Fraunhofer Institut Bauphysik

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten
Forschung, Entwicklung, Demonstration und Beratung auf den Gebieten der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-08/2007

Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung

Gefördert durch BMWi

Der Bericht umfasst
145 Seiten Text
12 Tabellen
67 Bilder

Dr. rer. nat. C. Fitz (IBP)
Dipl.-Ing. S. Klauß (ZUB)
Dr.-Ing. M. Krus (IBP)
Dipl.-Ing. K. Lengsfeld (IBP)
Dr.-Ing. R. Plagge (TU Dresden)

Holzkirchen, 2. Mai 2007

Stv. Institutsleiter	Abteilungsleiter	Projektleiter
i.V. Dr. rer.nat. K. Breuer	Dr.-Ing. H M. Künzel	Dr. rer. nat. C. Fitz

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Nobelstraße 12 · D-70569 Stuttgart
Telefon +49 (0) 711/970-00
Telefax +49 (0) 711/970-3395
www.ibp.fraunhofer.de

Institutsteil Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 · D-83626 Valley
Telefon +49 (0) 8024/643-0
Telefax +49 (0) 8024/643-366
www.bauphysik.de

Projektgruppe Kassel
Gottschalkstr. 28a · D-34127 Kassel
Telefon +49 (0) 561/804-1870
Telefax +49 (0) 561/804-3187

Inhalt

IBP-Bericht HTB-08/2007		**1**
1	**Einleitung**	**5**
1.1	Hintergrund und Zielsetzung	5
1.2	Vorgehensweise und Arbeitsplan	6
2	**Beschreibung der beteiligten Institute**	**8**
2.1	Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen (IBP)	8
2.2	Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden (IBK)	9
2.3	Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Kassel (ZUB)	10
3	**Eingesetzte Planungstools**	**12**
3.1	Berechnungsprogramm WUFI®	12
3.2	Simulationsprogramm DELPHIN®	16
3.3	Energetische Berechnungen – EPASS-HELENA®	19
4	**Festlegung der relevanten hygrothermischen Kennwerte**	**22**
4.1	Beprobung	22
4.2	Beschreibung der einzelnen Kennwerte und Messverfahren	23
4.3	Funktionalisierung	32
4.4	Approximationsverfahren	45
4.4.1	Approximation der Flüssigtransportkoeffizienten	46
4.4.2	Feuchtespeicherfunktion	50
4.5	Anforderung an die Materialkennwerte	54
4.6	Weitere Kennwerte - Strahlungskennwerte	55
5	**Verifizierung und Validierung**	**56**
5.1	Interner Ringversuch	56
5.1.1	Hygrische Kennwerte	56
5.1.2	Wärmeleitfähigkeit	58
5.2	Vergleichsberechnung mit Daten aus MASEA	59
5.2.1	Aufgabenstellung	60
5.2.2	Ergebnisse IBP	61
5.2.3	Ergebnisse IBK	65
5.3	Diskussion der Ergebnisse	71
5.4	Freilandexperimente, Validierungsberechnungen	71
5.4.1	Naturstein-Fassadenausschnitt unter natürlicher Bewitterung	71
5.4.2	Flüssigtransport über die Schichtgrenzen zweier miteinander verbundener kapillarporöser Materialien	74
5.4.3	Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden und Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des realen Wärmedurchgangskoeffizienten	77
6	**Literaturrecherche – Auswahlliste von Altbaumaterialien**	**80**
6.1	Literaturquellen	80
6.2	Vorauswahl der Materialien	81
7	**Auswahl der Materialien**	**87**
7.1	Festlegungen	87
7.2	Kategorien	95

8 Beschreibung der Datenbank 96
8.1 Konfiguration 96
8.1.1 Netzwerk 96
8.1.2 Software 97
8.2 Technik 98
8.2.1 Dateneingabe 98
8.2.2 Konvertierung und Übertragung 98
8.2.3 Darstellung und Report 101
8.2.4 Editor 101
8.3 Internas und Features 102
8.4 Entwicklungswerkzeuge 102
8.5 Dokumentation 102

9 Verfügbarkeit und Nutzung der Materialdatensammlung 103
9.1 Öffentliche und nichtöffentliche Inhalte 103
9.2 Pflege und Weiterentwicklung 103

10 Katalog der Materialdatensammlung 103
10.1 Aufbau und Inhalte 104
10.2 Verfügbarkeit 107

11 Beispielhafte Klassifizierung von Materialvarianten für die MASEA-Materialdatensammlung 107
11.1 Vorbemerkungen 107
11.2 Material und Methoden 108
11.2.1 Beprobung 108
11.2.2 Messmethoden 109
11.2.3 Datentransformation 109
11.2.4 Experimentelle Daten 110
11.3 Identifikation von Ziegel Clustern 110
11.4 Repräsentative Feuchtespeicher-Transferfunktionen 114

12 Etablierung einer neuen Größe - Trocknungskennwert 116
12.1 Hintergrund 116
12.2 Anforderungen an den Trocknungskennwert 118
12.3 Rechnerische Untersuchungen 120
12.3.1 Einfluss der Probendicke 120
12.3.2 Einfluss Wärmeübergangskoeffizienten 121
12.4 Messtechnische Untersuchungen 122
12.4.1 Messungen bei niedrigen Oberflächenluftgeschwindigkeiten 123
12.4.2 Messungen bei hohen Oberflächenluftgeschwindigkeiten 125
12.5 Konsequenzen aus den messtechnischen Untersuchungen 127

13 Zusammenfassung und Ausblick 129

14 Verbreitung der Ergebnisse 131

15 Literatur 133

Anhang 147

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Besonders im Altbau stecken aufgrund des großen Bestandes – über 80 % der Gebäude werden ihm zugeordnet – die größten Einsparpotentiale bezüglich des Energieverbrauchs. Neben Verbesserungen im Bereich der Raumklimatisierung (Heizung, Lüftung, Kühlung) lassen sich gerade hier durch bauliche Maßnahmen, wie z.B. eine Verbesserung der Wärmedämmung oder der Nutzung der Sonneneinstrahlung, große Mengen an Energie einsparen. Seit Februar 2002 sind bei der Renovierung derartiger Gebäude gesetzliche Vorgaben bezüglich des energetischen und baulichen Wärmeschutzes zu erfüllen (EnEV [54], DIN 4108 [31]). Bei nicht fachgerechter oder bauphysikalisch richtiger Sanierung kann es zu Schäden kommen, z.B. wenn Konstruktionen außen dampfdicht ausgeführt sind oder innenseitig gedämmt werden sollen. Dies gilt aber auch bei fehlerhafter Planung für den Neubau, zumal nach mitgeltender DIN 4108-2 dem hygienischen Mindestwärmeschutz ein deutlich höherer Stellenwert eingeräumt wird. Im Alt- und Neubau ist ein Großteil der bekannten Bauschadenssumme auf fehlerhafte Planungen zurückzuführen. Dies führt zu wirtschaftlich nicht vertretbaren Verschwendungen von Förder- und Steuermitteln.

Die Gefahr von Schimmelpilzbildung, Korrosion etc. aufgrund fehlerhafter und unzureichender Materialdaten wird häufig falsch eingeschätzt. Für den Planer stehen zurzeit nur Abschätzungsverfahren zur Verfügung. Bei der Altbausanierung sind diese Verfahren zwar auch anwendbar, doch jede Prognose und Berechnung von Sanierungsmaßnahmen ist nur so gut, wie die Kenntnis der vorhandenen Materialien. Und genau hier liegt das Problem. Vor allem die feuchtetechnischen Kennwerte der in den letzten 50 Jahren hauptsächlich verwendeten Baustoffe sind gänzlich ungekannt. Dabei sind Planungstools, die einerseits den Einfluss von Sanierungsmaßnahmen auf das hygrothermische Verhalten des Gebäudes quantifizieren und andererseits Schadensrisiken beurteilen und Schäden vermeiden helfen, heute ausreichend getestet und validiert. Zu nennen sind hier insbesondere auch von ENSAN geförderte Softwareprogramme. Ihre Anwendung für die breite Planungspraxis scheitert nicht an der Bedienerfreundlichkeit oder dem Verständnis, sondern am Mangel an Materialkennwerten. Der Einsatz dieser Planungstools setzt die Kenntnis der jeweils erforderlichen Stoffkennwerte voraus. Für neue Baustoffe bzw. gerade auf dem Markt befindliche sind die Hersteller in der Regel bereit, für ihr Material die notwendigen Kennwerte, soweit sie noch nicht vorhanden sind, bestimmen zu lassen. Im Altbaubereich ist für die Bestimmung der Kennwerte der zahlreichen verwendeten Baustoffe in den meisten Fällen kein direktes Industrieinteresse vorhanden. Da diese Werte aber für die energetische und hygrische Beurteilung einer Sanierungsmaßnahme bekannt sein müssen, sollten im Rahmen dieses Forschungsprogramms einfache Bestimmungsmethoden zur Ermittlung hygrothermischer Materialkennwerte und ihrer Bandbreite entwickelt und ein Materialdatenkatalog erstellt werden, der alle notwendigen hygrothermischen Kennwerte beinhaltet. Dabei ist zu beachten, dass

- aufgrund der enormen Vielzahl der verbauten Materialien zunächst nur eine begrenzte, aber dennoch repräsentative Auswahl berücksichtigt werden kann,
- nur die Bestimmung weniger Materialparameter in entsprechenden nationalen bzw. internationalen Normen geregelt ist. Während die Ermittlung der thermischen Kennwerte normativ nahezu (Ausnahme: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit) ausreichend geregelt ist, ist dies bei den meisten feuchtetechnischen Kennwerten nicht der Fall. Zwar sind in den letzten Jahren neue, orts- und zeitauflösende Messmethoden entwickelt worden, deren Anwendung aber zum Teil mit hohem Aufwand verbunden ist, so dass sie für eine „schnelle“ Kennwertbestimmung im Normalfall nicht in Frage kommen. In vielen Fällen könnten jedoch vereinfachte Verfahren basierend auf theoretischen Modellen oder empirischen Ansätzen erfolg versprechend eingesetzt werden. Diese waren im Rahmen des MASEA-Projektes zu ermitteln und für ausgewählte Materialien durch die o.g. hoch entwickelten Messmethoden zu validieren. Das Forschungsprojekt hatte zum Ziel, daraus genormte Messverfahren auf europäischer Ebene vorzubereiten.
- eine Kompatibilität für den Zugriff auf diese Datenbank aus den verschiedenen Software-Paketen heraus erreicht wird, indem weit verbreitete Datenbanksysteme verwendet wurden und
- eine Datenstruktur als Schema für künftige Ergänzungen entsteht, die eine Aufnahme und integrierte Beurteilung auch anderer für die Planung von Sanierungsmaßnahmen wichtiger Stoffeigenschaften ermöglicht.

Ziel des Projektes war die Erstellung einer umfangreichen internetfähigen, frei zugänglichen Sammlung von Materialkennwerten als Grundlage für die energetische Gebäudesimulation und hygrothermische Bauteilberechnung. Wesentliches Merkmal dieser Datensammlung ist, dass sie Kennwerte enthält, die aus einfachen, aber durch hochentwickelte Messverfahren validierte Bestimmungsmethoden gewonnen werden. Diese einfachen Bestimmungsmethoden wurden im Rahmen des Projektes entwickelt und sollen in Zukunft in entsprechende europäische und deutsche Prüfnormen implementiert, werden.

1.2 Vorgehensweise und Arbeitsplan

Zu Beginn musste eine umfangreiche Literaturrecherche mit dem Ziel erfolgen, die im Altbaubereich am häufigsten verwendeten Baumaterialien zu ermitteln. Für die Laboruntersuchungen konnte aus jeder Materialgruppe aus Kostengründen jedoch nur eine begrenzte Anzahl ausgewählt werden, die als repräsentativ für eine möglichst großen Anteil der Altbauten gelten muss.

Die verschiedenen Planungstools verwenden unterschiedliche Datenbankstrukturen, die untereinander nicht kompatibel sind. Im Rahmen des Projektes wurden normierte Schnittstellen für energetische Gebäudesimulation und hygrothermische Bauteilberechnungsprogramme entwickelt und entsprechend dokumentiert. Damit ist auch in Zukunft anderen Entwicklern von solchen Planungswerkzeugen der Zugang zu der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Datenbank gewährleistet.

Die Bestimmung hygrothermischer Stoffkennwerte sollte auf der Anwendung möglichst einfacher und kostengünstiger Messmethoden basieren, aus deren Ergebnissen mit Hilfe spezieller Umrechnungen (Approximationsverfahren) die benötigten Kennwerte ermittelt werden. Während für die wärmetechnischen Kennwerte Definitionen, Messvorschriften und Messpraxis Stand der Technik sind, fehlte eine entsprechende sichere Quantifizierung einiger wesentlicher feuchtetechnischer Materialkennwerte. Für eine genaue Beurteilung des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen bzw. Gebäuden, zur Bauschadensreduktion und Sicherung der energetischen Funktion der Bauwerkshülle sind diese Werte aber von grundlegender Bedeutung.

Durch die richtige physikalische Modellierung der gekoppelten Transportprozesse im Baustoff, die mittlerweile ausgereifte numerische Simulationssoftware, die Verbesserung der Labor- und in-situ Messtechnik und die anspruchsvolleren Normen und Verordnungen in der Bauphysik war der richtige Zeitpunkt für eine grundsätzlichen Bearbeitung der hygrischen Stofffunktionen und ihre Zusammenstellung in entsprechenden frei zugänglichen Materialdatenkatalogen gekommen.

Folgende Arbeiten wurden von den beteiligten Instituten geleistet:

- Definition der Feuchtespeicher- und Feuchtetransportfunktion in Abhängigkeit der benutzen Potenziale wie Feuchtegehalt, relative Luftfeuchte, Partialdruck des Wasserdampfes und Kapillarwasserdruck.
- Mathematische Darstellung der Feuchtespeicher- und Feuchtetransportfunktion, physikalische Interpretation der Parameter Sensitivitätsanalyse gegenüber einer Parametervariation.
- Prüfung der bisher genormten oder üblichen Messverfahren wie Sorptionsisotherme, Saugspannungskurve, Wasseraufnahmekoeffizient, µ-Wert usw., inwieweit diese zur Parameteridentifikation der oben genannten Funktionen geeignet sind.
- Erarbeitung von Messvorschriften für die Bestimmung der Parameter der Feuchtespeicher- und Transportfunktion, Festlegung eines Mininalsets von ausgewählten Messpunkten.
- Erstellen einer Auswahlliste von Bau- und Dämmstoffen für neu zu errichtende Gebäude, Altkonstruktionen und für Sanierungsmaßnahmen, für die die Materialfunktionen zu bestimmen sind.
- Durchführung der Messungen am IBP Holzkirchen und am IBK Dresden in Form von Parallelversuchen bei vergleichbarer Labormesstechnik und ergänzenden Versuchen bei komplementärer Ausstattung.
- Integration der Materialfunktionen in die Simulationsprogramme DELPHIN® und WUFI® und Durchführung von Vergleichsrechnungen für ausgewählte Konstruktionen unter definierten Klimarand- und Nutzungsbedingungen.
- Aufbereitung der hygrothermischen Ergebnisse für die Materialdatenbank.

Die umfassende Beurteilung des Schadensrisikos an gegebenen Wandaufbauten setzt gleichermaßen verlässliche Messwerte im thermischen wie im hygrischen Bereich voraus. Daher waren auch thermische Messungen an

Baustoffen vorgesehen, für die keine aktuellen und vertrauenswürdigen Messwerte nach einschlägigen Normen vorlagen.

Der zu entwickelnde Datenkatalog ist der Öffentlichkeit über ein internetbasiertes Informationssystem kostenlos zur Verfügung gestellt worden. Damit ist gewährleistet, dass die ermittelten Kennwerte von einer möglichst breiten Anwendergruppe auch in Zukunft genutzt werden können.

2 Beschreibung der beteiligten Institute

Das Forschungsvorhaben war ein Verbundprojekt dreier Forschungseinrichtungen. Beteiligt sind:

- Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen (IBP)
- Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden (IBK)
- Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Kassel (ZUB)

Das IBP war gegenüber dem Projektträger Jülich der Auftragnehmer und mit der Projektleitung betraut.

2.1 Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen (IBP)

Das IBP arbeitet seit Jahrzehnten auf dem Gebiet der feuchtetechnischen und energetischen Untersuchung von Baustoffen und Bauteilen. Auf dem Freilandversuchsgelände des IBP werden seit seiner Gründung in Holzkirchen vor 50 Jahren Wand- und Dachaufbauten im Maßstab 1:2 und als Modellprüfkörper messtechnisch untersucht und beurteilt. Eine eigene meteorologische Station mit kontinuierlicher Erfassung von Klimadaten stellt die klimatischen Randbedingungen für die Prüffelduntersuchungen bereit. Das IBP hat in nationalen und internationalen Projekten (z.B. IEA und EU-Projekte) umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungen im Bereich Hygrothermik dazugewonnen, an Objektuntersuchungen mitgewirkt, grundlagen- und anwendungsorientierte bauphysikalische Materialprüfungen durchgeführt und verbesserte bzw. neue Prüfungen und Untersuchungsmethoden entwickelt. Die in diesen Projekten durchgeführten Untersuchungen haben neue Ansätze zur Beschreibung praktischer Transportvorgänge und zur feuchtetechnischen Charakterisierung von Baustoffen mittels neuer Transport- und Speicherkenngrößen hervorgehoben. Das derzeit als einziges im Baubereich flexibel akkreditierte Prüflabor verfügt über spezielle Messgeräte zur Bestimmung des Wärme- und Feuchtetransportes (z.B. NMR-Anlage, Saugspannungsmessanlage) in Baustoffen. Neben der möglichst genauen messtechnischen Bestimmung der Materialkenngrößen wurden auch neuartige Approximationsverfahren zur Ermittlung hygrothermischer Materialfunktionen aus einfachen Kenngrößen (z.B. Wärmeleitfähigkeit, feuchteabhängig) bzw. einfachen Versuchen entwickelt.

Das Heizenergieberechnungsprogramm EPASS-HELENA wurde vom IBP in Zusammenarbeit mit Projektpartnern entwickelt. Für die rechnerische Untersuchung von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen entstand

am IBP das erprobte EDV-Programm WUFI®. Bisherige Beschreibungen des Wärme- und Feuchtetransportverhaltens von Baustoffen mit Hilfe dieser Verfahren haben eine beachtlich gute Übereinstimmung zwischen rechnerischer Aussage und praktischer Untersuchung am Objekt ergeben.

Das IBP beschäftigt sich darüber hinaus generell mit Maßnahmen zur Energieeinsparung mit raumklimatischen Fragen sowie Aspekten der Heizung und Lüftung. In diesem Zusammenhang fanden z.B. intensive Untersuchungen zur Schimmelpilzbildung an Rauminnenoberflächen und der dafür erforderlichen Randbedingungen statt, woraus mit Hilfe biohygrothermischer Modelle eine Vorhersagemethode entwickelt werden konnte.

Einige Publikationen über Studien, die in fachlichem Bezug zum durchgeführten Projekt stehen, geben einen Überblick über die vorhandenen Erfahrungen [77], [88], [90], [92], [93], [94] und [97]. Die Mitarbeit in mehreren nationalen und internationalen Fach- und Normungsgremien erbringt zusätzlich einen ständigen Überblick über den Stand des Wissens und der Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet im In- und Ausland.

2.2 Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden (IBK)

Die vom Institut für Bauklimatik der TU Dresden gesetzten Schwerpunkte liegen in den Bereichen der physikalischen Modellierung und Entwicklung von Simulationsmodellen zum gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport, der Materialuntersuchung und der Entwicklung multifunktionaler Baustoffe, sowie der Technologieanwendung und dem Betrieb von Testhäusern unter realen Nutzungsbedingungen.

Die Bauklimatik ist Entwickler von Simulations- und Berechnungssoftware und besitzt ein Forschungs- und Entwicklungslabor zur experimentellen Bestimmung der für eine Simulation erforderlichen Materialkennwerte und Materialfunktionen. Einen breiten Raum in der Forschung nehmen deshalb die exakte Messung von Materialfunktionen, die Ausarbeitung von Messvorschriften und die Erarbeitung von Methodenstandards im Rahmen nationaler und internationaler Normenausschüsse ein. Das IBK-Labor verfügt über spezielle Messtechnologien zur Bestimmung des Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransportes, wie z.B. eine erweiterte Saugspannungsmessanlage für den Niederdruckbereich mittels Unterdruck und für den Hochdruckbereich mittels Druckplatten, wie auch Haubenpermeameter und Tensionsinfiltrometer zur direkten und experimentellen Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit.

Neben dem Messlabor zur Bestimmung verifizierter Materialfunktionen für das Simulationsprogramm besitzt das IBK ein Forschungslabor zur zeitabhängigen und ortsauflösenden Messung der Zustandsgrößen (Wassergehalt, Salzgehalt, Kapillardruck, Luftfeuchte, Temperatur), womit zahlreiche Materialeigenschaften von Baustoffproben bestimmt werden können. Diese sogenannte NONSTAT-Technologie mit ihren miniaturisierten Sensoren (Hygrometer, Time- Domain- Reflectrometry (TDR), Drucksensor- Tensiometer, Peltier- Psychrometer) stellt das derzeit modernste und leistungsfähigste Meßsystem zur vollautomatischen, computergesteuerten und simultanen Bestimmung von Speicher und Transportfunktionen dar. Deren Einsatz

in Verbindung mit Mehrkammer-Differenzklimaprüfständen ermöglichen die Weiterentwicklung und Validierung physikalischer Modelle. Spezielle Diffusionszellen und Durchbruchsexperimente liefern darüber hinaus die salzspezifischen Transportparameter Diffusion, Dispersion und Konvektion.

Auf der Grundlage der zur Verfügung stehenden Simulations- und Labortechnologien kann die Wirkung der einzelnen Materialeigenschaften analysiert und das Verhalten beliebiger Konstruktionen unter realen Klimabedingungen vorausberechnet werden. Die gefundenen Ergebnisse lassen sich in realen Testhäusern bzw. Konstruktionen überprüfen und verifizieren. Zur Erhaltung und Erforschung von z.B. Denkmälern wurden die obigen Technologien bereits in zahlreichen Projekten im In- und Ausland eingesetzt. In diesem Zusammenhang sollen die Sanierung bzw. Instandhaltung bedeutender Denkmäler wie: das Rijksmuseums in Amsterdam, der Eiraku-kyu Tempels in China, die Humayuns Tomb Tempelanlagen in Indien, das Historical Village of Hokkaido in Japan, das Herrenschießhaus in Nürnberg, das Wat Mahathat in Ayutthaya und eine überdimensionale Budda Statue in Thailand exemplarisch erwähnt sein.

Mit den oben beschriebenen Technologien werden am IBK bevorzugt die folgende Themenkreise bearbeitet:

- Denkmalpflege; nachhaltige Entwicklung der bebauten Umwelt unter besonderer Berücksichtigung des Erhalts des kulturellen Erbes
- Entwicklung und Optimierung neuer Materialien, Herstellungsverfahren und Anwendungsmethoden; bauphysikalische und chemische Eigenschaften von Baustoffen werden unter multifunktionalen Gesichtspunkten analysiert
- Interaktion Bauwerk – Klima – Mensch; hierbei werden die Aspekte Nachhaltigkeit, Raumklima, Schadstoffemissionen, Behaglichkeit und Gesundheit als zentrale Themen behandelt
- Monitoring und Diagnose; diese Themenkreise beinhalten Fragen der Dauerhaftigkeit, der Analyse von Schädigungsmechanismen sowie die zerstörungsfreie Prüfung und Messung relevanter Zustandsgrößen.

Mit über 250 Artikeln in nationalen und internationalen Fachzeitschriften hat die Arbeitsgruppe des IBK ihre umfangreichen Forschungsergebnisse bislang publiziert ([62], [66], [70], [112], [111], [109], [110], [115], [126], [121] und [122].

2.3 Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Kassel (ZUB)

Das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB) ist ein Verein an der Universität Kassel, der als ein Bindeglied zwischen angewandter Forschung, Handwerk, Industrie, Architekten und Ingenieuren aktiv ist. Gleichzeitig wird dadurch ein Forschungsschwerpunkt für umweltbewusstes Bauen etabliert, der auf den wissenschaftlichen Grundlagen der Fachgebiete Bauphysik, Technische Gebäudeausrüstung und Experimentelles Bauen basiert. Der Verein wurde im Jahr 1998 gegründet.

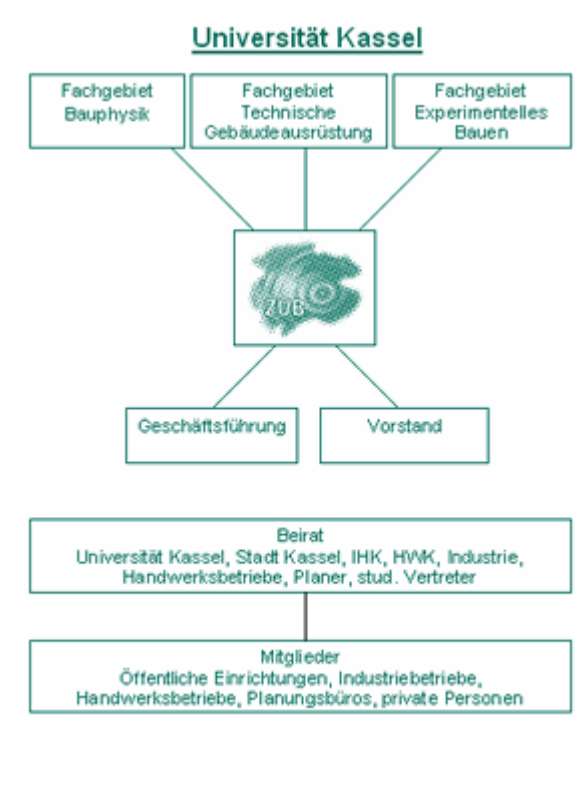


Bild 1: Organisationsstruktur des ZUB e.V.

Der Verein arbeitet nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten und finanziert sich ohne institutionelle Förderung über seine Geschäftsfelder selbst. Vorstand und Geschäftsführung werden durch den Beirat unterstützt, dessen Mitglieder verschiedene Institutionen, Firmen, Handwerksbetriebe und Planungsbüros repräsentieren. Bei den vierteljährlichen Beiratssitzungen werden die dem Verein profilgebenden Aktivitäten diskutiert als auch wesentliche Maßnahmen der Organisation zur Entwicklung und zum Aufbau des Zentrums in beratender Funktion entwickelt. Getragen wird der Verein durch seine Mitglieder, die sich ähnlich wie der Beirat, aus unterschiedlichen Zielgruppen zusammen setzen. Im Jahr 2006 zählte der Verein 48 Mitglieder.

Im Jahr 2001 konnte der nach höchsten Maßstäben der Energieeffizienz geplante Neubau des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen bezogen werden. Im Gebäude befinden sich Büros des ZUB, der Fraunhofer-IBP Projektgruppe Kassel und des Fachverbandes für Luftdichtheit im Bauwesen (FLiB e.V.). Weiterhin stehen für Veranstaltungen ein Vortragssaal, ein Seminarraum sowie ein kleinerer Konferenzraum zur Verfügung. Für Forschungsarbeiten können die vorhandenen Laborflächen genutzt werden.



Bild 2: Das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen – Neubau, rechts.

Mit seinem Dienstleistungsangebot unterstützt das ZUB Firmen bei der Entwicklung und Markteinführung innovativer Produkte als auch Planungsbüros bei der Bearbeitung anspruchsvoller Projekte. Die Entwicklung und der Vertrieb von Planungsinstrumenten ist ebenso Bestandteil der ZUB-Aktivitäten wie die Aus- und Weiterbildung.

3 Eingesetzte Planungstools

Die drei am Forschungsvorhaben beteiligten Institute entwickeln und vertreiben Software, die sie auch selbst bei der Bearbeitung von Projekten anwenden. Dabei sind die Zielrichtungen und die Anwendungsgebiete der einzelnen Produkte teilweise sehr unterschiedlich und sprechen daher unterschiedliche Nutzerkreise an.

Die Institute in Holzkirchen und Dresden entwickeln Simulationssoftware für hygrothermische Bauteilberechnungen. Es handelt sich dabei um die Programme WUFI® vom IBP Holzkirchen und DELPHIN® des IBK Dresden. Das ZUB vertreibt verschiedene Softwareprodukte, die für stationäre Berechnungen ausgelegt sind.

3.1 Berechnungsprogramm WUFI®

Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik wurde das Berechungsprogramm WUFI® (Wärme und Feuchte instationär) entwickelt [88],[94]. Die Software basiert auf einem instationären Berechnungsmodell. Dabei wird anhand von gegebenen Klimaverläufen (z.B. Innen- und Außenklima) das hygrothermische Verhalten eines Bauteils berechnet. WUFI® beruht auf einem geschlossenen Gleichungssystem, welches die hygrothermischen Transportvorgänge beschreibt. Dazu gehören: Flüssigtransport (Saugen, Weiterverteilen), Wasserdampfdiffusion, Feuchtespeicherung, Wärmeleitung (feuchte-

abhängig) und Regenabsorption an der Außenoberfläche. Zur Erläuterung der wesentlichen Schritte bei der Lösung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportgleichungen wird das Ablaufschema des Berechnungsverfahrens, das dem EDV-Programm WUFI zugrunde liegt, anhand des Flussdiagrammes in Bild 3 beschrieben. Zur Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauteilen ist die Erstellung folgender Datensätze erforderlich:

- Der Aufbau des zu berechnenden Bauteils und das numerische Gitter, dessen Elementgrößen dem Schichtaufbau und den zu erwartenden lokalen Klimaeinwirkungen angepasst werden müssen.
- Die thermisch und hygrischen Stoffkennwerte und -funktionen, der am Aufbau beteiligten Baustoffe; d.h. die Rohdichte, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die feuchte- und eventuell richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit, die feuchte- (nur bei polymeren Kunststoffen) und eventuell richtungsabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl sowie bei hygroskopischen, kapillaraktiven Stoffen auch die Feuchtespeicherfunktion und die eventuell richtungsabhängigen Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung.
- Die klimatischen Randbedingungen innen und außen bzw. an vier verschiedenen Seiten im zweidimensionalen Fall sowie die Vorgabe der Zeitschritte, die von den Klimadaten und der geforderten Rechengenauigkeit abhängt. Als Klimaparameter dienen die Temperatur und die relative Luftfeuchte. Außerdem können die kurzwellige Strahlung und der Niederschlag auf die Bauteiloberfläche berücksichtigt werden.
- Die Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen an den Bauteilgrenzen sowie die Steuerparameter: Zu den Übergangsbedingungen gehören der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient sowie der Strahlungsabsorptionsgrad und der Regenfaktor. Durch die Steuerparameter werden die Rechengenauigkeit, die Form der Anfangsbedingungen und andere berechnungsspezifische Parameter eingestellt.

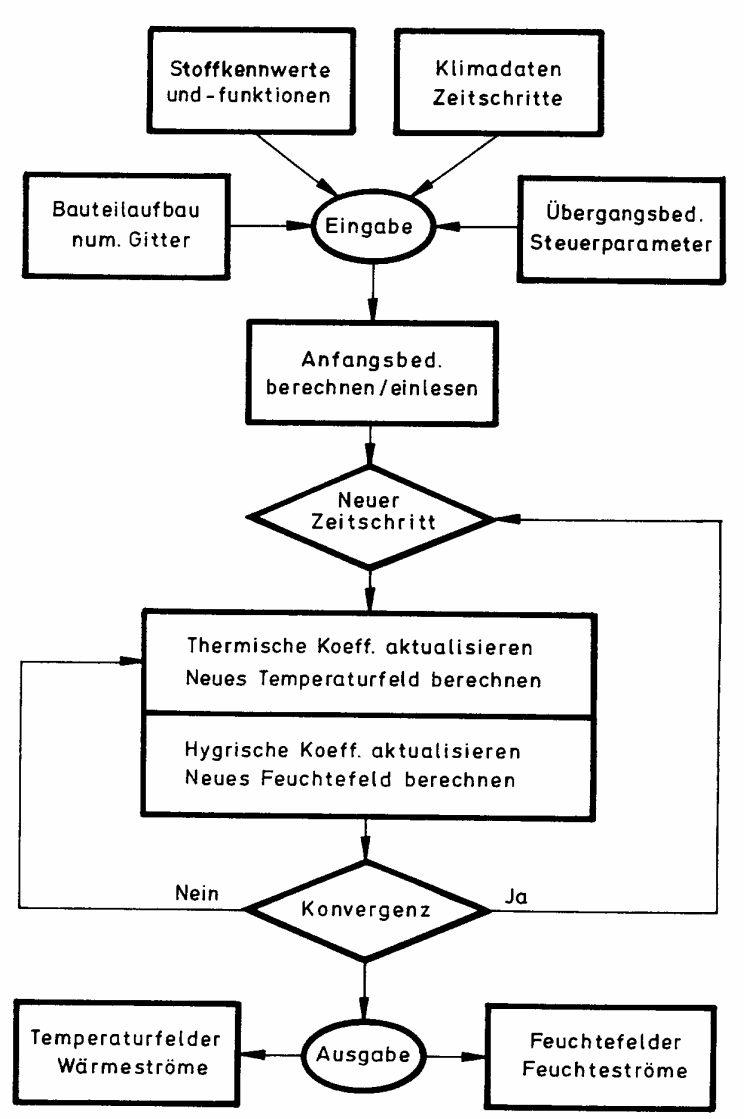


Bild 3: Ablaufschema des Berechnungsverfahrens, das dem EDV-Programm WUFI zugrunde liegt.

Nach der Eingabe dieser Datensätze werden zunächst die stationären Anfangsverteilungen von Feuchte und Temperatur berechnet oder beliebige Ausgangszustände, z.B. Verteilungen aus Messungen oder anderen Berechnungen eingelesen. Nun beginnt die instationäre Berechnung der Temperatur- und Feuchtefelder. Für jeden neuen Zeitschritt werden die gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportgleichungen solange abwechselnd gelöst, bis das vorgegebene Abbruchkriterium erreicht ist. Dabei werden vor jeder iterativen Lösung der Wärmetransportgleichung alle feuchte- und temperaturabhängigen thermischen Speicher- und Transportkoeffizienten aktualisiert. Das gleiche gilt für die Berechnung der hygrischen Koeffizienten vor der Lösung der Feuchtetransportgleichung. Am Ende des vorgegebenen Berechnungszeitraumes beginnt die Ausgabe der gewünschten Temperatur- und Feuchtefelder bzw. der Wärme- und Feuchteströme sowie der zeitlichen Verläufe dieser Variablen. Die Feuchte- und Temperaturfelder können wiederum als Anfangsbedingungen für weiterführende Berechnungen dienen.

Tabelle 1: Zusammenstellung der für eine Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauprodukten mit dem Programm WUFI erforderlichen Datensätze.

Parameter	**Erforderliche Datensätze oder Angaben**
Geometrie	Aufbau des zu berechnenden Bauteils
	numerisches Gitter
thermische und hygrische Stoff-kennwerte sowie -funktionen	Rohdichte und Porosität
	spezifische Wärmekapazität
	feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
	evtl. Feuchtespeicherfunktion
	evtl. richtungsabhängige Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung
Klimaparameter	Temperatur
	relative Luftfeuchte
	kurzwellige Strahlung (nur außen)
	Niederschlag auf die Bauteiloberfläche (nur außen)
Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen	Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient
	Strahlungsabsorptionsgrad
	Regenfaktor (nur außen)
Steuerparameter	Zeitschritte
	Rechengenauigkeit
	Form der Anfangsbedingungen (z.B. Starzeitpunkt)
	andere berechnungsspezifische Parameter

Als Rechenergebnisse werden die stündlichen Veränderungen der Temperatur- und Feuchtefelder sowie der Wärme- und Feuchteströme über die Bauteilgrenzen erhalten. Aus diesen Ergebnissen können sowohl die langzeitlichen Verläufe der hygrothermischen Parameter (Temperatur, relative Feuchte, Wassergehalt) an verschiedenen Positionen im Bauteil als auch deren örtliche Verteilungen (Profile) zu bestimmten Zeitpunkten ermittelt werden. Eine zweckmäßige und sehr anschauliche Art der Ergebnisdarstellung ist die filmähnliche Abfolge der instationären Feuchte- und Temperaturprofile. Bild 4 zeigt beispielhaft einen Schnappschuss aus einem solchen Ergebnisfilm, der bei der Berechnung des hygrothermischen Verhaltens einer zweischaligen Wand entstanden ist.

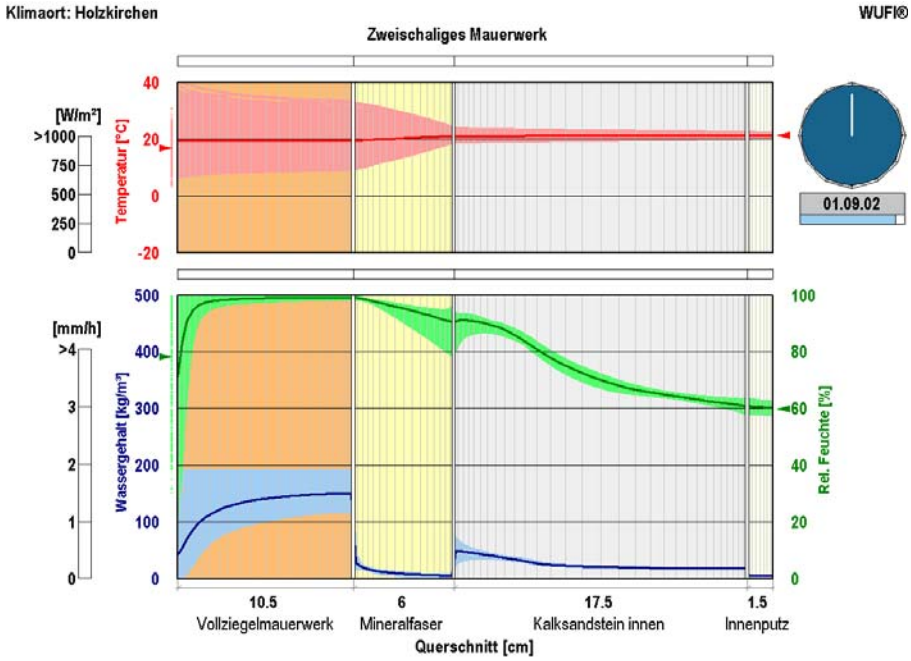


Bild 4: Momentaufnahme der Filmdarstellung der instationären Temperatur- und Feuchteverteilung (Bereiche und Mittelwerte) in einer zweischaligen, nach Westen orientierten Außenwand mit Kerndämmung im Verlauf des Monats August. Temperaturschwankungen finden praktisch nur in der Außenschale statt. Der Wassergehalt in der Außenschale erreicht niederschlagsbedingt hohe Werte bis hin zur freien Wassersättigung des Mauerwerks (obere Begrenzung des Bereichs). Die Feuchteschwankungen im äußeren Teil der Innenschale sind durch "Umkehrdiffusion" bedingt.

3.2 Simulationsprogramm DELPHIN®

Für die rechnerischen Untersuchungen wird am IBK das numerische Simulationsprogramm DELPHIN [62] eingesetzt. Einen schematischen Überblick über die Programmstruktur gibt das nachfolgende Bild 5. Das Simulationsprogramm DELPHIN unterteilt sich in einen Numerikteil und ein Paket für Pre- und Postprozessing. Der Preprozessor dient der grafischen Generierung und Vernetzung des geometrischen Modells, sowie zur Spezifikation und Zuordnung der Randbedingungen und Materialeigenschaften. Angeschlossen sind eine Baustoffdatenbank, deren Materialkennwerte in Form von feuchte- und temperaturabhängigen Materialfunktionen hohen Ansprüchen der Modellierung genügen. Die Klimadatenbank enthält die charakteristischen Wettersequenzen der wichtigsten deutschen Klimagebiete und ermöglich die Integration weiterer Wetterdaten. Der numerische Solver verarbeitet die Eingangsdaten nach dem vorgegebenen gekoppelten Modell zur Beschreibung des Stoff- und Energietransportes und liefert Zustandsfelder, Flüsse, Quellen, Senken und Materialeigenschaften als Output Dateien. Mit dem Postprozessing können die Ausgabedaten visualisiert werden, wobei unterschiedliche graphische Darstellungsmöglichkeiten auch für komplexe geometrische 2-dimensionale Details bestehen.

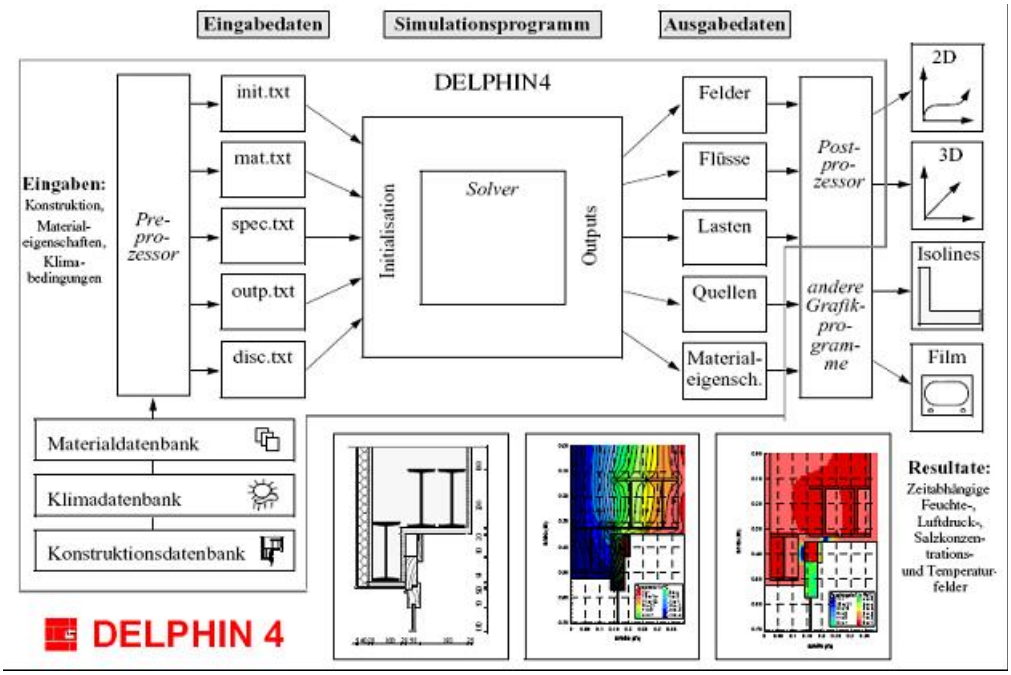


Bild 5: Überblick über die DELPHIN Programmkomponenten.

Die dem numerischen Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransportprogramm DELPHIN zugrunde liegende Theorie ist von thermodynamischen Prinzipien abgeleitet, welche die Transportprozesse und die Übergänge zwischen der festen, der flüssigen und der gasförmigen Phase beschreiben. Die Simulation des Verhaltens von porösen Materialien basiert auf der Theorie von Transportprozessen in Multiphasensystemen. Dabei existieren in allen drei Phasen mehrere Komponenten. In der festen Phase ausgefälltes Salz sowie der poröse Baustoff selbst, in der flüssigen Phase Wasser und gelöstes Salz, in der gasförmigen Phase schließlich Luft und Wasserdampf. Bei einer genauen Behandlung des Transports dieser Bestandteile ergibt sich eine große Zahl von Transportvorgängen und zugehörigen Diffusions- bzw. Advektionskoeffizienten. Diese Transportkoeffizienten werden in relativ freier Form als Materialeigenschaften abhängig vom Systemzustand beschrieben. Dem Simulationsprogramm werden daher eine Anzahl sogenannter Materialmodelle zur Verfügung gestellt.

Alle vom Simulationsprogramm benötigten Materialfunktionen können im Forschungs- und Entwicklungslabor des IBK bestimmt werden. Die hygrischen Materialeigenschaften durchwandern Skalen von mehreren Größenordnungen. Aus der Porenvolumenverteilung wird beispielsweise ersichtlich, dass sowohl Poren im Nano-Skalenbereich, als auch im Millimeterbereich die Speicher- und Transportprozesse bestimmen. Die Transportfunktionen durchwandern 9 Größenordnungen und stellen hohe Anforderungen an deren experimentelle Bestimmung, als auch an die numerische Mathematik. Zum Erhalt verlässlicher Funktionen, werden diese über geeignete Experimente verifiziert. Eine Auswahl relevanter hygrischer Funktionen repräsentieren die Graphiken in Bild 6.

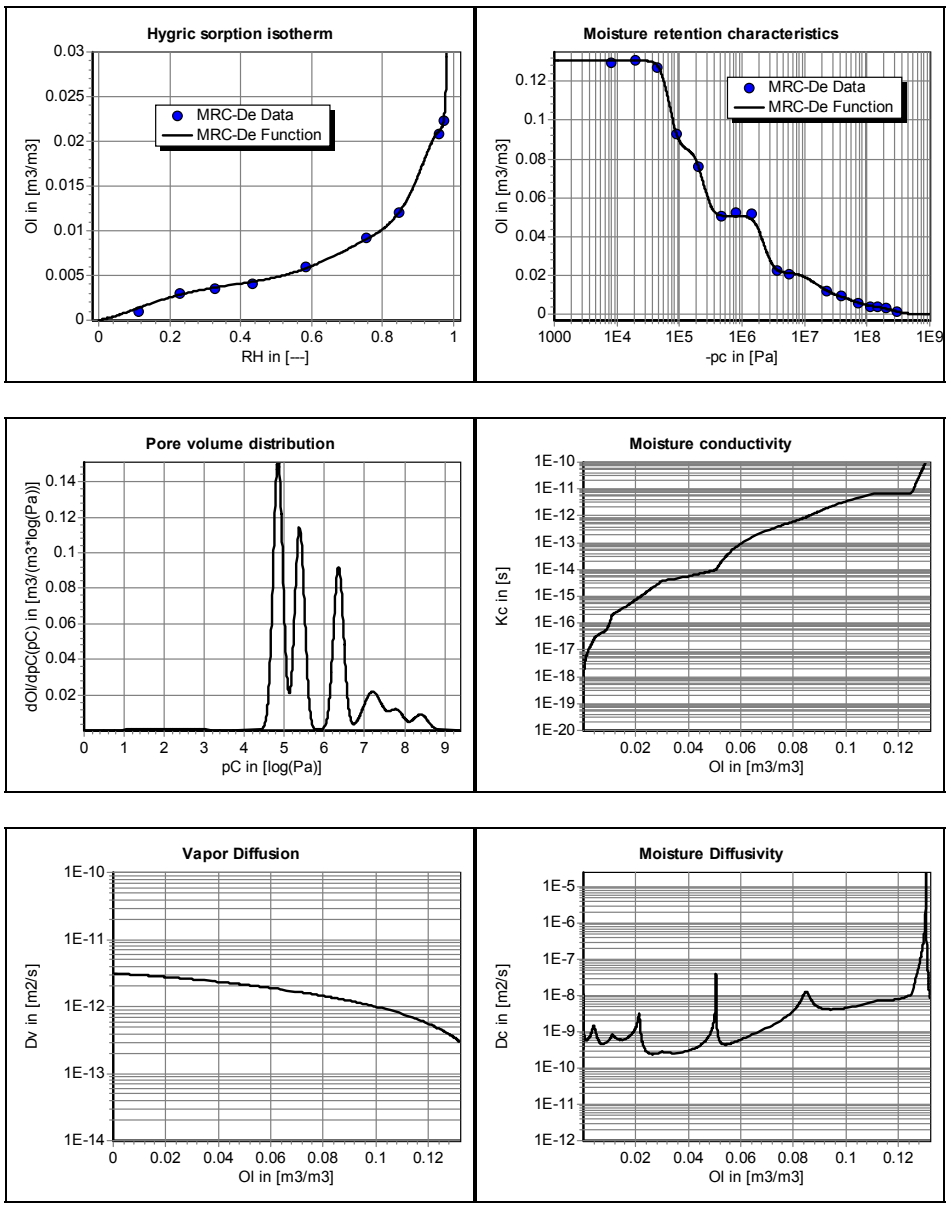


Bild 6: Beispiel für typische Materialfunktionen, die vom Simulationsprogramm DELPHIN® verwendet werden. Funktionen der Porenvolumenverteilung, Wasserretentionscharakteristik, Flüssigwasserleitfähigkeit, Wasserdampfdiffusion und Wasserdampf-diffusivität eines Porenbetons.

Neben der hygrothermischen Modellierung von komplexen, 2-dimensionalen Konstruktionsdetails von Gebäuden ermöglicht die DELPHIN® Simulation eine modellhafte Beschreibung des Salztransportes. Die derzeit vorliegenden Programmwerkzeuge erlauben eine Modellierung der Kinetik der Phasenumwandlungen (Kristallisation, Hydratation, Deliqueszenz) auch von Salzgemischen. Als wesentliche Effekte, die beschrieben werden können, zählen der Einfluss der Salze auf die Feuchtespeicherfunktion durch die Veränderung der Wasseraktivität der Porenlösung, wie auch die Porenverengung bei Kristallisation von Salz in den Poren. Dadurch wird die hygroskopische (wasseranziehende) Wirkung vieler Salze berechenbar. Ferner

sind verschiedene Diffusionsmodelle entwickelt, um den ladungsgekoppelten Transport mehrerer Salzionenarten in der gelösten Phase zu beschreiben. Dabei werden sowohl die Beweglichkeiten der einzelnen Ionen, als auch die Ladungsneutralität der Ionenmischung berücksichtigt.

Andere bereits implementierte Erweiterungen des Programms sind die Beschreibung des Transports leicht flüchtiger organischer Bestandteile, sogenannten VOC´s, oder die Ankopplung von Räumen an die Umfassungskonstruktion nebst der Berechnung sich einstellender Raumklimabedingungen.

3.3 Energetische Berechnungen – EPASS-HELENA®

Das Planungswerkzeug EPASS-HELENA® (derzeitige Version 4.8) ist eine Expertensoftware für die Berechnung energetischer Zusammenhänge von Gebäuden.

Bei der Entwicklung wirkten neben Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser auch das Fraunhofer Institut für Bauphysik, das Fachgebiet Technische Gebäude-Ausrüstung an der Universität Kassel und ISOVER-Consult mit. Seit dem Erscheinen von EPASS-HELENA® 4.0 zur EnEV 2002 ist das Zentrum für Umweltbewusstes Bauen allein mit der Vermarktung und Weiterentwicklung des umfassenden Programmpakets betraut. Dabei stehen insbesondere Aspekte der Planungspraxis im Vordergrund. In den Folgeversionen werden seither auch Anregungen von Nutzern aus der praktischen Anwendung berücksichtigt und umgesetzt. Bei EPASS-HELENA® handelt es sich um eine Software, die fortlaufend gepflegt und aktiv weiterentwickelt wird. Dies wird durch direkten Informationsfluss aus der täglichen Support-Arbeit gewährleistet.

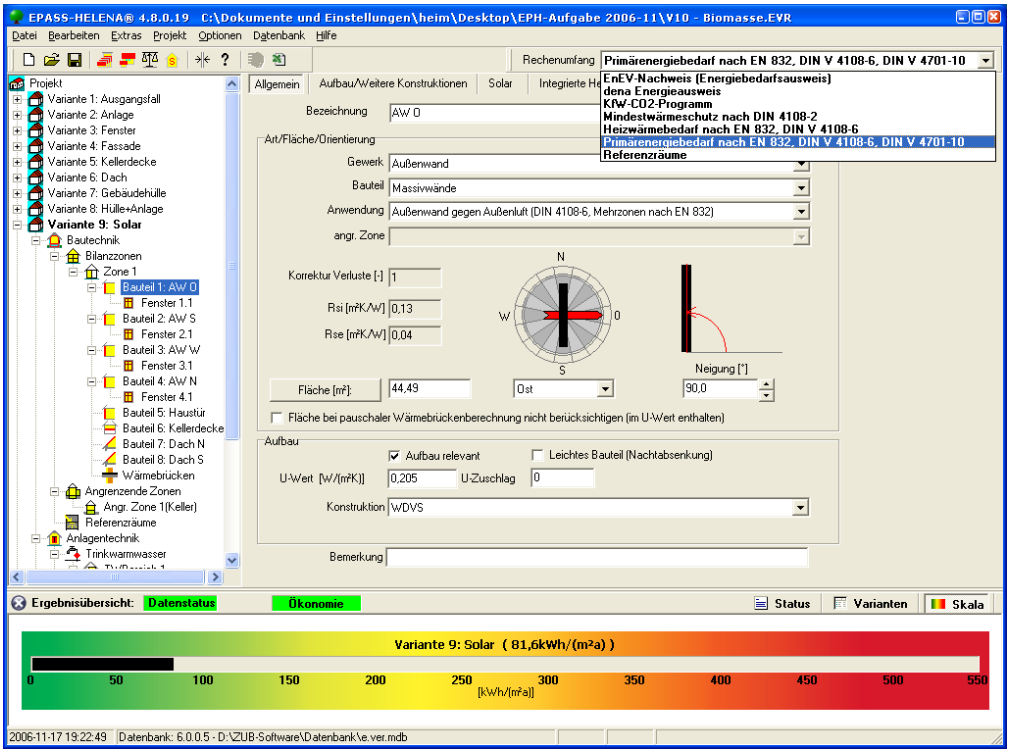


Bild 7: EPASS-HELENA – Definition von Bauteilen und Auswahl des Rechenumfangs.

Mit EPASS-HELENA® können verschiedene Temperaturzonen eines Gebäudes, wie z.B. Werkstatt, Lager und Büro, erfasst werden. Neben der von Anfang an konsequent umgesetzten Mehrzonigkeit stellt die darauf abgestimmte, detaillierte Darstellung der Anlagentechnik einen weiteren Vorteil dar. Damit besteht die Möglichkeit, Energieberatungen auch für komplexere Gebäude mit Hilfe nur eines Programms durchzuführen. Gleichzeitig lässt sich ein Energieausweis erzeugen, der auf Grundlage der dena-Vorgaben derzeit eine Gültigkeit von 10 Jahren hat. Die Konstruktionen und relevante Zwischenergebnisse werden in EPASS-HELENA® graphisch dargestellt. Sämtliche Berechnungsergebnisse sind per Knopfdruck komplett nach Excel exportierbar, wodurch Layout und Darstellung der Ergebnisse entsprechend individueller Anforderungen angepasst werden können. In Verbindung mit der klaren, einheitlichen Benutzerführung und der intuitiv bedienbaren Oberfläche steht dem Planer oder Berater ein ausgesprochen hilfreiches Instrument zur Verfügung.

