Zusätzliche Anstrichsysteme oder mineralische Dekorputze müssen diffusionsoffen und bei regenbelasteten Flächen wasserabweisend ausgerüstet sein, um die Funktionsfähigkeit der Putzsysteme zu gewährleisten. Das mehrlagige Aufbringen des Putzes erfordert ein sorgfältiges Aufrauen der einzelnen Lagen, um einen ausreichenden Haftverbund zu sichern.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Proben 1 und 2 noch nicht in jedem Bereich die Performance der Probe 4 erreichen (Wärmeleitfähigkeit, Wasseraufnahmekoeffizient), andererseits ist die Eignung als Putz für Träger aus nachwachsenden Rohstoffen (auch durch die Eigenschaften des Kalks) gegeben.

Es besteht weiterhin viel Forschungsbedarf, um biologische Putzsysteme, in Kombination mit Wärmedämmungen und Konstruktionen aus nachwachsenden Rohstoffen, auch für Außenanwendungen ökonomisch nutzbar zu machen.

Die bisherigen Forschungsergebnisse und Untersuchungen weisen jedoch deutlich darauf hin, dass dahingehend großes Potential besteht.

5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:Probefläche Sanierputzsysteme - links Probe 4,	rechts
Feuchtmauerputz	8
Abbildung 3-1: Lagerung der Proben im Klimaraum bis zur Massekonstanz	16
Abbildung 3-2: Herstellung der gesättigten KOH-Lösung	16
Abbildung 3-3: Einbau der Proben in die Gefäße mit der Salzlösung	17
Abbildung 3-4: Fertige Probe	17
Abbildung 3-5: Plattengerät mit Referenzprobe	26
Abbildung 3-6: Proben	27
Abbildung 3-7: Messung der Wärmeleitfähigkeit	27
Abbildung 3-8: Putzproben auf Ziegel aufgebracht, noch in der Schalung	29
Abbildung 3-9: Putzproben nach dem Ausschalen	30
Abbildung 3-10: Putzproben mit aufgeklebtem Stempel	30
Abbildung 3-11: Probe ins Messgerät eingebaut, vor dem Abziehen	31
Abbildung 3-12: Messaufbau	31
Abbildung 3-13: Probe nach Abziehversuch – gerissen (Kohäsionsbruch)	32
Abbildung 3-14: Bruchbilder; Quelle: EN1015-12:2000	34
Abbildung 3-15: Probekörper nach Durchführung der Biegezugprüfung	36
Abbildung 3-16: Probekörper nach Durchführung des Druckversuches	37
Abbildung 3-17: Druckfestigkeit Probe 1	38
Abbildung 3-18: Druckfestigkeit Probe 2	39
Abbildung 3-19: Druckfestigkeit Probe 4	40
Abbildung 3-20: Biegezugfestigkeit Probe 1	41
Abbildung 3-21: Biegezugfestigkeit Probe 2	42
Abbildung 3-22: Biegezugfestigkeit Probe 4	43
Abbildung 3-23: Trockenschrank, 105°C	46
Abbildung 3-24: Proben im Trockenschrank	46
Abbildung 3-25: Trockenrohdichte Probe 1	47
Abbildung 3-26: Trockenrohdichte Probe 2	48
Abbildung 3-27: Trockenrohdichte Probe 4	49
Abbildung 3-28: Putzproben im Trockenschrank	50
Abbildung 3-29: Putzproben mit gesättigter Salzlösung	50
Abbildung 3-30: Wägen der Proben	51
Abbildung 3-31: Messung Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den Probenbehälte	ərn 51
Abbildung 3-32: Messaufbau Wasseraufnahmekoeffizient	56
Abbildung 3-33: Einrichten der Probe	57
Abbildung 3-34: Probe mit ALU- und Kunststoffolie beim Einrichten über	dem
Wasserbecken	57
Abbildung 3-35: Einrichten der Probe	58
Abbildung 3-36: Die eingetauchte Probe	58

Abbildung 3-37: Proben in destilliertem Wasser	72
Abbildung 3-38: Drucktopf bis 5 bar, Druckregeleinrichtung	72
Abbildung 3-39: Keramikplatte nach dem Wässern, mit Kaolin und Abdecktuch	73
Abbildung 3-40: Proben im Drucktopf	73
Abbildung 3-41: Wiegen der Proben	74
Abbildung 3-42: 100 bar Drucktopf mit Zellulosefolie, Kaolin, Proben und Abdeck	tuch
	74
Abbildung 3-43: Verschlossener Drucktopf, Manometer der Stickstofflasche	75
Abbildung 3-44: LIM-Kurve	83
Abbildung 3-45: Aussenprüfstand	83
Abbildung 3-46: Innenputz mit Messsonden	84

