

**Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten
poröser mineralischer Baustoffe.
Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken.**

Von der Fakultät
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Martin Krus
aus Herbolzheim

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. sc.techn. h.c.Dr.-Ing. E.h. Karl Gertis

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Wolf Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Juli 1995

Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik

1995

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen. Sie wurde teilweise im Rahmen des Verbundprojektes „Bausubstanzerhaltung in der Denkmalpflege“ mit finanziellen Mitteln des Bundesforschungsministeriums gefördert.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Dr. E.h. mult. K. Gertis danke ich für die Betreuung, für die vielfältige Unterstützung bei der Durchführung und vor allem für die zahlreichen Hilfestellungen bei der Ausarbeitung dieser Arbeit.

Dank gebührt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt für die Mitbetreuung dieser Arbeit.

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. H.M. Künzel und Herrn Dr.-Ing. K. Kießl, die durch ihre stetige Diskussionsbereitschaft wesentliche Anregungen für die Entwicklung neuer Betrachtungsweisen gegeben haben. Für das sorgfältige und gewissenhafte Schreiben des Manuskriptes sei Frau Martha Westner ganz herzlich gedankt.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Institutes und in besonderem Maße allen studentischen Hilfskräften und Diplomanden, die mich im Laufe der Jahre durch Ihre tatkräftige Hilfe unterstützt haben.

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Martin Krus
 Geboren: 21. April 1958 in Herbolzheim / Breisgau
 Eltern: Dr. Adolf Krus
 Dr. Ericka Krus, geb. Heinze

Ausbildung

4/65 – 7/68 Südstadtschule Villingen-Schwenningen
 9/68 – 5/77 Gymnasium am Romäusring Villingen-Schwenningen
 8/77 – 9/77 Technisches Grundpraktikum Kienzle Apparate GmbH Villingen
 10/77 – 4/84 Studium des Chemieingenieurwesens an der Universität Karlsruhe
 Abschluß: Diplom
 4/85 – 8/85 Aufbaustudium Informatik

Berufliche Tätigkeit

8/85 – 11/86 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart
 Seit 11/86 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen
 Seit 2/95 Gruppenleiter in der Abteilung Hygrothermik

Inhaltsverzeichnis

	Seite		
Verzeichnis der Formelzeichen	4		
<u>1. Problemstellung</u>	5		
<u>2. Auswertung vorhandenen Schrifttums und neue Ansätze</u>	6		
2.1 Feuchtetechnische Grundlagen	6		
2.1.1 Feuchtespeicherung	7		
2.1.2 Feuchtetransport	10		
2.1.2.1 Wasserdampfdiffusion	11		
2.1.2.2 Flüssigtransport	14		
2.2 Experimentelle Verfahren	17		
2.2.1 Bestimmung von Speichereigenschaften	17		
2.2.2 Bestimmung von Dampfdiffusionskoeffizienten	19		
2.2.3 Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten	20		
<u>3. Untersuchte Baustoffe</u>	24		
<u>4. Bestimmung der Speichereigenschaften</u>	25		
4.1 Messung der Saugspannung	26		
4.1.1 Meßprinzip	26		
4.1.2 Apparativer Aufbau	27		
4.1.3 Meßdurchführung und Probenmaterial	27		
4.2 Ergebnisse der Saugspannungsmessung	27		
4.3 Vergleich mit der Quecksilberdruckporosimetrie	30		
4.3.1 Beschreibung der Hg-Druckporosimetrie	30		
4.3.2 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung	30		
4.3.3 Meßergebnisse und Bewertung	30		
4.4 Ermittlung der Speicherfunktion aus Saugspannungsmessung und Sorptionsmessung	32		
<u>5. Bestimmung der Wasserdampfdiffusionskoeffizienten</u>	34		
5.1 Messung im Feuchte- und Temperaturgefälle	34		
5.1.1 Apparativer Aufbau und Meßdurchführung	34		
5.1.2 Ergebnisse der Diffusionsmessungen	34		
5.2 Weitere Beweise für die These des der Diffusion überlagerten Flüssigtransports	36		
5.2.1 Doppelkammerversuch	36		
5.2.2 Temperaturabhängigkeit gemessener Diffusionskoeffizienten	36		
5.2.3 Taupunktmessungen in Kirchen	37		
5.3 Stoffeuchteunabhängiger Diffusionskoeffizient	38		
5.4 Bestimmung von Kapillartransportkoeffizienten im Sorptionsfeuchtebereich aus Diffusionswiderstandsmessungen und Vergleich mit NMR-Messungen	39		
		<u>6. Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten</u>	41
		6.1 Messung der Flüssigkeitsverteilung mit Hilfe der kernmagnetischen Resonanz	41
		6.1.1 Physikalische Grundlagen	41
		6.1.2 Apparativer Aufbau	44
		6.1.3 Meßgenauigkeit, Grenzen der Anwendung	46
		6.1.4 Meßdurchführung	48
		6.2 Meßergebnisse	49
		6.2.1 Eindringverhalten von Wasser	49
		6.2.2 Weiterverteilung von Wasser	50
		6.3 Ermittlung von Kapillartransportkoeffizienten	51
		6.3.1 Koeffizienten für die Befeuchtung	51
		6.3.2 Koeffizienten für die Weiterverteilung	53
		6.3.3 Vergleich der Koeffizienten Befeuchtung - Weiterverteilung	53
		<u>7. Berechnungsbeispiele zum Feuchtehaushalt mittels der neuen Koeffizienten und Vergleich mit praktischen Ergebnissen</u>	56
		7.1 Naturstein-Fassadenausschnitt unter natürlicher Bewitterung	56
		7.2 Flüssigtransport über die Schichtgrenzen zweier miteinander verbundener kapillarporöser Materialien	58
		7.2.1 Meßergebnisse	58
		7.2.2 Rechenergebnisse	59
		<u>8. Zusammenfassung und Konsequenzen</u>	60
		<u>9. Literatur</u>	63

Verzeichnis der Formelzeichen**Lateinische Zeichen**

A [kg/m ² √s]	Wasseraufnahmekoeffizient
B [m/√s]	Wassereindringkoeffizient
B ₀ [T]	äußeres Magnetfeld
D _D [m ² /s]	Dampfdiffusionskoeffizient in Luft
D _w [m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient
D _{OD} [m ² /s]	Oberflächendiffusionskoeffizient
D _{wo} [m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient bei trockenem Baustoff (exponentielle Näherung)
D _{wf} [m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient bei freier Sättigung (exponentielle Näherung)
FID [V]	Freier Induktionsabfall (Meßsignal)
FID ₀ [V]	Meßsignal direkt nach dem Impuls
g [kg/m ² s]	Gesamtmassenstromdichte
g _E [kg/m ² s]	Effusionsstromdichte
g _{OD} [kg/m ² s]	Oberflächendiffusionsstromdichte
g _v [kg/m ² s]	Dampfdiffusionsstromdichte
g _w [kg/m ² s]	Flüssigtransportstromdichte
K _n [-]	Knudsenzahl
L [m]	mittlere freie Weglänge
M [kg/mol]	Molekulargewicht
M _z [T]	Makroskopische Kernmagnetisierung in z-Richtung
M _{z0} [T]	Makroskopische Kernmagnetisierung vor dem Impuls
N _L [mol ⁻¹]	Loschmidt'sche Zahl
n [-]	Anzahl der Messungen
P _k [Pa]	Kapillardruck, Saugspannung
P _L [Pa]	Umgebungsluftdruck
P _ü [bar]	angelegter Überdruck
P ₀ [Pa]	Normdruck
p [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
p _s [Pa]	Sättigungsdampfdruck
R [J/mol K]	universale Gaskonstante
R _D [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
r [m]	Kapillarradius, Krümmungsradius
S/R [-]	Signal/Rausch-Verhältnis
s [m]	Wassereindringtiefe
T [K]	absolute Temperatur
T ₁ [s]	longitudinale Relaxationszeit
T ₂ [s]	transversale Relaxationszeit
t [s]	Zeit

w [kg/m ³]	Wassergehalt
w _f [kg/m ³]	freie Wassersättigung
w _{max} [kg/m ³]	maximale Wassersättigung
x [m]	Ortskoordinate

Griechische Zeichen

α [W/m ² K]	Gesamtwärmeübergangskoeffizient
β _p [kg/m ² sPa]	Wasserdampfübergangskoeffizient
δ [kg/msPa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
δ* [kg/msPa]	fiktive Wasserdampfdurchlässigkeit
ϑ [°C]	Temperatur
λ [m/√s]	Boltzmannvariable
μ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffes
μ* [-]	fiktive Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des feuchten Baustoffes
ρ _w [kg/m ³]	Dichte von Wasser
σ [N/m]	Oberflächenspannung von Wasser
σ _{L,w} [m]	mittlerer gaskinetischer Stoßdurchmesser
φ [-]	relative Feuchte
ω [1/s]	Kreisfrequenz

1. Problemstellung

Wie sich aus wissenschaftlichen, aber auch aus praktisch-wirtschaftlichen Bestrebungen in den letzten Jahren abzeichnet, wird den rechnerischen Möglichkeiten der Feuchtebeurteilung von Bauteilen zunehmend Aufmerksamkeit geschenkt. Aktuelle Aufgabenstellungen, wie die Erhaltung historischer Bausubstanz oder Sanierungs- bzw. Wärmeschutzfragen bei Außenbauteilen bestehender Gebäude, sind in besonderem Maße mit Fragen des Feuchtezustandes und der Veränderung des Feuchteverhaltens infolge eines Eingriffs in die Bausubstanz verbunden. Bedenkt man die zeit- und kostenaufwendigen experimentellen Überprüfungen des Feuchtehaushalts von Bauteilen im 1:1-Maßstab, so werden Überlegungen, die auf die rechnerische Erfassung abzielen, verständlich.

Es existieren bereits eine Reihe von Rechenmodellen für den gekoppelten Feuchte- und Wärmetransport, von denen einige, wie z.B. das Modell von Kießl [56], nachweislich zuverlässige Ergebnisse liefern. Voraussetzung für die rechnerische Anwendung der Modelle ist die möglichst genaue Kenntnis aller notwendigen Stoffkennwerte. Während im Bereich des Wärmetransports und der Wärmespeicherung die physikalischen Grundlagen sowie die für die Bestimmung der Stoffkennwerte einsetzbare Meßtechnik seit langem allgemein bekannt sind, besteht zur Klärung von Feuchtetransportvorgängen in weiten Bereichen noch Forschungsbedarf. Ein Hauptproblem existierender Rechenmodelle besteht darin, daß sie zum Teil sehr komplexe, wenig anschauliche und physikalisch zweifelhafte Feuchtetransport- und Speicherfunktionen verwenden. Mit der derzeit verfügbaren Meßtechnik würde die Bestimmung dieser Funktionen einen sehr hohen Aufwand bei nicht zufriedenstellender Genauigkeit erfordern. Aus diesem Grund hat sich die breite Anwendung von Feuchtetransportberechnungen, die über Dampfdiffusionsbetrachtungen wie beim Glaser-Verfahren [40] in DIN 4108 [25] hinausgehen, für bauphysikalische Fragestellungen bisher nur etwas zögerlich durchgesetzt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, aufgrund von bauphysikalischen Überlegungen geeignetere Funktionen für die Wasserspeicherung und Transportkoeffizienten zu entwickeln. Die natürlichen Feuchteverlagerungsvorgänge in porösen mineralischen Baustoffen können damit besser beschrieben werden, ohne einen allzu großen meßtechnischen Aufwand zu betreiben. Zur Bestätigung der Modelle, die diesen Koeffizienten zugrunde liegen und zur Bestimmung der Koeffizienten werden neue Meßtechniken entwickelt. Mit den neuen Meßtechniken können die Kennfunktionen mit höherer Genauigkeit, höherer Aussagekraft und zum Teil höherer Geschwindigkeit bestimmt werden. Außerdem lassen sich die Transportfunktionen zum Teil aus herkömmlichen Stoffeigenschaften ermitteln oder mit ausreichender Genauigkeit abschätzen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden neben der Feuchtespeicherfunktion nur der Flüssigtransport (Kapillarleitung und "Oberflächendiffusion") und die Dampfdiffusion untersucht. Andere Transportphänomene, wie hydraulische Sickerströmungen, Osmose, Elektrokinese oder Thermosdiffusion werden ausgeschlossen, da sie unter bauphysikalischen Bedingungen von untergeordneter Bedeutung sind oder ihre Wirkungsweisen noch ungeklärt sind (siehe Ziffer 2.1.2).

Diese neuen Erkenntnisse fließen auch in die Entwicklung eines neuen Rechenverfahrens zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen ein [88]. Mit Hilfe des Rechenprogramms ist es möglich, die Richtigkeit der eingesetzten Stoffkennwerte durch einen Vergleich der Rechenergebnisse mit den Meßergebnissen zu überprüfen. Die Validierung der Stoffkennwerte erfolgt an zwei Anwendungsbeispielen, die zeigen sollen, daß die Kennwerte nicht nur unter vereinfachten Versuchsbedingungen Gültigkeit besitzen. Die Konsequenzen, zu denen die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen über Feuchtespeicher- und Transportprozesse kapillarporöser mineralischer Baustoffe für die Verwendung der Stoffkennwerte führen, werden am Ende dieser Arbeit aufgeführt.

2. Auswertung vorhandenen Schrifttums und neue Ansätze

Die Literatursauswertung wird in zwei Kapiteln getrennt zuerst zur Darlegung der theoretischen Grundlagen durchgeführt. Im zweiten Kapitel werden experimentelle Verfahren, die dem Nachweis der Richtigkeit der theoretischen Grundlagen und der Ermittlung von Speicher- und Transportkoeffizienten dienen, vorgestellt und ihre Anwendbarkeit für die Untersuchungsziele beurteilt.

2.1 Feuchtetechnische Grundlagen

Eine sehr umfangreiche Literatursauswertung (650 Texte) über den Feuchtetransport in Baustoffen wurde bereits von Kießl 1980 veröffentlicht [55]. Hier sollen deshalb nur die für die vorliegende Arbeit wichtigen Grundlagen sowie die in Kießl's Literatursauswertung nicht enthaltene, zumeist neuere Literatur dargestellt werden.

Der Feuchtehaushalt poröser mineralischer Baustoffe wird durch die Feuchtespeichereigenschaften sowie die im Baustoff in flüssiger und gasförmiger Phase ablaufenden Feuchtetransportvorgänge bestimmt. Da die Feuchtespeicherung und der Feuchtetransport bei mineralischen Baustoffen im Porenraum stattfindet, soll anhand von rasterelektronenmikroskopischen (REM) Aufnahmen an Porenbeton und zwei Sandsteinen ein Eindruck über Porenraumgeometrien vermittelt werden. Bild 1 [39] zeigt den Porenbeton in zwei unterschiedlichen Vergrößerungen. Im linken Bild sind bei einer 22-fachen Vergrößerung die für den Porenbeton typischen Makroporen mit einem Durchmesser von 0,1 bis 1 mm deutlich zu erkennen. Bei weiterer Vergrößerung auf das Elftausendfache zeigt sich der Aufbau des Feststoffgerüsts mit seiner nadelförmigen Struktur. Bild 2 zeigt die Porenraumstruktur für Baumberger Sandstein (links, achthundertfünfzigfache Vergrößerung) und Sander Sandstein (rechts, vierhundertfünfzigfache Vergrößerung), die sich in ihrem Aufbau trotz der ähnlichen Genese beider Natursandsteinsorten deutlich unterscheiden [41]. Der Baumberger Sandstein besteht aus einem Konglomerat feiner Kristalle mit einem Durchmesser von wenigen Mikrometern, die die Poren umkleiden. Der Sander Sandstein zeigt wesentlich größere Kristalle von mehreren

Zehntelmillimetern Durchmesser. Die Wandungen der Porenräume sind zum Teil mit feinen Blättchen besetzt.

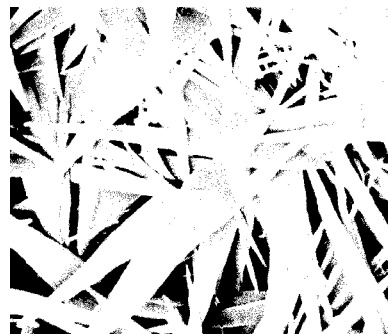
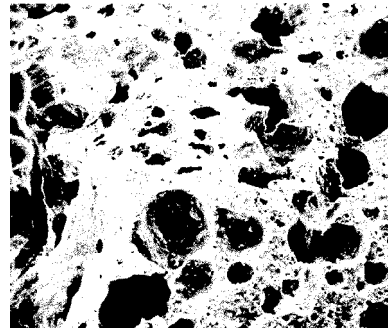


Bild 1 Rasterelektronische Aufnahme von Porenbeton [38] mit 22-facher Vergrößerung (oben) und elftausendfacher Vergrößerung (unten). Während die Poren im Baugerüst bei geringer Vergrößerung rundlich wirken, ist die bei hoher Vergrößerung sichtbare Mikrostruktur von spitzen Nadeln geprägt. Ein Zylinderkapillarenmodell zur Beschreibung der Porenstruktur erscheint hier unpassend.

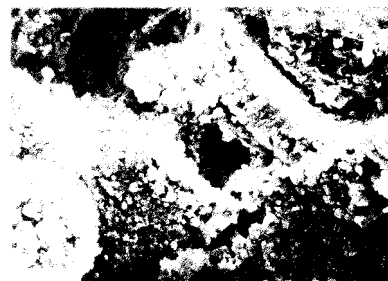


Bild 2 Rasterelektronische Aufnahmen [44] von Baumberger Sandstein in 850-facher Vergrößerung (oben) und Sander Sandstein in 450-facher Vergrößerung (unten). Trotz der sehr ähnlichen Genese zeigen beide Sandsteinarten deutliche Unterschiede in ihrer Porenstruktur.

Anhand dieser Aufnahmen wird deutlich, wie schwierig es sein muß, ein einfaches mathematisch faßbares Porenmodell zu finden, das die realen Porenraumgeometrien bezüglich ihrer komplexen Einflüsse auf Feuchtespeicherung und Feuchtetransport auch nur näherungsweise wiedergeben kann. Hinzu kommt, wie die Beispiele zeigen, daß das Porenmodell nur für eine enge Auswahl ähnlicher Baustoffe anwendbar ist. Es ist also eine Reihe verschiedener Porenmodelle zu entwickeln, um die gebräuchlichen mineralischen Baustoffe zu beschreiben. Brunauer [12] versucht aus diesem Grund den Porenraum durch Verwendung des hydraulischen Radius ohne Porenmodell zu beschreiben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Porenmodelle nur für eine anschaulichere Darstellung der Überlegungen und Ergebnisse verwendet, um die Vergleichbarkeit mit verschiedenen Methoden gewonnener Meßergebnisse zu gewährleisten. Am verbreitetsten und einfachsten ist das Modell von unverzweigten Kapillarröhrchen unterschiedlicher Radien (zylindrisches Porenmodell). Die Verwendung dieses einfachen Porenmodells führt natürlich zu systematischen Fehlern, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen (siehe auch Fitzner [32] und Schubert [124]).

2.1.1 Feuchtespeicherung

Für poröse mineralische Baustoffe lassen sich drei Bereiche unterscheiden, der Sorptionsfeuchtebereich, der Kapillarwasserbereich und der Übersättigungsbereich. Auf diese drei Bereiche soll im folgenden näher eingegangen werden.

Sorptionsfeuchtebereich

Der Sorptionsfeuchtebereich ist bestimmt durch die als Sorption bezeichnete Anlagerung von Wasser aus der umgebenden feuchten Luft bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes. Der Zusammenhang zwischen der Menge des angelagerten Wassers und der relativen Luftfeuchte wird bei isothermen Verhältnissen durch die Sorptionsisotherme charakterisiert (siehe Bild 3). Die Sorptionsisotherme hat für hygroskopische poröse Baustoffe einen typi-

schen s-förmigen Verlauf ([55] [39] [61]) und zeigt oft einen Hystereseeffekt zwischen Feuchteaufnahme und -abgabe (Adsorption und Desorption). Dieser Hystereseeffekt wird weitgehend als Folge unterschiedlicher Benetzungseigenschaften bei Adsorption und Desorption oder anderer durch die Porenraumgeometrie hervorgerufener Effekte ([18] [45] [111]) angesehen. Messungen von Künzel [82] zeigen aber, daß für die meisten Baustoffe die Hysterese so wenig ausgeprägt ist, daß zur Charakterisierung des Sorptionsfeuchtebereichs die Adsorptionsisotherme ausreicht. Für den Fall einer etwas stärker ausgeprägten Hysterese ist nach Untersuchungen von Rode [114], der Berechnungsergebnisse mit und ohne Berücksichtigung der Hysterese verglich, durch Mittelung von Ab- und Desorptionsisotherme eine ausreichend genaue Berechnung des Feuchteverhaltens solcher Stoffe möglich. Der Temperatureinfluß ist in Bild 3 unten schematisch angedeutet. Krischer [68] gibt eine näherungsweise lineare Abhängigkeit an, wobei sich der Gleichgewichtsfeuchtegehalt je nach relativer Luftfeuchte um einen Faktor in der Größenordnung von 10^{-3} bis $10^{-2} K^{-1}$ ändert. Die typischen Eigenschaften einer Sorptionsisotherme für hygroskopische Stoffe sind in Bild 3 oben zusammengestellt. Der untere Bereich bis ca. 15 % r.F. ist bestimmt durch eine monomolekulare Belegung der Feststoffoberfläche und geht dann über in einen linear ansteigenden Bereich multimolekularer Belegung, der bei etwa 50 % r.F. endet. Aus diesem Verlauf kann nach der BET-Theorie [11] die innere Oberfläche ermittelt werden. Der folgende progressiv ansteigende Bereich wird der Kapillarkondensation zugeschrieben. Dabei treten im Mikroporenbereich mit Porenradien zwischen etwa $2 \cdot 10^{-9}$ und 10^{-7} m Kondensationserscheinungen auf, die nach dem Gesetz von Kelvin-Thomson auf eine Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes über konkav gekrümmten Menisken zurückzuführen sind ([39] [45] [61]). Unter Annahme eines sphärischen Meniskus in einer Zylinderkapillare erhält man, wie in [55] abgeleitet, die häufig verwendete Formel der Kelvin-Beziehung. Sie gibt den Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Kapillarradius an, bis zu dem die Zylinderporen durch Kapillarkondensation gefüllt sind:

$$\varphi = \exp \left[- \frac{2\sigma \cos \theta}{r \rho_w R_D T} \right] \quad (1)$$

φ [-]	Relative Luftfeuchte
σ [N/m]	Oberflächenspannung des Wassers
θ [grad]	Randwinkel
r [m]	Kapillarradius
R_D [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
T [K]	absolute Temperatur
ρ_w [kg/m ³]	Dichte des Wassers

Bild 4 zeigt den Kurvenverlauf von Gleichung (1) unter Voraussetzung vollständiger Benetzung.

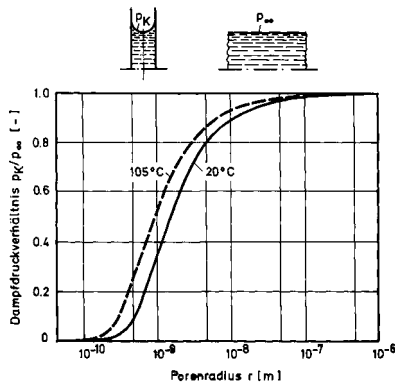


Bild 4 Verhältnis des Sättigungsdampfdruckes über einer gekrümmten Wasseroberfläche (Meniskus) zu demjenigen über einer ebenen Wasseroberfläche in Abhängigkeit vom Kapillarradius. Benetzungswinkel $\theta = 0$ vorausgesetzt [56].

- p_K : Dampfdruck über einem Meniskus mit dem Krümmungsradius ρ_K .
- p_∞ : Dampfdruck über einer Wasseroberfläche mit einem Krümmungsradius $\rho_K \rightarrow \infty$.

Kapillarwasserbereich

Bei relativen Luftfeuchten über 95 % steigt die Sorptionsisotherme sehr stark an. Gerade für diesen Bereich ist aber kein Meßverfahren bekannt, mit der mit hoher Genauigkeit die Luftfeuchte bestimmt werden kann. Eine eindeutige Zuordnung des Wassergehaltes zur Luftfeuchte ist deshalb nicht möglich. Hier beginnt der Kapillarwasserbereich, häufig auch überhygroskopischer Bereich genannt. Dieser Bereich ist gekennzeichnet durch die Fähigkeit kapillarporöser hygroskopischer Materialien, Wasser bis zum Erreichen der freien Wassersättigung aufzusaugen. Die freie Wassersättigung ist definiert als diejenige Stoff-

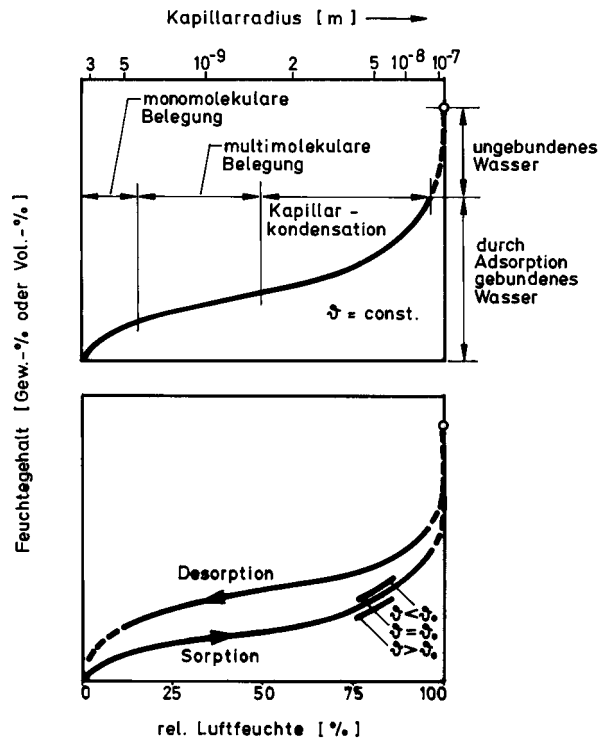


Bild 3 Schematische Darstellung einer typischen Sorptionsisotherme für hygroskopische poröse Baustoffe [56].

Oben: Bereiche der Feuchteaufnahme mit Angabe der ungefähren Porenradien (nach dem Zylinderkapillarenmodell).