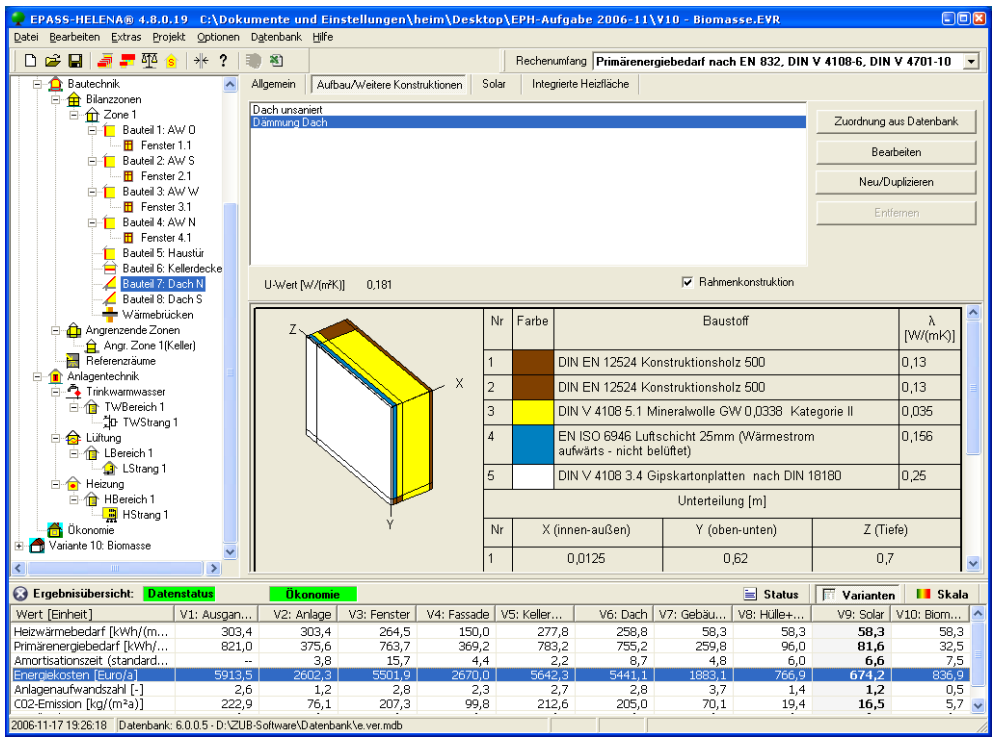


Bild 8: Bauteilaufbau zur Berechnung der U-Werte nach DIN EN ISO 6946.

Für Fragestellungen der Altbausanierung greift auch diese Software auf Materialkennwerte aktueller Normen zurück. Bei speziellen bauphysikalischen Fragestellungen oder konkreten Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist eine möglichst genaue Kenntnis der Ausgangssituation notwendig. Es werden die Materialkennwerte historisch verwendeter Baustoffe benötigt, um die Konstruktionen detailliert beschreiben zu können.

Die Inhalte der Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung bieten eine ideale Grundlage für derartige Fragestellungen. Dadurch können Bestandsgebäude häufiger in der Form für die energetische Bewertung erfasst werden, wie sie real vorzufinden sind.

Eine entsprechende Verwendung der MASEA-Daten kommt gleichzeitig beim Programm FPASS-ESTHER® zum Tragen, da es die gleiche Datenbank verwendet. Damit werden die Materialkennwerte alter Baustoffe in einem Programm verwendet, das einfache Feuchteberechnungen (Glaser und Euro-Glaser) ermöglicht. Zudem ist über eine Exportfunktion für das Programm WUFI® eine Weiterverarbeitung der Eingaben für detailliertere Betrachtungen möglich. Die Informationen der Materialdatensammlung erfahren eine breite Verwendung, was dem Bestreben nach einer einheitlichen Datenbasis für die energetische Altbausanierung zugute kommt.

4 Festlegung der relevanten hygrothermischen Kennwerte

Die feuchtetechnischen Kennwerte beschreiben den Feuchtetransport im Material sowie die dort ablaufenden Speichervorgänge. Für die beschriebenen Berechnungsprogramme ist die Kenntnis von den in Tabelle 2 aufgeführten Kennwerten erforderlich. Für ein besseres Verständnis bei der Beurteilung und beim Einsatz der Kennwerte werden im Folgenden kurz deren Bedeutung und die zugehörigen Messverfahren aufgeführt. Sind mehrere Verfahren genannt, verwendeten die Projektpartner unterschiedliche Verfahren.

Tabelle 2: Auflistung der erforderlichen bauphysikalische Kennwerte.

Kennwert	Formelzeichen	Einheit
Rohdichte	ρ	[kg/m³]
Spezifische Wärmekapazität	c_P	[J/(kgK)]
Wärmeleitfähigkeit	λ_r	[W/(mK)]
Diffusionswiderstandszahl	μ	[-]
Sorption	$u_{(80)}$	[kg/m³]
Freie Wassersättigung	$u_{(f)}$	[kg/m³]
Wasseraufnahmekoeffizient	W_w	[kg/(m²h^{0,5})]
Offene Porosität	Φ_o	[Vol.-%]

4.1 Beprobung

Die Messung der relevanten Materialeigenschaften erfordert den Einsatz zahlreicher Messmethoden, die häufig unterschiedliche Probendimensionen, Abdichtungstechniken oder Messzellen benötigen. Zur Beprobung werden daher die Probekörper randomisiert aus einer Materialcharge entnommen und in einem Probenkollektiv mit einer gewissen Anzahl von Wiederholungen zusammengestellt. Ein typisches Kollektiv gibt Tabelle 3 wieder.

Tabelle 3: Beispiel für das Probenkollektiv eines Porenbetons.

Probengröße	Wiederholungen
Prismen 70 x 70 x 30 mm	8
Prismen 40 x 40 x10 mm	64
Prismen 100 x 100 mm	3-5
Prismen 100 x 200 mm	3-5
Scheiben mit 50 mm Ø x 10 mm	10
Scheiben mit 200 mm Ø x 10 mm und 200 mm Ø x 50 mm	3-5
Scheiben mit 70 mm Ø x30 mm und 70 mm Ø x 50 mm	8
Scheiben mit 100 mm Ø x 20 mm und 100 mm Ø x 50 mm	3-5

Nach der Beprobung werden vor der eigentlichen Messung weitere Arbeitsschritte erforderlich, die nachfolgend aufgelistet sind:

- Metrische Messung der Probengeometrien zur Berechnung der Flächen und Volumina
- Bestimmung der Trockenmassen der Proben nach einer materialabhängigen Trocknung (z.B. Ziegel T_{max} = 105°C, Gipsputz T_{max} = 40 °C). Temperatursensitive Materialien werden am Ende der Experimente getrocknet.
- Präparation von Probekörpern; z.B. Einbau der Körper in Acrylfließzellen, laterale Probenabdichtung, Bohrung von Hohlräumen für die Aufnahme von Sensoren, etc.
- Bestimmung der Gesamtmassen der Proben nach der Präparation
- Probenkonditionierung; Lagerung der Probenkörper bei den erforderlichen experimentellen Bedingungen, z.B. kapillare Aufsättigung der Proben auf speziellen Keramiken, Lagerung bei bestimmten Luftfeuchte für die Wasseraufnahme, bzw. Wasserdampfdiffusion, etc.

4.2 Beschreibung der einzelnen Kennwerte und Messverfahren

Rohdichte oder Trockenraumdichte

Als Rohdichte oder Trockenraumdichte, ρ, bezeichnet man die Dichte eines porösen Festkörpers, die definiert ist als das Verhältnis von Masse der trockenen Festsubstanz und dem eingenommenen Raumvolumen, bestehend aus Feststoff inklusive Porenraum der Materialprobe [kg/m^3]. Die Trockenmasse wird durch Trocknung auf Gewichtskonstanz bei einer definierten Temperatur ermittelt. Die jeweilige Trocknungstemperatur richtet sich nach der Art des Materials und variiert zwischen 40 °C und 105 °C.

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität als Stoffkenngröße ist eine Materialeigenschaft und gibt an, wie groß die Wärmemenge ist, die 1 kg eines Stoffes aufnimmt oder abgibt, wenn dessen Temperatur um 1 K erhöht oder gesenkt wird. Als Einheit für die spezifische Wärmekapazität unter konstantem Druck c_P wird J/(kg K) verwendet (Umrechnung: 1 kJ/(kg K) = 0,278 Wh/(kg K)).

Für Berechnungen bezüglich des baulichen Wärmeschutzes sind Rechenwerte verschiedener relevanter Stoffe in DIN EN 12524 [39] angegeben. Innerhalb einzelner Materialgruppen sind Schwankungen der Werte relativ gering, so dass beispielsweise für anorganische Bau- und Dämmstoffe mit einer spezifischen Wärmekapazität von 850 J/(kg K) für trockene Materialien. Für Materialien mit praktischem Wassergehalt wird nach DIN EN 12524 mit 1000 J/(kg K) gerechnet.

Unter thermischer Analyse (TA) werden Methoden verstanden, bei denen physikalische und chemische Eigenschaften einer Substanz oder eines Gemisches als Funktionen der Temperatur oder der Zeit gewonnen werden. Grundsätzlich werden die untersuchten Proben einem kontrollierten Temperaturprogramm unterworfen. Die spezifische Wärmekapazität kann durch ein solches thermisches Analyseverfahren bestimmt werden.

Eine grundlegende Methode stellt die Kalorimetrie dar. Dafür kann ein Kaloriemetergefäß als eine einfache Versuchsanordnung verwendet werden. Es erfolgt die Bestimmung der Wärmemenge, die bei physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen erzeugt oder verbraucht wird. Aus diesen Erkenntnissen kann die spezifische Wärmekapazität ermittelt werden.

Begriffsdefinitionen zu thermischen Analyseverfahren finden sich in der DIN 51005 [33], die zudem die unterschiedlichen Verfahren benennt. Normativ festgelegte Verfahren, mit denen auch die spezifische Wärmekapazität bestimmt werden, finden sich in der DIN 51007 [34]. Darin werden Grundlagen der Differenzthermoanalyse (DTA) beschrieben. Unterschieden wird darin nach der Temperatur-Differenz-Thermoanalyse und der Dynamischen Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie, wobei grundsätzlich die zu untersuchende Probe und eine Referenzprobe einem Temperaturprogramm unterworfen werden, um deren thermisches Verhalten zu untersuchen. Während bei der Temperatur-Differenz-Thermoanalyse charakteristische Temperaturen ermittelt werden, können bei der Dynamischen Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie (DDK oder auch (engl.) DSC) darüber hinaus kalorische Werte bestimmt werden. Durch eine zusätzliche Heizung kann die bei der Aufheizung oder einem anderen Temperaturprogramm zwischen Probe und Referenzprobe auftretende Temperaturdifferenz auf nahezu Null geregelt werden. Die dafür notwendige Leistung wird als Funktion der Temperatur gemessen und man spricht dann von der Dynamischen Leistungs-Differenz-Kalorimetrie zur Bestimmung charakteristischer Temperaturen und kalorischer Werte.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine charakteristische Stoffeigenschaft und eine wichtige Basisgröße bei der Beurteilung des thermischen und hygrischen Verhaltens von Baustoffen und Konstruktionen. Unter Wirkung eines Temperaturgefälles erfolgt der Transport von Wärme durch den Vorgang der Wärmeleitung von Stoffteilchen zu Stoffteilchen. Während bei festen Körpern die Bewegungsenergie der um mittlere Lagen schwingenden Teilchen weitergegeben wird, ändern bei Flüssigkeiten und Gasen die einzelnen Teilchen ihre Lage zueinander.

Die Wärmeleitfähigkeit ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Bei nichtmetallischen Stoffen stellt die physikalische und chemische Struktur eine entscheidende Einflussgröße dar. Die Wärmeleitfähigkeit ist im Allgemeinen rohdichte- und temperaturabhängig. Bei wasseraufnahmefähigen Stoffen beeinflusst auch deren Wassergehalt die Wärmeleitung. Als Stoffkennwert ist die Wärmeleitfähigkeit ausschließlich experimentell bestimmbar.

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit kann nur nach indirekten Messmethoden erfolgen, also aus einer Beziehung zwischen der Wärmeleitfähigkeit und anderen Größen, die messtechnisch direkt zugänglich sind. Es ergibt sich daraus ein im Wesentlichen für alle Messverfahren gleiches Messprinzip. Demnach werden in der entsprechenden Probe der Wärmestrom und die maßgebende Temperaturdifferenz bestimmt. Zusätzlich sind die Probenabmessungen festzustellen. Der Wärmestrom oder die Wärmestromdichte werden aus der elektrischen Heizleistung abgeleitet oder mit Hilfe von Wärmestrommessern bestimmt. Die Temperaturmessung erfolgt mittels Thermoelementen oder Widerstandsthermometern.

Die normativen Grundlagen für die Messung der Wärmeleitfähigkeit finden sich in DIN EN 12664 [40] und in DIN EN 12667 [41]. Die genannten Normen beschreiben das Verfahren mit dem Plattengerät und das Verfahren mit dem Wärmestrommessplatten-Gerät. In Kombination mit den jeweiligen Produktnormen, welche zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Probenher-

stellung oder der Prüfbedingungen enthalten können, existieren somit ausreichende Festlegungen für routinemäßige Messungen der Wärmeleitfähigkeit.

DIN EN 12664 enthält die Verfahrensbeschreibung sowie die einzuhaltenden Prüfbedingungen für trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand. Die produktabhängig getrockneten oder auf einen Gleichgewichtszustand zu feuchter Luft konditionierten Proben müssen einen Wärmedurchlasswiderstand von mindestens 0,02 (m²K)/W aufweisen und können eine Wärmeleitfähigkeit von bis zu 2,0 W/(mK) besitzen. Der untere Grenzwert des messbaren Wärmedurchlasswiderstandes hängt vom Effekt des durch die Messtechnik bedingten Kontaktwiderstandes ab. Den gesamten Bereich der nach DIN EN 12664 zu erwartenden Prüfbedingungen erfasst nur das Plattengerät, das im normativen Anhang D der Norm hinsichtlich der Konstruktion der Prüfeinrichtung beschrieben ist.

Für trockene Proben mit einem Wärmedurchlasswiderstand von nicht weniger als 0,5 (m²K)/W empfiehlt sich die Anwendung des einfacheren Verfahrens der DIN EN 12667 [41]. Diese enthält die normativen Festlegungen für die Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät für Produkte mit hohem und mittleren Wärmedurchlasswiderstand. Der Grenzwert von mindestens 0,5 (m²K)/W ist wiederum durch den Einfluss von Kontaktwiderständen bedingt. Anhang D.3 der DIN EN 12667 [41] beschreibt drei Ausführungen des Wärmestrommessplatten-Gerätes, welches nur einen Teilbereich der genannten Prüfbedingungen erfüllen kann.

Messungen an dicken Proben mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand werden in DIN EN 12939 [42] behandelt.

DIN EN ISO 10456 [44] beschreibt die Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte. Sie nennt neben den o.g. Messverfahren zur experimentellen Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit weitere Verfahren und Möglichkeiten, den Nennwert der Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln (geregelter oder kalibrierter Heizkasten, indirekt erhaltene Werte unter Verwendung einer anerkannten Korrelation, z.B. zur Rohdichte). Relevant für die baupraktische Anwendung sind die in DIN EN ISO 10456 [44] beschriebenen Möglichkeiten zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Bemessungswerte.

Diffusionswiderstandszahl

Die Diffusionswiderstandszahl beschreibt den Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Materials im Vergleich zu einer Luftschicht gleicher Dicke. Die Diffusionswiderstandszahl von Luft ist dementsprechend gleich 1, wogegen die der Baumaterialien meist deutlich höher liegt.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist die Durchführung der Messung von Dampfdiffusionskoeffizienten gemäß DIN EN ISO 12572 [46] genormt. Dabei wird das Verfahren je nach Luftfeuchtebereich differenziert. Bei einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 0 bis 50 % relativer Luftfeuchte spricht man von dem "dry-cup" Verfahren, bei einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 50 bis 100 % relativer Luftfeuchte von dem "wet-cup" Verfahren.

Tabelle 4: Verwendete Sorbentien zur Realisierung konstanter Randbedingungen während der Messungen.

Sorbens	Relative Luftfeuchte von Trocknungsmittel und Salzlösung [%]
Silica Gel	3 - 5
Magnesiumchlorid	32,9
Natriumchlorid	75,4
Ammonium-Di-Hydrogenphospat	93
Kaliumsulphat	97,4

Die Messungen erfolgen unter isothermen Bedingungen. Dazu wird eine plattenförmige Probe des zu prüfenden Materials als oberer Abschluss auf ein Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden. Im Gefäß wird durch ein Trocknungsmittel oder eine geeignete gesättigte Salzlösung eine konstante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Zur Messung werden die Gefäße in einen Klimaraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchte gebracht. Unter dem Einfluss des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen den an die Probenoberfläche angrenzenden Lufträumen wandert der Wasserdampf durch die Proben hindurch (Bild 9). Nach Einstellen eines stationären Gleichgewichtes ergibt sich eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsänderung des Messgefäßes, welche dem Diffusionsstrom bei dem angelegten Luftfeuchtegradienten entspricht. Während der Messung wird die gesamte Masse des Gefäßes periodisch gemessen. Nach dem Erreichen stationärer Bedingungen, die mit einer zeitkonstanten Gewichtsänderung einhergehen, kann der Wasserdampfdiffusionswiderstand, μ, nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\mu = \frac{1}{s}\left(p_a * A * \frac{p_1 - p_2}{j} - s_a \right)$$

s [m] Dicke des Probekörpers

p_a [kg/m^{-1}h^{-1}Pa^{-1}] Wasserdampfpermeabilität von Luft

A [m^2] Fläche der Probe

s_a [m] Mittlere Schichtdicke der Luftschicht zwischen Probekörper und Sorbens

p_1 [Pa] Wasserdampfpartialdruck an der Probenoberseite

p_2 [Pa] Wasserdampfpartialdruck an der Probenunterseite

j [kg/h] Wasserdampfdiffusionsstrom

Zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands von Baustoffproben ist die Kenntnis der Wasserdampfpermeabilität von Luft erforderlich, die über die nachfolgende Gleichung berechnet werden kann.

$$p_a = \frac{0.083}{R_D T} \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81}$$

R_D [Nmkg^{-1}K^{-1}]	Gaskonstante von Wasserdampf mit 462 [Nmkg^{-1}K^{-1}]
T [°K]	absolute Temperatur
P_0 [hPa]	atmosphärischer Druck bei Standardbedingungen von 1013.25 [hPa].

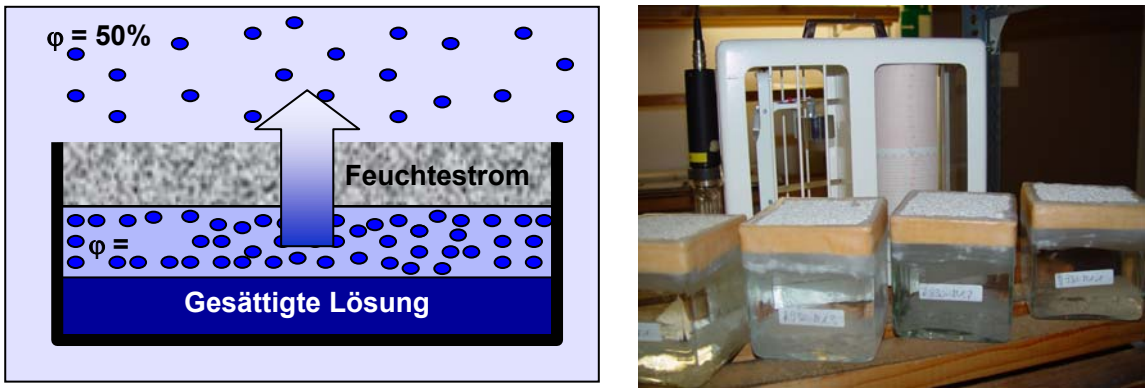


Bild 9: Prüfanordnung zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.

Feuchtespeicherfunktion, Sorption

Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt den Wassergehalt eines Baustoffes im Gleichgewicht mit den jeweiligen Randbedingungen. Bei der Bestimmung der Speichereigenschaften muss zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich und dem Kapillarwasserbereich unterschieden werden.

Im Sorptionsfeuchtebereich gibt es ein allgemein angewandtes, sehr einfaches Verfahren. Die Probe wird in einem über einer Salzlösung oder mit Hilfe eines Klimaschrankes eingestellten Klima gelagert und der Ausgleichsfeuchtegehalt durch Wiegen der Probe ermittelt. Durch schrittweises Variieren der relativen Luftfeuchte von relativ niedrigen (< 50 % r.F.) zu hohen Feuchten (bis 95 % r.F.) erhält man die Adsorptionsisotherme bzw. bei umgekehrter Vorgehensweise die Desorptionsisotherme. Messungen oberhalb von 95 % r.F. sollten nicht durchgeführt werden, da in diesem Bereich bei hygroskopischen mineralischen Baustoffen die Sorptionsisotherme extrem steil ist. Kleine nicht auszuschließende Schwankungen der relativen Luftfeuchte (z.B. durch Temperaturschwankungen) bewirken nämlich bereits sehr große Änderungen der Sorptionsfeuchte. Zur Bestimmung der Sorptionsisotherme von Beschichtungsstoffen werden diese auf Aluminiumbleche aufgebracht. Die Ermittlung einer Sorptionsisotherme dauert je nach Pro-

benmaterial und der Anzahl der Feuchtestufen aufgrund der sehr langsamen Einstellung der Ausgleichsfeuchte mehrere Wochen bis Monate. Das Messverfahren ist innerhalb der DIN EN ISO 12571 [45] normiert.

Die Feuchtespeicherfunktion im Kapillarwasserbereich muss auf andere Weise ermittelt werden. Als gut geeignet hat sich die Bestimmung der Saugspannungskurve mit Hilfe des Druckplattenapparates erwiesen. Eine korrekt bestimmte Saugspannungskurve ist unerlässlich zur Bestimmung des Feuchteüberganges zwischen kapillaraktiven Materialen (z.B. Mauerwerk-Grundputz-Deckputz). Bei der Saugspannungsmessung liegt das im Folgenden beschriebene Messprinzip zugrunde.

Bei kapillarporösen, hygroskopischen Materialien mit stetiger Porengrößenverteilung kann jedem Wassergehalt bis hin zur freien Sättigung jeweils eine maximal noch mit Wasser gefüllte Porengröße zugeordnet werden. Diese Zuordnung beruht auf der Voraussetzung, dass alle vom Wasser erreichbaren Poren miteinander Verbindung haben und die kleineren Poren mit höherer Saugkraft solange aus größeren Poren Wasser saugen, bis für einen bestimmten Wassergehalt ein Kapillardruckgleichgewicht erreicht ist. Für den Bereich der überhygroskopischen Feuchte ergibt sich eine charakteristische Abhängigkeit, die so genannte Kapillardruck- oder Saugspannungskurve. Mit Hilfe einer Saugspannungsmessanlage (Bild 10) wird diese Kurve durch Entfeuchten anfänglich gesättigter Proben durch Aufbringen verschiedener Überdrücke ermittelt, indem für jede Druckstufe der entsprechende Gleichgewichtswassergehalt bestimmt wird.



Bild 10: Links: Saugspannungsmessanlage
Rechts: Drucktopf mit Materialprobe.

Freie Wassersättigung

Die freie Wasseraufnahme ist die gewichts- oder volumenbezogene Menge an Wasser, die ein Material bei Wasserlagerung ohne zusätzliche äußere Kräfte (Überdruck oder Vakuum) aufnimmt. Sie liegt aufgrund eingeschlossener Luftporen stets unterhalb der Menge, die das Material aufgrund seiner offenen Porosität aufnehmen könnte.

Zur Bestimmung der freien Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck gemäß DIN 52103 [35] werden entsprechend vorbereitete und gewogene Prüfkörper in ein Wasserbad, gefüllt mit Leitungswasser, auf einen Gitterrost gelegt. Die Prüfkörper werden zunächst für 1 Stunde nur bis zur Hälfte ein-

getaucht. Dann werden sie mit 20 mm ± 5 mm Wasser überdeckt und in regelmäßigen Zeitintervallen gewogen. Oberflächlich anhaftendes Wasser wird mit einem feuchten Schwammtuch entfernt. Die freie Wasseraufnahme ist beendet, wenn Gewichtskonstanz erreicht ist, d. h. der Prüfkörper ändert sein Gewicht in 24 Stunden, um nicht mehr als 0,1 M.-%. Anschließend werden die Prüfkörper bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank getrocknet (Trocknungstemperatur 105 °C bzw. 40 °C für gipshaltige Baustoffe oder für Baustoffe, bei denen höhere Temperaturen zu vermeiden sind, bei Kunststoffen 70 °C).

Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die Feuchteaufnahme eines Materials über die Benetzungsfläche. Bei Materialien mit zeitlich konstanter Porenstruktur erfolgt die Wasseraufnahme stets linear mit der Wurzel der Zeit.

Zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach DIN EN ISO 15148 [47] werden die Proben an den Seitenflächen abgedichtet und mit der Saugfläche nach unten 2 bis 10 mm tief in ein Wasserbad eingetaucht. Die Proben werden vor dem Eintauchen in das Wasserbad und dann in bestimmten Zeitabständen gewogen. Vor der zweiten und den folgenden Wägungen wird an der Saugfläche oberflächlich anhaftendes Wasser mit einem feuchten Schwammtuch entfernt. Trägt man die flächenbezogene Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit auf, ergibt sich für die meisten mineralischen Baustoffe eine Gerade. Aus der Steigung der Geraden kann der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) ermittelt werden. Ergibt sich keine mit der Wurzel der Zeit lineare Wasseraufnahme, wird der w-Wert aus der Wasseraufnahme nach 24 Stunden ermittelt.

Neben dem oben beschriebenen manuellen Verfahren besteht die Möglichkeit der Messung der kontinuierlichen Wasseraufnahme. Damit können bestehende Grenzen und Unzulänglichkeiten einer klassischen w-Wert-Bestimmung umgangen werden [115]. Bei dem automatisierten Verfahren kann das Gewicht der Probe während der Wasseraufnahme kontinuierlich über eine Waage gemessen werden. Ein Bild der experimentellen Apparatur für zwei simultane Messungen zeigt Bild 11.

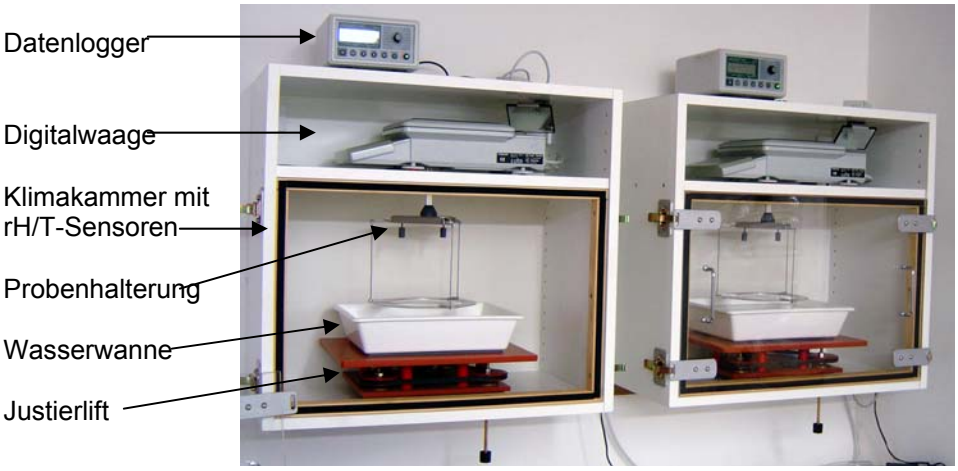


Bild 11: Experimentelle Apparatur zur automatischen Messung des kapillaren Wassergehaltes und des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten.

Die experimentelle Apparatur besteht aus:

- einer Klimakammer mit einer vertikal justierbaren Wasserwanne, wo die Temperatur konstant und die relative Luftfeuchte über 97% gehalten werden kann,
- der Materialprobe mit einer speziellen Halterung zur präzisen Platzierung der Probe auf der Wasseroberfläche,
- einer Digitalwaage (+- 0.01g) mit Halterung, die eine kontinuierliche Messung ermöglicht während die Probe unter der Waage hängt und
- einem Datenlogger und Computer zur automatischen Registrierung der Waagendaten sowie der Klimabedingung relative Luftfeuchte und Temperatur innerhalb der Kammer.

Die zeitabhängige Wasseraufnahme der Materialprobe wird über die Probenhalterung an die Waage weitervermittelt und vom Logger aufgezeichnet. Die Ankopplung der Probe an die Wasseroberfläche erfolgt über einen Justierlift. Während sich Probe und Wasserwanne in der Klimakammer befinden, sind Waage und Datenlogger zum Feuchteschutz außerhalb platziert.

Vor der Messung werden die Proben ausgemessen, getrocknet und deren Volumen sowie deren Masse bestimmt. Abhängig vom Material kommen Proben von 20 bis 100 mm Höhe zum Einsatz. Zur Gewährleistung eines 1-dimensionalen, vertikalen Transportes sind die Proben lateral versiegelt, wobei spezielle Beschichtungen, Epoxydharz und/oder Aluminiumfolie verwendet werden. Anschließend werden die Proben über 14 Tage in Exsikkatoren bei einer relativen Luftfeuchte von 33% gelagert. Zum Messbeginn wird eine nicht luftdichte Folie auf der Probenoberfläche befestigt. Damit wird eine Befeuchtung des Materials von oben während der Messung in der 97 % feuchten Kammer verhindert. Dann wird die Probenhalterung mit der Materialprobe auf die Halterung in der Kammer platziert und die Kammer geschlossen. Nach der Aktivierung des Datenloggers wird der Wannenlift zur Probe hin bewegt bis die Wasserfüllung Kontakt mit der Materialprobe hat. Während der gesamten Wasseraufnahmemessung werden Wasserwanne und Probenhalterung stabil belassen. Die Daten der Waage und der relative

Luftfeuchte/Temperatursensor werden kontinuierlich abgefragt. Bei Messende wird der Wassergehalt der Probe gravimetrisch gemessen und zur Kalibrierung des Wasseraufnahmeexperimentes verwendet.

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt nur die Wasseraufnahme eines Baustoffes über die Oberfläche, nicht aber die Verteilung des Wassers innerhalb des Materials. Mit Hilfe von Kapillartransportkoeffizienten, deren messtechnische Bestimmung aber einen hohen apparatetechnischen Aufwand bedeutet [88], [112], lassen sich für die Wasseraufnahme die Feuchteverteilungen berechnen. Diese für hygrothermische Berechnungen wesentliche Transportkoeffizienten können mit guter Nährung auch aus Standardstoffkennwerten (dem w-Wert, der freien Wassersättigung und dem Bezugsfeuchtegehalt) approximiert werden [92], [70].

Offene Porosität

Die offene Porosität, Φ_o [m^3/m^3, bzw. Vol%] ist definiert als Verhältnis der für Wasser zugänglichen, offenen Poren bezogen auf das Gesamtvolumen der Probe. Im Folgenden werden zwei Verfahren zur Messung der Porosität beschrieben.

Die Messung beginnt mit der Lagerung der Proben in einem entlüfteten mit Wasser gefüllten Exsikkator. Zusätzlich wird ein Vakuum angelegt und die Luft aus dem System entfernt, wobei die Probe für über 24 Stunden im Exsikkator verbleibt. Die offene Porosität berechnet sich über:

$$\Phi_o * \rho_w = \frac{m_w - m_d}{V}$$

m_d [kg]	Masse der trockenen Probe
m_w [kg]	Masse der feuchten Probe
V [m³]	Volumen der Probe
ρ_w [kg/ m³]	Dichte von Wasser
Φ_o [m^3/m^3]	Porosität

Beim zweiten Verfahren wird die Reindichte oder Feststoffdichte mit dem Heliumpyknometer bestimmt. Die Feststoffdichte, ρ_m, auch als Partikeldichte bezeichnet, entspricht der Dichte der festen Matrix und berechnet sich aus dem Verhältnis der Gesamtmasse des Feststoffs bezogen auf das Feststoffvolumen ohne Porenräume [kg/m^3]. Die Feststoffdichte wird mit einem kommerziellen Heliumpyknometer bestimmt (Bild 12). Im Messgerät sind zwei Kammern vorhanden, eine davon mit variablem Volumen. Zu Messbeginn wird das Volumen der unbefüllten Probenkammer auf die gleiche Größe der Referenzkammer eingestellt. Dazu wird mit Hilfe von Hubkolben in beide zuvor evakuierte Kammern die gleiche Menge Helium eingebracht und das Volumen der veränderlichen Kammer so eingestellt, dass in beiden Kam-

mern der gleiche Druck vorliegt. Zur Messung wird Helium verwendet, da es als innertes Gas den kleinsten Molekulardurchmesser besitzt und alle zugänglichen Hohlräume einer Probe erfasst. Anschließend wird die Probenkammer mit dem Prüfgut befüllt, wieder evakuiert und dann die gleiche Menge Helium wie vorher eingebracht. Um in beiden Kammern nun den gleichen Druck zu erreichen, muss das Volumen der Prüfkammer um das Volumen des reinen Feststoffes des Prüfgutes vergrößert werden. Dividiert man die Masse der Probe durch das so bestimmte Reinvolumen, erhält man die Reindichte.



Bild 12: Heliumpyknometer mit Prüfgut.

Die Porosität, Φ [m^3/m^3], berechnet sich über das Substanzvolumen aus Trockenraumdichte und Feststoffdichte. Sie beschreibt den gesamten, zur Verfügung stehenden Porenraum.

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_m}$$

ρ_d [kg/ m³] Trockenraumdichte/Rohdichte

ρ_m [kg/ m³] Feststoffdichte/Reindichte

Φ [m^3/m^3] Porosität

4.3 Funktionalisierung

Die hygrothermische Bauteilsimulation bzw. Feuchte- und Wärmetransportberechnungen basieren auf der numerischen Lösung von gekoppelten Differentialgleichungen mit feuchte- und temperaturabhängigen Transport- und

Speicherkoeffizienten. Die Laborexperimente hingegen liefern Basiskennwerte (oder -parameter), die einer Interpretation bedürfen, um als Parameter der Transport- und Speicherkoeffizienten verwendet werden zu können. Die Interpretation der Laborkennwerte zur Generierung von Materialfunktionen, welche die Materialeigenschaften adäquat beschreiben, ist die wesentliche Aufgabe der Materialmodellierung. Das Materialmodell umfasst ein Set von Materialfunktionen einschließlich der Material- und Modellparameter. Die Anwendung des Materialmodells erfolgt notwendigerweise in drei Stufen: Modellierung, Kalibrierung und Validierung.

1. Modellierung - Anwendung geeigneter Materialfunktion auf die im Labor gemessenen Materialdaten
2. Kalibrierung - Bestimmung interner „nicht sichtbarer“ Funktionsparameter durch Simulation von Laborexperimenten und deren Optimierung
3. Validierung - Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Materialverhalten anhand von Experimenten, die nicht zur Kalibrierung herangezogen wurden

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein am IBK entwickeltes Materialmodell verwendet. Dieses „Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakterisierung“ ermöglicht die Verknüpfung komplexer, aus thermodynamischen Grundlagen abgeleitete Funktionen mit einfachen, aus der Ingenieurpraxis bekannten Kennwerten. Das Materialmodell besitzt den Vorteil der einfachen Handhabung und der Erweiterbarkeit auf andere Problemstellungen, da es keine prinzipiell einschränkenden Voraussetzungen bezüglich der Modellierung von Transportvorgängen unterliegt.

Im Ergebnis entsteht ein im gesamten Feuchtebereich kalibriertes, auf thermodynamischen Grundlagen basierendes Transportmodell für den gekoppelten Flüssigwasser-, Wasserdampf- und Wärmetransport. Das Modell ist für die wissenschaftliche Weiterentwicklung zugänglich und z. B. auf den Salztransport und Salzkristallisationsprozesse erweiterbar. Die Anpassungsgenauigkeit kann durch eine erweiterte, über die Mindestanforderungen hinausgehende Bestimmung von Messdaten entsprechend erhöht werden.

Das Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakterisierung besitzt eine Reihe interner Funktions- und Materialparameter. Die internen Funktionsparameter werden durch Kalibrierung bestimmt. Dem Nutzer sichtbar ist ein Mindestsatz an Messdaten, die als Basisparameter bezeichnet werden. Basisparameter sind: Trockenraumdichte, Porosität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, freier Sättigungsfeuchtegehalt und Ausgleichsfeuchte bei 80% relativer Luftfeuchte, Wasseraufnahmekoeffizient, Dampfdiffusionswiderstandsfaktor (dry-cup Wert) und Trocknungskoeffizient (siehe Kapitel 11). Mit diesem Satz an Basisparametern ist es möglich, das Materialverhalten grundlegend zu beschreiben und Sensivitätsanalysen bzgl. einzelner Parameter durchzuführen.

Vergleichsmessung international renommierter Bauphysiklabors (siehe [121] und [122]) haben gezeigt, dass der derzeitige Stand der Normen nicht ausreicht, um qualitativ hochwertige Messungen abzusichern. Die Ergebnisse

differierten stark von Labor zu Labor, stärker als die festgestellte Inhomogenität der Materialeigenschaften. Das lässt den Schluss zu, dass die Resultate zu sehr von den individuellen Entscheidungen der ausführenden Personen abhängen und, in letzter Konsequenz, dass demnach die Normen überarbeitungsbedürftig sind. Die Basisparameter stellen daher eine Mindestanforderung an die durchzuführenden Laborexperimente dar. Zusätzliche Messungen erhöhen deutlich die Genauigkeit der Materialcharakterisierung des Ingenieurmodells und lassen daher auch präzisere Simulationsergebnisse erwarten, beispielsweise durch zusätzliche Messpunkte auf der Feuchtespeicherfunktion im Retentions- und Sorptionsfeuchtebereich, Permeabilitätsmessungen nahe Sättigung, wet-cup Dampfdiffusionsmessungen und die Bestimmung des Trocknungsverlaufes insbesondere im zweiten Trocknungsabschnitt. Die zusätzlichen Messpunkte fließen in das Materialmodell ein und präzisieren die physikalischen Modellvorstellungen

Physikalisch basierte Materialfunktionen und deren Anpassung

Das „Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakteristik“ beinhaltet die Ableitung und Definition der Materialfunktionen sowie die Vorschriften zu deren Anpassung und Kalibrierung, wobei eine Unterscheidung in die Funktionen für die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport vorgenommen wird.

Die Feuchtespeicherfunktion setzt sich aus der im hygroskopischen Feuchtebereich bestimmten Sorptionsisotherme und der im überhygroskopischen Bereich gemessenen Saugspannungskurve zusammen und lässt sich als eine durchgängige Funktion angeben. Die Transportfunktionen für flüssiges Wasser und Wasserdampf werden daraus abgeleitet und anhand weiterer Experimente kalibriert, wie z.B. durch das Trocknungsexperiment.

Anpassung der Feuchtespeicherfunktion

Für den Verlauf der Feuchtespeicherfunktion wird ein multimodaler Funktionsansatz verwendet, der sich aus der Summe gewichteter Einzelfunktionen mit einer entsprechenden Anzahl freier Parameter zusammensetzt. Diesem Ansatz liegt eine logarithmisch Gaußnormalverteilte Porenradienverteilung zu Grunde, deren Integral der Feuchtespeicherfunktion entspricht.

Die Anpassung erfolgt an die Messwerte der Feuchtespeicherung im hygroskopischen und überhygroskopischen Feuchtebereich, wobei die Modalität und die daran gekoppelte Anzahl freier Parameter anzugeben sind.

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{pC}}\theta_l(\mathrm{pC}) = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\theta_i}{\sqrt{2\pi \mathrm{S}_i}} \cdot \exp\left(\frac{(\mathrm{pC}-\mathrm{pC}_i)^2}{2\mathrm{S}_i^2}\right)\right]$$

$$\theta_l(\mathrm{pC}) = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\theta_i}{2} \cdot \left(1 + \mathrm{erf}\left(\frac{(\mathrm{pC}_i-\mathrm{pC})}{\sqrt{2\mathrm{S}_i}}\right)\right)\right]$$

pC [log Pa] Logarithmus des Kapillardruckes

Θ_l [m³/ m³]	Volumenanteil der Flüssigphase
N	Modalität (Anzahl der Peaks in der Porenvolumenverteilungskurve)
S_i [-]	Standardabweichung der Parameter
pC_i[log Pa]	Logarithmus der Kapillardrücke an den Peakpositionen
Θ_i [m³/ m³]	charakteristische gemessene volumetrische Wassergehalte
erf	Parameter der Gauß Normalverteilung

Ein Beispiel für die Anpassung der obigen Gleichung an gemessenen Daten zeigt Bild 13. Die Abbildung repräsentiert die integrale Feuchtespeicherfunktion (unten) nebst ihrer Ableitung (oben). Auch wird ersichtlich, dass eine zunehmende Anzahl von Datenpunkten die Genauigkeit der Funktionalisierung fördert.

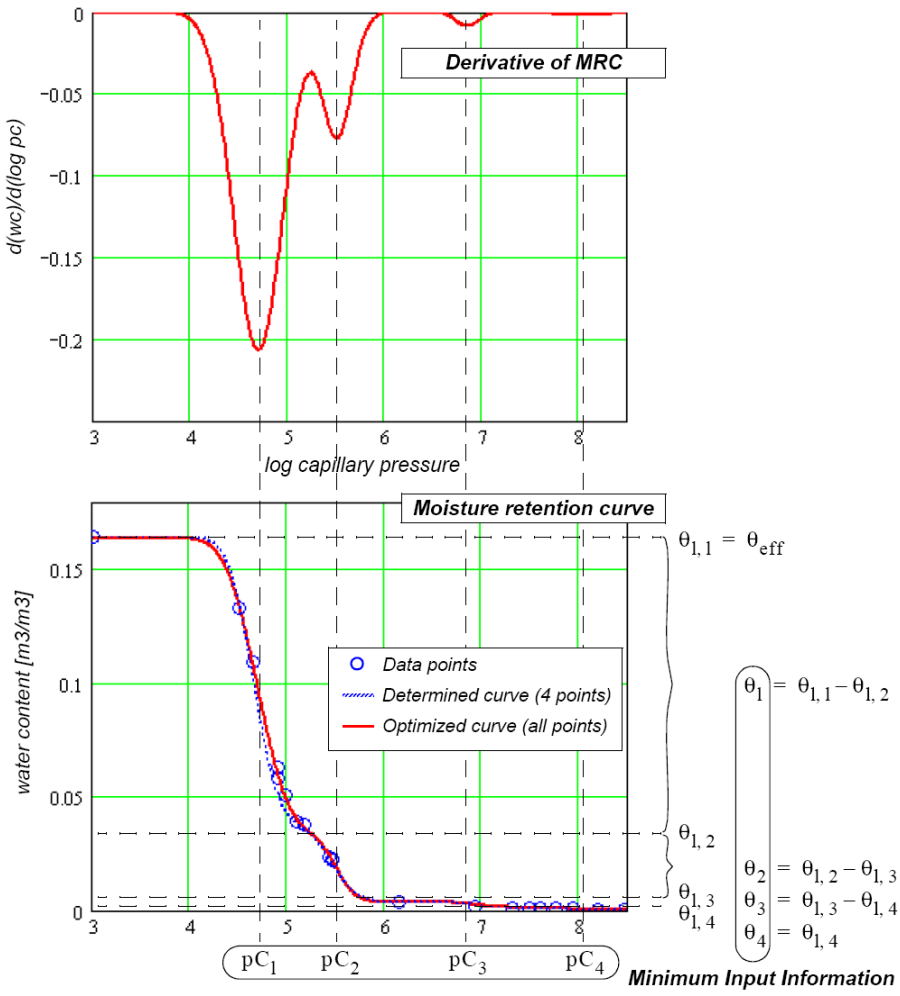


Bild 13: Feuchtespeicher- (unten) und Porenvolumenverteilungsfunktion (oben) eines Ziegels. Die Peaks (pC) liefern die Porenradienmaxima und deren Wassergehaltsverteilungen identifizieren die korrespondierenden Porenvolumina.

Modellansatz für Flüssigwasserleitfähigkeit

Zur Ableitung der Transportfunktionen für Flüssigwasser und Wasserdampf aus der Porenstruktur werden zwei Modelle miteinander kombiniert:

Die Flüssigwasserleitfähigkeit wird, basierend auf dem Porenmodel von Haagen Poseuille, die Feuchteleitfähigkeit über das Porenmodell nach Burdine [18] aus der Porenstruktur abgeleitet. Die Summation über alle Poren liefert die Flußdichte des flüssigen Wassers in Abhängigkeit vom größten Wasser gefüllten Kapillarradius. Der Term vor dem Potentialgradient beschreibt die Flüssigwasserleitfähigkeit des Porensystems.

$$j_k^{m_l} = -\left[\frac{\rho_l}{8\eta_l}\cdot\tau\cdot\int_{R_{min}}^{R}\pi\cdot r^4\cdot\frac{dn}{dr}\cdot dr\right]\cdot\left[\rho_l\cdot g_k+\frac{\partial p_c}{\partial x_k}\right]$$

r [m]	Kapillarradius
ρ_l [kg/ m³]	Dichte von Wasser
η_l [kg/ ms]	kinematische Viskosität
N	Modalität (Anzahl der Peaks in der
η_l [kg/ ms]	kinematische Viskosität
σ_i [N/ m]	Oberflächenspannung von Wasser
g, gk [m/ s^2]	Gravitation
j_k^{ml} [kg/ m^2s]	Flüssigwasser Flussdichte
p_c [Pa]	Kapillardruck
τ [-]	Tortuosität
n (r) [-]	differentielle Porenradienverteilungsfunktion
θ_i [m³/ m³]	volumetrischer Wassergehalt
X_k [m]	Raumkoordinate

Wird der obige Ausdruck in Bezug zur Umkehrfunktion der Feuchtespeicherung dargestellt, ergibt sich daraus die Feuchteleitfähigkeit als eine Funktion des Wassergehaltes

$$K_{pm}(\theta_l) = \frac{\rho_l}{8\eta_l} \cdot \tau \cdot \int_{\theta_{dry}}^{\theta_l} \left(\frac{2\sigma_l \rho_l g}{p_c(\theta_l)} \right)^2 \cdot d\theta_l$$

mit der Flüssigwasserleitfähigkeit K_{pm}, abgeleitet aus dem Porenmodell. Aufgrund der vereinfachenden Annahmen im Hagen-Poisseulleschen Ansatz mit kreisrunden, parallelen Poren wird das obige Modell keine exakten absoluten Leitfähigkeiten liefern. Jedoch kann die Verteilung der relativen Feuchteleitfähigkeit über das gesamte Porenspektrum ermittelt werden. Daher wird die obige Funktion normalisiert und als relative Funktion abgebildet. Anschließend wird die relative Funktion mit Hilfe gemessener Wasserleitfähigkeiten skaliert und liefert eine, sich an der Porenstruktur orientierende Feuchtetransportfunktion.

Die Leitfunktion knüpft im überhygroskopischen Bereich an die Dampfdiffusionsmessungen bei höheren Luftfeuchten (wet-cup) an und wird im Bereich der kapillaren Sättigung durch weitere Feuchteleitfähigkeitsmesswerte (Darcy-Leitfähigkeit) ergänzt. Die Genauigkeit der Funktionalisierung steigt mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Leitfähigkeitswerte.

$$K_r(\theta_l) = \frac{K_{pm}(\theta_l)}{K_{pm}(\theta_{cap})} = \frac{\int_{\theta_{dry}}^{\theta_l} \frac{1}{p_c(\theta_l)^2} d\theta_l}{\int_{\theta_{dry}}^{\theta_{cap}} \frac{1}{p_c(\theta_l)^2} d\theta_l}$$

$$K_l(\theta_l) = K_r(\theta_l) \cdot K_{cap}$$

Das vorgestellte Porenmodell beschreibt in sehr einfacher Weise den Flüssigtransport im Porensystem. Es wird z.B. immer eine vollständig vernetzte Flüssigphase vorausgesetzt, die ein kontinuierliches kapillares Fließen ermöglicht. Dabei handelt es sich um vorwiegend parallelen Flüssigwasser- und Dampftransport. Diese Voraussetzungen treffen sicherlich im oberen kapillaren bzw. gesättigten Feuchtebereich zu. Unterhalb des kapillaren Bereiches allerdings kann die Flüssigphase vorwiegend in Form von Flüssigkeitsinseln vorliegen, die kapillar nicht miteinander verbunden sind, d.h. die nur über die Dampfphase kommunizieren können. In diesem Fall spricht man von vorwiegend seriellem Flüssigwasser- und Dampftransport, der im Vergleich zum parallelen Transport in der Gasphase leistungsfähiger, dagegen in der Flüssigphase wesentlich weniger leistungsfähig ist. Es ist also zu erwarten, das die Volumenanteile, in denen paralleler Transport stattfindet, mit dem Wassergehalt zunehmen und die Volumenanteile mit seriellem Transport entsprechend abnehmen.

Da Flüssig- und Dampftransport gemeinsam zu betrachten sind, findet eine Kopplung zu einem Modell in Form eines seriellen und parallelen Flüssig-

wasser- und Dampftransportes statt, welches die Einflüsse der über die Gasphase und den Oberflächenfilm kommunizierenden Flüssigkeitsinseln beschreibt. Es erlaubt die Modellierung der Feuchteabhängigkeit des Dampftransportes und liefert zusätzlich eine Skalierungsfunktion für die Flüssigwasserleitfähigkeit im hygroskopischen und angrenzenden überhygroskopischen Bereich, deren physikalische Ursache in der Unterbrechung des kapillaren Flüssigwassertransportes von Flüssigkeitsinseln besteht.

Modellansatz für Wasserdampfdiffusion

Ein Modell zur Beschreibung des seriellen und parallelen Flüssigwasser- und Dampftransportes (SP-Modell), welches dieses Verhalten auf der Basis der einfachen bekannten Standardparameter berücksichtigt, lässt sich wie folgt skizzieren.

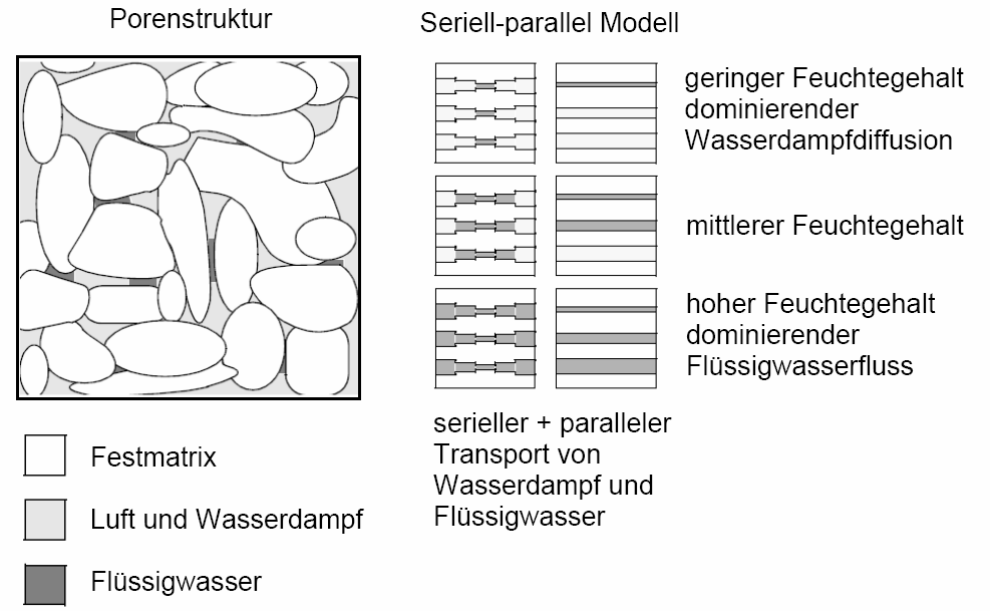


Bild 14: Kapillare Kondensation in porösen Materialien: flüssiges Wasser akkumuliert zuerst in Mikroporen (links), Unterschiede bei kapillaren Kondensationsprozessen zwischen seriell und parallel strukturierten Porendomänen des Porenvolumens (rechts).

Das SP-Modell setzt, wie in Bild 14 dargestellt, ein poröses Material mit Volumenanteilen voraus, in denen serieller und paralleler Flüssigwasser- und Wasserdampftransport stattfindet. Sowohl die seriellen als auch die parallelen Bereiche besitzen Poren entsprechend der Porenvolumen-verteilungsfunktion des Materials. Zur Veranschaulichung ist das Porenvolumen im Bild rechts ohne Feststoffmatrix schematisch in Porenbereiche unterteilt dargestellt. Der betrachtete Ausschnitt des trockenen porösen Materials besitzt in seriellen und parallelen Bereichen gemeinsam den resultierenden Dampfdiffusionskoeffizienten. Für einen bestimmten Wassergehalt ergibt sich in den parallelen Porenbereich nach dem im vorangegangen Abschnitt erläuterten Porenmodell die Flüssigwasserleitfähigkeit. Die Abhängigkeit des Dampfdiffusionskoeffizienten vom Feuchtegehalt erschließt sich über die anschließende Skizze.

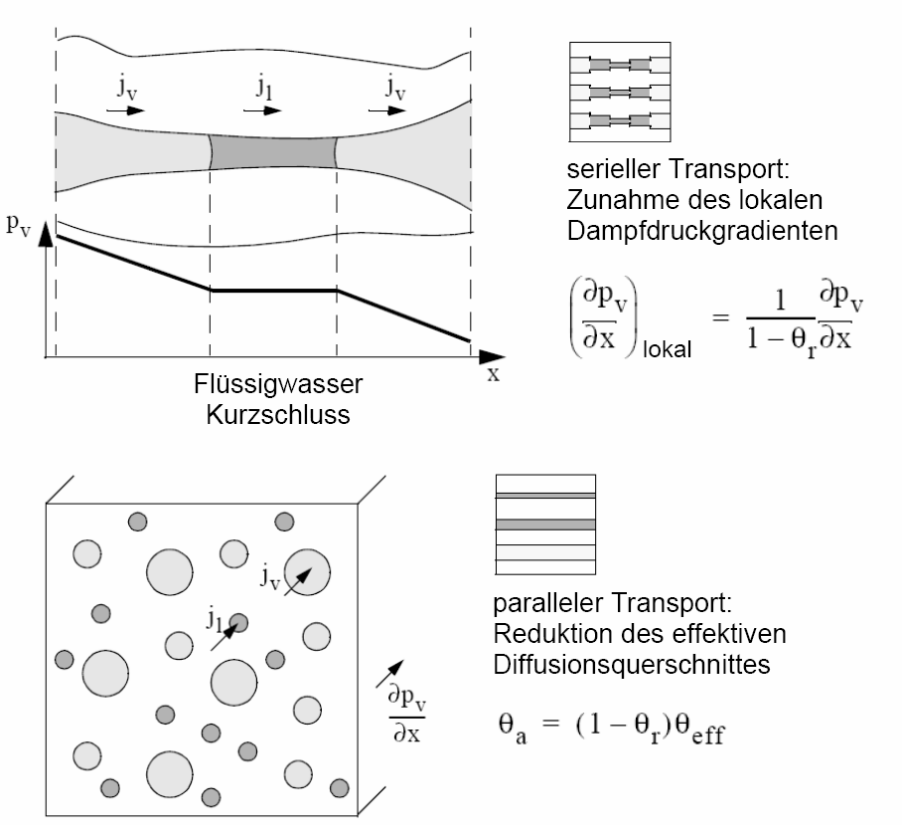


Bild 15: Mechanismen des Seriell- und Parallelflusses: (oben) Wasserdampfdiffusion mit dem Beiträgen der Kondensation, Flüssigwasserfluss und Evaporation an der anderen Seite der lokalen Wasserphase; (unten) Dampfdiffusion mit und ohne Beteiligung der flüssigen Phase jedoch mit Reduktion des effektiven Diffusionsquerschnittes in Form von Kapillarwasser.

