

Claytec GmbH & Co. KG

**Entwicklung und Erprobung eines optimierten Lehmputzmörtels zur
Reduktion der aktiven Klimatisierung im Museumsbau**

Abschlussbericht zum Vorhaben, gefördert durch die Deutsche
Bundesstiftung Umwelt unter Az.: 39380/01

Peter Breidenbach, Ulrich Röhlen

Viersen, 28.03.2025

Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	39380/01	Referat	25	Fördersumme	46.825 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	-----------------

Antragstitel **Entwicklung und Erprobung eines optimierten Lehmputzmörtels zur Reduktion der aktiven Klimatisierung im Museumsbau**

Stichworte Passive Feuchteregulierung, Lehmputzmischung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
10	28.02.2024	31.12.2024	1
Zwischenbericht	28.02.2024	28.07.2024	

Bewilligungsempfänger	Claytec GmbH & Co. KG	Tel	02153 918-0
	Nettetalter Strasse 113	Fax	02153 918 -18
	41751 Viersen	Projektleitung	Peter Breidenbach
		Bearbeiter	Ulrich Röhlen

Kooperationspartner -

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Auslöser für das Vorhaben war eine Vorstudie des Instituts für Bauklimatik an der TU Dresden für die anstehende Sanierung des Martin-Gropius-Museumsbaus in Berlin. Das Studienziel bestand in der Bewertung der Feuchtepufferfähigkeit von Lehmputz und dem daraus resultierenden Potenzial zur Reduzierung der nötigen Klimatechnik und des Energieaufwands beim Betrieb des Ausstellungsbereichs. Daraus gingen methodische Ansätze zur Überprüfung dieser Arbeitshypothese hervor. Auf Basis der Vorstudie war die Entwicklung eines variierten Lehmputzes, der anhand von Prüfergebnissen und Modellrechnungen hinsichtlich der klimatisierenden Raumwirkung bei gleichzeitig guten Anwendungseigenschaften optimiert werden sollte, Ziel des Projektes. Eine verlässlich abzuschätzende Wirkung soll zu Einsparungen bei der Klimatechnik und den laufenden Energie- und Unterhaltungskosten beitragen, insbesondere bei Gebäudenutzungen mit hoher Feuchtesensibilität.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Arbeitsschritte folgten einem iterativen Prozessablauf mit Rückkopplungen zwischen Rezepturentwicklung und Simulationsrechnung zu den angestrebten Raumklimaeffekten. In mehrstufigen Versuchsreihen entstanden bei Claytec 28 Putz-Probekörper mit Variationen der mineralischen und pflanzlichen Komponenten. In allen Probekörpern war Baulehm Hauptbestandteil. Mit zusätzlichen feinporigen mineralischen Zusätzen und Pflanzenfasern wurde versucht, die Feuchtesorptionsfähigkeit schrittweise zu erhöhen. Das Institut für Bauklimatik der TU Dresden untersuchte die Materialeigenschaften aller Probekörper hinsichtlich diverser hygrischer und thermischer Kennwerte, insbesondere der zyklischen Adsorption und Desorption. Zwei Gemische wiesen signifikant bessere Feuchtesorptionseigenschaften auf. Diese beiden Rezepturen wurden in einer zweiten Versuchsreihe weiter optimiert. Dieser optimierte „Lehm-Klimaputz“ (Rezeptur C2/8) mit den besten hygrischen und thermischen Eigenschaften fand Eingang in den Datenpool des Programms DELPHIN des Instituts für Bauklimatik. Der Effekt konnte für eine konkrete Raumsituation des Martin-Gropius-Baus simuliert werden. Parallel testete ClayTec die industrielle Reproduzierbarkeit und die Anwendbarkeit des optimierten Lehmputzmörtels.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0
□ Fax 0541/9633-190 □ <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Die gegenüber der ersten Phase erfolgte Rezepturentwicklung, u. a. erkennbar an der um die Hälfte reduzierte Rohdichte der Mischung C2_8, bewirkt eine sehr niedrige (gute) Wärmeleitfähigkeit von i.M. $0,148 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und eine Wärmespeicherkapazität von i.M. $601 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Dies resultiert insbesondere aus der Beimischung des porösen Minerals Sepiolith. Die Mittelwerte der Wasserdampfdiffusionswiderstandsäquivalente von 3,2 (Wet-Cup) bzw. 5,7 (Dry-Cup) signalisieren eine sehr gute Durchlässigkeit der Mischung C2_8. Zum Vergleich: Nach der Tabelle T 5-5 der Lehmregeln des Dachverband Lehm e.V. und den Angaben der DIN 4108-4 wären Werte von 5 und 10 zu erwarten. Auf Basis der zuvor ermittelten Sorptionsisothermen des optimierten Lehmputzes C2_8 erfolgte die Ermittlung der zyklischen Feuchtespeicherfähigkeit an größeren Probekörpern. Dabei wurde der Luftfeuchtegehalt nach ca. 6 h konstant 40% r. F. ohne Übergang auf 80% r. F. erhöht und verblieb 12 h auf diesem Niveau. Danach folgte die Absenkung auf wiederum ca. 40% r. F. Der optimierte Lehmputz hält ein signifikant hohes und gleichbleibendes Feuchtesorptionsniveau mit Amplituden von 10 g zwischen Adsorption (um 390 g) und Desorption (um 380 g) auf einer Fläche von nur rund $0,06 \text{ m}^2$. Auf einen Quadratmeter hochskaliert ergibt sich eine Feuchtepufferung von ca. 160 g in einem Zyklus. Die Messergebnisse für den optimierten Lehmputz C2_8 bildeten die Grundlage für die Simulation der Feuchtesituation in Räumen des Martin-Gropius-Baus. Im Rahmen der Analyse wurden mehrere Varianten erstellt, bei denen einzelne Parameter wie die Verweildauer einer festgelegten Anzahl von 10 Personen im Raum, sowie die Fläche des feuchtigkeitsregulierenden Putzes im Raum variiert wurden. Bei einer vollflächigen Beschichtung mit Lehmputz verstetigten sich die Extremwerte und das Delta zwischen Min und Max bei 60 Minuten Verweildauer beträgt 47%, verglichen mit 53% bei Beschichtung nur der Außenwände und 68% bei Beschichtung mit Putz ohne Feuchtespeichereffekt. Je höher die Verweildauer steigt, desto geringer ist die regulierende Wirkung des Putzes. Für den energetischen Effekt von Adsorption und Desorption wurden zunächst die idealen Bedingungen der Gasgleichung betrachtet. Damit wird lediglich die physikalische Umwandlungsenergie erfasst, die Verdampfungsenthalpie der Wandlung von Feuchte in Dampf bemisst die passive energetische Leistung der Lehmputzfläche. Werden die Be- bzw. Entfeuchtungseffekte mittels Anlagentechnik eingebracht, müssten zusätzlich zur Umwandlungsenergie auch Energiebedarfe für Heizen, Kühlung und Verteilung angesetzt ist der positive Effekt auf den Energiebedarf noch weitaus höher zu bewerten. Skaliert man den physikalischen Effekt der Umwandlung auf 5.000 m^2 hoch, werden

15 MWh/a eingespart. Mit den weiteren Energien durch Heizen, Kühlung, Verteilung und verbesserter Anlageneffizienz kann dieser Wert nach Schätzungen des Instituts für Bauklimatik auf mindestens 30 MWh/a verdoppelt werden. Zudem wird die Anlage dadurch kleiner. Damit sinken neben den Betriebskosten auch die Investitionskosten. Die mögliche Verkleinerung der Lüftungskanalquerschnitte ist sehr günstig für die architektonische Integration der technischen Einbauten in den Bestand, hier in ein bedeutendes Baudenkmal.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die im Projekt ermittelten Materialkennwerte für den optimierten Lehmputz werden in die Datenbank des Softwareprogramms DELPHIN zur hygrothermischen Modellierung, Simulation und Validierung der Raumklimatik eingefügt. Damit stehen die zentralen Ergebnisse als Werkzeuge für die Planung und Auslegung der Klima- und Lüftungstechnik für unterschiedlichste Anwendungsfälle zur Verfügung. ClayTec veröffentlicht nach Klärung letzter technischer Fragen ein Datenblatt und Verarbeitungshinweise für den neuen Lehm-Klimaputz. Über verschiedene, sofort verfügbare Kommunikationskanäle (z.B. Newsletter, Social Media, ClayBlog) bei ClayTec erreichen die Ergebnisse eine Verbreitung bei Planern, Verarbeitern und Entscheidungsträgern. Ausgewählte mögliche Nachfolgeprojekte, z.B. die Sanierung des Badischen Landesmuseums Schloss Karlsruhe, werden bereits von ClayTec betreut. Für September 2025 ist ein Vortrag im Rahmen der Fortbildungsreihe der WTA-Akademie zum Thema „Lehm-Klimaputz und seine Wirkung im Baudenkmal“ zugesagt.

Fazit

Ein optimierter Lehmputz kann über die verputzte Fläche die Klima- und Lüftungstechnik in Gebäuden hinsichtlich der Feuchteregulierung signifikant und erstmalig ingenieurmäßig berechenbar entlasten. Der im Projekt bearbeitete Anwendungsfall eines Museums mit äußerst sensiblen Feuchteanforderungen und unterschiedlichen Besucherströmen ist besonders anspruchsvoll und beweist die Leistungsfähigkeit des entwickelten Lehm-Klimaputzes. Die Ergebnisse lassen sich auf andere Gebäude mit gleichem oder weniger komplexem Feuchtemanagement übertragen. Durch das Förderprojekt wurde die ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit eines Lehmputzes zur passiven Klimatisierung von Gebäuden modellhaft nachgewiesen.

Inhalt

1. Zusammenfassung.....	1
2. Einleitung.....	1
2.1 Ausgangslage.....	1
2.2 Zielsetzungen.....	2
2.3 Aufgabenstellungen.....	3
3. Hauptteil.....	4
3.1 Darstellung der technischen Arbeitsschritte.....	5
3.1.1 Rezeptur und Mischung.....	5
3.1.2 Modellrechnung I.....	5
3.1.3 Rezepturoptimierung.....	8
3.1.4 Modellrechnung II.....	10
3.1.5 Produktion und Anwendung.....	13
3.2 Diskussion der Ergebnisse.....	18
3.3 Ausführliche technologische, ökologische, und ökonomische Bewertung.....	23
3.3.1 Berechnungsmodell für passive Klimatisierungseffekte (technologischer Aspekt).....	23
3.3.2 Ökobilanz des neuen Lehmputzes (ökologischer Aspekt).....	23
3.3.3 Energieeinsparung und geringerer Investitionsaufwand (ökonomischer Aspekt).....	24
3.4 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabenergebnisse.....	25
4. Fazit.....	25
Quellennachweise.....	26

Verzeichnis von Bildern, Diagrammen und Tabellen

Abb. 2.1: Simulation der ausgleichenden Wirkung unterschiedlicher Putze bei Feuchtebelastungen

Abb. 3.1: Sorptionskurven der 1. Lehmputzentwicklung

Abb. 3.2: Sorptionsisothermen der optimierten Rezepturen

Abb. 3.3: Feuchtigkeitsgehalt der optimierten Mischung C2_8

Abb. 3.4: Feuchtigkeitsgehalt der optimierten Mischung C2_11

Abb. 3.5: Feuchtigkeitsgehalt der optimierten Mischung C2_4

Abb. 3.6: Keilprobe Mischung C2_8 Seiten- und Draufsicht

Abb. 3.7: Mörtelprismen C2_8

Abb. 3.8: Entwurf Produktblatt ClayTec Lehm-Klimaputz

Tab.3.1: Ansätze zur Entwicklung eines Lehm-Klimaputzes

Tab. 3.2: Ausgleichsfeuchten der 1. Putzmörtelentwicklung

Tab. 3.3: Rezepturen der Optimierungsphase

Tab. 3.4: Vergleich der Ausgleichsfeuchtwerte der ersten und zweiten Rezepturenentwicklung