Unten: Temperatureinfluß und Hystereseeffekt zwischen Feuchteaufnahme und -abgabe.

feuchte, die durch freies Saugen ohne Einwirkung äußerer Kräfte unter Normaldruck erreicht werden kann. Bei kapillarporösen Baustoffen liegt die freie Wassersättigung immer unterhalb des durch den offenen Porenraum möglichen Wassergehaltes und stellt einen wichtigen Kennwert des Baustoffes dar. Der Grund für das Nichtauffüllen des restlichen Porenraumes ist das Vorhandensein eingeschlossener Luftblasen. Die Ursache der Saugfähigkeit liegt in der Oberflächenspannung von Flüssigkeiten und der Benetzbarkeit von Festkörpern, die sich mit der Flüssigkeit in Kontakt befinden. In [68] [126] [124] [39] [99] und [93] sind ausführlich die Kapillaritätseffekte beschrieben, die sich am anschaulichsten am einfa-

beim Porenbeton die Hysterese nur geringfügig aus. Die Ursache dafür liegt darin begründet, daß bei Porenbeton, wie bei den meisten mineralischen Baustoffen, eine wesentlich breitere Porengrößenverteilung als bei einer Sandschüttung und damit ein deutlich flacherer Verlauf der Saugspannungskurve vorliegt. Dadurch wirkt sich die Hysterese weniger aus. Eigene an Natursandsteinproben durchgeführte Untersuchungen an Natursteinproben zeigen, daß sich annähernd dieselben überhygroskopischen Feuchtegleichgewichte einstellen, unabhängig davon, ob sie durch Be- oder Entfeuchten der Bezugsproben erreicht wurden (Bild 6). Der Temperatureinfluß auf die Saugspannungskurve ergibt sich, wie Messungen von Crausse [20] und Vetterlein [134] zeigen, aus der geringen Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung (siehe Gleichung 2).

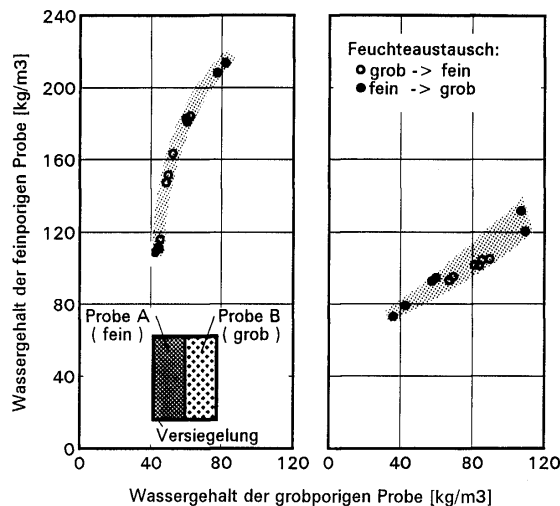


Bild 6 Überhygroskopische Gleichgewichtsfeuchte zweier kapillar verbundener Baustoffe (grob- und feinporiger Sandstein mit großen (links) und kleinen (rechts) Porositätsunterschieden (nach [89])).

Die Anfangswassergehalte der Proben wurden so gewählt, daß jeweils eine Hälfte der grobporigen Bezugsproben durch Feuchteaufnahme und die andere Hälfte durch Feuchteabgabe den Ausgleichswassergehalt erreichte. Die engen Bereiche (schraffiert) der Lage der Gleichgewichtszustände, unabhängig von der Anfangsfeuchtesituation, lassen auf eine unbedeutende Hysterese des kapillaren Feuchteausgleiches bei Natursandsteinen schließen.

Der schraffierte Bereich kennzeichnet die bei der Messung auftretenden Streuungen.

Übersättigungsbereich

Ein Überschreiten der freien Sättigung ist nur durch Anwendung äußeren Druckes, Anlegen eines Unter-

druckes zum Entfernen der Lufteinschlüsse oder durch erzwungene Kondensation durch Unterschreiten des Taupunktes möglich. Eine weitere Möglichkeit besteht in einer langen Wasserlagerung, da die eingeschlossene Luft sich mit der Zeit im Wasser löst. Eine Zuordnung des Wassergehaltes zur Saugspannung ist im Übersättigungsbereich nicht möglich, da durch Ersetzen der sich in einer Pore befindenden Luftblase sich zwar deren Wassergehalt, nicht aber deren Saugspannung verändert. Die Saugspannungskurve einer vakuumgesättigten Probe wird sich somit auch im Kapillarwasserbereich von der Saugspannungskurve einer frei gesättigten Probe unterscheiden. Wie Versuche gezeigt haben [73], findet zwischen übersättigten und kapillargesättigten Bereichen selbst innerhalb von 40 Tagen kein Feuchteausgleich durch Kapillartransport statt. Da unter natürlichen bauphysikalischen Bedingungen eine Befeuchtung mineralischer Baustoffe über die freie Wassersättigung hinaus nur in Ausnahmefällen auftritt, wird der Übersättigungsbereich nicht berücksichtigt.

2.1.2 Feuchtetransport

Bild 7 gibt einen Überblick über die Transporteffekte, die abhängig vom Aggregatzustand und den treibenden Ursachen in Poren auftreten können [56]. Einige Transporteffekte sind aber unter praktischen bauphysikalischen Bedingungen kaum bedeutsam und sollen daher nicht Gegenstand dieser Arbeit sein. Gesamtdruckunterschiede treten mit Ausnahme von hohen Temperaturen unterliegenden Brandeinwirkungen unter üblichen Bedingungen nur in geringem Maße auf (Winddruck), so daß Flüssigkeits- und Gasströmungen vernachlässigt werden können. Der Einfluß der Elektrokinese auf den Kapillartransport ist bis heute noch nicht ausreichend geklärt. Nach [4] wird der Saugvorgang durch elektrokinetische Effekte beschleunigt, nach [139] dagegen behindert. Die Thermoeffusionseffekte liefern nach [5] unter bauphysikalisch auftretenden Bedingungen nur einen zu vernachlässigenden Beitrag zum Gesamttransport von etwa 0,05 %. Dieser Transporteffekt darf nicht verwechselt werden mit dem thermisch bedingten Anteil der Dampfdiffusion aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Wasserdampfdrucks. Feuchtetransportkoeffizienten mit der Temperatur als treibendem Potential, wie sie von vielen Autoren ([55]

[92] [63] [106] u.a.) verwendet werden, sind nur durch das formale Aufspalten des eigentlichen Potentials, des Partialdruckes, in die Potentiale Luftfeuchte und Temperatur bedingt. Ebenfalls nicht Gegenstand dieser Untersuchung soll der Einfluß der Gravitation auf den Feuchtetransport sein. Wie die Autoren [140] zeigen, nimmt die Schwerkraft erst ab Porenradien größer 10^{-6} m Einfluß auf den Flüssigtransport; sie ist

deshalb bei den durchgeführten horizontalen Saugversuchen zu vernachlässigen. In Bild 8 sind die auftretenden Transporteffekte der verschiedenen Feuchtegehaltsstadien am Modell einer einzelnen zylindrischen Kapillare mit variierendem Durchmesser dargestellt (modifiziert nach [117]).

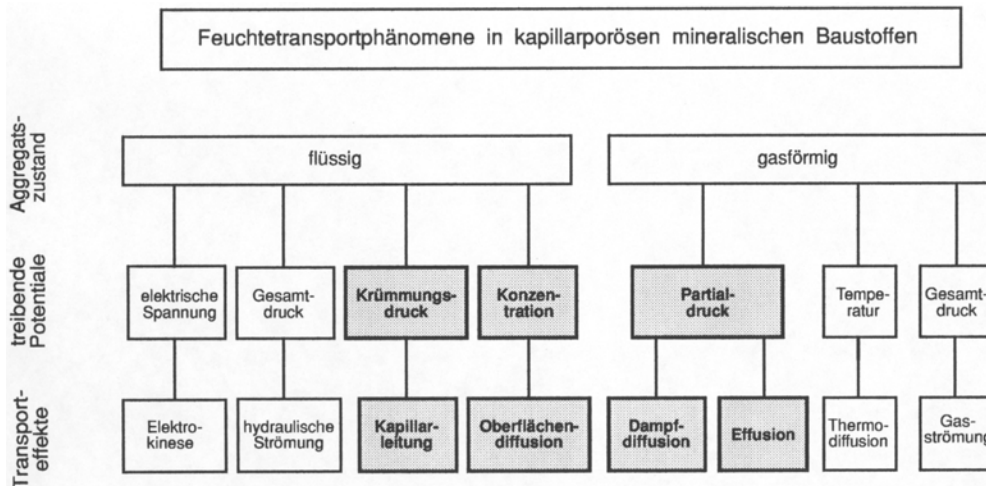


Bild 7 Schematische Übersicht über die Feuchtetransportphänomene in porösen mineralischen Baustoffen (modifiziert nach [56]). Die durch Schraffur hervorgehobenen Transportphänomene werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

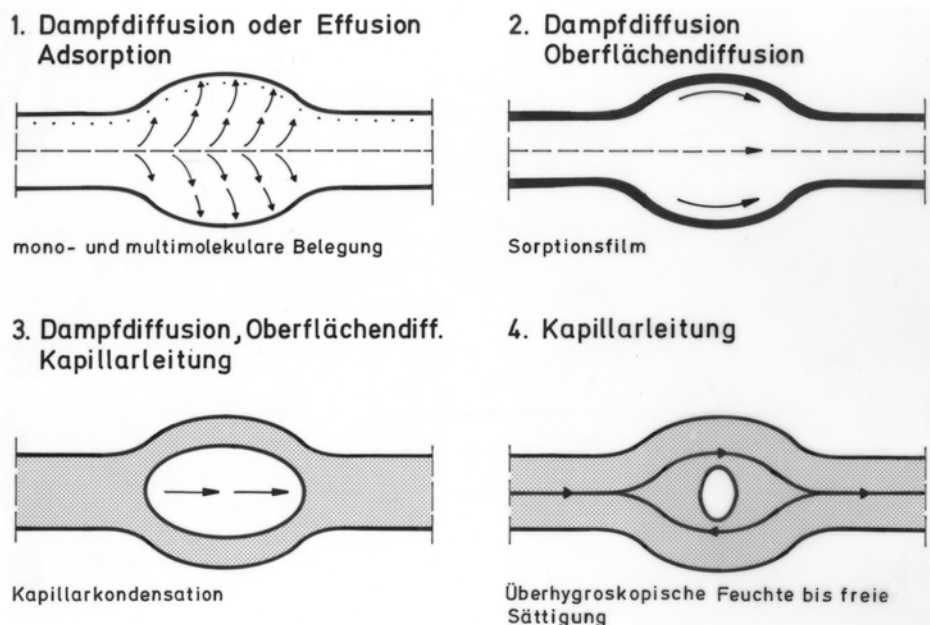


Bild 8 Bei verschiedenen Feuchtegehalten auftretende Transporteffekte, dargestellt am Modell einer zylindrischen Kapillare mit variierendem Durchmesser, modifiziert nach [118].

2.1.2.1 Wasserdampfdiffusion

Wie in Bild 7 dargestellt, kann aufgrund von Partialdruckunterschieden sowohl Dampfdiffusion als auch Effusion auftreten. Mit Hilfe der Knudsenzahl, die das Verhältnis aus mittlerer freier Weglänge des Was-

sermoleküls und dem Porenraumdurchmesser beschreibt, läßt sich eine Einteilung in die verschiedenen Transportmechanismen durchführen.

$$K_n = \frac{L}{2r} \quad (3)$$

K_n [-] Knudsenzahl

L [m] mittlere freie Weglänge

r [m] Porenradius

Ist die mittlere freie Weglänge größer als der Porenraumdurchmesser, liegt die Knudsen'sche Molekularbewegung, auch Effusion genannt, vor. Der Transport wird hier durch die Stöße der Wassermoleküle mit der Porenwand bestimmt. Bei Normalbedingungen liegt die freie Weglänge für Gase und für Wasserdampf in der Größenordnung von 10^{-8} m, die Effusion findet also nur im Mikroporenbereich statt.

Krischer [68] gibt für die Effusion durch Zylinderkapillaren den folgenden Transportansatz an:

$$g_E = -\frac{8}{3} r \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

g_E [kg/m²s] Effusionsstrom

M [kg/mol] Molekulargewicht

R [J/mol K] universale Gaskonstante

T [K] absolute Temperatur

p [Pa] Wasserdampfpartialdruck

r [m] Kapillarradius

Bei Porenabmessungen deutlich größer als die freie Weglänge ($K_n \ll 1$) wird der Transport durch Stöße der Wassermoleküle untereinander bestimmt. In diesem Kontinuumsbereich findet der als Wasserdampfdiffusion bezeichnete Gastransport statt. Nach [129] folgt aus der allgemeinen Gastheorie und unter Verwendung der idealen Zustandsgleichung für feuchte Luft:

$$g_v = -\frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{\sqrt{\frac{1}{M_L} + \frac{1}{M_w}}}{N_L \cdot \sigma_{L,w} \cdot P_L} \left(\frac{RT}{\pi}\right)^{3/2} \frac{dp}{dx} \quad (5)$$

g_v [kg/m²s] Diffusionsmassenstromdichte

M_L, M_w [kg/mol] Molekulargewicht der Luft und des Wassers

$\sigma_{L,w}$ [m] mittlerer gaskinetischer Stoßdurchmesser

P_L [Pa] Umgebungsluftdruck

N_L [mol⁻¹] Loschmidt'sche Zahl

Im Übergangsbereich dazwischen kommen beide Transportmechanismen nebeneinander vor. Da bei den meisten mineralischen Baustoffen ein Porengrößenspektrum vorliegt, das alle drei Bereiche kontinuierlich überdeckt, ist eine klare Abgrenzung der Transporteffekte kaum möglich. Außerdem ist für beide Transportarten das treibende Potential der Partialdampfdruck. Deshalb sollen im weiteren die Effusion

und die Wasserdampfdiffusion im Baustoff mit einem gemeinsamen Diffusionskoeffizienten beschrieben werden.

$$g_v = -\frac{D_D}{\mu R_D T} \frac{dp}{dx} \quad (6)$$

g_v [kg/m²s] Dampfdiffusionsstromdichte

D_D [m²/s] Dampfdiffusionskoeffizient in Luft

R_D [J/kgK] Gaskonstante für Wasserdampf

p [Pa] Wasserdampfpartialdruck

μ [-] Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

In der Bauphysik hat sich für den Dampfdiffusionskoeffizienten in Luft vor allem die empirische Beziehung von Schirmer [123], die auch in DIN 52615 verankert ist, durchgesetzt:

$$D_D = 2,3 \cdot 10^{-5} \frac{P_0}{P_L} (T/273)^{1,81} \quad (7)$$

P_0 [Pa] Normdruck

P_L [Pa] Umgebungsluftdruck

D_D [m²/s] Dampfdiffusionskoeffizient in Luft

Bei der Dampfdiffusion durch poröse Materialschichten hat der Diffusionsstrom einen erhöhten Widerstand zu überwinden. Er ist auf das Verhältnis der von den Poren eingenommenen Fläche zur gesamten Querschnittsfläche (Porosität), auf die durch die Porenstruktur erzwungenen Umwege sowie auf Querschnittsveränderungen in den Porenkanälen zurückzuführen. Krischer und Kast [68] haben dafür einen konstanten Widerstandsfaktor eingeführt, der diese Einflüsse beinhaltet und experimentell zu bestimmen ist. Dieser Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ drückt aus, um welchen Faktor der Diffusionswiderstand einer Materialschicht größer ist als der einer gleich dicken Luftschicht. Der Faktor $D_D/R_D T$ stellt den in DIN 52615 [26] definierten Transportleitkoeffizienten für die Diffusion in Luft dar.

$$g_v = -\frac{D_D}{\mu R_D T} \frac{dp}{dx} = -\frac{\delta}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (8)$$

g_v [kg/m²] Dampfdiffusionsstromdichte

μ [-] Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

δ [kg/msPa] Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft

p [Pa] Wasserdampfpartialdruck

Bestimmt man jedoch den Dampfdiffusionswiderstand δ/μ nach Gleichung (8) gemäß DIN 52615 für unterschiedliche Luftfeuchtebereiche, so zeigt sich bei

hygroskopischen porösen Materialien eine typische Abhängigkeit des gemessenen Diffusionswiderstandes von der relativen Luftfeuchte ([81] [132] [90] [35] u.a.). Mit steigender, über den Probenquerschnitt gemittelter relativer Luftfeuchte steigt die Wasserdampfdurchlässigkeit nichtlinear zum Teil stark an. In Bild 9 ist über den Porenfüllgrad (volumetrischer Anteil des Sorptionswassergehaltes am Gesamtporenvolumen) die Differenz zwischen den nach DIN 52615 im Trockenbereich bestimmten und den im Feuchtbereich bestimmten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen für verschiedene Baustoffe dargestellt. Es zeigt sich eindeutig, daß das in den Poren sorbierte Wasser für den ermittelten Anstieg der Wasserdampfdurchlässigkeit verantwortlich ist [71]. Husseini [54] modifiziert das Glaser-Verfahren dahingehend, daß er die Abhängigkeit der Diffusionswiderstandszahl von der relativen Luftfeuchte und die Sorptionsisotherme hygroskopischer Stoffe bei seinem instationären Diffusionsmodell mit einbezieht. Philip und de Vries [106] erklären die unter isothermen Bedingungen gemessene Erniedrigung des Dampfdiffusionswiderstandes durch das mit steigender Luftfeuchte vermehrte Auftreten von Wasserinseln. Diese Wasserinseln sollen für den Dampftransport als Kurzschluß wirken (siehe Bild 10 oben).

Während einige Autoren ([55] [64] [98] [99] [113] u.a.) ebenfalls die Inselbildung als maßgebliche Ursache für die Feuchteabhängigkeit des Diffusionswiderstandes betrachten, vermuten andere ([17] [35] [67] [117], und [118]), daß die Ursache in der Oberflächendiffusion zu finden ist (siehe Bild 10 unten). Betrachtet man REM-Aufnahmen der Porenräume kapillarporöser Stoffe (Bild 1 und Bild 2), erscheint der von Philip und de Vries als Ursache angenommene Verschluss der Poren durch die sogenannten Wasserinseln, zumindest bei niedrigen relativen Luftfeuchten (unterhalb ca. 80 % r.F.), als nicht sehr wahrscheinlich. Es ist eher anzunehmen, daß sich bei der Aufnahme von Wasser durch Sorption dieses als Sorbatfilm an den Porenwänden und vor allem in den Zwickeln zwischen aneinandergrenzenden Kristallen des Feststoffgerüsts absetzt (siehe Bild 11). Gerade diese Zwickel können mit steigender relativer Luftfeuchte eine große Menge Wasser aufnehmen, das im Vergleich zu dem dünnen, an der Oberfläche festhaftenden Sorbatfilm von nur wenigen Moleküllagedicken eine hohe Beweglichkeit besitzt.

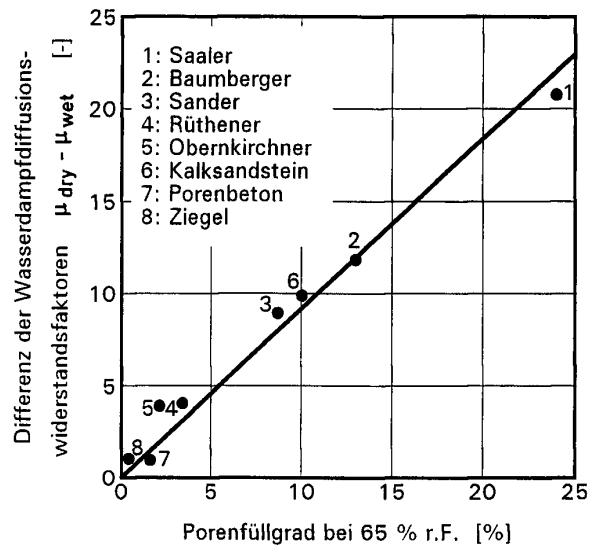
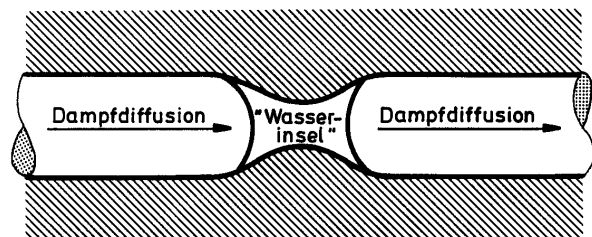
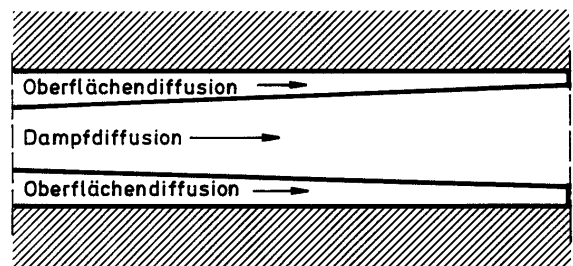


Bild 9 Differenzen der nach DIN 52615 [26] jeweils im Trockenbereich (μ_{dry}) und im Feuchtebereich (μ_{wet}) bestimmten Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktoren verschiedener Natur- und Baustoffe in Abhängigkeit vom jeweiligen sorptionsbedingten Porenfüllgrad bei 65 % r.F.



Inseltheorie



Oberflächendiffusion

Bild 10 Modelle zur Klärung des mit steigendem Feuchtegehaltes beobachteten Anstiegs der Wasserdampfdurchlässigkeit bei hygroskopischen Baustoffen.

Oben: Inseltheorie, die Wasserinseln wirken als Kurzschluß für den Dampftransport (nach [106]).

Unten: Der Dampfdiffusion ist eine Oberflächendiffusion überlagert (nach [119]).

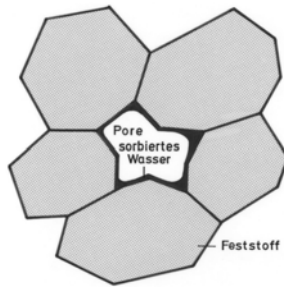


Bild 11 Porenmodell mit durch Sorption aufgenommenem Sorbatfilm und Zwickelwasser. Im Gegensatz zum dünnen Sorbatfilm auf den ebenen Porenoberflächen ist in den Porenzwickeln die Schichtdicke des Wassers ausreichend groß für einen Flüssigtransport.

Liegt ein Partialdampfdruckgradient über der Probe an, so wird entlang dieses Gradienten gemäß Gleichung (8) ein Diffusionstransport stattfinden, der unbeeinflusst ist von der im Porenraum vorliegenden Sorptionsfeuchte. Dies gilt allerdings streng genommen nur so lange, bis der für Diffusion zur Verfügung stehende freie Querschnitt durch das vorhandene Wasser nicht nennenswert verkleinert wird.

Unter isothermen Bedingungen ist in der Probe bei Vorliegen eines Partialdampfdruckgradienten immer ein Gradient der relativen Luftfeuchte bzw. des Sorptionsgehaltes in gleicher Richtung vorhanden. Die unter diesen Bedingungen auftretenden Transportvorgänge lassen sich anschaulich am einfachen Modell einer einzelnen Zylinderkapillare darstellen (siehe Bild 12). Entlang der Kapillare findet aufgrund des Partialdruckgefälles ein Diffusionstransport in gasförmiger Phase statt. Außerdem führt der vorliegende Sorptionsfeuchtegradient zu einem Flüssigtransport in der Sorbatschicht, ebenfalls in Richtung des Partialdruckgradienten. Dies bedeutet aber, daß die Sorptionsfeuchte auf der Seite höherer Luftfeuchte unter die Gleichgewichtsfeuchte absinkt und auf der anderen Seite über die Gleichgewichtsfeuchte ansteigt. Die Folge davon ist eine Sorption an der einen und eine Desorption an der anderen Probenoberfläche. Man kann annehmen, daß das Einstellen des Sorptionsfeuchtegleichgewichtes an den Probenoberflächen im Vergleich zur Diffusion und dem Flüssigtransport durch den Probenquerschnitt sehr schnell abläuft. Die unter isothermen Bedingungen gemäß DIN 52615 ermittelte Wasserdampfdurchlässigkeit ist danach, zumindest bei höherer mittlerer Luftfeuchte, durch die Summe aus der Dampfdiffusion und einem dieser Diffusion überlagertem Flüssigtransport bestimmt.

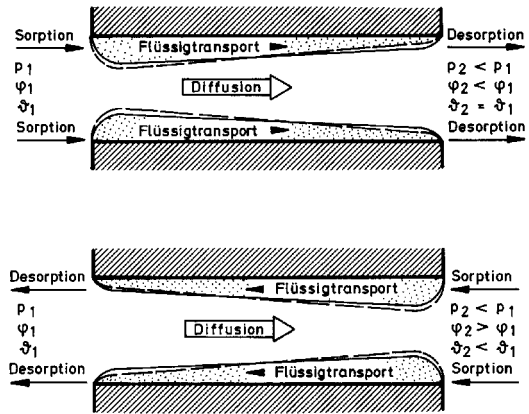


Bild 12 Modell für den überlagerten Flüssig- und Dampftransport im Porenraum hygroskopischer Baustoffe bei isothermen (oben) und nichtisothermen (unten) Randbedingungen. Die gestrichelte Linie stellt das Sorptionsfeuchtegleichgewicht dar, das sich ohne Flüssigtransport in der sorbierten Phase einstellen würde. Die durchgezogene Linie zeigt das sich aufgrund des Flüssigtransport einstellende dynamische Gleichgewicht. Der Flüssigmassenstrom wird durch Sorption auf der Seite höherer Luftfeuchten und Desorption auf der Seite niedrigerer Luftfeuchten aufrecht erhalten.

p_1, p_2 Wasserdampfpartialdruck auf beiden Seiten

φ_1, φ_2 relative Luftfeuchte auf beiden Seiten

ϑ_1, ϑ_2 Lufttemperatur auf beiden Seiten

Die vorliegende Arbeit soll zur Klärung der wirklichen Ursachen für die beobachtete Feuchteabhängigkeit beitragen. Die Klärung dieser Frage ist von großer Bedeutung, da sie darüber entscheidet, ob die übliche Beschreibung des Feuchte-transportes (flüssig und dampfförmig) als feuchteabhängige Diffusion zulässig ist.

2.1.2.2 Flüssigtransport

Bei der Betrachtung der Flüssigkeitstransportvorgänge muß, genauso wie bei der Feuchtespeicherung, zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich und dem Kapillarwasserbereich unterschieden werden. Der Übersättigungsbereich entfällt aus den in Ziffer 2.1.1 beschriebenen Gründen. Im Sorptionsfeuchtebereich tritt in hygroskopischen mineralischen Baustoffen die Oberflächendiffusion auf, im Kapillarwasserbereich die Kapillarleitung.