In den Volumenanteilen mit seriellem Transport diffundieren Dampfmoleküle durch den luftgefüllten Porenraum auf beiden Seiten einer Flüssigkeitsinsel vom höheren zum geringeren Dampfdruck. Kapillare Kondensation findet dabei an dem der höheren Dampfdruckseite zugewandten Kapillarmeniskus statt, am gegenüberliegenden Kapillarmeniskus verdunsten zum gleichen Zeitpunkt äquivalente Anteile von Wassermolekülen. Zwischen den beiden Kapillarmenisken wird das Wasser in der Flüssigphase transportiert. Setzt man sofortigen Druckausgleich in der Flüssigkeitsinsel voraus, wirkt diese als „Kurzschluss“ in Bezug auf die Dampfdiffusion, d.h., der Dampfdruck über beiden Kapillarmenisken ist gleich groß. Dadurch wird der lokale Dampfdruckgradient (im luftgefüllten Porenraum auf beiden Seiten einer Flüssigkeitsinsel) größer, was zu einer Erhöhung der Dampfdiffusionsstromdichte führt. Unter seriellen Fließbedingungen sind Flüssigwasser- und Dampfdiffusionsstromdichte gleich groß und können wie folgt beschrieben werden.

In den wassergefüllten Poren der seriellen Bereiche ist der Dampfwiderstand sehr viel kleiner als in den luftgefüllten Poren. Der Dampfdruckgradient wird deshalb dort als Null angenommen. Für den seriellen Bereich wird eine

mittlere Dampfdruckänderung angesetzt. Der Dampfstrom für die in Serie stehenden Bereiche kann in Abhängigkeit des Dampfdruckgradienten angeschrieben werden.

$$g = D_v \cdot \frac{1}{1-\theta_r}\frac{1}{(1-p)} \cdot \frac{dp_{vs}}{dx}$$ *serieller Dampffluss*

Diesem wird der Feuchtefluß im parallel geschalteten Bereich gegenübergestellt.

$$g = D_v \cdot (1-\theta_r) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{vp}}{dx} + K_l(\theta_l) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{cp}}{dx}$$ *paralleler Dampf und Flüssigwasserfluss*

p [-] Anteil paralleler Bereiche am Gesamtsystem

p_{vs}, p_{vp} [Pa] Dampfdruck im seriellen und parallelen Bereich

p_{cp} [Pa] Kapillardruck im parallelen Bereich

θ_r [-] relativer Wassergehalt mit $\theta_r = \frac{\theta_l}{\theta_{max}}$

Der Gesamtfeuchtestrom setzt sich nach dem Gleichsetzen der beiden Gleichungen aus dem seriellen und parallelen Anteil zusammen. Die Differenz des Dampfdruckes im parallelen Bereich lässt sich dabei als Differenz zwischen Gesamtstrom und seriellem Bereich $dp_{vp} = dp_v - dp_{vs}$ beschreiben.

$$D_v(1-p)\frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{vp}}{dx} = D_v \cdot (1-\theta_r) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_v}{dx} - D_v \cdot (1-\theta_r) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{vs}}{dx}$$

mit

$$\frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{cp}}{dx} \rightarrow \frac{dp_c}{dx}$$

Durch Umstellung nach dem Unbekannten seriellen Dampffluss ergibt sich

$$D_v \cdot dp_{vs} = \left(D_v \cdot \frac{1-\theta_r}{p} \cdot dp_v + K_l(\theta_l) \cdot dp_c\right) \cdot \frac{1}{\left[\frac{1}{(1-\theta_r)\cdot(1-p)} + \frac{1-\theta_r}{p}\right]}$$

Die in eckigen Klammern stehenden Ausdrücke repräsentieren die Skalierfunktionen des Flüssigwasser- und Dampftransportes in Abhängigkeit vom relativen Wassergehalt und vom Anteil parallel strukturierter Bereiche am Gesamtsystem. Sie lassen sich herausnehmen und vereinfachen. Mit ihnen werden die Koeffizienten für flüssigen und gasförmigen Feuchtetransport multipliziert.

$$f_v = \frac{1-\theta_r}{[p+(1-\theta_r)^2 \cdot (1-p)]}$$

Skalierungsfaktor Dampftransport

$$f_l = \frac{1}{\left[1+\frac{(1-\theta_r)^2 \cdot (1-p)}{p}\right]}$$

Skalierungsfaktor Flüssigwassertransport

Der Anteil parallel strukturierter Bereiche, p, ist nicht konstant, sondern in Abhängigkeit zum Wassergehaltes definiert. Befindet sich nur wenig Wasser im Porensystem, gibt es auch nur wenige Verbindungen zwischen einzelnen Flüssigkeitsbereichen. Ein Paralleltransport ist kaum möglich. Nimmt jedoch der Wassergehalt zu, füllen sich die Poren und es entstehen zunehmend mehr Bereiche, in denen paralleler Feuchtetransport möglich ist. Zur Beschreibung der Feuchteabhängigkeit des Parameters p wird mit h ein Anpassungsparameter eingeführt, der mit dem relativen Wassergehalt verknüpft ist. Der Parameter h ist materialabhängig und wird durch inverse Modellierung mit Hilfe der numerischen Simulation aus dem Trocknungsversuch bestimmt.

$$p(\theta_r, h) = (\theta_r)^h$$

h [-] materialabhängiger Anpassungsparameter

Kalibrierung des Materialmodells und der Materialfunktionen

Aus den oben beschriebenen physikalischen Modellansätzen ergeben sich feuchteabhängige Transportfunktionen. Die Dampfdiffusivität folgt aus der Dampfdiffusion durch Luft, abgemindert mit dem Dampfdiffusionswiderstand des trockenen Materials, μ_{dry}, und multipliziert mit dem entsprechenden Anteil aus dem seriell-parallel Modell.

$$D_v(\theta_r, T) = \frac{D(T)}{\mu_{dry}} \cdot \frac{1-\theta_r}{[\theta_r^{\,h}+(1-\theta_r)^2 \cdot (1-\theta_r^{\,h})]}$$

Aus der Multiplikation der relativen Flüssigwasserleitfähigkeit, $K_r(\theta_l)$, aus dem Porenmodell mit der gemessenen Leitfähigkeit bei Sättigung, K_s, und der Verknüpfung nach dem seriell-parallel Modell folgt die Flüssigwasserleitfähigkeit.

$$K_l(\theta_l) = K_r(\theta_l) \cdot K_s \cdot K_{l\text{-corr}} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{(1-\theta_r)^2 \cdot (1-\theta_r^{\,h})}{\theta_r^{\,h}}\right]}$$

Die Leitfunktionen enthalten die beiden Parameter, h und $K_{l\text{-corr}}$, die jeweils an verschiedenen Experimenten anzupassen sind. Der Parameter $K_{l\text{-corr}}$ dient der Korrektur der Flüssigwasserleitfähigkeit im hochfeuchten Bereich. Der den Aufsaugversuch maßgeblich bestimmende Feuchtebereich ist der Bereich nahe der kapillaren Sättigung, θ_{cap}, die unmittelbar aus dem Wasseraufnahmeexperiment abgeleitet wird. Mit Hilfe des Parameters h wird der niederfeuchte Bereich unabhängig angepasst. Dies geschieht anhand des Trocknungsversuches.

In beiden Fällen der Kalibrierung werden die Parameter variiert und die Experimente nachsimuliert bis eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erzielt wird. Nachfolgend ist beispielhaft die Kalibrierung des Materialmodells für einen Vollziegel dargestellt.

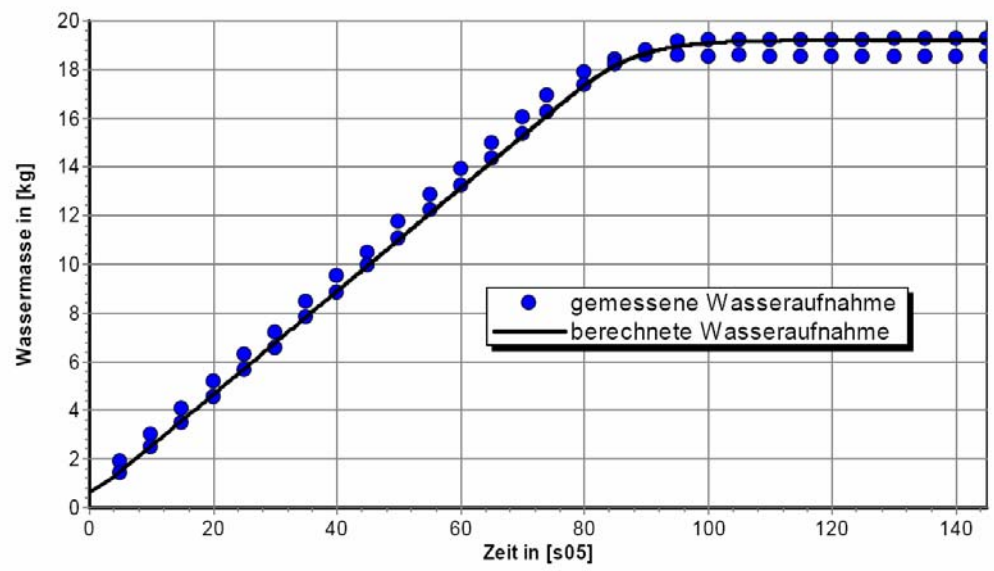


Bild 16: Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem Aufsaugverhalten für einen Vollziegel.

Der Übergangsbereich zwischen dem überhygroskopischen und hygroskopischen Feuchtebereich wird durch die Simulation des Trocknungsverhaltens kalibriert. In Kenntnis der Umgebungsbedingungen und der Möglichkeit der radialsymmetrisch-dreidimensionalen Simulation mit Delphin 4 kann neben den Anfangs- und Übergangsbedingungen auch der Temperatureinfluss auf das Trocknungsverhalten berücksichtigt werden (Bild 17).

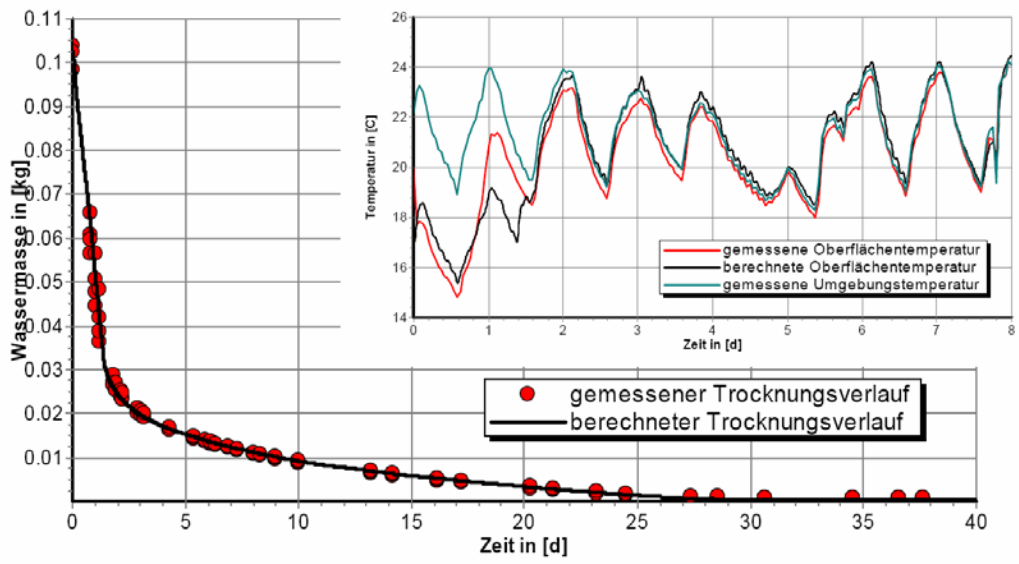


Bild 17: Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem Trocknungsverhalten für den gewählten Ziegel einschließlich der Oberflächentemperaturen.

Beispiel gemessener Materialfunktionen

Stellvertretend für die zahlreichen abgeleiteten Materialfunktionen für die Baustoffe werden in den nachfolgenden Bilder die Funktionen der hygrischen Sorptionsisotherme, der Wasserretentionscharakteristik, der Porenvolumenverteilung, der Wasserdampfdiffusion, der kapillaren Flüssigwasserleitfähigkeit und der Diffusivität dargestellt.

Der historische Sandstein wurde dem Grabmahl „Humayun tomb“ aus Neu Delhi in Indien entnommen und war seit seiner Verbauung einer Verwitterung von über 700 Jahren ausgesetzt. Vergleichend dazu wird ein frisch gebrochener Sandstein präsentiert, der dem gleichen Steinbruch entstammt, aus dem auch der historische Sandstein vor jahrhunderten entnommen wurde.

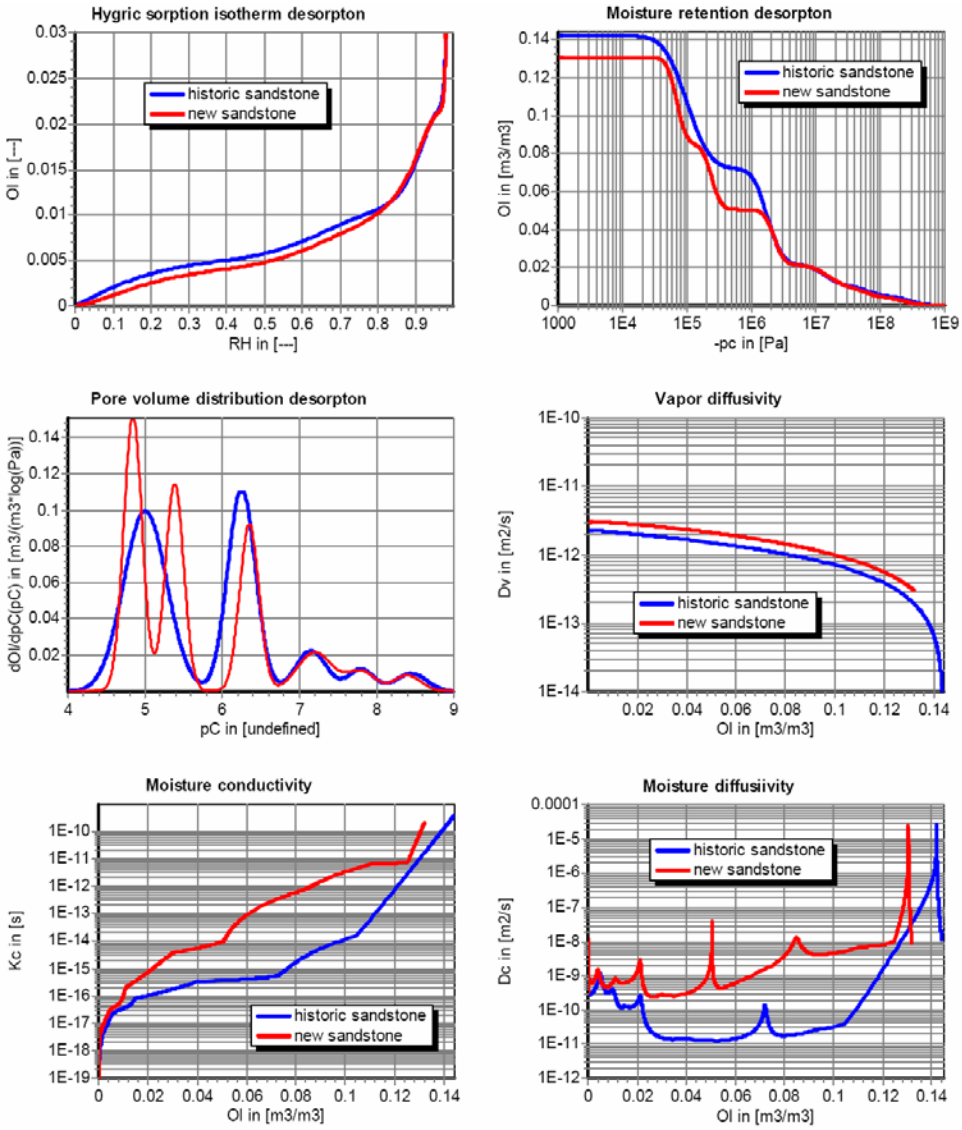


Bild 18: Vergleich der hygrischen Materialfunktionen eines historischen und eines neuen Sandsteins gleicher Provinienz, Humayun tomb aus Neu Delhi und der korrespondierenden Lagerstätte in Indien.

Der Vergleich zwischen dem historischen und dem frisch entnommenen Sandstein zeigt die Unterschiede zwischen den beiden Materialien auf. Abweichungen bestehen in der hygrischen Sorptionsisotherme, wie auch in der Wasserretention. Deren Interpretation visualisiert sich in der Porenvolumenverteilung, wobei der historische Sandstein ein 5-modales System und der neue Sandstein ein 6-modales Porensystem aufweist. Die Porengrößensequenzen identifizieren ferner eine geringe Verschiebung der Porendurchmesser. In der Konsequenz zeigt der Feuchtetransport des neuen Sandsteins eine Zunahme in der Wasserleitfähigkeit, bzw. der Diffusivität, wie auch in der Dampfdiffusion.

Diese Einschätzung belegt auch die kontinuierliche Wasseraufnahme und Verdunstung. Infolge der höheren Porosität und des Einflusses großer Poren saugt der historische Sandstein mehr und schneller das Wasser auf, wenn

Kontakt zu freiem Wasser besteht, z.B. bei Niederschlägen. Aufgrund des höheren Anteils kleiner Poren, Strukturierung und Aggregierung verbunden mit Kapillarsperreneffekten verbleibt jedoch die Feuchtigkeit länger im Sandstein. Die Trocknungsdauer des historischen Sandsteins beträgt 180 Tage, die des neuen Sandsteins lediglich 100 Tage.

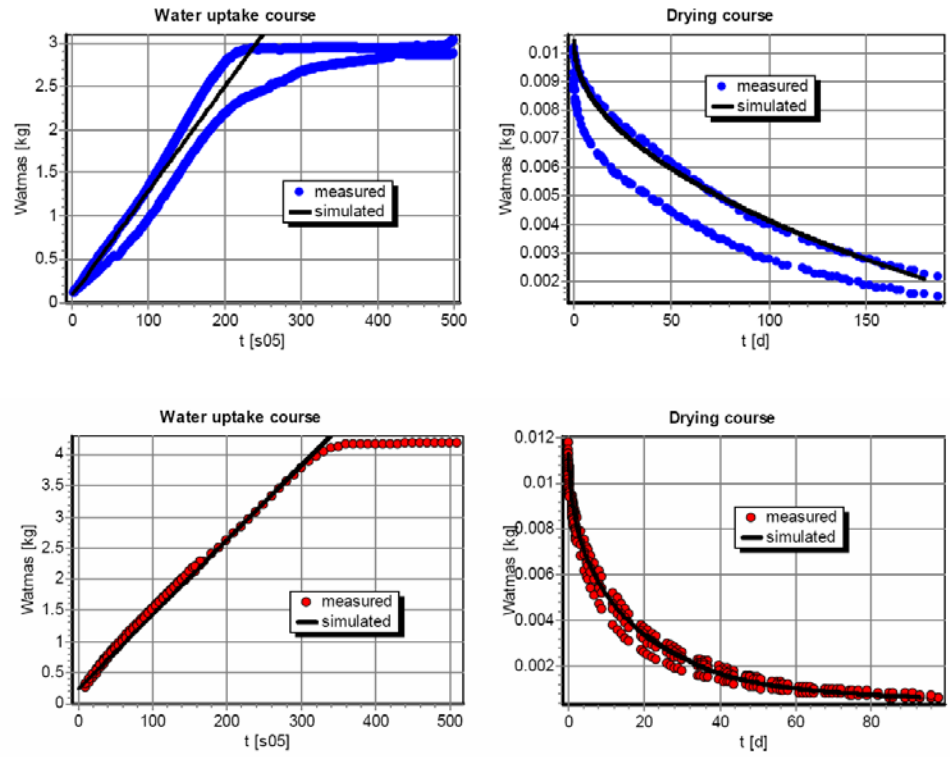


Bild 19: Vergleichsrechnungen mit den in Bild 18 dargestellten Materialfunktionen des historischen und des neuen Sandsteins gleicher Provinienz, Humayun tomb aus Neu Delhi und der korrespondierenden Lagerstätte in Indien.

4.4 Approximationsverfahren

Für instationäre Berechnungen des Feuchtehaushaltes von Bauteilen sind für neue Rechenverfahren z.T. zusätzliche Kennwerte notwendig, um damit eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung erhalten zu können. Besonderen Einfluss auf den Feuchtehaushalt hat der Flüssigtransport. Durch ihn können pro Zeiteinheit um Zehnerpotenzen größere Wassermengen im Materialinneren transportiert werden als durch Diffusion. Eine korrekte Bestimmung der Transportkoeffizienten für den Flüssigtransport ist daher von entscheidender Bedeutung. Wie in [88] dargelegt, ist dabei zwischen Befeuchtung und Trocknung zu unterscheiden, d.h. es ergeben sich für diese beiden Randbedingungen unterschiedliche Flüssigtransportkoeffizienten. Die Bestimmung dieser stark wassergehaltsabhängigen Transportkoeffizienten wird durch die Messung von Wassergehaltsprofilen im Baustoff ermöglicht, wozu Anlagen eingesetzt werden, die auf der kernmagnetischen Resonanz oder der γ-Durchstrahlung beruhen [26]. Sofern ein Transport zwischen in Kontakt miteinander stehenden kapillaraktiven Materialien auftritt,

ist die Kenntnis einer korrekten Feuchtespeicherfunktion unabdingbar. Diese ergibt sich nach [88] im hygroskopischen Feuchtebereich aus der Sorptionsisotherme und im höheren Feuchtebereich aus Saugspannungsmessungen, die aufwendig und sehr zeitintensiv sind.

Oft sind solche genauen, aber zeit- und kostenintensiven Bestimmungen nicht unbedingt notwendig oder für manche Materialien wegen deren Struktur auch gar nicht möglich (z.B. bei Lochziegeln). Aus diesem Grund sind Verfahren entwickelt worden, die es gestatten, aus den für die meisten Baustoffe bereits bekannten feuchtetechnischen Grundkennwerten oder einfachen zusätzlichen Messungen eine gute Näherung für die Flüssigtransportkoeffizienten des Befeuchtungs- und Trocknungsvorganges sowie die Feuchtespeicherfunktion zu erhalten. Diese sind auch Grundlage für die in der Masea-Datenbank abgelegten approximierten Materialkennwerte.

4.4.1 Approximation der Flüssigtransportkoeffizienten

Für den Kapillartransport hat Krischer [87] folgenden Diffusionsansatz eingeführt:

$$g_W = -D_W(u)\frac{du}{dx}$$

gw [kg/m²s] Flüssigtransportstromdichte

Dw(u) [m² /s] Flüssigtransportkoeffizient

u [kg/m³] Wassergehalt

Bei der theoretischen Herleitung geht Krischer von einem Kapillarbündelmodell aus, das aus parallel angeordneten, widerstandslos miteinander verbundenen Zylinderkapillaren unterschiedlicher Durchmesser besteht. In allen gefüllten Kapillaren eines bestimmten Querschnitts soll Druckausgleich herrschen. Der vorliegende Unterdruck in der Flüssigkeit wird dabei durch den kapillaren Zug des ausgelasteten Meniskus der größten noch gefüllten Kapillare in diesem Querschnitt bestimmt. Dieser Zusammenhang zwischen dem in einem Querschnitt vorliegenden kapillaren Zug und dem Wassergehalt führt zu einem stark wassergehaltsabhängigen Kapillartransportkoeffizienten D_w. Wird die Wasserzufuhr unterbunden, findet ein Weitertransport der Flüssigkeit statt, obwohl sich an der nicht mehr mit Wasser versorgten Oberfläche Gegenmenisken ausbilden (siehe Bild 20 rechts). Diese Weiterverteilung der Flüssigkeit beruht darauf, dass die noch nicht gefüllten kleineren Poren aufgrund ihrer höheren Saugkraft über die vorhandenen Querverbindungen die größeren gefüllten Poren leer saugen. Es ist zu erwarten, dass dieses Weiterverteilen der Flüssigkeit, das auch beim Trocknungsvorgang auftritt, deutlich langsamer abläuft als der Transport beim Saugvorgang.

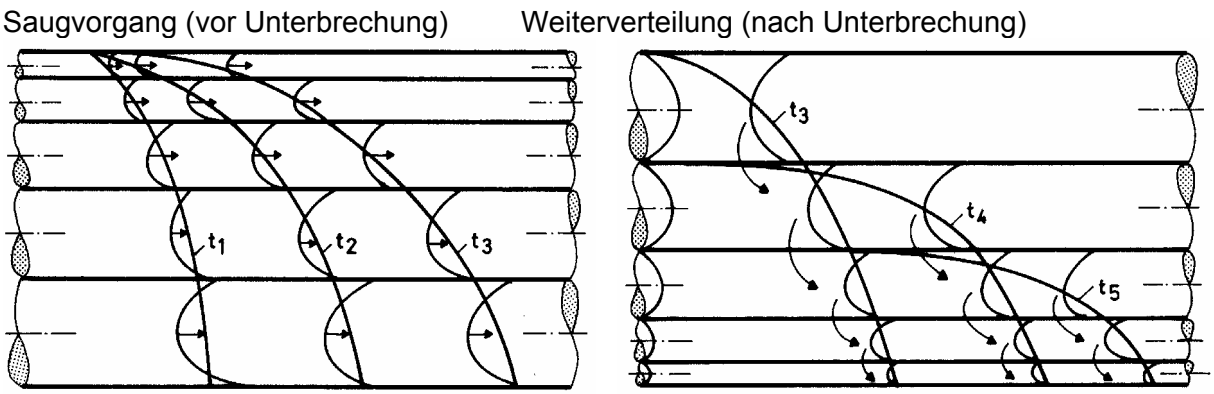


Bild 20: Kapillartransporterscheinungen dargestellt am Modell miteinander verbundener Zylinderkapillaren unterschiedlichen Durchmessers.

Transport im hygroskopischen Feuchtebereich

Im hygroskopischen Feuchtebereich wird der Wassergehalt eines Baustoffes durch die Sorptionsisotherme beschrieben. Im Bereich unterhalb etwa 50 % rel. Luftfeuchte ist die Bindung des Wassers so stark, dass ein merklicher Flüssigtransport ausgeschlossen werden kann. Oberhalb von 50 % tritt im Mikroporenbereich Kapillarkondensation auf. Der bei Messung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes poröser Baustoffe nach DIN EN ISO 12572 [43] für den Feuchtbereich ermittelte, im Vergleich zum Trockenbereich stets kleinere Diffusionswiderstand ist auf einen der Diffusion überlagerten Flüssigtransport in diesem Feuchtebereich zurückzuführen [89]. Aus der Differenz der dabei im höheren Luftfeuchtebereich zu den im Trockenbereich gemessenen Massenströmen lassen sich bei Kenntnis der Sorptionsisotherme für den hygroskopischen Feuchtebereich die Kapillartransportkoeffizienten berechnen [88]. Aus den auf diese Weise ermittelten Flüssigtransportkoeffizienten ergeben sich für alle aufgeführten Materialien fast die gleichen Transportkoeffizienten von etwa $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s. Dies ist nicht überraschend, wenn man bedenkt, dass unter diesen Bedingungen in allen Proben die Poren bis zum gleichen maximalen Porenradius mit Wasser gefüllt sind. Damit sollte sich auch ein vergleichbarer Kapillartransportkoeffizient ergeben. Es erscheint somit gerechtfertigt, für eine Approximation den Kapillartransportkoeffizienten im hygroskopischen Feuchtebereich auf $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s festzulegen. Da für die meisten Baustoffe nur der Wassergehalt bei 80 % r.F. (Bezugsfeuchtegehalt) bekannt ist, ist es sinnvoll, diesen Transportkoeffizienten u_{80} zuzuordnen. Somit ergibt sich für die Approximation des Kapillartransportkoeffizienten eine Funktion, die bei u_{80} mit einem Wert von $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s anfängt. Da im hygroskopischen Feuchtebereich, in dem der Flüssigtransport im Sorbatfilm abläuft, eine Unterscheidung zwischen Saugen und Weiterverteilen physikalisch nicht sinnvoll erscheint, gilt dieser Wert für beide Transportvorgänge.

Exponentielle Approximation

Für die meisten Baustoffe lassen sich die Kapillartransportkoeffizienten recht gut mit einer Exponentialfunktion approximieren [88], [82]:

$$D_w(u) = D_{wo} \exp\left(\frac{u}{u_f} \ln \frac{D_{wf}}{D_{wo}}\right) \qquad (2)$$

D_{wf} [m²/s] Kapillartransportkoeffizient bei freier Wassersättigung

D_{wo} [m²/s] Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsfeuchtebereich

Für den Saugvorgang lässt sich zwischen D_{wf} und dem w-Wert der folgende Zusammenhang herleiten [92]:

$$D_{wf} = \frac{K \pi w^2 \ln(D_{wf} / D_{wo})}{4 u_f (u_f - u_{80})} + D_{wo} \qquad (3)$$

u_f [kg/m³] freie Wassersättigung)

u_{80} [kg/m³] Sorptionswassergehalt bei 80 % r.F. (Bezugsfeuchtegehalt)

D_{wo} [m²/s] Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsfeuchtebereich,

stoffunabhängig auf $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s festgesetzt

K [-] Korrekturfaktor

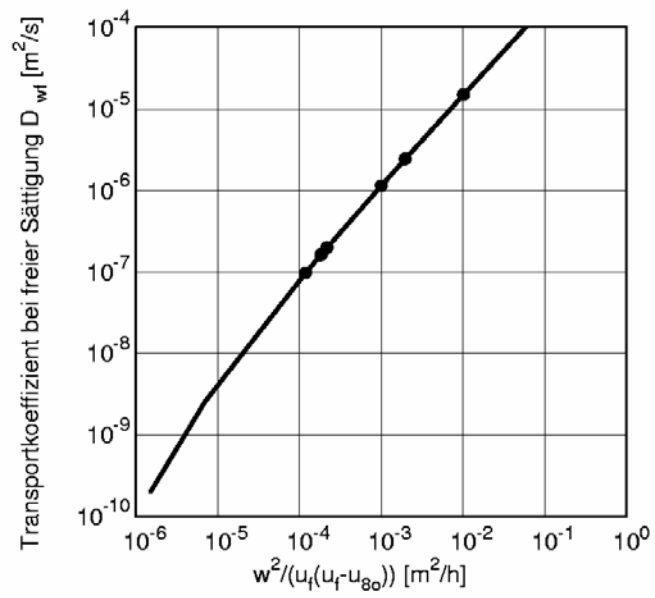


Bild 21: Darstellung von Gl. (3) zur graphischen Bestimmung von D_w. Die Werte für die aufgeführten Materialien sind als Punkte mit eingezeichnet.

Gl. (3) ist in Bild 21 dargestellt, so dass bei Kenntnis des w-Werts, der freien Wassersättigung und des Bezugsfeuchtegehaltes auch D_{wf} auf einfache Weise graphisch bestimmt werden kann.

Trocknungsvorgang

Analog zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme sollten sich aus der Beobachtung des Trocknungsverhaltens eines anfangs wassergesättigten Versuchskörpers Informationen über die Kapillartransportkoeffizienten für den Weiterverteilungs- bzw. Trocknungsvorgang gewinnen lassen. Bei der Trocknung eines wassergesättigten porösen Baustoffes stellen sich nach Krischer [86] unterschiedliche Trocknungsphasen ein. Solange der Kapillartransport groß genug ist, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Inneren der Probe nachzufördern, muss die Verdunstung bei konstanten äußeren Klimarandbedingungen an der Oberfläche nahezu konstant bleiben. In diesem ersten Abschnitt der Trocknung ist die Trocknungsgeschwindigkeit nur abhängig von den äußeren Bedingungen; die Eigenschaften des Baustoffes haben keinen Einfluss. Da der Kapillartransport im Baustoff mit sinkendem Wassergehalt stark zurückgeht, wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die an die Oberfläche transportierte Flüssigkeitsmenge nicht mehr ausreichen, um die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Dies führt dazu, dass man in diesem Trocknungsabschnitt eine stetig sinkende Trocknungsgeschwindigkeit beobachtet. Der Trocknungsverlauf ist hier, außer von den Klimarandbedingungen, auch von der Diffusionswiderstandszahl und den Flüssigtransportkoeffizienten abhängig.

Für die rechnerische Ermittlung von D_{wf} wird das bereits vielfach verifizierte Wärme- und Feuchteberechnungsprogramm WUFI® [94] eingesetzt, wobei

stattdessen natürlich jedes andere vergleichbare Berechnungsprogramm, das mit feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten rechnet, verwendbar ist. Bei der Ermittlung der Transportkoeffizienten für den Weiterverteilungsprozess werden die gemessenen und gerechneten Massenverläufe miteinander verglichen. Für die Bestimmung von D_{ww} sind zwei Schritte durchzuführen. Zuerst muss der an der Verdunstungsoberfläche vorherrschende Wärmeübergangskoeffizient bestimmt werden. Dazu wird dieser, ausgehend von dem in WUFI vorgeschlagenen Wert von 8 W (m²K) erhöht - in einem Klimaraum werden stets Lüfter eingesetzt -, bis für den ersten Trocknungsabschnitt die berechneten Gewichtsverläufe mit den Messungen übereinstimmen. Als zweiter Schritt wird der Kapillartransportkoeffizient D_{ww} bei freier Sättigung solange angepasst, bis sich auch für die weitere Trocknung eine minimale Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Verlauf ergibt. Mit etwas Übung erreicht man bereits nach zwei bis vier Rechenläufen (je ca. 2 min Rechenzeit) eine recht gute Übereinstimmung.

4.4.2 Feuchtespeicherfunktion

Neben den Flüssigtransportkoeffizienten für das kapillare Saugen bzw. die Trocknung ist die Feuchtespeicherfunktion wesentlich zur Berechnung der kapillaren Transportvorgänge. Eine korrekte Kenntnis dieser Funktion ist vor allem dann unabdingbar, wenn ein Feuchtetransport zwischen in Kontakt miteinander stehenden kapillaraktiven Materialien auftritt [84]. Sie ergibt sich nach [88] im hygroskopischen Feuchtebereich aus der Sorptionsisotherme und im höheren Feuchtebereich aus der Saugspannungsmessung.

Deswegen sind Approximationsmethoden zur Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion auf Basis einfach zu ermittelnder Kennwerte in der Literatur häufig zu finden [69], [78], [85] und [120]. Einige dieser Ansätze sind rein empirischer Natur, andere werden direkt aus der BET-Theorie [88] abgeleitet. Bei vielen Ansätzen wird bei 100 % r.F. der physikalisch nicht sinnvolle Wert einer unendlich hohen freien Sättigung erreicht. Die besten Ergebnisse wurden mit der in [94] angegebenen Näherung erzielt, bei der sich die gesamte Feuchtespeicherfunktion aus dem Ausgleichsfeuchtegehalt bei 80 % relativer Feuchte und der freien Sättigung ergibt. Ein Vergleich zwischen der gemessenen und der von [94] vorgeschlagenen Feuchtespeicherfunktion zeigt aber für einige Materialien (Holzwerkstoffe, Kalkzementputz, Beton in Bild 22 bis Bild 24) unterhalb dem 80 % Luftfeuchte entsprechenden Kapillardruck von $3 \cdot 10^7$ Pa (300 bar) deutlich zu niedrige und oberhalb deutlich zu hohe approximierte Wassergehalte.

Entwicklung eines neuen Approximationsverfahrens

Trägt man die komplette Feuchtespeicherfunktion nicht mehr als Funktion der relativen Feuchte, sondern als Funktion des Kapillardrucks auf, so ergibt sich für nahezu alle Materialien ein typischer s-förmiger Verlauf, der vor allem durch den Gradienten im Bereich der Feuchtespeicherfunktion zwischen 80 % (entspricht 300 bar) und 95 % r. F. (entspricht 60 bar) bestimmt wird. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird deshalb hier die Verwendung der folgenden empirischen Funktion mit den beiden freien Parametern p_{k1} und p_{k2} vorgeschlagen (mit p_c als Kapillardruck in Pa):

$$u(p_c) = \frac{u_f}{1+\left(\frac{p_c}{p_{k1}}\right)^{p_{k2}}} = \frac{u_f}{1+\left(\frac{\rho_w \cdot R_D \cdot T \cdot \ln(\varphi)}{p_{k1}}\right)^{p_{k2}}}$$

P_{k1}, p_{k2} [-]	freie Parameter
R_D [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
T [K]	Absolute Temperatur
u_f [kg/m^3]	Freie kapillare Wassersättigung
ρ_w [kg/m^3]	Dichte von Wasser
φ [-]	Relative Luftfeuchte

Sie lassen sich durch Einsetzen der beiden gemessenen Sorptionsfeuchten bei 80 % und 95 % relative Luftfeuchte (oder einen anderen möglichst hohen Wert) errechnen. Diese Werte sind ohne großen messtechnischen Aufwand leicht bestimmbar. Die Umrechnung der relativen Feuchte in den Kapillardruck erfolgt mit Hilfe der Kelvin-Formel. Für verschiedene Mauersteine, Putze und Holzwerkstoffe sind die Ergebnisse der beiden Approximationsmethoden im Vergleich zu den jeweils gemessenen Feuchtespeicherfunktionen in Bild 22 bis Bild 24 dargestellt. Die gemessenen Werte stammen dabei entweder aus eigenen Untersuchungen oder aus der WUFI-Materialdatenbank [96]. Bei den Messwerten wird zusätzlich der abgeschätzte Unsicherheitsbereich, bedingt durch Materialschwankungen und die Messmethode, mit angegeben. Es zeigt sich, dass für die hier aufgeführten Beispiele eine deutlich bessere Übereinstimmung der neu vorgeschlagenen Approximation mit den gemessenen Werten erzielt wird und deshalb die vorgeschlagene Funktion in guter Näherung verwendet werden kann. Ein Softwaretool zur Generierung dieser approximierten Feuchtespeicherfunktion wird in Kürze zur Verfügung gestellt.

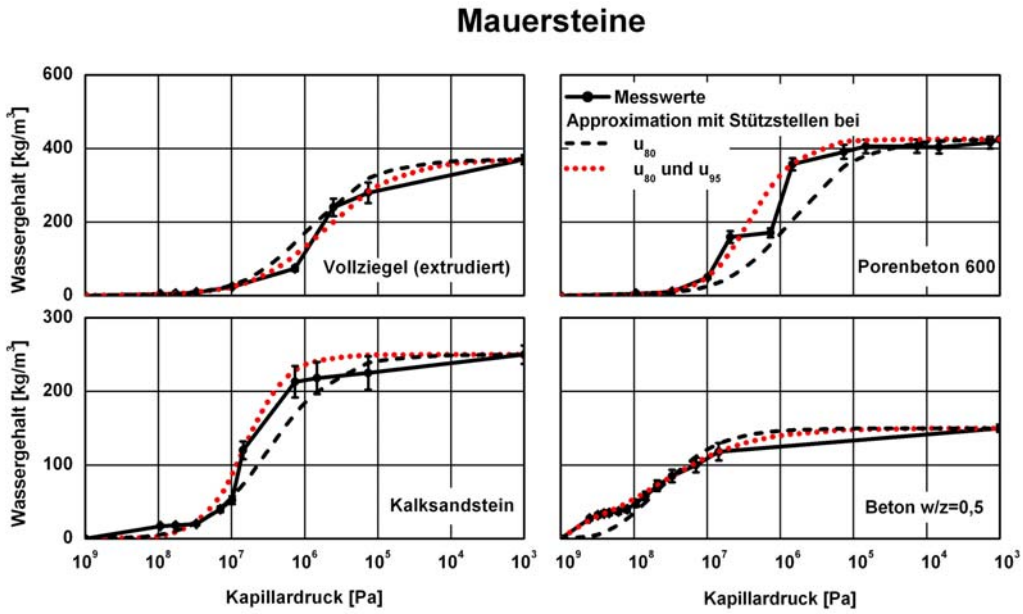


Bild 22: Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für vier Mauerwerksbildner, dargestellt als Funktion des Kapillardrucks. Die Messwerte stammen von [88], [96].

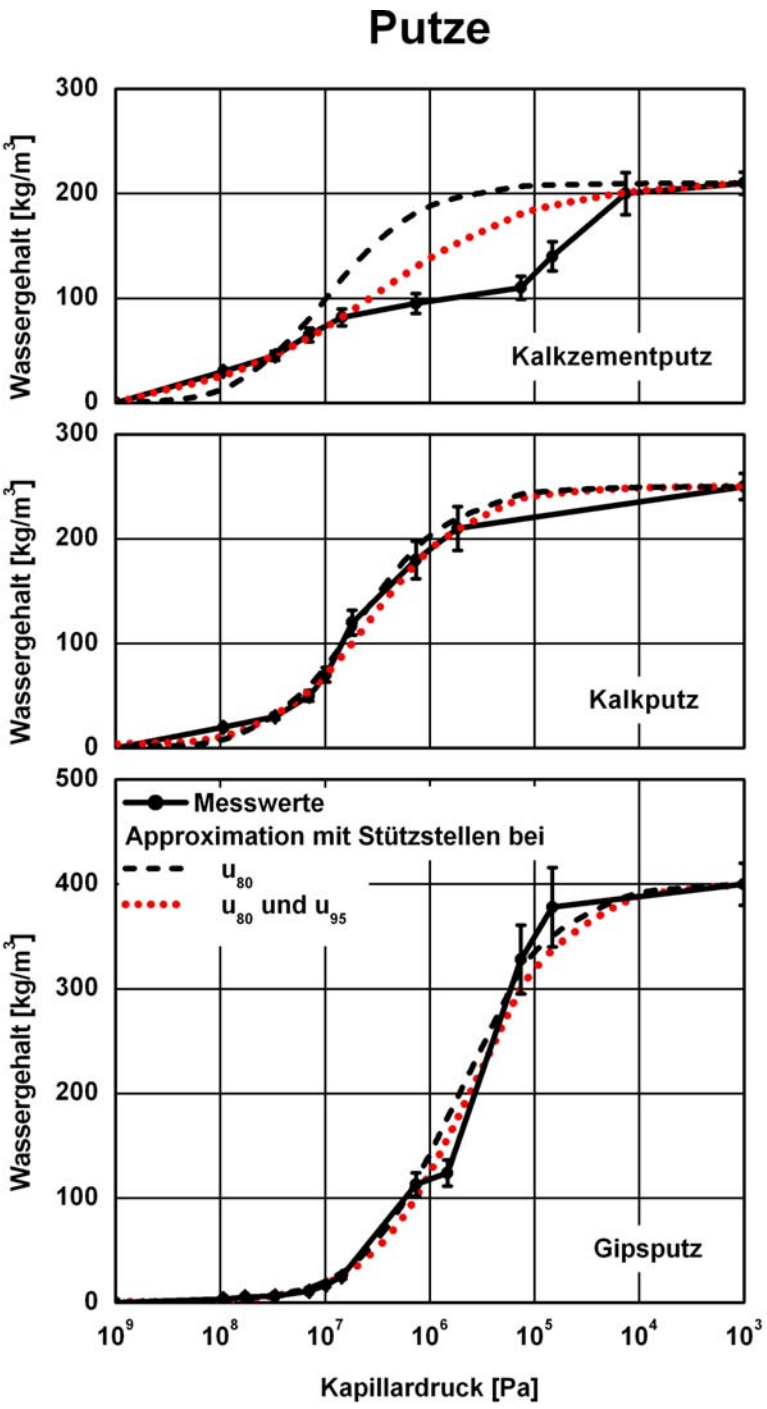


Bild 23: Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für drei Putze. Die Messwerte stammen von [88], [96].

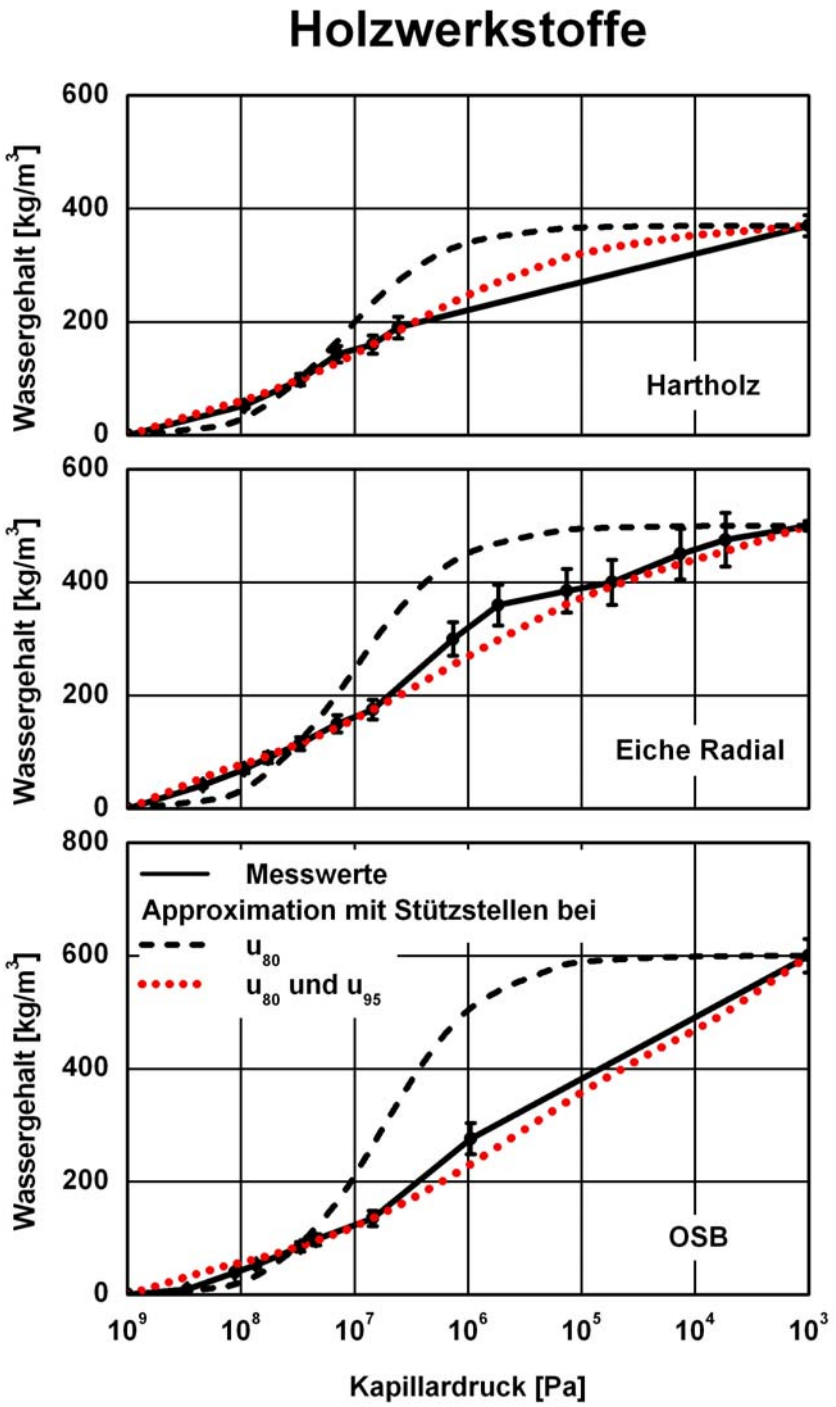


Bild 24: Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für drei Holzwerkstoffe. Die Messwerte stammen von [88],[96].

4.5 Anforderung an die Materialkennwerte

Das Ergebnis jeder Simulation kann nur so gut sein, wie die Ausgangsdaten, in diesem Fall also die hygrothermischen Materialkennwerte der verwende-

ten Baustoffe. Je exakter die Materialdaten bekannt sind, umso genauer lassen sich die Feuchteverteilungen im Bauwerk berechnen und darstellen. Die in der Literatur veröffentlichten Kennwerte variieren oft sehr stark, was häufig mit der Bandbreite, der am Markt befindlichen Baustoffe in Verbindung gebracht werden kann. Allerdings finden sich auch oft Werte, die außerhalb der üblichen Materialtoleranzen liegen und deshalb kritisch hinterfragt werden müssen.

Für die vorliegende Materialdatensammlung werden deshalb nur Werte übernommen, die entweder von den Projektpartnern in den eigenen Labors bestimmt wurden oder, sofern es sich um Literaturwerte handelt, einer eingehenden Prüfung unterzogen werden. Kenntlich gemacht wird der Unterschied dadurch, dass für Literaturwerte eine Quellenangabe in der letzten Spalte unter „Referenz“ eingefügt ist und für gemessene Werte nicht. Existieren Materialproben, werden diese messtechnisch untersucht. Es ist von der Größe und dem Umfang der Proben abhängig, welche Kennwerte bestimmt werden können. Daraus ergibt sich, dass nicht für alle messtechnisch erfassten Materialien auch alle hygrothermischen Kennwerte vorliegen.

Ähnliches gilt im besonderen Maße für die Kennwerte aus Literaturangaben. In den seltensten Fällen existiert ein vollständiger Satz an hygrothermischen Kennwerten für Materialien, die aus Literaturquellen stammen. Vor allem die hygrischen Kennwerte haben offensichtlich in der Vergangenheit eine untergeordnete Rolle gespielt. Lediglich die Diffusionswiderstandszahl bzw. der s_d-Wert finden sich etwas häufiger als hygrische Kennwerte in der Literatur. Da für energetische Simulationen mit EPASS HELENA die thermischen Kennwerte genügen, werden auch Materialien aufgenommen, für die lediglich diese Kennwerte vorliegen.

4.6 Weitere Kennwerte - Strahlungskennwerte

Für alle außenliegenden Bauteile, z. B. Dacheindeckungen, Außenbeschichtungen etc. ist das Vorhandensein der Strahlungskennwerte für eine rechnerische Simulation erforderlich. Strahlungskennwerte werden deshalb bei den entsprechenden Materialien in der Datensammlung unter „Hinweise und besondere Merkmale“ angegeben. Die Messverfahren werden im Folgenden kurz beschrieben.

Kurzwellige Strahlungsabsorption

Der kurzwellige Strahlungsabsorptionsgrad beschreibt den Anteil der von einer Oberfläche absorbierten Sonneneinstrahlung im Wellenlängenbereich 250 – 2500 nm (Ultraviolett, sichtbar, nahes Infrarot). Je höher der Absorptionsgrad, desto stärker erwärmt sich eine Oberfläche. Die Bestimmung erfolgt durch Messung der spektralen Reflexionsgrade (bei opaken Proben; Absorptionsgrad = 1 – Reflexionsgrad) mit einem Gitterspektrometer und Auswertung nach der Norm DIN EN 410 [36].

Langwellige Strahlungsemission

Je niedriger der Emissionsgrad, desto geringer ist sowohl tagsüber als auch nachts der langwellige, thermische Strahlungsaustausch mit der Umgebung. Die Oberfläche bleibt tagsüber wärmer und kühlt auch nachts weniger aus.

Der langwellige Emissionsgrad wird durch Messung der spektralen Reflexionsgrade im Wellenlängenbereich zwischen 2,5 und 50 nm mit einem Fourier-Interferometer bestimmt (Emissionsgrad = 1 – Reflexionsgrad).

5 Verifizierung und Validierung

5.1 Interner Ringversuch

Die in der MASEA-Materialdatenbank erfassten Stoffkennwerte bilden die Grundlage für die rechnerische Beurteilung von Sanierungsempfehlungen. Die Ergebnisse der Berechnungen hängen deshalb unmittelbar von der fehlerfreien Bestimmung der Kennwerte ab. Da in den Labors der Projektpartner die Materialkennwerte teilweise nach unterschiedlichen Verfahren bestimmt werden, ist eine Vergleichsmessung an einzelnen Materialien unabdingbar.