Tab. 3.5: Vergleich der Zusammensetzung mit/ohne Sepiolith

Tab. 3.6: Vergleich der Zusammensetzung zweier Rezepturen mit Sepiolith

Tab. 3.7: Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmespeicherkapazität

Tab. 3.8: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Tab. 3.9: Extremwerte der Raumlufffeuchten nach Verweildauer

Tab. 3.10: Physikalische Umwandlungsenergie der Feuchteconditionierung

Tab. 3.11: Energiebedarf und Treibhausgaspotenzial

1. Zusammenfassung

Im Rahmen der experimentellen Materialentwicklung und begleitenden Bemessung der Feuchtepufferwirkung der verschiedenen, modifizierten Lehmputzrezepturen durch das Institut für Bauklimatik der TU Dresden entstand ein optimierter Lehm-Klimaputz. Systematische Testreihen zu den hygroskopischen Eigenschaften des optimierten Lehm-Klimaputzes führten zu einem realistischen, verifizierbaren Datensatz als Grundlage eines Berechnungsmodells zur Bemessung der Feuchteregulierung in Räumen unter Einbeziehung der Sorptionseigenschaften des im Projekt entwickelten und optimierten Lehmputzes. Die Materialkennwerte des neuen, optimierten Lehmputzes zeigen eine signifikante Feuchtepufferung in den relevanten Luftfeuchtebereichen und können so einen Beitrag zur raumklimatischen Resilienz in den sensiblen Räumen des Martin-Gropiusbaus in Berlin leisten, auch bei erhöhter Nutzerfrequenz. Aus der Feuchtepufferung resultiert Energieeffizienz. Die modellhaft errechnete Energieersparnis beträgt 30 MWh/a bei 5.000 m² Fläche. Hinzu kommt die Option einer effizienteren Dimensionierung der Klima- bzw. Lüftungstechnik mit Einspareffekt bei den erforderlichen Investitionskosten.

Die passive Feuchtepufferung über die Lehmoberfläche kann zukünftig als Bestandteil der Berechnungen zur Auslegung für die Lüftungs- bzw. Klimatechnik in Gebäuden mit besonderer Feuchtsensibilität genutzt werden. Die Ergebnisse des Projektes finden Eingang in das Berechnungstool DELPHIN der TU Dresden, um die Nutzung als Planungsinstrument für andere Bauprojekte des Wohn- und Gewerbebaus zu ermöglichen.

2. Einleitung

2.1 Ausgangslage

Auslöser für das Vorhaben war eine Vorabstudie des Instituts für Bauklimatik an der TU Dresden für die Auslegung der Klimatechnik im Rahmen der anstehenden Sanierung des Martin-Gropius-Baus in Berlin.

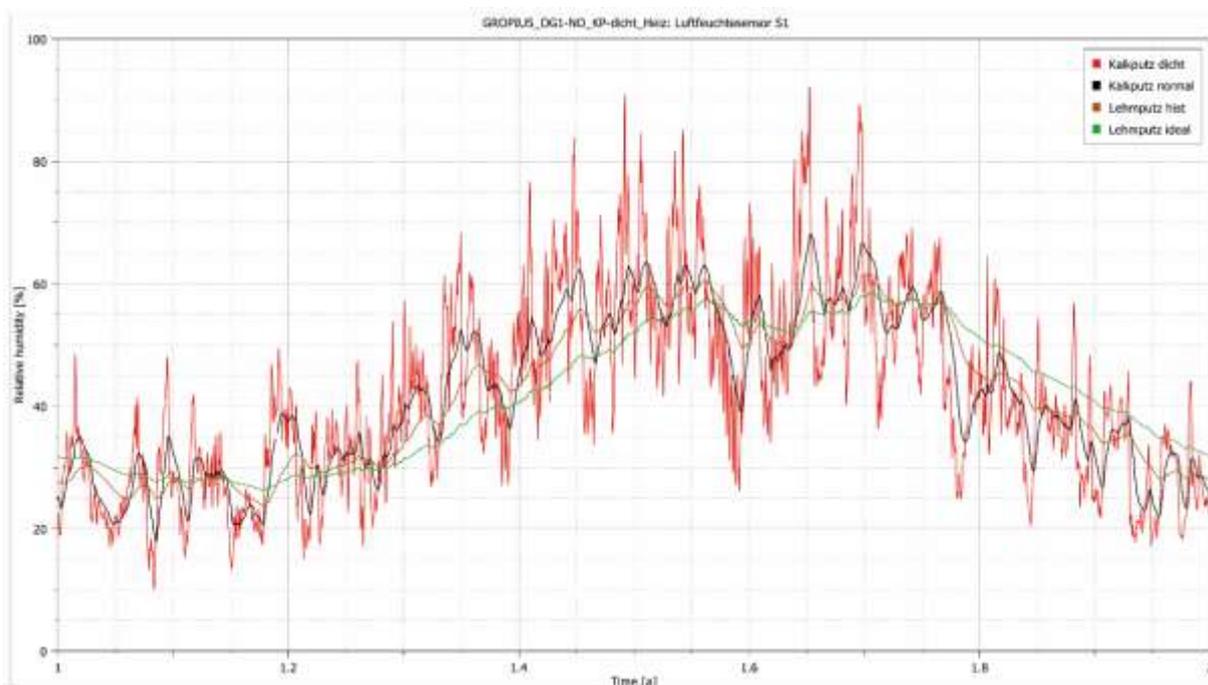
Die Simulationsstudie sollte zur Vorabbewertung des Einsatzes eines Lehmputzes an der Raumseite von Wänden der Gebäudehülle beitragen. Das Ziel bestand in der Bewertung der Feuchtepufferfähigkeit eines Lehmputzes und dessen Potenzial zur Reduzierung der nötigen Klimatechnik für den Betrieb des Ausstellungsbereichs des Martin-Gropius-Baus. Es galt methodische Ansätze zur Überprüfung dieser Arbeitshypothese zu entwickeln.

Die positive Wirkung von Lehmputzen und -bauteilen für das Raumklima ist für die subjektive Erfahrungsebene von Nutzern seit langem bekannt. Der Effekt resultiert aus der thermischen Speichermasse und wesentlich aus der Fähigkeit des Materials, Wasserdampf aus der Luft schnell auf- und wieder abzugeben (Pufferung). Besondere Bedeutung hat dies für den Museums- und Archivausbau, da die Zielkorridore für Temperatur und Luftfeuchte hier zum Schutz der Exponate und durch konservatorische sowie versicherungsbedingte Vorgaben meist sehr eng gefasst sind. Die aus diesem Grund notwendige aktive Klimatisierung per

energieintensiv betriebenen Klimaanlage zählt zu den großen Posten der laufenden Kosten im Museumsbetrieb.

Die Vorarbeiten des Instituts für Bauklimatik an der TU Dresden (Prof. Dr. Grunewald) simulierten im Rahmen theoretischer Modellrechnungen die Feuchtpufferwirkung eines generischen, in einem Baudenkmal gewonnenen, historischen Lehmputzes im Vergleich zu generischem Kalkputz und inerten Beschichtungen am Beispiel eines ausgesuchten repräsentativen Raums im Martin-Gropius-Bau. Die Potenziale der hygrothermischen Eigenschaften der Tonminerale im Lehmputz bestätigten sich in der Simulationsstudie. In einer zweiten Betrachtung wurde ein rechnerisch idealer Lehmputz ergänzt, um die maximal denkbare Wirkung des Puffereffektes abzuschätzen.

Abb. 2.1: Simulation der ausgleichenden Wirkung unterschiedlicher Putze bei Feuchtebelastungen



Das Institut für Bauklimatik an der TU-Dresden führt mit dem Programm „Delphin“ ein Tool, das unter Nutzung zahlreicher hygrischer und thermischer Materialkennwerte ursprünglich darauf angelegt war, Prognosen für die sichere Funktion von Innendämmungen zu erstellen. Auf dieser Basis sind Weiterentwicklungen erfolgt, die als Grundlagen bei der Entwicklung des o.g. Bemessungsverfahrens dienen.

2.2 Zielsetzungen

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines neuen, hinsichtlich der klimatisierenden Raumwirkung optimierten Lehmputzes (kurz: Lehm-Klimaputz). Einhergehend mit der sukzessiven Rezepturenentwicklung und -optimierung erfolgt die Bewertung der

Materialeigenschaften für eine modellhafte, großflächige Anwendung. Mit dieser modellhaften Berechnungsgrundlage soll die Reduktion aktiver technischer Raumklimatisierung durch passive Feuchtepufferung über die optimierte Lehmputzoberfläche bemessen werden. Die verlässliche Planung soll zu Einsparungen bei Investitionen in Klimatechnik und laufenden Energie- und Unterhaltungskosten beitragen, insbesondere in Gebäuden mit sensibler Feuchteregulierung wie Museen.

Die Zielsetzung zur Entwicklung eines passiv klimatisierend wirkenden Lehmputzes erfolgt als Optimierungsprozess unter Randbedingungen. Randbedingungen sind u.a. die Verfügbarkeit der Rohstoffe einer neuen Rezeptur, die möglichst weitgehende Kompatibilität mit DIN 18947, die Rheologie einer Putzmischung, die industrielle Reproduzierbarkeit, die praktische Anwendbarkeit auf der Baustelle und eine möglichst kreislauffähige Mischung mit Wiederwertung der Rohstoffe. Ferner waren neue Rohstoffe gesundheitlich zu bewerten, da insbesondere bei sehr feinkörnigen mineralischen Beimischungen lungengängige und asbestartige Strukturen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden können.

Der FuE Partner begleitet die Materialentwicklung mit Messwertaufnahmen zu Materialeigenschaften und Bewertung der Feuchtepufferung der entwickelten Lehmputzmischungen. Ziel ist die Aufnahme der Daten einer optimierten, finalen Mischung in die Datenbank des Berechnungstools „DELPHIN“, um die weitergehende Nutzung zur Planung von Raumklimatisierungen zu ermöglichen.

2.3 Aufgabenstellungen

Die Aufgabenstellung des Projektes lässt sich in vier Punkten zusammenfassen:

1. Variation der Zusammensetzung des Lehmputzes

Die experimentelle Entwicklung eines Lehmputzes umfasst schrittweise Änderungen der Lehmenteile in Kombination mit mineralischen Zusätzen und Fasern. Dadurch entstehen mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Rezepturoptionen. Die Eingrenzung der letztlich favorisierten Varianten wird durch die Materialprüfungen und raumklimatische Modellrechnungen am Institut für Bauklimatik an der TU Dresden begleitet.

Bei der Auswahl von Zusatzstoffen muss die Rückbaubarkeit und Wiederverwendung des Lehmputzes erhalten bleiben. Diese ökologische Eigenschaft von Lehmputzen bildet eine der in Abs. 2.2 genannten Randbedingungen bei der Entwicklung eines neuen Lehm-Klimaputzes. Gesundheitsschädliche mineralische Strukturen sind auszuschließen.