Oberflächendiffusion

Durch die Anlagerung von Wassermolekülen an den inneren Oberflächen entsteht gemäß der BET-Theorie [11] ein mehr oder weniger starker Sorbatfilm, dessen Dicke mit steigender relativer Luftfeuchte zunimmt. Mit

der Dicke des Sorbatfilms nimmt auch die Mobilität der vielschichtig absorbierten Wassermoleküle zu [61]. Liegt ein Gradient der relativen Luftfeuchte an, so tritt ein Massentransport im Flüssigkeitsfilm an der Porenwand auf, der durch die Schichtdickenunterschiede des sorbierten Filmes ausgelöst wird. Im Gegensatz zu Philip und de Vries [106], welche die Oberflächendiffusion für vernachlässigbar halten, hat der Massentransport durch Oberflächendiffusion bei relativer Luftfeuchte von über 50 % nach [17] [23] [35] [117] [118] und [121] bei hygroskopischen mineralischen Baustoffen erhebliche Bedeutung und kann dabei die reine Dampfdiffusion um ein Vielfaches übersteigen. Es ist anzunehmen, daß der Massenstrom bei der Oberflächendiffusion proportional dem Schichtdickengefälle und damit dem Konzentrationsgefälle ist. Damit handelt es sich hier um einen Diffusionstransport, der mit einem Ansatz analog dem Fick'schen Gesetz beschrieben werden kann ([121] und [118]):

$$g_{OD} = D_{OD} \frac{dw}{dx} \quad (9)$$

g_{OD} [kg/m ² s]	Oberflächendiffusionsmassenstromdichte
D_{OD} [m ² /s]	Oberflächendiffusionskoeffizient
w [kg/m ³]	Wassergehalt
x [m]	Ortskoordinate

Nach Überlegungen von Schaschek [121] und Chang [17] zur Temperaturabhängigkeit der Oberflächendiffusion, die auf einer Betrachtung von Adsorptionsenergien und Aktivierungsenergien zur Überwindung von Potentialschwellen auf heterogenen Oberflächen beruhen, nimmt die Transportintensität der Oberflächendiffusion mit steigender Temperatur zu. Ein weiterer Hinweis, der auf eine Zunahme mit der Temperatur hindeutet, ergibt sich aus der Abnahme der Viskosität der Flüssigkeit mit steigender Temperatur.

Kapillarleitung

Der praktisch bedeutsame Effekt der Kapillarleitung in porösen Baustoffen hat sich bis heute einer exakten theoretischen Beschreibung entzogen ([61] [58] [55]). Die Ursachen dafür liegen, wie schon in Ziffer 2.1 beschrieben, in der äußerst komplexen Hohlraumstruktur mit ihren undefinierbaren Querschnittsänderungen und Verbindungen der Transportkanäle, die sich nicht mehr durch einfache, mathematisch gut erfaßbare Modelle darstellen lassen. Eine rechnerische Approxima-

tion ist daher an bestimmte Modellvorstellungen gebunden und wird sich stets am Experiment orientieren müssen.

Für das Modell einer Einzelkapillare leitet Cammerer [14], ausgehend von der Bernoulli-Gleichung der Hydrodynamik und dem Hagen-Poiseuille-Gesetz für Rohrströmungen, eine Differentialgleichung für die Flüssigkeitsbewegung her und erhält für die Saugweite eine Lösung in der Form:

$$x = B\sqrt{t} \quad (10)$$

x [m]	Wassereindringtiefe
B [m/√s]	Wassereindringkoeffizient
t [s]	Zeit

Diese \sqrt{t} -Beziehung zeigt sich auch bei der kapillaren Wasseraufnahme poröser Baustoffe mit sehr unterschiedlicher Porenstruktur ([125] [80]). Daraus leitet Schwarz [125] den Wasseraufnahmekoeffizienten A , der auch in DIN 52617 [27] Niederschlag findet, gemäß der folgenden Definitionsgleichung ab:

$$g_w = A\sqrt{t} \quad (11)$$

g_w [kg/m ²]	aufgenommene Wassermenge
A [kg/m ² √s]	Wasseraufnahmekoeffizient

Mit Hilfe von Gleichung (11) läßt sich zwar die bei Kontakt mit Wasser aufgenommene Flüssigkeitsmenge berechnen, Aussagen über Wassergehaltsverteilungen oder kapillare Ausgleichsvorgänge sind damit jedoch nicht möglich. Das \sqrt{t} -Berechnungsmodell geht beim Saugen von einer exakt definierten Wasserfront aus, die in das Baustoffinnere eindringt. Dies ist bei realen Baustoffen aber nicht der Fall, da bei ihnen aufgrund der unterschiedlich großen und miteinander verbundenen Poren durch die lokal verschiedenen großen Zugkräfte (siehe Ziffer 2.1.1) und Widerstände stets ein Wassergehaltsgefälle auftritt. Mit Hilfe des Modells miteinander verbundener Zylinderkapillaren läßt sich die Ausbildung von Wassergehaltsprofilen erklären. Die Flüssigkeit in einem kapillarporösen Körper wird durch kapillare Zugkräfte beschleunigt, bis ein Gleichgewicht zwischen dem kapillaren Zug und dem Strömungswiderstand vorliegt. In einer Zylinderkapillaren ist die Zugkraft proportional dem Kehrwert des Radius' (Gleichung (2)), der Strömungswiderstand

aber proportional dem Kehrwert des Radiuses im Quadrat (Hagen-Poiseuillesches-Gesetz). Dies führt dazu, daß das Wasser in den größeren Kapillaren trotz deren niedrigerer Zugkraft vorausseilt (siehe Bild 13 oben). Aus diesem Grund nimmt in Saugrichtung der Wassergehalt stets kontinuierlich ab.

Da die verantwortlichen kapillaren Zugkräfte im Porenraum nicht direkt erfaßbar sind, ihre meßbaren Auswirkungen (Wassergehaltsgefälle) aber in einem funktionalen Zusammenhang damit stehen müssen, hat Krischer [68] formal den Wassergehalt als treibendes Potential eingeführt. Dies führt zu folgendem Diffusionsansatz:

$$g_w = -D_{w(w)} \frac{dw}{dx} \quad (12)$$

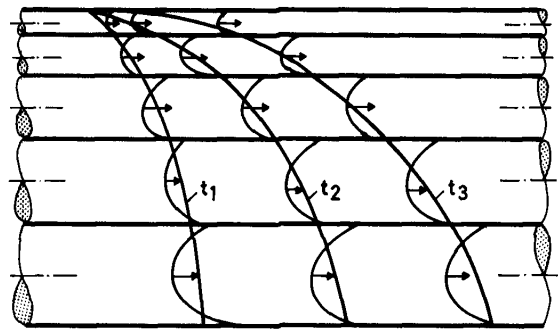
g_w [kg/m²s] Flüssigtransportstromdichte
 $D_{w(w)}$ [m²/s] Flüssigtransportkoeffizient
 w [kg/m³] Wassergehalt

Bei der theoretischen Herleitung geht Krischer ebenfalls 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 . Cammerer [15] kommt über die Bewegungsgleichung im Kapillarenbündel zu einem vergleichbaren Ergebnis. Crank zeigt in [19], daß sich mit diesem Ansatz, unabhängig von der Form des Kapillartransportkoeffizienten, die experimentell gefundene \sqrt{t} -Abhängigkeit der aufgenommenen Wassermenge beim Saugen ergibt. Der Ansatz von Krischer gilt, wie er selbst feststellt, nicht mehr für die folgenden Grenzfälle:

- a) Wassertransport ohne Wassergehaltsgefälle. Der Transportkoeffizient müßte unendlich groß sein, z.B. beim Transport im wassergesättigten Bereich

einer Einzelkapillare oder in einem Baustoffbereich mit freier Wassersättigung.

Normales Saugen (vor Unterbrechung)



Weiterverteilung (nach Unterbrechung)

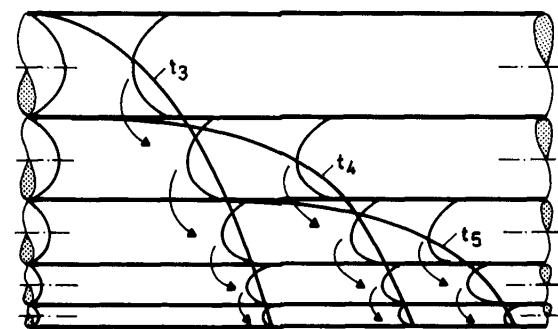


Bild 13 Kapillartransporterscheinungen dargestellt an Modell miteinander verbundener Zylinderkapillaren unterschiedlichen Durchmessers.

Oben: Durch einen geringeren Strömungswiderstand saugen die größeren Kapillaren mit größerer Geschwindigkeit. Eine kontinuierliche Feuchteverteilung bildet sich in Saugrichtung aus.

Unten: Nach Unterbrechung der Wasserzufuhr findet eine Weiterverteilung der Flüssigkeit statt. Noch nicht gefüllte kleinere Kapillaren saugen aufgrund ihrer größeren Saugkraft die größeren Kapillaren leer.

- b) Wassertransport mit unstetigem Wassergehaltsgefälle. Der Transportkoeffizient müßte an der Unstetigkeitsstelle aufgrund des vorliegenden unendlichen Wassergehaltsgradienten Null sein, z.B. beim Transport in einer Einzelkapillare im Bereich des Meniskus, bei Fehlen gewisser Bereiche im Porengrößenspektrum eines Stoffes oder beim Flüssigkeitsdurchgang durch die Trennfläche zweier Stoffe mit unterschiedlicher Kapillarstruktur.

Trotz der genannten Einschränkungen erscheint ein Ansatz nach Gleichung (12) aus folgenden Gründen geeignet:

Der Fall a) mit einer vollständigen Sättigung größerer Bereiche des Baustoffes tritt unter praktischen Verhältnissen kaum auf. Unstetigkeiten in der Porenverteilung (Fall b) sind bei mineralischen Baustoffen im interessierenden Wassergehaltsbereich nicht festgestellt worden. Das Problem der Unstetigkeit an Schichtgrenzen läßt sich durch entsprechende Wahl der rechnerischen Lösungsverfahren oder durch Umrechnen auf ein anderes, materialunabhängiges Potential eliminieren. Da dieser Ansatz eine weitaus bessere Erfassung der tatsächlichen kapillaren Transportvorgänge in kapillarporösen Stoffen, verglichen mit dem reinen \sqrt{t} -Ansatz, erlaubt, hat er bereits bei vielen Arbeiten Eingang gefunden ([34] [37] [58] [64] [106] u. a.) und soll auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden.

Die Temperaturabhängigkeit des Kapillartransports ergibt sich nach Messungen von Crausse [20] und Vetterlein [134] aus der Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Fluids. Die nur sehr geringe Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung ist hier von untergeordneter Bedeutung.

Wird die Wasserzufuhr unterbunden, findet ein Weitertransport der Flüssigkeit statt, obwohl sich an der nicht mehr mit Wasser versorgten Oberfläche Gegenmenisken ausbilden (siehe Bild 13 unten). 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 leersaugen. Es ist zu erwarten, daß dieses Weiterverteilen der Flüssigkeit deutlich langsamer abläuft als der Transport beim Saugvorgang, daß für den Flüssigtransport also je nach Randbedingungen (benetzte oder unbenetzte Oberfläche) unterschiedliche Flüssigtransportkennfunktionen angesetzt werden müssen. Prazak [108] stellt, gestützt auf Messungen an Kalksandstein ebenfalls fest, daß der Kapillartransport von den Randbedingungen abhängt. Er zieht daraus aber lediglich den Schluß, daß der Kapillartransportkoeffizient kein echter Stoffkennwert ist.

2.2 Experimentelle Verfahren

Für die Ermittlung der Speichereigenschaften, der Feuchtetransportkoeffizienten und der Dampfdiffusionskoeffizienten gibt es in der Literatur verschiedene

zum Teil sehr unterschiedliche Bestimmungsverfahren. Aber nicht alle Verfahren sind gleichermaßen oder überhaupt geeignet, die notwendigen Untersuchungen mit optimalem Erfolg bei sinnvollem Aufwand durchzuführen. Im folgenden sollen die verschiedenen Verfahren vorgestellt und ihre Eignung bzw. ihre Vor- und Nachteile dargelegt werden.

2.2.1 Bestimmung von Speichereigenschaften

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 Klimaschranks 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 ([26] [61] [132]). Die Ermittlung einer Sorptionsisotherme dauert je nach Probenmaterial und der Anzahl der Feuchtestufen aufgrund der sehr langsamen Einstellung der Ausgleichsfeuchte mehrere Wochen bis Monate. Aus diesem Grund soll ein weiteres Meßverfahren nicht unerwähnt bleiben, das von Fagerlund in [29] beschrieben wurde. Der Meßeffect beruht dabei auf der Gefrierpunktserniedrigung des Wassers in Poren mit abnehmendem Radius. Dabei läßt sich eine theoretische Beziehung zwischen der Gefrierpunktserniedrigung und dem Radius sowie über die Kelvin-Beziehung gemäß Gleichung (1) mit der relativen Luftfeuchte herstellen. Die Erfassung einer Sorptionsisotherme kann auf diese Weise innerhalb von etwa 3 Stunden durchgeführt werden. Allerdings kann es beim Gefrieren zu Gefügezerstörungen kommen. Zudem muß die Möglichkeit der Unterkühlung der Flüssigkeit im Porenraum in Betracht gezogen werden. Ein weiterer entscheidender Nachteil die-

ser Meßmethode liegt in dem relativ großen meßtechnischen Aufwand.

Im Kapillarwasserbereich muß die Speicherfunktion, die den Zusammenhang zwischen Kapillardruck und Wassergehalt des Baustoffes darstellt, auf anderem Wege bestimmt werden. Kießl [55] berechnet die Speicherfunktion für diesen Bereich aus mit der Quecksilberporosimetrie bestimmten Porenradienverteilungen. Vorteilhafter erscheint dagegen die Verwendung von Wasser als Bestimmungsmedium (in Ziffer 4.3 wird darauf noch näher eingegangen werden). Bei allen Verfahren wird der Kapillardruck bzw. die Saugspannung vorgegeben und nach Einstellung des Gleichgewichtes der Wassergehalt bestimmt. Durch schrittweises Erhöhen der Saugspannung erhält man die Saugspannungskurve. Dazu kann die Zentrifugalkraft beim Schleudern der Probe genutzt werden oder man setzt die im Porenraum befindliche Flüssigkeit direkt einem Über- bzw. Unterdruck aus. Außerdem können auf osmotische Effekte beruhende Meßgeräte eingesetzt werden (Tensiometer). Einen guten Überblick über die verschiedenen Bestimmungsmethoden findet sich in [21].

Beim Schleudern einer wassergesättigten Probe treten abhängig von der Drehzahl und dem Drehachsenabstand Zentrifugalkräfte auf. Unter deren Wirkung wird solange Wasser an der von der Achse entferntesten Probenseite ausgeschleudert, bis zwischen den kapillaren Zugkräften und den Zentrifugalkräften, die auf die am Meniskus hängenden Flüssigkeitssäulen wirken, Gleichgewicht herrscht. Dabei ergibt sich in der Probe ein mit zunehmendem Abstand von der Drehachse steigender Wassergehalt, wie in Bild 14a dargestellt ([67] [126]). Da die angreifenden Zentrifugalkräfte leicht berechenbar sind, läßt sich damit aus einer Reihe von Versuchen mit verschiedener Drehzahl die Saugspannungskurve ermitteln. Um das Wasser auch aus Poren von 10^{-7} bis 10^{-8} cm Durchmesser herausschleudern zu können, müssen je nach Durchmesser der Zentrifuge Drehzahlen von zum Teil deutlich mehr als 10.000 U/min gefahren werden. Abgesehen von den hohen Kosten für eine solche Zentrifuge kann es dabei leicht zu mechanischen Beanspruchungen des Probenmaterials bis hin zu dessen Zerstörung kommen. Außerdem muß nach Versuchsende das Feuchteprofil sofort und schnell ermittelt werden, ehe es sich durch kapillare Ausgleichvorgänge verändert. Dieses Problem kann dadurch umgangen

werden, daß man eine verhältnismäßig kurze Probe verwendet, an deren äußerer Stirnseite sich ein gesättigter kapillarporöser Körper anschließt. Damit erreicht man, sofern dieser Körper feinporös genug ist, eine vorgegebene Länge der Wassersäule. Sofern die Probenlänge klein gegenüber der Gesamtlänge ist, läßt sich der Feuchtegradient in der Probe vernachlässigen ([21] [76]) und man kann durch Wiegen der Probe nach Einstellung des Gleichgewichtes bei einer entsprechenden Anzahl unterschiedlicher Drehzahlen die Saugspannungskurve ermitteln (siehe Bild 14b).

Auf einem anderen Meßprinzip beruhen die sogenannten Tensiometer, die hauptsächlich in der Bodentechnik angewendet werden (siehe [21] und [112]). Bei den Tensiometern ist die Probe in Kontakt mit einer

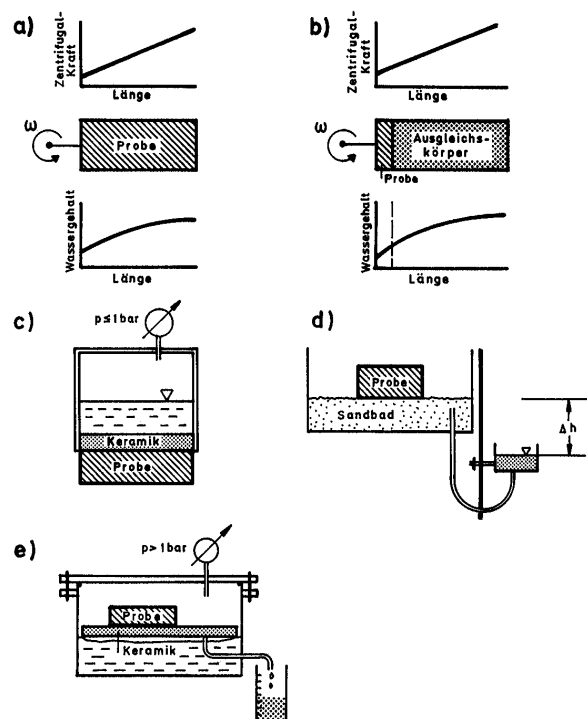


Bild 14 Verschiedene Meßmethoden zur Bestimmung der Saugspannung.

- Schleudermethode: Aufgrund der auftretenden Zentrifugalkräfte wird das Wasser aus der Probe herausschleudert. In der Probe entsteht eine der Zentrifugalkraftverteilung entsprechende Wassergehaltsverteilung.
- Schleudern mit Ausgleichskörper: Durch Verwendung einer sehr kurzen Probe kann der Wassergehaltsgradient in der Probe vernachlässigt werden.
- Tensiometer: Die Probe saugt durch die gesättigte Keramik solange Wasser aus dem wassergefüllten abgeschlossenen Raum, bis sich durch den entsprechenden Unterdruck ein Saugspannungsgleichgewicht einstellt.
- Sandbad: Durch Absenken des Wasserniveaus wird ein hydrostatischer Unterdruck eingestellt.

e) Druckplattenapparat: Durch Aufbringen eines Überdrucks wird die Probe entfeuchtet.

porösen, wassergesättigten Keramik. Diese Keramik steht in Verbindung mit einem abgeschlossenen, wassergefüllten Raum, in dem sich ein Manometer befindet (siehe Bild 14c). Dem Tensiometer wird so lange Wasser entzogen bis sich durch den sich einstellenden meßbaren Unterdruck ein Saugspannungsgleichgewicht einstellt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen hydrostatischen Unterdruck durch ein abgesenktes Wasserniveau zu erzeugen (Bild 14d). Der Nachteil beider Methoden liegt in dem nur sehr begrenzten Saugspannungsbereich von 0 bis etwa 1 bar, da der erreichbare Unterdruck durch den Dampfdruck des Wasser begrenzt ist.

Ein wesentlich weiterer Saugspannungsbereich ist mit dem auf Gardner [36] zurückzuführenden und ebenfalls in der Bodentechnik angewandten Druckplattenapparat (siehe Bild 14e) abzudecken ([6] [9] [47] [104] [122]). In einem Drucktopf befindet sich eine poröse Keramikplatte, die luftundurchlässig, aber wasserdurchlässig ist (auf den Aufbau der Meßanlage wird in Ziffer 4.1.1 noch ausführlicher eingegangen). Aus der auf die Platte gesetzten wassergesättigten Probe wird hierbei statt mit einem Unterdruck mit einem Überdruck bis zur Einstellung eines dem Druck entsprechenden Gleichgewichtswassergehaltes das Wasser herausgedrückt. Durch stufenweises Erhöhen des Druckes kann hiermit die Speicherfunktion bis zu einer Saugspannung von über 100 bar ermittelt werden. Im Gegensatz zur bereits beschriebenen Zentrifugemethode ist hierbei eine Zerstörung der Probe ausgeschlossen, da auf das Feststoffgerüst ausschließlich Druckspannungen ausgeübt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Saugspannungsmessung mit dem Druckplattenapparat erstmals für bauphysikalische Untersuchungen an Festkörpern eingesetzt. Durch einen Vergleich mit der Quecksilberdruckporosimetrie werden die Vorteile dieses Meßverfahrens für die Bestimmung einer realistischen Feuchtespeicherfunktion in Ziffer 4.3 dargelegt.

2.2.2 Bestimmung von Dampfdiffusionskoeffizienten

Für die Bundesrepublik Deutschland ist die Durchführung der Messung von Dampfdiffusionskoeffizienten gemäß DIN 52 615 [26] genormt. Dabei wird nach

Trockenbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 0 bis 50 % r.F., allgemein als "dry-cup"-Verfahren bekannt, und Feuchtbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 50 bis 100 % r.F. ("wet-cup") unterschieden. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen.

Eine plattenförmige Probe des zu prüfenden Materials wird als oberer Abschluß auf ein Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden (Bild 15). Im Gefäß wird durch ein Trocknungsmittel oder eine gesättigte Salzlösung eine konstante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Die Gefäße werden in einen Klimaraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchte gebracht. Unter dem Einfluß des Wasserdampfdruckgefälles zwischen den an die Probenoberfläche angrenzenden Lufträumen diffundiert Wasserdampf durch die Proben hindurch. Nach Einstellen eines stationären Diffusionsstromes ergibt sich eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsänderung des Meßgefäßes, welche dem Diffusionsstrom entspricht.

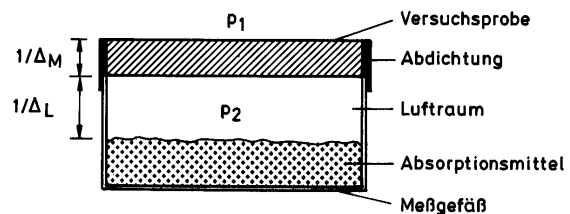


Bild 15 Versuchsanordnung für die Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit (schematisch).

Bei Diffusionsmessungen an dünnen Schichten aus nicht hygroskopischen Materialien stellt sich ein stationärer Diffusionsstrom praktisch sofort ohne "Anlaufvorgang" ein. Bei dickeren Schichten aus hygroskopischen Materialien muß sich in der Versuchsprobe zunächst ein den Umgebungsbedingungen (außen und innen) entsprechendes Feuchtigkeitsgleichgewicht einstellen. Die anfänglich gemessenen Gewichtsänderungen des Meßgefäßes einschließlich der Versuchsprobe sind daher zunächst sowohl auf Feuchtigkeitsänderungen der Versuchsprobe als auch auf Gewichtsänderungen des im Gefäß befindlichen Sorbens zurückzuführen. Eine Trennung der beiden Anteile ist dadurch möglich, daß die Versuchsprobe und das Sorbens getrennt voneinander gewogen werden. Eine Meßvorrichtung hierzu beschreibt z.B. Zehender [141]. Wenn das Gewicht der Versuchsprobe konstant bleibt, ist der stationäre Diffusionsvorgang erreicht. Das Erreichen des stationären Zustandes kann

unter Umständen lange Zeit in Anspruch nehmen, je nach Dicke und Diffusionswiderstand der Versuchssprobe. Da beim Anlaufvorgang häufig ebenfalls zunächst eine proportional mit der Zeit verlaufende Gewichtsänderung auftritt, sind leicht Fehlbeurteilungen möglich, wenn keine ausreichende Meßerfahrung vorliegt ([8] [30]).

Aus versuchstechnischen Gründen ist es zweckmäßig, daß zwischen der Unterseite der Probe und dem Trockenmittel bzw. der Salzlösung eine Luftschicht vorhanden ist [13]. Bei Verwendung eines körnigen Trocknungsmittels (z.B. Silicagel) kann dadurch nach jeder Wägung durch Schütteln frisches Trocknungsmittel an die Oberfläche gebracht werden, bei Verwendung einer Flüssigkeit ist ein Luftzwischenraum zur Verhinderung einer Benetzung der Probenunterseite bei der Handhabung notwendig.

Für die Berechnung des Diffusionswiderstandes der Luftschicht wird von ruhender Luft ausgegangen. Dies ist für die "dry-cup"-Messungen zulässig, da hier vom Trockenmittel zur Probe eine ansteigende relative Luftfeuchte mit daraus resultierender fallender Dichte der Luft vorliegt. Im Falle der "wet-cup"-Messungen liegt unterhalb der Probenoberfläche aber trockenere Luft höherer Dichte als über der Salzlösung vor. Dies kann zu einer Konvektion in der Luftschicht und damit zu einem niedrigeren Diffusionswiderstand durch die Luftschicht führen. Besonders bei Proben mit geringem Diffusionswiderstand kann durch die falsche Beurteilung des Einflusses des Luftspaltes eine zu niedrige Bewertung des Diffusionswiderstandes resultieren.

Bei manchen Materialien kann, wie in [85] gezeigt, mit guter Genauigkeit die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl wesentlich schneller durch instationäre Diffusionsmessungen bestimmt werden. Diese Methode versagt allerdings bei inhomogenen Materialien mit einer dichteren Oberflächenhaut oder Beschichtung.

Da in der Praxis Diffusionsvorgänge in der Regel unter dem Einfluß von Unterschieden in der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit der Luft an den gegenüberliegenden Bauteiloberflächen ablaufen, wurden auch Messungen bei Vorhandensein eines Temperaturgefälles im Prüfkörper durchgeführt ([119] [137]). Diese Methode ist aufwendiger und birgt die Gefahr, daß durch eventuelles Auftreten von Feuchtekon-

densation in der Probe der Diffusionsmeßwert verfälscht wird. Außerdem wurde bei einem Vergleich an Kälteschutzstoffen [13] kein prinzipieller Unterschied der Ergebnisse zu den im Temperaturgleichgewicht erzielten gefunden.