5.1.1 Hygrische Kennwerte

Zu diesem Zweck werden drei verschiede Ziegel, ein Porenbeton und eine Gipskartonplatte ausgewählt und die feuchtetechnischen Kennwerte im Labor bestimmt. Die Ergebnisse aus den Messungen werden in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Messtechnischer Vergleich der feuchtetechnischen Materialkennwerte

Ziegel Jöns

Kennwert		Einheit	Werte	
			IBP	TUD
Rohdichte	ρ	[kg/m³]	1720	1790
Diffusionswiderstandszahl (23-0/50)	μ	[-]	11	13
Sorption	$u_{(80)}$	[kg/m³]	2,2	2,4
Freie Wassersättigung	$u_{(f)}$	[kg/m³]	288	257
Wasseraufnahme-koeffizient (1,5 h)	W_w	[kg/(m²h^{0,5})]	14,8	13,6
Offene Porosität	Φ	[Vol.-%]	37	35

Ziegel Wienerberger

Kennwert		Einheit	Werte	
			IBP	TUD
Rohdichte	ρ	[kg/m³]	1740	1740
Diffusionswiderstandszahl (23-0/50)	μ	[-]	15	18,8
Sorption	$u_{(80)}$	[kg/m³]	2,5	13,1
Freie Wassersättigung	$u_{(f)}$	[kg/m³]	287	262
Wasseraufnahme-koeffizient (1 h)	W_w	[kg/(m²h^{0,5})]	17,5	12,0
Offene Porosität	Φ	[Vol.-%]	33	35

Ziegel Hamstad

Kennwert		Einheit	Werte	
			IBP	TUD
Rohdichte	ρ	[kg/m³]	1890	1950
Diffusionswiderstandszahl (23-0/50)	μ	[-]	14	19,4
Sorption	$u_{(80)}$	[kg/m³]	1,2	1,2
Freie Wassersättigung	$u_{(f)}$	[kg/m³]	180	161
Wasseraufnahme-koeffizient (0,5 h)	W_w	[kg/(m²h^{0,5})]	11,0	8,5
Offene Porosität	Φ	[Vol.-%]	28	26

Porenbeton 400

Kennwert		Einheit	Werte	
			IBP	TUD
Rohdichte	ρ	[kg/m³]	415	390
Diffusionswiderstandszahl (23-0/50)	μ	[-]	7,9	7,4
Sorption	$u_{(80)}$	[kg/m³]	8,4	20,6
Freie Wassersättigung	$u_{(f)}$	[kg/m³]	381	259
Wasseraufnahme-koeffizient	W_w	[kg/(m²h^{0,5})]	3,4	2,6
Offene Porosität	Φ	[Vol.-%]	-	87

Gipskartonplatte

Kennwert		Einheit	Werte	
			IBP	TUD
Rohdichte	ρ	[kg/m³]	717	724
Diffusionswiderstandszahl (23-0/50)	μ	[-]	7,4	6,5
Sorption	$u_{(80)}$	[kg/m³]	9,5	9,3
Freie Wassersättigung	$u_{(f)}$	[kg/m³]	834	728
Wasseraufnahme-koeffizient	W_w	[kg/(m²h^{0,5})]	0,08	-
Offene Porosität	Φ	[Vol.-%]	-	73

Die Vergleichsmessungen zwischen dem IBP und der TUD zeigen eine gute Übereinstimmung. Teilweise bestehende Unterschiede lassen sich durch die

Materialvariabilität und Einsatz unterschiedlicher Messverfahren erklären. Größere Unterschiede bestehen bei manchen Materialien in den Sorptionsmessungen bei 80 % relativer Feuchte. Diese Differenzen sind in der Hysterese der Feuchtespeicherung begründet. Je nach Prozessrichtung, Befeuchtung oder Entwässerung, liegen bei hysteretischen Materialien bei gleichen Luftfeuchten unterschiedliche Feuchtegehalte im Gleichgewicht vor. Am IBP wird routinemäßig die Sorptionsfeuchte mittels Adsorption bestimmt, während die TUD die Desorptionsfunktion der Retentionscharakteristik ermittelt.

Besonders auffällig sind diese Unterschiede beim Wienerberger Ziegel. Zur Veranschaulichung sind die mittels Adsorption und Desorption ermittelten Wassergehalte in Bild 25 dargestellt. Andere Ziegeltypen besitzen eine deutlich geringere Hysteresis.

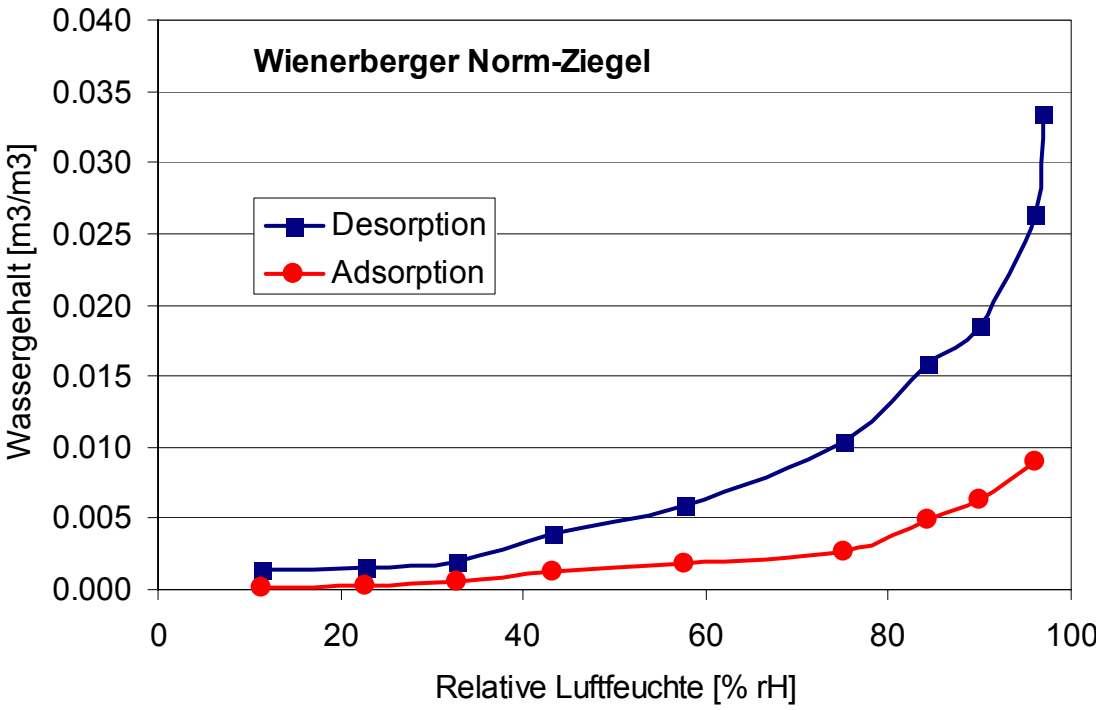


Bild 25: Hysteretisches Verhalten des Wienerberger Vollziegels.

5.1.2 Wärmeleitfähigkeit

In einem internen Ringversuch wurde die Wärmeleitfähigkeit für Proben aus Naturstein in den drei Instituten bestimmt. Bei den Proben handelt es sich um zwei Sandsteinproben, zum einen den „Sander“-Sandstein und zum anderen den „Rüthener“-Sandstein. Die Proben wurden mit unterschiedlichen Apparaturen untersucht. Für den „Rüthener“-Sandstein wurde in den beteiligten Laboratorien mit einer gemessenen Wärmeleitfähigkeit zwischen 2,0 und 2,3 [W(mK)] eine sehr gute Übereinstimmung erzielt. Beim „Sander“-Sandstein lagen die ermittelten λ-Werte zwischen 1,31 und 1,74 [W(mK)]. Die hier vorliegende relativ große Abweichung lag an der Verwendung verschiedener Messverfahren sowie der Probendicke. Insgesamt konnte jedoch eine gute Übereinstimmung erzielt werden.

Tabelle 6: Ergebnisse des internen Ringversuchs zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Natur-Sandsteinen und einem Ziegel

Messlabor	Rüthener Sandstein [W/(m K)]	Sander Sandstein [W/(m K)]
IBP - Holzkirchen	2,3	1,74
IBK - Dresden	2,0	1,31
ZUB-Kassel / IBP - Stuttgart	2,0	1,53

5.2 Vergleichsberechnung mit Daten aus MASEA

Bei der Sanierung von Altbauten sind die derzeit geltenden Bestimmungen zur Energieeinsparung und zum klimabedingten Feuchteschutz in der Regel zu erfüllen. Meist setzen jedoch wirtschaftliche Zwänge oder Forderungen des Denkmalschutzes dem bautechnisch Machbaren enge Grenzen und es gilt, einen tragbaren Kompromiss zwischen Wärmeschutz und Wohnkomfort auf der einen Seite und dem vorhandenen Budget bzw. der Erhaltung des historischen Erscheinungsbildes auf der anderen Seite zu finden. Eine Innendämmung, die aus bauphysikalischer Sicht Nachteile mit sich bringt und deshalb mit besonderem Sachverstand erstellt werden muss, kommt deshalb vor allem dann zum Einsatz, wenn eine Außen- oder Kerndämmung aus den oben genannten Gründen nicht möglich ist.

Bei der thermischen Sanierung mit einer Innendämmung wird häufig übersehen, dass diese den Trocknungsverlauf nach einem Schlagregenereignis gravierend beeinflussen kann, wie anhand von Bild 26 verdeutlicht wird. Bei einem Wandaufbau ohne Dämmung kann die Feuchte nach beiden Richtungen, also auch zur Raumseite hin, austrocknen. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn die Fassade keinen modernen Schlagregenschutz aufweist. Bringt man eine Innendämmung auf, die nach gängiger Praxis entweder selbst relativ dampfdicht ist (z.B. Hartschaumplatten) oder eine Dampfsperre beinhaltet, wird eine Austrocknung nach innen weitgehend unterbunden. Zusätzlich senkt die Innendämmung, außer im Hochsommer, das Temperaturniveau des dahinter liegenden Mauerwerks, was auch die Trocknung nach außen verlangsamt.

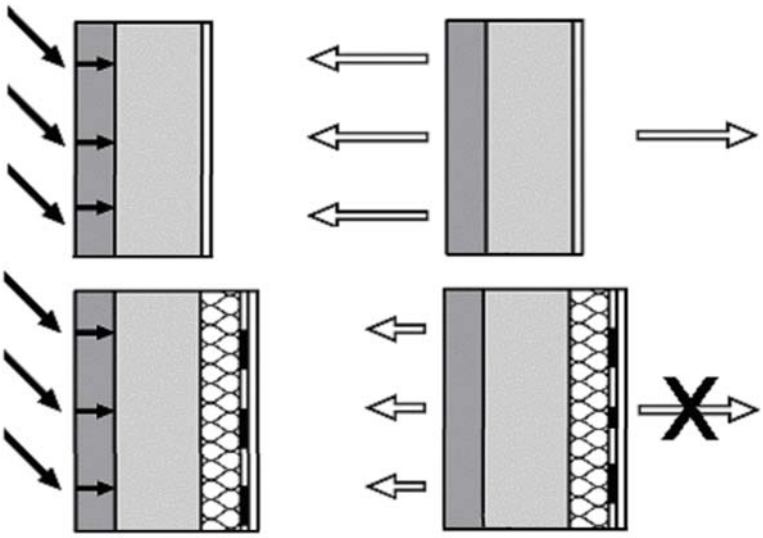


Bild 26: Schematische Darstellung der Befeuchtung und Trocknung einer Außenwand ohne Dämmung und mit Innendämmung. Im Gegensatz zur schlagregenbedingten Feuchteaufnahme, die durch die Dämmung nicht beeinflusst wird, verlangsamt die Innendämmung durch Absenkung des Temperaturniveaus die Austrocknung nach außen und die Dampfsperre unterbindet eine Trocknung nach innen.

Für die Vergleichsrechnung soll aus den beschriebenen Gründen eine thermische Sanierung mit einer Innendämmung rechnerisch sowohl mit dem Programmsystem WUFI® als auch mit DELPHIN® durchgeführt werden. Dabei kommen die in der Materialdatenbank MASEA abgelegten Kennwerte zum Einsatz und als Wandbaustoff und als innerer Abschluss der Dämmung werden Materialien ausgewählt, für die im Rahmen des Projektes zu Vergleichszwecken sowohl das IBP als auch die TUD die hygrothermischen Kennwerte ermittelt hat.

5.2.1 Aufgabenstellung

Ein unter Denkmalschutz stehender Altbau in Holzkirchen mit Ziegelmauerwerk (24 cm Wandstärke) aus Jöns-Ziegel soll auf einen Mindeststandard U=0,45 W/m²K gebracht werden. Der historische Zementputz (1 cm dick) mit einem w-Wert von 1,2 kg/m²√h muss erhalten bleiben. Innenseitig ist ein normaler Gipsputz mit 1 cm Stärke angebracht.

Der zu untersuchende Sanierungsvorschlag besteht in einer Innendämmung mit 8 cm Polystyrol-Dämmstoff und einer Gipskartonplatte als innenseitiger Abschluss.

Bei der Berechnung kommen für den Jöns-Ziegel und die Gipskartonplatte die gemeinsam bestimmten Materialkennwerte zum Tragen. Der Zementputz entstammt der WUFI-Materialdatenbank und wurde nur hinsichtlich des w-Wertes angepasst.

Zu beantworten sind folgende Fragen:

- Wie ändert sich der Feuchtehaushalt nach der Sanierung?
- Welche Vor- und Nachteile bzw. Risiken ergeben sich durch die Innendämmung?
- Gibt es eine einfache Möglichkeit der Schadensvermeidung?

5.2.2 Ergebnisse IBP

Bild 27 und Bild 28 zeigen den implementierten Wandaufbau vor und nach der thermischen Sanierung durch eine Innendämmung.

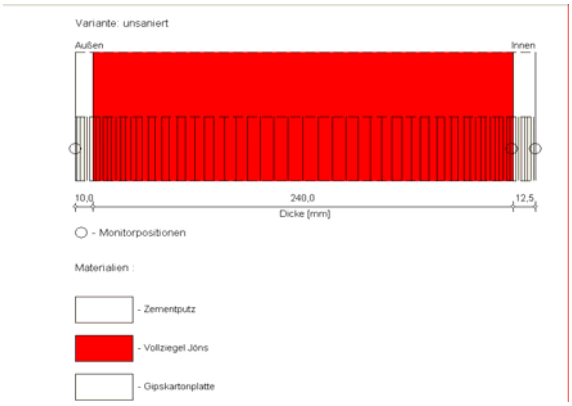


Bild 27: Bild 2: Implementierter Aufbau zur eindimensionalen Berechnung der Feuchtesituation an der unsanierten Wand.

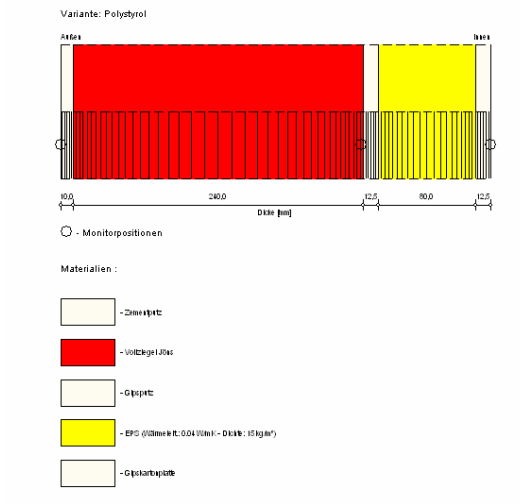
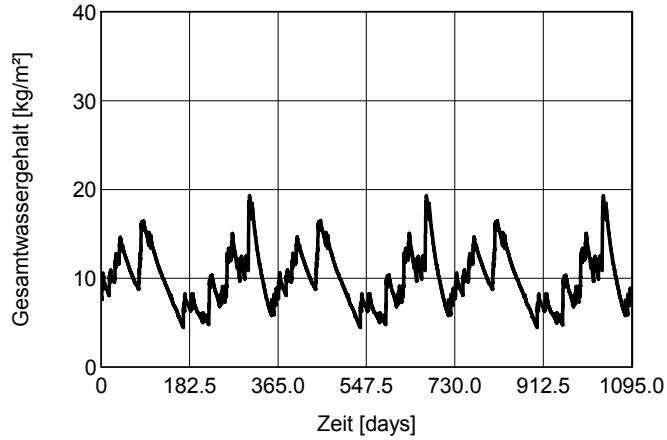


Bild 28: Implementierter Aufbau zur eindimensionalen Berechnung der Feuchtesituation an der mit einer Innendämmung versehenen Wand.

In Bild 29 ist der zeitliche Verlauf des Gesamtwassergehaltes dargestellt. Vor der Sanierung (oben) zeigt sich ein jahreszeitlich stark schwankender Gesamtwassergehalt mit einem Mittelwert von ca. 10 kg/m². Nach Anbringung der Innendämmung (unten) steigt der Gesamtwassergehalt deutlich an und erreicht mit etwa den gleichen jahreszeitlichen Schwankungen einen Mittelwert von ca. 25 kg/m².



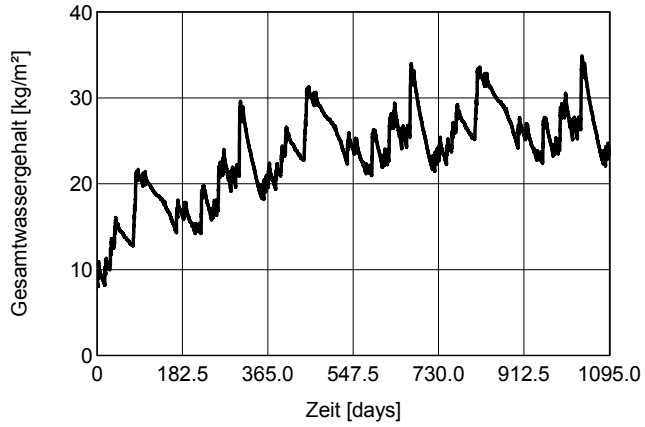


Bild 29: Verlauf des Gesamtwassergehaltes der unsanierten Wand (oben) und der mit Innendämmung versehenen Wand.

Wie aus Bild 30 ersichtlich, ist dies vor allem in dem Wasserhaushalt des Ziegels begründet. Vor der Sanierung (oben) zeigt sich mit einem Mittelwert von ca. 30 kg/m³ (3 Vol.-%). Nach Anbringung der Innendämmung (unten) steigt der Wassergehalt deutlich an und erreicht mit etwa den gleichen Jahreszeitlichen Schwankungen einen etwa dreifachen Mittelwert von ca. 100 kg/m³ (10 Vol.-%).

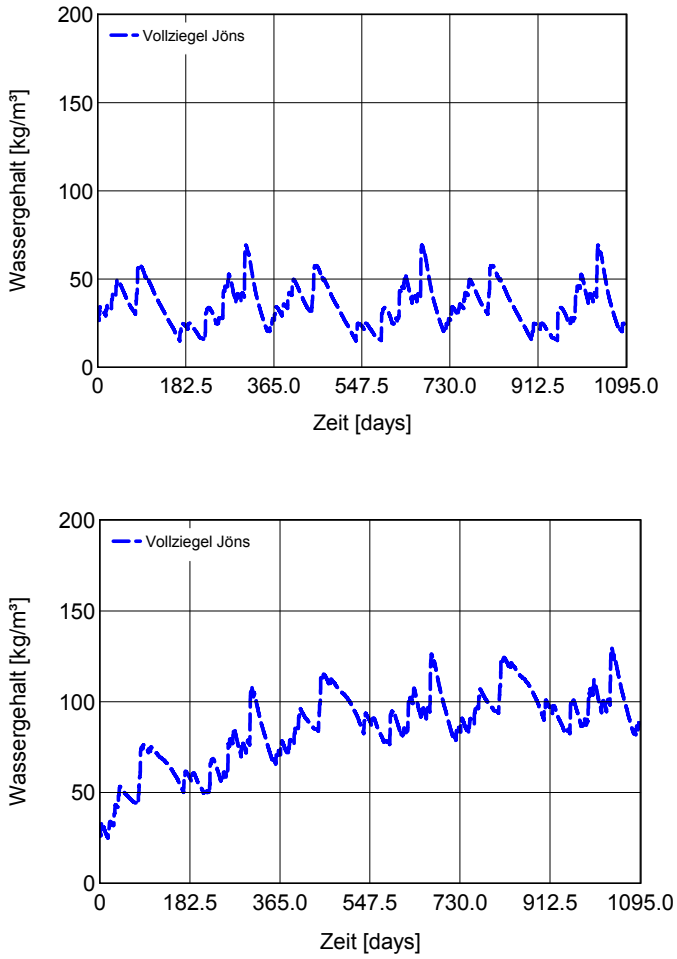


Bild 30: Verlauf des Wassergehaltes im Ziegel der unsanierten Wand (oben) und dem der mit Innendämmung versehenen Wand.

Am anschaulichsten wird der Einfluss der Innendämmung bei Betrachtung der Feuchteverteilung in der WUFI-Filmansicht. Bild 31 zeigt die Ansicht zum Ende des Berechnungszeitraumes. Die farbigen Flächen zeigen die in diesem Zeitraum überstrichenen Werte. Dabei ist die Temperatur rot, die relative Luftfeuchte grün und der Wassergehalt blau dargestellt. Die Linien in den Feldern geben den Mittelwert für den berechneten Zeitraum wieder. Aus der Form der Kurve des mittleren Wassergehaltes der sanierten Wand (unten) im Vergleich zur unsanierten (oben) erkennt man, dass der höhere Wassergehalt nach der Sanierung in der Behinderung der Trocknung nach innen mit begründet ist.

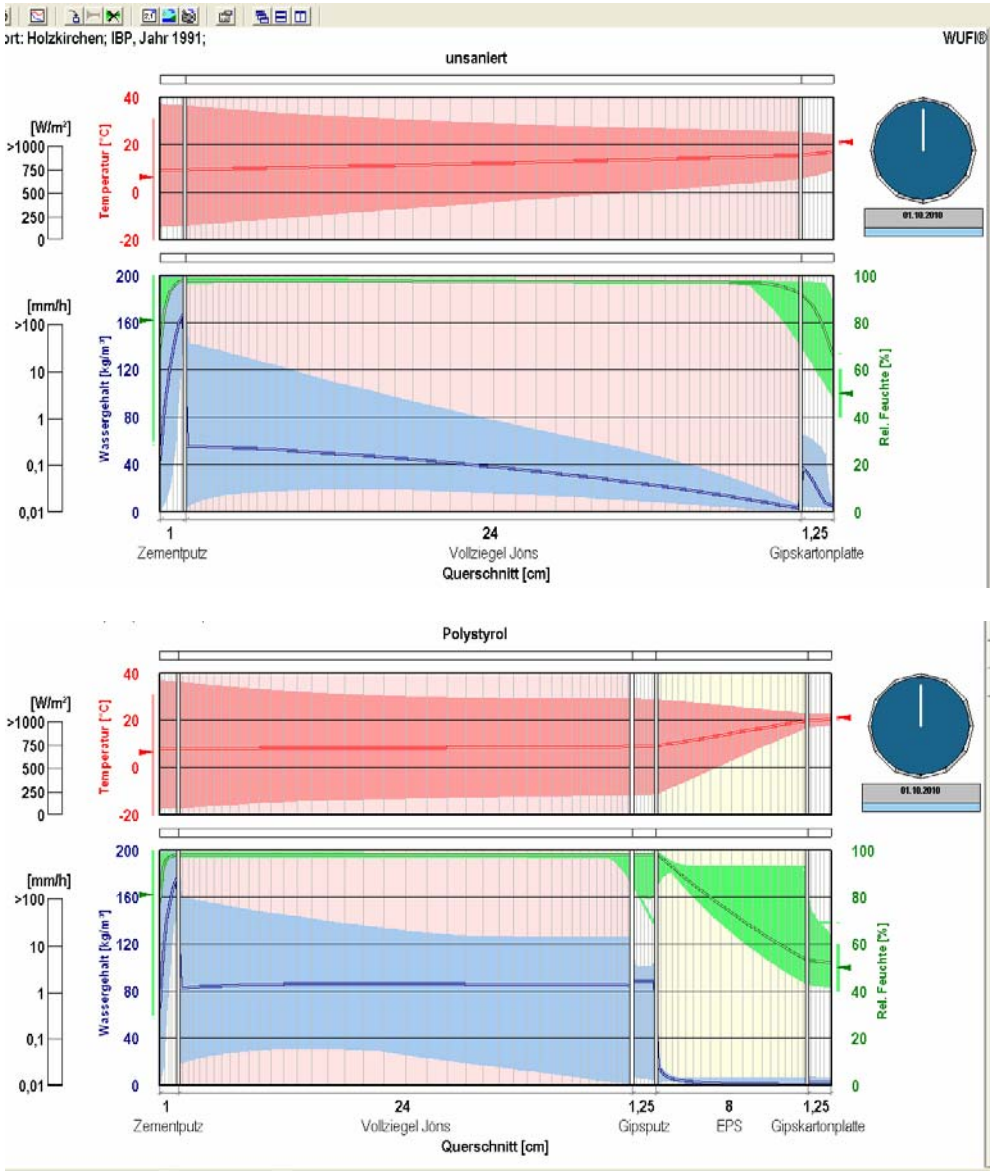


Bild 31: Ansicht der Berechnungsergebnisse vor der Sanierung (oben) und nach der Sanierung (unten) über den Wandquerschnitt zum Ende des Berechnungszeitraumes. Die farbigen Flächen zeigen die in diesem Zeitraum überstrichenen Werte. Dabei ist die Temperatur rot, die relative Luftfeuchte grün und der Wassergehalt blau dargestellt. Die Linien in den Feldern geben den Mittelwert für den berechneten Zeitraum wieder.

Eine einfache Möglichkeit die Feuchteerhöhung durch die Innendämmung zu vermeiden ohne einen neuen besseren Außenputz aufzubringen, besteht darin den alten Putz in geeigneter Weise zu hydrophobieren. Bild 32 zeigt das damit erzielte Berechnungsergebnis. Durch die Hydrophobierung trocknet die Wand fast vollständig aus.

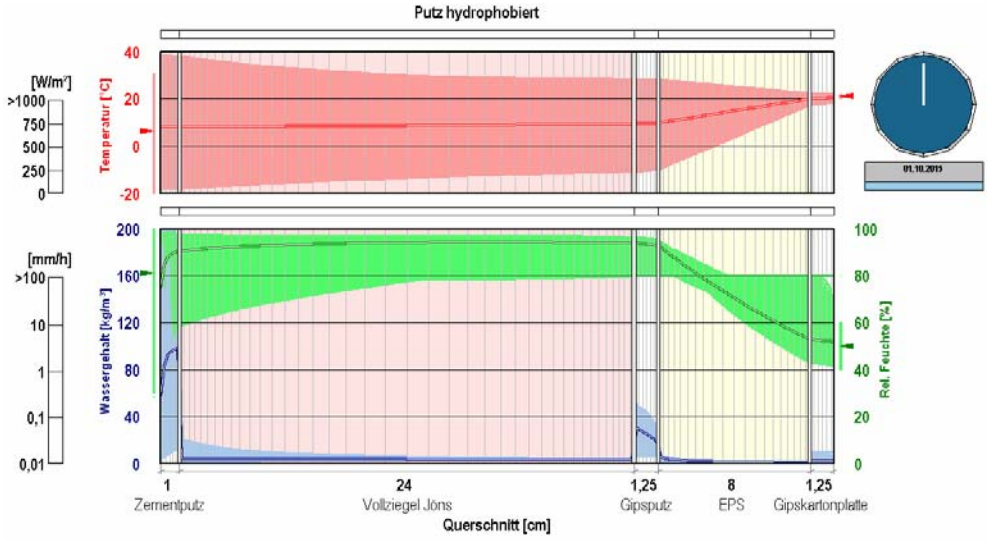


Bild 32: Ansicht der Berechnungsergebnisse bei Hydrophobierung des Außenputzes über den Wandquerschnitt zum Ende des Berechnungszeitraumes. Die farbigen Flächen zeigen die in diesem Zeitraum überstrichenen Werte. Dabei ist die Temperatur rot, die relative Luftfeuchte grün und der Wassergehalt blau dargestellt. Die Linien in den Feldern geben den Mittelwert für den berechneten Zeitraum wieder.

5.2.3 Ergebnisse IBK

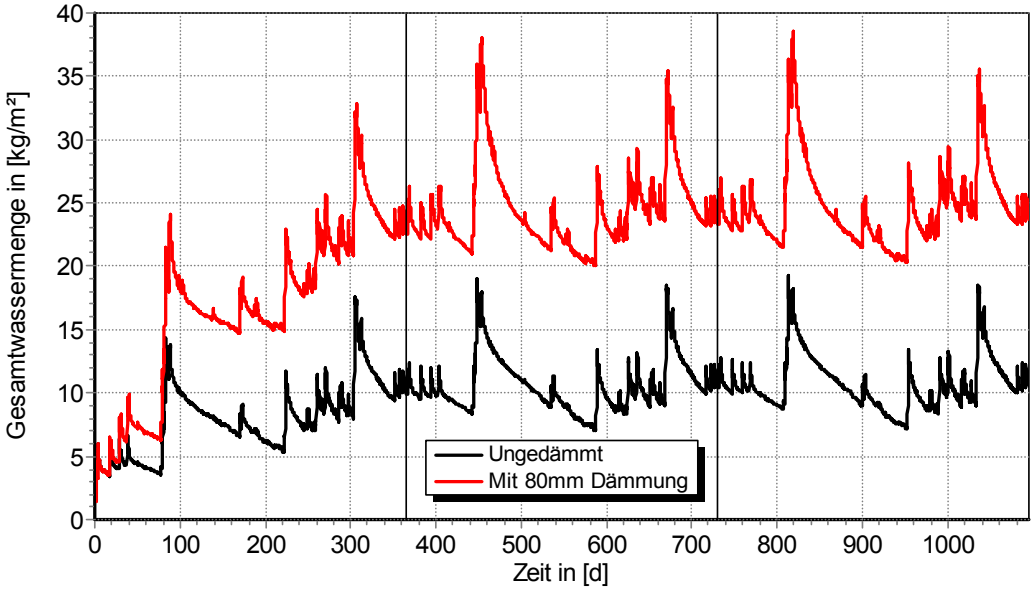


Bild 33: Verlauf der Gesamtwassermenge in der Konstruktion in der unsanierten (schwarze Linie) und der sanierten Wand (rote Linie).

Bei einer Berechnung mit DELPHIN4 konnte für die unsanierte Wand (schwarze Linie, Bild 33) eine durchschnittliche Gesamtwassermenge von etwas über 10 kg/m² ermittelt werden. Demgegenüber steigt die Gesamt-

wassermenge mit der diffusionsdichten Innendämmung auf einen Wert von durchschnittlich 25 kg/m².

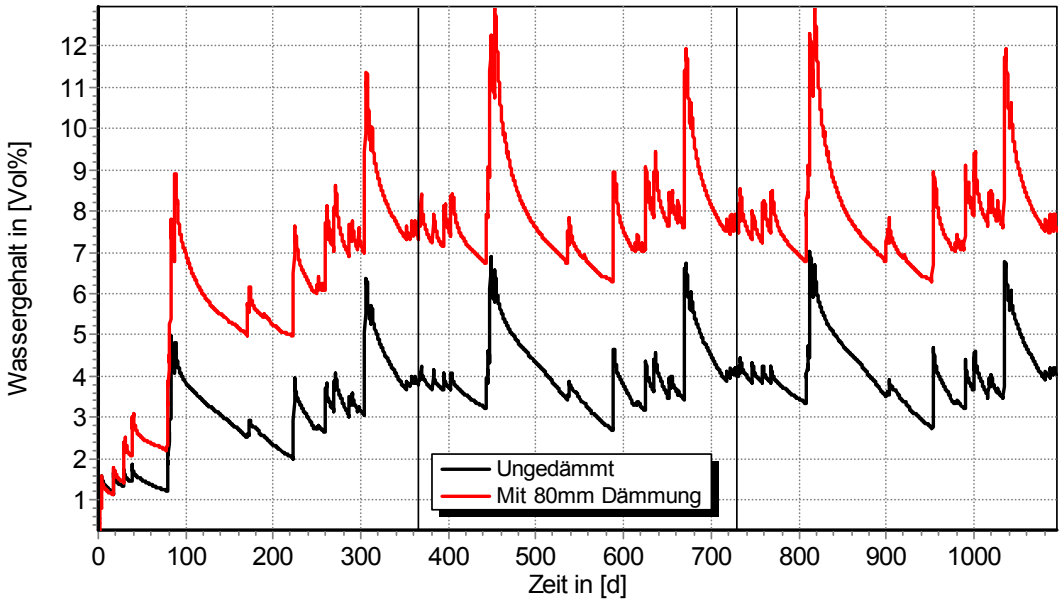


Bild 34: Verlauf des Wassergehalts im Ziegel Jöns in der unsanierten (schwarze Linie) und der sanierten Wand (rote Linie).

Bild 34 beinhaltet den Verlauf des durchschnittlichen Wassergehalts im Ziegel („Jöns“) der beiden untersuchten Aufbauten. Auch hier ist der nach der Sanierung erhöhte Gang augenfällig. Demnach ist bei der sanierten Variante mit einem durchschnittlichen Wert von etwa 8.5 Vol% Feuchte zu rechnen im Vergleich zu knapp 4 Vol% ohne zusätzliche Dämmmaßnahme.

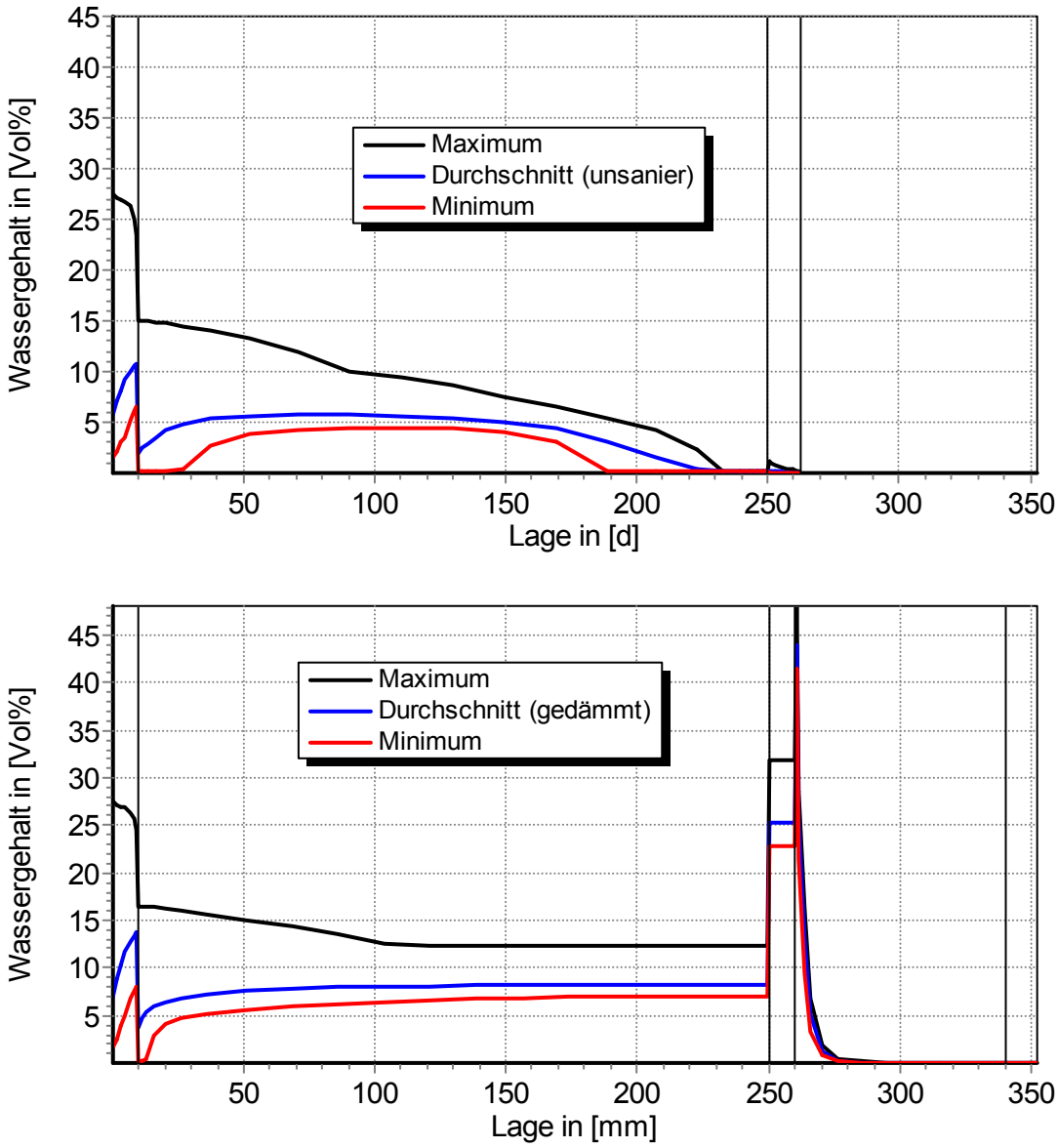


Bild 35: Maximales, minimales und durchschnittliches Profil des Wassergehalts im zweiten und dritten Jahr in der unsanierten (oben) und gedämmten Konstruktion (unten).

Obige Bilder illustrieren einen Schnitt durch die beiden Konstruktionen. Darin sind jeweils für die beiden Varianten die extremen sowie das mittlere Wassergehaltsprofil durch die Wandkonstruktion für das zweite und dritte Jahr angegeben. Es zeigt sich wiederum, dass der Wassergehalt in der Konstruktion, insbesondere nahe der Innendämmung im Vergleich zum unsanierten Aufbau stark erhöht ist, was auf das reduzierte Trocknungspotenzial zurückzuführen ist. Während im Außenputz und im direkt dahinter liegenden Bereich des Ziegels der durchschnittliche Wassergehalt in der sanierten Variante nur etwas erhöht ist, zeichnet sich schon vor der Hälfte des Ziegels ein konstantes, deutlich darüber liegendes Niveau bei etwas über 8 Vol% ab - ohne Dämmschicht sinkt der Wassergehalt durch Dampfdiffusion zum Innenraum unter 1 Vol%! Besonders drastisch ist der „Feuchtestau“ in der

Gipsschicht zwischen Dämmung und Ziegel zu sehen. Der mittlere Wassergehalt in der Mitte der Ziegelschicht liegt bei 5 (unsaniert) und 8 Vol% (gedämmt).

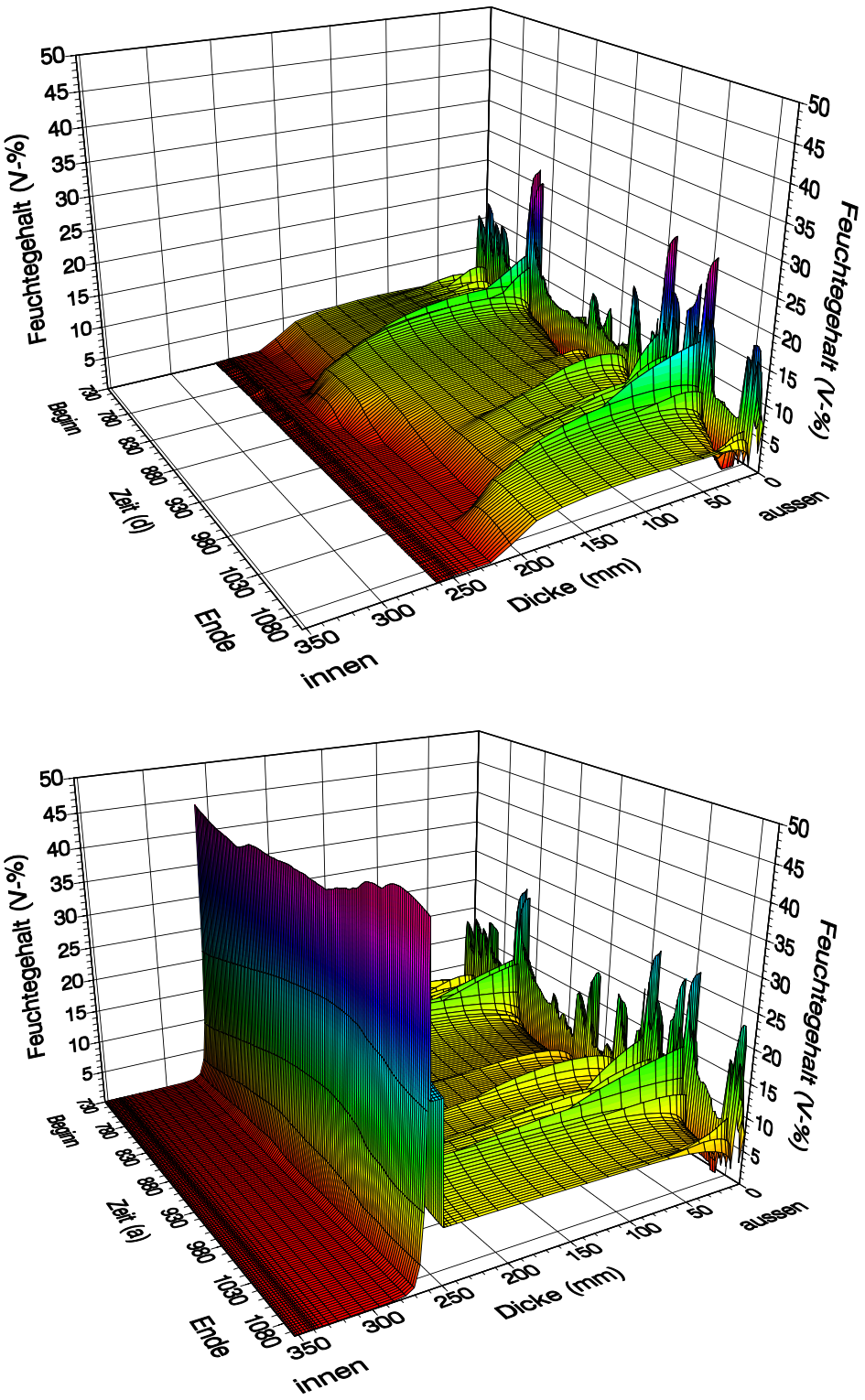


Bild 36: Profile des Wassergehalts während des dritten Jahres; unsaniert (oben) und gedämmt (unten).

Die 3D-Schaubilder in Bild 36 geben noch einmal auf andere Weise den Verlauf des Wassergehaltes während eines Jahres wieder. Der unruhige Verlauf am rechten, hinteren Rand ist auf eindringenden Schlagregen zurückzufüh-

ren. Im unteren Bild wirkt die stark diffusionsbremsende Eigenschaft der Dämmung wie eine Barriere.

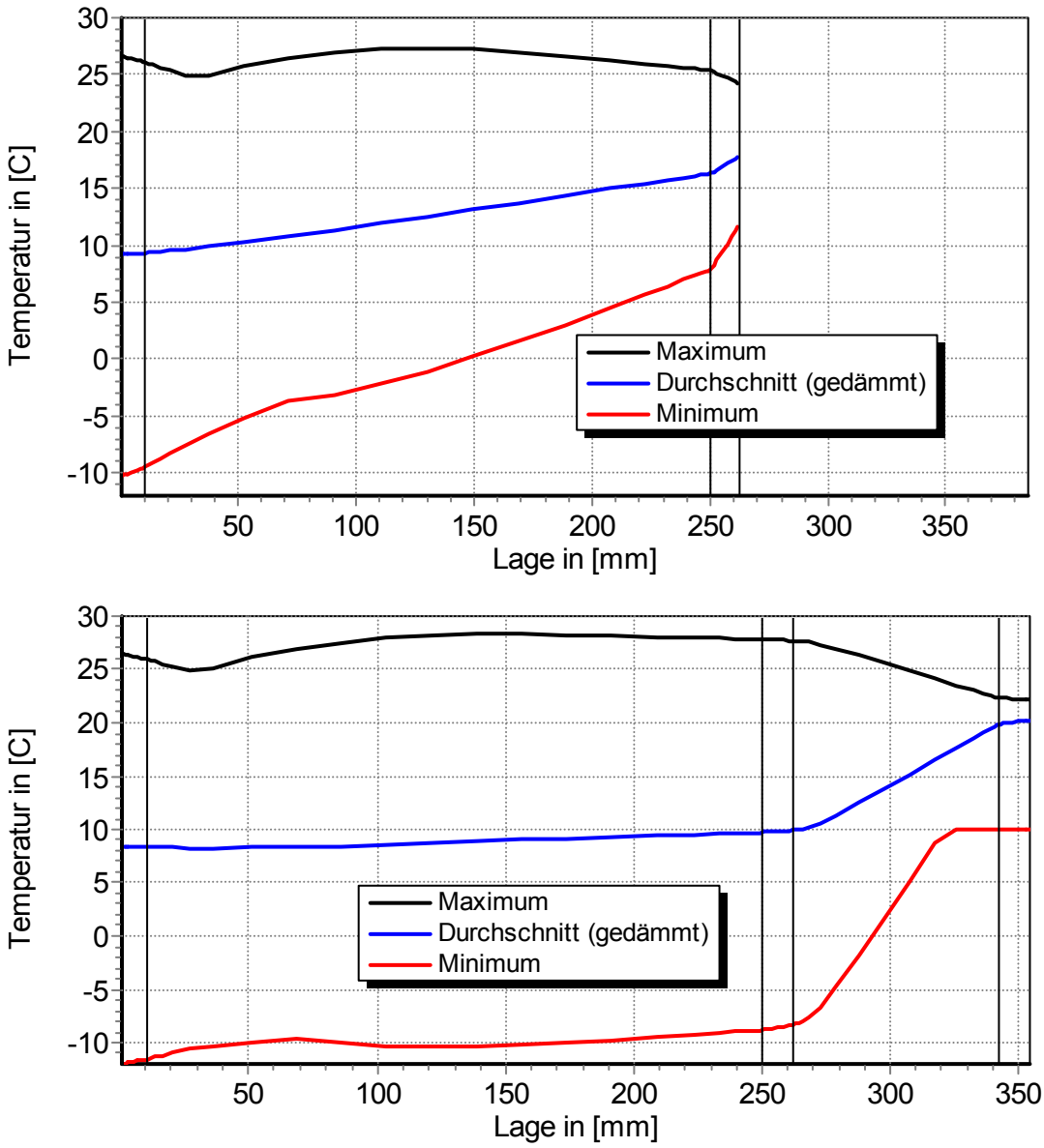


Bild 37: Maximales, minimales und durchschnittliches Temperaturprofil im zweiten und dritten Jahr in der unsanierten (oben) und gedämmten Konstruktion (unten)

Abschließend sind in Bild 37 noch die extremen sowie die durchschnittlichen Temperaturprofile durch die Konstruktion wiedergegeben. Anhand der Profile kann beobachtet werden, dass durch die Sanierung immerhin die Temperatur nahe der Innenoberfläche auf ein höheres Level gehoben wurde.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

Am Beispiel einer thermischen Sanierung mit einer Innendämmung wurden Vergleichsberechnungen mit den Programmen DELPHIN® und WUFI® durchgeführt. Für die Ziegelwand vor der Sanierung wurde mit beiden Programmen ein Gesamtwassergehalt von im Mittel 10 kg/m² berechnet. Auch die jahreszeitlich bedingten Schwankungen wurden mit beiden Modellen ähnlich abgebildet. Die Maxima werden in den gleichen Zeiträumen erreicht und variieren lediglich um +/- 1 kg/m².

Durch die Sanierungsmaßnahme steigt der Gesamtwassergehalt auf 25 kg/m² an. Auch hier wurden mit beiden Simulationsprogrammen vergleichbare Werte erhalten. Betrachtet man den Wassergehalt des untersuchten Ziegels, ergaben sich vor der Sanierung mit WUFI® 3 Vol.-% mit DELPHIN 4 Vol.-%. Durch Anbringen der diffusionsdichten Innendämmung steigt der Wassergehalt des Ziegels auf 10 Vol. % (WUFI) und 8,5 Vol.-% (DELPHIN). Beide Programme zeigten, das die Ursache für den erhöhten Wassergehalt im Ziegelmauerwerk auf das reduzierte Trocknungspotenzial nach Innen durch die diffusionsdichte Innendämmung zurückzuführen ist. Beide Programme liefern übereinstimmende Ergebnisse.

5.4 Freilandexperimente, Validierungsberechnungen

Die in der Masea-Materialdatenbank abgelegten Materialkennwerte und -funktionen werden im Folgenden stichprobenweise anhand von Anwendungsbeispielen, bei denen das Feuchteverhalten von Bauteilen experimentell untersucht wurde, validiert, um zu zeigen, dass sie nicht nur unter vereinfachten Versuchsbedingungen Gültigkeit besitzen.

Für die Überprüfung der Stoffkennwerte sind nur Testbeispiele geeignet, bei denen die Anfangs- und Randbedingungen und der Aufbau des Bauteils gut dokumentiert sind und die Stoffkennwerte zur Verfügung stehen.

5.4.1 Naturstein-Fassadenausschnitt unter natürlicher Bewitterung

Das erste Berechnungsbeispiel veranschaulicht die Untersuchung des Feuchteverhaltens eines nach Westen orientierten Naturstein-Fassadenausschnittes. Für die Berechnung des Feuchteverhaltens des Fassadenausschnittes aus Sander Schilfsandstein wurden die gemessenen Kapillartransportkoeffizienten sowie Speicherfunktion verwendet.

Das Experiment wurde an 25 cm langen flankenversiegelten Gesteinsprismen mit einem Querschnitt von 5 x 5 cm² durchgeführt. Der Einbau dieser Prismen erfolgte im trockenen Zustand in die Westfassade einer ungeheizten Versuchshalle. Die raumseitige Oberfläche der Prismen wurde zum Schutz vor Tauwasser abgedichtet, während die Außenoberfläche der freien Bewitterung ausgesetzt war. Vom Zeitpunkt des Einbaus an erfolgte eine kontinuierliche Erfassung der Weststrahlung, der Außenlufttemperatur und -feuchte sowie des Schlagregens, der auf gleicher Höhe wie die Prismen durch einen in die Fassade integrierten Tropfenzähler gemessen wurde. Diese Klimadaten sind in Form von Tagesmittelwerten bzw. -summen in Bild 38 oben für einen Beobachtungszeitraum von 80 Tagen dargestellt. Die Raumlufttemperatur hat sich im gleichen Zeitraum relativ gleichmäßig von

21 °C auf 10 °C erniedrigt. Die Raumluftfeuchte ist wegen der raumseitigen Versiegelung der Prismen ohne Bedeutung. Das Feuchteaufnahme- und -abgabeverhalten der Natursteinprismen unter den beschriebenen Randbedingungen wurde durch regelmäßiges Wiegen der Prismen erfasst. In bestimmten Zeitabständen wurden außerdem die Feuchteprofile in den Prismen durch NMR-Messungen registriert. Zur Berechnung des Feuchteverhaltens einer Natursteinfassade unter den hier angegebenen Bedingungen wurden Stundenmittelwerte der registrierten Klimaparameter verwendet.

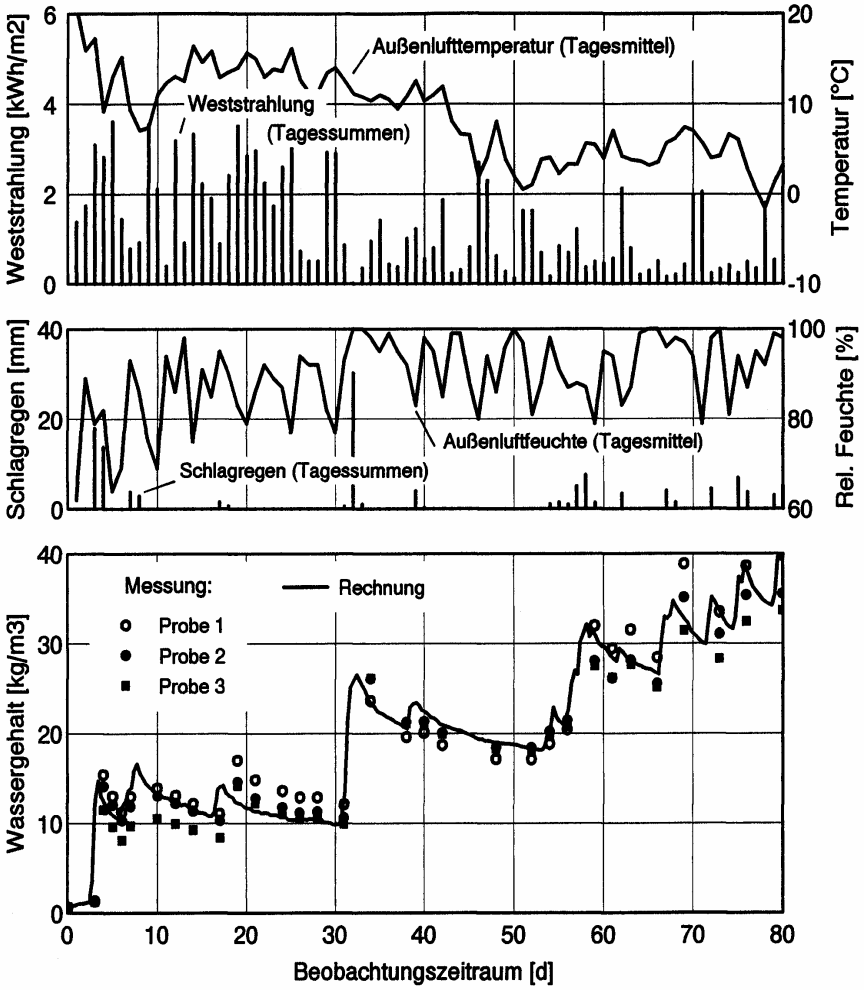


Bild 38: Gemessener Verlauf von Außenlufttemperatur und Weststrahlung (oben) sowie Außenluftfeuchte und Schlagregen (Mitte) zur besseren Darstellung in Form von Tagesmittelwerten bzw. -summen über einen 80-tägigen Beobachtungszeitraum. Der mit diesen klimatischen Randbedingungen (in Form von Stundenmittelwerten) berechnete Feuchteverlauf einer 25 cm dicken, anfangs trockenen Natursteinwand ist im Vergleich zu Messungen an 3 Natursteinfassadenproben dargestellt (unten).

In Bild 38 unten ist der berechnete Verlauf des über die Gesamtdicke von 25 cm gemittelten Wassergehalts der Natursteinfassade im Vergleich zum gemessenen Feuchteverlauf dreier Natursteinprismen für einen Beobachtungszeitraum von 80 Tagen nach Beginn der Bewitterung dargestellt. Die

Messung und Berechnung, die relativ gut übereinstimmen, zeigen einen von kurzen Trocknungsperioden unterbrochenen Anstieg der Bauteilfeuchte aufgrund des Schlagregens (am deutlichsten in der Mitte von Bild 38 erkennbar), der auch nach 80 Tagen noch keinen Ausgleichszustand erreicht hat. Die sich in den Fassadenprismen einstellenden Feuchteprofile sind für vier markante Zeitpunkte in Bild 39 dargestellt. Das Profil zum Zeitpunkt 1 zeigt die Gesteinsfeuchte nach der ersten Regenperiode. Ähnlich wie bei einem Saugversuch im Labor ist dort eine eng begrenzte Feuchtefront zu erkennen. Zum Zeitpunkt 2 nach einer längeren Schönwetterperiode hat sich diese Feuchtefront durch Austrocknen und Weiterverteilen bereits bis zur Mitte der Prismen hin abgeflacht. Das Bild zum Zeitpunkt 3 gibt ein Feuchteprofil bei stürmischem Wetter mit niedriger Außenluftfeuchte (im Alpenvorland als Föhnsturm bekannt) wieder. Deutlich ist hier der steile Wassergehaltsgradient in der Oberflächenzone zu erkennen, der aus der hohen Trocknungsgeschwindigkeit bei diesen Klimabedingungen resultiert. Das Feuchteprofil am Ende des 80-tägigen Beobachtungszeitraumes (Zeitpunkt 4) weist ein relativ gleichmäßiges Feuchtegefälle in der Fassade bei annähernd freier Wassersättigung der Außenoberfläche und immer noch sehr geringem Wassergehalt im Bereich der Innenoberfläche auf. Zu allen vier Zeitpunkten ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung ausgezeichnet. Dies zeigt neben der Tauglichkeit des Rechenprogrammes eindeutig, dass die verwendeten Transportkoeffizienten gute Voraussagen über das Feuchteverhalten von Baustoffen auch unter komplexen Feuchtebeanspruchungen erlauben. Allerdings spielt in diesem Beispiel die Speicherfunktion keine so große Rolle, da es sich um einen monolithischen Probekörper handelt.