2. Auswertung und Modellrechnungen

Das Institut für Bauklimatik an der TU-Dresden verfügt mit dem Programm „Delphin“ ein Tool, das unter Nutzung zahlreicher hygrischer und thermischer Materialkennwerte ursprünglich darauf angelegt war, Prognosen für die sichere Funktion von Innendämmungen zu erstellen. Auf dieser Basis sind Weiterentwicklungen erfolgt, die als Grundlagen für erste Modellrechnungen herangezogen worden. Unterstellte die Vorstudie einen generischen und einen idealen Lehmputz mit theoretischen bauphysikalischen Werten, ermittelt und

bewertet der FuE-Partner parallel zur Materialentwicklung und -optimierung echte raumklimatisch relevante Materialkennwerte. Daraus ergibt sich eine Berechnungsgrundlage für den erwartenden Einspareffekt der Klimatisierung. Damit sind die Voraussetzungen für die raumklimatische und damit Lüftungstechnische Planung unter Berücksichtigung der hygrothermischen Eigenschaften der passiven Wirkung der Wandbeschichtung mit Lehmputz gegeben.

3. Optimierung der favorisierten Lehmmischung und Produktionstest

Der Entwicklungsprozess verläuft iterativ mit einem laufenden Austausch zu den gemessenen Eigenschaften der jeweiligen Materialproben bis zum Erreichen einer optimierten thermohygrischen Leistungsfähigkeit eines Lehm-Klimaputzes zur Feuchtepufferung. In dieser letzten Entwicklungsphase folgt auch der Schritt vom Labor in die Produktion des neuen Lehm-Klimaputzes. Dazu sind Testläufe auf Produktionsanlagen an den Standorten von Claytec vorgesehen. Als geeignete Produktionsverfahren stehen drei Optionen zur Disposition: das Erdfeuchtverfahren, die Nachtrocknung und die Trockendosierung. An den Standorten von Claytec sind alle drei Verfahren verfügbar. Vor Projektbeginn und ohne Kenntnis der finalen Lehmmischung kann das optimale Herstellverfahren nicht festgelegt werden. Die Vorbereitung und Erprobung einer industriell reproduzierbaren Lehmmischung konzentriert sich auf die Prozessschritte, darunter die Art der Zufuhr von Komponenten mit unterschiedlichen Aggregatzuständen (pulverig, körnig, faserig); die automatisierte, verlässliche Dosierung (Volumen, gravimetrisch) und Durchmischung der Komponenten.

4. Anwendungstest

Die Anwendungstests dienen der Ermittlung bautechnischer Eigenschaften, die in einem Produktblatt zusammengefasst werden. Insbesondere wurden folgende bautechnische Eigenschaften im Projekt untersucht:

- Mörtelaufbereitung,
- Ergiebigkeit,
- Schichtdicke,
- Haftfestigkeit,
- Rissbildung und Schwindung,
- Maschinengängigkeit und
- Trocknungsverhalten.

3. Hauptteil

Der Hauptteil beginnt mit der Darstellung der technischen Arbeitsschritte von der Rezepturenentwicklung bis zur Modellrechnung in Teil 3.1.

Die Bewertung der erzielten Ergebnisse und die Darlegung der bei der Projektdurchführung aufgetretenen Problemstellungen erfolgt in Teil 3.2.

Die Interpretation der Projektergebnisse unter ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten findet sich in Teil 3.3.

Der Hauptteil schließt in Teil 3.4 mit einem Ausblick zur weiteren Verwertung bzw. Vermarktung der Projektergebnisse.

3.1 Darstellung der technischen Arbeitsschritte

Die Darstellung technischer Arbeitsschritte zeichnet den Entwicklungsprozess nach. Beginnend mit der ersten Rezeptur und der Rückkopplung, insbesondere zur Feuchtesorption seitens des Projektpartners. Danach folgen die Optimierungsphase mit einer modifizierten Rezeptur und schließlich Versuche zur praktischen Anwendbarkeit des optimierten Lehm-Klimaputzes.

3.1.1 Rezeptur und Mischung

Die Rezepturentwicklung vollzog sich in zwei Phasen. Zu Beginn des Projektes konzentrierten sich die Laborversuche zur Entwicklung des Lehm-Klimaputzes auf die Modifikation eines vorhandenen, bewährten Lehmputzmörtels. Die Tabelle (Tab. 3.1) veranschaulicht die Variationen durch Zusatz mineralischer, pflanzlicher und sonstiger Komponenten, um eine geeignete Porengeometrie und resultierende hygrometrische Eigenschaften zu erzielen.

Tab.3.1: Erste Ansätze zur Entwicklung eines Lehm-Klimaputzes

Grundstoffe	Lehm-Klimaputzvarianten 01 – 14
Baulehm	>50 M.-% Baulehmanteil
Mineralische Zusätze	Kieselgur, Perlite, Trassmehl, Ziegelmehl, Bims, Gips, Diatomeeerde, Zeolith
Pflanzenfasern	Hanfüllstoff
Sonstige Zusätze	Zellulosefasern

Bei dieser ersten Auswahl von Zusatzstoffen bleibt die Wiederverwertung des Baulehm und mineralischer Komponenten erhalten. Die Mischungsverhältnisse wurden variiert und die rheologischen Eigenschaften als Putzbeschichtung im Laborversuch getestet. Das Institut für Bauphysik der TU Dresden erhielt zur ersten Analyse der Feuchtesorptionseigenschaften 14 verschiedene Proben im Format 40x40x10mm.

3.1.2 Modellrechnung I

Die Analyse der ersten 14 Proben beim Institut für Bauphysik umfasste folgende Kennwerte:

Symbol	Größe/Beschreibung	Einheit
A_w	<ul style="list-style-type: none"> • Wasseraufnahmekoeffizient <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN EN ISO 15148^[1] ◦ gibt an, wie viel Wasser ein Baustoff innerhalb einer bestimmten Zeit durch kapillares Saugen aufnimmt 	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$
c_p	<ul style="list-style-type: none"> • Spezifische Wärme(-speicher)kapazität <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN EN ISO 10456^[1] ◦ ist die Fähigkeit eines Materials Wärme(-energie) zu speichern 	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
g	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserdampfdiffusionsstromdichte <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN EN ISO 12572^[1] ◦ gibt an wieviel Wasser in Form von Dampf in einer Sekunde durch eine Fläche von einem Quadratmeter strömt 	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ oder $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$
w_{80}	<ul style="list-style-type: none"> • praktischer Feuchtegehalt <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN 4108-3^[1] ◦ auch Volumenbezogener Feuchtegehalt oder Ausgleichsfeuchte genannt ◦ gibt die Menge Wasser an, die ein Baustoff im Gleichgewichtszustand bei 23°C und 80% r.H. speichert 	kg/m^3
$\lambda_{23,\text{dry}}$	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmeleitfähigkeit <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN EN 1745^[1] ◦ auch als Wärmeleitzahl oder Wärmeleitkoeffizient bezeichnet ◦ gibt die Fähigkeit eines Materials an, Wärme(-energie) zu leiten/transportieren ◦ eine niedrige Wärmeleitfähigkeit bedeutet eine hohe Dämmwirkung 	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
μ	<ul style="list-style-type: none"> • (Wasser-)Dampfdiffusionswiderstand(-szahl) <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN EN ISO 12572 ◦ beschreibt den Widerstand eines Materials bezüglich des Dampftransportes 	-

Symbol	Größe/Beschreibung	Einheit
ρ_{roh}	<ul style="list-style-type: none"> • (Trocken-)Rohdichte <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN 4108-4^[6] ◦ auf das Volumen bezogene Masse des Baustoffes ◦ das Volumen enthält bei der Rohdichte auch den mit Luft gefüllten Porenraum 	kg/m ³
Φ	<ul style="list-style-type: none"> • Porosität <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN 4108-3 ◦ ist das Volumen aller im Material vorhandenen Poren bezogen auf das Gesamtvolumen 	m ³ /m ³ oder Vol%
Ψ	<ul style="list-style-type: none"> • kapillarer Wassergehalt <ul style="list-style-type: none"> ◦ nach DIN EN ISO 12570^[7] ◦ Volumenbezogener Feuchtegehalt welcher über kapillares Saugen entsteht ◦ ist das Volumen/Masse des vom Material in den Poren aufgenommenen Wassers bezogen auf das Gesamtvolumen 	m ³ /m ³ oder kg/m ³

Für die Kalibrierung eines späteren DELPHIN Datensatzes wurden insbesondere die Feuchtemassen und damit der Feuchtegehalt in kg/m³ gemessen. Dazu wurden die Lehmputze in einer Umgebung von circa 95 % aufgefuehctet. Anschließend wurden die Probekörper jedes Materials auf vier verschiedene Feuchtestufen aufgeteilt und die Feuchtegehalte durch die Messung der Masse im feuchten und trockenen Zustand gemessen. Nach Abschluss der Messungen wurden die Ergebnisse in Sorptionskurven im Messbereich übertragen und die Ausgleichsfeuchte bei 80 % Luftfeuchte ermittelt.

Abb. 3.1: Sorptionskurven der 1. Lehmputzentwicklung

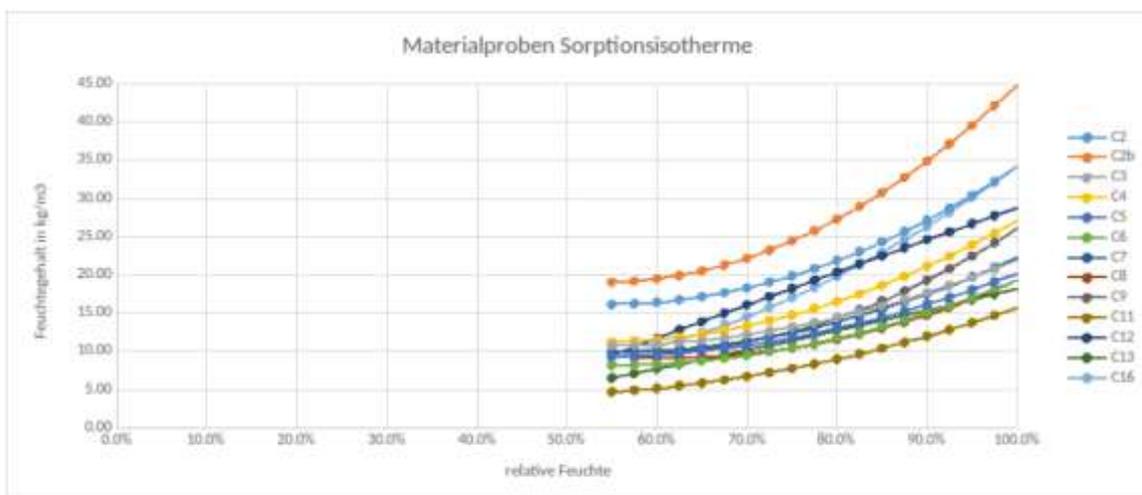


Abbildung 18. Feuchtegehalt C2 - C16

Abb. 3.1 zeigt die Ergebnisse der Feuchtemessung aus der ersten Rezepturentwicklung. Hierbei ist wichtig, dass die Lehmputzproben eine möglichst

große Feuchtespeicherkapazität aufweisen. Das sind die Sorptionsisotherme (= Gleichgewichtszustand der Sorption eines Stoffes abhängig von der relativen Luftfeuchte bei konstanter Temperatur), deren Anstieg am steilsten und deren Minimal- und Maximalwerte am größten entfernt sind. Die Mischungen C2b (orange) und C2 (blau) erzielten die besten Sorptionswerte, gemessen als Feuchtegehalt in kg/m^3 . Den schlechtesten Wert erreichte C11 mit Axilat, einem Hydrokolloid für Mörtel und Putze. Ebenso lagen die Sorptionsisotherme der Mischungen mit Bims, Gips, Perlite unterhalb der Kurven für C2 und C2b. Die Kurve C16 (Abb. 3.1 hellblaue Line unterhalb der blauen Linie für C2) zeigt die Werte einer Mischung mit Hanffasern. Diese Mischung neigte zur Schimmelbildung bei Aufweuchtung. C2 und C2b enthielten Kombinationen aus Lehm, Kieselgur und Diatomeenerde.