Bei den unter isothermen Bedingungen durchgeführten Diffusionsmessungen liegen der Partialdampfdruckgradient und der Gradient der relativen Luftfeuchte und damit auch der Sorptionsfeuchtegradient in derselben Richtung vor. Eine Unterscheidung von Gasdiffusion und Flüssigtransport im Sorbatfilm zur Überprüfung der in Ziffer 2.1.2.1 dargelegten Überlegungen ist nicht möglich. Dazu müßte eine Meßanlage verwendet werden, mit der es möglich wäre, über dem Probenquerschnitt ein Temperaturgefälle so einzustellen, daß sich ein Gradient der Luftfeuchte und damit auch ein Sorptionsfeuchtegradient entgegen dem Partialdruckgefälle ergibt (siehe Bild 12). Falls wirklich der überlagerte Flüssigtransport im Sorbatfilm zu der unter isothermen Bedingungen ermittelten Verringerung des Dampfdiffusionswiderstandes führte, müßte ein dem Partialdruckgefälle entgegengesetzter Sorptionsfeuchtegradient eine Erhöhung des gemessenen Diffusionswiderstandes bewirken.

2.2.3 Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten

Nach Gleichung (12) ergibt sich der Kapillartransportkoeffizient aus dem Massenstrom des Wassers und dem für den Transport verantwortlichen Wassergehaltsgradienten:

$$D_w = -g_w / \left(\frac{dw}{dx} \right) \quad (13)$$

D_w [m²/s] Flüssigtransportkoeffizient
 G_w [kg/m²s] Flüssigtransportstromdichte
 w [kg/m³] Wassergehalt

Zur Bestimmung dieses Koeffizienten muß deshalb die Wassergehaltsverteilung ermittelt werden. Es ist damit ein Feuchtemeßverfahren mit relativ hoher örtlicher Auflösung einzusetzen. Ein zerstörungsfreies und schnelles Meßverfahren wäre wünschenswert, um die zeitliche Entwicklung der Feuchteverteilung während des Saugvorganges beobachten zu können. Die Messung der zeitlichen Veränderung der Wassergehaltsverteilung an einer Probe schließt auch den Einfluß der unvermeidlichen Schwankungen der Stoffeigenschaften mehrerer Proben eines Baustoffes auf

die Bestimmung des Kapillartransportkoeffizienten aus. Die Ermittlung der Wassergehaltsverteilung muß dazu schnell genug erfolgen können, sodaß während des Meßvorganges keine merkliche Veränderung der Wassergehaltsverteilung auftreten kann.

Wie schwierig die Stofffeuchtemessung ist, wird an der großen Anzahl der verschiedenen Meßmethoden ersichtlich. Eine gute Übersicht über die physikalischen Grundlagen, die Grenzen der Anwendung sowie die Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden wird in [7] [53] [91] gegeben. Im folgenden sollen die verschiedenen in Frage kommenden Bestimmungsverfahren vorgestellt und ihre Eignung für die Bestimmung von Kapillartransportkoeffizienten erläutert werden.

Die Stofffeuchtemeßmethoden lassen sich in konventionelle Verfahren und strahlungstechnische Verfahren unterteilen. Zu den konventionellen Verfahren zählen die Widerstandsmessung, die Wärmeleitfähigkeitsmessung, die Kapazitätsmessung, die Ultraschallmessung und die Darrmethode:

Widerstandsmessung

Der Meßeffect der Widerstandsmessung beruht auf der Verringerung des Ohmschen Widerstandes einer im trockenen Zustand kaum leitenden Probe mit steigendem Wassergehalt ([2] [7] [42] [107]). Eine örtliche Auflösung ist kaum erreichbar und der Meßeffect ist stark von Schwankungen des Elektrolytgehaltes (Salze) abhängig. Der Einfluß vorhandener Salze kann durch Messungen mit Wechselstrom verringert, aber nicht beseitigt werden. Außerdem kann die Messung zu einer Erwärmung der Probe führen. Feuchte-meßgeräte auf Basis einer Widerstandsmessung werden in größerem Umfang und mit Erfolg nur für die Erfassung von Holzfeuchte eingesetzt.

Wärmeleitfähigkeitsmessung

Die mit anwachsendem Feuchtegehalt steigende Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes wird beim Wärmeleitfähigkeitsmeßgerät zur Erfassung der Stofffeuchte genutzt. Einen starken Meßeffect erhält man nur bei Dämmstoffen ([1] und [136]), trotzdem ist bei Baustoffen die Messung der Feuchteverteilung unter Verwendung des Hitzdrahtverfahrens möglich, jedoch nur mit einer Ortsauflösung im Zentimeterbereich [106]. Aller-

dings besteht bei dieser Meßtechnik die Gefahr, daß sich durch das zur Messung notwendige Aufheizen eine Beeinflussung des Feuchteprofils ergibt.

Kapazitätsmessung

Diese Art der Feuchtemessung beruht auf der Tatsache, daß die Dielektrizitätskonstante des Wassers im Frequenzbereich unterhalb von 1 GHz etwa 10 bis 40 mal größer ist als die der meisten trockenen Baustoffe. Befindet sich die zu untersuchende Probe in einem Kondensator, so ist die Änderung der Kapazität des Kondensators ein Maß für die Feuchtigkeit. Durch Aufbau eines elektrischen Schwingkreises wird die Kapazität über die Bestimmung der Resonanzfrequenz ermittelt ([65] [91] [100]). Diese Meßmethode ist bei geeigneter Meßfrequenz nur wenig vom Elektrolytgehalt beeinflusst. Bei der Ankopplung des Kondensators an das Material können Unebenheiten in der Oberfläche zu zufällig schwankenden Abständen zur Elektrode führen, was sich stark auf das Ergebnis auswirkt. Auch können hohe Feuchtegehalte nahe der Elektrode zu Fehlmessungen führen. Diese Meßtechnik eignet sich, um Feuchteverteilungen mit einer Ortsauflösung von etwa 1 cm zu messen, wobei aber das Meßvolumen vom Feuchtegehalt abhängt ([94] [100]).

Ultraschallmessung

Die Feuchtemessung mit Ultraschall beruht auf der Abhängigkeit der Absorption des Schalls sowie dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Feuchte. Aufgrund der deutlich höheren Fehleranfälligkeit der Messung der Absorption wird die Messung der Schallgeschwindigkeit häufiger angewendet ([7] [38] [91]). Wie auch eigene Tastuntersuchungen ergaben, ist diese Meßmethode recht ungenau, sehr abhängig von Zusammensetzung und Struktur des Meßgutes und besitzt praktisch keine örtliche Auflösung.

Darrmethode

Die Darrmethode, also die Ermittlung des Feuchtegehaltes durch Trocknen der Probe, bietet noch immer die genaueste Bestimmungsverfahren und wird deshalb meist als Referenzverfahren verwendet ([7] [91]). Eine Beurteilung verschiedener Einflußgrößen wie Trocknungstemperatur, Jahreszeit und eventuelles Bespülen des Trockenofens mit vorgetrockneter Luft findet sich in [84]. Obwohl eine Feuchteverteilung nur durch Zerstörung der Probe, also ein Zerteilen der

Probe in die für die gewünschte Ortsauflösung notwendige Anzahl von Teilstücken möglich ist, wird diese Methode aufgrund ihrer Genauigkeit, Einfachheit und Preiswürdigkeit häufig eingesetzt ([10] [37]).

Tracer-Methode

Bei dieser Meßmethode werden die Saugversuche mit Wasser durchgeführt, das mit Radioisotopen versetzt ist. Die Eindringtiefe wird durch Schwärzen eines geeigneten, auf die Probe gelegten Films oder durch Ab-scannen der Probe mit Hilfe eines geeigneten Detektors ermittelt. Dazu müssen als Radioisotope Gammastrahler verwendet werden, da Betastrahlen aufgrund ihrer nur sehr geringen Eindringtiefe in Festkörper nur eine Messung des Oberflächenfeuchtegehaltes ermöglichen würden. Außerdem sollte die Halbwertszeit der verwendeten Isotope ausreichend groß im Vergleich zur Saugzeit sein ([7] [38] [46]). Bei dieser Methode kann es zu Chromatographieeffekten und damit zu einem unterschiedlichen Eindringen von Wasser und den Tracern kommen. Wiederholungsmessungen sind aufgrund der Kontaminierung der Proben schwierig und solche Experimente dürfen nur in speziellen Radioisotopenlaboratorien durchgeführt werden.

Röntgendurchstrahlung

Die Absorption von Röntgenstrahlen hängt von der Dichte und der Ordnungszahl des durchstrahlten Materials ab. Wasser besitzt gegenüber den Baustoffen einen deutlich niedrigeren Röntgenabsorptionskoeffizienten. Durch die von Hounsfield [52] für die Medizin entwickelte Computertomographie lassen sich zweidimensionale Bilder mit hoher örtlicher Auflösung darstellen [102]. Aufgrund des niedrigen Absorptionskoeffizienten von Wasser können die Feuchtegehalte allerdings nur mit recht geringer Auflösung bei relativ großem Apparate- und Strahlungsschutzaufwand gemessen werden ([109] [116]).

Mikrowellenmeßtechnik

Wasser ergibt bei der Durchstrahlung mit Mikrowellen eine hohe Dämpfung, die durch die angeregte Rotation der Wassermoleküle verursacht wird. Dabei wird die Mikrowellenenergie in Wärme umgewandelt. Dies kann zur Wassergehaltsbestimmung genutzt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Mikrowellentechnik findet sich in [89]. Bei dieser Meßtechnik haben die Dichte und die Struktur des Probenmaterials gro-

ßen Einfluß auf das Ergebnis, so daß für jedes Material eine Kalibrierkurve erstellt werden muß [3]. Außerdem können bei scharfen Übergängen zwischen trockenem und feuchtem Material die Ergebnisse durch Beugungseffekte verfälscht werden [138]. Die Strahlungsleistung muß soweit begrenzt werden, daß nicht durch eine Erwärmung eine Feuchtwanderung hervorgerufen wird. Aus diesem Grund lassen sich mit diesem Verfahren nur bei sehr dünnen Proben ausreichend hohe Meßgeschwindigkeiten erreichen. Mit der Mikrowellenmeßtechnik kann eine Feuchteverteilung mit einer örtlichen Auflösung von etwa 1 cm mit guter Empfindlichkeit bei hoher Meßgenauigkeit erfaßt werden. Der Einfluß der Temperatur und der Dichte läßt sich durch eine gleichzeitige Erfassung der durch die Materialschicht verursachten Phasenverschiebung teilweise berücksichtigen ([59] [60] [135] und [138]).

Gamma-Durchstrahlung

Die Gammadurchstrahlung ist die am weitesten verbreitete Methode der zerstörungsfreien Messung von Stofffeuchteverteilungen ([78] [101] [110] [127]). Sie beruht auf der Feuchteabhängigkeit der Absorption und Streuung der Gammastrahlung, wobei als Strahler zumeist Am^{241} , Co^{60} und Cs^{137} verwendet werden. Allerdings ist der Absorptionskoeffizient von Wasser etwa gleich groß wie der trockener Feststoffe. Dieses Meßverfahren kann damit als Dichtemeßverfahren betrachtet werden. Der Wassergehalt wird über die Differenz der Dichte zum trockenen Baustoff bestimmt. Bei Materialien mit großen Dichteunterschieden muß eine Trockenmessung mit exakter örtlicher Zuordnung durchgeführt werden. Dies kann besonders bei stark quellenden Stoffen zu erheblichen Schwierigkeiten führen. Bei Materialien, die im Laufe der Zeit ihr Feststoffgerüst und damit ihre Dichte verändern (z.B. durch die Hydratisierung in Beton oder Mörtel), ist mit diesem Verfahren eine verlässliche Wassergehaltsbestimmung kaum möglich. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens liegt in dem erforderlichen Aufwand für den Strahlenschutz. Mit zum Teil neueren Meßanlagen ist die Bestimmung der Feuchteverteilung mit einer Ortsauflösung bis in den Millimeterbereich bei ausreichend hoher Meßgeschwindigkeit möglich ([22] [24] [62] [128]).

Neutronenstrahlungsverfahren

Neutronen mit hoher Energie, sogenannte schnelle Neutronen, treten beim Durchgang durch Materie mit

den Atomen in Wechselwirkung. Sie werden gestreut, abgebremst oder diffundieren. Dadurch treten thermische Neutronen mit veränderter Bewegungsrichtung und verminderter Energie auf. Wasserstoff bremst schnelle Neutronen am effektivsten, sein Bremsvermögen übersteigt das von anderen häufig vorkommenden Elementen um mehr als zwei Zehnerpotenzen. Deshalb stellt die Messung thermischer Neutronen für mineralische Baustoffe eine direkte Meßmethode für Wasser dar ([7] [50] [131]). Im allgemeinen Sprachgebrauch wird ein Feuchtemeßverfahren dann als eine direkte Meßmethode für Wasser bezeichnet, wenn das Meßsignal nur oder wenigstens fast ausschließlich vom Wassergehalt beeinflusst wird. Allerdings ist mit dieser Meßtechnik zunächst keine Ortsauflösung zu erreichen. Abhängig vom Feuchtegehalt wird die Feuchtigkeit innerhalb einer Kugel um den Strahler mit einem Radius von 20 bis 50 cm erfaßt. Eine hohe Ortsauflösung läßt sich nur erreichen, wenn die Probe mit thermischen Neutronen anstelle schneller Neutronen durchstrahlt wird. Die Neutronen durchdringen nach dem Durchgang durch die zu messende Probe eine Fotoplatte, die mit einer Konversionsfolie ausgestattet ist. In der Konversionsfolie entstehen durch den Neutronenbeschuß Elektronen, die eine Schwärzung der Photoschicht hervorrufen ([133] [142]). Als Nachteile der Neutronenstrahlverfahren ist der Einfluß einiger Elemente, wie Chlor, Lithium, Eisen und Kalium auf das Meßsignal sowie der notwendige Apparate- und Strahlenschutz aufwand zu nennen. Außerdem stellt diese Art der Messung eine der Gammadurchstrahlung vergleichbare indirekte Bestimmung des Wassergehaltes dar.

Kernmagnetische Resonanz

Die kernmagnetische Resonanz ist ein Meßverfahren, das in der Biologie, Chemie und Medizin seit langem als spektroskopisches Verfahren verbreitet ist ([43] [49] [51] [66]). Aber auch einfachere, nicht zur Spektroskopie geeignete Geräte finden in der Lebensmittelindustrie, Werkstoffkunde und Bodentechnik Anwendung ([48] [77] [96] [103] [130]). Die kernmagnetische Resonanz beruht auf dem Drehimpuls der positiv geladenen Protonen (Spin) und dem daraus resultierenden magnetischen Momentes. In einem äußeren konstanten Magnetfeld verhalten sich die Wasserstoffkerne wie präzessierende magnetische Dipole; es gibt zwei erlaubte Energieniveaus der Protonen, die der

Orientierung ihres magnetischen Moments parallel oder antiparallel zur Richtung des angelegten Magnetfeldes entsprechen. Durch die Einwirkung eines magnetischen Wechselfeldes bestimmter Frequenz, senkrecht zum konstanten Feld, werden Übergänge zwischen den beiden Energieniveaus induziert. Die dabei von der Stoffprobe absorbierte Hochfrequenzenergie hängt von der Anzahl der Protonen in der Probe ab und kann, da Wasserstoffkerne in Baustoffen im allgemeinen nur in Form von Wasser auftreten, als Maß für die Feuchte dienen. Eine eingehende Beschreibung des Meßprinzips findet sich in Ziffer 6.1.1. Dieses Meßverfahren ist, wie das Neutronenstrahlungsverfahren, ein direktes Feuchtemeßverfahren, allerdings ohne dessen schädliche biologische Wirkung. Es zeichnet sich weiterhin durch seine hohe Genauigkeit bei hoher Meßgeschwindigkeit und geringer Temperaturabhängigkeit aus ([69] [115] [120]). Eine gute örtliche Auflösung ist, wie in dieser Arbeit gezeigt wird, durch Verwendung eines speziellen modifizierten Meßkopfes möglich.

Die für die Bestimmung von Kapillartransportkoeffizienten gestellten Anforderungen an die zerstörungsfreie Feuchtemeßtechnik mit hoher Genauigkeit und guter Ortsauflösung bei hoher Meßgeschwindigkeit können bei sinnvollem Aufwand nur die Gammadurchstrahlungsmethode sowie die Messung der kernmagnetischen Resonanz erfüllen. Die Messung der kernmagnetischen Resonanz als direktes Meßverfahren ermöglicht im Gegensatz zur Gammadurchstrahlung die Feuchtemessung ohne die Notwendigkeit der Trockenmessung. Dies und das Fehlen jeglicher schädlicher Strahlung sind die Gründe für die erstmalige Anwendung der kernmagnetischen Resonanz für bauphysikalische Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit.

Zur Klärung, ob beim Kapillartransport je nach Randbedingung zwei unterschiedliche Transportmechanismen vorliegen (siehe Ziffer 2.1.2.2.), ist eine Meßeinrichtung aufzubauen gewesen, die eine schnelle Erfassung von Feuchteprofilen zuläßt. Es sollte damit möglich sein, während des Saugvorganges auch an schnell saugenden Baustoffen die Feuchteverteilung zu ermitteln, ohne daß sich diese während des Meßzeitraumes merklich verändert. Aus den in einer zeitlichen Abfolge gemessenen Verteilungen lassen sich die Transportkoeffizienten für das kapillare Eindringen

der Flüssigkeit bei benetzter Oberfläche bestimmen. Wenn die Flüssigkeitszufuhr gestoppt wird, nachdem eine ausreichende Menge aufgesaugt wurde, lassen sich auf gleiche Weise die die Weiterverteilung beschreibenden Transportkoeffizienten bestimmen.

3. Untersuchte Baustoffe

Sämtliche Untersuchungen wurden an derselben Auswahl von Baustoffen durchgeführt. Vier Natursandsteinarten (Baumberger Sandstein, Obernkirchner Sandstein, Rüthener Sandstein und Sander Sandstein) wurden so ausgesucht, daß mit ihnen bezüglich der feuchtetechnischen Eigenschaften die reichhaltige Palette der verbauten Natursandsteine abgedeckt wird. An künstlichen Baustoffen wurde jeweils ein Vertreter der im Mauerwerksbau üblicherweise verwendeten mineralischen Baustoffe (Kalksandstein, Porenbeton und Ziegel) ausgewählt. Als Beispiel für ein im Innenausbau verwendetes Material dient Gips. Im folgenden werden diese Baustoffe kurz charakterisiert.

Der Baumberger Sandstein ist ein gelblichgrauer, sandiger Kalkstein aus der Oberkreide mit vorwiegend calcitischer Bindung. Er ist feinporig und hat ein im Vergleich zu anderen Sandsteinsorten hohes Sorptionsvermögen. Der zum Beispiel im Kölner Dom und im Dom zu Münster verbaute Sandstein zeigt eine nur mäßige bis schlechte Verwitterungsresistenz mit Verwitterungserscheinungen wie Verkrustung, Absanden, Schalenbildung sowie Gipsausblühungen [41].

Der Obernkirchner Sandstein ist ein grobsiltiger bis feinsandiger, grauweißer bis gelblichweißer, ungeschichteter Sandstein aus der Unterkreide mit hohem Quarzanteil und vorwiegend quarzitischer Bindung. Dieser ebenfalls feinporige Sandstein besitzt die niedrigste Sorptionsfähigkeit aller hier untersuchten Sandsteine. Er ist im Rathaus in Bremen sowie in mehreren sakralen und profanen Bauten in Bückeberg verbaut und zeigt eine sehr gute bis gute Verwitterungsresistenz. Seine Verwitterungserscheinungen sind Abschalen und löcheriges Auswittern in fossilreichen Lagen [41].

Der Rüthener Sandstein ist ein graugrüner, mittelsandiger Sandstein aus der Oberkreide mit hohem Quarzanteil und barytisch-kieselig-toniger Bindung. Dieser grobporige Sandstein hat ein auffällige hohes Wasseraufnahmevermögen und einen sehr hohen Wasser-

aufnahmekoeffizienten. Der in vielen Gebäuden und Grabsteinen in der Gegend von Rüthen verbaute Sandstein besitzt eine gute Verwitterungsresistenz mit Krustenbildung, dünnem Abschalen sowie Absanden als typische Verwitterungserscheinungen [41].

Der Sander Sandstein ist ein braun- bis olivgrüner fein- bis mittelsandiger Schilfsandstein aus dem mittleren Keuper mit überwiegend toniger Bindung. Dieser feinporige Sandstein mit relativ hoher Sorptionsfähigkeit besitzt einen niedrigen Wasseraufnahmekoeffizienten. Der unter anderem in der Residenz und im Ursulinenkloster Würzburg und im Schloß Seehof bei Bamberg verbaute Schilfsandstein zeigt eine mäßige, teils gute Verwitterungsresistenz mit vielfältigen Verwitterungsbildern (Absanden, Abbröckeln, Schuppen- und Rißbildung sowie Ausblühungen [41]).

Kalksandsteine sind Mauersteine, die aus Kalk und kieselsäurehaltigen Zuschlägen hergestellt, nach innigem Mischen geformt, verdichtet und unter Dampfdruck gehärtet werden. Sie werden als Voll- oder Hohlblocksteine in verschiedenen Dichten und Festigkeitsklassen und je nach Anwendungszweck auch als frostbeständige Vormauersteine oder Verblender hergestellt. Ausgewählt wurde ein Vollstein mit einer Rohdichte von etwa 1900 kg/m^3 . Die Porosität liegt mit 29 Volumenprozent höher als bei Natursandsteinen, die freie Wasseraufnahme und der Wasseraufnahmekoeffizient sind mit der des Baumberger Sandsteines vergleichbar.

Bei der Herstellung von Porenbeton wird mehlfein gemahlener Quarzsand mit Zement und Kalk unter Zugabe von Wasser und einem Treibmittel gut vermengt in Gießformen gegeben. Dort bildet sich in der Mischung Wasserstoff, der diese auftreibt. Nach dem Abbinden entstehen Rohblöcke, aus denen die verschiedenen Bauteile geschnitten werden. In einem Autoklaven werden die Bauteile unter Zugabe von gespanntem Dampf gehärtet. Der Porenbeton besitzt aufgrund seiner hohen Porosität gute Wärmedämmeigenschaften. Die Untersuchungen wurden an einem Porenbeton mit einer Dichte von etwa 600 kg/m^3 und einer Porosität von etwa 72 Vol.-% durchgeführt. Da ein bedeutender Anteil großer Poren ohne nennenswerte Saugfähigkeit vorliegt, sind die Wasseraufnahme und der Wasseraufnahmekoeffizient deutlich niedriger als es die hohe Porosität erwarten läßt.

Der Ziegel ist einer der ältesten künstlich hergestellten Baustoffe. Er wird hergestellt aus Ton, Lehm oder tonigen Massen, mit oder ohne Zusatzstoffe geformt und anschließend gebrannt. Durch Erhöhung der Brenntemperatur kann eine Sinterung erreicht werden, durch die die Ziegel frostbeständig werden. Durch Zugabe von Sägemehl oder Polystyrolperlen können die Rohdichte und die Wärmeleitfähigkeit vermindert werden. Der untersuchte Vollziegel mit einer Rohdichte von etwa 1700 kg/m^3 besitzt eine Porosität von etwa 38 Vol.-% bei einer fast ebenso großen Wasseraufnahmekapazität. Die Sorptionsfähigkeit dieses Materials ist sehr niedrig, der Wasseraufnahmekoeffizient ist dagegen relativ hoch (siehe Tabelle 1).

Beim Gips handelt es sich um einen Baustoff, der im Innenausbau vor allem als Gipskartonplatten Verwendung findet. Der Gips wird auf eine Kartonplatte aufgebracht und durch Überströmen mit trockener, warmer Luft getrocknet. Der Gips besitzt eine sehr große Wasseraufnahmefähigkeit von etwa 40 Vol.-% und einen großen Wasseraufnahmekoeffizienten bei einer nur sehr geringen Sorptionsfähigkeit.

Die feuchtetechnischen Grundkennwerte aller oben aufgeführten Materialien sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Zusammenstellung "klassischer" feuchtetechnischer Stoffkennwerte der untersuchten Baustoffe. Der Wasseraufnahmekoeffizient A und die Dampfdiffusionswiderstandszahlen μ wurden nach DIN 52 617 [27] bzw. DIN 52 615 [26] bestimmt.

Baustoff	Rohdichte [kg/m^3]	Porosität [Vol.-%]	freie Sättigung [kg/m^3]	A-Wert [$\text{kg/m}^2 \sqrt{\text{s}}$]	Dampfdiffusionswiderstandszahl	
					Trockenbereich (3 bis 50 % r.F.)	Feuchtbereich (50 bis 93 % r.F.)
Baumberger	1980	23	210	0,044	20	14
Obernkirchner	2150	14	110	0,046	32	28
Rüthener	1950	24	200	0,30	17	13
Sander	2120	17	130	0,02	33	22
Gips	850	65	400	0,29	8,3	7,3
Kalksandstein	1900	29	250	0,045	28	18
Porenbeton	600	72	290	0,09	7,6	6,7
Vollziegel	1700	38	370	0,25	9,5	8

4. Bestimmung der Speichereigenschaften

Da unter natürlichen bauphysikalischen Bedingungen eine Befeuchtung mineralischer Baustoffe über die freie Sättigung nur in Ausnahmefällen auftritt, werden hier nur der Sorptionsfeuchtbereich und der Kapillarwasserbereich betrachtet. Für beide Bereiche müssen verschiedene Meßtechniken eingesetzt werden. Die Bestimmung der Sorptionsisotherme ist bereits hinlänglich bekannt und das Meßverfahren innerhalb der DIN 52620 [28] normiert, weshalb auf eine weitere Beschreibung des Verfahrens verzichtet wird. Ein relativ umfassender Katalog an Sorptionsisothermen ist in [44] zu finden. Bei einigen Materialien ist die Variationsbreite allerdings relativ groß, so daß z.T. eigene Messungen notwendig waren. Für die untersuchten Baustoffe sind die Adsorptionswas-

sergehalte für verschiedene relative Luftfeuchten in Tabelle 2 aufgelistet.

Die Feuchtespeicherfunktion im Kapillarwasserbereich wird mit Hilfe eines Druckplattenapparates bestimmt. Anhand von ausgewählten Beispielen salzbelasteter und unbelasteter Natursandsteine wird die mit dem Druckplattenapparat bestimmte Saugspannung mit dem Meßergebnis der Quecksilberdruckporosimetrie verglichen, um die Vor- und Nachteile dieser Meßmethode zu verdeutlichen. Aus den Ergebnissen der Sorptionsmessungen und der Saugspannungsmessungen wird eine Feuchtespeicherfunktion entwickelt, die alle wesentlichen Feuchtespeichereigenschaften eines porösen Baustoffes bis hin zur freien Wassersättigung enthält.

Tabelle 2 Zusammenstellung der bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte bestimmten Sorptionsfeuchtegehalte der untersuchten Baustoffe.