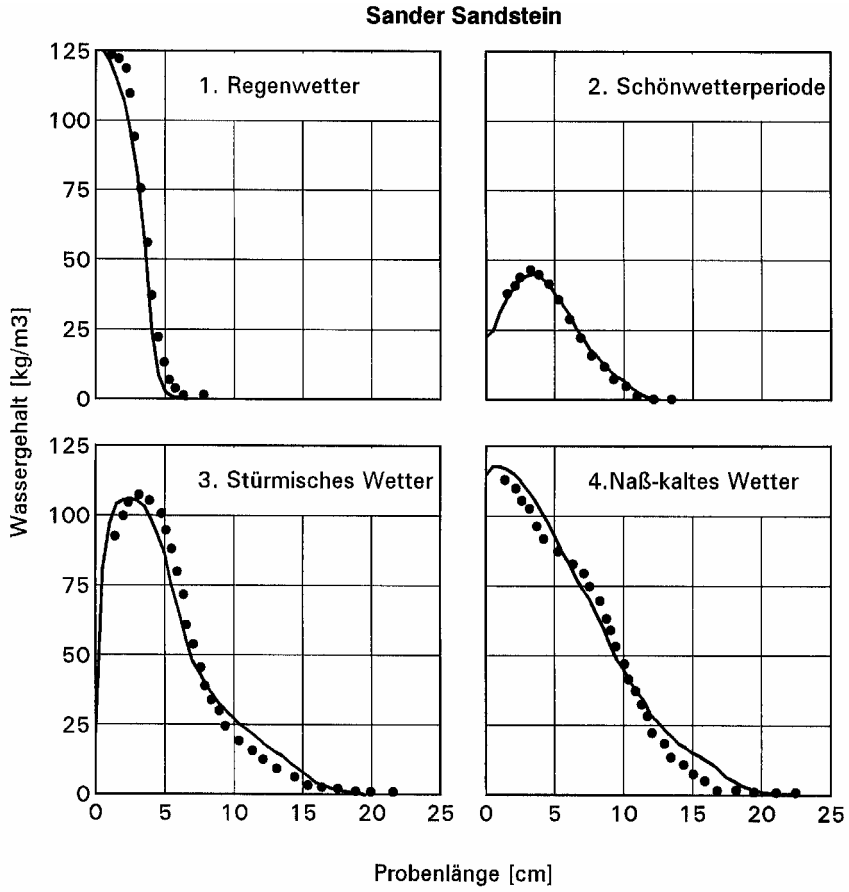


Bild 39: Vergleich der berechneten und an Sander Sandstein (Bild 1, Probe 2) gemessenen Feuchteprofile in vier markanten Wetterperioden: Nach dem ersten längeren Regen zu Versuchsbeginn, nach einer einwöchigen Schönwetterperiode, bei auf Regen folgendem stürmisch trockenem Wetter und bei längerfristig nasskaltem Wetter am Ende des Beobachtungszeitraumes.

5.4.2 Flüssigtransport über die Schichtgrenzen zweier miteinander verbundener kapillarporöser Materialien

Bei obigem Beispiel wurden nur an monolithischem Material für den Feuchtetransport Vergleiche zwischen Messungen und Rechnungen durchgeführt. Deshalb wurden Messungen der Wasseraufnahme über die Schichtgrenzen zweier miteinander verbundener kapillarporöser Materialien hinweg durchgeführt und mit Rechenergebnissen verglichen.

Die Untersuchungen wurden mit drei verschiedenen Natursandsteinsorten durchgeführt: Rüthener, Baumberger und Obernkirchner Sandstein. Von jeder Kombination aus je zwei Materialien wurden Proben mit einer Querschnittsfläche von 5 x 5 cm und verschiedenen Längen geschnitten. Die Seiten aller Proben wurden mit Epoxidharz versiegelt, um eindimensionale Verhältnisse zu erhalten. Für eine gute hygrische Verbindung wurden je zwei unterschiedliche Proben mit befeuchtetem Kaolinpulver kapillar verbunden

und getrocknet. Anschließend wurde ein Wasseraufnahmeversuch durchgeführt, wobei die offene Seite des kürzeren Probenteils mit Wasser in Kontakt gebracht wurde (siehe Bild 40). Die zeitabhängige Wasseraufnahme wurde durch Wägung bestimmt. Wie Vorversuche ergaben, hat die dünne Kaolinschicht keinen nennenswerten Einfluss auf den Wasseraufnahmeprozess.

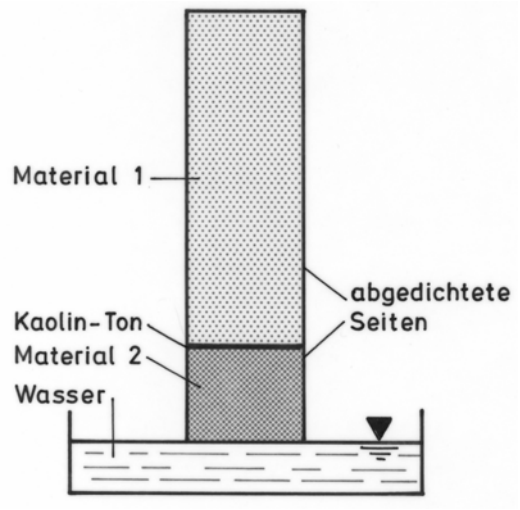


Bild 40: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Wasseraufnahme über die Schichtgrenze von zwei unterschiedlichen Materialien. Der Kaolin-Ton gewährleistet den einwandfreien hygrischen Kontakt zwischen beiden Proben.

In Bild 41 und Bild 42 sind die durch wiederholte Wägungen erhaltenen Verläufe für die Wasseraufnahme als Messpunkte dargestellt. Bild 41 links zeigt die Wasseraufnahme der Kombination aus 2 cm Rüthener Sandstein und 18 cm Baumberger Sandstein. Nach einer kurzen Aufnahmezeit des Rüthener Sandsteins mit seinem hohen Wasseraufnahmekoeffizienten erreicht das Wasser den Baumberger Sandstein, wie aus dem scharfen Knick der Kurve zu ersehen ist. Von da an nimmt der Baumberger Sandstein durch den Rüthener Sandstein fast völlig unbeeinflusst das Wasser auf.

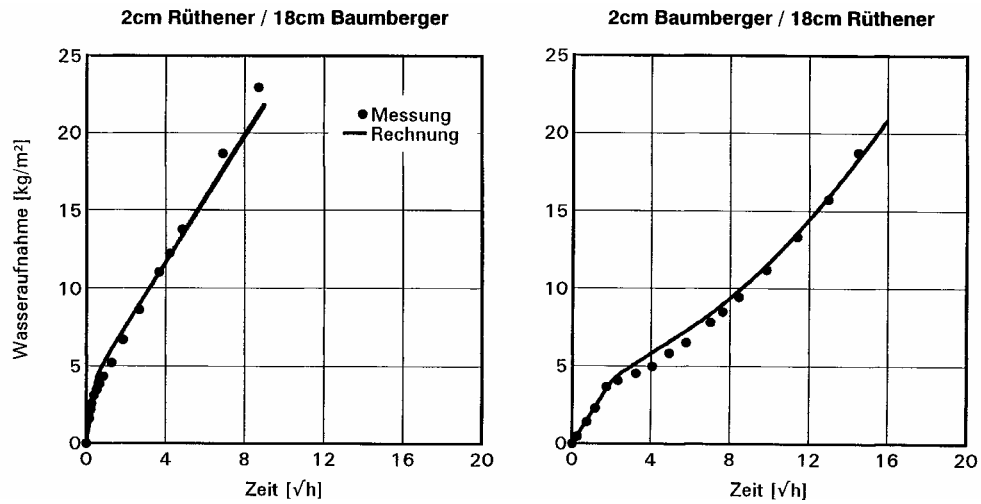


Bild 41: Zeitlicher Verlauf (Wurzel-Maßstab) der Wasseraufnahme über die Schichtgrenze von zwei miteinander in hygrischem Kontakt stehenden Sandsteinproben aus Rüthener und Baumberger Sandstein hinweg. Während der Verlauf der Wasseraufnahme des Baumberger Sandsteins durch den Rüthener Sandstein nicht beeinflusst wird (linkes Bild), wird die Wasseraufnahme des Rüthener Sandsteins durch den Baumberger Sandstein stark behindert (rechtes Bild).

Die Kombination Baumberger/Rüthener Sandstein zeigt, wie im rechten Teil des Bildes dargestellt, ein anderes Verhalten. In diesem Fall hat der Baumberger Sandstein einen sehr großen Einfluss auf das Aufnahmeverhalten des Rüthener Sandsteins. Trotz seines großen Wasseraufnahmekoeffizienten nimmt der Rüthener Sandstein das Wasser sogar langsamer als der Baumberger Sandstein auf. Mit steigender Saugzeit bzw. mit steigender Wassereindringtiefe steigt die Wasseraufnahmegeschwindigkeit des Rüthener Sandsteins. Dieser Effekt ist zu erwarten, da mit steigender Eindringtiefe durch die niedriger werdende Strömungsgeschwindigkeit der im Vergleich zum Rüthener Sandstein deutlich höhere Strömungswiderstand abnimmt.

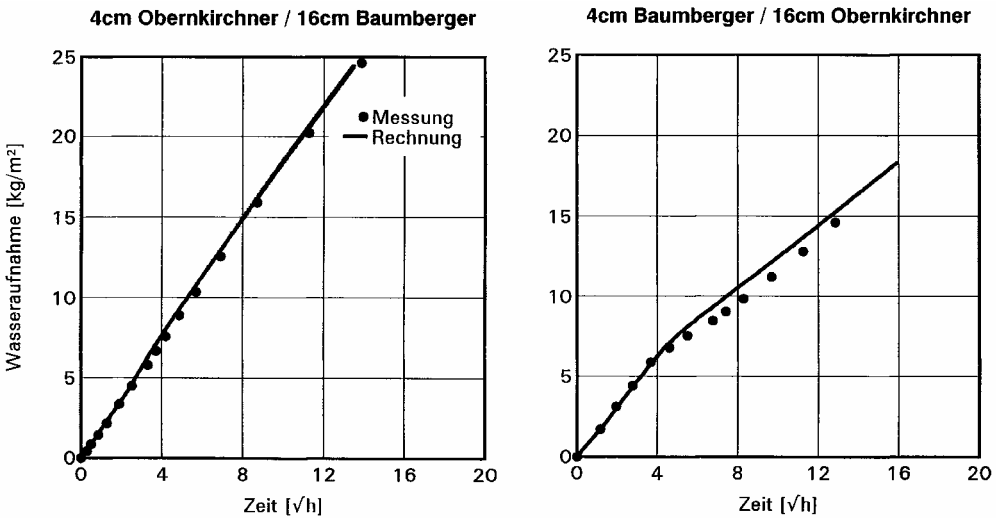


Bild 42: Zeitlicher Verlauf (Wurzel-Maßstab) der Wasseraufnahme über die Schichtgrenze von zwei miteinander in hygrischem Kontakt stehenden Proben aus Obernkirchner und Baumberger Sandstein. Beide Sandsteinvarietäten besitzen den gleichen Wasseraufnahmekoeffizienten. Die Saugspannung des Obernkirchner Sandsteins ist aber deutlich niedriger als die des Baumberger Sandsteins. Beim Saugen des Baumberger Sandsteins aus dem Obernkirchner Sandstein heraus zeigt sich ein Verhalten wie bei einer monolithischen Probe (linkes Bild). Bei umgekehrter Saugrichtung (rechtes Bild) zeigt sich der Einfluss der unterschiedlichen Saugspannung beider Proben.

Bei der Kombination 4 cm Obernkirchner und 16 cm Baumberger, zwei Materialien mit fast gleichem Wasseraufnahmekoeffizienten aber unterschiedlicher Saugspannung, ist das Aufnahmeverhalten wie das eines homogenen Materials (siehe Bild 42 links). Bei umgekehrter Kombination erhält man dagegen ein Verhalten vergleichbar dem der Kombination Baumberger/Rüthener. Der Grund hierfür liegt darin, dass auch hier ein Material mit niedriger Saugkraft das Wasser durch ein Material mit hoher Saugkraft und hohem Strömungswiderstand saugen muss.

5.4.3 Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden und Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des realen Wärmedurchgangskoeffizienten

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Dämmwirkung eines Leichtziegelmauerwerks besteht in der Verwendung von Wärmedämmputzen. Dazu wurde der Einfluss der zum Teil wasserabweisend eingestellten Dämmputzsysteme auf das Trocknungsverhalten des baufeuchten Mauerwerks durch Vergleich mit Messungen an konventionell verputztem Mauerwerk untersucht. Außerdem wurden die unter praktischen Klimaeinwirkungen erreichbaren realen Wärmedurchgangskoeffizienten ermittelt. Mit dem PC-Programm WUFI® wurden Simulationsrechnungen durchgeführt und die Rechenergebnisse mit den experimentell gewonnenen Ergebnissen verglichen. Dabei ergab sich auch die Möglichkeit, neben den Feuchte- und Temperaturverteilungen auch gemessene Wärmestromdichten mit einzubeziehen.

Messaufbau

Die Prüfwände des Versuchshauses bestehen von innen nach außen aus einem ca. 1,5 cm dicken Kalk-Gips-Innenputz, Leichtziegelmauerwerk und unterschiedlichen Außen- bzw. Dämmputzen:

- Referenz-Wände aus 36,5 cm dickem Leichtziegelmauerwerk mit 2 cm mineralischem Außenputz (PII), mit N-Orientierung und mit S-Orientierung,
- 30 cm Leichtziegelmauerwerk mit Wärmedämmputz mit mineralischem Zuschlag, 6 cm dick, mit S-Orientierung.

Die thermischen Untersuchungen über die Winterperiode von November bis März zur Bestimmung von Wärmeströmen wurden wie folgt durchgeführt: Bei den Wänden mit Dämmputz ist im Wandinneren, d.h. zwischen Mauerwerk und Dämmputz, ein Wärmeflussmesser etwas über halber Wandhöhe eingebaut, bei den Wänden mit normalem Außenputz ist dieser auf der raumseitigen Wandoberfläche angebracht. Die Innenlufttemperatur wird auf 20 °C konstant gehalten.

Das Untersuchungsmaterial für die Bestimmung von Stoffeigenschaften an Putz-Laborproben wurde im Zuge des Putzauftrages unter anwendungstechnischen Bedingungen (Mischer: Quirl bzw. Putzmaschine) in die entsprechenden Probenformen gefüllt.

Rechnerische Untersuchungen

Für die Berechnung der am Versuchshaus aufgetretenen Wärme- und Feuchtetransportvorgänge wurde das am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelte Rechenverfahren eingesetzt. Die Berechnungen beginnen mit dem Zeitpunkt der ersten Probennahme im März (die ermittelten Feuchteverteilungen wurden als Ausgangswerte eingesetzt) und enden mit der 3. Probennahme im April des folgenden Jahres. Es wurden für die klimatischen Randbedingungen die am Institut gemessenen Stundenmittelwerte von Temperatur, Strahlung, relativer Luftfeuchte und Regen verwendet. Dabei wurde die auf die Oberfläche auftreffende Strahlung für die jeweilige Ausrichtung der Wand aus Direkt- und Diffusstrahlung und der Schlagregen aus Normalregen, Windrichtung und -geschwindigkeit berechnet.

Zusätzlich zu den Vergleichsrechnungen wurden zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Wandaufbauten (normal verputzt, mit Wärmedämmputz und mit Wärmedämmverbundsystem) auf das Austrocknungsverhalten des Ziegelmauerwerks und damit auf den zeitlichen Verlauf des Wärmedurchgangskoeffizienten weitere Rechnungen über einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt. Die bereits verwendeten Klimajahresdaten wurden dazu mehrmals hintereinander durchlaufen. Für die Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass im Ende Oktober fertig gestellten Mauerwerk ein durch Regenbelastung hervorgerufener, relativ hoher, aber realistischer Wassergehalt entsprechend der halben freien Sättigung (7,5 Vol.-%) vorliegt. Alle drei Wände sind nach Süden ausgerichtet.

Ergebnisse der Messungen und Vergleich mit Berechnungen

In Bild 43 sind für die südorientierte (linkes Bild) und die nordorientierte (mittleres Bild) normal verputzte Ziegelwand die durch Bohrkernentnahme ermittelten Feuchteprofile dargestellt. Zum Zeitpunkt der Probennahme im März war der Rohbau bereits etwas über ein Jahr fertiggestellt. Dies führt dazu, dass in der südorientierten Wand nur noch in der oberflächennahen Zone erhöhte Feuchtegehalte vorzufinden sind. In der nordorientierten Wand liegen wegen der fehlenden solaren Erwärmung der Wand zu diesem Zeitpunkt noch deutlich höhere Wassergehalte vor. Im darauf folgenden halben bzw. ganzen Jahr trocknet die Südwand mit ihrem niedrigen Anfangswassergehalt nur noch unwesentlich weiter aus, während in der Nordwand eine deutliche Abnahme des Wassergehaltes zu beobachten ist. Für die Ziegelwand mit Dämmputz sind die gemessenen Feuchteverteilungen in Bild 43 rechts dargestellt. Bei der Probennahme im März liegen nur im äußeren Drittel der Wand hohe Feuchtegehalte vor. Die Ziegel trocknen bis zur nächsten Probennahme im September bis auf knapp oberhalb des praktischen Feuchtegehaltes von etwa 0,5 Vol.-% aus. Der Wassergehalt des Dämmputzes halbiert sich im gleichen Zeitraum von 4 Vol.-% auf 2 Vol.-% (praktischer Feuchtegehalt der Laborproben 1,4 Vol.-%). Die als gestrichelte Linien mit eingezeichneten Rechenergebnisse zeigen, dass die Berechnungen das Austrocknungsverhalten der Wände gut wiedergeben.

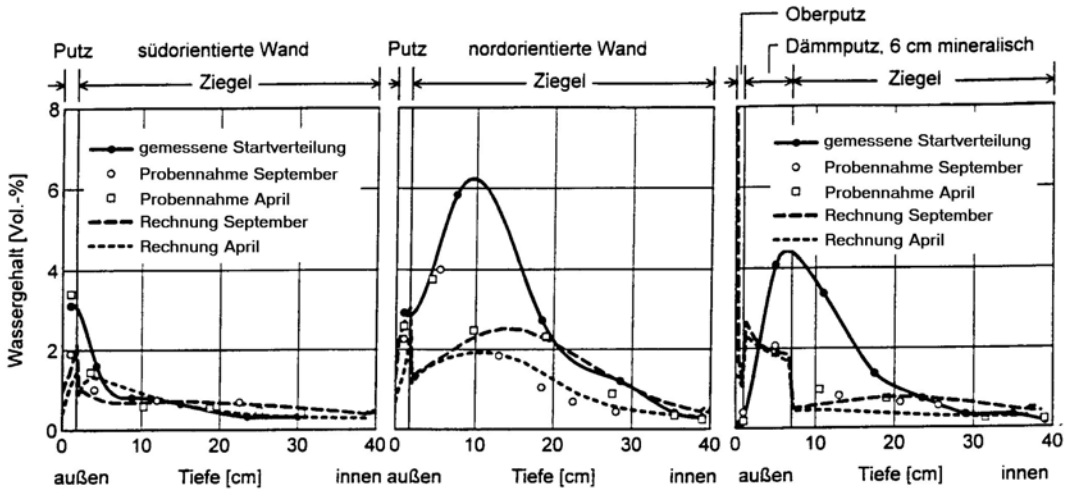


Bild 43: Gemessene und berechnete Wassergehaltsprofile der untersuchten Ziegelwände.

Die an der süd- und nordorientierten normal verputzten Ziegelwand mit Hilfe von Wärmeflussmessern ermittelten Wärmeströme sind als Wochenmittelwerte in Bild 44 für den Zeitraum von November bis März eingezeichnet (Punkte). Die südorientierte Wand (Bild 44 oben) zeigt wegen der solaren Strahlungsgewinne über die Messzeit gemittelt um mehr als 15 % niedrigere Wärmeverluste als die nordorientierte Wand (Bild 44 Mitte). Die Rechenergebnisse (Linien) stimmen für beide Wände gut mit den Messungen überein. Auch der Einfluss der geographischen Ausrichtung der Wand auf die Wärmeverluste wird korrekt wiedergegeben. Bei der mit Dämmputz versehenen Wand ist der Wärmestrom durch die im Vergleich zum Ziegel niedrigere Wärmeleitfähigkeit des Dämmputzes weiter reduziert. Auch hier ergibt die

Rechnung eine recht gute Übereinstimmung mit den messtechnisch gewonnenen Ergebnissen.

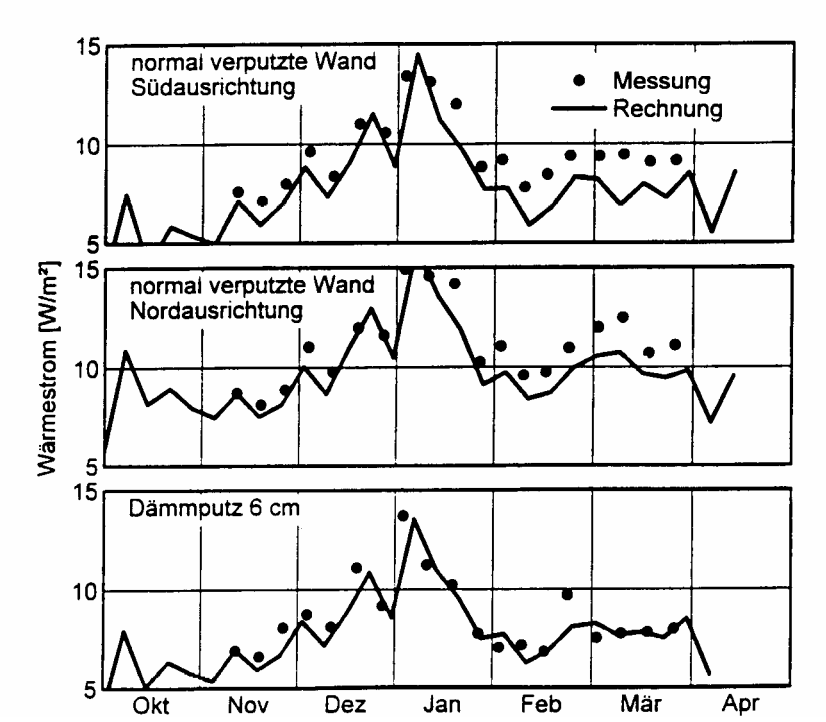


Bild 44: Verlauf der gemessenen und berechneten Wärmeströme.

6 Literaturrecherche – Auswahlliste von Altbaumaterialien

Es ist notwendig bei der Vielfalt an Altbaumaterialien, eine angemessene Auswahl zu treffen. Dazu bedarf es einer eingehenden Literaturrecherche historischer Quellen. Das Erscheinungsdatum der gesichteten Bücher und sonstigen Werke reicht bis in die 30er Jahre des 20. Jahrhunderts zurück. Die regionalen Einschränkungen der Transportmöglichkeiten früherer Epochen führen zu einer Vielzahl an Altbaumaterialien, die es zu gruppieren gilt. Aus den Gruppen werden die Materialien ausgewählt, die mit Materialkennwerten und Zusatzinformationen versehen, Eingang in die Datensammlung finden.

6.1 Literaturquellen

In Bibliotheken findet sich eine umfangreiche Anzahl historischer Literaturquellen zum Thema Wärmeschutz im Hochbau. Diese sind stark verstreut und auch thematisch nicht immer klar zuordenbar. Der Art nach handelt es sich um Normen, Bücher, Berichte, Auszüge aus Forschungsarbeiten u.ä.. Die älteste im Zusammenhang mit der hier erstellen Materialdatensammlung verwendete Literaturquelle stammt aus dem Jahr 1932. Das Literaturverzeichnis zu diesem Kapitel enthält alle Informationsquellen, die gesichtet und ausgewertet wurden, um die im Folgenden beschriebene Materialauswahl zu treffen.

6.2 Vorauswahl der Materialien

Zur Vorauswahl der Materialien bzw. Materialgruppen werden die vorgefundenen Quellen gesichtet und ein Überblick der verwendeten Baustoffe erstellt. Dieser ist als Basis für den weiteren Auswahlvorgang zu verstehen.

Es wird von zwei Kriterien für die Berücksichtigung von Materialien in der Datensammlung ausgegangen, um eine möglichst breite Datenbasis zu schaffen. Ein Aspekt ist die Bedeutung bzw. die Verbreitung eines Materials. Wird ein bestimmtes Material in bestimmten Konstruktionen oder durch bestimmte Umstände häufig eingesetzt, muss es Eingang in die Datensammlung finden. Um eine möglichst große Menge an Materialien, bei gleichzeitig hoher Qualität der Inhalte, zu erfassen, ist es naheliegend, bereits vorhandene Materialproben ebenfalls zu berücksichtigen und existente Datensätze aufzunehmen. Somit gehen in den Instituten in anderen Zusammenhängen erforschte Kennwerte nicht verloren und werden einer breiten Nutzergruppe zur Verfügung gestellt. Die vorhandenen Stoffproben bieten die Möglichkeit, eine Reihe von kompletten Datensätzen zu erhalten.

Als Ergebnis der Literatur- und Informationsauswertung wird die Datenbasis von folgenden Materialgruppen ausgehen aufgebaut:

- Mauerwerksbildner
- Putze und Mörtel
- Innenbekleidungen
- Dämm- und Schüttstoffe
- Anstriche, Folien und Bahnen
- Materialien des Dachbereichs

Diese Auflistung stellt jedoch nicht die später beschriebenen Kategorien dar, sondern den Ausgangspunkt für die spezielleren Untersuchungen.

Es werden exemplarisch Materialien aus verschiedenen Quellen den o.g. Materialgruppen zugeordnet, um typische Vertreter zu benennen. Gleichzeitig werden die Literaturangaben hinsichtlich eines ausgewählten Materialkennwertes, in diesem Falle der Wärmeleitfähigkeit, verglichen. Der Vergleich umfasst die Wärmeschutznorm des Hochbaus DIN 4108 in den Ausgaben Juli 1952 und Mai 1960 sowie verschiedene Bücher und Veröffentlichungen. Tabelle 7 enthält die Materialien mit den Angaben zur Wärmeleitfähigkeit aus den einzelnen Quellen.

Tabelle 7: Exemplarische Zuordnung von Materialien inkl. der Wärmeleitfähigkeit bezüglich der festgelegten Materialgruppen.

Vorauswahl/Material	**DIN 4108 – Juli 1952x**	**DIN 4108 – Mai 1960**	**[Literatur]**
M a u e r w e r k s b i l d n e r			
Klinker	Hochbauklinker, Mauerwerk aus Mauerziegeln (DIN 105)	Wie vor, jedoch Angabe der Rohwichte >1900 kg/m³	Hochbauklinker KMz 350, Dichte >1900 kg/m³ [74]
λ [W/(m K)]	1,050	1,050	1,050
gewählt	**Hochbauklinker KMz 350 aus Verblendmauerwerk**		
Vollziegel	Vollziegel, Vormauerziegel, Hochlochklinker (DIN 105)	Vollziegel, Vormauerziegel (DIN 105), unterschiedliche Rohwichte	Vollziegel Mz und Vormauerziegel VMz untersch. Dichte [74]
λ [W/(m K)]	0,791	0,466 – 0,791	0,520 – 0,790
gewählt			**Vormauerziegel VMz mit 1800 kg/m³**
Hochlochziegel	Porenziegel, Langlochziegel und Hochlochziegel (DIN 105) 1200 kg/m³ oder 1400 kg/m³	Lochziegel, Vormauerlochziegel (DIN 105), unterschiedliche Rohwichte	Hochlochziegel HLz mit Dichte von 1200 kg/m³ und 1400 kg/m³ [74]
λ [W/(m K)]	0,524 u. 0,605	0,466 – 0,605	0,520 u. 0,600
gewählt			**Hochlochziegel HLz 1,4 mit1400 kg/m³**
Kalksandstein	Kalksandsteine (DIN 106) Kalksand-Vollsteine	Kalksandsteine (DIN 106 Bl. 1)Dichte zwischen 1000 und >1800 kg/m³, ver-schiedene Formen	Kalksand-Vollsteine KSV, -Lochsteine KSL, -Hohlblocksteine KSHbl [74]
λ [W/(m K)]	0,989	0,501 – 1,050	0,560 – 1,100
gewählt			**Kalksand-Lochstein KSL 1,4 mit1400 kg/m³**
Gasbeton (Porenbeton)	Gas-, Schaumbeton- und Leichtkalkbetonsteine (DIN 4165), dampf- und luftgehärtet	Gas- und Schaumbetonsteine (DIN 4165) und Leichtkalkbetonsteine, dampfgehärtet, Wie vor, luftgehärtet	Gasbetonsteine, dampfgehärtet (DIN 4165) GS 25/50/75 von 470 bis 780 kg/m³ [74]
λ [W/(m K)]	0,233 – 0,698	0,140 – 0,699	0,330 – 0,410
gewählt			**GS 25–470 kg/m³** oder **GS 75–780 kg/m³**
Schwemmstein (Bimsbeton)	Bimsbeton und Beton aus geschäumter und granulierter	Bimsbeton und Beton aus geschäumter und granulierter	Hüttenschwemm-steine (DIN 399), Schwemmsteine aus

	Hochofenschlacke	Hochofenschlacke	Naturbims (DIN 1059); als Hohlblöcke und Formsteine (DIN 4152 und 4153) [1]
λ [W/(m K)]	0,291 – 0,466	0,291 – 0,466	0,200 – 0,790 [74] und [104]
gewählt	**GS 25–470 kg/m³** oder **GS 75–780 kg/m³**		
Fachwerk-Ausfachung	Massivlehm und Lehmformlinge, Strohlehm, Leichtlehm	Massivlehm und Lehmformlinge, Strohlehm, Leichtlehm	Lehmbewurf (Strohlehm) auf Stakung, Ziegelmauerwerk [103]
λ [W/(m K)]	0,466 – 0,931	0,466 – 0,931	0,470 u. 0,700 [104]
gewählt	**Lehmbewurf aus Strohlehm** oder **Grünlinge**		
Natursandstein	Porige Natursteine (Sandstein, Muschelkalk, Nagelfluh usw.)	Porige Natursteine (Sandstein, Muschelkalk, Nagelfluh usw.)	Regional unterschiedlich, v.a. für Grundmauern, Sockelbereich
λ [W/(m K)]	2,330	2,330	2,300 (bei 2600 kg/m³) [104]
gewählt	**2 Natursteine IBP**		
Ziegelsplittbeton-steine	Keine Angaben zu entspr. Steinen, nur bzgl. Ziegelsplittbeton	Keine Angaben zu entspr. Steinen, nur bzgl. Ziegelsplittbeton	Als Hohlblocksteine bedeutend beim Wiederaufbau nach 1945 [74]
λ [W/(m K)]	k.A. für Steine, nur für entsprechenden Beton	k.A. für Steine, nur für entsprechenden Beton	k.A. für Steine, jedoch für Schwerbeton und Wandbauplatten aus Ziegelsplitt [74]
gewählt	**Hohlblocksteine aus Ziegelsplittbeton nach DIN 4155**		
Schlackenbeton-blocksteine	Keine Angaben zu entspr. Steinen, nur bzgl. Steinkohlen-schlackenbeton	Keine Angaben zu entspr. Steinen, nur bzgl. Steinkohlen-schlackenbeton	Einschalige Außenwand nach [73]
λ [W/(m K)]	k.A. zu Steinen	k.A. zu Steinen	0,430
gewählt	**Schlacken-Hohlblockstein SHbl** (300/240/238mm)		
Stampfbeton	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt	**keine Angabe**		

Tuffsteine	Keine Angaben	Keine Angaben	Verwendung in Steinputzen (steinmetzmäßige Bearbeitung) und Tuffsteinbetonen
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt			**keine Angabe**
P u t z e u n d M ö r t e l			
Kalkputz	Kalkmörtel, Kalkzementmörtel, Mörtel aus hydraulischem Kalk	Kalkmörtel, Kalkzementmörtel, Mörtel aus hydraulischem Kalk	Kalkputz (Kalkmörtel, hochhydraulisch) [74]
λ [W/(m K)]	0,873	0,873	0,810
gewählt			**Kalkputz 1600 kg/m³** nach [74]
Kalkzementputz	Kalkmörtel, Kalkzementmörtel, Mörtel aus hydraulischem Kalk	Kalkmörtel, Kalkzementmörtel, Mörtel aus hydraulischem Kalk	Kalk-Zementputz, miner. Edelputz, Kalk-Zement-Porenputz [74]
λ [W/(m K)]	0,873	0,873	0,870
gewählt			**Kalk-Zementputz 1900 kg/m³** nach [74]
Zementputz	Zementmörtel	Zementmörtel	Zementputz, Kunststoff-Zementputz [5]
λ [W/(m K)]	1,400	1,400	1,400 [104]
gewählt			**Zementputz 2100 kg/m³** nach [74]
Kunstharzputze	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt			**keine Angabe**
I n n e n b e k l e i d u n g e n			
Gipsdielen	Gipsdielen (Wandbauplatten aus Gips nach DIN 18163)	Gips (Gipsdielen),Gips mit Füllstoffen, Hohlräumen, Poren (Wandbauplatten aus Gips nach DIN 18163)	Gipsdielen, Gips-Wandbauplatten mit Füllstoffen, Hohlräumen oder Poren [1], [74]
λ [W/(m K)]	0,466 u. 0,582	0,408 – 0,582	0,290 – 0,700 [74]
gewählt			**Gips-Wandbauplatte 1000 kg/m³** nach [74]
Hourdisplatten (Ziegelplatten)	Keine Angaben	Keine Angaben	Tonhohlplatten (Hourdis) [1], aus

			Ziegelsplitt [74], ACE-Hourdis-Elemente [75]
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	0,580 [74]
gewählt			**Hohltonplatte (Hourdis)**
Schilfrohrrabitz	Keine Angaben	Keine Angaben	Rohrgewebe, einfach und doppelt, aus Schilfrohr [131], [75]
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt			**Rohrgewebe aus Schilfrohr**
Holzwolleleicht-bauplatten, verputzt	nur Angaben zu Holz-wolleleichtbauplatten (DIN 1101) von 15mm bis >50 mm	nur Angaben zu Holz-wolleleichtbauplatten (DIN 1101) von 15mm bis >50 mm	Putzträger, organ. Dämmstoff, Plattenwände [1], [131], [75]
λ [W/(m K)]	0,082 – 0,140 abhängig von Plattendicke	0,082 – 0,140 abhängig von Plattendicke	0,081 – 0,140 Plattendicke und zugehörige Dichte von 400 bis 550 kg/m³ [74]
gewählt			**Heraklith-Platte, 25 mm, 450 kg/m³**
D ä m m u n g / S c h ü t t u n g e n			
Kork	Korkplatten von 120 bis 200 kg/m³	Korkplatten von 120 bis 200 kg/m³	Back-Kork, expan-dierter Kork, Kork-platten, nur selten als Füllstoff [75]
λ [W/(m K)]	0,041 – 0,046	0,041 – 0,046	0,040 u. 0,044 [74]
gewählt			**Expandierte Korkplatte, 160 kg/m³**
Weichfaserplatten	Keine Angaben	Keine Angaben	Leichtbauplatten aus weichen, zusammengepressten Fasern [75]
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	0,0343 0,0390 [131]
gewählt			**Torfplatte** (Torfoleum, Torfisotherm, Dyckerhoff-D-Platten) **Holzweichfaserplatte** (GUTEX, PAVATEX)
Kieselgur	Keine Angaben	Keine Angaben	Kieselgur-Beton, K.-Granulat, K.-Steine, K.-Platten, K.-Wärme-schutzmassen [75]

λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt			**Beton, Platten, Granulat**
Hochofenschlacke	Steinkohlenschlacke, Hochofenschaum-schlacke	Steinkohlenschlacke, Hochofenschaum-schlacke	Hüttenschlacke, Kunstbims [75]
λ [W/(m K)]	0,187 u. 0,140	0,187 u. 0,140	k.A.
gewählt			**Hüttenbims, Thermosit** nach [131]
Anstriche, Folien und Bahnen			
Anstriche	Keine Angaben	Keine Angaben	Anstriche nach DIN 55945 [75] unspezifisch
λ [W/(m K)]	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll
gewählt			**keine, große Vielfalt**
Bituminöses Papier / Ölpapier	Keine Angaben	Keine Angaben	Bitumenpapier als Auflage von Mineralfaser-Matten [75]
λ [W/(m K)]	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll	nicht sinnvoll
gewählt			**Bitumenpapier** [75]
Dachpappe	Dachpappe 1100 kg/m³	Dachpappe 1100 kg/m³	Drei prüfbare Dachpappen [131]
λ [W/(m K)]	0,187	0,187	k.A.
gewählt			**625er, 500er, 333er**
Materialien des Dachbereichs			
Altholz	Keine Angaben, jedoch für Holz, lufttrocken nach DIN 4074	Keine Angaben, jedoch für Holz, lufttrocken nach DIN 4074	Schnitt- und Güte-klassen nach DIN 4074 und 68365 [104]
λ [W/(m K)]	0,140	0,140	0,140 [74]
gewählt			**Fichten- und Eichenholz**
Dachziegel	Keine Angaben	Keine Angaben	Verschiedene Ziegelformen aus gebranntem Ton oder Beton [131], [104]
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt			**Ton- und Betonziegel**

Reetdächer	Keine Angaben	Keine Angaben	Schilfrohr [104]
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt			**Schilfrohr**
Schindeln	Keine Angaben	Keine Angaben	Besonders in waldreichen Gebirgsgegenden [104]
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt			**diverse Holzarten**
Schiefer	Keine Angaben	Keine Angaben	Glimmer-, Mergel- und Tonschiefer [75]
λ [W/(m K)]	k.A.	k.A.	k.A.
gewählt			**Schieferart**

Insgesamt verwendete und ausgewertete Literatur: [1] [10] [16] [19] [20] [21] [27] [28] [29] [30] [49] [51] [52] [53] [55] [58] [59] [60] [61] [73] [74] [75] [83] [99] [100] [103] [104] [118] [123] [124] [130] [131] [134] [141][142].

7 Auswahl der Materialien

Die in Kapitel 6 beschriebene Auswahlliste wird dahingehend spezifiziert, dass konkrete Materialien festgelegt werden, die einer eingehenderen Betrachtung unterzogen wurden. Diese ist nicht als abgeschlossenes System zu verstehen, sondern steht nach Projektende der Erweiterung offen. Für das Erreichen der Projektziele war jedoch eine Begrenzung des Umfangs erforderlich.

7.1 Festlegungen

Aus den genannten Gründen fand eine Festlegung von Materialien statt, für die es relevante hygrothermische Kennwerte zu ermitteln galt. Die Festlegung und Beschreibung der Kennwerte erfolgt ausführlich in Kapitel 4.1. Für die einzelnen Gruppen wird eine Auswahl an Materialien getroffen, die mit Blick auf die energetische Altbausanierung als repräsentative Vertreter angesehen werden. Die Auswahl ist nicht hinsichtlich der Vielfalt an Materialien beschränkt sondern bezüglich der Menge unterschiedlicher Gruppenvertreter für die erste Version der Datensammlung. Neben den bekannten Baustoffen sind auch Altbaumaterialien vertreten, die in der Gegenwart keine Verwendung mehr finden, in der Altbausubstanz aber enthalten sein können. Zu nennen sind beispielsweise Torfmatten, Seegras oder Zellulosefolien als Dämmstoffe oder Ziegelsplittbeton als wichtiger Baustoff der Nachkriegszeit. Während erstgenannte Materialien bereits ausgetauscht oder ersetzt sein könnten, sind Ziegelsplitt- und auch Bimsbeton als Wand- oder Deckenbildner häufig anzutreffen.

Manche Baustoffe erleben eine Renaissance und werden in begrenztem Umfang wieder eingesetzt. Durch veränderte Rezepturen und moderne Fertigungstechnologien ist es wichtig, diese hinsichtlich der Kennwerte von den Altbaustoffen zu differenzieren.

In einem ersten Ansatz wurde folgende Materialauswahl festgelegt:

- Klinker und Ziegel (Voll- und Lochziegel)
- Kalksandstein
- Porenbeton
- Bims
- Fachwerk (Hölzer und Ausfachungsmaterialien)
- Natursandstein
- Betonsteine
- Beton
- Tuffstein
- Putze
- Holzwerkstoffe
- Innenbekleidungen
- Dämmungen und Schüttungen
- Anstriche
- Dachpappen
- Dachbereich (Dacheindeckungen allgemein)
- Calciumsilikatplatten

Diese erste Materialauswahl wurde im Verlauf der Projektbearbeitung spezifiziert und den Erfordernissen der Altbausanierung angepasst, woraus sich letztendlich die abschließende Katalogstruktur ergibt. Den Katalogen wurden die konkret gefundenen Materialien zugeordnet. Dabei gibt es keine Beschränkungen, wie viele Materialien pro Katalog eingestellt werden können. Die Materialien wurden grundsätzlich danach unterschieden, ob es sich um Altbaumaterialien oder moderne Produkte für die Sanierung handelt.

Im Folgenden werden Materialien vorgestellt, die im Auswahlprozess genauer betrachtet wurden, um vorhandene Kennwerte und Informationen zu identifizieren.

Tabelle 8: Überblick zu vorhandenen Materialkennwerten und Informationen zu ausgewählten Materialien im Rahmen des Auswahlprozesses.

M a u e r w e r k s b i l d n e r			
Bims – als Schüttung, Leichtbeton, Leichtbetonsteine			
Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]	Evtl.	
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]	Evtl.	
Beschreibung und Hinweise nach [142] ▪ Systematischer Abbau seit 1845 zur Schwemmsteinherstellung im Gebiet Neuwieder Becken / Laacher See ▪ Entstehung der Rheinischen Bimsindustrie mit lokaler Bedeutung ▪ Anfänglich Zusetzen von Kalkbrühe zum Bimskies und Herstellung von Vollsteinen in Einzelformen von Hand ▪ Ausdehnung der Absatzgebiete ▪ Ab den 40er/50er Jahren Verwendung von Zementen bzw. Spezialbindemitteln – Formung komplizierter Bauelemente, Erzielen höherer Festigkeiten ▪ Massenproduktion unter Einsatz von Automaten ▪ Entwicklung vom Schwemmstein zum Bimsbetonstein ▪ Heute bundesweiter Marktanteil bei Mauersteinen von 10% [16]			
Natursandstein			
Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]	×	

Sättigung / Porosität	[Vol.-%]	×	

Beschreibung und Hinweise nach [100] – Natursteine allgemein

- Bis ins 17. Jh. Für Wohnbauten kaum von Bedeutung – hauptsächlich Holzfachwerk-Bauweise
- Forderung nach Steinbau in den Städten durch Stadtbrände
- Verbreitungsgebiet im Umkreis von ca. 50 km vom Gewinnungsort oder über größere Distanzen entlang schiffbarer Flüsse
- Ab Mitte 19. Jh. bis zur Jahrhundertwende des 20. Jh. Verwendung bei bedeutenden Bauwerken als unverputzte Außenwände – Repräsentationszwecke

Beschreibung und Hinweise nach [28] – Natursandstein

- In Deutschland am weitesten verbreiteter und abgebauter Naturwerkstein
- Wirtschaftlich nutzbare Ressourcen in küstennahen Meeresgebieten und breiten Flussdeltas
- Keine Eingrenzung zu Verbreitung / Verwendung im Wohngebäude-bestand (Information DNV)

Tuffe und Travertine

Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	Evtl.	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]	Evtl.	
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]	×	

Beschreibung und Hinweise

- Tuffe sind porige Natursteine vulkanischen Ursprungs während Travertine wegen der Entstehung als Kalk- oder Quellsinter bezeichnet werden
- Steinbrüche meist nur von lokaler Bedeutung, nur bei naheliegenden Schifffahrtswegen Transport über größere Entfernungen (Kölner Dom)
- Abbaugebiete für Tuffe sind Weibern, Ettringen und Kruft bei Mendig in der Eifel, Steinbrüche an der Limburg bei Sasbach (für Münster in Breisach), Mayen [51]
- Travertinvorkommen bei Königslutter (lokale Bez. Duckstein), Ehringsdorf bei Weimar, Bad Langensalza und Bad Cannstatt (Raum Stuttgart)
- Umfangreiche hygrische Kennwerte für vulkanische Gesteine aus Hessen und deren Verwendung [100]

Betonsteine			
Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]	Evtl.	
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]	Evtl.	

Beschreibung und Hinweise

- Kontakt zu Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (BDZ) und Bundesverband Deutsche Beton- und Fertigteilindustrie (BDB)
- Keine Aussagen über Verbreitung oder historisch am häufigsten verwendete Arten von Betonsteinen möglich
- Angebot zur Sichtung der Bibliothek des BDB in Bonn mit gesammelten Zeitschriften „Betonsteinzeitung“ (heute „Betonwerk- und Fertigteiltechnik“) seit 1935
- Allgemeine Informationen und Kennwerte zu Betonen
- Konkrete Angaben zu Voll- und Hohlblocksteinen nur für Leichtbetone (siehe Bims)

I n n e n b e k l e i d u n g e n

Holzwolle-Leichtbauplatten			
Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]		×
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]		×

Schilfrohrmatten / Schilfrohrplatten			
Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	

Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]		×
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]		×

Beschreibung und Hinweise

- Magnesia- und Zementgebundene Holzwolle-Leichtbauplatten grundsätzlich für Außenanwendung als Putzträger geeignet
- So eingesetzt bereits in den 20er/30er Jahren bei Holzständerbauten mit innen- und außenseitiger HWL-Beplankung (Weißenhof-Siedlung in Stuttgart
- Im Dritten Reich mit HWL-Platten realisiertes Bauprogramm für sozial Schwache
- Niebelungenhalle in Passau, Bj. 1934/35, Abriss in diesem Jahr
- Zementgebundene reagieren etwas „unruhiger" auf Feuchtigkeit
- Wichtig: sachgerechte Verarbeitung, Einbau im trockenen Zustand
- Bauschäden in den 50er und 60er Jahren wegen falscher Informationen über Lagerung zementgeb. Platten, negative Auswirkungen auf Verwendung entsprechender Platten
- Aktuelle Messungen ergeben c von 2100-2200 J/(kgK) [lt. Heraklith]

Dämmungen und Schüttungen

Kork als Schrot, in Plattenform, bituminiert, expandiert

Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]		×
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]		×

Holz-Weichfaserplatten

Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	

Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]		×
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]		×
Torf-Weichfaserplatten			
Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]		×
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]		×
Seegras-Matten			
Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]		×
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]		×
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]		×
Sägemehl und Hobelspäne			
Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	

Diffusionswiderstandszahl	[-]		×
Sorption	[M.-%]		×
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]		×
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]		×

Stroh – allgemeine Nennung und in Form von Platten

Kennwert	Einheit	Vorhanden	
		ja	nein
Rohdichte	[kg/m³]	×	
Wärmekapazität	[J/(kg K)]	×	
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]	×	
Diffusionswiderstandszahl	[-]	×	
Sorption	[M.-%]	×	
Wasseraufnahme	[kg/(m² $h^{0,5}$)]		×
Sättigung / Porosität	[Vol.-%]		×

Beschreibung und Hinweise

- Bis auf Hanf und Cellulose als Schüttung alle angestrebten Materialien mit Kennwerten erfasst bzw. aufgefunden
- Darüber hinaus Vielzahl weiterer Materialien dieser Gruppe, wie z.B. diverse Faserdämmstoffe, Kunststoffschäume, Kokosfasern, Bauwolle, verschiedene Schlacken als Schüttung, Leichtzuschläge, Leichtbetone, Perlit, Lehm etc.

Anstriche, Dachpappen, Dacheindeckungen

Beschreibung und Hinweise

- Kennwerte zu Anstrichen in großem Umfang in [133], [141] und [124 – S. 202]
- Dachpappen und bitumenhaltiges Papier (Ölpapier) umfangreich in [141] und [53]
- Dacheindeckungen aus Ton, Beton und Metall kaum erwähnt, Nennung von Strahlungszahlen und Emissionsgrad in [132], in [124] und [19]

7.2 Kategorien

Die Materialien werden in Kategorien eingeteilt. Bei der Festlegung der Kategorien wird die Einteilung nach [32] berücksichtigt und speziell für die Anforderungen der Altbausanierung angepasst.

Die Kategorien dienen der Gruppierung der in der Datensammlung enthaltenen Materialien. Dadurch existiert eine übersichtliche Darstellung, die ein zügiges Auffinden gesuchter Kennwerte ermöglicht und zudem einen Gesamtüberblick zu den vorhandenen Materialien einer Kategorie erlaubt. Die Kategorien selbst bieten als obere Ordnungsebene eine Übersicht der vorkommenden Materialgruppen und damit den zentralen Ausgangspunkt für eine freie Suche nach Materialkennwerten. Außerdem finden sich innerhalb einer Materialgruppe Alternativen für den Fall, dass genau das gesuchte Material oder die gesuchte Rohdichteklasse nicht enthalten sind.

Im Folgenden werden die Kategorien aufgelistet und mit Beispielen konkretisiert.

- Anstriche (Innen- und Außenwandfarben, Bitumenhaltige Beschichtungen, Schutz- und Sperranstriche, etc.)
- Putze, Mörtel und Ausfachungen (Gips-, Kalkzement-, Kalk-, Wärmedämmputze und -mörtel, Estriche, etc.)
- Mauersteine (Kalksandstein, Ziegel, Porenbeton, Bimsbetonsteine, Normal- und Schwerbetonsteine, etc.)
- Natursteine (Sandstein, Granit, Bims, Marmor, Schluff, Tuff, etc.)
- Zementhaltige Baustoffe (Beton, Porenbeton, Estriche, Leichtbeton, Kalkzementputz, etc.)
- Dämmstoffe (Wärmedämmputz, Naturdämmstoffe, Schaumkunststoffe, Faserstoffe, Montageschäume, etc.)
- Bauplatten (GKP, Holzwerkstoffe, Faserplatten, Lehmbauplatten, etc.)
- Holz (Holzwerkstoffe, Massivholz, Faserplatten, Fachwerk, etc.)
- Naturstoffe (Lehm, Schilf, Hanf, Flachs, Zellulose, Stroh, Torf, Bims, etc.)
- Erden und Böden (Sand, Lehm, Humus, Erde, Kies, Schotter, Torf, etc.)
- Fassadenbekleidungen, Bodenbeläge und Eindeckungen (Vorsatzschalen, Fliesen, Flachverblender, Spaltklinker, etc.)
- Folien und Abdichtungsstoffe (Bitumenbahnen, PTFE, Dampfbremsen, Montageschäume, etc.)
- Sonstige (Metalle, Glas, Dachstein, Luftschichten, Sondermaterialien, etc.)

Einige Materialien können in mehrere Kategorien eingeteilt werden, da sie verschiedene Einsatzmöglichkeiten bieten. In der Datenbank können maximal drei Kategorien für jedes Material vergeben werden.

8 Beschreibung der Datenbank

8.1 Konfiguration

8.1.1 Netzwerk

Server

Als Hardware werden zwei Sun Enterprise 450 [139] mit jeweils 2GB RAM, 2x400Mhz UltraSparcII und zwei 18GB Seagate Cheetah Festplatten (gespiegelt) verwendet.

Eine der beiden E450 ist mit ihrem physikalischen Interface (IP-Adresse 153.96.181.7) mit der DMZ verbunden. Zwei virtuellen Interfaces wurden die IP-Adressen 153.96.181.8 bzw. 153.96.181.9 zugewiesen. Der Nameserver (auf KSI und KSO und auf den FHG-Nameservern) hat Einträge für www.masea-ensan.de (153.96.181.8) und www.masea-ensan.com (153.96.181.9). Über beide url's gelangt der Benutzer zur gleichen Anwendung. Die zweite Maschine (153.96.143.31) hängt im Hausnetz (153.96.143.0/24) und dient als Spiegel-Server. Alle mysql-Befehle werden parallel auch auf diesem ausgeführt. Bild 45 zeigt eine schematische Darstellung der, das Projekt betreffenden, Hardware. Der Spiegel-Server wird regelmäßig über den Backup-Server auf Band gesichert.

Firewall

An der Firewall [24] ist lediglich Port 80 (http) und Port 443 (https) für Zugriffe von außen offen. Für Zugriffe von innen ist zusätzlich noch Port 22 (ssh), Port 3306 (mysql) und Port 8080 (tomcat) geöffnet, dabei ist nur Port 22 für das gesamte Netz offen, die beiden anderen nur für 153.96.143.31 (der Spiegel-Server).

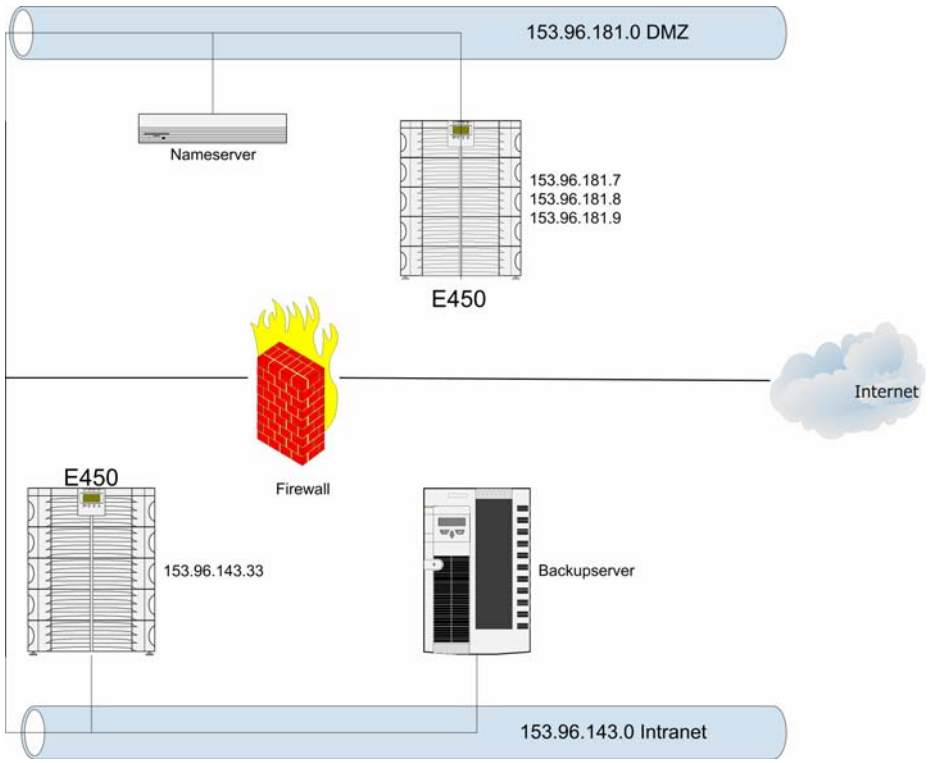


Bild 45: Schematische Darstellung der Hardware.