Tab. 3.2: Ausgleichsfeuchten der 1. Putzmörtelentwicklung

1. Screening				
Kennzeichnung	Ausgleichsfeuchte bei 80% r.H.			
	$\psi \text{ kg/m}^3$			
C11	9			
C8	11.5			
C6	11.7			
C13	12.7			
C5	13			
C7	13.8			
C9	14.3			
C3	14.4			
C4	16.5			
C16	19.8	(Trocken-)Rohdichte		
C12	20.4	$\rho_s \text{ [kg/m}^3\text{]}$		
C2	21.9	Mittel	Min	Max
C2b	27.3	1921	1891	1943
		1788	1752	1813

Tab. 3.2 (1. Screening) listet die Werte der Ausgleichsfeuchte bei 80% r. F. (kg/m^3) auf. Aus diesem Ranking der Feuchtesorption der ersten Mischungen wurden die beiden besten Rezepturen mit den höchsten Werten ausgewählt. Das sind die Mischungen C2 und C2b. Diese beiden Favoriten der ersten Testreihe haben eine Rohdichte von 1.921 kg/m^3 für C2 und 1.788 kg/m^3 für C2b. Die Rohdichte ist ein Indikator für die Porosität der Lehmputze und damit ihrer Wasseraufnahmekapazität.

3.1.3 Rezepturoptimierung

Nach Auswertung der Kennwerte, insbesondere zur Feuchtesorption, der ersten Stufe der Rezepturentwicklung erwiesen sich einige mineralische Zusätze als nicht zielführend. Ausgeschieden sind Mischungen mit Bims, Gips, Ziegelmehl, Trassmehl und Perlite. Die Lehmmischungen C2 und C2b mit Zusatz von Kieselgur und

Diatomeenerde bildeten die Ausgangsmischung für die Optimierungsphase der Rezepturentwicklung. Die Mischungsverhältnisse wurden variiert und die Rezepturen durch andere pflanzliche Faserzusätze aus Miscanthus, Stroh, Sisal und Hanffüllstoff ergänzt. Eine Mischung enthielt Viscosefasern. Auf der mineralischen Achse der Mischungen kam Sepiolith neu in Betracht. Sepiolith oder Meerschaum ist ein eher seltenes Tonmineral aus der Gruppe der Silikate, chemisch gesehen hydratisiertes Magnesiumsilikat ($Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6 H_2O$). Meerschaum ist weiß, gelblich oder grau gefärbt, besitzt einen matten Glanz und schwimmt auf dem Wasser (hohe Porosität). Sepiolith wird u.a. als Adsorptionsmittel in der Chemieindustrie verwendet.

Die nachfolgende Tabelle verdeutlicht die Anzahl der Varianten für eine optimierte Rezeptur.

Tab. 3.3: Rezepturen der Optimierungsphase

II. Rezepturen	Mineralien			Fasern	
C2_2N	Trockenlehm	Diatomeenerde		Miscanthus	Hanf Füllstoff
C2_3	Trockenlehm	Diatomeenerde	Sand	Miscanthus	Hanffüllstoff
C2_4	Trockenlehm	Diatomeenerde	Sepiolith	Miscanthus	Hanffüllstoff
C2_5	Trockenlehm	Diatomeenerde	Zeolith	Miscanthus	Hanffüllstoff
C2_6	Trockenlehm	Diatomeenerde		Miscanthus	Zellulose
C2_7	Trockenlehm	Diatomeenerde		Miscanthus	Sisal
C2_8	Trockenlehm	Diatomeenerde	Sepiolith	Miscanthus	Sisal
C2_9	Trockenlehm	Diatomeenerde	Kieselgur	Miscanthus	Hanffüllstoff
C2_10	Trockenlehm	Diatomeenerde		Miscanthus	Viscose
C2_11	Trockenlehm	Diatomeenerde		Stroh	Zellulose
C2_12	Trockenlehm	Diatomeenerde	Zeolith	Miscanthus	Sisal

Baulehm bleibt mit durchschnittlich 55 M.-% Hauptbestandteil aller optimierten Rezepturen. Diatomeenerde wurde in verschiedenen Körnungen 0/1 und 2/3 kombiniert (in Tab.3.3 Rezepturen C2_2N, C2_3, C2_4, C2_5, C2_6, C2_7, C2_10 und C2_11). Die mineralischen Zusätze von Sepiolith bzw. Zeolith ersetzen in den Mischungen C2_8 und C2_12 Diatomeenerde mit der größeren Körnung 2/3.

Fasern sollen zur Verbesserung der bautechnischen Eigenschaften der Putzmörtel beitragen, z.B. innere Armierung, Rißbildung, Sämigkeit, Wasseraufnahme. Langfasern aus Miscanthus (Schilfart) oder Stroh wurden mit unterschiedlichen Feinstfasern (Zellulose, Viscose, Sisal) kombiniert.

3.1.4 Modellrechnung II

Das Institut für Bauklimatik ermittelte die Materialkennwerte nach dem gleichen Vorgehen wie bei der ersten Phase der Rezepturentwicklung.

Tab. 3.4: Vergleich der Ausgleichsfeuchtwerte der ersten und zweiten Rezepturentwicklung

1. Screening		2. Screening	
Kennzeichnung	Ausgleichsfeuchte bei 80% r.H.	Kennzeichnung	Ausgleichsfeuchte bei 80% r.H.
	ψ kg/m ³		ψ kg/m ³
C11	9	C2/11	25.1
C8	11.5	C2/3	26
C6	11.7	C2/6	27.1
C13	12.7	C2/7	28
C5	13	C2/10	28.2
C7	13.8	C2/9	29.8
C9	14.3	C2/2N	30.6
C3	14.4	C2/12	30.6
C4	16.5	C2/5	31
C16	19.8	C2/4	32.4
C12	20.4	C2/8	32.7
C2	21.9	-	-
C2b	27.3	-	-

Tab. 3.4 stellt die Werte zur Ausgleichsfeuchte bei 80% r. F in kg /m³ der ersten Rezepturentwicklung (1. Screening) denen der optimierten Rezepturen (2.

Screening) gegenüber. Der beste Wert aus der ersten Rezepturentwicklung mit 27,3 kg/m³ wurde von acht der elf optimierten Rezepturen übertroffen.

Abb. 3.2: Sorptionsisothermen der optimierten Rezepturen

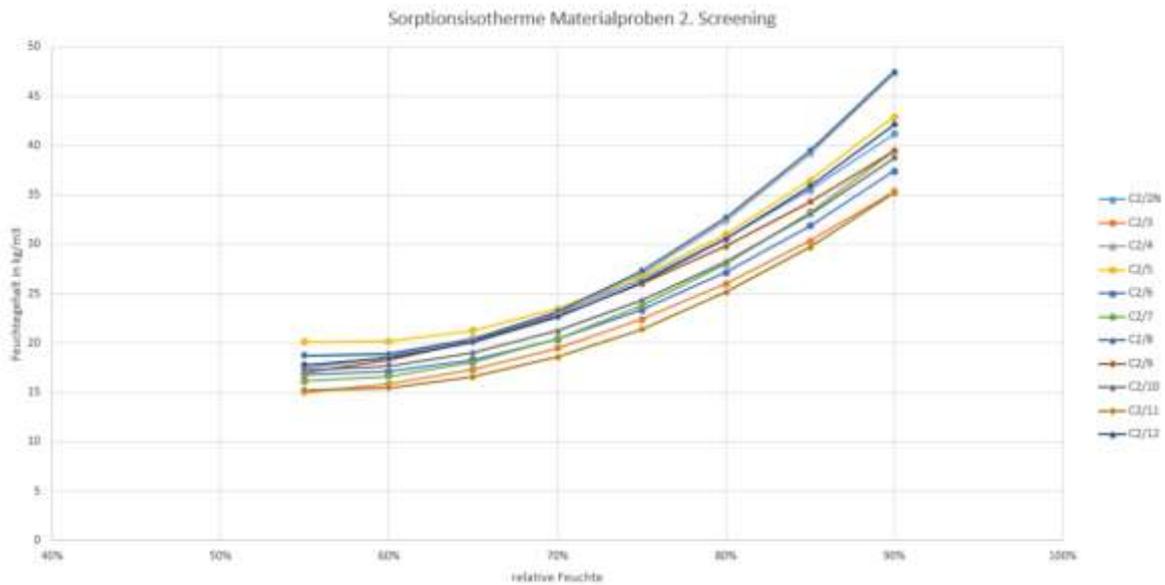


Abb. 3.2 zeigt die Ergebnisse der Feuchtemessung für die optimierten Rezepturentwicklungen auf Basis der besten Rezeptur aus der ersten Entwicklungsphase – C2. Für die Bewertung ist wichtig, dass die Lehmputze eine möglichst große Feuchtespeicherkapazität aufweist. Den steilsten Anstieg mit dem größten Delta zwischen Minima- und Maximalwerte zeigt der Sorptionsisotherm der Rezeptur C2_8.

Abb. 3.3: Feuchtigkeitsgehalt der optimierten Mischung C2_8

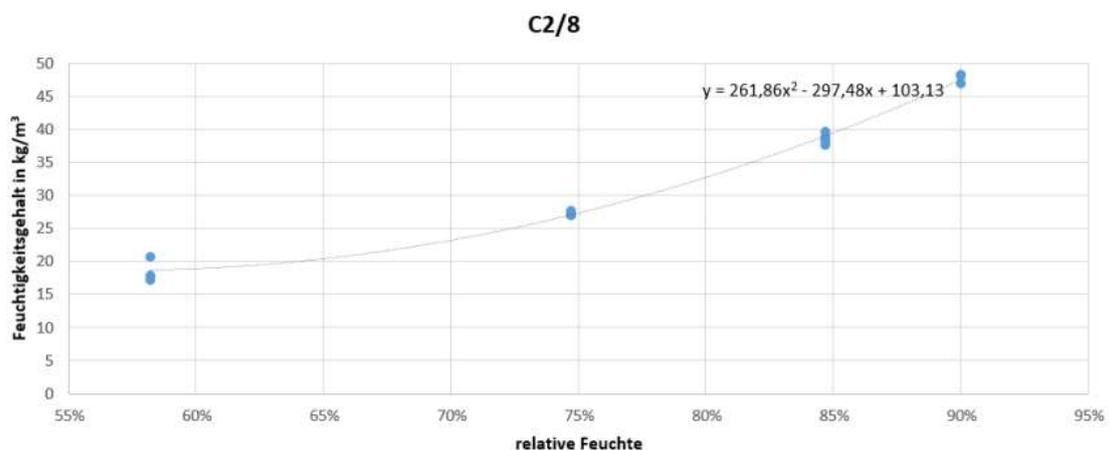
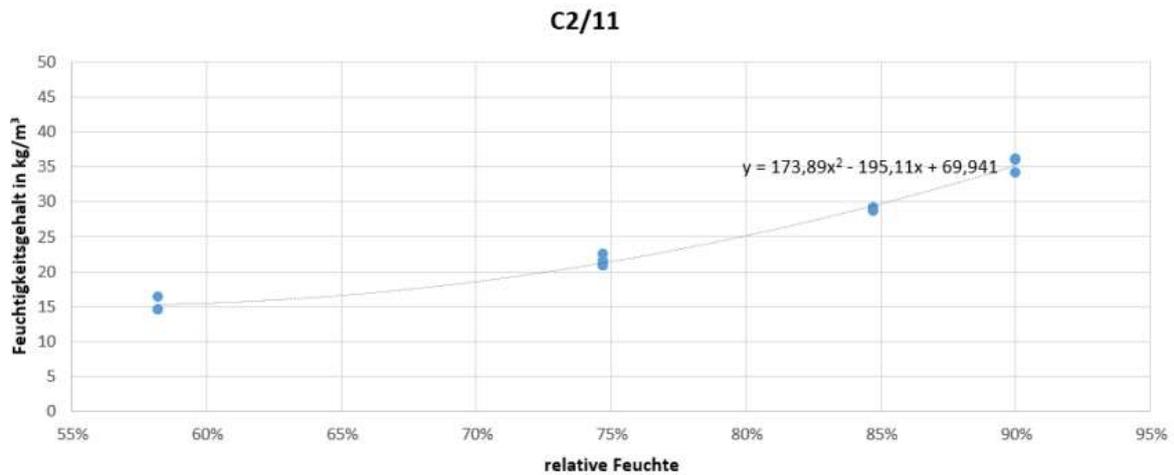


Abb. 3.4: Feuchtigkeitsgehalt der optimierten Mischung C2_11



Ein ausgewählter Vergleich der favorisierten Rezeptur C2_8 mit der Rezeptur C2_11 aus den Versuchsreihen der Optimierungsphase verdeutlicht den Unterschied. Die Modellrechnung der Feuchtesorption bei ansteigender Luftfeuchte in dem kritischen Bereich > 50% r. F. ergibt eine höhere Aufnahmekapazität der Mischung C2_8 gegenüber C2_11. Zugleich ist der Anstieg der Feuchteaufnahme mit steigender relativer Luftfeuchte signifikant höher und damit schneller als bei der Mischung C2_11.