Baustoff	Sorptionsfeuchtegehalt in [kg/m ³] bei					
	10 % r.F.	30 % r.F.	50 % r.F.	65 % r.F.	80 % r.F.	90 % r.F.
Baumberger	8,5	17,6	-	27,5	35,6	43,1
Obernkirchner	0,6	1,3	-	2,6	3,4	4,3
Rüthener	1,8	4,5	-	8	12,4	16,9
Sander	4,4	10,2	-	15,2	-	22,6
Gips	-	-	3,6	5,2	6,3	11
Kalksandstein	-	-	17	18	24,9	40,2
Porenbeton	-	-	7,3	12,5	17	38
Vollziegel	-	-	7,5	8,4	18	34

4.1 Messung der Saugspannung

Zur Beschreibung der Saugspannungsmessung werden im folgenden das Meßprinzip, der apparative Aufbau und die Meßdurchführung dargestellt.

4.1.1 Meßprinzip

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 sogenannte Kapillardruck- oder Saugspannungskurve. Mit Hilfe der Saugspannungsmeßanlage wird diese Kurve durch Entfeuchten anfänglich gesättigter Proben mit Aufbringen verschiedener Überdrücke ermittelt, indem für jede Druckstufe der entsprechende Gleichgewichtswassergehalt bestimmt wird.

Zur Berechnung des Zusammenhangs zwischen dem Wassergehalt und der maximalen noch gefüllten Porengröße wird vom folgenden Modell ausgegangen: Der Porenraum des kapillarporösen Körpers besteht aus einem Bündel von unverzweigten Kapillarröhrchen mit unterschiedlichen Radien (zylindrisches Porenmodell). Für die Steighöhe h von Wasser in einer Kapillare mit dem Radius r gilt:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g} \quad (14)$$

- σ [N/m] Oberflächenspannung
(für Wasser: $72,75 \cdot 10^{-3}$ N/m bei 20 °C)
- ρ [kg/m³] Dichte (für Wasser: 1000 kg/m³)
- g [m/s²] Erdbeschleunigung
- θ [°] Randwinkel
(für voll benetzende Flüssigkeiten: 0°)

Da der hydrostatische Druck der maximal erreichbaren Steighöhe dem zur Entleerung dieser Kapillare aufzubringenden Druck entsprechen muß, kann jedem Druck ein Radius zugeordnet werden, bis zu dem alle größeren Poren entleert sind. Es ergibt sich für Wasser folgende Näherungsgleichung:

$$r = 1,5 \cdot 10^{-6} / P_{\bar{u}} \quad (15)$$

- r [m] Porenradius
- $P_{\bar{u}}$ [bar] angelegter Überdruck

Weil bei einem kapillarporösen Körper normalerweise keine zylindrischen unverzweigten Kapillaren vorliegen, bringt das Zylinderporenmodell gewisse Probleme mit sich. Entlang der Kapillare kann deren Durchmesser zum Teil beträchtlich schwanken. Der Druck, der zum Entleeren des Porenraumes hinter einer Verengung ("Porenhals") aufgebracht werden muß, wird durch die Querschnittsabmessungen dieses Porenhalses bestimmt. Damit wird gemäß Gleichung (15) dem herausgedrückten Wasservolumen der Radius des Porenhalses, durch den es geleert wurde, zugeordnet [124]. Da aber bei der Quecksilberporosimetrie mit der Verwendung des gleichen Modells auch

der gleiche systematische Fehler auftritt, sind die Voraussetzungen für einen Vergleich zwischen Saugspannungsmessung und Hg-Porosimetrie gegeben. Die Umrechnung des Kapillardruckes in einen Porenradius dient nur dazu, die Meßergebnisse zu veranschaulichen, die Wahl des Porenmodells hat keinen Einfluß auf die Verwendbarkeit der Saugspannungskurve.

4.1.2 Apparativer Aufbau

Die Saugspannungsmeßanlage besteht aus drei Drucktöpfen mit Durchmesser von jeweils ca. 25 cm für Drücke bis 5 bar, 15 bar und 100 bar. Die Erzeugung des Drucks erfolgt bis 15 bar mit Hilfe eines Kompressors und darüber mit Hilfe einer Gasflasche. Der Druck wird über Druckminderer konstant gehalten. Der schematische Aufbau eines Drucktopfes und eine fotografische Ansicht ist in Bild 16 dargestellt. In jedem Drucktopf liegen, je nach dessen Größe und nach der anfallenden Menge an Proben, ein bis drei Keramikplatten. Sie sind hinsichtlich ihrer Porosität so ausgewählt, daß sie nach Sättigung mit Wasser eine möglichst hohe Wasserdurchlässigkeit besitzen, aber bis zum maximal aufgebrauchten Druck nicht luftdurchlässig sind. Die Platten sind auf einer Seite mit einer Gummimembrane abgedichtet und über einen Schlauch nach außen verbunden. Um einen guten Kapillarkontakt der Probenunterseite mit der Platte zu erreichen, wird üblicherweise die Probenunterseite mit Kaolin-Ton bestrichen und die Probe an die Platte gedrückt. Da dies aber zu einer Verunreinigung der Probe und damit beim Wiegen zu einem Meßfehler führen kann, sind die Platten nach Aufbringen einer dicken Kaolinschicht mit einem sehr feinmaschigen Tuch überzogen worden, durch das nur sehr wenig Kaolin dringen kann. Damit entsteht nach Befeuchten der Platte ein weiches Bett, in das die Proben gedrückt werden können. Dadurch wird ebenfalls ein guter hygrischer Kontakt sichergestellt, aber ein Anhaften des Kaolins an der Probe wird deutlich vermindert.

4.1.3 Meßdurchführung und Probenmaterial

Das zu untersuchende Probenmaterial wird auf Abmessungen von ca. 4x4x1 cm zugeschnitten. Größere Dicken als 1 cm sollten vermieden werden, da dadurch die Meßdauer beträchtlich steigen kann. Von jeder Probenart werden zehn Proben eingesetzt, um

Streuungen der Messungen durch Mittelung ausgleichen zu können. Von den plättchenförmigen Proben wird das Trockengewicht bestimmt. Anschließend werden sie mit Wasser unter Normaldruck gesättigt, gewogen und auf das Tuch aufgedrückt. Die Platte wird in den Drucktopf eingebaut und die erste Druckstufe eingestellt. Das Wasser wird jetzt aus der Probe durch die Platte hindurch über die Schlauchverbindung nach außen gedrückt. Ein Gleichgewichtszustand stellt sich - abhängig von den Abmessungen und den Porositätseigenschaften der Proben - nach zwei bis vier Tagen ein, erkenntlich daran, daß kein Wasser mehr nach außen dringt. Dann werden die Proben von der Platte genommen, vom anhaftenden Kaolin gereinigt und gewogen, woraus sich der der Druckstufe entsprechende Wasserverlust ergibt. Anschließend werden die Proben wieder eingebaut, um die nächste Druckstufe einzustellen. Diese Prozedur wiederholt sich von der niedrigsten bis zur höchsten Druckstufe. Insgesamt wird bei bis zu 10 Druckstufen zwischen 0,015 bar und 100 bar gemessen, was einen Porenradienbereich zwischen 10^{-4} m und $1,5 \cdot 10^{-8}$ m abdeckt. Aus den Meßwerten für den Gewichtsverlust läßt sich für jede Druckstufe und damit nach Gleichung (15) für den entsprechenden Kapillarradienbereich das zugehörige Porenvolumen bzw. - bezogen auf die Gesamtporosität - der relative Porenanteil bestimmen.

4.2 Ergebnisse der Saugspannungsmessung

In den Bildern 17 und 18 ist für die vier verschiedenen Natursandsteine und künstlichen Baustoffe der Gleichgewichtswassergehalt über dem in der Saugspannungsmeßanlage angelegten Druck dargestellt. In die Diagramme sind außerdem die freie Wassersättigung und als zweite Abszisse der nach Gleichung (15) dem Druck entsprechende Porenradius aufgetragen.

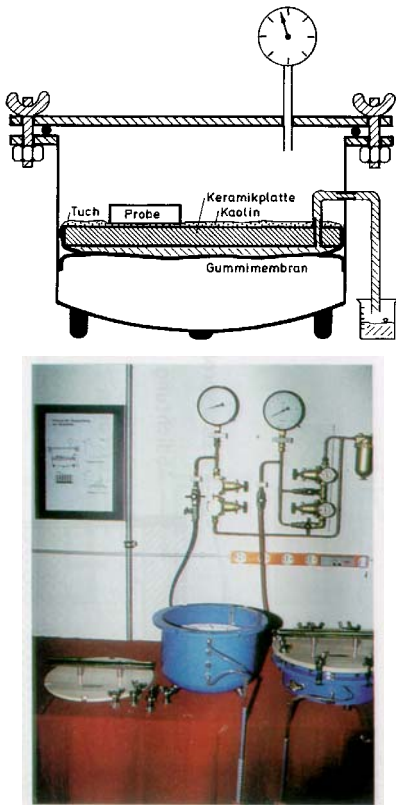


Bild 16 Schematischer Aufbau eines Drucktopfes der Saugspannungsmeßanlage (oben) und photographische Teilansicht d. Meßanlage (unten).

Aus Bild 17 ist erkenntlich, daß aus dem Baumberger Sandstein erst ab einem Druck von 0,5 bar merklich Wasser ausgetrieben wird, das heißt, dieser Sandstein besitzt keinen nennenswerten Anteil an Poren mit einem Durchmesser größer als $3 \cdot 10^{-6}$ m. Von da an sinkt der Gleichgewichtswassergehalt über den ganzen restlichen Druckbereich kontinuierlich ab. Dies bedeutet, daß im ganzen Porenradienbereich von $3 \cdot 10^{-6}$ m bis $3 \cdot 10^{-8}$ m gleichmäßig verteilter Porenraumanteil vorliegen muß.

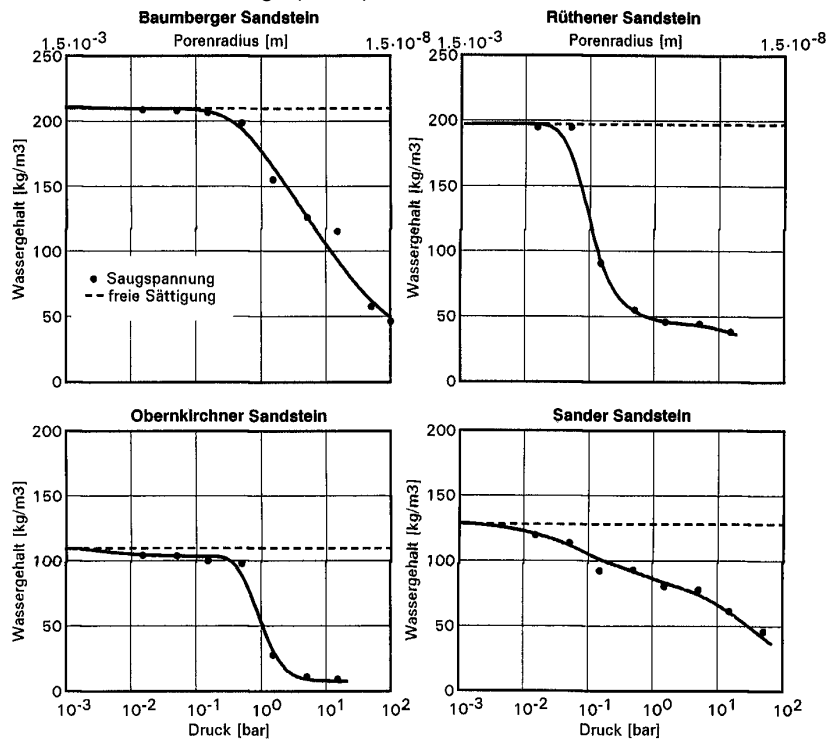


Bild 17 Saugspannungskurve von Baumberger Sandstein (oben links), von Obernkirchner Sandstein (unten links), von Rühener Sandstein (oben rechts) und von Sander Sandstein (unten rechts). Als zweite Abszisse ist der dem angelegten Druck entsprechende Porenradius aufgetragen.

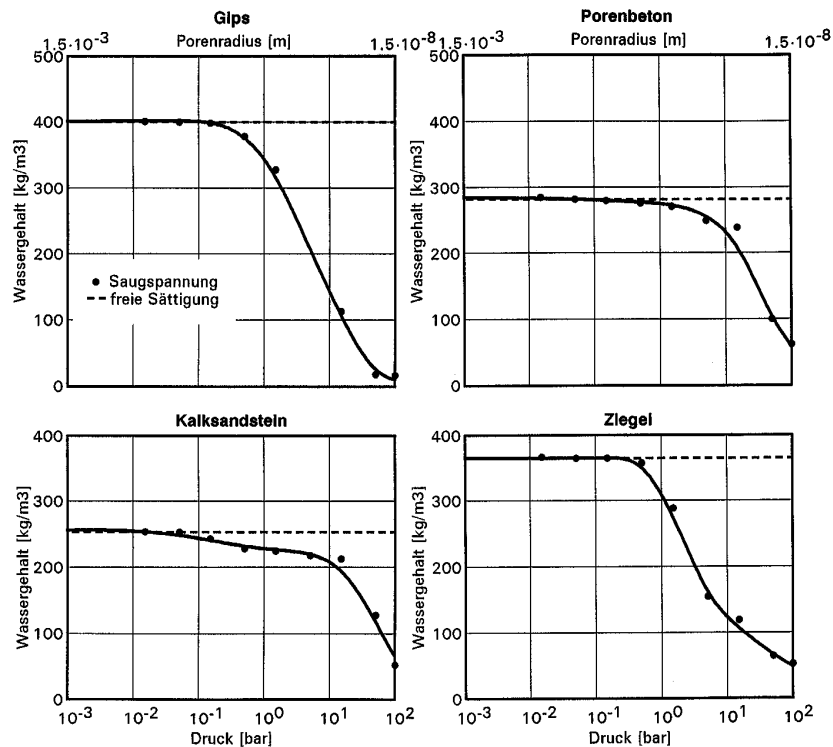


Bild 18 Saugspannungskurve von Gipskaton (oben links), von Kalksandstein (unten links), von Porenbeton (oben rechts) und von Ziegel (unten rechts). Als zweite Abszisse ist der dem angelegten Druck entsprechende Porenradius aufgetragen.

Beim Obernkirchner Sandstein ergibt sich ein anderer Verlauf. Ab einem Druck von 0,5 bar sinkt der Gleichgewichtswassergehalt sehr stark ab, bei einem Druck von 1,5 bar ist bereits ein Wassergehalt von unter 30 % der freien Wassersättigung erreicht. Bei einer Druckerhöhung auf 5 bar sinkt er weiter bis auf etwa 10 % der freien Sättigung ab und verändert sich ab da nur noch geringfügig. Der Obernkirchner Sandstein muß damit den Hauptanteil an Poren in einem Radienbereich zwischen $3 \cdot 10^{-6}$ m und 10^{-7} m besitzen.

Bereits bei einer Druckerhöhung von 50 auf 150 mbar ist beim grobporigen Rühthener Sandstein ein starker Abfall zu beobachten, bei einem Druck von 0,5 bar ist bereits ein Viertel der freien Wassersättigung erreicht. Die Hälfte aller Poren des Rühthener Sandsteins liegt damit im Radienbereich zwischen $3 \cdot 10^{-5}$ m bis $1,5 \cdot 10^{-5}$ m und ein weiteres Viertel im anschließenden Bereich bis $3 \cdot 10^{-6}$ m.

Beim Sander Sandstein nimmt der Gleichgewichtswassergehalt über den ganzen Druckbereich gleichmäßig ab. Dieser Sandstein besitzt damit kein ausgeprägtes Maximum in der Porenradienverteilung. Die Saugspannungskurve des Gips (siehe Bild 18) ist der des Baumberger Sandsteins sehr ähnlich. Allerdings

ist der Abfall bei 0,5 bar etwas steiler und geht bis auf einen Wassergehalt von unter 5 % der freien Sättigung. Der Gips kann deshalb nur eine geringe Sorptionsfähigkeit besitzen. Bis zu einem Druck von 15 bar liegt beim Kalksandstein nur ein schwacher Abfall vor mit darauffolgendem steilen Abfall bis zum maximalen Druck von 100 bar. Der größte Porenanteil liegt damit zwischen 10^{-7} m bis $1,5 \cdot 10^{-8}$ m.

Porenbeton zeigt ebenfalls einen nur schwachen Abfall bis zu einem Druck von 5 bar. Ab da nimmt der Gleichgewichtswassergehalt kontinuierlich bis zu einem Wassergehalt von etwa 20 % der freien Sättigung bei Erreichen von 100 bar ab. In den sichtbaren großen Poren des Porenbetons findet damit kein Kapillartransport statt, eine Beobachtung, die auch durch den großen Unterschied zwischen freier Sättigung und Vakuumsättigung dieses Materials bestätigt wird. Der Hauptanteil der kapillaraktiven Poren liegt damit im Radienbereich zwischen 10^{-7} - $1,5 \cdot 10^{-8}$ m.

Ziegel zeigt ein Verhalten, das dem des Gips sehr ähnlich ist, nur mit dem Unterschied, daß bei Erreichen von 100 bar Überdruck noch ein Gleichgewichtswassergehalt von annähernd 15 % der freien Sättigung vorliegt.

4.3 Vergleich mit der Quecksilberdruckporosimetrie

Um die Vorteile der Saugspannungsmessung im Vergleich zur Hg-Druckporosimetrie zu zeigen, werden an salzbelastetem und unbelastetem Sandstein Messungen durchgeführt. Es ist zu erwarten, daß der Salzgehalt einen merklichen Einfluß auf das Wasserspeicherverhalten ausübt. Es wird zuerst die Quecksilberdruckporosimetrie, die Probenvorbereitung und die Versuchsdurchführung kurz beschrieben. Anschließend werden die Meßergebnisse beider Verfahren gegenübergestellt und die methodisch bedingten Unterschiede unter Berücksichtigung der Einflüsse der Gesteinsart und der Einflüsse von Salzwirkungen im Porenraum der jeweiligen Gesteine aufgezeigt. Eine ausführlichere Beschreibung dieser Untersuchungen findet sich in [70].

4.3.1 Beschreibung der Hg-Druckporosimetrie

Die weitgehend bekannte und häufig angewandte Quecksilberdruckporosimetrie arbeitet nach dem Prinzip der druckabhängigen Quecksilberintrusion. Dem Meßprinzip liegt ebenfalls das Kapillargesetz zugrunde, wobei man auch hier vom zylindrischen Porenmodell ausgeht. Es wird Quecksilber als nicht benetzende Flüssigkeit in das poröse Probenmaterial gedrückt und für jede Druckstufe die von der Probe aufgenommene Menge registriert. Die Steuerung der Druckerhöhung sowie die Aufnahme und Verarbeitung der Meßwerte erfolgt über einen Computer. Der Meßbereich des Quecksilberporosimeters erstreckt sich von 0,15 bis 2000 bar, was einem Radienbereich von $5 \cdot 10^{-5}$ m bis $3,7 \cdot 10^{-9}$ m entspricht. Die Meßdauer für eine Probe mit bis zu 630 Meßpunkten über den gesamten Druckbereich liegt bei 2 bis 4 Stunden.

4.3.2 Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen werden an zwei in ihren Porositätseigenschaften deutlich unterschiedlichen Sandsteinsorten - dem Obernkirchner und dem Rühthener Sandstein - jeweils an unbelasteten, mit Epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) und mit Nitrokalit (KNO_3) beaufschlagten Proben durchgeführt. Die Salzbelastung der Proben des Rühthener Sandsteins erfolgt in einer 3 %igen Epsomitlösung und einer 3 %igen Nitrokalitlösung. Die Salzbelastung der Proben des Obern-

kirchner Sandsteins erfolgt in einer 3 %igen Epsomitlösung und einer 25 %igen Nitrokalitlösung. Mit diesen Konzentrationen wird in den Gesteinsproben jeweils ungefähr die gleiche aufgenommene Salzmenge erreicht. Die zunächst stabförmigen Proben mit einer Abmessung von 4 x 4 x 20 cm werden mit der jeweiligen Salzlösung gesättigt, anschließend bei 40 °C unter Zufuhr getrockneter Luft bis zur Massenkonzanz getrocknet, gewogen und wieder in die Salzlösung gebracht. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis sich keine nennenswerte Massenzunahme mehr zeigt. Für die Saugspannungsmessung werden die Proben auf eine Abmessung von ca. 4 x 4 x 1 cm zugeschnitten. Für die Quecksilberdruckporosimetrie reichen je 5 bis 10 g Probenmaterial aus. Für beide Untersuchungsmethoden wurden Proben aus jeweils demselben, im ganzen präparierten Materialprisma gewonnen, um eine weitgehende Vergleichbarkeit der Meßergebnisse sicherzustellen.

Tabelle 3 Zusammenstellung der Porositätskennwerte und der aufgenommenen Salzmenge der für den Vergleich von Saugspannungsmessung und Quecksilberporosimetrie untersuchten Gesteinsarten.

Gesteinsart	Rohdichte [kg/m ³]	Porosität [Vol.-%]	Freie Sättigung [kg/m ³]	Aufgenommene Salzmenge [Masse-%]	
				MgSO ₄ · 7H ₂ O	KNO ₃
Obernkirchner Sandstein	2150	14	110	0,16	0,39
Rühthener Sandstein	1950	24	210	0,19	0,41

Als Ausgangsinformation über die untersuchten Gesteine sind in Tabelle 3 die mit einem Heliumpyknometer gemessenen Porositätskennwerte der unbelasteten, bruchfrischen Gesteinsproben sowie Angaben über die gemäß beschriebener Präparation von den Proben im Mittel aufgenommenen Salzmenge zusammengestellt.

4.3.3 Meßergebnisse und Bewertung

In Bild 19 sind für beide Gesteinsarten und Meßmethoden die Ergebnisse in Form einer integralen Porengrößenverteilung dargestellt. Daraus kann die Feuchtespeicherfunktion für den überhygroskopischen Bereich berechnet werden. Während die Quecksilberdruckporosimetrie stets den gesamten erreichbaren Porenraum überdeckt, ist es möglich, bei der Saugspannungsmessung nur den für natürliche

Feuchtespeichervorgänge zur Verfügung stehenden Porenraum zu erfassen, indem von frei wassergesättigten Proben ausgegangen wird. In Bild 19 sind für die bruchfrischen Gesteine und beide Meßmethoden die ermittelten Ergebnisse als durchgezogene Linie dargestellt. Die mit der Saugspannungsmeßanlage ermittelten Verteilungen sind aufgrund der kleinen Anzahl an Druckstufen etwas eckiger, zeigen aber dieselbe Charakteristik wie die der Hg-Porosimetrie. Beim Obernkirchner Sandstein ergibt sich bei beiden Meßmethoden ein steiler Abfall im Porenradienbereich zwischen $3 \cdot 10^{-6}$ m und $1,5 \cdot 10^{-6}$ m, beim Rütthener Sandstein liegt der Abfall zwischen $3 \cdot 10^{-7}$ m bis $3 \cdot 10^{-6}$ m.

In Bild 19 sind neben den Verteilungen der unbelasteten Proben auch die der salzbelasteten Proben mitangegeben. Die am Obernkirchner Sandstein (Bild 19 oben links) nach der Hg-Druckporosimetrie bestimmten Kurven sind bis zu einem gefüllten Porenradius von ca. $3 \cdot 10^{-6}$ m nahezu identisch, Salzrierende Gesamtporosität hin ab. Dabei liegen die Kurven für die salzbelasteten Proben wiederum eng

zusammen, weisen also kaum Unterschiede nach der Salzart auf. Nach der Saugspannungsmessung unterscheiden sich die Kurven für die salzbelasteten Proben ebenfalls kaum, weichen aber von der der unbelasteten Probe speziell im unteren Porenradienbereich $< 10^{-5}$ m ab (Bild 19 oben rechts).

Besonders deutlich werden die unterschiedlichen Ergebnisse nach beiden Methoden für den Rütthener Sandstein (Bild 19 unten). Nach der Hg-Druckporosimetrie liegen alle Kurven für salz- und unbelastetes Gestein eng beieinander. Die Saugspannungsmessung aber zeigt deutlich unterschiedliche Kurvenverläufe, wobei die salzbelasteten Proben im oberen Porenradienbereich kaum differieren, sich aber klar von der unbelasteten Probe unterscheiden. Im unteren Radienbereich scheint die mit KNO_3 belastete Probe im Gegensatz zur mit MgSO_4 belasteten Probe kaum andere kapillare Speichereigenschaften zu besitzen als die unbelastete Probe.

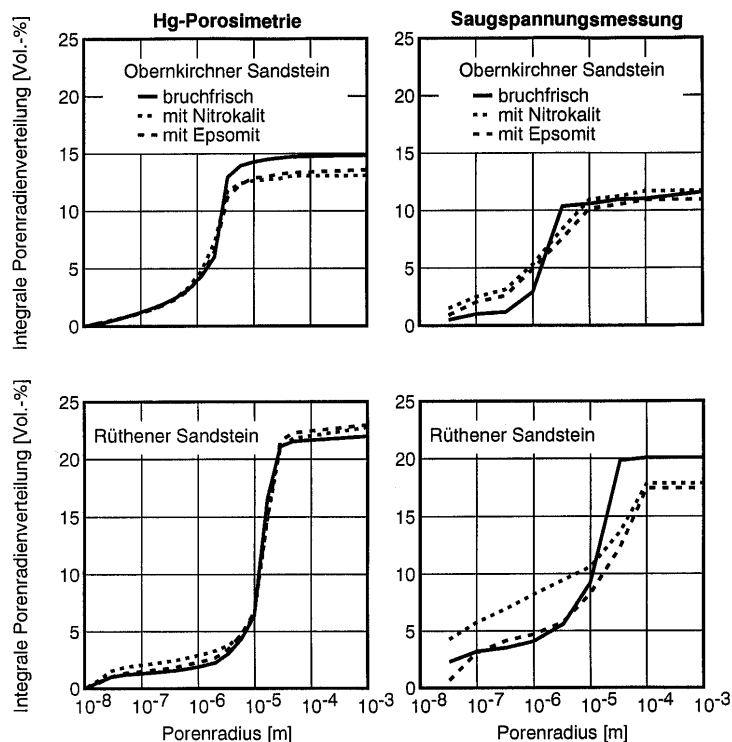


Bild 19 Integrale Porenradienverteilungen des bruchfrischen und salzbelasteten Obernkirchner und Rütthener Sandsteins, gemessen mit Hilfe der Quecksilber-Druckporosimetrie und mit Hilfe der Saugspannungsmeßanlage.