6 Diagrammverzeichnis

Diagramm 3-1: Veranschaulichung der Massenänderung	22
Diagramm 3-2: Sorptionsisotherme	55
Diagramm 3-3: Sorptionsisotherme von Lehmputz im Vergleich zu konv Putzen	entionellen 55
Diagramm 3-4: Masseänderung Probe 1.1	60
Diagramm 3-5: Wasseraufnahme Probe 1.1, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 60
Diagramm 3-6: Masseänderung Probe 1.3	61
Diagramm 3-7: Wasseraufnahme Probe 1.3, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 61
Diagramm 3-8: Masseänderung Probe 1.5	62
Diagramm 3-9: Wasseraufnahme Probe 1.5, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 62
Diagramm 3-10: Masseänderung Probe 2.1	63
Diagramm 3-11: Wasseraufnahme Probe 2.1, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 63
Diagramm 3-12: Masseänderung Probe 2.4	64
Diagramm 3-13: Wasseraufnahme Probe 2.4, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 64
Diagramm 3-14: Masseänderung Probe 2.5	65
Diagramm 3-15: Wasseraufnahme Probe 2.5, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 65
Diagramm 3-16: Masseänderung Probe 4.1	66
Diagramm 3-17: Wasseraufnahme Probe 4.1, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 66
Diagramm 3-18: Masseänderung Probe 4.2	67
Diagramm 3-19: Wasseraufnahme Probe 4.2, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 67
Diagramm 3-20: Masseänderung Probe 4.5	68
Diagramm 3-21: Wasseraufnahme Probe 4.5, Kurve Typ "A" gem. EN ISO 1	5148:2002 68
Diagramm 3-22: Probe 1, Verlauf der Absoluten Feuchte	85
Diagramm 3-23: Probe 2, Verlauf der Absoluten Feuchte	85
Diagramm 3-24: Probe 1, Verlauf der rel. Feuchte und der Temperatur	85
Diagramm 3-25: Probe 2, Verlauf der rel. Feuchte und der Temperatur	86
Diagramm 3-26: Absolute Feuchte im Stroh Probe 1	86
Diagramm 3-27: Relative Feuchte im Stroh	86
Diagramm 3-28: Wärmestrom Probe 2	87

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Prüfbedingungen Wasserdampfdurchlässigkeit	.17
Tabelle 3-2: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 1.1	.18
Tabelle 3-3: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 1.2	.18
Tabelle 3-4: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 1.3	.19
Tabelle 3-5: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 2.1	.19
Tabelle 3-6: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 2.2	.20
Tabelle 3-7: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 2.3	.20
Tabelle 3-8: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 4.1	.21
Tabelle 3-9: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 4.2	.21
Tabelle 3-10: Messergebnisse Wasserdampfdiffusion Probe 4.3	.22
Tabelle 3-11: Bestimmung Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	.24
Tabelle 3-12: Bestimmung Wärmeleitfähigkeit	.28
Tabelle 3-13: Messergebnisse Haftzugfestigkeit	.33
Tabelle 3-14: Trocknung bis Massekonstanz	.46
Tabelle 3-15: Messwerte Sorption Probe 1	.52
Tabelle 3-16: Messwerte Sorption Probe 2	.53
Tabelle 3-17: Messwerte Sorption Probe 4	.54
Tabelle 3-18: Gekürzter Auszug aus dem Wiegeprotokoll	.59
Tabelle 3-19: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 1.1	.60
Tabelle 3-20: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 1.3	.61
Tabelle 3-21: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 1.5	.62
Tabelle 3-22: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 2.1	.63
Tabelle 3-23: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 2.4	.64
Tabelle 3-24: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 2.5	.65
Tabelle 3-25: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 4.1	.66
Tabelle 3-26: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 4.2	.67
Tabelle 3-27: Wasseraufnahmekoeffizient Probe 4.5	.68
Tabelle 3-28: Anhand der Formel 1 ermittelte Porenradien	.71
Tabelle 3-29: Veranschaulichung der Messergebnisse	.76
Tabelle 3-30: Masseänderung durch Druck, Probe 1	.77
Tabelle 3-31: Masseänderung durch Druck, Probe 2	.77
Tabelle 3-32: Masseänderung durch Druck, Probe 4	.77
Tabelle 3-33: Wassergehalt in Abhängigkeit vom Druck, Probe 1	.78
Tabelle 3-34: Wassergehalt in Abhängigkeit vom Druck, Probe 2	.78
Tabelle 3-35: Wassergehalt in Abhängigkeit vom Druck, Probe 4	.78
Tabelle 3-36: Wassergehalt/Porenradius, Probe 1	.79
Tabelle 3-37: Wassergehalt/Porenradius, Probe 2	.79
Tabelle 3-38: Wassergehalt/Porenradius, Probe 4	.79
Tabelle 3-39: Gegenüberstellung der Mittelwerte, Wassergehalt/Porenradius	.80

Tabelle 3-40: Porenradius - Anteile	81
Tabelle 4-1: Zusammenfassung der Messergebnisse	88