Tab. 3.5: Vergleich der Zusammensetzung mit/ohne Sepiolith

C2_8	Trockenlehm	Diatomeenerde	Sepiolith	Miscanthus	Sisal
C2_11	Trockenlehm	Diatomeenerde		Stroh	Zellulose

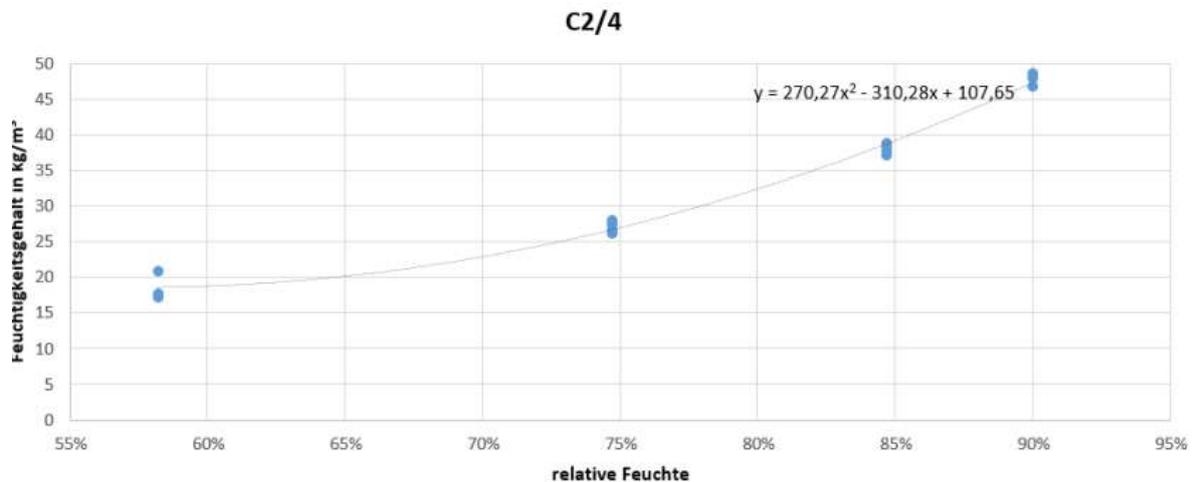
Die unterschiedliche Zusammensetzung der beiden Rezepturen in Tab.3.5 weist darauf hin, dass die mineralische Achse mit Sepiolith den Unterschied hinsichtlich der Feuchtesorption ausmacht. Diese Wirkung durch Optimierung der mineralischen Achse der Rezeptur belegt ein weiterer Vergleich in Tab. 3.6.

Tab. 3.6: Vergleich der Zusammensetzung zweier Rezepturen mit Sepiolith

C2_8	Trockenlehm	Diatomeenerde	Sepiolith	Miscanthus	Sisal
C2_4	Trockenlehm	Diatomeenerde	Sepiolith	Miscanthus	Hanffüllstoff

Die zweitbeste Mischung ist C2_4 ebenfalls mit Sepiolith, aber mit Hanffüllstoff statt Sisal verhält sich annähernd gleich zu C2_8 (Abb. 3.5).

Abb. 3.5: Feuchtigkeitsgehalt der optimierten Mischung C2_4



Mineralische Feinzuschläge wurden dem ECO-Institut, Köln, dass auch die Gesundheitsaspekte anderer ClayTec-Lehmmörtelprodukte bewertet und zertifiziert, zur Vorab-Einschätzung vorgelegt. Bezüglich des Sepioliths empfahl das Institut die weitere Untersuchung auf Asbest bzw. asbestartige Strukturen. Damit wurde das Bremer Umweltinstitut beauftragt. Entsprechende Strukturen konnten nicht nachgewiesen werden, einer Zertifizierung des Lehm-Klimaputzes, die auch für Gebäudebewertungssysteme wie dem des DGNB, LEED oder BREEAM zentral ist, steht damit nichts im Wege.

3.1.5 Produktion und Anwendung

Der optimierte Lehm-Klimaputz lässt sich im Trockendosierverfahren industriell herstellen. Die verwendeten Komponenten der Rezeptur sind getrocknete Vorprodukte in der Lieferform als Silo- oder Sackware. Der verwendete Trockenlehm aus Erdaushub (Sekundärlehmaushub) ist am Produktionsstandort von Claytec als Siloware vorhanden. Das im Projekt erprobte Trockendosierverfahren erlaubt eine hinreichende Dosiergenauigkeit und Durchmischung der pulverförmigen, körnigen Mineralien mit den Feinfasern. Die Rezeptur ist in der Steuerung der Dosieranlage hinterlegt. Der optimierte Lehm-Klimaputz kann als Trockenmörtel zu den Baustellen geliefert werden.

Die Anwendungsversuche dienen der Erprobung der bautechnischen Praktikabilität. Dazu gehören Aspekte der Mörtelaufbereitung (Wasserzugabe, Mischgeräte), Ergiebigkeit, minimale und maximale Schichtdicke pro Lage, Haftfestigkeit, Schwindung und Rissbildung, Putzmaschineneignung, Verarbeitungseigenschaften, Druckfestigkeit und Abrieb und des Trocknungsverhaltens.

Die Anwendungsversuche wurden mit der optimierten Rezeptur C2/8 durchgeführt.

Mörtelaufbereitung: Aufgrund der großen inneren Oberfläche (= Summe aller Kornumhüllungsflächen) und des hohen Anteils organischer Bestandteile (Pflanzenfasern) liegt der Anmachwassergehalt mit ca. 75% sehr hoch (üblich Lehmputze 20-25%). Das Material ist mit allen üblichen Mischgeräten und auch von Hand leicht aufzubereiten.

Ergiebigkeit: Aus 1 kg Trockenmörtel sind 1,5 l Frischmörtel herzustellen (üblich Lehmputze 0,75 l). Die Ergiebigkeit ist somit sehr gut.

Schichtdicke: Die Spannweite der möglichen Auftragsdicken wurde mithilfe der von ClayTec für Lehmputzmörtel entwickelten Keilprobe ermittelt. Dabei wird der Mörtel im Querschnitt (Seitenansicht) keilförmig auf einen Standarduntergrund (hier Porenbetondiele) aufgetragen, um die Anhaftung und Rissneigung bei dünnem und dickem Auftrag (5 bis 30 mm) zu bewerten. Grundsätzlich können diese Dicken mit Lehm-Klimaputz realisiert werden. Damit sind wirtschaftlich attraktive einlagige Aufbauten bis 30 mm Dicke möglich. Als Standarddicken können wie bei anderen Lehmputzmörteln 10-15 mm angegeben werden.

Abb. 3.6: Keilprobe Mischung C2_8 Seiten- und Draufsicht



Haftfestigkeit: Die Haftfestigkeit ist geringer als bei anderen Lehmputzmörteln. Bei sehr dicken Aufträgen kann es zum Nachlassen der Adhäsion kommen, wie die kleine Spaltbildung im rechten Drittel der Keilprobe (Seitenansicht) zeigt. Für gut griffige Untergründe der Denkmalpflege und Altbausanierung ist die Haftfestigkeit ausreichend. Für mittelmäßig und schlecht griffige Untergründe werden besondere vorbereitende Maßnahmen wie Putzträger, Kammspachtelungen oder ein mehrlagiger dünner Auftrag empfohlen.

Rissbildung und Schwindung: Die Oberfläche der Keilprobe zeigt auch bei dickem Auftrag keinerlei Schwindrisse. Die mutmaßlich geringe Schwindneigung wird durch die Prüfung des linearen Trockenschwindmaßes am Mörtelprisma 40 x 40 x 160 mm nach DIN 18947 bestätigt. Das Schwindmaß ist mit 1,4% sehr niedrig (zulässig nach DIN 18947 sind 3%).

Abb. 3.7: Mörtelprismen C2_8



Putzmaschineneignung: Die sehr kleinteiligen Körnungen mit teils sperrigen Geometrien machen die Verarbeitung in gängigen Gipsputzmaschinen (z.B. PFT G4) schwierig. Die entsprechenden Versuche wurden abgebrochen, nachdem Parameter wie Konsistenz, Förderdruck und Schlauchquerschnitt nicht zur maschinellen Förderfähigkeit führten. Die Verarbeitung per Zwangsmischer und Mörtelpumpe ist möglich. Die eingeschränkte Maschinengängigkeit könnte ein Markthemmnis bilden, allerdings sind besondere Putzmaschinen für Spezialputze nicht unüblich. Eine Verbesserung des Putzmörtels im Hinblick auf die Putzmaschineneignung ist grundsätzlich möglich, wurde aber hier aufgrund der zuvor erfolgten fein austarierten bauphysikalischen Optimierung zurückgestellt.

Verarbeitungseigenschaften: Aufgrund der o.g. Körnungseigenschaften lässt sich der Putzmörtel nicht so angenehm ebnen und glattziehen, wie es bei gängigen Gipsputzen, aber auch vielen Lehmputzen üblich ist. Rein technisch gesehen sind die Verarbeitungseigenschaften nicht problematisch, allerdings haben Mörtel, die mit wenig Anstrengung und schnellem Ergebnis verarbeitet werden können, erfahrungsgemäß Marktvorteile. Auch dieses vermeintliche Handicap bleibt zunächst unbearbeitet, wesentlich wird hier die konkrete Rückmeldung aus dem Markt sein. Die Anhaftung ist gut, ebenso das Stehvermögen beim Anspritzen in dicken Lagen, was aus der geringen Dichte des Mörtels und den Korngemetrien resultiert.