Zur Interpretation dieser Ergebnisse sei auf die entsprechenden Erläuterungen zu den differentiellen Porenradienverteilungen in [70] verwiesen. Die Gegenüberstellung der Meßergebnisse beider Methoden

zeigt, daß die Saugspannungsmessung trotz der größeren manuellen Meßtechnik und der daraus resultierenden geringeren Anzahl an Meßpunkten durchaus mit der Quecksilberdruckporosimetrie vergleich-

bare Ergebnisse bringt. Eine Bestimmung der Reproduziergenauigkeit mit Hilfe von Mehrfachmessungen wurde aufgrund der langen Meßzeiten nicht durchgeführt. Die Verwendung von Wasser als Bestimmungsmedium gewährleistet eine realistischere Zustandsbeschreibung, da - wie unter natürlichen Bedingungen - die realen Wechselwirkungen zwischen Wasser und Porenwand und eventuell vorhandener auch hydrophiler oder hydrophober Porenhaltsstoffe erfaßt werden. Dies zeigt sich besonders an salzbelasteten Proben, wie die beschriebenen Versuchsergebnisse zeigen. Außerdem wird durch den Einsatz von freigesättigtem Probenmaterial auch nur der dem Kapillartransport verfügbare Porenraum in die Bestimmung einbezogen. In Tabelle 4 sind beide Meßmethoden bezüglich ihrer Eigenschaften nochmals in Stichpunkten gegenübergestellt.

Tabelle 4 Gegenüberstellung der Meßgrößen bei der Saugspannungsmessung und der Quecksilberdruckporosimetrie.

Meßdaten	Saugspannung	Quecksilberdruckporosimetrie
Bestimmungsmedium	Wasser	Quecksilber
erfaßter Porenraum	Nur wassergefüllte Poren	Alle Poren
Salzeinfluß	meßbar	Ohne Meßeffect
Hydrophobiereffekte	meßbar	Ohne Meßeffect
Meßzustand	naß	trocken
Meßgeschwindigkeit	niedrig (ca. 4 Wochen)	hoch (ca. 3 Stunden)
Meßgenauigkeit	mittel	hoch
Abstufung	grob	fein
Porenradienbereich [μm]	0,015 bis 30	0,004 bis 50

4.4 Ermittlung der Speicherfunktion aus Saugspannungsmessung und Sorptionsmessung

Die Sorptionsisotherme und die Saugspannungskurve geben den Wassergehalt jeweils in Abhängigkeit von echten Potentialgrößen an, der relativen Luftfeuchte ϕ als Verhältnis des Dampfdruckes zum Sättigungsdampfdruck und dem Kapillarradius r als kennzeichnende Größe für den Kapillardruck. Beide Größen sind über die bereits erwähnte thermodynamische Gleichgewichtsbedingung nach Kelvin miteinander verknüpft (siehe Gleichung (1)). Damit kann der Wassergehalt im hygroscopischen und überhygroscopischen Stoffeuchtebereich einheitlich als Funktion entweder von ϕ oder von r dargestellt werden. Universell anwendbar und praktisch anschaulicher ist die Wahl der relativen Luftfeuchte als allge-

meines Feuchtespeicherpotential. In kapillar nicht aktiven Baustoffen, wie z.B. den meisten Dämmstoffen, ist der Dampfdruck bzw. die relative Luftfeuchte, nicht aber der Kapillardruck bzw. die Saugspannung definiert. In Bild 20 ist am Beispiel von Kalksandstein dargestellt, wie sich die Feuchtespeicherfunktion - aus der Sorptionsisotherme, links oben, mit Angabe des Grenzwertes der freien Wassersättigung - und aus der Saugspannungskurve, rechts oben, mit Angabe der den Porenradien nach der Kelvin-Beziehung zuzuordnenden relativen Luftfeuchte zusammensetzt [57].

Da die Saugspannungsmessung, bedingt durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Porengröße und relativer Feuchte, nur einen Luftfeuchtebereich zwischen 93 % und 100 % abdeckt, ergibt sich bei dieser Darstellungsart ein steiler Verlauf des durch die Saugspannungsmessung bestimmten Bereiches. Um die Feuchtespeicherfunktionen verschiedener Baustoffe besser miteinander vergleichen zu können, wird deshalb der Kapillarradius als Feuchtespeicherpotential gewählt; die Feuchtespeicherfunktion wird analog entwickelt.

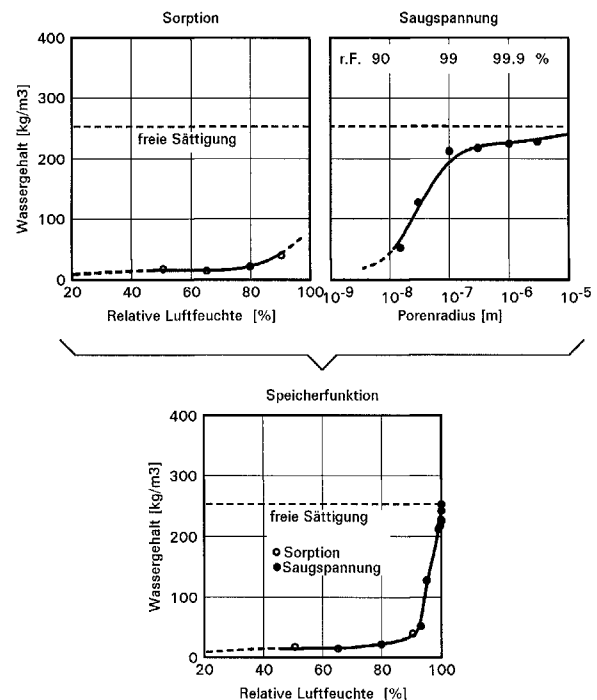


Bild 20 Entwicklung einer Feuchtespeicherfunktion für den hygroscopischen und überhygroscopischen Feuchtebereich aus der Sorptionsisotherme (oben links) und der Saugspannungsmesskurve (oben rechts) am Beispiel von Kalksandstein.

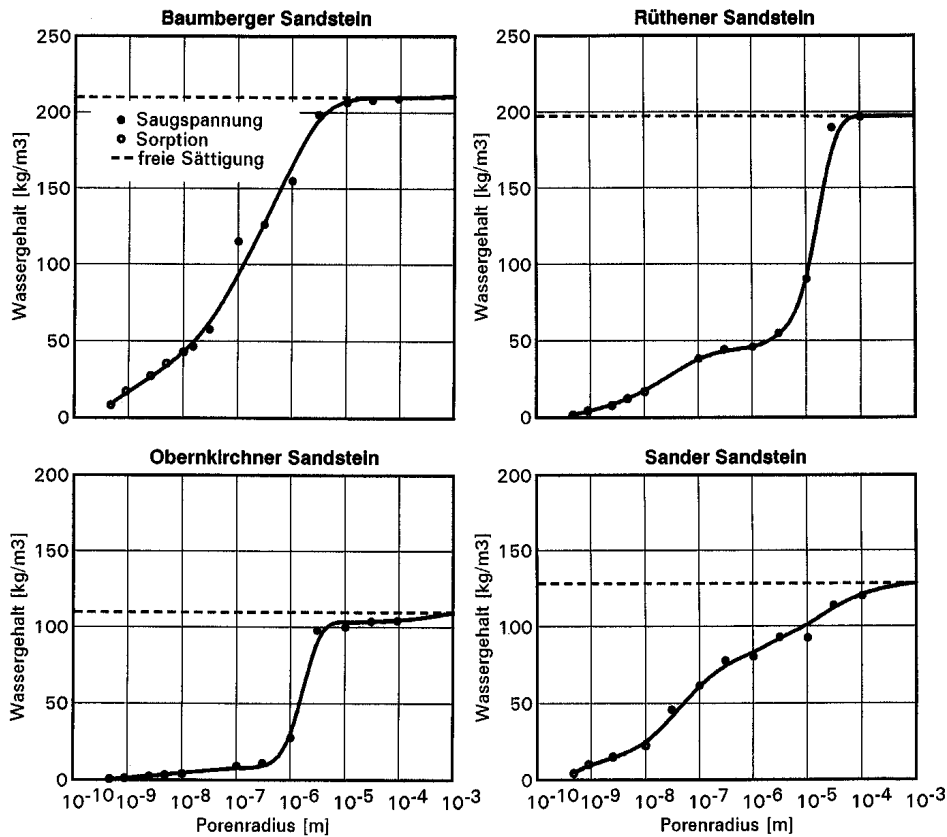


Bild 21 Feuchtespeicherfunktion von Baumberger Sandstein (oben links), von Obernkirchner Sandstein (unten links), von Rühener Sandstein (oben rechts) und von Sander Sandstein (unten rechts), entwickelt aus der Sorptionsisotherme und der Saugspannungsmeßkurve.

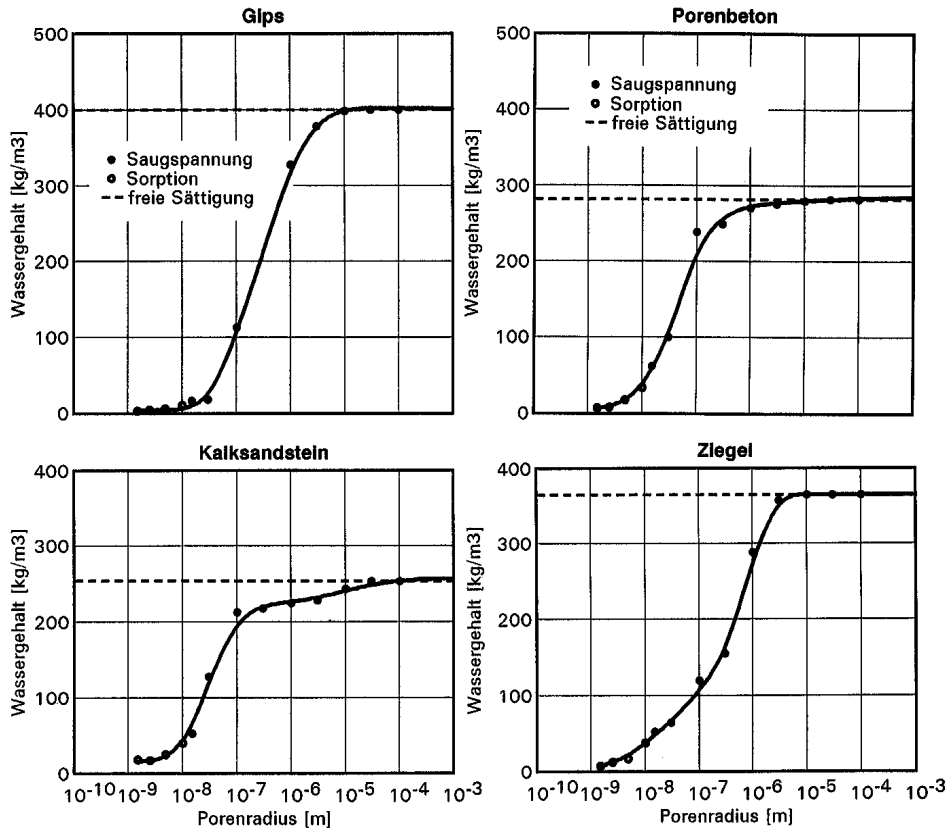


Bild 22 Feuchtespeicherfunktion von Gipskarton (oben links), von Kalksandstein (unten links), von Porenbeton (oben rechts) und von Ziegel (unten rechts), entwickelt aus der Sorptionsisotherme und der Saugspannungsmeßkurve.

Die in Bild 21 für die Natursandsteine und in Bild 22 für die künstlichen Baustoffe dargestellten Feuchtespeicherfunktionen zeigen alle einen nahtlosen Übergang (ohne Sprung oder Knick) vom hygroskopischen Feuchtebereich, in dem die Speicherfunktion durch Sorptionsmessungen bestimmt wird, zum überhygroskopischen Bereich mit der Saugspannungsmessung als Bestimmungsmethode. Dies gilt sowohl für Stoffe mit niedriger Sorptionsfähigkeit (z.B. Oberkirchner Sandstein und Gips) als auch für solche mit hoher Sorptionsfähigkeit (z.B. Baumberger Sandstein und Kalksandstein). Trotz Verwendung zweier unterschiedlicher Meßmethoden läßt sich damit eine stetige Feuchtespeicherfunktion ermitteln, welche alle praktisch wesentlichen Feuchtespeichereigenschaften eines porösen Baustoffes bis hin zur freien Wassersättigung enthält und in Abhängigkeit von einer echten stoffunabhängigen Potentialgröße (wahlweise relative Luftfeuchte oder Porenradius) angegeben werden kann.

5. Bestimmung der Wasserdampfdiffusionskoeffizienten

Die in Ziffer 2.2.2 dargelegten Überlegungen zum Feuchtetransport können nur durch Messungen im Temperaturgefälle bestätigt werden, da unter isothermen Bedingungen die treibenden Gradienten für den Dampftransport und für den Flüssigtransport stets in der gleichen Richtung vorliegen. Dazu wurden Messungen mit zwei unterschiedlichen neu entwickelten Meßanlagen mit in gleicher und entgegengesetzter Richtung vorliegenden Gradienten für den Dampftransport und den Flüssigtransport durchgeführt. Zusätzliche Hinweise für die Richtigkeit der These, daß dem Diffusionstransport ein Flüssigtransport überlagert ist, werden durch Neuinterpretationen der Meßergebnisse anderer Autoren über die Temperaturabhängigkeit von Diffusionsmessungen und über Taupunktmessungen in Kirchen gegeben [72].

5.1 Messung im Feuchte- und Temperaturgefälle

Für die Messung im Feuchte- und Temperaturgefälle wurde eigens eine Meßapparatur entwickelt. Der apparative Aufbau und die Meßdurchführung sowie die damit erhaltenen Ergebnisse werden im folgenden beschrieben.

5.1.1 Apparativer Aufbau und Meßdurchführung

Die in Bild 23 gezeigte Meßeinrichtung gestattet es, durch Aufbringen einer Temperaturdifferenz Dampfdruck- und Sorptionsfeuchtegradienten bzw. Luftfeuchtegradienten auch in entgegengesetzter Richtung in einer Materialprobe definiert einzustellen. Durch den Boden eines gläsernen Diffusionsgefäßes mit oben aufgedichteter Baustoffprobe wird die Probeninnenoberfläche mit Hilfe eines geregelten Strahlers auf eine bestimmte Temperatur erwärmt. Das Gefäß ist seitlich mit einer Dämmung versehen, um eindimensionale Verhältnisse zu schaffen. Die relative Luftfeuchte im Innenraum wird von einer gesättigten Salzlösung in einem ringförmigen Glasbehälter am Boden des Gefäßes erzeugt. Der Aufbau steht in einer Klimakammer, die das Außenklima vorgibt. Mit Hilfe von Thermoelementen werden die vorliegenden Temperaturen bestimmt; die Partialdampfdrücke werden mit Hilfe eines Taupunktspiegels ermittelt.

Die Verwendung einer außenliegenden Strahlungsheizung ist notwendig, da bei einer im Gefäß befindlichen Ohmschen Heizung große Temperaturgradienten im Gefäß zu einem "Sturm im Wasserglas" führen würden. Eine Untersuchung des Diffusionstransportes wäre damit nicht möglich. Bei der vorliegenden Art der Beheizung sind die Temperaturunterschiede zwischen Probenunterseite, Innenluftraum, Sole und Glasboden stets geringer als 2 K. Die Untersuchungen werden unter verschiedenen Randbedingungen an runden Proben aus Gips und Baumberger Sandstein mit einem Durchmesser von 9 cm und einer Dicke von 2 bzw. 1 cm durchgeführt. Durch Wägung des Diffusionsgefäßes wird der Massenstrom bestimmt.

5.1.2 Ergebnisse der Diffusionsmessungen

Randbedingungen und Meßergebnisse für die Fälle gleich- und entgegengerichteter Gradienten sind für die genannten Probenmaterialien in Tabelle 5 aufgeführt, wobei die Diffusionswiderstandszahl μ nach dem Diffusionsansatz (8) aus dem gemessenen Massenstrom errechnet wird. Für Gips ergibt sich bei gleichgerichteten Gradienten ein μ -Wert von 6,3 und für entgegengesetzte Gradienten ein Wert von 22. Dies bestätigt theoretische Überlegungen, nach denen entgegengesetzte Gradienten eine Minderung des Gesamtmassenstroms bewirken (siehe Bild 12).

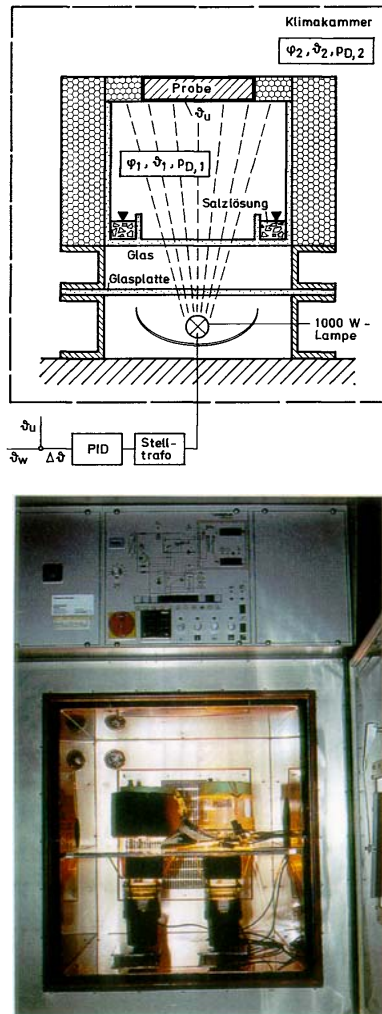


Bild 23 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (oben) und fotografische Teiansicht der Anlage (unten) zur Bestimmung der Dampfdurchlässigkeit von Baustoffen unter Dampfdruck und Temperaturgradienten. Beim rechten Gefäß wurde die seitliche Dämmung entfernt.

Aus den Messungen für Baumberger Sandstein, wobei beide Messungen nichtisotherm bei entgegengesetzten Gradienten, aber unterschiedlichen Dampfdruckdifferenzen durchgeführt worden sind, erkennt man, daß eine Erniedrigung der Dampfdruckdifferenz von 3,2 auf 1,5 mbar eine Erhöhung für den nach Gleichung (8) berechneten μ -Wert von 29 auf 160 bewirkt. Dieser extreme Effekt wird verständlich, wenn man die jeweiligen Massenstromdifferenzen zwischen dem gemessenen nichtisothermen Fall und dem berechneten isothermen Fall betrachtet. Dabei liegen jeweils die gleichen Dampfdruckdifferenzen zugrunde:

$$\Delta g = 1,07 - 0,57 = 0,50 \text{ g/m}^2\text{h} \quad (16)$$

$$\Delta g = 0,50 - 0,05 = 0,45 \text{ g/m}^2\text{h} \quad (17)$$

$$\Delta g \text{ [g/m}^2\text{h]} \quad \text{Massenstromdifferenz}$$

Die in beiden Fällen etwa gleich große Differenz entspricht dem der Diffusion entgegengerichteten und davon unabhängigen Flüssigtransport im nichtisothermen Zustand. Da im Fall der geringeren Dampfdruckdifferenz der entgegengesetzte Flüssigtransport fast so groß ist wie der Diffusionsstrom, erfaßt man meßtechnisch nur einen sehr kleinen Gesamtmassenstrom und ermittelt daraus nach Gleichung (8) einen extrem großen μ -Wert.

Tabelle 5 Parameter und Ergebnisse für Diffusionsmassenstromdichten und μ -Werte bei Gipskarton und Baumberger Sandstein. Die nichtisothermen Diffusionswiderstandszahlen wurden aus den gemessenen Massenströmen nach Gleichung (1) ermittelt. Die isotherme Diffusionswiderstandszahl wurde bei einer mittleren relativen Luftfeuchte von 63 % bestimmt und daraus der Massenstrom berechnet.

Material	Parameter						Ergebnisse		
	ϑ_1 [°C]	ϑ_2 [°C]	φ_1 [%]	φ_2 [%]	p_{D1} [mbar]	p_{D2} [mbar]	Gradienten φ und p_D	g [g/m ² h]	μ [-]
Gips	24	18	50	75	14,9	15,5	parallel	0,86	6,3
nicht isotherm Gemessen	26,5	18	50	75	17,3	15,5	entgegen	0,41	22
Baumberger	27	17	50	75	17,7	14,5	entgegen	0,57	29
nicht isotherm Gemessen	25	17	50	75	16,0	14,5	entgegen	0,05	160
Baumberger isotherm berechnet	23		Mittelwert ca. 63 %		$\Delta p_D = 3,2$ $\Delta p_D = 1,5$		parallel parallel	1,07 0,50	16 16

$\vartheta_1, \varphi_1, p_{D1}$: Temperatur, relative Luftfeuchte, Partialdampfdruck im Diffusionsgefäß

$\vartheta_2, \varphi_2, p_{D2}$: Temperatur, relative Luftfeuchte, Partialdampfdruck im Klimaschrank

g : Gesamtmassenstrom

5.2 Weitere Beweise für die These des der Diffusion überlagerten Flüssigtransports

Durch Meßergebnisse einer zusätzlichen Versuchseinrichtung wird ein weiterer Beweis dafür gegeben, daß es sich bei den unter isothermen Bedingungen beobachteten Erhöhungen der Wasserdampfdurchlässigkeit um einen der Dampfdiffusion überlagerten Flüssigtransport handelt. Zusätzliche Hinweise ergeben sich durch eigene Interpretationen der Meßergebnisse anderer Autoren.

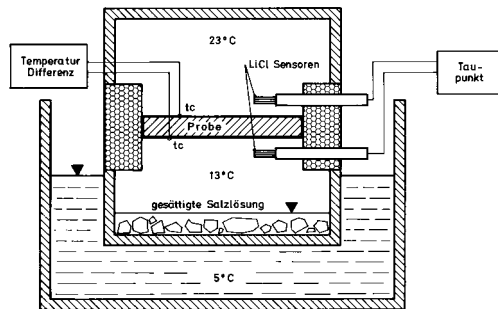


Bild 24 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Partialdruckgleichgewichtes, das sich bei Vorhandensein eines Temperaturgradienten zwischen Ober- und Unterseite der Probe einstellt.

5.2.1 Doppelkammerversuch

Der in Bild 24 dargestellte Versuchsaufbau ist einfacher als der bereits beschriebene (Bild 23). Zwei Kammern werden durch das Probenmaterial voneinander getrennt. In der unteren Kammer wird mit einer übersättigten Salzlösung die relative Luftfeuchte konstant gehalten.

Diese Kammer wird in einem Kältebad mit einer Badtemperatur von 5 °C gekühlt, so daß sich unterhalb der Probe eine Lufttemperatur von etwa 13 °C ergibt. Die Luft in der oberen Kammer hat Raumtemperatur. Als Probenmaterial dient

5.2.2 Temperaturabhängigkeit gemessener Diffusionskoeffizienten

Nach Schirmer [123] beschreibt die folgende Gleichung den Einfluß der Temperatur auf den Dampfdiffusionskoeffizienten der Luft D_D :

$$D_D = 8,8 \cdot 10^{-10} \cdot T^{1,81} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (18)$$

T [K] absolute Temperatur

D_D [m²/s] Dampfdiffusionskoeffizient in Luft

eine Preßspanplatte, da dieses Material neben einer hohen Sorptionsfähigkeit auch eine gute Wärmedämmung besitzt. Die Probe besitzt einen Durchmesser von 9 cm und eine Dicke von 16 mm. In beiden Kammern wird der Taupunkt bzw. der Wasserdampfpartialdruck mit Hilfe eines Lithiumchlorid-Fühlers bestimmt, der eine dem Taupunktspiegel vergleichbare Funktionsweise hat..

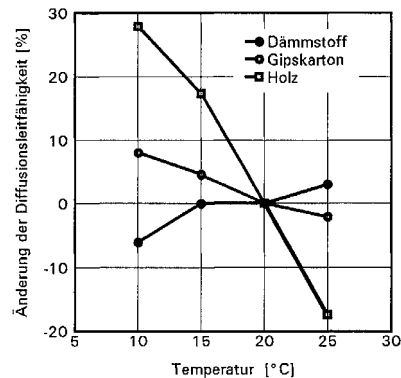


Bild 25 Prozentuelle Änderung der Diffusionsleitfähigkeit verschiedener Baustoffe in Abhängigkeit von der Bestimmungstemperatur (nach [90]) bezogen auf den Meßwert bei 20 °C. Bei den Messungen lag ein Luftfeuchtegradient von 60 % auf 93 % relativer Feuchte über dem Probenquerschnitt vor.

Liegt ein reiner Diffusionstransport vor, muß sich in beiden Kammern der gleiche Wasserdampfpartialdruck einstellen, wobei die relative Luftfeuchte in der oberen Kammer wegen der höheren Temperatur niedriger ist. Ist der Diffusion aufgrund des vorliegenden Gradienten der relativen Luftfeuchte bzw. des Sorptionswassergehaltes von der unteren zur oberen Kammer ein Flüssigtransport überlagert, so ist in der oberen wärmeren Kammer ein höherer Wasserdampfpartialdruck und damit auch eine höhere Taupunkttemperatur zu erwarten. In der Tat wird bei dieser Messung eine Taupunktdifferenz von zwischen 1 und 2 K gemessen.

Gleichung (18) eingesetzt in Gleichung (8) führt zu

$$g_v = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{8,8 \cdot 10^{-10}}{R_D} T^{0,81} \cdot \frac{dp}{dx} = -\frac{\delta}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (19)$$

Die Wasserdampfleitfähigkeit δ müßte mit steigender Temperatur ansteigen. R.C. McLean, G.H. Galbraith und C. Sanders [90] haben die Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Materialien bei

unterschiedlichen Temperaturen (10, 15, 20 und 25 °C) und unterschiedlichen Feuchtebereichen (0 bis 60, 60 bis 100, 60 bis 93 und 80 bis 100 % r.F.) ermittelt. Bild 25 zeigt für Gipskarton, Holz und Dämmstoff die Änderung der gemessenen Wasserdampfdurchlässigkeiten in Vergleich zum jeweiligen bei 20 °C bestimmten Meßwert. Bei den Messungen lag über dem Probenquerschnitt ein Luftfeuchtegradient von 60 auf 93 % vor. Dieser Feuchtebereich wurde ausgewählt, da in den anderen Bereichen entweder ein nur sehr geringer Sorptionswassergehalt (0 bis 60 % r.F.) vorlag oder bei den Messungen mit 100 % relativer Luftfeuchte auf einer Probenseite die Gefahr verfälschter Meßergebnisse durch Wasserdampfniederschlag an der Probenoberfläche aufgrund geringer Temperaturschwankungen bestand.

Das Dämmmaterial, das auch in diesem hohen Feuchtebereich einen nur geringen Sorptionswassergehalt besitzt, zeigt, wie nach Gleichung (19) zu erwarten, einen Anstieg der Wasserdampfdurchlässigkeit mit steigender Temperatur. Beim Gipskarton und in noch größerem Maße beim Holz ergibt sich allerdings ein dazu gegensätzliches Verhalten.