8.1.2 Software

Nachfolgend werden die Software-Komponenten aufgelistet und beschrieben.

- Datenbank: MySQL-Datenbank in der Version 4.1.18 [101]
- Webserver: Apache2 Webserver [5]
- Anwendungsserver: Tomcat 5.5.20 Anwendungsserver [6]
- Java: Java1.5 [135] diverse Java-Pakete (JFreeChart [105], MySQL-Connector [102], jsf-api [136], hibernate3 [117], xml-api [4], myfaces [8], tobago [9], poi-fs [7], ...)
- LaTeX: LaTeX (teTeX Version 3.0) [25]
- Perl: Perl [107]

Datenbank

MySQL verwendet in der gegenwärtigen Konfiguration UTF-8 (8-bit Unicode Transformation Format) als Standardzeichensatz. UTF-8 umfasst die meisten Alphabete und Schriftzeichensysteme, die derzeit genutzt werden, also nicht nur die lateinischen Buchstaben und arabischen Zahlen, sondern zum Beispiel auch die arabische, griechische, kyrillische, koreanische und die thailändische Schrift. Als Datentabellen finden InnoDB-Tabellen Verwendung, da diese Transaktionen unterstützen. Diverse Einstellungen für die Speicherverwaltung wurden angepasst. Der Master-Slave Modus ist konfiguriert, um Replikation auf den zweiten E450 Server zu ermöglichen.

Webserver und Anwendungsserver

Der Apache Webserver wurde so konfiguriert, dass alle Anfragen an www.masea-ensan.de bzw. www.masea-ensan.com an den Anwendungsserver Tomcat [6] weitergeleitet werden. Dieser wertet die Anfrage aus und die Antwort (generierte HTML-Seite) wird zurück an den Webserver gesendet, die dieser wiederum dem Client ausliefert. Bei Tomcat handelt es sich um einen Anwendungsserver, der (unter anderem) JSP/JSF Code in HTML-Code umsetzt. Für verschlüsselten Zugriff auf sicherheitsrelevante Seiten (login, Bearbeitung von Accountdaten) war die Erstellung eines Zertifikates notwendig. Bei dem erstellten Zertifikat handelt es sich um ein sog. selbstsigniertes [57]. Durch die Selbstsignierung ist eine „Man-in-the-middle-attack"; [144] nicht auszuschließen, es wird jedoch kaum jemand den für einen solchen Angriff notwendigen Aufwand betreiben, um einen Login zu erhalten und damit Materialdaten fälschen/ändern. Durch die Verschlüsselung ist jedoch ausgeschlossen, dass beliebige Personen die Logindaten durch ein einfaches Mitschneiden des Netzverkehrs in Erfahrung bringen, um damit Materialdaten zu editieren.

8.2 Technik

8.2.1 Dateneingabe

Die Materialdaten werden in eine Exceltabelle eingegeben. Um evtl. Literaturverweise nicht mehrfach eingeben zu müssen, wurde eine eigene Literaturtabelle erstellt und die Materialtabelle enthält lediglich Verweise auf Einträge in der Literaturtabelle.

8.2.2 Konvertierung und Übertragung

Um diese Daten in die Datenbank importieren zu können, muß das Microsoft-eigene OLE2 Format gelesen und in SQL-Befehle (SQL=Standard Query Language) umgesetzt werden. Da das Lesen einer Exceldatei ziemlich rechenintensiv ist und eine Überlastung des Servers vermieden werden sollte, wurde entschieden, das Parsen der Exceldateien auf den Clients auszuführen. Dazu dient ein Java-Applet (Bild 46), das auf jedem beliebigen Client lauffähig ist, unter der Voraussetzung, dass auf dem Client Java in mind. der Version 1.4 installiert ist. Ein Applet wird auf dem Client ausgeführt und belastet somit nicht den Server. Auch können etwaige Fehler/Unstimmigkeiten ohne Kommunikation mit dem Server festgestellt und vom Anwender ggf. behoben werden.

Java-Applet zur Konvertierung

Das Applet verwendet zum Lesen der Exceldateien die frei verfügbare Software-Bibliothek POI-FS [7]. Dies ist die wohl vollständigste Implementierung des Microsoft-eigenen, undokumentierten Formats (OLE2). Die geparsten Daten werden nach XML (eXtendedMarkupLanguage) konvertiert und in einem Textfenster ausgegeben. In diesem Textfenster können Korrekturen vorgenommen, oder aber XML-Daten, die über ein externes Programm erstellt wurden, direkt eingegeben werden.

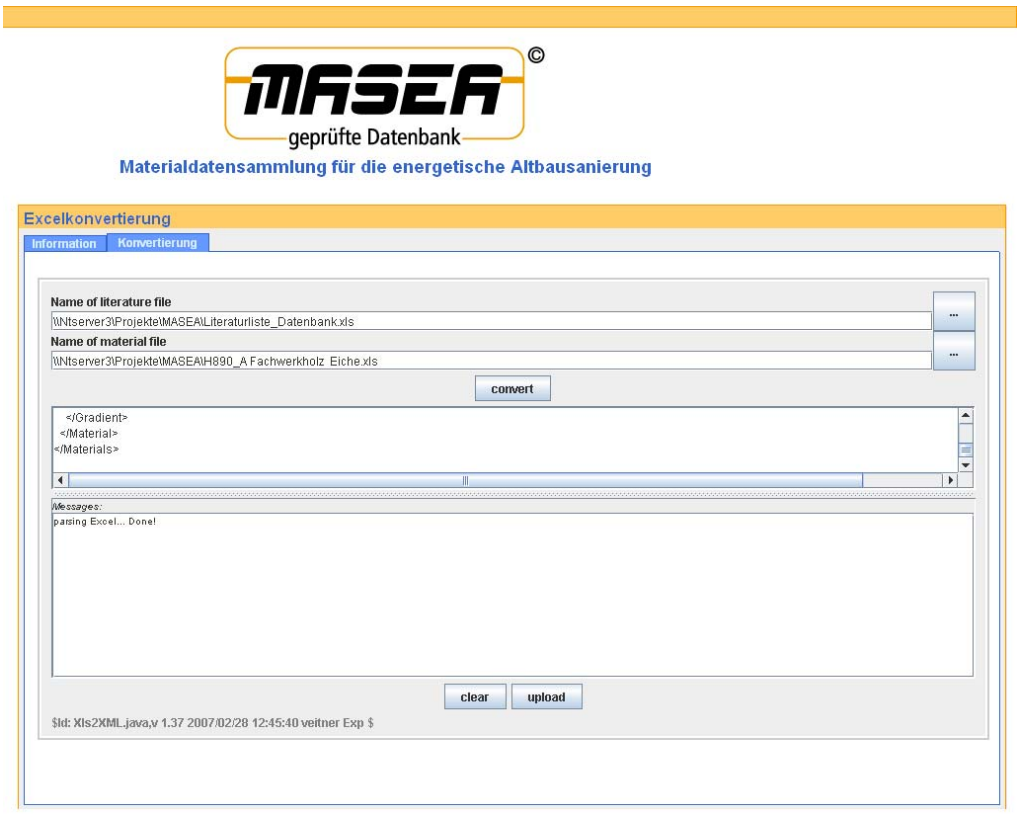


Bild 46: Screenshot des Webfrontends mit geladenem Applet.

Datenübertragung

Die XML-Daten werden aus dem Textfenster gelesen, eventuell vorhandene Bilddaten Base64-codiert mit aufgenommen und anhand einer DTD (DocumentTypeDefinition) auf Gültigkeit überprüft. Wenn das Dokument gültig ist, wird es in komprimierter Form (XML ist ASCII und somit gut komprimierbar) an den Server übermittelt. Auf dem Server nimmt ein Java-Servlet die komprimierten XML-Daten entgegen, dekomprimiert diese, überprüft sie nochmals gegen die DTD (falls über ein anderes Programm direkt Daten an das Servlet übermittelt werden) und konvertiert sie letztlich in eine Java-Objekt-Struktur unter Verwendung von Xerces [4]. Diese Java Objekte werden nun mit Hilfe von Hibernate [11], ein objekt-relationales Mapping Werkzeug, in SQL übersetzt und in die Datenbank (Datenbankschema Bild 47) importiert. Ein solches Mapping Tool implementiert Techniken, die mit handgeschriebenem SQL-Code nur unter beträchtlichem Zeitaufwand und Wissen zu erreichen sind (z.B. Caching, lazy-loading usw.). Auch werden updates nur ausgeführt, wenn sich die Daten geändert haben, was mit handgeschriebenem SQL-Code kaum zu erreichen ist.

Bild 47: Entity-Relationship Diagramm der Datenbank, Gesamtansicht.

8.2.3 Darstellung und Report

Dargestellt werden die Daten durch eine Transformation mittels Xalan [3]), dies ist ein XSLT-Processor der Apache Software Foundation. Xalan transformiert XML-Dateien mittels XSLT-Stylesheets (z.B. in XHTML oder Text). XSL (Extensible Stylesheet Language) ist eine Familie von Sprachen zur Erzeugung von Layouts für XML-Dokumente. Der XSL-Dialekt XSLT kann auch zur Übersetzung/Transformation eines XML-Dialektes in ein anderes Format dienen (meistens in andere XML-Dialekte). Diese Layouts (auch Stylesheets genannt) können in die zu formatierenden XML-Dokumente eingebunden werden, wobei sich die Layouts speziellen Medien zuordnen lassen. So ist es möglich, ein Layout zum Drucken und ein Layout für die Darstellung am Monitor zu verwenden. Die Transformation der XML-Daten in HTML oder PDF hat den Vorteil, daß das Layout für alle darzustellenden Materialien identisch ist und mit verhältnismäßig geringem Aufwand angepasst werden kann. Es sind lediglich die XSL-Transformationsdateien zu bearbeiten.

Die transformierten Daten werden letztlich dem Client/Browser übermittelt. Etwaige Bilddaten werden in einem temporär-Ordner abgelegt und über ein Java-Servlet [67] ausgeliefert, das die (evtl. hochaufgelösten) Bilder in die gewünschte Auflösung (z.B. 72dpi für Monitordarstellung) konvertiert - dies dient der Performance und umgeht die aufwändige händische Erstellung von Bildern in unterschiedlichen Auflösungen.

Die Konvertierung in pdf geschieht mittels Apache-Cocoon [2]. Als Cocoon wird das XML-Publishing-System der Apache Foundation bezeichnet. Dieses Framework wurde geschaffen, um Daten in XML-Form zu speichern und mittels XSL formatiert auszugeben. Als Ausgabeprodukte von XML-Daten können XHTML, PDF, RTF und viele weitere stehen. Cocoon ist ein Publishing Framework Servlet, das ein XML-Quelldokument je nach anfragendem Client in ein beliebiges Zielformat transformiert. Da das PDF-Format primär dem Ausdruck dient, ist hier eine höhere Auflösung der Bilddaten notwendig.

8.2.4 Editor

Es ist müßig, die Exceldaten zu ändern und erneut auf den Server zu übertragen. Auch ist es schwer zu entscheiden, ob ein evtl. bereits vorhandenes Material überschrieben werden soll, eine Fehlermeldung an den Client gemeldet wird oder aber der Name abgeändert und das Material gespeichert werden soll. Die Möglichkeit, dies dem Benutzer zu überlassen, könnte zum ungewollten Überschreiben von Daten führen, da eine Überprüfung der Schreibrechte vom Applet aus nicht bzw. nur unter größerem Aufwand durchgeführt werden kann. Auch bringt nahezu ein jedes Update der Microsoft Office Familie ein geändertes Datenformat mit sich, welches dann vom Applet (bzw. poi-fs) nicht mehr gelesen werden kann. Aus diesem Grund wurde ein Editor auf der Basis von JSP/JSF [125] entwickelt. Java Server Faces (kurz: JSF) ist ein Framework-Standard im Bereich der Webanwendungen. Mit Hilfe von JSF können auf einfache Art und Weise Komponenten für Benutzerschnittstellen in Webseiten eingebunden und die Navigation definiert werden. Es werden nicht die Ausgabeseiten in HTML entwickelt, son-

dern auf einem höheren Abstraktionsniveau aus Komponenten zusammengesetzt. Um die Anwendung besser zu strukturieren, wird strikt zwischen Modell, Ausgabe und Steuerung getrennt, wie es das Model-View-Controller-Konzept vorsieht. Dieser Editor erlaubt das Bearbeiten spezifischer Materialdaten (z.B. Beschreibung), ohne eine erneute langwierige Konvertierung der Exceldaten mit anschließendem Hochladen der xml-Daten.

8.3 Internas und Features

Einheiten und Symbole werden in TeX-Format definiert. Dies führt zu einer anschaulichen Darstellung mehr oder weniger komplexer Ausdrücke und dient der besseren Lesbarkeit. Diese TeX-Ausdrücke werden zur Laufzeit in Bilder konvertiert (textogif, ein Perl-Script, das die Bilder in der benötigten Auflösung generiert).

Die Datenbankstruktur wurde mit Hinblick auf Mehrsprachigkeit entwickelt. D.h. ein Text-Ausdruck ist ein Verweis auf einen sprachabhängigen String in einer eigenen Tabelle. So kann die Datenbank einfach um Sprachen erweitert werden, ohne einen jeden Ausdruck in einem jeden Material übersetzen zu müssen. Gleiche Textbausteine verweisen auf denselben Eintrag (z.B. liegt der Ausdruck „Feuchtespeicherfunktion“; nur einmal in der Datenbank und braucht folglich nur einmal übersetzt zu werden. Die Datenbank ist nicht fixiert auf eine bestimmte Anzahl von z.B. Skalaren. Es können beliebige skalare Werte (z.B. Wärmeausdehnungskoeffizient) hinzugefügt werden, ohne die Datenbankstruktur bearbeiten zu müssen. Das gilt auch für Matrizen (Der Begriff Matrix wird hier für „mehrspaltige“ Daten verwendet). Die erste Spalte fungiert hier als x-Achse und beliebig folgende als y-Wertereihen. Die Graphen aus den „Matrizen“ werden über das Paket JFreeChart erzeugt. JFreeChart ist ein Framework für die Programmiersprache Java, mit welchem auf einfache Weise auch komplexe Diagramme erstellt werden können.

8.4 Entwicklungswerkzeuge

Als Entwicklungsumgebung fand IntelliJ [80] Verwendung. Dies ist eine Entwicklungsumgebung für Java [15], die nahezu keine Wünsche offen lässt. Als Entwicklungsrechner diente eine SunBlade2500 [138] unter Solaris10 [137]. Diese diente mittels einer eingebauten SunPCICard [140] auch als Testumgebung für das Webfrontend unter verschiedenen Betriebssystemen (Windows2000, WindowsXP, Linux) und Browsern (Mozilla, Firefox, IE6).

8.5 Dokumentation

Die Dokumentation zum Quellcode wird nach allen größeren Änderungen aktualisiert und findet sich zusammen mit dem Quellcode unter http://153.96.181.7/docs/masea/.

9 Verfügbarkeit und Nutzung der Materialdatensammlung

9.1 Öffentliche und nichtöffentliche Inhalte

Die Datenbank erlaubt es, den Inhalten einen Status zuzuweisen, der sie als öffentlich oder nichtöffentlich klassifiziert. Öffentliche Inhalte sind dabei alle Inhalte, die uneingeschränkt über den Internetzugang darstellbar sind. Als nichtöffentliche Inhalte sind solche zu verstehen, die ausschließlich den Projektpartnern zur Verfügung stehen werden. Dabei handelt es sich um Daten, die zur Anwendung in speziellen Planungstools aufbereitet sind. Die Datenbank dient damit als Austauschplattform zwischen den Projektpartnern, um nicht zuletzt die Nachhaltigkeit der Forschungsergebnisse sicherzustellen. Nichtöffentliche Inhalte beziehen auch Ergebnisse ein, die noch nicht abschließend validiert sind und zwischen den Projektbeteiligten diskutiert werden müssen. Durch die Freigabe solcher Ergebnisse oder Werte können diese in den öffentlichen Bereich überführt und damit frei nutzbar gemacht werden. Dies ist ein entscheidender Punkt und eine wichtige Funktionalität der Datenbank für die Qualitätssicherung der Datenbank-Inhalte.

9.2 Pflege und Weiterentwicklung

Die zum Projektende enthaltene Menge an Materialkennwerten ist als Ausgangsbasis für die Weiterentwicklung der Datenbank zu sehen. Es ist im Sinne der Nachhaltigkeit wünschenswert, die Datenbank inhaltlich zu ergänzen. Über die projektverantwortlichen Institute als Vermittler, haben Firmen, Institute und Verbände die Möglichkeit, Materialkennwerte zur Verfügung zu stellen. Diese werden dann geprüft, um die Qualität der Materialdatensammlung aufrecht zu erhalten und in die Datenbank implementiert.

Neben Altbaumaterialien steht die Datensammlung damit auch für aktuelle Materialien der Sanierung offen. Damit werden die historischen Kennwerte sinnvoll durch solche ergänzt, die potenziell bei der energetischen Sanierung des Gebäudes relevant sind. Durch diese Anwendung der Datensammlung ist eine Finanzierung der Weiterentwicklung und Pflege vorstellbar. Interessierte Firmen können über die beteiligten Instituten Kontakt aufnehmen.

Die Datenbankfunktionalitäten bieten die Option, die Inhalte auch mehrsprachig darzustellen. Dabei handelt es sich nicht um eine Übersetzungsfunktion sondern die Funktionsfähigkeit der Befehle je nach eingepflegter Sprache und deren Verwendung bei Abfragen.

10 Katalog der Materialdatensammlung

Neben der elektronischen Version der Materialdatensammlung besteht der Anspruch, eine rechnerunabhängige Verfügbarkeit der Informationen zu gewährleisten. Durch einen Katalog als Papierform der gesammelten Daten wird diese Forderung erfüllt. Die Entwicklung einer Katalogseite ist die Basis für eine Realisierung dieser Papierform.

10.1 Aufbau und Inhalte

Grundsätzlich enthält der Katalog die gleichen Informationen wie die elektronische Datensammlung. Der Aufbau ist übersichtlich, klar strukturiert und kompakt. Vor allem die hygrothermischen Kennwerte sollen schnell verfügbar sein.

Als entscheidendes Identifizierungsmerkmal ist der eindeutige Name des Materials als hervorgehobene Überschrift enthalten. Der relevante Inhalt der Materialdatensammlung bezieht sich auf die hygrothermischen Materialkennwerte. Diese finden sich in einer tabellarischen Übersicht, wobei nur die Kennwerte dargestellt werden, die auch vorhanden sind. Zur Veranschaulichung und als Hilfe bei der Identifizierung ist neben den Kennwerten ein Bereich für Bilder der entsprechenden Materialien vorgesehen.

Unterhalb der Kennwerte und Bilder sind Zusatzinformationen und Hinweise aufgeführt. Diese dienen ebenfalls der Identifizierung und Zuordnung der Materialien. Die Zusatzinformationen sind in Umfang und Detailtiefe nicht festgelegt und können auch vollkommen entfallen. Sind sie vorhanden, können die damit verbundenen Informationen von der stofflichen Zusammensetzung bis hin zu speziellen Eigenschaften oder deren typischer Verwendung reichen.

Letztlich kann die Papierform Materialfunktionen in Form von Graphen und Diagrammen enthalten, wenn entsprechende Messreihen durchgeführt und die Daten in elektronischer Form hinterlegt und verfügbar sind. Beispielsweise kann auf diese Art der funktionale Zusammenhang des Wasseraufnahmeexperiments dargestellt werden. Je nach Umfang der Messreihen lassen sich weitere Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen darstellen.

Joens Ziegel

Kategorien: Mauersteine

Bauphysikalische Kennwerte

Kennwert	Symbol	Einheit	Wert
Rohdichte	ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	1722
Spezifische Wärmekapazität	c_P	$\left[\frac{J}{kg\,K}\right]$	850
Wärmeleitfähigkeit	λ_r	$\left[\frac{W}{m\,K}\right]$	0.81
Diffusionswiderstandszahl (dry) 23°C - 3/50%	μ	$[-]$	11
Sorption	$u_{(80)}$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	2.2
Freie Wassersättigung	$u_{(f)}$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	288
Wasseraufnahmekoeffizient	W_w	$\left[\frac{kg}{m^2\sqrt{h}}\right]$	14.8
Offene Porosität	Φ	$[Vol.\%]$	40

[1)]Daten nicht gemessen.[2)]Angabe nicht sinnvoll.



Jöns Ziegel Draufsicht



Jöns Ziegel Schnitt

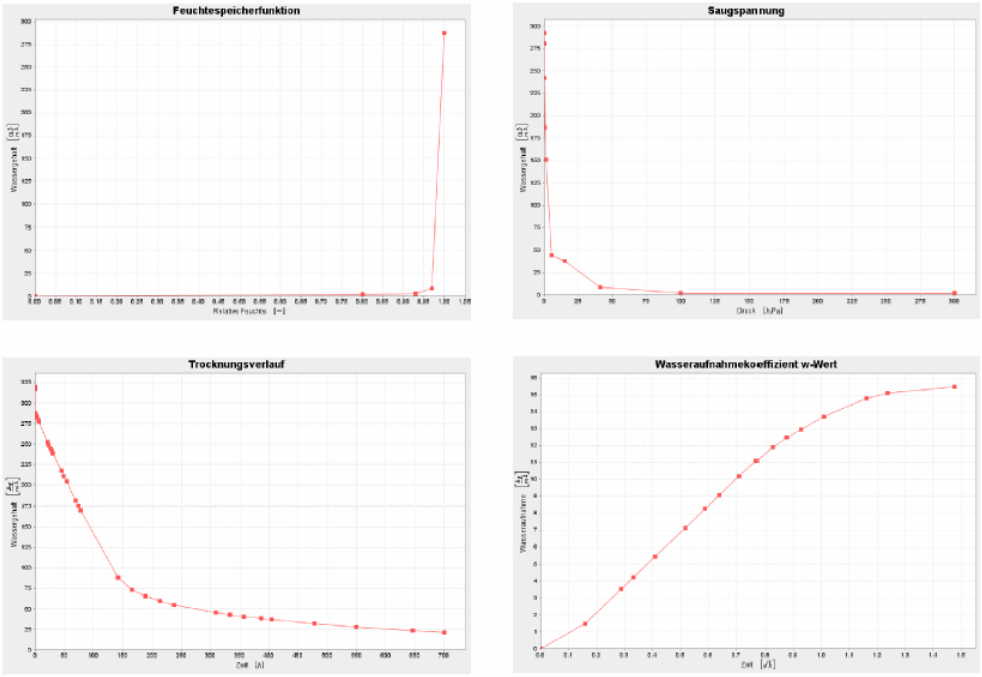
Copyright © 2006 *http://www.masea-ensan.de/*

Bild 48: Katalogseite der Materialdatensammlung mit hygrothermischen Kennwerten und Bildern am Beispiel des Joens Ziegels.

Joens Ziegel

Hinweise und besondere Merkmale

- Ziegel bestehen aus Ton, der bei hohen Temperaturen (ca. 1200°C) gebrannt wird. Die Art der Herstellung sowie die Brenntemperatur verleihen den Ziegelbaustoffen unterschiedliche Eigenschaften. Bestimmte Ziegelarten (z.B. Leichthochlochziegel) haben eine sehr hohe Wärmedämmung. Weitere Vorteile sind der Schallschutz und die Hitzebeständigkeit. Ziegel dehnen sich bei Temperaturschwankungen weniger stark aus als bindemittelgebundene Baustoffe.
- w-Wert Angabe
  - Der angegebene Wert bezieht sich auf den Wasseraufnahmekoeffizient nach 1,5 h; danach durchfeuchtet



Copyright © 2006 *http://www.masea-ensan.de/*

Bild 49: Zweiter Teil der Katalogseite mit Zusatzinformationen und Diagrammen funktionaler Zusammenhänge am Beispiel des Joens Ziegels.

Die Darstellung und Anordnung ist für jedes Material gleich, so dass alle Informationen schnell gefunden werden können. Damit ist es auch unabhängig von den elektronischen Ressourcen möglich, die Materialdatensammlung effizient anzuwenden.

10.2 Verfügbarkeit

Die Papierform ist immer in der aktuellsten Version der elektronischen Datensammlung verfügbar. Möglich wird dies durch die direkte Erzeugung von PDF-Dateien über den Online-Zugang der elektronischen Datensammlung. Sämtliche dort enthaltenen Inhalte lassen sich nach Bedarf in PDF-Dateien umwandeln und ausdrucken. So lässt sich ein jeweils individueller Katalog als Papierform der Materialdatensammlung erzeugen. Jeder Nutzer kann die für ihn relevanten Informationen zusammenstellen und diese sukzessive ergänzen.

Diese sehr flexible Lösung erlaubt zudem eine optimierte Auswahl der zu druckenden Informationen. Technisch bedingt lässt es sich nicht vermeiden, dass zu jeder Rohdichte-Klasse jeweils eine komplette Seite mit sämtlichen verfügbaren Informationen als PDF-Datei erzeugt wird. Dementsprechend werden die Bilder, Zusatzinformationen und Diagramme für das gleiche Material wiederholt erzeugt und dargestellt. Eine andere Lösung ist nicht möglich, da beim Zugriff auf die Datenbank nicht bekannt sein kann, ob dem Nutzer die Zusatzinformationen schon zur Verfügung stehen. Beim Druck können die sich wiederholenden Informationen ausgeklammert werden.

11 Beispielhafte Klassifizierung von Materialvarianten für die MASEA-Materialdatensammlung

11.1 Vorbemerkungen

Der Dresdener Gebäudebestand besteht zum größten Teil aus Ziegelkonstruktionen. Abhängig von der Bauperiode kamen dabei unterschiedliche Ziegel und Mauerwerkstypen zum Einsatz. Lehm und Tonziegel sind die häufig eingesetzten Materialien, wobei die Fassaden häufig verputzt und mit Ornamenten und diversen Zierteilen verkleidet sind. Eine weitere Variante stellt die Verwendung von Zierklinker Bereichen in den Fassaden. Während des zweiten Weltkrieges sind viele Gebäude zerstört worden. Zum Aufbau wurde der alte Mörtel abgeschlagen und die gereinigten Ziegel anschließend für den Wiederaufbau verwendet. Diese Form der Ziegelbeschaffung führte zu einer Mischung unterschiedlicher Ziegeltypen und in der Konsequenz zu einem heterogenen Mauerwerk.

Die heutige Anforderung an die Gebäudenutzung vor dem Hintergrund steigender Energiepreise und CO_2 Reduktion verlangt nach der energetischen Aufwertung solcher Gebäude. Die notwendige Verbesserung der Wärmedämmung in Verbindung mit der Erhaltung der schützenswerten Fassaden bedingt eine Reihe von Problemen. Für die meisten alten Gebäude kann eine Außendämmung nicht durchgeführt werden, jedoch trägt eine Innendämmung das Risiko der inneren Kondensation [68].

Der Feuchteschutz und die Verhinderung der Zerstörung der historisch wertvollen Fassaden erfordert eine geeignete energetische Sanierung der Umfassungskonstruktionen. Neue Heizungssysteme, zusätzliche Dämmung von Dach und Keller und im besonderen luftdichte Fenster mit Wärmedämmglas

führen häufig zu Kondensationsproblemen an den Innenwandoberflächen und damit zu Schimmel und anderen Schäden.

Vorraussetzung für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit einer Innendämmung ist die Analyse des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports im Mauerwerk. Die Bewertung einer Konstruktion ermöglicht das Finden und die Beurteilung optimaler Lösungen für unterschiedliche Sanierungsmaßnahmen. Dies wird gewöhnlich durch die Anwendung von Simulationswerkzeugen, wie DELPHIN oder WUFI realisiert. Jedoch erfordern die Simulationsprogramme die Kenntnis der Speicher- und Transporteigenschaften der vorhandenen, bzw. zum Einsatz kommenden Materialien. Infolge des heterogen Mauerwerks des Dresdener Gebäudebestands ist dies ein schwerwiegendes Problem. Vor dem Hintergrund der natürlichen Variabilität hygrischer Materialeigenschaften einzelner Ziegel erscheint es wichtig natürliche Gruppierungen innerhalb der Ziegel zu identifizieren. Daraus lassen sich Transferfunktionen generieren, die in der Lage sind die z.B. die Feuchtespeicherung der Ziegel des Dresdener Gebäudebestandes zu repräsentieren. Da die Feuchtespeicherung zudem den Porenraum und -struktur identifiziert [76] ist die Retentionscharakteristik ideal geeignet natürliche Gruppierungen zu identifizieren wie Bild 50 verdeutlicht.

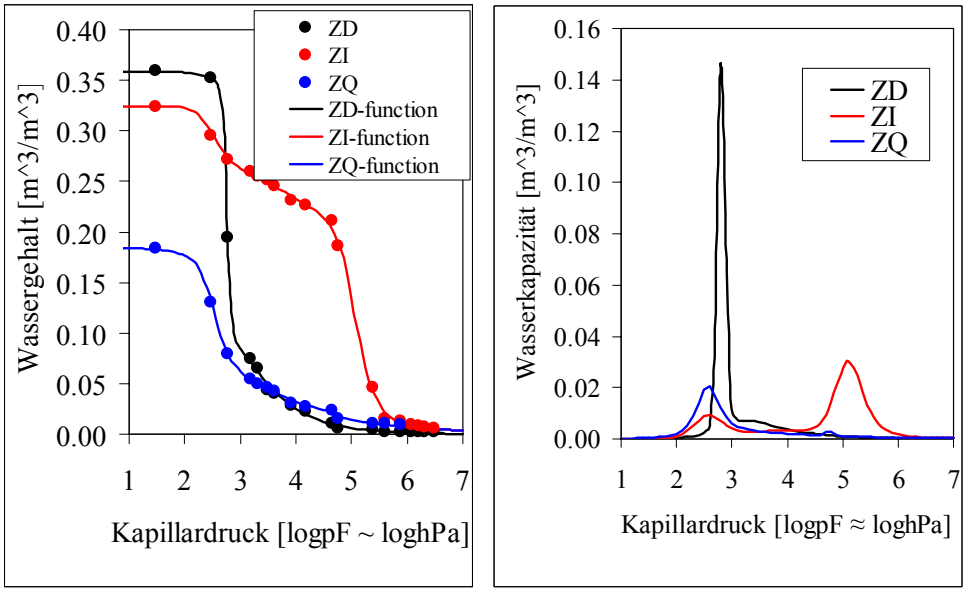


Bild 50: Gemessene Retentionsdaten und multi-modale Funktionsanpassung (links) sowie die aus den Funktionen abgeleitete Porenvolumenverteilung zur Identifikation der Porenstruktur.

11.2 Material und Methoden

11.2.1 Beprobung

Für die vorliegende Untersuchung wurde ein Set von 17 unterschiedlichen Ziegeln des Dresdener Gebäudebestandes analysiert. Diese Sammlung ist eine repräsentative Auswahl von Ziegeln, die in den letzten 130 Jahren zum Einsatz gekommen sind. Die Ziegelfarben umfassen den Farbraum von

einem hellen Gelbbraun bis hin zu einem dunklen Karminrot. Die Trockenraumdichte der Ziegel variiert zwischen 1610 und 2010 kg/m^3, wobei die Dimensionen in den Größen von 280*120*80 mm bis 230*110*65 mm streuen.

Zur Messung wurden ca. 10 mm der Ziegelwand abgeschnitten und der Kernbereich der Ziegel zur Herstellung der Probekörper verwendet. Zur Bestimmung der Feuchtespeicherung wurden Proben in den Dimensionen 50*30*10 mm, bzw. 50*50*10 mm verwendet.

11.2.2 Messmethoden

Die zur Untersuchung verwendeten Messmethoden sind in Kap 4.2 näher erläutert. Im überhygroskopischen Bereich wurden 9 Druckstufen gemessen: 0.03, 0.3, 0.6, 1.5, 2, 3, 4, 8 und 15 bar. Im hygroskopischen Bereich kamen gesättigte Salz in Wasserlösungen zu Einsatz, wobei für 7 Feuchtestufen die folgenden Luftfeuchtepunkte gemessen wurden: 96.9% (K_2SO_4), 96.0% (KH_2PO_4), 84.3% (KCl), 75.3% (NaCl), 43.2% (NaBr), 32.8% ($MgCl_2$), 22.5% (CH_3COOK) und 11.3% (LiCl).

11.2.3 Datentransformation

Die Daten der überhygroskopischen und hygroskopischen Feuchte liegen als Funktionen des Kapillardruckes und der relativen Luftfeuchte vor. Um beide Datensätze ineinander zu überführen, bzw. zu kombinieren, müssen Datenbereiche konvertiert werden. Die Kopplung von relativer Luftfeuchte und Kapillardruck erfolgt über eine Äquivalentporengröße, r, [m] mit:

$$\psi = \frac{c}{r}$$

Hierbei sind ψ der Kapillardruck [Pa], c ist die kapillare Steighöhe von Wasser [cm] und r steht für einen Äquivalentporendurchmesser [cm] multipliziert mit der Konstanten ~ 9.81*10^{-3} und ist definiert durch:

$$c = 2\sigma \cos\omega / g\rho_w$$

Die Parameter σ und ω korrespondieren mit der Oberflächenspannung [Pa/m] und dem Kontaktwinkel zwischen Wasser und Festphase. g und ρ_w sind die Gravitation [ms^{-2}] und die Dichte des Wassers [kg m^{-3}]. Die relative Luftfeuchte, φ, [-] liefert die Kelvins-Gleichung mit:

$$\varphi = e^{-\frac{2\sigma}{r\rho_w R_V T}}$$

Mit R_V der allgemeinen Gaskonstanten [W s kg^{-1}K^{-1}] und T der Temperatur [K]. Die obigen Gleichungen ermöglichen die wechselseitige Konvertierung von Kapillardruck, Luftfeuchte und Äquivalentporenradius. Dies eröffnet die Möglichkeit physikalisch basierte Porengrößenverteilungsmodelle zur Vorhersage der Wassertransportfunktion oder auch Wasserleitfähig-keitsdaten funktional anzupassen. Die Güte der Anpassung mit einem physikalischen Modell zeigt Bild 1.

11.2.4 Experimentelle Daten

Die Kollektion der 17 unterschiedlichen Ziegeltypen des Dresdener Gebäudebestandes lieferten 306 Mittelwerte von Wasserretentionsdaten. Sämtliche mittleren Wassergehalts- / Kapillardruckdaten sind im nachfolgenden Bild 51 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine große Streuung zwischen den verschiedenen Ziegeln des Dresdener Gebäudebestandes bestehen. Im überhygriskopischen Bereich variieren die Wassergehalte bei gleichem Kapillardruck und 20 – 30 Vol%. Im hygroskopischen Bereich geht die Streuung auf 1.5 – 5 Vol% zurück.

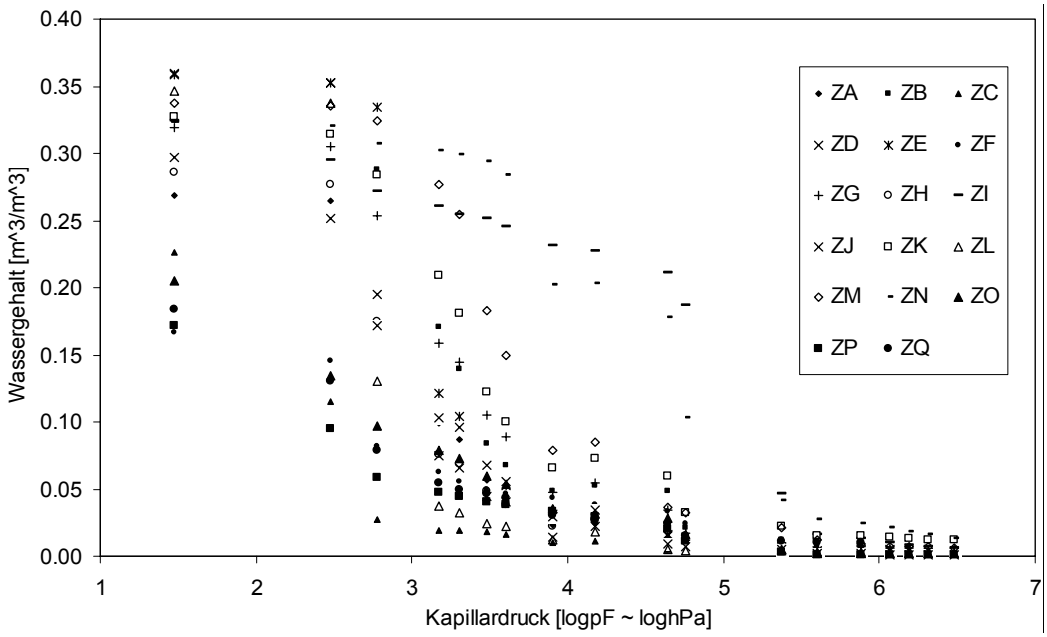


Bild 51: Gemessene Wasserretentionsdaten (n = 306) der Ziegel aus dem Dresdener Gebäudebestand.

11.3 Identifikation von Ziegel Clustern

Zur Identifikation natürlicher Gruppierungen innerhalb der Daten kommt eine multivariante Cluster Analyse zum Einsatz. Sie beinhaltet eine Diskriminanzanalyse zur Klassifizierung der Objekte in Gruppen ohne das Anzahl oder die Gruppenmitglieder der Untergruppen bekannt sind [71]. Zur Erzeugung der Cluster wird es erforderlich die Unähnlichkeit zwischen den unterschiedlichen Ziegeltypen zu berechnen. Ähnliche Ziegel sollten im gleichen Cluster erscheinen und unähnliche Ziegel in verschiedenen Clustern. Zur Clusterung von Eigenschaftsattributen, sogenannte Performance Attribute, wird es erforderlich den Variablen einen vergleichbaren Einfluss zu geben. Die Korrelationsmaße können signifikant durch unterschiedliche Skalen beeinflusst werden. Da den Performance Attributen, Wassergehalt und Kapillardruck, die gleichen Skalen zugrunde liegen, können euklidische Distanzmaße zur Korrelationsanalyse verwendet werden [72]. Eine Normalisierung erlaubt den Vergleich zwischen Proben unterschiedlicher Größen. Daher wurde normalisierte euklidische Distanzen (Quadratwurzel Distanzen) für die statistischen Berechnungen verwendet.

Nach [71] und [116] können verschiedenen Methoden verwendet werden um die Distanz (Unterschiedlichkeit) zwischen den Ziegeln, bzw. den Ziegelclustern zu bestimmen. Für die Analyse der Retentionsdaten der Ziegel wurden sechs unterschiedlichen Methoden eingesetzt, um die Cluster zu identifizieren. Die sogenannte „single linkage Methode“ verwendet die Distanzen zwischen 2 Ziegeln oder Ziegelclustern als Entfernung zwischen den 2 ähnlichsten Mitgliedern des Clusters. Dieses Clustermaß produziert langkettige Cluster und unterstützt eine Gruppierung wenig. Die sogenannte „Complete linkage Methode“ von [81] verwendet die am wenigsten ähnlichen Paare zur Berechnung der Distanzen. Diese Methode produziert kompakte, globuläre Cluster. Die sogenannte „Centroid linkage Methode“ verwendet den Mittelwert aller Objekte in einem Cluster als Referenzpunkt für die berechneten Distanzen zu den Ziegeln des gleichen Clusters. Eine Variante der „Centroid linkage Methode ist die „Ward minimum variance linkage Methode [143]. Sie verbindet das „Centroid linkage Verfahren“ durch Verwendung der Covarianzen innerhalb der Daten. Die sogenannten „Average linkage-“ und „Median linkage Methoden“ mitteln alle Distanzen zwischen den jeweiligen Ziegelpaaren in den Clustern um abzuschätzen, wie verschieden die unterschiedlichen Ziegel voneinander sind.

Die unterschiedlichen hierarchischen Clustermethoden wurden an den Retentionsdaten der Dresdener Ziegel getestet. Die Berechnungen erfolgten nach der Programmierung des Interpreters mit der SYSTAT Version 5.2. In den obigen Abbildungen werden Teile der statistischen Berechnungen exemplarisch für die „Complete linkage Methode“ und die „Ward minimum variance linkage Methode“ vorgestellt.

Die Verbindung und Zuordnung eines jeden Ziegels, bzw. Ziegelclusters ist als angekoppelter Ast in dem Baumdiagramm dargestellt. Die Wurzel des Baumes ist die Verbindung aller Cluster in einem Set (rechte Seite des Diagramms) und endet in den kleinen Verästellungen in Form jedes individuellen Ziegels (linke Seite des Diagramms). Die Distanzen zwischen den Ziegeln in Form der verbundenen Äste eines Clusters werden als Zahlenwerte auf der rechten Seite des Diagramms wiedergegeben. Hohe Zahlenwerte repräsentieren eine große Unähnlichkeit (Dissimilarität) auf der Basis des meist entfernten Nachbars, bzw. der größte Varianz zwischen den Nachbarn, kleine Zahlenwerte weisen eine hohe Ähnlichkeit aus. Die repräsentativen Distanzen zur Separation in die Clustergruppen sind unterstrichen. Das Baumdiagramm ist dabei so angeordnet, dass die ähnlichsten Ziegel nebeneinander abgebildet sind und nahe zueinander stehen. An den Pfeilen sind die Äste zur optimalen Darstellung und Einpassung in die Vorgabeseiten verkürzt.

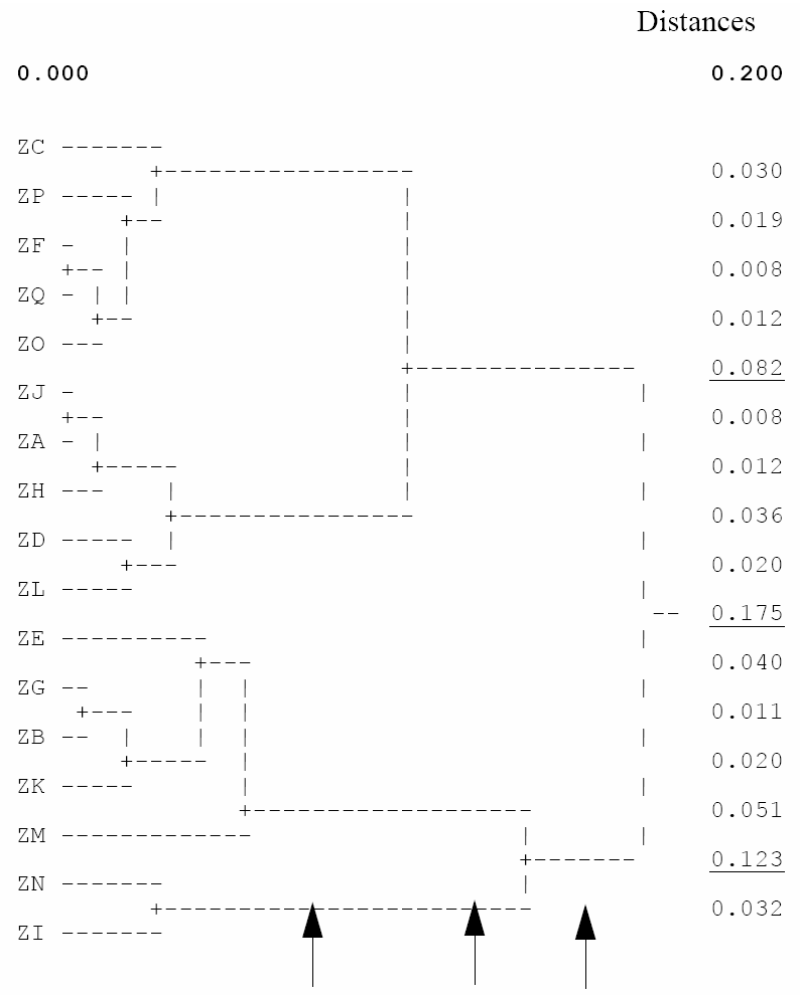


Bild 52: Baumdiagramm einer Clusterhierarchie, Unterscheidungsmaß ist eine euklidische Distanz auf der Basis der „Complete linkage Methode“ von Johnson (1967). Die Verkürzung der einzelnen Äste wird durch die Pfeile angezeigt.

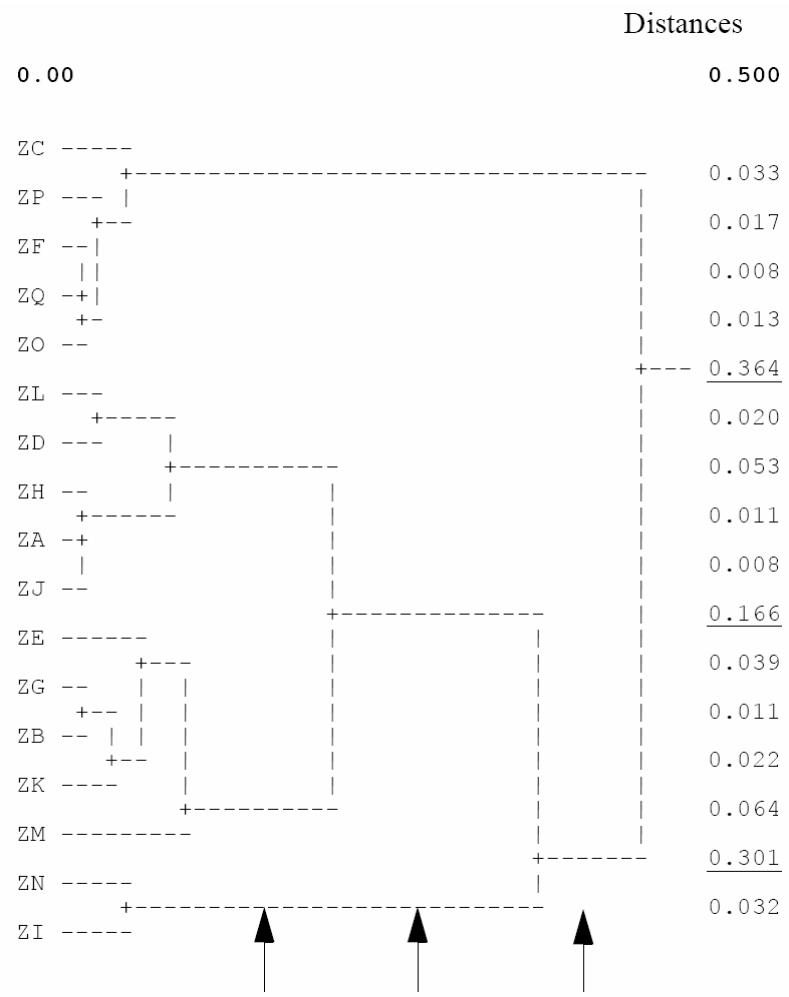


Bild 53: Baumdiagramm einer Clusterhierarchie, Unterscheidungsmaß ist eine euklidische Distanz auf der Basis der „Ward minimum variance linkage Methode“ von Ward (1963). Die Verkürzung der einzelnen Äste wird durch die Pfeile angezeigt.

Abhängig von der gewählten Unterscheidungsmethode und dem Distanzmaß können die Ziegel in unterschiedliche Clustergruppen unterschieden werden. Mit abnehmenden Distanzen steigt die Anzahl der unterscheidbaren Cluster. Tabelle 9 und Tabelle 10 geben die identifizierten Clustergruppen wieder. Bei der Distanz von 0.082 („Complete linkage Methode“) trennt sich das Cluster 4 von Cluster 1. Hingegen differenziert sich Cluster 4 bei dem bei der „Ward minimum variance linkage Methode“ aus Cluster 3. Als Ergebnis der Diskriminanzanalyse können bei den eingesetzten Verfahren unterschiedliche 4 Cluster differenziert werden. Eine weitere Auftrennung der Cluster erscheint vor dem Hintergrund der Streuung der einzelnen Ziegel und einem Stichprobenumfang von nur 17 Ziegeln wenig sinnvoll.

Tabelle 9: Distanzen und korrespondierende Clustergruppen bei Verwendung der „Complete linkage Methode“ für die Wasserretentionsdaten.

Distanz	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
0.175	ZC, ZP, ZF, ZQ, ZO, ZJ, ZA, ZH, ZD, ZL,	ZE, ZG, ZB, ZK, ZM, ZN, ZI,		
0.123	ZC, ZP, ZF, ZQ, ZO, ZJ, ZA, ZH, ZD, ZL,	ZN, ZI,	ZE, ZG, ZB, ZK, ZM,	
0.082	ZC, ZP, ZF, ZQ, ZO,	ZN, ZI,	ZE, ZG, ZB, ZK, ZM,	ZJ, ZA, ZH, ZD, ZL,

Tabelle 10: Distanzen und korrespondierende Clustergruppen bei Verwendung der der „Ward minimum variance linkage Methode“ für die Wasserretentionsdaten.

Distanz	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
0.346	ZC, ZP, ZF, ZQ, ZO,	ZL, ZD, ZH, ZA, ZJ, ZE, ZG, ZB, ZK, ZM, ZN, ZI,		
0.301	ZC, ZP, ZF, ZQ, ZO,	ZN, ZI,	ZL, ZD, ZH, ZA, ZJ, ZE, ZG, ZB, ZK, ZM,	
0.166	ZC, ZP, ZF, ZQ, ZO,	ZN, ZI,	ZE, ZG, ZB, ZK, ZM,	ZL, ZD, ZH, ZA, ZJ,

11.4 Repräsentative Feuchtespeicher-Transferfunktionen

Zur Ableitung repräsentativer Transferfunktionen werden die identifizierten Clusterdaten zusammengefasst und über einen multi-modalen Funktionsansatz angepasst [113]. Diese Funktionalisierung hat die Glättung und Interpolation der Streuenden Daten zum Ziel. Das gesamte Set der Wasserretentionsfunktionen für die einzelnen Cluster wird nachfolgend abgebildet.

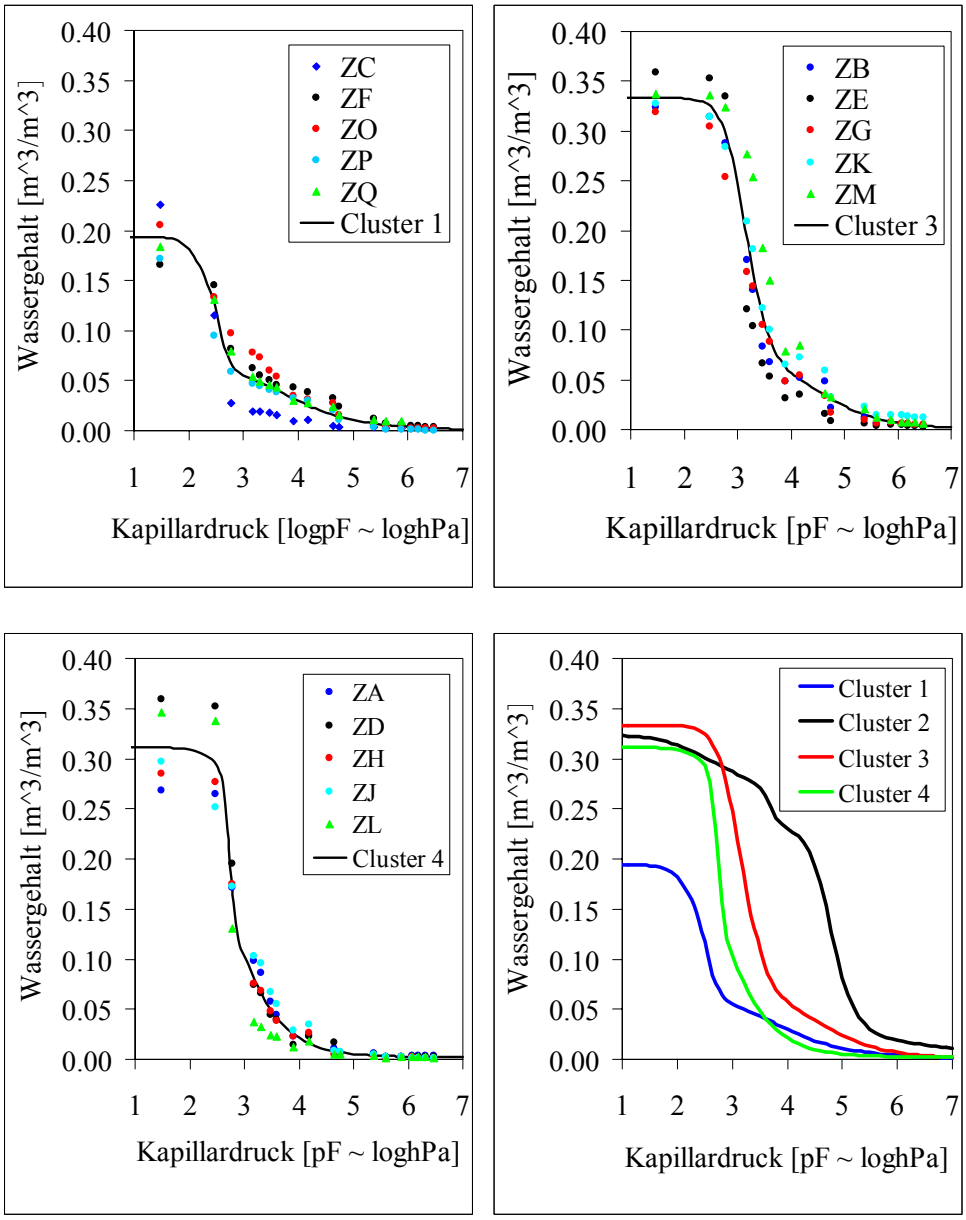


Bild 54: Darstellung und Vergleich der identifizierten 4 Cluster sowie die korrespondierenden Materialdaten aus dem Dresdener Gebäudebestand.