Druckfestigkeit und Abrieb: DIN 18947 unterteilt Lehmmörtel in zwei Festigkeitsklassen. Aufgrund der ersten orientierenden Tests zu Haftfestigkeit, Druckfestigkeit und Abrieb ist es möglich, dass der Lehm-Klimaputz in die festigkeitsklasse I eingeordnet werden muss. Das Technische Merkblatt TM01 „Anforderungen an Lehmputz als Bauteil“ des Dachverband Lehm e.V., Weimar fordert: „Werkmörtel für normal genutzte Räume soll in der Regel die Anforderungen

der Festigkeitsklasse S II nach DIN 18947 erfüllen.“ Hier ergibt sich ein Zielkonflikt. Der hohe Anteil an feinen mineralischen Bestandteilen mit besonderer Porenstruktur limitiert die Festigkeit des Putzes. Er wäre als Spezialputz zu betrachten, der mithilfe architektonischer und konstruktiver Maßnahmen geschützt wird und somit geringeren Anforderungen genügen muss. Derartige Lösungen gibt es für die sog. Akustikputze, die ebenfalls weich und porös sind und bei deren Anwendungsrichtlinien Anleihen gemacht werden könnten. (Exkurs: Eine Untersuchung der akustischen Eigenschaften des Lehm-Klimaputz ergibt möglicherweise interessante Zusatznutzen auf dem Feld der akustischen Wirksamkeit.) Eine Verbesserung der Oberflächenfestigkeit durch entsprechende Anstrichstoffe ist möglich und wünschenswert, allerdings müssen die Anstrichmittel im Hinblick auf Diffusionsoffenheit sehr sorgfältig ausgewählt werden.

Trocknungsverhalten: Aufgrund der porösen Bestandteile und des hohen Anmachwassergehalts trocknet der Lehm-Klimaputz vergleichsweise langsam. Nach Tabelle A.2- „Mikrobielle Beschaffenheitsklassen von Lehmputzmörteln“ der DIN 18947 ist der Putzmörtel in MBK Ib einzuordnen (= mit Pflanzenfasern, trocken). Aufgrund der organischen Bestandteile kann der Putz bei schlechter Trocknung und ungünstigen klimatischen Umständen von Schimmel befallen werden, was auch durch den vergleichsweise niedrigen pH-Wert von ca. 7 nicht verhindert werden kann. Der Putz muss darum auf der Baustelle zügig und mit gebotener Sorgfalt getrocknet werden. In der Putz-Anwendungsnorm DIN 18550-2 (6-2015) „Putz und Putzsysteme-Ausführung (Innenputz)“ sowie im Technischen Merkblatt TM 01 (6-2014) „Anforderungen an Lehmputz als Bauteil“ des Dachverband Lehm e.V. (DVL) wird die Überwachung der Einhaltung ausreichender Trocknungsbedingungen bei kritischen Anwendungsfällen gefordert. Insbesondere bei dicklagigem Auftrag auf schlecht saugenden Untergründen wäre ein solcher kritischer Anwendungsfall gegeben.

Die Ergebnisse der Versuche und Bewertungen zur Anwendung sind im „Produktblatt Lehm-Klimaputz“ zusammengefasst.

Abb. 3.8: Entwurf Produktblatt ClayTec Lehm-Klimaputz

Produktblatt

Lehm-Klimaputz

Art. 05.xxx, 10.xxx

Lehmputzmörtel - analog DIN 18947 - LPM 0/2 m - S II - 0,9

Anwendung Ein- oder mehrlagiger Grund- und Deckputz im Innenbereich. Hand- oder Maschinenputz auf Mauerwerk, Massivbaustoffen u.ä.

Zusammensetzung Natur-Baulehm, Kieselgut, pflanzliche Fasern, Meerscham (Sepiolith), Korngruppe, Überkorngröße nach DIN 0/2, < 2 mm.

Herkunftsland Deutschland

Baustoffwerte Trocknungsschwindmaß ≤ 2,0%. Festigkeitsklasse S I. Rohdichteklasse 0,9. Wärmeleitfähigkeit 0,15 W/mK. μ-Wert 3/5. Wasserdampfdampfsorptionsklasse WS III. Mikrobielle Beschaffenheitsklasse MBK Ib.

Lieferformen, Ergiebigkeit

Trocken 05.xxx in 500 kg Big-Bags (erg. 750 l Putzmörtel, 75 m² Fläche bei D= 1,0 cm. Ca. 0,67 kg/m² je mm Putzdicke.)

Trocken 10.lxxx in 12,5 kg Säcken (erg. 18,75 l Putzmörtel, 1,9 m² Fläche bei D= 1,0 cm. Ca. 0,67 kg/m² je mm Putzdicke), 48 Sack/Pal.

Lagerung Sachgemäße trockene Lagerung unbegrenzt möglich.

Mörtelbereitung Unter Wasserzugabe von ca. 75% mit handelsüblichen Freifall-, Teller- und Trogzwangsmischern, in kleinen Mengen auch mit dem Motorquirl oder von Hand. Hinweise zum Einsatz von Putzmaschinen unter www.claytec.de.

Putzgrund Lehmputze haften nur mechanisch. Der Untergrund muss tragfähig, frostfrei, trocken, sauber, frei von Salzbelastung, ausreichend rau und saugfähig sein. Als Grundierung ist DIE ROTE für grobe Lehmputze (ClayTec 13.435-430) geeignet. Zum Binden von Oberflächenstaub Untergrund ggf. Vornässen (Sprühnebel). Rohrgewebe muss trocken sein.

Putzauftrag Der Mörtel wird mit der Kelle angeworfen, aufgezogen oder mit der Putzmaschine (Offene Systeme mit Mischer und Mörtelpumpe) angespritzt. Auftragsdicke Grundputze 10-15 mm, je nach Untergrund bis zu 30 mm pro Lage, Deckputze 6-10 mm. Auf Beton oder über Kopf grundsätzlich nur 6 mm pro Lage. Die Mörtelkonsistenz ist auf die Auftragsstärke abzustimmen.

Verarbeitungsdauer Da kein chemischer Abbindeprozess stattfindet, ist das Material abgedeckt über mehrere Tage verarbeitungsfähig. Ebenso lange kann es in Putzmaschinen und Schläuchen bleiben.

Trocknung Nach dem Auftrag muss für rasche Trocknung gesorgt werden, z.B. mittels Querlüftung (24 Std. pro Tag alle Fenster und Türen geöffnet) oder Trocknungsgeräte. Bei kritischen Bedingungen ist die Trocknung gemäß DIN 18550-2 zu protokollieren. Details siehe dort oder im ClayTec „Arbeitsblatt Lehmputze“.

Weiterbehandlung Der Weiterverputz erfolgt nach vollständiger Trocknung der vorherigen Lage, frühestens nach Abschluss möglicher Schwindrissbildung. Zum Erhalt der speziellen Sorptionseigenschaften sind hoch diffusionsoffene Anstrichsysteme zu wählen.

Hinweis Farbe und Textur unterschiedlicher Lehmputz Mineral Lieferformen können leicht variieren. Als Lehmputzmörtel der Festigkeitsklasse S I ist das Produkt nur für Anwendungen mit geringen mechanischen Anforderungen geeignet. Dies ist bei Planung und Nutzung zu berücksichtigen. Reklamationsansprüche aufgrund zu hoher Ansprüche an die Gebrauchstauglichkeit werden nicht anerkannt.

Arbeitsproben Untergrundeignung und Auftragsstärke sind in jedem Fall anhand einer ausreichend großen Arbeitsprobe zu überprüfen.

Reklamationsansprüche, die nicht aus werkseitigen Mischfehlern resultieren, sind ausgeschlossen. Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Stand 2025/3.

3.2 Diskussion der Ergebnisse

Durch das in Abs. 3.1 aufgezeigte Zusammenwirken von Rezepturentwicklung und Materialprüfungen entstand im Förderprojekt ein für die passive Feuchteregulierung optimierter Lehmputz (Rezeptur C2_8, Tab. 3.3). Die ermittelten Materialkennwerte des optimierten Lehmputzes bildeten die Eingangsgrößen zur Raumsimulation mit Hilfe des DELPHIN-Programms beim Institut für Bautechnik der TU Dresden. Voraussetzung für Simulationsberechnungen waren insbesondere die Kennwerte des Lehmputzes zu Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmespeicherkapazität und der Wasserdampfdiffusionswiderstand. Zusammen mit den Materialdaten zur Feuchtesorption lassen sich verifizierbare Berechnungen zur Feuchtepufferung in spezifisch modellierten Räumen anstellen, hier Museumsräume im Martin-Gropius-Haus. Die Simulation schließt Wetterdaten und unterschiedliche Verweilzeiten der Besucher mit ein.

Für hygrothermische Bemessungen und Simulationsberechnungen (DELPHIN) darf der Wert der trockenen Wärmeleitfähigkeit verwendet werden, da hier die Software die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt berücksichtigt.

Tab. 3.7: Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmespeicherkapazität

Kennzeichnung	Wärmeleitfähigkeit			Spezifische Wärme(speicher)kapazität		
	$\lambda_{23,dry}$ [W/(m·K)]			c_p [J/(kg·K)]		
	Mittel	Minimum	Maximum	Mittel	Minimum	Maximum
C2/8	0.148	0.143	0.152	601	525	698

Die gegenüber der ersten Phase erfolgte Rezepturentwicklung, u. a. erkennbar an der um die Hälfte reduzierte Rohdichte der Mischung C2_8 (Tab.3.7), bewirkt eine geringe mittlere Wärmeleitfähigkeit von 0,148 W/(m·K) und eine mittlere Wärmespeicherkapazität von 601 J/(kg·K). Das liegt insbesondere an der Beimischung des porösen Minerals Sepiolith. Zum Vergleich: Nach der Tabelle T 5-3 der *Lehmbau Regeln* des Dachverband Lehm e.V. und den Angaben der DIN 4108-4 wäre ein Wert von ca. 0,30 W/(m·K) zu erwarten.

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand wurde im trockenen Bereich (Dry-Cup) und im feuchten Bereich (Wet-Cup) ermittelt.

Randbedingungen Dry-Cup:

- Raumluftfeuchte im Cup: 32.8 %
- Raumluftfeuchte außerhalb des Cups: ist nahe 0 %

Randbedingungen Wet-Cup:

- Raumluftfeuchte im Cup: 96.0 %
- Raumluftfeuchte außerhalb des Cups: 65 %.