Unter der Annahme, daß in diesem Feuchtebereich der Diffusion ein Flüssigtransport überlagert ist, läßt sich dieses Verhalten wie folgt erklären:

Der Gesamtmassenstrom ergibt sich zu

$$g = g_v + g_w = -\frac{D_D}{\mu RT} \frac{dp}{dx} - D_w \frac{dw}{dx} = -\frac{\delta}{\mu} \frac{dp}{dx} - D_w \frac{dw}{dx} \quad (20)$$

g [kg/m²s] Gesamtmassenstromdichte

g_v [kg/m²s] Dampfstromdichte

g_w [kg/m²s] Flüssigstromdichte

D_D [m²/s] Dampfdiffusionskoeffizient in Luft

D_w [m²/s] Flüssigtransportkoeffizient

δ [kg/msPa] Wasserdampfdiffusionsleitkoeff. in Luft

μ [-] Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Die fiktive Wasserdampfdurchlässigkeit berechnet sich aus dem Gesamtmassenstrom bezogen auf den Wasserdampfpartialdruckgradienten:

$$\delta^* = -\frac{D_D}{\mu RT} + \frac{g_w}{dp/dx} \quad (21)$$

δ^* [kg/msPa] fiktive Wasserdampfdurchlässigkeit

Der Flüssigtransportkoeffizient D_w nimmt über die Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Wassers leicht zu, während die Steigung der Sorptionsisotherme mit der Temperatur geringfügig abnimmt. Dies bedeutet, daß der Flüssigtransportanteil sich kaum mit der Temperatur ändert. Dagegen steigt der Wasserdampfpartialdruckgradient bekanntermaßen durch die exponentielle Abhängigkeit des Wasserdampfpartialdruckes mit der Temperatur sehr stark an. Dadurch nimmt der Flüssigtransportanteil der gemäß Gleichung (21) berechneten Wasserdampfdurchlässigkeit stark ab, eine mit der Temperatur sinkende Wasserdampfdurchlässigkeit ist die Folge.

Auch Messungen an Papiermembranen [121] stützen diese Überlegungen. In Bild 26 ist im oberen Diagramm der Diffusionsstrom durch die Membran bezogen auf die Partialdruckdifferenz dargestellt. Er nimmt im Widerspruch zu den Gasdiffusionsgesetzen mit steigender Temperatur ab. Bezieht man die feuchtebedingte Erhöhung (Feuchtestrom minus Feuchtestrom unter trockenen Bedingungen) auf die relative Feuchte (Bild 26 unten), entspricht die Temperaturabhängigkeit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

5.2.3 Taupunktmessungen in Kirchen

H. Künzel und D. Holz [83] haben Untersuchungen an zahlreichen Kirchen durchgeführt. In Bild 27 sind typische Verläufe der Taupunkttemperaturen im Innenraum und außerhalb der Kirche für eine unbeheizte und eine beheizte Kirche dargestellt. In einer unbeheizten Kirche (Bild 27 links) folgt die Innenraumtaupunkttemperaturkurve der Taupunkttemperaturkurve außerhalb der Kirche, wobei allerdings die Spitzen etwas gedämpft werden. Dagegen verläuft die Taupunkttemperatur in einer beheizten Kirche (Bild 27 rechts) während der Heizperiode im ersten und vierten Quartal deutlich oberhalb der Taupunkttemperaturerhöhung. Deshalb nahmen sie an, daß die erhöhte Taupunkttemperatur durch Desorption des in den Wänden gespeicherten Wassers hervorgerufen wird. Dies allein kann aber nicht die Ursache sein, denn in diesem Falle müßte das Gemäuer während einer anderen Periode das abgegebene Wasser wieder aufnehmen; die Taupunkttemperatur im Innenraum müßte in dieser Periode unterhalb derjenigen der Außenluft liegen.

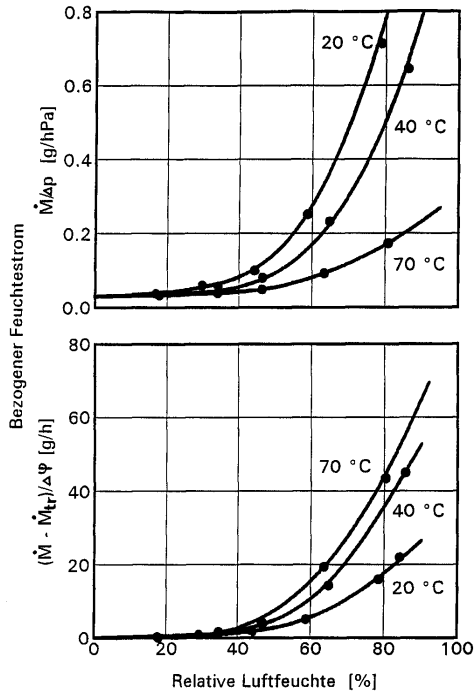


Bild 26 Abhängigkeit d. bezogenen Feuchtestrome \dot{M} durch eine Papiermembran [122] von der mittleren relativen Feuchte φ und der Umgebungstemperatur.

Bezieht man den Massenstrom auf die Dampfdruckdifferenz Δp (oben), so nimmt er im Widerspruch zu den Gasdiffusionsgesetzen mit steigender Temperatur ab. Bezieht man die Feuchtebedingte Erhöhung der Massenströme (Feuchtestrom \dot{M} minus Feuchtestrom unter trockenen Bedingungen \dot{M}_{tr} auf die relative Feuchte (unten), entspricht die Temperaturabhängigkeit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

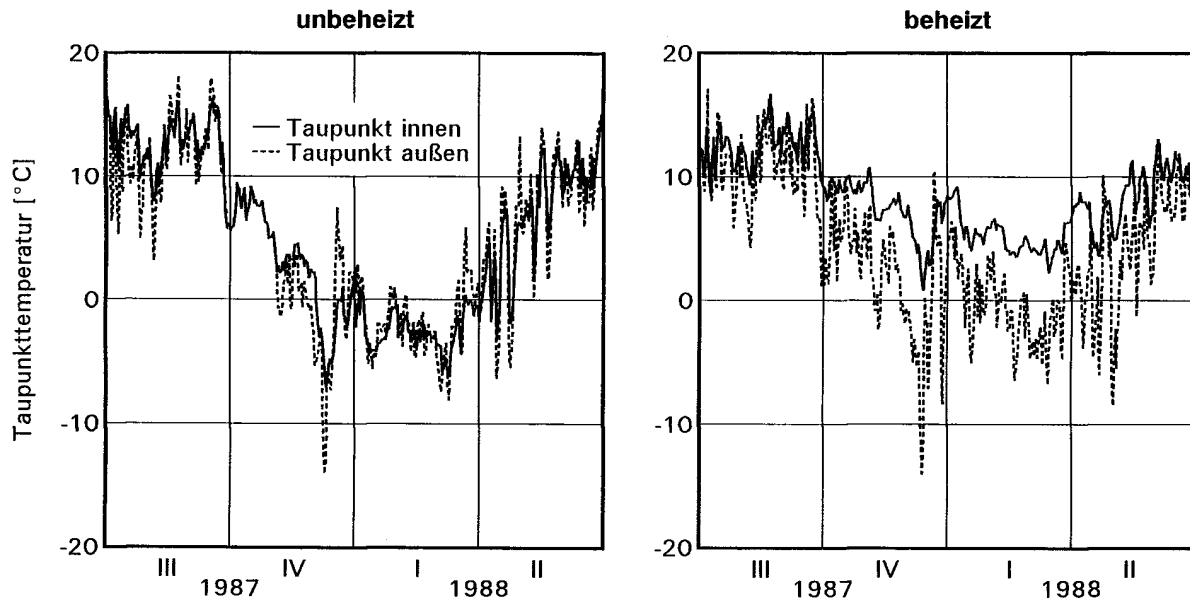


Bild 27 Jahresverläufe der Taupunkttemperatur der Raumluft und der Außenluft in einer unbeheizten Kirche (St. Leonhardt, Moosberg) und einer beheizten Kirche (Klosterkirche Mareinstatt) [82]. In der beheizten Kirche liegt während der gesamten Heizperiode die Taupunkttemperatur deutlich über der Taupunkttemperatur außerhalb der Kirche.

Der vorliegende Effekt lässt sich nur durch Transport von Wasser von der Außenluft durch die Mauer in das Gebäude erklären. Die Diffusion kann dabei nicht die Transportursache sein, da sie nicht entgegen dem Partialdruckgefälle ablaufen kann. Dagegen bildet sich durch das Beheizen der Kirche ein Gradient der relativen Luftfeuchte von außen nach innen. Außen liegt eine in der Heizperiode typische hohe relative Luftfeuchte von ca. 80 % vor, während die Luftfeuchte im Innenraum durch die Temperaturerhöhung deutlich abgesenkt ist. Damit entsteht in der Mauer ein Sorptionsfeuchteprofil, das zu einem Flüssigtransport von der Außenseite der Mauer zur Innenseite führt. Das transportierte Wasser wird von außen durch Sorption zugeführt und erhöht von der Innenoberfläche aus durch Desorption den Luftfeuchtegehalt im Innenraum (siehe auch Bild 12).

5.3 Stoffeuchteunabhängiger Diffusionskoeffizient

Die dargestellten Ergebnisse belegen, daß die unter isothermen Bedingungen nach DIN 52615 [26] gemessene Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit bei Erhöhung der mittleren Stoffeuchte auf einem der Diffusion überlagerten Feuchtetransport in flüssiger Phase beruht. Da für beide Transportmechanismen unterschiedliche treibende Transportpotentiale wirken, ist eine integrale Beschreibung beider

Transportvorgänge als feuchteabhängige Diffusion nicht zulässig. Wie in Ziffer 5.1.2 dargelegt, kann unter nichtisothermen Bedingungen, wie sie speziell während der Heizperiode der Normalfall sind, durch den Feuchtegehalt eine Minderung des Feuchtetransports auftreten. Die Ursache dafür liegt darin, daß unter diesen Bedingungen ein der Diffusion entgegengesetzter Flüssigtransport auftreten kann. Eine Beschreibung der Transportvorgänge für nichtisotherme Verhältnisse allein mit Hilfe des Diffusionsansatzes ist damit bei Verwendung eines vom Dampfdruckgradienten unabhängigen Diffusionswiderstandes nicht möglich.

Aber auch unter isothermen Bedingungen, wenn die treibenden Potentiale für Dampf- und Flüssigtransport gleichgeschaltet sind, kann das Einbeziehen des Flüssigtransportes in den Dampfdiffusionsansatz mittels feuchteabhängiger Diffusionswiderstandszahl zu Fehlern bei Berechnungen führen. Und zwar dann, wenn Unterschiede zwischen der Temperatur der Koeffizientenbestimmung und der Berechnungstemperatur vorliegen (vgl. Ziffer 5.2.2).

Aus den aufgeführten Gründen ist es sinnvoll, von einem stoffeuchteunabhängigen Diffusionskoeffizienten auszugehen und die Oberflächendiffusion bei der Berechnung des Flüssigtransportes zu berücksichtigen. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß sich Dampf- und Flüssigtransport gegenseitig nicht beeinflussen. Im Sorptionsfeuchtebereich ist diese Voraussetzung bei den meisten Baustoffen näherungsweise erfüllt, da die Dampfdiffusionsgeschwindigkeit vor allem durch die größeren Poren bestimmt wird, während der Flüssigtransport weitgehend unabhängig davon über die Mikroporen und im in den Zwickeln sorbierten Wasserfilm abläuft. Im Kapillarwasserbereich kann nicht mehr von einem feuchteunabhängigen Diffusionswiderstand ausgegangen werden, da hier die Diffusion eindeutig durch das vorhandene Wasser behindert wird. Allerdings ist in diesem Feuchtebereich im allgemeinen der Kapillartransport um Größenordnungen größer als die Diffusion, so daß feuchtebedingte Änderungen des Diffusionskoeffizienten bei Berechnungen in diesem Bereich nur einen geringen Einfluß auf das Ergebnis haben.

Der Diffusionstransportkoeffizient muß damit unter Bedingungen ermittelt werden, bei denen noch kein

(nennenswerter) Flüssigtransport auftritt. Bei den meisten Baustoffen liegt bis zu einer relativen Luftfeuchte von 50 % nur ein geringer Sorptionsfeuchtegehalt vor. Die nach DIN 62615 im Trockenbereich (0 bis 50 % r.F.) bestimmte Diffusionswiderstandszahl kann damit als eine die Diffusion beschreibende echte Stoffeigenschaft betrachtet werden.

5.4 Bestimmung von Kapillartransportkoeffizienten im Sorptionsfeuchtebereich aus Diffusionswiderstandsmessungen und Vergleich mit NMR-Messungen

Unter der Annahme, daß die Dampfdiffusion durch die im Trockenbereich ermittelte Dampfdiffusionswiderstandszahl bestimmt wird und das Absinken der Diffusionswiderstandszahl auf einen überlagerten Flüssigtransport zurückzuführen ist, müssen sich die Flüssigtransportkoeffizienten im Sorptionsfeuchtebereich durch die Bestimmung fiktiver Dampfdiffusionswiderstandszahlen μ^* analog zur Messung nach DIN 52615 [26] in höheren Feuchtebereichen berechnen lassen. Die Differenz der in höheren Luftfeuchtebereichen gemessenen Massenströme zu den im Trockenbereich gemessenen muß auf Flüssigtransport zurückzuführen sein:

$$\Delta g = g_w = - \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu^*} \right) \cdot \frac{D_D}{RT} \frac{dp}{dx} = - \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu^*} \right) \cdot \frac{D_D p_s}{RT} \cdot \frac{d\varphi}{dx} \quad (22)$$

Δg [kg/m ² s]	Massenstromdichtedifferenz
D_D [m ² /s]	Dampfdiffusionskoeffizient in Luft
μ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
μ^* [-]	fiktive Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (mit Flüssigtransport)
R [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
T [K]	absolute Temperatur
p_s [Pa]	Sättigungsdampfdruck
φ [-]	relative Luftfeuchte

Für den Transport in flüssiger Phase gilt:

$$g_w = -D_w \frac{dw}{dx} \quad (23)$$

D_w [m²/s] Flüssigtransportkoeffizient

Damit ergibt sich die folgende Bestimmungsgleichung für den Flüssigtransportkoeffizienten:

$$D_w = \frac{D_D p_s}{RT} \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu^*} \right) \frac{dw}{d\varphi} \quad (24)$$

Für die Berechnung der Transportkoeffizienten ist folglich auch die Kenntnis der Sorptionsisotherme zur Ermittlung des treibenden Wassergehaltsgradienten erforderlich.

In Tabelle 6 sind in unterschiedlichen Luftfeuchtebereichen gemessene Dampfdiffusionswiderstandszahlen aufgeführt. Bei manchen Baustoffen sind die Unterschiede zum Trockenbereichswert nur gering, so daß eine Auswertung nach Gleichung (24) nicht sinnvoll erscheint. Diese geringe Verminderung der Diffusionswiderstandszahl im höheren Feuchtebereich ist durch einen geringen Sorptionswassergehalt und/oder durch eine sehr große Dampfdiffusionsoffenheit bedingt.

In Bild 28 sind im Vorgriff exemplarisch für den Baumberger Sandstein und für den Kalksandstein die nach Gleichung (24) aus den Diffusionsmessungen berechneten Transportkoeffizienten zusammen mit den mit Hilfe der NMR-Anlage bei der Weiterverteilung von Wasser ermittelten Transportkoeffizienten dargestellt. Die nach beiden Methoden ermittelten Koeffizienten zeigen eine erstaunlich gute Überein-

stimmung beim Kalksandstein; hier wurde der Transportkoeffizient nur aus der dry- und wet-cup-Messung ermittelt. Beim Baumberger Sandstein zeigt sich im oberen hygrischen Feuchtebereich ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Erst bei niedrigen Feuchten weichen die durch Diffusionsmessungen ermittelten Transportkoeffizienten zu etwas niedrigeren Werten hin ab. In Tabelle 7 sind für die untersuchten Materialien die Flüssigtransportkoeffizienten für den hygroskopischen Bereich aufgelistet. Sie wurden nach Gleichung (24) aus isothermen Diffusionsmessungen im Trocken- und Feuchtebereich ermittelt. Alle Transportkoeffizienten sind relativ klein.

Tabelle 6 Dampfdiffusionswiderstandszahlen der untersuchten Baustoffe gemessen nach DIN 52 615 [26] im Trocken- und Feuchtebereich sowie in weiteren Feuchtebereichen oberhalb des Trockenbereiches. Die Unterschiede der Ergebnisse zu den Trockenbereichsmessungen sind auf Flüssigtransporteffekte zurückzuführen und können zur Bestimmung der Flüssigleitkoeffizienten im hygroskopischen Feuchtebereich dienen.

Baustoff	Dampfdiffusionswiderstandszahlen			
	Trockenbereich		Feuchtebereich	
	3 bis 50 % r.F.	44 bis 63 % r.F.	50 bis 93 % r.F.	80 bis 90 % r.F.
Baumberger	20	17	14	8,8
Obernkirchner	32	30	28	18
Rüthener	17	16	13	9,4
Sander	33	30	22	13
Gips	8,3	-	7,3	-
Kalksandstein	28	24	18	13
Porenbeton	7,6	-	6,7	-
Vollziegel	9,5	8,8	8	6,9

Tabelle 7 Aus isothermen Diffusionsmessungen im Trocken- und Feuchtebereich nach Gleichung (24) bestimmte Flüssigtransportkoeffizienten. Für die Berechnung ist die Kenntnis der Sorptionsisotherme notwendig (siehe Tabelle 2).

Baustoff	Wassergehalt [kg/m ³]	Flüssigtransportkoeffizient [m ² /s]
Baumberger	31	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Obernkirchner	7,7	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Rüthener	14	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Sander	22	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Gips	10	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Kalksandstein	30	$1,8 \cdot 10^{-10}$
Porenbeton	44	$1,1 \cdot 10^{-10}$
Vollziegel	35	$2,6 \cdot 10^{-10}$

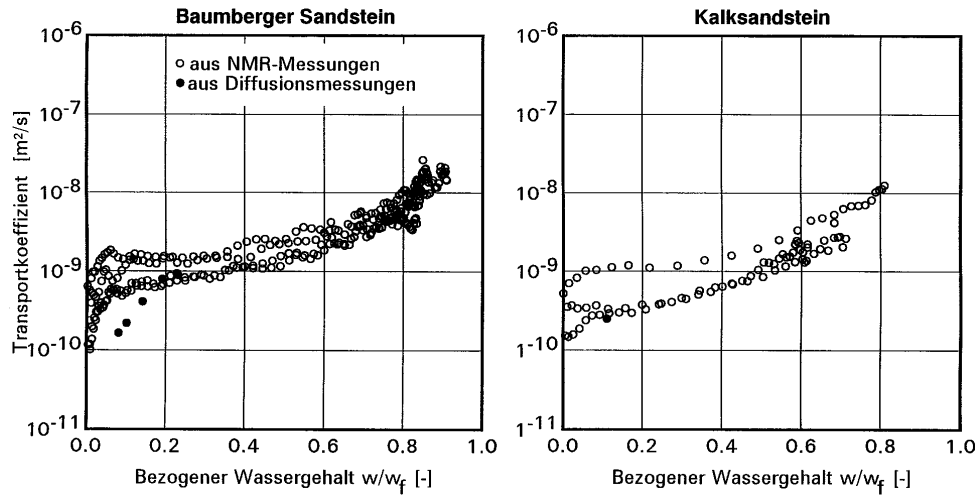


Bild 28 Aus Feuchteprofilmessungen mit Hilfe der NMR-Anlage ermittelte Funktionen der Transportkoeffizienten für das kapillare Weiterverteilen. Ergänzend dazu sind aus feuchteabhängigen Diffusionsmessungen berechnete Werte für die Koeffizienten im hygroskopischen Feuchtebereich miteingezeichnet.

6. Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten

Durch das Aufsaugen flüssigen Wassers wird bei den meisten mineralischen Baustoffen eine um Zehnerpotenzen größere Wassermenge pro Zeiteinheit in das Material transportiert, als dies durch Diffusion geschieht. Obwohl, abgesehen von frei bewitterten Natursteinfassaden oder Vormauerschalen, normalerweise durch konstruktive Maßnahmen verhindert wird, daß stark saugende Baustoffe dem Schlagregen ausgesetzt werden, ist eine genauere Betrachtung dieses Transportvorganges sinnvoll. Durch seine große Transportintensität können nämlich schon durch geringe handwerkliche Imperfektionen bei Abdichtungen oder durch mit der Zeit auftretende kleine Risse bauschädliche Feuchtemengen aufgenommen werden. Die Kapillaraktivität des Baustoffes kann aber auch von Vorteil sein, weil das durch Unterschreiten der Taupunkttemperatur im Inneren des Baustoffes ausfallende Wasser auf weitere Bereiche verteilt wird und damit eine zu große örtliche Anreicherung ausbleiben kann.

6.1 Messung der Flüssigkeitsverteilung mit Hilfe der kernmagnetischen Resonanz

Zur Ermittlung wassergehaltsabhängiger Kapillartransportkoeffizienten müssen die Flüssigkeitsverteilungen im Probekörper während des Transportvorganges bestimmt werden. Dazu ist eine Meßanlage notwendig, die eine schnelle Erfassung der Feuchteprofile mit guter örtlicher Auflösung zuläßt. Für diesen Zweck wurde eine Anlage aufgebaut, die auf der Messung der kernmagnetischen Resonanz beruht.

Dieses Meßverfahren, kann im Gegensatz zu fast allen anderen Stofffeuchtemeßverfahren als direktes Meßverfahren für den im Baustoff vorliegenden Wassergehalt betrachtet werden.

6.1.1 Physikalische Grundlagen

Das Verhalten von Atomkernen kann nicht allein durch die klassische Physik erklärt werden, für eine korrekte Beschreibung müßten die Gesetzmäßigkeiten der Quantenphysik herangezogen werden. Zum einfacheren Verständnis werden die notwendigen Grundlagen hier aber mit Hilfe der klassischen Physik erläutert.

Alle Atomkerne mit ungerader Protonen- oder Neutronenzahl (ungefähr zwei Drittel aller stabilen Atomkerne) besitzen einen Eigendrehimpuls (Spin) und – bedingt durch ihre räumlich ungleich verteilten Ladungen daran gekoppelt - ein magnetisches Moment. Die Atomkerne kann man sich vereinfacht als rotierende Stabmagneten (magnetische Dipole) vorstellen, die ein um ihre Drehachse rotationssymmetrisches Magnetfeld ausbilden. Solange kein äußeres Magnetfeld vorhanden ist, zeigen die Pole dieser Stabmagneten statistisch in alle möglichen Raumrichtungen. Legt man ein äußeres Magnetfeld B_0 an, dann versuchen sich die magnetischen Kerndipole auszurichten (siehe Bild 29). Allerdings dürfen gemäß den Gesetzen der Quantenmechanik nur ganz bestimmte Richtungen bezüglich einer Vorzugsrichtung eingenommen werden. Beim Wasserstoffatom (Proton) sind nur zwei Richtungen erlaubt, eine mehr parallel und eine mehr antiparallel zum ange-

legten Magnetfeld. Die Dipole präzedieren wie gekippte Kreisel auf einem Kegelmantel um die B_0 -Richtung (siehe Bild 30). Die parallele Ausrichtung ist die energetisch günstigere, wobei die Energiedifferenz beider Ausrichtungen proportional zur Magnetfeldstärke ist. Am absoluten Nullpunkt der Temperatur sind alle kernmagnetischen Momente parallel zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet. Bei höheren Temperaturen ist dies nicht mehr der Fall, da die thermische Energie die geordnete Ausrichtung erheblich stört. Bringt man zum Beispiel Wasser in ein Magnetfeld der Flußdichte 1 T, so kommen bei Zimmertemperatur auf zehn Millionen Kerne im höheren Energieniveau zehn Millionen und elf Kerne im niedrigeren. Da jedoch in 1 cm^3 Wasser $6,7 \cdot 10^{22}$ Wasserstoffkerne enthalten sind, erhält man trotzdem einen Überschuß von $3,7 \cdot 10^{16}$ parallel zum äußeren Magnetfeld ausgerichteter magnetischer Momente. Aus diesem Überschuß resultiert eine makroskopische Kernmagnetisierung mit dem Kernmagnetisierungsvektor M_z in Richtung des angelegten äußeren Feldes (Z-Richtung).

Bei der gepulsten Kernresonanz wird diese Kernmagnetisierung durch Einstrahlung eines Hochfrequenzimpulses über eine Meßspule aus ihrer Ausgangslage gebracht. Die Frequenz des Impulses

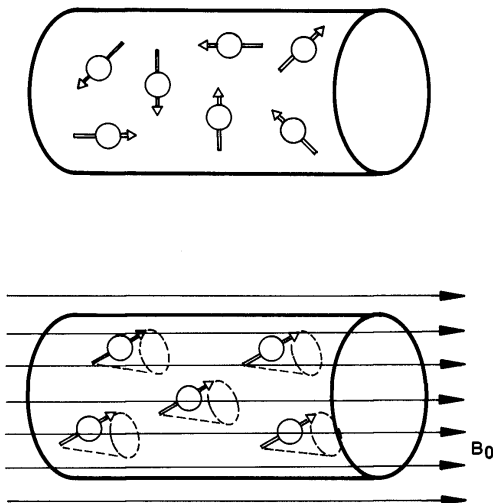


Bild 29 Orientierung der magnetischen Dipolmomente.

Oben: Ohne äußeres Magnetfeld zeigen die magnetischen Dipole in alle Raumrichtungen.

Unten: Bei Anlegen eines äußeren Magnetfeldes B_0 richten sich die Dipole aus, sie präzedieren auf einem Kegelmantel um die B_0 -Feldlinien.

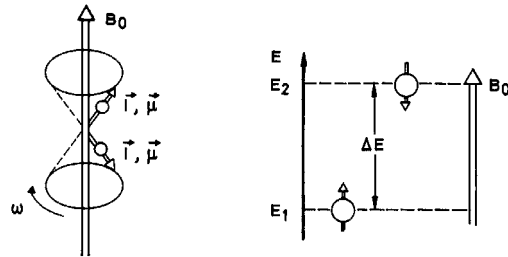


Bild 30 Zwei Möglichkeiten der Orientierung eines Protons im Magnetfeld.

Links: Bei der Präzession der Kerne auf einen Kegelmantel um die B_0 -Richtung ist eine Orientierung mehr parallel und mehr antiparallel zum äußeren Feld möglich.