Cluster 1 repräsentiert die Klinkerziegel. Diese Ziegel besitzen eine geringere Porosität und niedrige hydraulische Leitfähigkeiten bzw. Aw-Werte und eignen sich zum Schlagregenschutz. Cluster 2 steht für neue und moderne Ziegeltypen die technologisch optimiert sind. Ein typischer Repräsentant ist der NZ Standardziegel der „Wienerberger Ziegelindustrie“. Die klassischen Lehm- und Tonziegel, welche alten Lehmgruben entstammen, gehören dem Cluster 3 an. Abhängig von der Textur, z.B. dem Gehalt von Schluff und Ton ist die Wasserretention verschoben. Zunehmende Tongehalte führen zu einem höheren Gehalt feiner Poren, während höhere Schluffgehalte sich in den Mittelporen wiederfinden lassen. Ein weiteres Kriterium ist die ungenügende Maßhaltigkeit der Ziegelgruppe 3, die sich in variablen Ziegeldimensi-

onen niederschlägt. Das Cluster 4 wird ebenfalls durch den Schluff- und Tongehalt dominiert. Jedoch wurde hier Sand beigemengt, wodurch zum einen die Maßhaltigkeit während des Herstellungsprozesses gewährleistet ist.

Die Klassifikation der unterschiedlichen Ziegel in Cluster erfordert eine visuelle Kontrolle. Ziegel des Clusters 1 können oft durch ihre Form und Gestalt differenziert werden. Häufig zeigt eine laterale Seite ein besonderes Aussehen oder ist geglättet, während die anderen Seiten gewöhnlich aussehen. Weiterhin deutet der keramische Klang beim Anschlagen mit einem Hammer auf die höheren Brenntemperaturen hin. Weiterhin ist die Trockenraumdichte signifikant hoher ist, wodurch eine einfache Messung des Gewicht und des Volumens einen Klinker identifizieren kann.

Ziegel der Clustergruppe 2 sind neuartige Ziegel, die in den letzten 15-20 Jahren hergestellt wurden. Die intensive Durchmischung ausgewählter Texturen und Zuschlagsstoffe sowie z.B. deren Extruderproduktion führt zu Knetrissen innerhalb der Ziegel. Besondere Kenzeichnungen wie Ziegeltyp, Produktionsjahr und anderes mehr machen eine Identifikation leicht. Traditionelle Ziegel der Cluster 3 und 4 haben mehr oder weniger eindimensional orientierte Risse aufgrund des Produktionsprozesses. Häufig variieren alte klassische Ziegel in ihren Dimensionen, was relativ einfach mit Hilfe eines Zollstocks geprüft werden kann. Ihre Dimensionen unterscheiden sich deutlich von denen der neuen Ziegeltypen. Zur Unterscheidung der Ziegel der Cluster 3 und 4 ist ein Hammer zum Bruch der Ziegel hilfreich. Ziegel des Clustergruppe 4 zeigen grobe Sandkörner oder andere grobe an den Bruchflächen.

12 Etablierung einer neuen Größe - Trocknungskennwert

12.1 Hintergrund

Seit langem dienen der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) und die Diffusionswiderstandszahl (μ-Wert) bzw. diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d-Wert) als bauphysikalische Standardkennwerte zur Charakterisierung des Feuchteverhaltens von Baustoffen. Mit dem w-Wert wird die Wasseraufnahme von Materialien bei Kontakt mit flüssigem Wasser (Schlagregen) beschrieben. Der μ-Wert bzw. s_d-Wert kennzeichnet die Trocknungsmöglichkeit der Wand aufgrund Diffusion durch den Putz. Der Einfluss der Kapillarleitfähigkeit auf den Trocknungsvorgang wird bei dieser Betrachtung vernachlässigt. An den folgenden zwei kurz erläuterten Beispielen wird gezeigt, dass das hygrothermische Verhalten mit den vorhandenen Standardkennwerten nicht beschreibbar ist.

Sanierputze

Sanierputze werden in der Regel auf ein feuchtes, salzbelastetes Mauerwerk aufgebracht. Die Wirkung hängt unter anderem wesentlich davon ab, wie diese das Austrocknen des darunter liegenden Mauerwerks gestatten. Die Eigenschaften eines Sanierputzes sind durch ein diesbezügliches WTA-Merkblatt [145] gerade in Bezug auf den w-Wert und den s_d-Wert in engen

Grenzen definiert. In eigenen Untersuchungen [91] konnte gezeigt werden, dass sich zwei Putzsysteme trotz annähernd gleichem w-Wert und s_d-Wert in ihrem Trocknungsverhalten deutlich unterscheiden. Während das eine Putzsystem bei höheren Luftfeuchten deutlich langsamer trocknet (siehe Bild 55 links), ist der Einfluss der Luftfeuchte auf die Trocknungsgeschwindigkeit des anderen Putzsystems relativ gering (siehe Bild 55 rechts). Die Ursache dafür ist das unterschiedliche Zusammenspiel von Diffusions- und Kapillartransport. Trotz annähernd gleichem w-Wert weist das zweite Sanierputzsystem beim Trocknungsvorgang einen wesentlich ausgeprägteren Kapillartransport auf. Dies führt dazu, dass bei ihm, die durch die höheren Luftfeuchten verschlechterten Trocknungsrandbedingungen zum großen Teil über einen verstärkten Kapillartransport an die Oberfläche wettgemacht wird und deshalb die Trocknungsgeschwindigkeit wesentlich weniger beeinflusst wird. Dieses Sanierputzsystem wird somit für eine deutlich schnellere Austrocknung einer Wand sorgen, aber aufgrund seiner Kapillaraktivität auch ein größeres Risiko von Salzausblühungen bei salzbelastetem Gemäuer mit sich bringen.

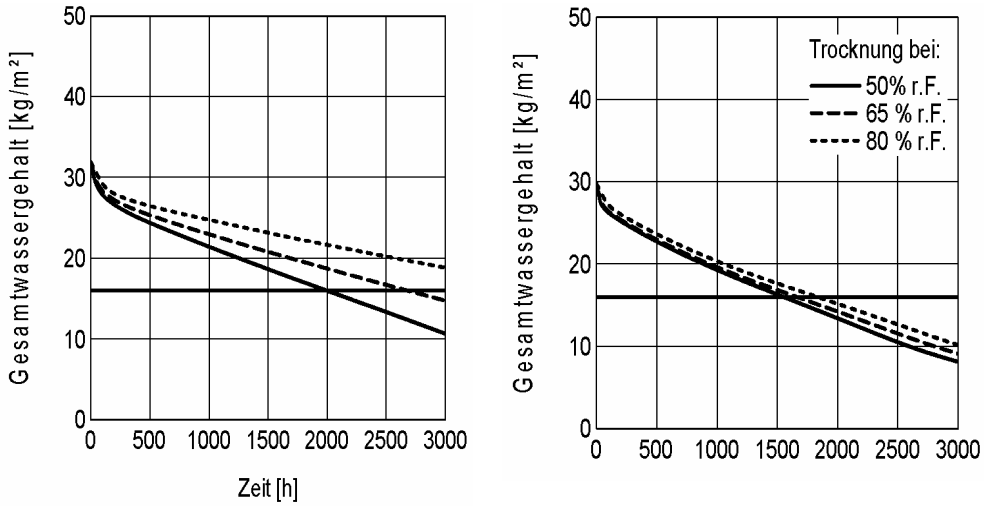


Bild 55: Austrocknungsverhalten des Putzsystems A (links) und B (rechts) bei 50 % r.F., 65 % r.F. und 80 % r.F.. Während Putzsystem A eine deutliche Abhängigkeit von der bei der Trocknung vorliegenden relativen Luftfeuchte zeigt, hat diese bei Putzsystem B nur geringen Einfluss. Die Linie parallel zur Abszisse kennzeichnet die Hälfte des Anfangswassergehaltes.

Mikrobieller Bewuchs auf Außenfassaden

Im Rahmen von Untersuchungen zum mikrobiellen Bewuchs von Wärmedämmverbundsystemen [17] wurden Prüfkörper mit Putzen unterschiedlicher Rezeptur im Freigelände des IBP über mehrere Jahre bewittert. Auffällig war dabei, dass trotz ähnlicher Rezeptur Putz M2 einen wesentlich stärkeren Bewuchs aufwies als Putz M1. Vergleicht man die feuchtetechnischen Kennwerte der beiden Putze M1 und M2 (Tabelle 11), so stellt man bei den Standardkennwerten keine nennenswerten Unterschiede fest. Jedoch ist das Austrocknungsverhalten grundsätzlich verschieden, wie an den in Bild 56 links dargestellten Laboruntersuchungen zu sehen ist. Beide Putze nehmen etwa gleich viel Wasser auf, aber die Austrocknung erfolgt bei M2 deutlich langsamer. Während der Putz M1 bereits nach 100 Stunden die Hälfte des

aufgenommenen Wassers abgegeben hat, dauert es beim Putz M2 doppelt solange. Dieser Effekt kann mit bloßem Auge an den Prüfkörpern nach Regen beobacht werden. In Bild 56 rechts handelt es sich bei den vier dunkleren Prüfkörpern in der Mitte um die Variante M2, während links daneben die Variante M1 angebracht ist. Der Helligkeitsunterschied ist hauptsächlich auf den unterschiedlichen Feuchtegehalt zurückzuführen, da im trockenen Zustand keine Unterschiede zu sehen sind.

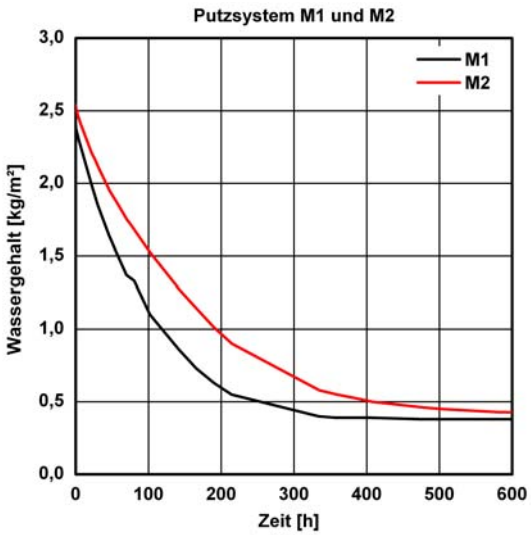




Bild 56: Links: Trocknungsverlauf der Putze M1 und M2
Rechts: Fotografische Ansicht der Prüfkörper;
bei den dunkleren vier Prüfkörpern in der Mitte handelt es sich um die Variante M2, links daneben hängt die Variante M1.

Tabelle 11: Vergleich der feuchtetechnischen Kennwerte der Putze M1 und M2.

Putzsystem	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	Wasseraufnahmekoeffizient w_{1h} [kg/m²√h]	Freie Wassersättigung [M.-%]
M1	0,35	0,23	21,5
M2	0,32	0,20	23,0

12.2 Anforderungen an den Trocknungskennwert

Für moderne Berechnungsverfahren, wie z.B. WUFI® [95] oder Delphin® [62] sind unterschiedliche Kennwertfunktionen (feuchteabhängige Diffusionskoeffizienten oder Kapillarleitfunktionen) zur realitätsnahen Beschreibung der Kapillartransportvorgänge beim Saugvorgang und bei der Trocknung entwickelt worden. Die Ergebnisse in Bild 57 zeigen am Beispiel des Porenbetons (Pb) mit unterschiedlicher Dicke, dass mit den vorhandenen Kennwertfunktionen eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung erreicht wird. Es existieren auch bereits bewährte Approximationsverfahren, um aus Standardkennwerten in Verbindung mit einfachen Laborversuchen diese Kennwertfunktionen zu approximieren [63], [77], [92] und [93].

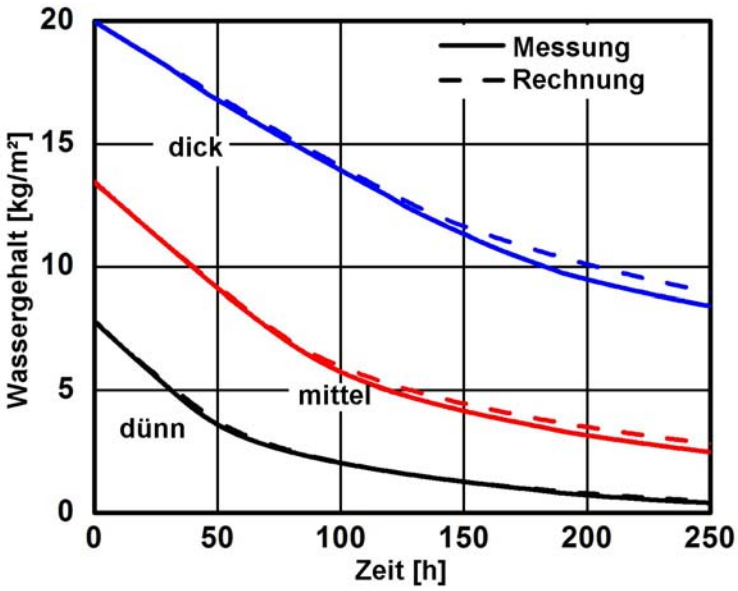


Bild 57: Vergleich des messtechnisch ermittelten Trocknungsverlaufs von Porenbetonproben unterschiedlicher Dicke mit Berechnungsergebnissen.

Bauphysikalische Standardkennwerte dienen den Anbietern von Baustoffen zur Kennzeichnung der wesentlichen Eigenschaften ihrer Produkte. Sie müssen auch dem weniger mit der Bauphysik vertrauten Anwender ermöglichen, anhand dieser Angaben unterschiedliche Produkte vergleichend zu bewerten. Kennwertfunktionen, wie sie für die hygrothermischen Berechnungen eingesetzt werden, sind deshalb dafür nicht geeignet und werden sich als Standardkennwert nicht durchsetzen. Dies bedeutet, dass ein Einzahlenwert gefunden werden muss, der physikalisch korrekt die Kapillaraktivität des Materials während des Trocknungsvorganges beschreibt. Außerdem muss dieser Kennwert durch ein einfaches und reproduzierbares Messverfahren bestimmbar sein, sodass er auch beim Baustoffhersteller ohne großen technischen Aufwand und spezieller tiefgehender Kenntnisse bestimmbar ist.

Betrachtet man die Trocknung eines anfangs gesättigten Materials unter konstanten Randbedingungen, lassen sich verschiedene Trocknungsabschnitte unterscheiden [86]. Während des ersten Trocknungsabschnittes (1. TA) wird die Trocknungsgeschwindigkeit ausschließlich von den äußeren Randbedingungen bestimmt. Hier ist der kapillare Flüssigkeitstransport ausreichend groß, um das an der Oberfläche verdunstende Wasser nachzuliefern und dementsprechend nimmt der Wassergehalt bei konstanten Klimarandbedingungen linear mit der Zeit ab. Das Ende des 1. TA ist erreicht, wenn aufgrund der mit absinkendem Wassergehalt geringer werdenden Kapillartransportkoeffizienten dieser Nachtransport nicht mehr ausreichend ist. Die Verdunstungsfront wandert unter die Materialoberfläche, sodass die Trocknung durch den damit verbundenen zusätzlichen Diffusionswiderstand der trockenen Schicht behindert wird, mit der Folge stetig abnehmender Trocknungsgeschwindigkeit. Das Ende des 1. TA beschreibt somit den Zeitpunkt, bei dem der kapillare Flüssigtransport genau so groß ist, wie der von den Randbedingungen abhängige Verdunstungsmassenstrom einer freien

Wasseroberfläche. Da die Länge des 1. TA von den äußeren Randbedingungen abhängt, müssen für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse die Messungen in einem Standardklima durchgeführt werden. Hierfür bietet sich ein Klima von 50 % r.F. bei 23 °C an, das auch für Diffusionsmessungen nach EN ISO 12572 [43] benötigt wird. In den Trocknungskennwert muss auch der Einfluss der Materialdicke in geeigneter Weise einbezogen werden (s. Kapitel 3.1).

12.3 Rechnerische Untersuchungen

Um die Eignung eines derartigen Trocknungskennwertes zu überprüfen, wurden in einem ersten Schritt rechnerische Untersuchungen durchgeführt. Mit Hilfe des Berechnungsprogramms WUFI® wurde für verschiedene Baustoffe bei unterschiedlichen Randbedingungen das Ende des 1. TA bestimmt. Dabei wurde stets von anfangs gesättigten Materialproben und einem Klima von 23 °C und 50 % r. F. ausgegangen.

12.3.1 Einfluss der Probendicke

Im Gegensatz zum Wasseraufnahmekoeffizienten wird das Ende des 1. TA durch die Probendicke wesentlich beeinflusst (siehe auch Bild 57). Hierbei handelt es sich, wie aus Bild 58 am Beispiel des Kalksandsteins und des Porenbetons ersichtlich, erwartungsgemäß nicht um eine linear sondern mit der Wurzel der Probendicke zunehmende Länge des 1. TA (Bild 58 unten). Die Steigungen der Ausgleichsgeraden in Bild 58 unten betragen für den Kalksandstein 190 h/√m und für den Porenbeton 500 h/√m.

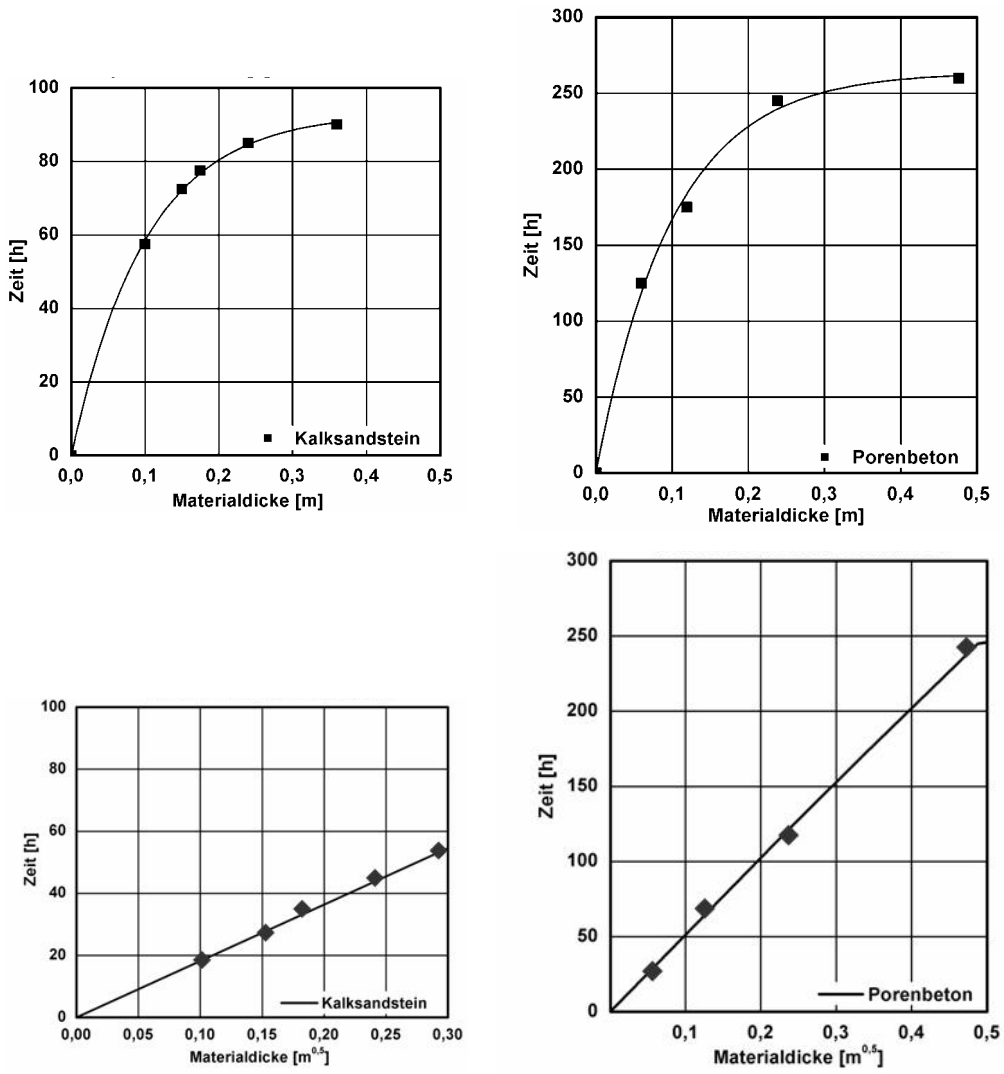


Bild 58: Rechnerisch bestimmtes Ende des 1.TA am Beispiel des Kalksandsteins (links) und des Porenbetons (rechts) aufgetragen über der Materialdicke (oben) und der Wurzel der Materialdicke (unten).

12.3.2 Einfluss Wärmeübergangskoeffizienten

Neben der Lufttemperatur und –feuchte hat der Wärmeübergangskoeffizient aufgrund seiner Kopplung mit dem Stoffübergangskoeffizienten (Lewis-Relation) einen deutlichen Einfluss. In Bild 59 sind für den Kalksandstein die berechneten Trocknungsverläufe für unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten dargestellt. Der Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten auf die Steigung der Kurve im 1. TA und dessen Länge ist deutlich zu erkennen.

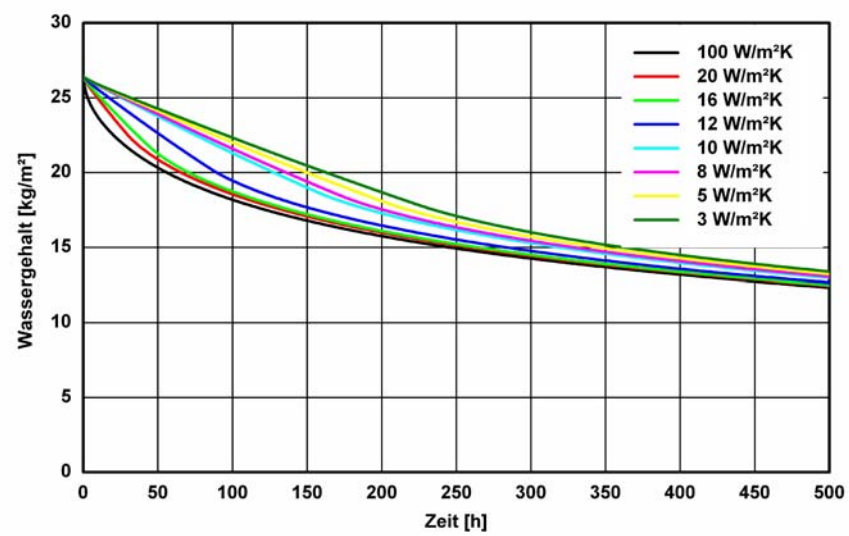


Bild 59: Für unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten berechnete Austrocknungsverläufe von Proben aus Kalksandstein.

12.4 Messtechnische Untersuchungen

Die dargelegten Überlegungen und die rechnerischen Ergebnisse bedeuten, dass bei der messtechnischen Ermittlung des Trocknungskennwertes die folgend beschriebenen Bedingungen erfüllt werden müssen, um eine Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Messungen müssen unter konstanten Normklimabedingungen durchgeführt werden (23 °C; 50 % r.F.). Die Messung des Masseverlustes sollte kontinuierlich erfolgen, um das Ende des 1. TA sicher zu erfassen. Dies ist mit modernen Waagen, die meist eine Datenschnittstelle besitzen, ohne größeren Aufwand möglich. Um die Dickenabhängigkeit zu bestimmen, sollten die Messungen an Proben unterschiedlicher Dicke durchgeführten werden. Bei Produkten mit definierten Dicken bei der Anwendung (z.B. Putzen) sollten die Prüfkörper mit entsprechender Dicke eingesetzt werden.

Aufgrund der bei den Messungen verwendeten Probengrößen kann nicht von eindimensionalen Bedingungen ausgegangen werden. Randeinflüsse sind somit nicht auszuschließen. Bei der Verdunstung des Wassers wird die Probe durch die Verdunstungswärme von der Trocknungsseite her abgekühlt und es stellt sich innerhalb des 1. TA eine niedrigere Oberflächengrenztemperatur ein. Bei einem nicht unendlich ausgedehnten Körper wird von den Probenseiten her diese Temperatur durch Wärmeleitung beeinflusst. Durch eine zusätzliche Dämmung an den Probenseiten kann dieser Einfluss verringert werden. Die Notwendigkeit einer derartigen Maßnahme wurde durch Messungen mit und ohne Dämmung untersucht. Es zeigt sich dabei, dass bei niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten dieser Effekt bei den eingesetzten Probengrößen mit einer Querschnittsfläche von 100 cm² gering ist (s. Bild 60). Bei hohen Luftgeschwindigkeiten muss für ein korrektes Ergebnis dagegen eine Dämmung der Probenseiten erfolgen.

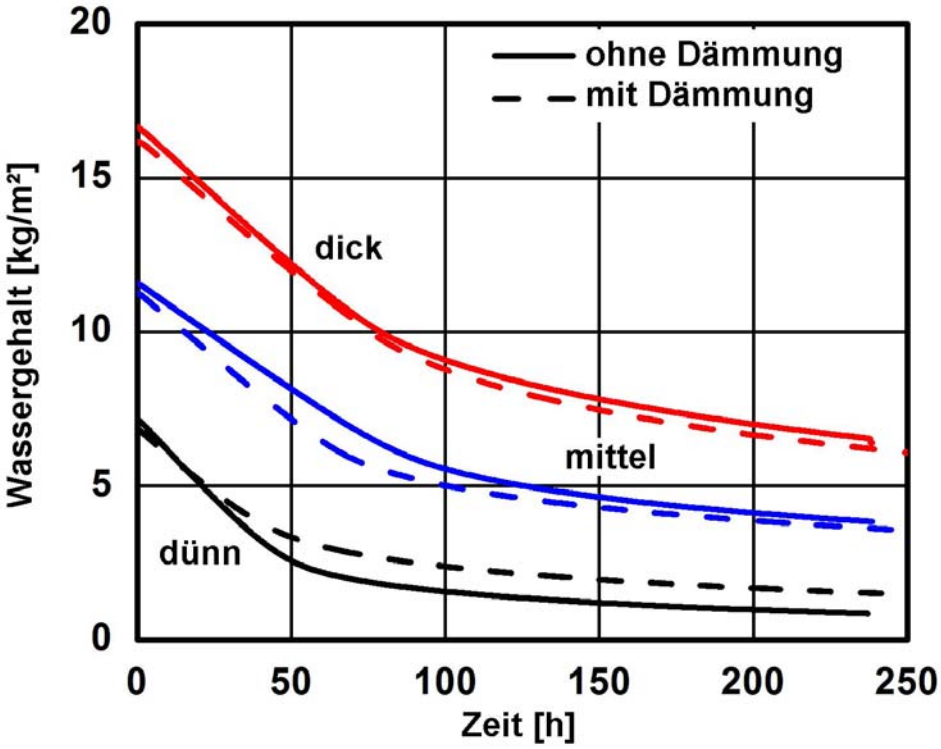


Bild 60: Messtechnische Untersuchung des Einflusses einer seitlichen Dämmung der Probe. Bei niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten ist der Einfluss gering, bei hohen dagegen wesentlich (nicht dargestellt).

In Bezug auf den Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten muss berücksichtigt werden, dass dieser in üblichen Klimakammern oder –räumen aufgrund unterschiedlicher Luftströmungsgeschwindigkeiten meist örtlich unterschiedliche Werte aufweist. Es wurde deshalb versucht, durch einen geeigneten Messaufbau dafür zu sorgen, dass bei der Messung über der Probenoberfläche der Wärmeübergangskoeffizient in engen, das Messergebnis wenig beeinflussenden, Grenzen bleibt. Grundsätzlich bieten sich dazu zwei Möglichkeiten an. Entweder man sorgt durch eine geeignete Maßnahme für eine ruhende Luftschicht oberhalb der Probe, um definierte vergleichbare Bedingungen zu erhalten, oder man bewirkt definierte Wärmeübergangskoeffizienten durch erzwungene hohe Luftgeschwindigkeiten. Im Folgenden werden für beide Möglichkeiten messtechnische Beispiele aufgeführt und die Vor- und Nachteile aufgezeigt.

12.4.1 Messungen bei niedrigen Oberflächenluftgeschwindigkeiten

Um den Einfluss der unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten im Klimaraum auf den Trocknungsvorgang zu minimieren, wurde über die Probe eine diffusionsoffene Folie (s_d = 0,03m), die auf einem Wirrgelege befestigt ist, angebracht. Dieses Wirrgelege gewährleistet einen definierten Abstand der Folie zur Probenoberfläche. Vorab wurde die Wirkung einer derartigen Folie rechnerisch untersucht (s. Bild 61). Wie erwartet, ergibt sich ein deutlich geringerer Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten oberhalb der Folie aber auch eine höhere Trocknungszeit. Bild 62 zeigt den Versuchsaufbau mit dieser Folie.

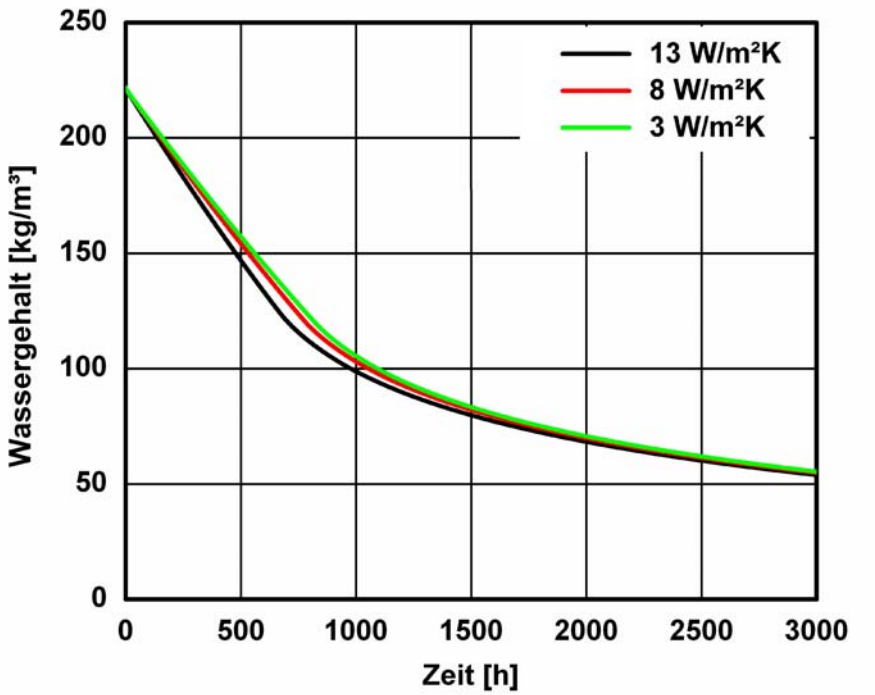


Bild 61: Berechneter Trocknungsverlauf einer gesättigten Probe aus Kalksandstein mit diffusionsoffener Folie bei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten oberhalb der Folie.



Bild 62: Versuchsaufbau mit diffusionsoffener Folie. Die Folie mit Wirrgelege ist links oben dargestellt, darunter die Probe mit aufgelegter Folie, daneben der Probenaufbau mit seitlicher Abdichtung.

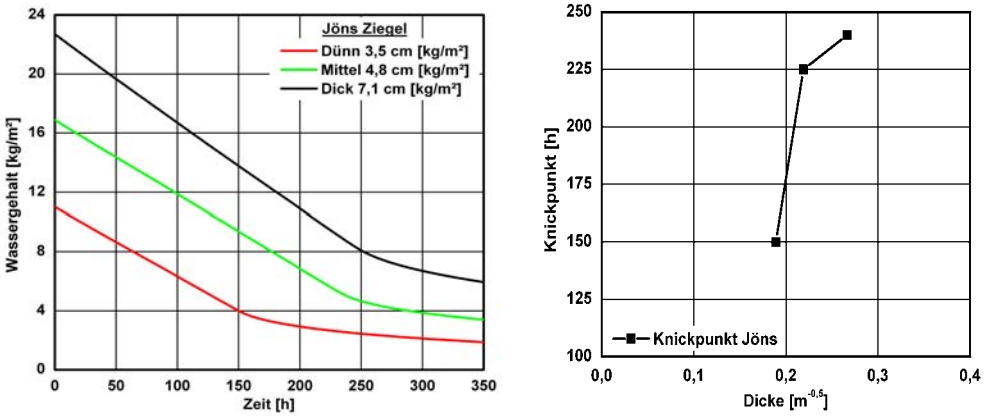


Bild 63: Für unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten berechnete Austrocknungsverläufe von Proben aus Kalksandstein.

Bild 63 links zeigt am Beispiel eines Ziegels den mit diesem Versuchsaufbau gemessenen Trocknungsverlauf von Proben unterschiedlicher Dicke. In Bild 62 rechts sind die zugehörigen Zeitdauern des 1. TA über der Wurzel der Probendicke dargestellt. Durch den zusätzlichen Diffusionswiderstand ergibt sich aber kein linearer Zusammenhang mehr.

12.4.2 Messungen bei hohen Oberflächenluftgeschwindigkeiten

Am Institut für Bauklimatik der Universität Dresden ist eine Messeinrichtung entwickelt worden, die die Bestimmung des Trocknungsverlaufes unter kontrollierten Randbedingungen erlaubt [129]. Der Prototyp wurde aus Metall und PVC aufgebaut, mit einem Windkanal aus Plexiglas. Er besteht aus einem mit Plexiglasplatten bedeckten Metallrahmen, drei Ventilatoren an jedem Kanalende und Einschubleisten für drei Laden. Die Laden sind in drei Teile unterteilt mit jeweils einer in der Höhe justierbaren Halterung für den Probekörper. Auf den Laden befindet sich ein Deckel mit passenden Ausschnitten für die Proben. Die Messtechnik besteht aus 12 Temperatursensoren, die so in der Höhe justierbar sind, dass damit in Probenmitte die Oberflächentemperatur gemessen werden kann. Zusätzlich sind an zwei Stellen kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren installiert. Außerdem können Strömungsmesssensoren angebracht werden. Bild 64 zeigt eine schematische Darstellung sowie eine photographische Ansicht.

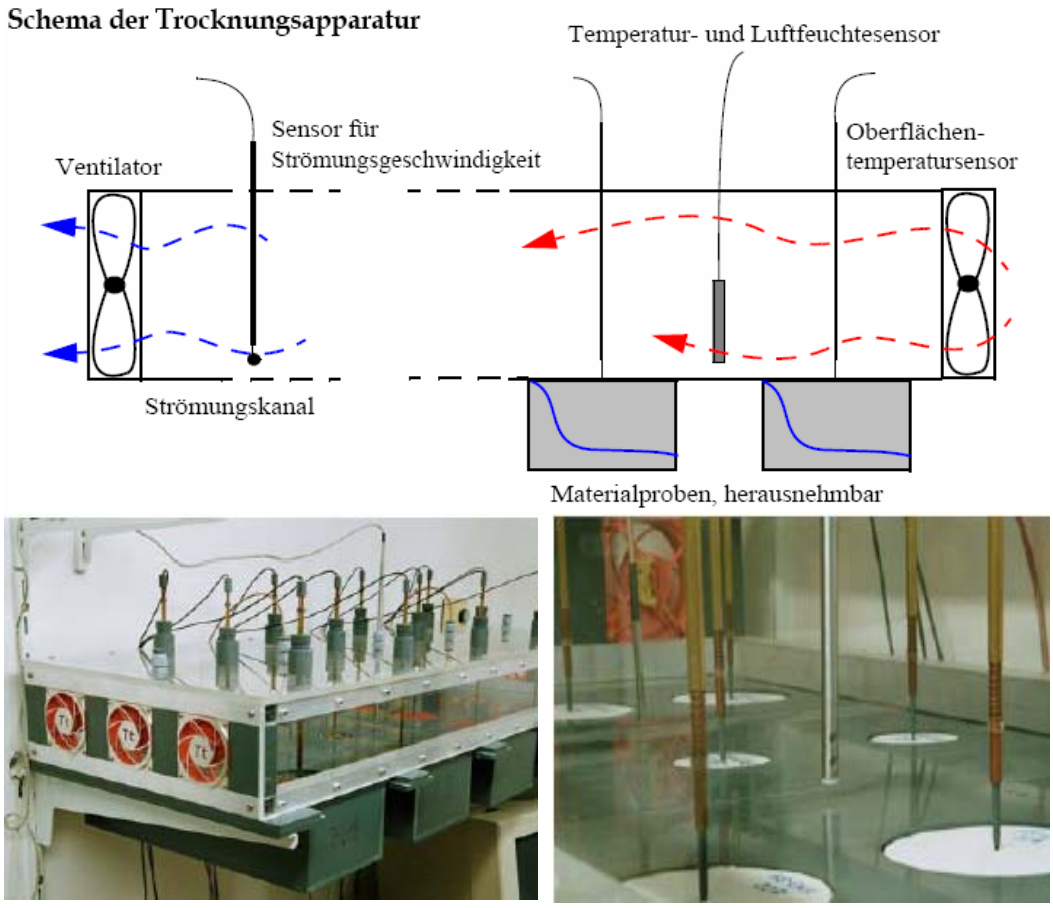


Bild 64: Messapparatur entwickelt, um unter definierten Randbedingungen den Trocknungsverlauf zu ermitteln.
Oben: Schematische Darstellung der Messeinrichtung
Unten links: Photographische Ansicht der Messeinrichtung
Unten rechts: Photographische Ansicht der installierten Mess sensoren.

In Bild 65 sind die Trocknungsverläufe von drei Proben einer Lade dargestellt. Wie erwartet führt die große Luftgeschwindigkeit zu einer hohen Trocknungsgeschwindigkeit. Die zwei Trocknungsabschnitte sind deutlich unterscheidbar. Der erste Trocknungsabschnitt ist beendet, wenn der materialabhängige Flüssigtransport an die Oberfläche gerade ausreicht, um die den Randbedingungen entsprechende Verdunstungsrate zu ermöglichen. Ab hier ist die Trocknungsgeschwindigkeit nicht länger konstant und der Trocknungsverlauf weicht von der Geraden ab. Außerdem nähert sich, wie in Bild 66 ab dem neunten Tag erkennbar, die Oberflächentemperatur der Lufttemperatur.

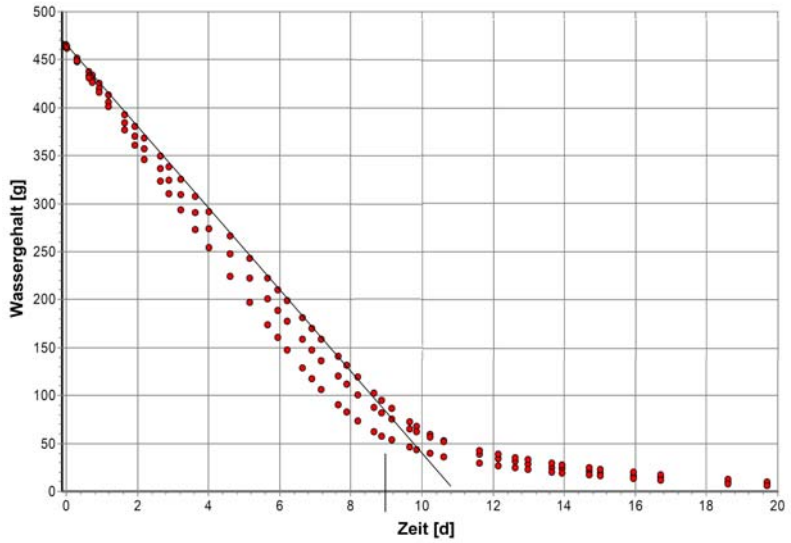


Bild 65: Gemessene Trocknungsverläufe für Kalziumsilikatplatten. Dargestellt sind die Ergebnisse von drei Proben einer Lade. Der lineare Trocknungsverlauf endet nach ca. 9 Tagen.

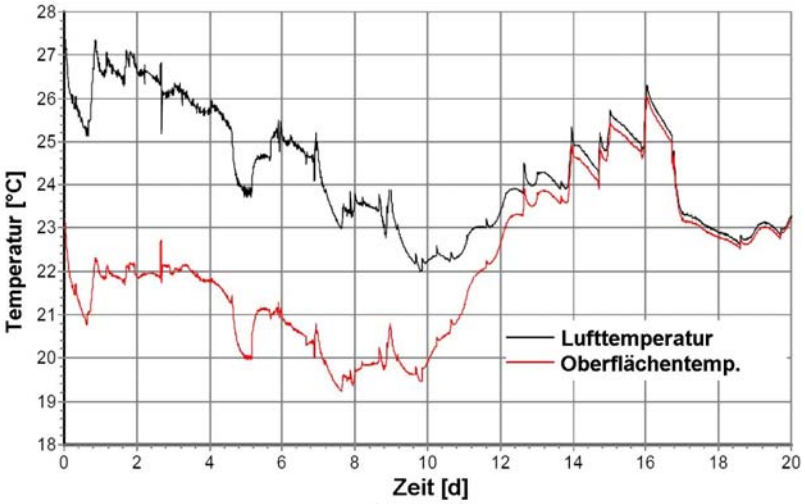


Bild 66: Verlauf der Luft- und Oberflächentemperatur während der in Bild 65 dargestellten Messung. Nach Beendigung des 1. Trocknungsabschnittes nähert sich die Oberflächentemperatur der Lufttemperatur an.

12.5 Konsequenzen aus den messtechnischen Untersuchungen

Die dargelegten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass es nur mit größerem Aufwand oder unter Inkaufnahme nicht akzeptabler Einschränkungen möglich ist, exakt definierte Wärmeübergangsbedingungen bei den Messungen sicherzustellen. Aus diesem Grund müssen als Alternative die vor Ort vorliegenden Randbedingungen mitbestimmt werden, um aus dem ermittelten Trocknungskennwert auf Standardübergangsbedingungen umzurechnen.

Da der Gewichtsverlust kontinuierlich erfasst werden muss, um das Ende des 1. TA zu bestimmen, kann man aus den Messungen auch den von den Übergangsbedingungen abhängigen flächenbezogenen Massenstrom ermitteln. Damit kann gemäß folgender Gleichung der bezogene Trocknungskennwert berechnet werden:

$$T = T_{Mess}\, g_{Mess}/g_{Ref}$$

T	[h/√m]	Trocknungskennwert
T_{Mess}	[h/√m]	Trocknungskennwert bei Messung
g_{Mess}	[kg/m²h]	Massenstromdichte bei Messung
g_{Ref}	[kg/m²h]	Massenstromdichte bei Referenzbedingung

In Bild 67 links sind für normale Innenraumwärmeübergangskoeffizienten von 3 bis 12 W(m²K) die berechneten Trocknungsverläufe am Beispiel des Porenbetons dargestellt. Zur Veranschaulichung sind die Steigungen des 1. TA mit eingezeichnet (schwarze Geraden). Die daraus ermittelten Trocknungskennwerte sind für den Porenbeton sowie einen Kalksandstein in Bild 67 rechts in Abhängigkeit von den Übergangsbedingungen aufgetragen. Bezieht man die Werte gemäß obiger Gleichung auf Normübergangsbedingungen für den Innenraum von 8 W(m²K) erhält man die in Tabelle 12 aufgelisteten Werte. Dabei fällt auf, dass sich die Trocknungsgeschwindigkeiten beider Materialien trotz gleicher Randbedingungen leicht unterscheiden. Die Ursache hierfür liegt in der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der Materialien, wodurch sich beim Verdunstungsvorgang unterschiedliche Oberflächentemperaturen ergeben. Als Referenztrocknungsgeschwindigkeit wird deshalb die Massenstromdichte angesetzt, die sich für reines Wasser bei den Standardrandbedingungen ergibt. Trotz der nichtlinearen Abhängigkeit der Kapillartransportkoeffizienten vom Feuchtegehalt ergibt sich ein in sehr engen Grenzen liegender Trocknungskennwert. Dies muss jedoch noch durch Messungen bestätigt werden.

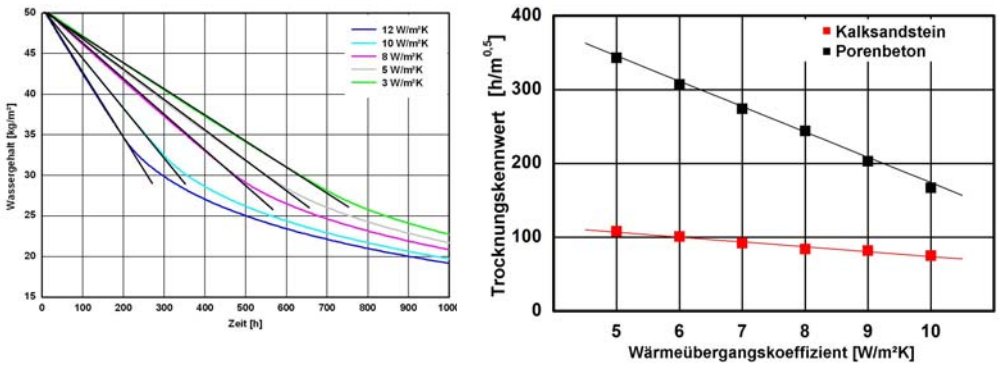


Bild 67: Für unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten berechnete Austrocknungsverläufe von Proben aus Porenbeton (rechts). Für eine leichtere Erkennbarkeit der unterschiedlichen Trocknungsgradienten des 1. TA sind entsprechende Geraden mit eingezeichnet. Das rechte Bild zeigt die resultierenden Trocknungskoeffizienten im Vergleich zu denen des Kalksandsteins.

Tabelle 12: Gemessene und auf Standardtrocknungsbedingungen normierte Trocknungskennwerte für Porenbeton und Kalksandstein, berechnet mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten.

Wärmeübergangskoeffizient [W(m²K)]	Trocknungsgeschwindigkeit [kg(m²h)]		Trocknungskoeffizient [h/√m]			
	Kalksandstein Messung	Porenbeton Messung	Kalksandstein Messung	Kalksandstein Normiert	Porenbeton Messung	Porenbeton Normiert
5	0.0575	0.0540	313	270	994	805
6	0.0618	0.0585	293	271	890	781
7	0.0656	0.0627	267	262	794	747
8	0.0684	0.0698	244	250	707	740
9	0.0714	0.0795	238	254	588	701
10	0.0738	0.0907	217	241	484	658

13 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung“ wurde von den Projektpartnern IBP, TUD und ZUB der Grundstein für einen umfangreichen öffentlich zugänglichen Datenkatalog gelegt. Die durchgeführten Arbeiten umfassten die nachfolgend aufgeführten Punkte.

Basierend auf der jahrelanger Erfahrung der Projektpartner in der Anwendung von Simulationsverfahren wurden zunächst die für Berechnungen erforderlichen Materialkennwerte festgelegt. Es handelt sich neben der Rohdichte der Baustoffe um thermische Kennwerte, wie spezifische Wärmespeicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit sowie um hygrische Kennwerte, wie Diffusionswiderstandszahl, Sorption, Wasseraufnahmekoeffizient, freie Wassersättigung und offene Porosität. Ein weiterer Schritt war die Auswahl der entsprechenden Messverfahren und, sofern die Prüflaboratorien mit verschiedenen Verfahren arbeiten, die Vergleichbarkeit der Messergebnisse.

Basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche über im Altbaubereich verwendete Materialien, wurde eine Auswahlliste von typischen Materialien erstellt. Im Folgenden fand das Zusammentragen von bereits vorhandenen Baustoffproben sowie die Beschaffung von typischen Vertretern einzelner Stoffklassen statt. Teilweise konnten Daten aus früheren Untersuchungen, die von den Projektpartnern durchgeführt wurden, eingebracht und durch ergänzende Messungen vervollständigt werden. Für eine Vielzahl von Materialien mussten die Messungen im Zuge des Projektes durchgeführt werden. Für die vorliegende Materialdatensammlung wurden deshalb nur Werte übernommen, die entweder von den Projektpartnern in den eigenen Labors bestimmt wurden oder, sofern es sich um Literaturwerte handelt, einer eingehenden Prüfung unterzogen wurden. Aus der Literatur entnommene Werte sind als solche gekennzeichnet. Soweit möglich wurde auf die Voll-

ständigkeit der hygrischen und / oder thermischen Materialkennwerte geachtet.

Die durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen den beteiligten Laboratorien zeigte sowohl im hygrischen als auch im thermischen Bereich eine gute Übereinstimmung der Messwerte. Auftretende Abweichungen liegen im Einsatz verschiedener Messverfahren und Materialinhomogenitäten begründet.

Für einen fiktiven Altbau aus Ziegelmauerwerk in Holzkirchen wurde eine thermische Sanierung mit einer Innendämmung rechnerisch sowohl mit dem Softwaretool WUFI als auch DELPHIN überprüft. Dabei kommen die in der MASEA-Materialdatensammlung abgelegten Kennwerte zum Einsatz, die zu Vergleichszwecken von den beteiligten Instituten messtechnisch bestimmt wurden. Während die unsanierte Ziegelwand im Mittel einen Gesamtwassergehalt von 10 kg/m² hat, kommt es durch die Anbringung der dampfdichten Innendämmung zu einer Erhöhung des Gesamtwassergehaltes auf 25 kg/m². Beide Programme liefern übereinstimmende Ergebnisse.

Ein weiterer Projektinhalt bestand in der Entwicklung einer Datenbank, auf die unter www.masea-ensan.de öffentlich zugegriffen werden kann. Damit stehen den Anwendern von Berechnungsverfahren wie WUFI, DELFIN und EPASS-HELENA eine breite Datenbasis zur Verfügung. Da für rein energetische Berechnungen mit EPASS-HELENA etc. die Kenntnis der thermischen Kennwerte ausreichend ist, wurden in die Datenbank auch ca. 200 Materialien aufgenommen, für die die hygrischen Kennwerte nicht oder nur teilweise bekannt sind. Zu Projektende konnten 475 Materialien in die Datenbank eingepflegt werden.

Die Materialien sind in Kategorien eingeteilt, die sich weitestgehend an bestehenden Normen orientieren. Dabei können einzelne Materialien in mehrere Kategorien (maximal 3) eingeteilt werden, da sie unterschiedliche Anwendungbereiche finden. Die Kategorien mit der Anzahl der in der Datenbank enthaltenen Materialien (in Klammer) zu Projektende sind nachfolgend aufgelistet:

- Anstriche (3)
- Putze, Mörtel und Ausfachungen (59)
- Mauersteine (99)
- Natursteine (25)
- Zementhaltige Baustoffe (89)
- Dämmstoffe (179)
- Bauplatten (47)
- Holz (47)
- Naturstoffe (65)
- Erden und Böden (19)
- Fassadenbekleidungen, Bodenbeläge und Eindeckungen (15)
- Folien und Abdichtungsstoffe (9)
- Sonstige (80)

Die Materialdatensammlung enthält derzeit 475 Materialien. Trotzdem war es nicht möglich sämtliche im Altbaubereich eingesetzten Materialien zu erfassen. Durch die Vielzahl der enthaltenen Materialien teilweise auch desselben Typs (z. B. Ziegel) erhält der Benutzer jedoch einen Überblick über die Varianz der Kennwerte und kann, je nach Anwendungsfall beurteilen, ob bei einer geplanten Sanierung feuchtetechnische Probleme entstehen können oder nicht. In kritischen Fällen wird nur eine Kennwertbestimmung des verbauten Materials eine exakte Abschätzung ermöglichen.

Nach Projektende wird die Datenbank weiter gepflegt. Aufgenommen werden sollen vor allem aktuelle Baustoffe, die zur Sanierung eingesetzt werden. Es wird angestrebt die Materialkennwerte im Auftrag des Herstellers mit der entsprechenden Produktbezeichnung in die Datenbank aufzunehmen.

Im Zuge des Projektes zeigte sich, dass die Einführung eines neuen Kennwertes, ein „Trocknungskennwert“ erforderlich ist. Die Notwendigkeit eines Trocknungskennwerts als zusätzlicher bauphysikalischer Standardkennwert wird an zwei Beispielen dargestellt. Dieser Trocknungskennwert sollte, um eine einfache Vergleichbarkeit sicher zu stellen keine Materialfunktion sondern ein Einzahlenwert sein. Als Trocknungskennwert wird die Dauer des ersten Trocknungsabschnittes einer gesättigten Probe bezogen auf die Wurzel der Materialdicke definiert. Wichtig ist dabei, dass die Messungen unter standardisierten Randbedingungen ablaufen. In Bezug auf die Lufttemperatur und –feuchte bietet sich dafür das für Diffusionswiderstandsmessungen definierte Standardklima von 23 °C und 50 % Luftfeuchte an. Einen deutlichen Einfluss haben aber auch die Wärme- bzw. Stoffübergangsbedingungen, die von der Luftgeschwindigkeit an der Probenoberfläche abhängen. Diese variieren aber örtlich in normalen Klimaräumen oder –kammern. Die Untersuchungen zeigen, dass es nur mit größerem Aufwand oder unter Inkaufnahme nicht akzeptabler Einschränkungen möglich ist, exakt definierte Wärmeübergangsbedingungen bei den Messungen sicherzustellen. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, die Messungen unter den vorliegenden Laborbedingungen durchzuführen und das Ergebnis auf Standardübergangsbedingungen umzurechnen.

Bei dem hier vorgestellten Trocknungskennwert und dazugehörigen Messverfahren handelt es sich um erste orientierende Schritte, auch um eine diesbezügliche Diskussion in der Fachwelt in Gang zu setzen. Bevor ein derartiger Kennwert in die Öffentlichkeit gebracht werden kann, müssen an einer größeren Anzahl unterschiedlicher Materialien Messungen durchgeführt werden, um dessen Eignung im Praxistest zu überprüfen.

14 Verbreitung der Ergebnisse

Innerhalb des laufenden Projekts sind die nachfolgend aufgelisteten Publikationen erschienen. Des Weiteren wurden bei Veranstaltungen über Vorträge die in dem Projekt erarbeiteten Erkenntnisse dem Fachpublikum übermittelt.

Publikationen

Fitz, C., Krus, M.: Normenwirrwarr bei der Bestimmung von feuchtetechnischen Materialkennwerten. IBP-Mitteilung 441, 2004.

Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung (MASEA). IBP-Jahresbericht, 2005.

Scheffler, G. & R. Plagge 2005: Bestimmung des Trocknungsverhaltens von Baustoffen unter definierten Randbedingungen. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Bauphysik 27 (2005), Heft 6, 323-330.

Scheffler, G. & R. Plagge 2005: Defined drying behaviour measurement for building materials. 7th Conference of Building Physics in Northern Countries, Reykjavik 2005, Vol. 1, 23-30

Krus, M., Lenz, K., Plagge, R., Scheffler, G.: Ein Trocknungskoeffizient als neuer hygrothermischer Standardmaterialkennwert. Proceedings of the 12th Symposium on Building Physics in Dresden, März 2007.

Plagge R., Scheffler, G., Meißner, F., Häupl, P., Fitz, C., Lengsfeld, K., Krus, M., Künzel, H.M., Klauß, S.: MASEA – Material Property Database of Old and New Building Materials for Software Tools in Building Construction. Proceedings of the 12th Symposium on Building Physics in Dresden, März 2007.