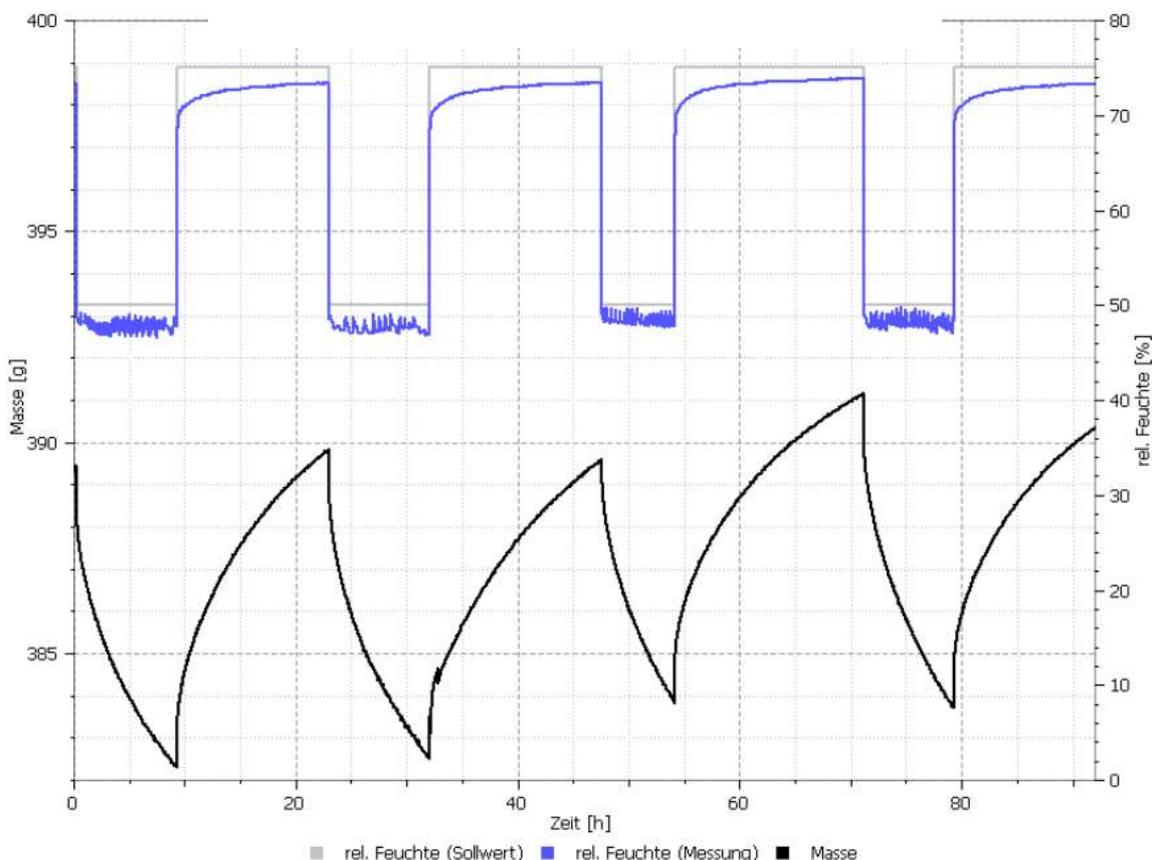
Tab. 3.8: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Kennzeichnung	Dampfdiffusionswiderstand Dry-Cup			Dampfdiffusionswiderstand Wet-Cup		
	μ [einheitenlos]			μ [einheitenlos]		
	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max
C2/8	5.70	5.50	5.90	3.23	2.97	3.35

Die Mittelwerte von 3,2 bzw. 5,7 (Tab. 3.8) signalisieren eine gute Durchlässigkeit aufgrund der Porosität der Mischung C2_8. Zum Vergleich: Nach der Tabelle T 5-5 der *Lehmbau Regeln* des Dachverband Lehm e.V. und den Angaben der DIN 4108-4 wären Werte von 10 und 5 zu erwarten.

Ausgehend von der Sorptionsisotherme des optimierten Lehmputzes C2_8 in Abb. 3.3 folgt die Simulation von Befeuchtungszyklen an Probekörpern. Dabei erhöht sich der Feuchtegehalt nach ca. 6 h konstant 40% r. F. plötzlich auf 80% r. F. und verbleibt 12 h auf diesem Niveau. Danach folgt eine Absenkung auf ca. 40% r. F (Abb. 3.6).

Abb. 3.6: Adsorptions/Desorptionszyklen eines Probekörpers mit C2_8



Die Abb. 3.6 bildet den zeitlichen Verlauf der Feuchteaufnahme und -abgabe von Probekörpern mit dem optimierten Lehmputzmörteln C2/8 im mittleren Feuchtebereich zwischen 40-80% r. F. ab. Die oberen blauen Linien zeigen die in der Testumgebung tatsächlich gemessene relative Luftfeuchte mit wiederholtem Wechseln zwischen knapp unter 50% r. F. bis knapp unter 80% r. F. (rechte Skala). Die untere schwarze Linie zeigt die Masseveränderung des Lehmputzes bei ansteigender und abnehmender relativer Luftfeuchte in der Testumgebung (linke Skala).

Der optimierte Lehmputz hält ein signifikant hohes und gleichbleibendes Feuchtesorptionsniveau mit Amplituden von 10 g zwischen Adsorption (um 390 g.) und Desorption (um 380 g). Die Masseveränderung lässt sich anhand der Größe der Probekörper besser einordnen (Abb. 3.7)

Abb. 3.7: Probekörper mit C2_8



Die Probekörper hatten ein Format von etwa DIN A4. Die Massendifferenz zwischen Adsorption und Desorption von 10 g bezieht sich auf eine Fläche von nur rund 0,06 m². Hochskaliert auf 1 m² errechnet sich eine Feuchtepufferung von ca. 160 g in einem Zyklus.

Die Messergebnisse für den optimierten Lehmputz C2_8 bildeten die Grundlage für die Simulation der Feuchtesituation in Räumen des Martin-Gropius-Baus. Im Rahmen der Analyse wurden mehrere Varianten erstellt, bei denen einzelne Parameter wie die Verweildauer einer festgelegten Anzahl von 10 Personen im Raum, sowie die Fläche des feuchtigkeitsregulierenden Putzes im Raum variiert wurden. Variante 0, 1 und 2 stellen die Abhängigkeit der verschiedenen Putzflächen (ohne, mit 42 m², 232,2 m²) für den Raum "OG1.14 Ausstellung" dar. Weiterhin stellen die Variante 1, 2, 3 und 4 die Abhängigkeit der Verweildauern (15, 30, 45, 60 min) für den Raum "OG1.14 Ausstellung" dar. Die Variante 6 und 7 erweitern diese Analyse der Verweildauern auf den Raum "OG1.15 Ausstellung". Die Personenanzahl ist für alle Räume konstant auf

10 gesetzt. Somit konnte die Feuchtespeicherfunktion exakt im Bereich 55-90% Luftfeuchte nachgebildet werden. Die Personen sind täglich anwesend im Zeitraum von 9:00 bis 20:00 Uhr. Die Extremwerte der Raumlufffeuchten schwanken je nach Verweildauer der Besucher in dem Museum (Tab. 3.9).

Tab. 3.9: Extremwerte der Raumlufffeuchten nach Verweildauer

Verweil- dauer [min]	Putz ohne Feuchtespeicherung		ClayTec-Putz an Außenwänden (42m ²)		ClayTec-Putz an allen Wänden (238m ²)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
15	12%	75%	25%	74%	27%	70%
30	12%	77%	25%	76%	27%	71%
45	13%	79%	26%	77%	27%	72%
60	13%	81%	26%	79%	27%	74%

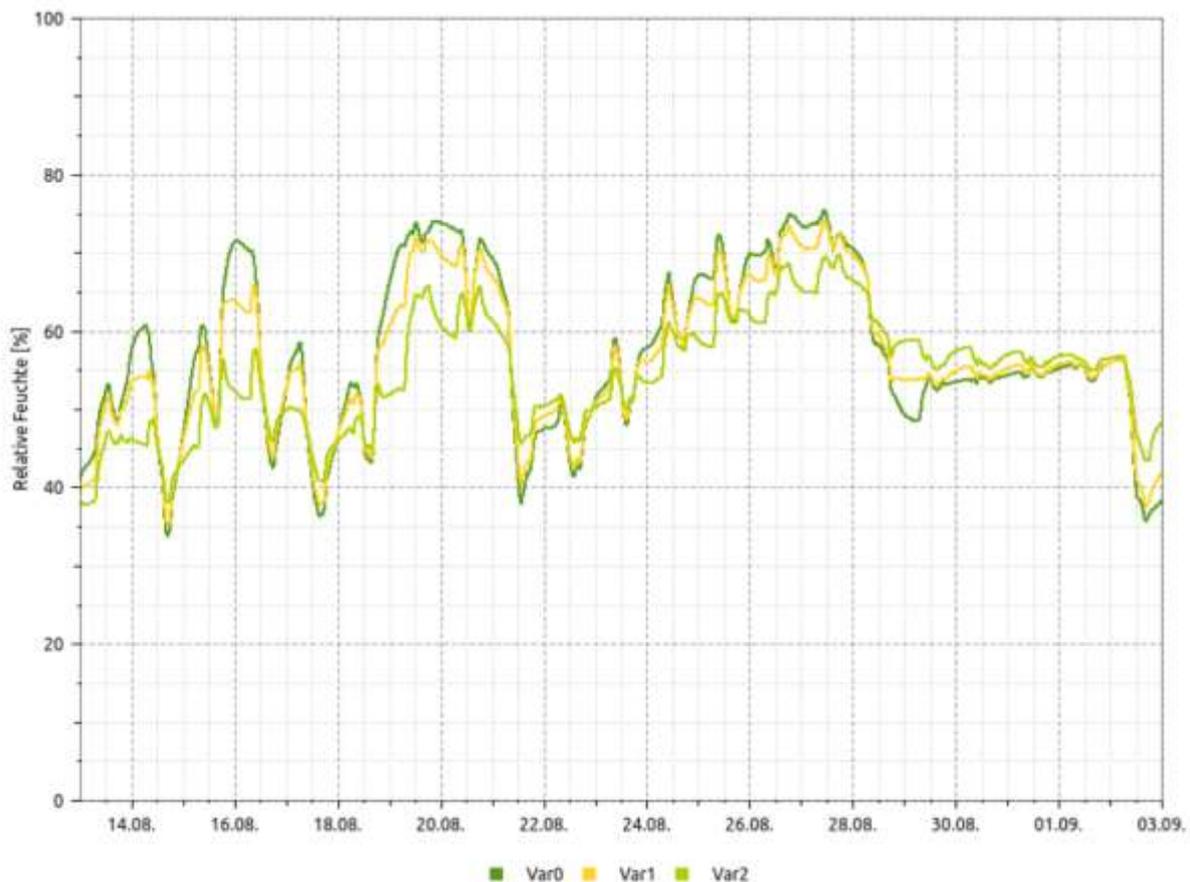
Bei einer vollflächigen Beschichtung mit Lehmputz verstetigen sich die Extremwerte und das Delta zwischen Min und Max bei 60 Minuten Verweildauer beträgt 47% verglichen mit 53% bei Beschichtung nur der Außenwände und 68% bei Beschichtung mit Putz ohne Feuchtespeichereffekt. Je höher die Verweildauer steigt desto geringer ist die regulierende Wirkung des Putzes. Daher wird angeraten den Putz für solche Situationen in der Nacht zu entladen. D.h. durch gezieltes Entfeuchten der Raumluff und damit das Entladen der Feuchte aus dem Putz kann die Speicherfähigkeit des Putzes weitaus besser ausgenutzt werden. Diese Variante sollte unbedingt geprüft werden und bei erfolgreichen Ergebnisse in die Steuerung der GLT übertragen werden.

In den nachfolgenden Vergleichen werden die Variante 0, 1 und 2 gegenübergestellt. Hierbei wird die Putzfläche im Raum OG1.14 variiert.

- Var0 kein Putz
- Var1 nur Putz auf der Außenwand
- Var2 alle Wandflächen geputzt
- Verweildauer der Personen für diese Varianten 15 min/h.

Wenn kein Putz vorhanden ist, ist keine Pufferfähigkeit im Raum vorhanden (Abb. 3.8 dunkelgrüne Linie). Daher kommen sehr hohe Feuchten im Sommer als auch sehr niedrige Feuchten im Winter. Sobald Putzflächen integriert werden, werden die Raumlufffeuchten stabiler. Je mehr Putzfläche desto mehr Stabilität stellt sich ein (Abb. 3.8 hellgrüne Linie).

Abb. 3.8: Simulierte Raumlufffeuchten der Var 0, 1 und 2 im Raum OG 1.1.4 Martin-Gropius-Bau



In Tab. 3.10 werden die Energien für die Feuchteconditionierung dargestellt. Hierbei sind nur die physikalischen Umwandlungsenergien (Feuchte/Dampf) enthalten. Die Verdampfungsenthalpie zur Umwandlung von Feuchte in Dampf bemisst die passive energetische Leistung der Lehmputzfläche.

Tab. 3.10: Physikalische Umwandlungsenergie der Feuchteconditionierung

$Q_{\text{Verdampfungs-enthalpie}}$ [kWh]	Entfeuchtung Var1	Entfeuchtung Var2	Befeuchtung Var1	Befeuchtung Var2
Summe Sommer	201	506	-317	-106

Für die Befeuchtung und Entfeuchtung werden zuerst die idealen Bedingungen der Gasgleichung angenommen. Würden diese Be- bzw. Entfeuchtungswassermengen mittels Anlagentechnik eingebracht, müssen zusätzlich zur Umwandlungsenergie, Energien für Heizen, Kühlung und Verteilung angesetzt werden. Dadurch stellen die ausgewiesenen Energien nur einen Teil dar. Somit ist der positive Effekt auf den Energiebedarf noch weitaus höher zu bewerten. Skaliert man diesen Einsparungseffekt auf die 5000 m² Fläche hoch, werden 15 MWh an rein physikalischer Umwandlungsenergie eingespart. Mit den weiteren Energien durch

Kühlung, Heizung, Verteilung und Anlageneffizienzen kann dieser Wert nach Schätzungen des Instituts für Bauklimatik mindestens verdoppelt werden. Dadurch sind mindestens 30 MWh/a an Einsparungen möglich. Zudem wird die Anlage dadurch kleiner. Damit sinken neben den Betriebskosten auch die Investitionskosten. Die mögliche Verkleinerung der Lüftungskanalquerschnitte ist sehr günstig für die architektonische Integration der technischen Einbauten in den Bestand, hier ein bedeutendes Deutsches Baudenkmal.

3.3 Ausführliche technologische, ökologische, und ökonomische Bewertung

Die im Projekt erzielten Ergebnisse lassen sich unter drei Aspekten bewerten:

- Berechnungsmodell passiver Klimatisierungseffekte (technologischer Aspekt)
- Ökobilanz des Lehmputzes (ökologischer Aspekt)
- Energieeinsparung und geringerer Investitionsaufwand (ökonomischer Aspekt)

3.3.1 Berechnungsmodell für passive Klimatisierungseffekte (technologischer Aspekt)

Die ausführliche beschriebene Messwertaufnahme für den im Förderprojekt optimierten Lehm-Klimaputz bildete ein realistische, reproduzierbare Eingangsgröße zur Simulation einer Raumklimatisierung im DELPHIN-Programm des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden. Bisher waren nur generische Daten für Lehmputz im Programm hinterlegt. Mit dem Förderprojekt steht jetzt ein auf Feuchtesorption ausgerichteter und optimierter Lehmputz zur passiven Unterstützung der Klimatisierung von Räumen zur Verfügung. Die durchgeführten Simulationsrechnungen haben modellhaft nachgewiesen, dass es eine Feuchtepufferung durch diesen Lehmputz gibt und dass sich dieser passive Klimatisierungseffekt ingenieurmäßig korrekt und nachvollziehbar berechnen lässt. Die Variablen sind erprobt worden, u.a. Wetterdaten, Raumsituation, Verweildauer der Nutzer und nötige Putzfläche.

Der Datensatz zu den feuchtespezifischen Materialkennwerten des Lehm-Klimaputzes ermöglicht die Berechnung und Planung von Klima- und Lüftungstechnik (KLT) unter Einbeziehung der passiven Feuchteregulierung der mit Lehmputz beschichteten Wandoberflächen.

3.3.2 Ökobilanz des neuen Lehmputzes (ökologischer Aspekt)

Die Produktentwicklung stand von Beginn an unter der Prämisse die ökologisch vorteilhaften Eigenschaften des Lehmputzes zugunsten des angestrebten Klimatisierungseffekts zu konterkarieren. Hauptbestandteil ist mit > 55 Masseprozent Baulehm. Es handelt sich dabei um Sekundärlehmaushub im Sinne der Definition des Dachverbandes Lehm, der als Bodenabfall bei anderen Prozessen anfällt, hier als Deckschicht beim Kiesabbau. Die Faserbestandteile der optimierten Lehmrezeptur sind Miscanthusschilf und Sisal, beides nachwachsende Rohstoffe, Beide pflanzlichen Komponenten bringen gebundenes CO₂ in die Ökobilanz des Lehmputzes ein. Die Beimischung von Sepiolith löste zunächst Besorgnisse aus, weil es Berichte über lungengängige Faseranteile gibt. Deshalb wurde vor Verwendung des Minerals beim Bremer Umweltinstitut ein Gutachten zur Untersuchung

hinsichtlich gesundgefährdender lungengängiger Faseranteile in Auftrag gegeben. Erst nachdem die Messungen nach VDI 3866-5 keine gefährdenden Bestandteile nachgewiesen hatte, kam dieses Mineral in Betracht.

Die ökologische Bewertung der Produktentwicklung erfolgt im Vergleich des neuen Lehm-Klimaputzes mit Kalkputzmörtel. Die Tab. 3.1 bezieht sich auf die Lebenszyklusphase von der Bereitstellung der Rohstoffe zum Werkstor (Modul A1-A3 nach EN 15804). Tab. 3.11 ist eine erste orientierende Bilanzierung. Für die mineralischen Komponenten Kieselgur und Sepiolith liegen keine hinreichenden Umweltdaten vor. Deshalb beinhalten die Werte eine Schätzung für beide Komponenten auf Basis der Daten des Umweltbundesamtes zu Kieselgur aus dem Jahr 2004 [2].

Tabelle 3.11: Energiebedarf und Treibhausgaspotenzial

Lehm-Klimaputzes C2_8 vs. Kalkputzmörtel

Ausgangsstoffe	PEI	GWP
	MJ/kg	kg CO ₂ äquiv./kg
Kalkinnenputz (Ökobaudat)	1,49	0,216
Lehm-Klimaputzmörtel o. CO ₂ Gutschrift	1,05	0,143
<i>Lehm-Klimaputzmörtel mit CO₂ Gutschrift</i>	<i>1,05</i>	<i>-0,035</i>

Der Vergleich in Tab. 3.11 unterstreicht, dass durch die großflächige Beschichtung von Wänden mit dem neuen Lehm-Klimaputz weniger „graue Energie“ ins Gebäude eingetragen wird. Die in der ÖKOBAUDAT [1] eingetragene Umweltbilanz für Kalkinnenputz weist einen um 30% pro kg höheren Energieeinsatz (PEI) aus als Lehm-Klimaputz C2_8. Die Treibhausgaspotenziale (GWP) des optimierten Lehm-Klimaputzes sind, ohne CO₂-Gutschrift für die nachwachsenden Rohstoffe in der Mischung um 38% pro kg niedriger als beim vergleichbaren Standardputz aus Kalkmörtel. Unter Einrechnung der CO₂-Gutschrift für gebundenes CO₂ in den pflanzlichen Komponenten ergibt sich mit -0,035 kg CO₂ äquiv./kg ein negativer Wert – eine CO₂-Senke. Für die ökologische Gesamtbilanzierung eines Gebäudes, insbesondere öffentliche Gebäude, ist die Ökobilanz des Putzmörtels durchaus von Bedeutung.

3.3.3 Energieeinsparung und geringerer Investitionsaufwand (ökonomischer Aspekt)

Nach der Simulationsrechnung für einen realen Ausstellungsraum im Martin-Gropius-Bau bringt der im Projekt optimierte Lehmputz ein Einsparpotenzial für die KLT von mindestens 30 MWh/a bei 5000 m² Fläche. Das Institut für Bauklimatik der TU Dresden stellt zusätzlich fest, dass unter Einbeziehung des passiven Feuchtepufferung die Lüftungs- und Klimatechnik im Gebäude kleiner ausgelegt und mit weniger Umbausaufwand eingebaut werden kann. Der Bau- und Investitionsaufwand sinkt. Nicht zuletzt deshalb soll das im Förderprojekt entwickelte und erprobte Simulationsmodell zur Auslegung der Klimatisierungstechnik mit dem

optimierten Lehmputz in die anstehende Ausschreibung zur Umbauplanung des Martin-Gropius-Bau einbezogen werden.

3.4 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabenergebnisse.

Die im Projekt ermittelten Materialkennwerte für den optimierten Lehmputz werden in die Datenbank des Softwareprogramms DELPHIN zur hygrothermischen Modellierung, Simulation und Validierung der Raumklimatik. Damit stehen die zentralen Ergebnisse für die Planung und Auslegung der KLT für verschiedene Anwendungsfälle zur Verfügung.

ClayTec veröffentlicht nach Klärung letzter technischer Fragen ein Datenblatt und Verarbeitungshinweise für den neuen Lehm-Klimaputz. Über verschiedene, sofort verfügbare Kommunikationskanäle (z.B. Newsletter, Social Media, ClayBlog) bei Claytec erreichen die Ergebnisse eine Verbreitung bei Planern, Verarbeitern und Entscheidungsträgern. Ausgewählte mögliche Nachfolgeprojekte, z.B. die Sanierung des Badischen Landesmuseums Schloss Karlsruhe, werden bereits von ClayTec betreut.

Die TU Dresden hat bereits um eine Nutzungsgestattung der Ergebnisse für eigene Darstellungen und Vorträge gebeten.

4. Fazit

Die Projektergebnisse bestätigen die Ausgangshypothese. Der optimierte Lehmputz kann über die verputzte Fläche die Klima- und Lüftungstechnik in Gebäuden hinsichtlich der Feuchteregulierung signifikant und berechenbar entlasten. In zukünftigen Gebäudeplanungen kann der Feuchtepuffereffekt mit einem bekannten, verfügbaren Berechnungstool für individuelle Raumkonstellation bemessen werden. Dies ist vollkommen neu, bislang konnte die raumklimatische und energetische Wirksamkeit von Lehmputz nicht quantifiziert werden, positive Auswirkungen auf die Dimensionierung der technischen Klimatisierung konnten nicht berücksichtigt werden. Der im Projekt bearbeitete Anwendungsfall eines Museums mit äußerst sensiblem Feuchtemanagement und unterschiedlichen Besucherströmen war besonders anspruchsvoll und beweist die Leistungsfähigkeit des entwickelten Lehm-Klimaputzes. Die Ergebnisse lassen sich auf andere Gebäude mit gleichem oder weniger komplexem Feuchtemanagement übertragen. Insgesamt hat das Förderprojekt modellhaft die ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit eines Lehmputzes als passiver Teil der KLT in Gebäuden nachgewiesen.

Quellennachweise

Relevante Normen und Richtlinien

DIN EN ISO 15148 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, Dezember 2018

DIN EN ISO 10456 Baustoffe und Bauprodukte, Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai 2010

DIN EN ISO 12572 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit – Verfahren mit einem Prüfgefäß, Mai 2017

DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung Oktober 2018

DIN EN 1745 Mauerwerk und Mauerwerksprodukte – Verfahren zur Bestimmung von wärmeschutztechnischen Eigenschaften, Oktober 2020

DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, März 2017

DIN EN ISO 12570 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur, Juli 2018

DIN 18947:2022-03: Lehmputzmörtel - Anforderungen, Prüfung und Kennzeichnung

DIN EN 15804:2020-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte

VDI Richtlinie 6202 Blatt 3: Schadstoffbelastete bauliche und technische Anlagen - Asbest - Erkundung und Bewertung

VDI Richtlinie 3866 Blatt 5: Bestimmung von Asbest in technischen Produkten - Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren

Sonstige Quellen:

[1] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Datensatz Kalkinnenputz, 1.4.04 Mineralische Baustoffe / Mörtel und Beton / Putz und Putzmörtel, ÖKOBAUDAT 10/2024

[2] Umweltbundesamt: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (Probas), Datensatz Kieselgur, Referenzjahr 2004