Krus, M., Lenz, K., Plagge, R.,Scheffler, G.: The Capillary Drying Coefficient as Innovative Hygrothermal Standard Material Characteristic eingereicht bei ASHRAE 2007.

Plagge, R., G. Scheffler, F. Meissner, C. Fitz, M. Krus & H. Künzel 2007: Einsatz einer multivarianten Cluster Analyse zur Identifikation natürlicher Gruppierungen innerhalb von Altbauziegeln. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Bauphysik, zur Veröffentlichung eingereicht

Vorträge

Künzel, H.M.: MASEA - Materialdaten für die energetische Altbausanierung. ENOB-Statusseminar, Freiburg 6. Mai 2004.

Klauß, S.: GFB-Seminarreihe "Bauen im Bestand", am 2.12.2005 in Kassel

Klauß, S.: Energietage Hessen, am 17.11.2006 in Wetzlar

Krus, M., Lenz, K., Plagge, R., Scheffler, G.: Ein Trocknungskoeffizient als neuer hygrothermischer Standardmaterialkennwert. Proceedings of the 12th Symposium on Building Physics in Dresden, März 2007.

Plagge R., Scheffler, G., Meißner, F., Häupl, P., Fitz, C., Lengsfeld, K., Krus, M., Künzel, H.M., Klauß, S.: MASEA – Material Property Database of Old and New Building Materials for Software Tools in Building Construction. Pro-

ceedings of the 12th Symposium on Building Physics in Dresden, März 2007.

15 Literatur

[1] Ahnert, R; Krause, K. H.:Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960. zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band I – Gründungen, Wände, Decken, Dachtragwerke. 2. Auflage. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1987.

[2] Apache Software Foundation. Coccon project. http://cocoon.apache.org, 2005.

[3] Apache Software Foundation. Xalan xslt processor. http://xml.apache.org/ /xalan-j, 2005.

[4] Apache Software Foundation. Xerces java parser. http://xerces.apache.org/ /xerces-j/, 2005.

[5] Apache Software Foundation. Apache http server version 2.0. http:// /httpd.apache.org/docs/2.0/, 2006.

[6] Apache Software Foundation. Apache tomcat 5.5 servlet/jsp container. http://tomcat.apache.org/tomcat-5.5-doc/, 2006.

[7] Apache Software Foundation. Java implementation of the ole 2 compound document format. http://jakarta.apache.org/poi/poifs/, 2006.

[8] Apache Software Foundation. Apache myfaces project. http://myfaces.apache.org, 2007.

[9] Atanion GmbH. Tobago framework. http://myfaces.apache.org/tobago/, 2007.

[10] Bargmann, Horst: Historische Bautabellen. Normen und Konstruktionshinweise 1870 bis 1960. 3. Auflage. Düsseldorf: Werner Verlag 2001.

[11] Bauer, Ch., and King, G. Hibernate in Action. Manning Publications, 2004. ISBN: 1932394153.

[12] Bauer, Ch. and King, G. Java Persistence with Hibernate. Manning Publications, 2006. ISBN: 1932394885.

[13] Bear J. and Y. Bachmat 1992: Introduction to modelling of transport phenomena in porous media. Kluwer Academic Publishers.

[14] Berliner, M.A.: Feuchtemessung. VEB Verlag Technik Berlin (1980).

[15] Bodoff Stephanie, Eric Armstrong, and Jennifer Ball. The J2EE Tutorial, volume 2. Addison-Wesley Longman, Amsterdam, 2004. ISBN: 0321245755.

[16] Böhmer, Heike; Güsewelle, Frank (Institut für Bauforschung e.V. Hannover): U-Werte alter Bauteile : Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung wärmeschutztechnischer Berechnungen bei der Modernisierung. Überarbeitung der 2. Fassung, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005.

[17] Breuer, K.; Fitz, C.; Hofbauer, W.; Sedlbauer, K.; Krus. M.; Renzl. A.: Prognoseverfahren zum biologischen Befall durch Algen, Pilze und Flechten an Bauteiloberflächen auf Basis bauphysikalischer und mikrobieller Untersuchungen, IBP-Bericht HTB-03/2005, Holzkirchen 2005.

[18] Burdine, N.T. 1953: Relative permeability calculations from pore-size distribution data“ Trans. AIME 198, 71-78.

[19] Cammerer, J.S.: Tabellarium aller wichtigen Größen für den Wärme- und Kälteschutz. 11. erweiterte Auflage. Heidelberg: Heidelberger Verlagsanstalt und Druckerei GmbH Juli 1973 (VKI-Rheinhold & Mahla AG, Mannheim).

[20] Cammerer, Joseph S.: Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. 4. Auflage, Reprint (der Ausgabe) Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1962. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1980.

[21] Cammerer, Walter F.: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. 5., völlig neu überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1995.

[22] Childs, E.C., & Collis-George, N. 1950: The permeability of porous materials. Proc. Roy. Soc. Austr., 201, 392-405.

[23] Chopra, Vivek; Bakore, Amit; and Eaves, Jon. Professional Apache Tomcat 5. Wiley & Sons, 2004. ISBN: 0764559028.

[24] Cisco. Pix firewall commands. http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/ /iaabu/pix/pix_sw/v_63/cmdref/intro.htm, 2006.

[25] CTAN Team. Ctan the comprehensive tex archive network. http://www.ctan.org.

[26] De Freitas, V.P., Krus, M., Künzel, H.M., Quenard, D.: Determination of the Water Diffusivity of Porous Materials by Gamma-ray Attenuation and NMR. International Symposium on Moisture Problems in Building Walls: Proceedings, 11.-13. Sept. 1995. Porto, 1995, S. 445-460.

[27] Deutscher Naturwerkstein-Verband e.V.: Bautechnische Information Naturwerkstein 1.7 - Bauchemische und bauphysikalische Einflüsse, Außenarbeiten. Würzburg: 1995.

[28] Deutscher Naturwerkstein-Verband e.V.: Bautechnische Information Naturwerkstein 4.1 – Wissenswertes über Naturwerkstein. Würzburg: 1996.

[29] DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau. Juli 1952x.

[30] DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau. Mai 1960.

[31] DIN 4108-2 Beuth-Verlag, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Ausgabe Juli 2003

[32] DIN 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte. Beuth-Verlag, Juli 2004.

[33] DIN 51005: Thermische Analyse (TA) – Begriffe. Beuth-Verlag, Ausgabe: August 2005.

[34] DIN 51007: Thermische Analyse (TA); Differenzthermoanalyse (DTA); Grundlagen. Beuth-Verlag, Ausgabe: Juni 1994.

[35] DIN 52103: Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert. Beuth-Verlag, Ausgabe: Oktober 1988.

[36] DIN EN 410: Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen. Beuth-Verlag, Dezember 1998.

[37] DIN EN 1946-1: Wärmetechnisches Verhalten von Bauprodukten und Bauteilen - Technische Kriterien zur Begutachtung von Laboratorien bei der Durchführung der Messungen von Wärmeübertragungseigenschaften - Teil 1: Allgemeingültige Regeln; Deutsche Fassung EN 1946-1:1999. Beuth-Verlag, Ausgabe: April 1999

[38] DIN EN 1946-2: Wärmetechnisches Verhalten von Bauprodukten und Bauteilen - Technische Kriterien zur Begutachtung von Laboratorien bei der Durchführung der Messungen von Wärmeübertragungseigenschaften - Teil 2: Messung nach Verfahren mit dem Plattengerät; Deutsche Fassung EN 1946-2:1999. Beuth-Verlag, Ausgabe: April 1999

[39] DIN EN 12524: Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte; Deutsche Fassung EN 12542:2000. Beuth-Verlag, Ausgabe: Juli 2000

[40] DIN EN 12664 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplattengerät - Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai 2001

[41] DIN EN 12667: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001. Beuth-Verlag, Ausgabe: Mai 2001

[42] DIN EN 12939: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Dicke Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12939:2000, Beuth-Verlag, , Ausgabe: Februar 2001

[43] DIN EN ISO 12572: Lacke und Anstrichstoffe - Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich - Teil 2: Bestimmung und Einteilung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte (Permeabilität) (ISO 7783-2:1999); Ausgabe April 1999.

[44] DIN EN ISO 10456: Baustoffe- und Bauprodukte – Verfahren zur Bestimmung des Wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte; (ISO 10456:1999); Deutsche Fassung EN 10456:1999. Beuth-Verlag, Ausgabe: August 2000

[45] DIN EN ISO 12571 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, April 2000

[46] DIN EN ISO 12572 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, September 2001

[47] DIN EN ISO 15148 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung desWasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, März 2003

[48] DIN ISO 11272 Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohdichte, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Januar 2001

[49] DIN V 4108-4: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. (Vornorm). Februar 2002.

[50] Durner, W. 1991: Predicting the unssaturated hydraulic conductivity using multi-porosity water retention curves. In: Van Genuchten, M.Th., F.J. Leij & L.J. Lund (eds.) (1992), Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Riverside (California) USA, 185-202.

[51] Egloffstein, Petra: Vulkanische Tuffsteine als Werksteine an historischen Bauwerken in Ungarn und Deutschland – Verwitterungsverhalten und Sanierungskonzepte. Köln: Verlag Sven von Loga, 1998. Zugl.: Karlsruhe, Universität, Diss., 1998.

[52] Eichler, Friedrich: Bauphysikalische Entwurfslehre. Band 3: Wärmedämmstoffe. 2., verbesserte und erweiterte Auflage. Berlin: VEB Verlag für das Bauwesen. Köln-Braunsfeld: Gemeinschaftsauflage mit der Verlagsgesellschaft Rudolf Müller 15.3.1971 (Redaktionsschluss).

[53] Eichler, Friedrich; Pohnert, Irmgard: Bauphysikalische Entwurfslehre. Band 1: Berechnungsgrundlagen der Wärme- und Feuchtigkeitsschutzes. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: VEB Verlag für das Bauwesen, 1975. Köln-Braunsfeld: Teilauflage für die Verlagsgesellschaft Rudolf Müller.

[54] EnEV Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV); Ausgabe 2004

[55] Fachvereinigung der Bims- und Leichtbetonindustrie e.V.: Umweltverträgliches Bauen mit Leichtbeton – Bauen mit Naturbims. Informationsbroschüre. Neuwied: 01/99

[56] Fischer, Heinz-Martin: Lehrbuch der Bauphysik : Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima. 4., neubearb. und erw. Auflage. Stuttgart: Teubner, 1997.

[57] Frank Martin. Ssl certifcates howto. http://www.tldp.org/HOWTO/SSL-Certificates-HOWTO/index.html, 2002.

[58] Geißler, Achim; Maas, Anton; Hauser, Gerd: Leitfaden für die Vor-Ort-Beratung bei Sanierungsvorhaben, Hilfestellung zur Beurteilung baulicher Aspekte. Forschungsbericht, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Aktenzeichen: Z6-5.4.00-11 / II 13-80 01 00-11). Kassel: Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Bauphysik, Juni 2001.

[59] GESELLSCHAFT FÜR RATIONELLE ENERGIEVERWENDUNG E.V. (GRE) (Hrsg.), Energieeinsparung im Gebäudebestand : Bauliche und anlagentechnische Lösungen. 3. Auflage. Bad Hersfeld: Höhl Druck, Januar 2001.

[60] Greiner; Hempel (inhaltlich verantwortlich): Wärmetechnisches Handbuch. 25. Auflage. Ludwigshafen: G+H Montage GmbH; Grünzweig+Hartmann AG Mai 1996.

[61] Gröber, Heinrich; Erk, Siegmund; Grigull, Ulrich: Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Dritte Auflage von Ulrich Grigull/3. Nachdruck. Reprint – Zweiter unveränderter Nachdruck. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag 1988.

[62] Grunewald, J. 1997: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation, Dresden University of Technology, Faculty of Architecture, Institute of Building Climatology.

[63] Grunewald, J., M. Bomberg: An engineering approximation of material characteristics for input to Heat, Air and Moisture transport simulations, Tagungsband zum 11. Bauklimatisches Symposium an der TU Dresden, Sept. 2002, S. 272 - 285

[64] Grunewald, J. und Häupl, P. 2002: Ein Modell zur Beschreibung der feuchteabhängigen Dampfleitfähigkeit kapillarporöser Materialien“, 11. Bauklimatischen Symposium, Band 1 (S.286-294), TU Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik, Eigenverlag.

[65] Grunewald J., R. Plagge, M. Bomberg 2001: Advantages and disadvantages of lumped parameter or phase-dividing HAM-models. ICBEST 2001 Conference, Ottawa, Canada

[66] Grunewald, J., R. Plagge & P. Häupl 2002: A 2-levelled hygrothermal material database for the numerical simulation program Delphin4. Proceedings of the International Symposium on Building Physics in Nordic Countries, University of Trondheim, Norway, 39-46.

[67] Hall, M. and Larry Brown. Core Servlets and Java Server Pages (JSP), volume 1. Prentice Hall International, 2. edition, 2003.

[68] Häupl, P., H. Fechner, R. Martin & J. Neue 1999: Energetische Verbesserung der Bausubstanz mittels kapillaraktiver Innendämmung. Tagungsband zum 10. Bauklimatischen Symposium an der TU-Dresden, Band 2, ISBN 3-86005-233-0, 755-767.

[69] Häupl, P. und Fechner, H.; Neue, J.: Numerische Berechnung des hygrischen Verhaltens von Außenwänden. Tagungsband DFG-For¬schungsschwerpunkt Bauphysik der Außenwände

1997 Internationaler Bauphysikkongress 25. und 25. September 1997 Berlin, IRB-Verlag

[70] Häupl, P., R. Plagge & H. Fechner 2001: Hygrische Materialfunktionen von porösen Baustoffen. Gesundheitsingenieur, Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik, 122. Jahrgang, 305 - 316.

[71] Hartigan, J.A. 1975: Clustering algorithms. John Wiley & Sons: New York.

[72] Hartigan, J.A. & M.A. Wong 1979: A K-mean clustering algirithm: Algorithm AS 136. Applied Statistics: 28, 126-130.

[73] Hebgen, Heinrich: Neuer baulicher Wärmeschutz. 1. Auflage. Braunschweig: Vieweg Verlag 1978.

[74] Hebgen, Heinrich; Heck, Friedrich: Außenwandkonstruktionen mit optimalem Wärmeschutz. 2. Auflage. Braunschweig: Vieweg Verlag 1977.

[75] Hempel, R.: Wörterbuch des Wärme- und Kälteschutzes. 3. Auflage. Heidelberg: Heidelberger Verlagsanstalt Januar 1977 (VKI-Rheinhold & Mahla AG, Mannheim).

[76] Hoffmann, D., K. Niesel & R. Plagge 1996: Relationship between pore structure and other physico-technical characteristics of stone. Congress Proceedings of the 8th. International Congress on Deterioration and Conservation of Stone in Berlin 1996, Vol. 1, 461-472.

[77] Holm, A. & Krus, M. 1998. Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung, Bauinstandsetzen 4, H. 1, pp. 33-52.

[78] Husseini, F.: Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund insta¬tionärer Wasserdampfdiffusion. Universität Dortmund, Dissertation 1982. Als Manuskript gedruckt.

[79] Ira R. Forman. Java Reflection in Action. Manning, 2004. ISBN: 1932394184.

[80] JetBrains. Intellijidea. http://www.jetbrains.com.

[81] Johnson, S.C. 1967: Hierarchical clustering schemes. Psychometrika: 32, 241-254.

[82] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen 1983.

[83] Kleemann, M.; Heckler R.; Kolb G.; Hille, M.: Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung in Gebäuden – Materialien, Szenarioanalyse mit dem IKARUS-Raumwärmemodell (WWW-Seite, Stand 14.1.2004). Internet: http://www.bei.uni-bremen.de/download/waerm2_2.pdf (Zugriff: 21.1.2004, 17.07MEZ).

[84] Klier, M.: Kapillarer Feuchteaustausch in verschiedenen Baustoffen. Feuchteprofilmessungen im Kontaktbereich der Baustoffe und Erweite¬rung vorhandener Modellansätze. Diplom-Arbeit Ludwig-Maximilians-Universität München, Sektion Physik (1995).

[85] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH Wiesbaden (1974).

[86] Krischer, O., Kast, W. (1978). Trocknungstechnik 1. Band: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin

[87] Krischer, O., Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin (1978).

[88] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation Universität Stuttgart 1995.

[89] Krus, M.: Ist der Diffusionswiderstand von Baustoffen wirklich feuchteabhängig? 9. Bauklimatisches Symposium Dresden, 14.-16. Sept. 1994, S. 287-302.

[90] Krus, M.: Messung von Feuchteverteilungen mit dem Kernresonanzverfahren. Fachbuchreihe Kontakt & Studium, Band 513.

[91] Krus, M.; Holm, A.: Ist die Trocknungshalbwertzeit zur Beschreibung des Trocknungserhaltens von Putzsystemen geeignet? Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege 8 (2002), H. 5, S. 495 – 511.

[92] Krus, M., Holm, A., Schmid, Th.: Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3 (1997), H.3, S. 1-16.

[93] Krus, M., Kießl, K.: Determination of the moisture storage chracteristics of porous capillary active materials. Materials and Structures, Vol. 31 (1998), H. 212, pp 522-529.

[94] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Feuchte- und Wärmetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.

[95] Künzel H.M. 1995. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. - One- and two-dimensional calculation using simple parameters. IRB Verlag.

[96] Künzel, H.M., Schmidt, Th. und Holm, A.: WUFI-3.1: Programm zur instationären Berechnung des eindimensionalen Wärme- und Feuch¬tetransports in Bauteilen, Holzkirchen (2001).

[97] Kuper, K. et al.: Materialfeuchtemessung. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, S. 173-191, 1997, ISBN 3-8169-1359-8.

[98] Landscheidt, Willi; Schlüter, August: Bauzeichnungen; Darstellung und Konstruktion nach Baunormen. 10., erg. Auflage. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag GmbH, 1981.

[99] Mehling, Germann, Kownatzki: Naturstein Lexikon. 5., völlig überarbeitete und aktualisierte Neuausgabe. München: Verlag Georg D.W. Callwey GmbH & Co., 2003

[100] Meisel, Ulli: Naturstein : Erhaltung und Restaurierung von Außenbauteilen. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1988. (Hrsg. von: Landesinstitut für Bauwesen und Angewandte Bauschadensforschung (LBB), im Auftrag des Ministers für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen).

[101] MySQL AB. Mysql 4.1 reference manual. http://dev.mysql.com/doc/refman/, 2005.

[102] MySQL AB. Mysql connector/j. http://ww w.mysql.com/products/connector/j/, 2005.

[103] Nebel, Herbert: Sanieren und Modernisieren von Fachwerkbauten. Nachdruck von Heft 04.069 „Sanieren und Modernisieren von Fachwerkbauten“ in der Schriftenreihe des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Mönchengladbach: Wilhelm Kraft 19xx.

[104] Nebel, Herbert: Sanieren und Modernisieren von Gebäuden. Handbuch zur behutsamen und fachgerechten Erneuerung älterer Mauerwerksbauten. Wermelskirchen: Bernhard GmbH 1985 (=Schriftenreihe 04 „Bau- und Wohnforschung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Heft Nr. 04.106).

[105] Object Refinery Limited. Jfreechart api documentation. http://www.jfree.org/ /jfreechart/, 2005.

[106] Okronglowski, Doris: Wärmetechnisches Verhalten von Holzbauteilen. Diplomarbeit an der Universität Kassel, Fachbereich Bauingenieurwesen. Kassel: August 2006.

[107] Perl Foundation. The perl directory. http://www.perl.org.

[108] Pistoia Marco, Nataraj Nagaratnam, Larry Koved, and Anthony Nadalin. Enterprise Java 2 Security. Addison-Wesley Longman, Amsterdam, 2004. ISBN: 0321118898.

[109] Plagge, R. 2002: Application of multi-modal pore size distribution models to describe water storage and transfer in capillary porous building materials. Symposium on: Measurement of water flow in porous material and its numerical simulation, National Research Institute of Cultural Properties, Tokyo, Japan. 60-71.

[110] Plagge, R. 2004: Hygrothermal Characterization of Building Materials. In: Study of moisture movement in building material and its simulation analysis, Seminar Book of Kyoto University, Katsura Campus, Japan, 20-41.

[111] Plagge, R. & J. Grunewald: 2002: Determination of solute transport from laboratory tracer experiments. Proceedings of the International Symposium on Building Physics in Nordic Countries, University of Trondheim, Norway, 531-538.

[112] Plagge, R., J. Grunewald & P. Häupl 1999: Simultaneous determination of water retention characteristic and moisture conductivity using instantaneous profile techniques. Tagungsband zum 10. Bauklimatischen Symposium an der TU-Dresden, Band 2, ISBN 3-86005-233-0, 433-443.

[113] Plagge, R., P. Häupl, J. Grunewald & H. Fechner 2002: Functional description of water storage and transfer in capillary porous building materials. Tagungsband zum 11. Bauklimatischen Symposium an der TU-Dresden, Band 2, ISBN 3-86005-233-0, 338-350.

[114] Plagge, R., H. Petzold and F. Meißner 2007: Hygrothermal characterization of the Humayun sandstone. Symposium in Delhi on Protection of historical monuments: Indo-European exchange and knowledge transfer on required basics in building climatology (CLIMON).

[115] Plagge, R., G. Scheffler & J. Grunewald 2005: Automatische Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten und des kapillaren Wassergehaltes von porösen Baustoffen. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Bauphysik 27 (2005), Heft 6, 315-323.

[116] Plagge R., & A. Teutsch 2003: Water retention transfer functions of ceramic bricks of the Dresden building stock: A statistical approach. In. Research in Building Physics, eds. J. Carmeliet, H. Hens & G. Vermeir. A.A. Balkema Swets & Zeilinger B.V. Linse Netherlands, Publishers, ISBN 90 5809 565 7, 197-206.

[117] Red Hat Middleware, LLC. Hibernate core for java. http://www.hibernate.org/, 2006.

[118] Reinsch, Dietmar: Natursteinkunde : eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1991.

[119] Rettig Oliver. Tomcat 5, volume 1. Galileo Press, 2004. ISBN: 3898424642.

[120] Ricken, D.: Ein einfaches Berechnungsverfachren für die eindimensio¬nale, instationäre Wasserdampfdiffusion in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität Dortmund (1989).

[121] Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Brocken, H., Hall, C., Plagge, R., Cerny, R., Pavlik, Z. & Kumaran, K. 2004: Interlaboratory comparison of the measurement of basic hygric properties of porous building materials. Journal of Thermal Envelope & Building Science, Vol. 27 No. 4, April 2004, Sage Publications London, Thousand Oaks, New Delhi 2004

[122] Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Brocken, H., Hall, C., Plagge, R., Cerny, R., Pavlik, Z. & Kumaran, K. 2004: A comparison of different techniques to quantify moisture content profiles in porous building materials. Journal of Thermal Envelope & Building Science, Vol. 27 No. 4, April 2004, Sage Publications London, Thousand Oaks, New Delhi 2004

[123] Rothfuchs, Georg: Betonfibel. Band II. Arbeitsdiagramme und –tafeln für Betoningenieure. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag GmbH, 1964.

[124] Sautter, Leopold: Wärmeschutz und Feuchtigkeitsschutz im Hochbau. Berlin: Verlagsgesellschaft mbH Max Lipfert, 1948.

[125] Schalk Chris and Ed Burns. JavaServer Faces. The Complete Reference. McGraw-Hill Professional, 2006. ISBN: 0072262400.

[126] Scheffler, G. & Plagge, R. 2005: Bestimmung des Trocknungsverhaltens von Baustoffen unter definierten Randbedingungen. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Bauphysik 27 (2005), Heft 6, 323-330.

[127] Scheffler, G., J. Grunewald & R. Plagge 2006: Evaluation of Functional Approaches to describe the Moisture Diffusivity of Building Materials. Journal of ASTM International, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

[128] Scheffler, G.; Grunewald, J. and P. Häupl 2004: „Calibration of an Engineering Model of hygrothermal material characteristics“. CIB W40 Meeting in Glasgow, September 2004.

[129] Scheffler, G.; Plagge, R. Defined drying behaviour measurement for building materials

[130] Schrader, Mila: Reet & Stroh als historisches Baumaterial. Suderburg-Hösseringen: Edition :anderweit Verlag GmbH, 1998.

[131] Siedler, Eduard Jobst: Die Lehre vom neuen Bauen. Ein Handbuch der Baustoffe und Bauweisen. Berlin: Bauwelt-Verlag im Ullsteinhaus 1932.

[132] Staufenbiel, Georg; Wessig, Josef: Bauphysik und Baustofflehre : eine Einführung in Experimenten. Band 2. Wärme, Wärmewirkung, Wärmeschutz. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1989.

[133] Staufenbiel, Georg; Wessig, Josef: Bauphysik und Baustofflehre : eine Einführung in Experimenten. Band 3. Wasserdampfdiffusion, Tauwasserbildung, Feuchte- und Frostwirkung. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1992.

[134] Steindlberger, Enno: Vulkanische Gesteine aus Hessen und ihre Eigenschaften als Naturwerksteine. Geologische Abhandlungen Hessen, Band 110. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 2003. Zugl.: Frankfurt am Main, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Diss., 18.1.2002.

[135] Sun Microsystems, Inc. Java se apis and documentation. http://java.sun.com/ /javase/reference/api.jsp, 2007.

[136] Sun Microsystems, Inc. Javaserver faces technology. http://java.sun.com/javaee/ /javaserverfaces/, 2006.

[137] Sun Microsystems, Inc. Solaris 10. http://www.sun.com/software/solaris/, 2006.

[138] Sun Microsystems, Inc. Sun blade 2500. http://www.sun.com/desktop/workstation /sunblade2500/, 2006.

[139] Sun Microsystems, Inc. Sun enterprise 450 server. http://www.sun.com/products-n-solutions/hardware/docs/Servers/Workgroup_Servers/Sun_Enterprise_450/, 1998.

[140] Sun Microsystems, Inc. Sunpci iiipro coprocessor card. http://www.sun.com/desktop/products/sunpcipro/, 2006.

[141] TGL 35 424/02: Bautechnischer Wärmeschutz – Größen, Einheiten, Kennwerte. Dezember 1985.

[142] Verband Rheinischer Bims- und Leichtbetonwerke e.V.: bims – Bauen mit Bimsbaustoffen. Sonderdruck Bimsabbau und Produktion von Bimsbaustoffen. Neuwied: ohne Jahresangabe.

[143] Ward, J.H. 1963: Hierarchical grouping to optimize an objective function. Journal of the American Statistical Association, 58, 236-244.

[144] WIKIPEDIA. Man-in-the-middle-angriff. http://de.wikipedia.org/wiki/Man-In-The-Middle-Attack.

[145] WTA Merkblatt 2-2-91/D Sanierputze, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V., Zürich 1991.

Anhang

Zu Projektende konnten 475 Materialien in den Datenkatalog aufgenommen werden, die im Anhang in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt sind. Nachfolgend sind die Materialien nach Kategorien geordnet aufgelistet. Dabei sind Mehrfachnennungen möglich, da einzelne Stoffe in mehrere Kategorien (maximal 3) fallen.

Anstriche
- Dispersionsfarbe
- Dispersionssilikatfarbe
- Silikonharzfarbe

Putze, Mörtel und Ausfachungen
- Antischimmelputz AiSit
- Armierungsputz kunstharz gebunden
- Blähtonlehm 1
- Blähtonlehm 2
- CaSi Kleber leicht
- CaSi Kleber schwer
- Calciumsilikat_Kleber
- Dämmunterputz NWA
- Fachwerkdeckputz
- Fachwerkmörtel
- Faserlehm mit reichlichem Faseranteil_1200
- Faserlehm mit reichlichem Faseranteil_1400
- Faserlehm mit reichlichem Faseranteil_1600
- Fliessestrich FE 50
- Gips
- Gips Variante A
- Gips VarianteB
- Holzlehm
- Innenputz mit Perlit
- Kalkputz
- Kalkzementputz
- Kieselgurstein
- Klimaputz
- Kunstharzoberputz
- Lehmmörtel
- Lehmputz
- Leichtlehm mit Stroh, Lehmwickel_1000
- Leichtlehm mit Stroh, Lehmwickel_1200
- Leichttonmörtel
- Leichttonmörtel LTM81
- Maschinen-Gipsputz ip22
- Mineralische Klebe- und Spachtelmasse
- Mineralischer Armierungsputz
- Mineralischer Edelputz
- Mineralischer Kalkzement Leichtputz
- Mineralischer Kratzputz
- Multipor Leichtmörtel
- Porengrundputz

- Sanier-, Haft-, Glättputz
- Sanierputz 1
- Sanierputz 2
- Sanierputz leicht
- Secopor
- Silikonharzoberputz
- Spritzdämmputz_Aerostate-Dämmputz
- Spritzdämmputz_Elastizell-Fassadenputz
- Spritzdämmputz_Frisalit-Dämmgips
- Spritzdämmputz_Limpet-Spritzasbest 62 mm_200_0°C
- Spritzdämmputz_Plastoperlit-Dämmputz
- Strohlehm / Lehmstein
- Sumpfkalkputz
- Thermokork
- Transputz SG
- Trass-Kalk-Feinputz
- Trasskalkmaschinenleichtputz
- Trasskalkwärmedämmputz
- Wärmedämm-Lehm
- Wärmedämmputz
- Zementputz

Mauersteine

- Belgischer Ziegel
- Beton
- Bimsbeton
- Blähton
- Glasbausteine_750
- Glasbausteine_in Mörtel_950
- Granit
- Hilssandstein
- Hochdämmender Ziegel 600
- Hochdämmender Ziegel 700
- Holzbeton_nagelbare Steine - Durisol_800
- Indischer Sandstein historisch
- Indischer Sandstein neu
- Joens Ziegel
- Kalksandstein
- Kalksandstein KS
- Kalksandstein Rutsch
- Kalksandstein Xella
- Kalktuff
- Kieselgurstein
- Porenbeton 400
- Porenbeton 500
- Porenbeton 600
- Porenbeton 600/2
- Porenbeton XELLA
- Porenbeton YTONG Nord
- Porenbeton YTONG SÜD
- Porenbeton alt.400
- Porenbeton alt.600

Porenbeton von 1960
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Flugasche_1000
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Flugasche_1200
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Flugasche_600
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Flugasche_800
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Hochofenschlacke GB 35_400
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Hochofenschlacke GB 35_600
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Hochofenschlacke GB 50_1000
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Hochofenschlacke GB 50_800
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Quarzsand_1000
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Quarzsand_1100
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Quarzsand_800
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Quarzsand_900
Rüthener Sandstein
Sandstein
Sandstein Bad Bentheim
Sandstein Cotta
Sandstein Reinhardsdorf
Sandstein Rüthen
Sandstein Velbke
Travertin
Tuffstein
Vermiculit-Beton_1100
Vermiculit-Beton_1200
Vermiculit-Beton_300
Vermiculit-Beton_340
Vermiculit-Beton_470
Vermiculit-Beton_500
Vermiculit-Beton_520
Vermiculit-Beton_600
Vermiculit-Beton_610
Vollziegel ARB
Vollziegel Bernhard
Vollziegel Jöns
Vollziegel Wienerberger
Vollziegel ZA
Vollziegel ZC
Vollziegel ZD
Vollziegel ZE
Vollziegel ZF
Vollziegel ZG
Vollziegel ZH
Vollziegel ZI
Vollziegel ZJ
Vollziegel ZK
Vollziegel ZL
Vollziegel ZM
Vollziegel ZN
Vollziegel ZO
Vollziegel ZP
Vollziegel ZQ
Vollziegel ZS

- Vollziegel, alt
- Vollziegel, extrudiert
- Vollziegel, handgestrichen
- Wienerberger Vollziegel
- Ziegel 1
- Ziegel 800
- Ziegel Falkenlöwe
- Ziegel Glindow
- Ziegel H
- Ziegel Hartmann
- Ziegel Perleberg
- Ziegel Stralsund (alt,~500J.)
- Ziegelsplittbeton_geschlossenporig_1600
- Ziegelsplittbeton_geschlossenporig_1800
- Ziegelsplittbeton_geschlossenporig_2000
- Ziegelsplittbeton_haufwerksporig_1200
- Ziegelsplittbeton_haufwerksporig_1400
- Ziegelsplittbeton_haufwerksporig_1600

Natursteine
- Baumberger Sandstein
- Granit
- Hilssandstein
- Indischer Sandstein historisch
- Indischer Sandstein neu
- Kalktuff
- Krensheimer Muschelkalk
- Obernkirchener Sandstein
- Rüthener Sandstein
- Sandstein
- Sandstein Bad Bentheim
- Sandstein Cotta
- Sandstein Cottaer
- Sandstein Posta
- Sandstein Reinhardsdorf
- Sandstein Rüthen
- Sandstein Rüthener
- Sandstein Sander
- Sandstein Ummendorfer
- Sandstein Velbke
- Sandstein Worzeldorfer
- Sandstein Wüstenzeller
- Sandstein Zeitzer
- Travertin
- Tuffstein

Zementhaltige Baustoffe
- Beton
- Beton W/Z=0.5
- CEM I 42,5R w/z = 0.40
- CEM I 42,5R w/z = 0.50
- CEM I 42,5R w/z = 0.60

CEM II A-LL 42,5R w/z = 0.50
CEM II B-S 32,5R NB w/z = 0.50
Fliessestrich FE 50
Holzbeton_1000
Holzbeton_1200
Holzbeton_600
Holzbeton_800
Holzbeton_T-Dachplatten_300
Holzbeton_lufttrockene Platten_500
Holzbeton_lufttrockene Platten_600
Holzbeton_lufttrockene Platten_700
Holzbeton_lufttrockene Platten_800
Holzbeton_lufttrockene Platten_900
Holzbeton_nagelbare Steine - Durisol_800
Kalkzementputz
Mineralische Klebe- und Spachtelmasse
Mineralischer Armierungsputz
Mineralischer Edelputz
Mineralischer Kratzputz
Polystyrol-Leichtbeton_1000
Polystyrol-Leichtbeton_350
Polystyrol-Leichtbeton_400
Polystyrol-Leichtbeton_450
Polystyrol-Leichtbeton_500
Polystyrol-Leichtbeton_600
Polystyrol-Leichtbeton_700
Polystyrol-Leichtbeton_800
Polystyrol-Leichtbeton_900
Porenbeton 400
Porenbeton XELLA
Porenbeton YTONG Nord
Porenbeton YTONG SÜD
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Flugasche_1000
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Flugasche_1200
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Flugasche_600
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Flugasche_800
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Hochofenschlacke GB 35_400
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Hochofenschlacke GB 35_600
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Hochofenschlacke GB 50_1000
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Hochofenschlacke GB 50_800
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Quarzsand_1000
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Quarzsand_1100
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Quarzsand_800
Porenbeton-Porensilikatbeton mit Quarzsand_900
Porensinterbeton mit Quarzsand_1000
Porensinterbeton mit Quarzsand_1200
Porensinterbeton mit Quarzsand_1400
Porensinterbeton mit Quarzsand_900
Porensinterbeton ohne Quarzsand_1000
Porensinterbeton ohne Quarzsand_1200
Porensinterbeton ohne Quarzsand_1400
Porensinterbeton ohne Quarzsand_800

- Porensinterbeton ohne Quarzsand_900
- Schlacken- und Hüttenbimsbeton_1000
- Schlacken- und Hüttenbimsbeton_1200
- Schlacken- und Hüttenbimsbeton_1400
- Schlacken- und Hüttenbimsbeton_1600
- Schlacken- und Hüttenbimsbeton_1700
- Transputz SG
- Vermiculit-Beton_1100
- Vermiculit-Beton_1200
- Vermiculit-Beton_300
- Vermiculit-Beton_340
- Vermiculit-Beton_470
- Vermiculit-Beton_500
- Vermiculit-Beton_520
- Vermiculit-Beton_600
- Vermiculit-Beton_610
- Zement Fließestrich Typ2 Oberschicht
- Zement-Fließestrich Typ 2 Unterschicht
- Zement-Fließestrich Typ1 Mittelschicht
- Zement-Fließestrich Typ1 Oberschicht
- Zement-Fließestrich Typ1 Unterschicht
- Zement-Fließestrich Typ2 Mittelschicht
- Zement-Fließestrich Typ3 Mittelschicht
- Zement-Fließestrich Typ3 Oberschicht
- Zement-Fließestrich Typ3 Unterschicht
- Zementputz
- Ziegelsplittbeton_geschlossenporig_1600
- Ziegelsplittbeton_geschlossenporig_1800
- Ziegelsplittbeton_geschlossenporig_2000
- Ziegelsplittbeton_haufwerksporig_1200
- Ziegelsplittbeton_haufwerksporig_1400
- Ziegelsplittbeton_haufwerksporig_1600

Dämmstoffe

- Aschensinter (Agloporit)_720
- Basaltfasern_53_10°C
- Basaltfasern_53_30°C
- Basaltfasern_Basaltwollefilz_53
- Basaltfasern_Flugfasern_45
- Basaltfasern_Flugfasern_50
- Basaltfasern_Flugfasern_57,5
- Basaltfasern_Normalfasern_100
- Basaltfasern_Normalfasern_150
- Basaltfasern_Normalfasern_200
- Basaltfasern_Normalfasern_75
- Basaltfasern_Normalfasern_80
- Basaltfasern_Odenwald-Mineralfaserplatte_350
- Basaltfasern_Odenwald-Mineralfaserplatte_700
- Baumwollfasern_50
- Beplankte Schaum-Polystyrol-Platten (Mehrschichtenplatten)_150
- Bimsbeton
- Bimskies_750

Blähtonlehm 1
CPH_Cellulose
Calzium Silikate
Calzium Silikate Al
Cellulose Einblasdämmung
Dämmung aus Aluminium-Folien_geknittert
Dämmung aus Aluminium-Folien_planeben
Dämmunterputz NWA
EPS Expandierter Polystyrol-Hartschaum Deckschicht
EPS-Perimeterdämmung Kernschicht
EPS_040.15
EPS_040.30
Extrudiertes Schaum-Polystyrol_30
Extrudiertes Schaum-Polystyrol_55
Extrudiertes Schaum-Polystyrol_Roofmate FR_40_20°C
Extrudiertes Schaum-Polystyrol_Styrofoam HD-300_53_20°C
Extrudiertes Schaum-Polystyrol_Styrofoam_30_20°C
Flachsdämmplatten
Glasfasern_Fasermatten_100
Glasfasern_Fasermatten_120
Glasfasern_Faserplatten_110
Glasfasern_Faserplatten_40
Glasfasern_Faserplatten_70
Glasfasern_Glaswatte, unkonfektioniert_100
Glasfasern_Glaswatte, unkonfektioniert_60
Glasfasern_Glaswatte, unkonfektioniert_80
Glasfasern_Glaswatte-Leichtfilz_20
Glasfasern_Gullfiber-Fasern, resolharzgebunden_100
Glasfasern_Lose Glasfasern_90
Glasfasern_Rollfilze_40
Glasfasern_Rollfilze_70
Harnstoff-Formaldehyd-Schaum_Piatherm_15
Harnstoff-Formaldehyd-Schaum_Piatherm_25
Harnstoff-Formaldehyd-Schaum_Piatherm_250
Harnstoff-Formaldehyd-Schaum_Piatherm_35
Harnstoff-Formaldehyd-Schaum_Piatherm_75
Harnstoff-Formaldehydharz_040
Holzfaserdämmplatte 1
Holzfaserdämmplatte 2
Holzfaserdämmplatte 3
Holzfaserdämmplatte 4
Holzfaserplatten_Altmark-Platte_180-210
Holzfaserplatten_Altmark-Platte_260
Holzfaserplatten_Altmark-Platte_330
Holzfaserplatten_Altmark-Platte_400
Holzfaserplatten_Bituminierte Holzfaser-Dämmplatten_330
Holzfaserplatten_Feste Holzfaserplatten_400
Holzfaserplatten_Holzfaser-Dämmplatten_300
Holzfaserplatten_Leichte Holzfaser-Dämmplatten_200
Holzfaserplatten_Normale Holzfaser-Dämmplatten_260
Holzspäne
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_370

Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_390
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_460
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_570
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_390
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_450
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_480
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_530
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_400
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_450
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_460
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_500
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_550
Holzwolleleichtbauplatte_1
Holzwolleleichtbauplatte_2
Kork_040
Korkprodukte_Backkork_60
Korkprodukte_Expansit-Platten_145_0°C
Korkprodukte_Expansit-Platten_180_0°C
Korkprodukte_Expansit-Platten_450_0°C
Korkprodukte_Expansit-Schalen_250_0°C
Korkprodukte_Expansit-Schrot_50_0°C
Korkprodukte_Korkplatten_200
Korkprodukte_Korkplatten_250
Korkprodukte_Korkschrot expandiert_60
Korkprodukte_Korkschrot, expandiert_160
Korkprodukte_Korkschrot, expandiert_75
Korkprodukte_Korkschrot, expandiert_90
Korkprodukte_Korkschrot_160_0°C
Korkprodukte_Korkschrot_160_100°C
Korkprodukte_Korkschrot_85_0°C
Korkprodukte_Korkschrot_85_100°C
Korkprodukte_Platten aus Pechkork_150
Korkprodukte_Platten aus Pechkork_250
Korkprodukte_Platten aus Pechkork_300
Korkprodukte_Platten aus Pechkork_400
Korkprodukte_Presskork_160_20°C
Korkprodukte_Presskork_95_20°C
Korkprodukte_Rohkork_120_0°C
Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_150
Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_200
Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_250
Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_300
Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_400
Kunstharzflocken_18
Luftschichten-Dämmplatten_60_mit Aluminium-Folie
Luftschichten-Dämmplatten_60_ohne Aluminium-Folie
Mineralfaser_040
Multipor Dämmplatte
Perlit mit Bitumen_280

Phenolharzschaum_040
Polyurethanschaum_025
Polyurethanschaum_030
Polyäthylen-Schaum_40_1
Polyäthylen-Schaum_40_2
Porenbeton XELLA
Porenbeton YTONG SÜD
Rohr-Stroh-Schilf_Schilfrohrmatten_85
Rohr-Stroh-Schilf_Schilfrohrplatten_170
Rohr-Stroh-Schilf_Schilfrohrplatten_215
Schaum-Phenol_100
Schaum-Phenol_60
Schaum-Polyurethan_mit diffusionsdichter Umhüllung_30
Schaum-Polyurethan_mit diffusionsdichter Umhüllung_40
Schaum-Polyurethan_ohne oder mit diffusionsoffener Deckschicht_30
Schaum-Polyurethan_ohne oder mit diffusionsoffener Deckschicht_40
Schaumglas einlagig_150_20°C
Schaumglasplatten_130
Schaumglasplatten_150
Schaumkies_Celramik-Platte_178
Schaumkies_G+H Schaumkies_150_0°C
Schlackenwolle_Matten_110
Schlackenwolle_Matten_60
Schlackenwolle_Matten_90
Schlackenwolle_Platten_140
Schlackenwolle_Platten_170
Schlackenwolle_z.B. Kamilit (DDR)_90
Seegras-Matten_150
Seegras-Matten_unbelastet_100
Spritzdämmputz_Limpet-Spritzasbest 62 mm_200_0°C
Steinwolle_100
Steinwolle_160_0°C
Steinwolle_200
Steinwolle_60
Steinwolle_Sillan-Hartplatte_250
Steinwolle_Sillan-Hartplatte_350
Strohlehm / Lehmstein
Thermokork
Torfmull_200
Vermiculit_125
Vermiculit_170_20°C
Vermiculit_80_20°C
Vermiculit_Schüttdichte_170_100°C
Vermiculit_Schüttdichte_78_0°C
Vermiculit_Schüttdichte_78_100°C
Vermiculit_Schüttdichte_96_0°C
Vermiculit_Schüttdichte_96_100°C
Wärmedämm-Lehm
XPS Extrudierter Polystyrol-Hartschaum 1 (Deckschicht)
XPS Extrudierter Polystyrol-Hartschaum 1 (Kernschicht)
XPS Extrudierter Polystyrol-Hartschaum 2 (Deckschicht)
XPS Extrudierter Polystyrol-Hartschaum 2 (Kernschicht)

XPS_Deckschicht 3
XPS_Kernschicht 3
Zellulose
Zellulosefaser_040
Zellulosefolien_Wellit-Platten_35

Bauplatten
BFU
BFU 100 Sperrholz
Beplankte Schaum-Polystyrol-Platten (Mehrschichtenplatten)_150
Bimsbeton
Calzium Silikate
Calzium Silikate Al
DWD-Holzfaserplatte
EPS Expandierter Polystyrol-Hartschaum Deckschicht
EPS-Perimeterdämmung Kernschicht
Furnierschichtholz Kerto Q
Gipsgeb.Faserplatte Fermacell
Gipskartonplatte GKB
Gipskartonplatte
Holzbeton_lufttrockene Platten_500
Holzbeton_lufttrockene Platten_600
Holzbeton_lufttrockene Platten_700
Holzbeton_lufttrockene Platten_800
Holzbeton_lufttrockene Platten_900
Holzfaserdämmplatte 1
Holzfaserdämmplatte 2
Holzfaserdämmplatte 3
Holzfaserdämmplatte 4
Holzfaserplatte 2
Holzfaserplatten_Feste Holzfaserplatten_400
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_370
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_390
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_460
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_570
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_390
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_450
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_480
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_530
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_400
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_450
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_460
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_500
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_550
Holzwolleleichtbauplatte_1
Holzwolleleichtbauplatte_2
MSB (Microstrandboard)
OSB/3
Preßspanplatte V100

Spanplatte V100/E1F0
Thermoglasin_480

Holz
BFU
BFU 100 Sperrholz
DWD-Holzfaserplatte
Eiche logitudinal
Eichenholz alt
Fichte radial
Fichte logitudinal
Fichte radial
Furnierschichtholz Kerto Q
Hartholz
Hobelspäne_150
Holzfaserdämmplatte 1
Holzfaserdämmplatte 2
Holzfaserdämmplatte 3
Holzfaserdämmplatte 4
Holzfaserplatte 2
Holzfaserplatten_Altmark-Platte_180-210
Holzfaserplatten_Altmark-Platte_260
Holzfaserplatten_Altmark-Platte_330
Holzfaserplatten_Altmark-Platte_400
Holzfaserplatten_Bituminierte Holzfaser-Dämmplatten_330
Holzfaserplatten_Feste Holzfaserplatten_400
Holzfaserplatten_Holzfaser-Dämmplatten_300
Holzfaserplatten_Leichte Holzfaser-Dämmplatten_200
Holzfaserplatten_Normale Holzfaser-Dämmplatten_260
Holzspäne
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_370
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_390
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_460
Holzwolle-Leichtbauplatten_Heraklith-Platten (Magnesia)_570
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_390
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_450
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_480
Holzwolle-Leichtbauplatten_Lingolith-Platten (Zement)_530
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_400
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_420
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_450
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_460
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_500
Holzwolle-Leichtbauplatten_gipsgebunden_550
MSB (Microstrandboard)
OSB/3
Preßspanplatte V100
Spanplatte V100/E1F0
Weichholz

Naturstoffe

- Baumwollfasern_50
- Bimskies_750
- Blähschiefer_655
- Blähton_525
- Eiche logitudinal
- Eiche radial
- Faserlehm mit reichlichem Faseranteil_1200
- Faserlehm mit reichlichem Faseranteil_1400
- Faserlehm mit reichlichem Faseranteil_1600
- Fichte logitudinal
- Fichte radial
- Flachsdämmplatten
- Hartholz
- Holzspäne
- Kieselgur (Coswig)_270
- Kieselgur ungebunden_100_100°C
- Kieselgur ungebunden_200_100°C
- Kieselgur ungebunden_400_100°C
- Kieselgur ungebunden_600_100°C
- Kieselgur ungebunden_800_100°C
- Kork_040
- Korkprodukte_Backkork_60
- Korkprodukte_Expansit-Platten_145_0°C
- Korkprodukte_Expansit-Platten_180_0°C
- Korkprodukte_Expansit-Platten_450_0°C
- Korkprodukte_Expansit-Schalen_250_0°C
- Korkprodukte_Expansit-Schrot_50_0°C
- Korkprodukte_Korkplatten_200
- Korkprodukte_Korkplatten_250
- Korkprodukte_Korkschrot expandiert_60
- Korkprodukte_Korkschrot, expandiert_160
- Korkprodukte_Korkschrot, expandiert_75
- Korkprodukte_Korkschrot, expandiert_90
- Korkprodukte_Korkschrot_160_0°C
- Korkprodukte_Korkschrot_160_100°C
- Korkprodukte_Korkschrot_85_0°C
- Korkprodukte_Korkschrot_85_100°C
- Lehmmörtel
- Lehmputz
- Leichtlehm mit Stroh, Lehmwickel_1000
- Leichtlehm mit Stroh, Lehmwickel_1200
- Massivlehm mit geringem Faseranteil_1700
- Massivlehm mit geringem Faseranteil_1800
- Massivlehm mit geringem Faseranteil_1900
- Naturbims_Schüttdichte_300
- Naturseide_118_0°C
- Naturseide_118_100°C
- Rohr-Stroh-Schilf_Schilfrohrmatten_85
- Rohr-Stroh-Schilf_Schilfrohrplatten_170
- Rohr-Stroh-Schilf_Schilfrohrplatten_215
- Schwerlehm ohne nennenswerten Faseranteil_2000

Schwerlehm ohne nennenswerten Faseranteil_2200
Schwerlehm ohne nennenswerten Faseranteil_2400
Schäbenplatten_500
Schäbenplatten_850
Seegras-Matten_150
Seegras-Matten_unbelastet_100
Strohlehm / Lehmstein
Thermokork
Torfmull_200
Waldabfallplatten_350
Weichholz
Wärmedämm-Lehm
Zellulose
Zellulosefaser_040

Erden und Böden
Blähtonlehm 2
Holzlehm
Kies, einkörnig_1500
Kies, gemischtkörnig_1850
Kieselgur ungebunden_100_100°C
Kieselgur ungebunden_200_100°C
Kieselgur ungebunden_400_100°C
Kieselgur ungebunden_600_100°C
Kieselgur ungebunden_800_100°C
Kiessand, naturfeucht_1800
Leichtlehm mit Stroh, Lehmwickel_1000
Leichtlehm mit Stroh, Lehmwickel_1200
Massivlehm mit geringem Faseranteil_1700
Massivlehm mit geringem Faseranteil_1800
Massivlehm mit geringem Faseranteil_1900
Sand, feucht_1800
Schwerlehm ohne nennenswerten Faseranteil_2000
Schwerlehm ohne nennenswerten Faseranteil_2200
Schwerlehm ohne nennenswerten Faseranteil_2400

Fassadenbekleidungen, Bodenbeläge und Eindeckungen
Holzbeton_lufttrockene Platten_500
Holzbeton_lufttrockene Platten_600
Holzbeton_lufttrockene Platten_700
Holzbeton_lufttrockene Platten_800
Holzbeton_lufttrockene Platten_900
Travertin
Zement Fließestrich Typ2 Oberschicht
Zement-Fließestrich Typ 2 Unterschicht
Zement-Fließestrich Typ1 Mittelschicht
Zement-Fließestrich Typ1 Oberschicht
Zement-Fließestrich Typ1 Unterschicht
Zement-Fließestrich Typ2 Mittelschicht
Zement-Fließestrich Typ3 Mittelschicht
Zement-Fließestrich Typ3 Oberschicht
Zement-Fließestrich Typ3 Unterschicht

Folien und Abdichtungsstoffe

- Polyamid-Folie mit Flies
- Bitumendachbahn 1
- Bitumenpappe
- Dachunterspannbahn aus Papier mit eingearbeitem Glasfasergewebe
- Natronkraftpapier
- Natronkraftpapier 2
- Natronkraftpapier 3
- Polyethylen-Folie 1
- Polyethylen-Folie 2

Sonstige

- Aschensinter (Agloporit)_720
- Dämmung aus Aluminium-Folien_geknittert
- Dämmung aus Aluminium-Folien_planeben
- Feuerasche_900
- Flugasche_500
- Gichtstaub_350
- Gips mit Polystyrol-Granulat_600
- Glasbausteine_750
- Glasbausteine_in Mörtel_950
- Gummischrot_300
- Hobelspäne_150
- Hochofenschlacke_1000
- Hochofenschlacke_1200
- Hüttenbims_500
- Hüttenbims_750
- Kies, einkörnig_1500
- Kies, gemischtkörnig_1850
- Kieselgur (Coswig)_270
- Kieselgur mit Klebstoff_350_100°C
- Kieselgur ungebunden_100_100°C
- Kieselgur ungebunden_200_100°C
- Kieselgur ungebunden_400_100°C
- Kieselgur ungebunden_600_100°C
- Kieselgur ungebunden_800_100°C
- Korkprodukte_Platten aus Pechkork_150
- Korkprodukte_Platten aus Pechkork_250
- Korkprodukte_Platten aus Pechkork_300
- Korkprodukte_Platten aus Pechkork_400
- Korkprodukte_Presskork_160_20°C
- Korkprodukte_Presskork_95_20°C
- Korkprodukte_Rohkork_120_0°C
- Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_150
- Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_200
- Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_250
- Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_300
- Korkprodukte_pechgebundener Korkstein_400
- Kunstharzflocken_18
- Luftschichten-Dämmplatten_60_mit Aluminium-Folie
- Luftschichten-Dämmplatten_60_ohne Aluminium-Folie

Naturbims_Schüttdichte_300
Natursand, einkörnig_1300
Natursand, gemischtkörnig_1660
Naturseide_118_0°C
Naturseide_118_100°C
Perlit mit Bitumen_280
Porengips, Porenanhydrit_1000
Porengips, Porenanhydrit_1200
Porengips, Porenanhydrit_400
Porengips, Porenanhydrit_600
Porengips, Porenanhydrit_800
Porengips, Porenanhydrit_900
Porengips, Porenanhydrit_Schaumgips_550
Porengips, Porenanhydrit_Schaumgips_600
Porengips, Porenanhydrit_Schaumgips_650
Porengips, Porenanhydrit_Schaumgips_700
Sand, feucht_1800
Schäbenplatten_500
Schäbenplatten_850
Splitt_1500
Steinholz_1000
Steinholz_1100
Steinholz_1200
Steinholz_1300
Steinholz_1400
Steinholz_1500
Steinholz_1600
Steinholz_550
Steinholz_900
Steinkohlenschlacke_790
Thermoglasin_480
Vermiculit_125
Vermiculit_170_20°C
Vermiculit_80_20°C
Vermiculit_Schüttdichte_170_100°C
Vermiculit_Schüttdichte_78_0°C
Vermiculit_Schüttdichte_78_100°C
Vermiculit_Schüttdichte_96_0°C
Vermiculit_Schüttdichte_96_100°C
Waldabfallplatten_350
Zellulosefolien_Wellit-Platten_35