Rechts: Ein Kerndipolmoment parallel zum Feld B_0 bedeutet einen niedrigeren Energieinhalt im Vergleich zum Dipolmoment antiparallel zum angelegten Feld. Die Energiedifferenz ΔE hängt von der Stärke des Magnetfeldes ab.

muß mit der Präzessionsfrequenz der Dipole (Resonanzfrequenz) übereinstimmen; sie ist proportional der Feldstärke des angelegten Magnetfeldes. Über die Länge des Impulses läßt sich die Auslenkung der makroskopischen Kernmagnetisierung variieren. Schaltet man den Impuls ab, wenn der Kernmagnetisierungsvektor senkrecht zum Magnetfeld steht (Auslenkungswinkel = 90° , deshalb 90° -Impuls), präzedieren die Kerne mit einem maximalen Öffnungswinkel um das statische Feld. In der Meßspule wird in diesem Fall die maximale Spannung induziert. Diese Spannung ist proportional der Anzahl der Wasserstoffkerne im Meßvolumen. Diese Spannung ist proportional der Anzahl der Wasserstoffkerne im Meßvolumen.

Nach Beendigung des Hochfrequenz-Impulses kehren die angeregten Kerne in die Ausgangslage zurück mit einem Zeitverhalten, das mit einem Relaxations-Ansatz der Form

$$M_z(t) = M_{z0}(1 - e^{-t/T_1}) \quad (25)$$

$M_z(t)$ [T] Makroskopischer Kernmagnetisierungsvektor in Z-Richtung

M_{z0} [T] Makroskopischer Kernmagnetisierungsvektor vor dem Impuls

T_1 [s] longitudinale Relaxationszeit

mit der Relaxationszeit T_1 beschreibbar ist. Diese longitudinale Relaxationszeit ist verbunden mit einer Energieabgabe an die Umgebung. T_1 ist vor allem von der physikalischen Bindung des Wasserstoff-

kernes abhängig, also im Falle des Wassers davon, ob es als Feststoff (Eis) oder in flüssiger Form vorhanden ist, aber auch von der Bindung an den Porenwänden und damit vom Porendurchmesser. Diese Relaxationszeit ist für das Kernresonanzexperiment insofern von Bedeutung, als nach jeder Anregung der Kerne vor der nächsten Messung alle Kerne in ihren Ausgangszustand zurückgekehrt sein müssen. Die Längsrelaxation ist damit entscheidend für die erreichbare Meßgeschwindigkeit. Allgemein sollte bis zur nächsten Messung eine Zeitspanne, die etwa der fünffachen T_1 -Relaxationszeit entspricht, abgewartet werden [97].

Bei der kernmagnetischen Resonanz tritt noch ein zweiter Relaxationsprozeß auf, die transversale Relaxation. Zwischen den senkrecht zum statischen Feld präzedierenden Kernen findet ein Energieaustausch statt, die einzelnen Kerne verändern ihre Präzessionsfrequenz und den Phasenwinkel; es kommt zu einem "Auffächern" des Magnetisierungsvektors. Bei diesem Vorgang ändert sich die Gesamtenergie des Spinsystems nicht. Dabei wird allerdings die Magnetisierung, die für die in der Meßspule induzierte Spannung verantwortlich ist, abgebaut. Da diese transversale Relaxation deutlich schneller abläuft (außer bei freiem Wasser) ist das Zeitverhalten des Meßsignales im starken Maße durch sie geprägt und zeigt einen exponentiellen Abfall. In Bild 31 ist ein typisches, allgemein als FID (Freier Induktionsabfall; Free Induction Decay) bezeichnetes Meßsignal dargestellt.

$$FID = FID_0 \cdot \exp^{-t/T_2} \quad (26)$$

FID [V] Freier Induktionsabfall (Meßsignal)
 FID₀ [V] Meßsignal direkt nach dem Impuls
 T₂ [s] transversale Relaxationszeit

Auch die transversale Relaxation ist von der chemischen und physikalischen Bindung des Kerns abhängig (siehe Tabelle 8). Liegen Komponenten mit verschiedenen T₂-Relaxationszeiten vor, so erhält man ein Meßsignal, das sich aus der Überlagerung der Exponentialkurven der einzelnen Komponenten ergibt. Trennt man die Meßkurve in die einzelnen Exponentialkurven auf, so lassen sich daraus die Mengenanteile der einzelnen Komponenten bestimmen. Dies wird routinemäßig z.B. in der Lebensmittelindustrie zur Bestimmung der Fett/Wasseranteile in Margarine angewandt [16]. Da die Relaxationszeiten,

wie schon beschrieben, auch stark von den physikalischen Bindungen des Wassers im Porenraum und damit von der Porenraumgröße abhängig sind, wäre es denkbar, durch deren Bestimmung Aufschluß über Anteile gebundenes/freies Wasser oder eine Art Porengrößenverteilung bestimmen zu können. Dies ist allerdings nicht möglich, wie eigens durchgeführte Messungen zeigten. Da bei den mineralischen Baustoffen immer eine stetige Porengrößenverteilung über einen größeren Bereich vorliegt, ist das Meßsignal eine Überlagerung vieler Relaxationskurven. Eine Auftrennung ist mit sinnvollem Aufwand und sinnvoller Genauigkeit unmöglich. In Tabelle 8 sind für Wasser in verschiedenen Bindungszuständen die Größenordnungen der longitudinalen und transversalen Relaxationszeiten dargestellt.

Die Grundlagen der kernmagnetischen Resonanz konnten hier nur vereinfacht und soweit sie für das Verständnis dieser Arbeit notwendig sind, dargestellt werden. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in der einschlägigen Fachliteratur und in Grundlagenbüchern ([31] [33] [43] [95] [97]).

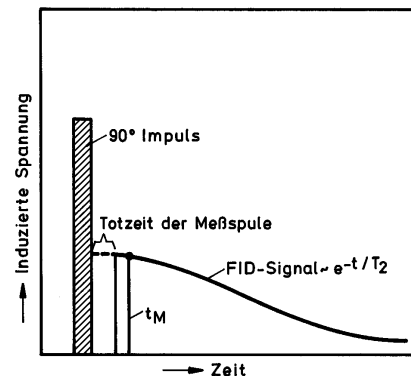


Bild 31 Typischer Verlauf (schematisch) eines gleichgerichteten FID-Signals (Free Induction Decay) nach einem 90°-Impuls.

T₂ Transversale Relaxationszeit
 t_M Zeitpunkt der Signalabtastung

Tabelle 8 Größenordnungen der longitudinalen Relaxationszeit T₁ (nach [77]) und der transversalen Relaxationszeit T₂ (nach [120]) von Wasser in verschiedenen Bindungszuständen.

Bindungszustand des Wassers	Longitudinale Relaxationszeit	Transversale Relaxationszeit
Feststoff (Eis) / fest gebundenes Wasser	etwa hundert Millisekunden	wenige Mikrosekunden
Leicht gebundenes Wasser	etwa hundert Millisekunden	Einige Mikrosekunden
Nicht gebundenes Porenwasser	etwa eine Sekunde	einige hundert Mikrosekunden
freies Wasser	wenige Sekunden	wenige Sekunden

6.1.2 Apparativer Aufbau

Kernstück der Meßanlage ist ein NMR-Gerät, das aus einer elektronischen Steuereinheit und einem Permanentmagneten mit Meßspule besteht. Im Meßfeld des Permanentmagneten beträgt die Magnetfeldstärke 0,235 Tesla, die Resonanzfrequenz für Wasserstoffkerne liegt damit bei 10 MHz. Der Magnet ist auf 40 °C thermostatisiert, um einen Temperatureinfluß auf das Magnetfeld zu verhindern. Über ein Helmholtz-Spulenpaar an den Polen des Permanentmagneten kann die Feldstärke nachgeregelt werden. Zwischen den Magnetpolen ist der Meßkopf befestigt. Da für die Bestimmung von Wassergehaltsverteilungen eine gute Ortsauflösung notwendig ist, wurde ein spezieller Meßkopf entwickelt. Dessen Spulenlänge beträgt im Gegensatz zu den in diesem Gerät üblichen 25 mm nur 3 mm. Außerdem wurde durch die Verwendung eines durchgehend offenen Meßkopfes und die Anbringung einer entsprechenden Bohrung in den Magnetgehäuseboden ein schrittweises Abscannen der Probe ermöglicht. Der offene Durchmesser der Meßspule von etwa 30 mm erlaubt damit die Verwendung von prismatischen Probenkörpern mit bis zu 20 x 20 mm² Querschnittsabmessung oder zylindrischen Probekörpern mit 30 mm Durchmesser.

Der Magnet ist so auf einem Transportschlitten montiert, daß der Meßkopfkanal waagrecht in Laufrichtung des Schlittens liegt. Mit Hilfe eines Schrittmotors wird der Schlitten positioniert. Dadurch kann die Meßspule zur Erfassung von Verteilungen schrittweise über die Probe geführt werden. Die Probe selbst ist waagrecht aufgehängt und mit einem gläsernen

Flüssigkeitszufuhrsystem verbunden, so daß eine freie Wasseraufnahme ohne Schwerkräfteinfluß möglich ist. Der kapillare Flüssigkeitsstrom wird durch kontinuierliche Wägung des Reservoirbehälters aus dessen Masseverlust bestimmt, was der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (A-Wert) aus einem Saugversuch entspricht. Die Wägung dient zur Kontrolle der in der Probe gemessenen Flüssigkeitsverteilungen. Bild 32 zeigt den schematischen Aufbau der Anlage.

Die mikroprozessorgesteuerte Steuereinheit besitzt einen Quarz-Oszillator zur Erzeugung der Resonanzfrequenz. Die Impulslänge wird über ein Potentiometer eingestellt und muß ebenso wie die Feldstärken-einstellung des Magneten anhand des mit einem angeschlossenen Speicheroszilloskopen dargestellten Signalverlaufes kontrolliert werden. Die nach dem Hochfrequenzimpuls in der Spule induzierte Wechselspannung wird gleichgerichtet, wobei der Anwender zwischen einer Diodengleichrichtung und einer phasenempfindlichen Gleichrichtung auswählen kann. Mit der phasenempfindlichen Gleichrichtung wird eine höhere Meßempfindlichkeit erreicht, aber Feldstärke- und Temperaturschwankungen haben dabei einen größeren Einfluß auf das Meßsignal als bei der Diodengleichrichtung. Das gleichgerichtete Signal wird anschließend mit einem Analog-Digital-Converter (ADC) für den Mikroprozessor digitalisiert. Da der ADC nur einen Arbeitsbereich von -5,1 bis +5,2 Volt hat, muß das Signal wieder so abgeschwächt werden, daß keine Überschreitung dieses Bereiches auftritt.

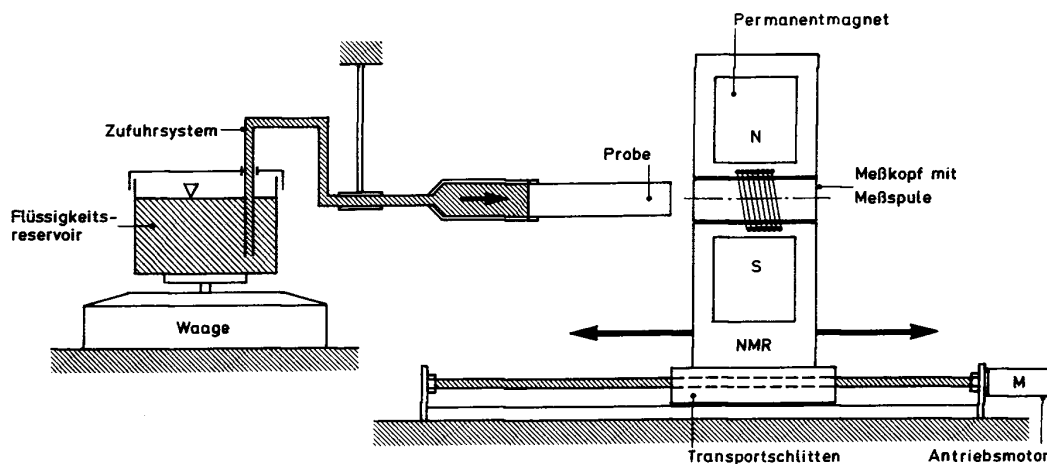


Bild 32 Schematischer Aufbau der NMR-Anlage zur Bestimmung von Flüssigkeitsverteilungen in prismatischen Probekörpern bei kapillarer Flüssigkeitsaufnahme.

Mit diesem Gerät ist es möglich, mehrere Signale aufzunehmen und zu mitteln, um das Signal/Rauschverhältnis S/R zu verbessern. Dabei gilt die Beziehung:

$$S/R \approx \sqrt{n} \quad (27)$$

n [-] Anzahl der Messungen

Bei der Erfassung von Verteilungen werden deshalb an jedem Meßpunkt so viele Messungen durchgeführt, wie ohne Überschreitung einer sinnvollen Meßzeit möglich sind. Dabei spielt natürlich auch der Zeitabstand zwischen den Messungen eine große Rolle. Er muß so gewählt werden, daß vor der nächsten Messung alle Kerne in die Gleichgewichtslage zurückgekehrt sind. Vom FID-Signal (Bild 31) wird zu einem am Gerät einstellbaren Zeitpunkt die Amplitude als Meßsignal erfaßt. Dieser Zeitpunkt muß auf jeden Fall größer als die Totzeit der Meßspule (hergerufen durch das Umschalten vom Senden des Impulses auf Empfangen des Nutzsignals) sein. Durch die Wahl des Zeitpunktes läßt sich der Einfluß eines eventuellen Festkörpersignals auf das Ergebnis variieren.

Zur Steuerung der gesamten Anlage wird ein Personalcomputer mit vier seriellen Schnittstellen eingesetzt. An diesen Schnittstellen sind die Schrittmotorsteuerung, die Steuerelektronik für den Meßstart, die NMR-Steuerung sowie die Waage angeschlossen. Für die Meßwerterfassung wurde ein menuegesteuertes Programm entwickelt, das die folgenden Aufgaben erfüllt:

1. Positionierung der Meßeinheit
2. Anregung zur NMR-Messung über die Steuerelektronik
3. Übernahme des NMR-Signals
4. Meßwerterfassung von der Waage
5. Erfassen der Flüssigkeitsverteilungen in konstanten Wurzelzeitabständen
6. Graphische Darstellung mit automatischer Grenzwertanpassung von NMR-Signal über die Probenlänge und aufgenommener Flüssigkeitsmenge über der Wurzel der Zeit
7. Datensicherung

Es wurde noch eine zweite NMR-Meßanlage aufgebaut, die zur Messung an größeren Proben mit einem

Querschnitt von $5 \times 5 \text{ cm}^2$ geeignet ist. Im Gegensatz zur bereits beschriebenen Anlage mußte dazu ein Elektromagnet eingesetzt werden, der ein Gewicht von etwa 700 kg besitzt. Deshalb wird in diesem Fall nicht der Magnet, sondern die Probe mit Hilfe eines Transportschlittens bewegt. Diese Anlage ist für lang dauernde Messungen weniger geeignet, da die Stromversorgung und damit das Magnetfeld eine Drift besitzen. Das Magnetfeld muß, wählt man die auf Feldstärkeschwankungen unempfindlicher reagierende Diodengleichrichtung, etwa alle zwei bis drei Stunden nachgestellt werden. Der Magnet besitzt eine doppelt so große Feldstärke wie das "kleine" NMR und damit eine etwas größere Meßempfindlichkeit. Bis auf die dargelegten Unterschiede ist diese Meßanlage identisch wie die erste Anlage. Bild 33 zeigt eine fotografische Teilansicht beider Anlagen.

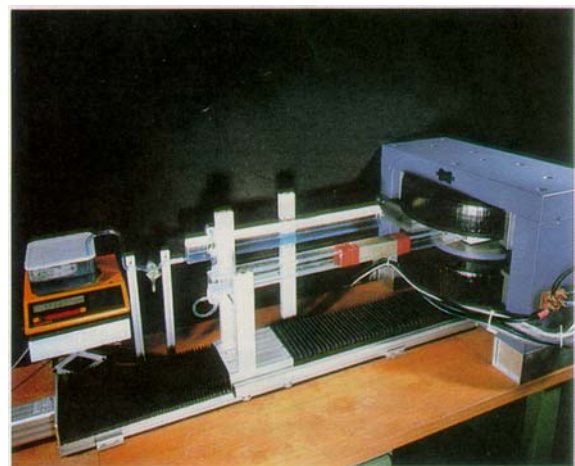


Bild 33 Fotografische Teilansichten der „kleinen“ NMR-Anlage (oben) und der „großen“ NMR-Anlage (unten). Mit dem beiden Anlagen können in Proben mit einer Querschnittsabmessung von bis zu $2 \times 2 \text{ cm}^2$ bzw. $5 \times 5 \text{ cm}^2$ die Flüssigkeitsverteilungen gemessen werden.

6.1.3 Meßgenauigkeit, Grenzen der Anwendung

Ein Vergleich herkömmlich gravimetrisch bestimmter und mit der NMR-Anlage an denselben Proben ermittelter Wassergehalte ist für zwei unterschiedliche Natursandsteine (ein feinporiger, sorptionsfähiger und ein grobporiger, wenig sorptionsfähiger Sandstein) in Bild 34 dargestellt. Für beide Sandsteine läßt sich dieselbe Kalibrierkurve verwenden. Dies zeigt den Vorteil eines direkten Meßverfahrens für den Feuchtegehalt. Die NMR-Meßtechnik kann für die meisten Baustoffe als ein solches betrachtet werden. Nicht für jedes Material muß eine Trockenmessung durchgeführt und eine eigene Kalibrierkurve erstellt werden. Dies gilt nicht für Materialien, die Wasserstoffkerne enthalten (z.B. Holz, Kunststoffe).

Aus Bild 35 ist die hohe Meßgenauigkeit dieses Verfahrens zu erkennen. Dargestellt ist für verschiedene Natursandsteine die Messung des Feuchtegehalts im hygroskopischen Bereich. Die Stoffeuchte kann mit einer Genauigkeit von höher als 0,2 Vol.-% bestimmt werden. Dabei läßt sich durch die Anzahl der zu mittelnden Einzelmessungen das Signal/Rauschverhältnis und damit die erreichbare Meßgenauigkeit variieren.

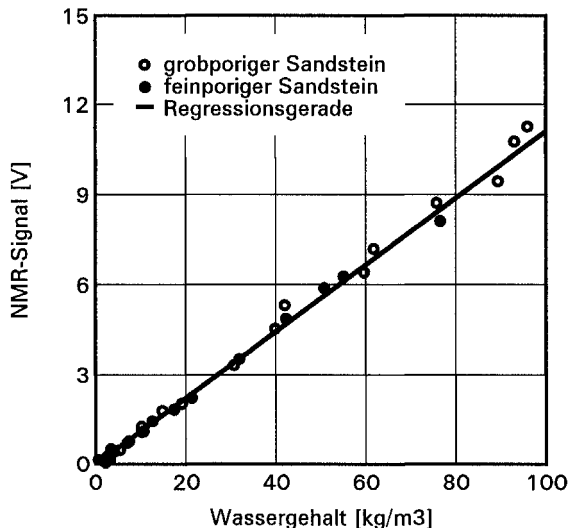


Bild 34 Abhängigkeit des NMR-Signals vom Feuchtegehalt. Da die kernmagnetische Resonanz ein direktes Meßverfahren für den Feuchtegehalt darstellt, läßt sich dieselbe Kalibrierkurve auch für sehr unterschiedliche Materialien (hier ein grobporiger, wenig sorptionsfähiger und ein feinporiger, sorptionsfähiger Sandstein) verwenden.

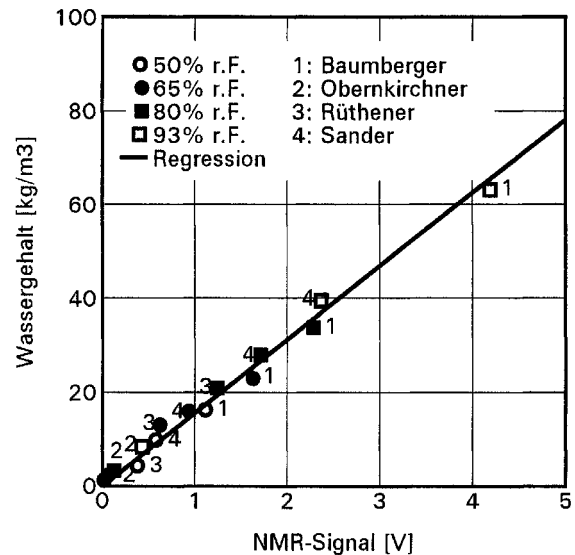


Bild 35 Gegenüberstellung von gravimetrisch bestimmten Wassergehalten und an denselben Proben mit der NMR-Anlage ermittelten Meßsignalen verschiedener Sandsteinvarietäten im hygroskopischen Feuchtebereich. Durch die Erhöhung der Anzahl der zu mittelnden Einzelmessungen läßt sich das Signal/Rauschverhältnis soweit vergrößern, daß der Wassergehalt mit einer Genauigkeit von besser als 0,2 Vol.-% bestimmt werden kann.

Für die Bestimmung von Feuchteverteilungen ist natürlich auch die Ortsauflösung des Meßgerätes von Bedeutung. Das NMR-Gerät mißt nicht nur innerhalb der 3 mm kurzen Meßspule, sondern auch davor und dahinter, da auch dort die Wasserstoffkerne zur Resonanz gebracht werden und damit ebenfalls zum Meßsignal beitragen. Die Ortsauflösung wurde mit einem sehr dünnen, getränkten Filterpapier bestimmt, das millimeterweise durch den Meßkopf geführt wurde. Bild 36 zeigt die so ermittelte ortsabhängige Empfindlichkeit für die NMR-Anlagen. Für beide Geräte ergibt sich ein Verlauf, der sich sehr gut durch die jeweils aufgeführte Gaußfunktion annähern läßt. Die Halbwertsbreite der relativen Empfindlichkeit beider Meßgeräte liegt bei ± 6 mm bzw. $\pm 7,5$ mm.

In Bild 37 ist ein Vergleich zwischen der Messung der Wassergehaltsverteilung mit Hilfe der NMR-Anlage und der Messung mit einer Gammadurchstrahlungsanlage dargestellt. Dabei wurden die Messungen an derselben Probe nach einer Saugzeit von mehreren Stunden direkt nacheinander durchgeführt. Die Probe hatte eine Querschnittsabmessung von 5×5 cm² und eine Länge von 25 cm. Zum Abscannen der Probe wurde für die NMR-Messung etwa 5 Minuten und für die Gammadurchstrahlungsmessung 25 Minuten benötigt. Das verwendete Gammadurchstrahlungsmeß-

gerät erreichte eine Ortsauflösung von einem Millimeter [62]. Trotzdem ergeben sich für beide gemessenen Verteilungen, wenn man von den ersten Millimetern der Probe absieht, nur sehr geringe Unterschiede. Dies zeigt, daß die Ortsauflösung der NMR-Anlage voll ausreicht, die Feuchteverteilungen üblicher Baustoffe, bei denen keine millimeterscharfen Feuchtegradienten auftreten, zu bestimmen. Da beim Saugversuch der Feuchtegradient mit zunehmender Eindringtiefe immer flacher wird, kann das Problem einer zu niedrigen Ortsauflösung fast immer durch eine eventuell größer zu wählende Saugzeit vermindert werden.

Wie eigene Versuche ergeben haben, ist es trotz Kenntnis der Funktion für die Ortsauflösung des Meßgerätes nicht möglich, aus den gemessenen Profilen die sich davon geringfügig unterscheidenden wirklichen Wassergehaltsverteilungen zu berechnen. Es ist aber leicht möglich, den umgekehrten Weg zu gehen und aus berechneten Verteilungen diejenigen Profile zu bestimmen, die sich bei Messung dieser Verteilungen mit der NMR-Anlage ergeben würden. Um einen optimalen Vergleich zwischen Rechnung und Messung zu ermöglichen, sind deshalb alle berechneten Verteilungen auf diese Weise "NMR-korrigiert" worden.

Probleme kann es bei der Messung an Baustoffen mit grobkörnigen Zuschlägen geben. Es werden oft Zuschlagstoffe verwendet, die einen Durchmesser von zum Teil mehr als einem Zentimeter besitzen. Bei einer maximalen Querschnittsabmessung von 5 x 5 cm kann die Probe in diesem Fall nicht mehr als homogen betrachtet werden. Ein anderes Problem stellen die sogenannten Gelporen des Betons dar. Diese Poren besitzen extrem kleine Durchmesser. Wie schon beschrieben, nimmt die transversale Relaxationszeit des Wassers in Poren mit sinkendem Porendurchmesser deutlich ab. Bei sehr kleinen Poren kann die Relaxationszeit so niedrig werden, daß die Wasserstoffkerne bereits innerhalb der Totzeit der Meßspule so weit relaxiert sind, daß sie mit der Meßspule nicht mehr oder nur noch zum Teil erfaßt werden. Dies führt, wie auch in Bild 38 dargestellte Testmessungen an Beton zeigen, zu einer Kalibrierkurve, die nicht durch den Nullpunkt geht und eventuell auch keine Gerade darstellt.

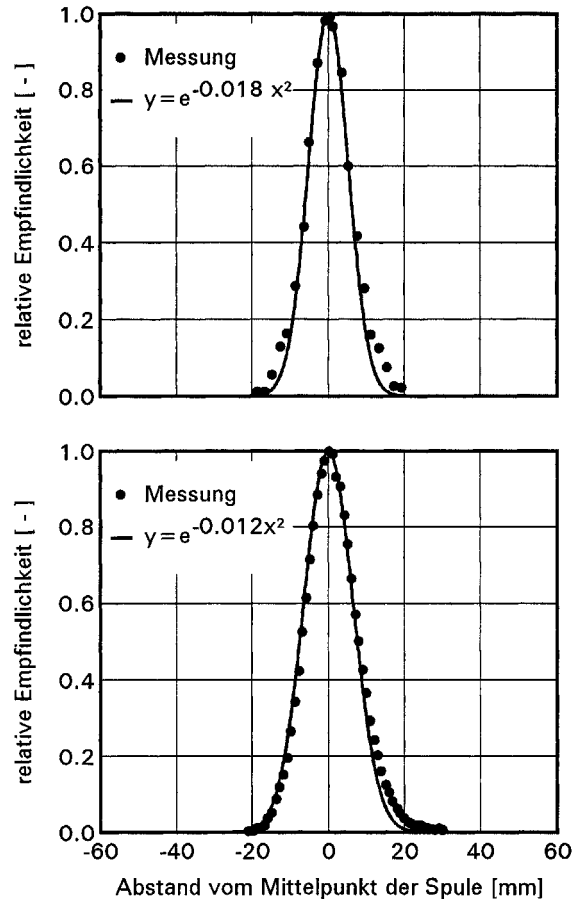


Bild 36 Ortsabhängige Empfindlichkeit der an dem NMR-Anlagen verwendeten Meßspulen. Die Ortsempfindlichkeit läßt sich gut mit den angegebenen Gaußverteilungen beschreiben
Oben: „Kleines“ NMR
Unten: „Großes“ NMR

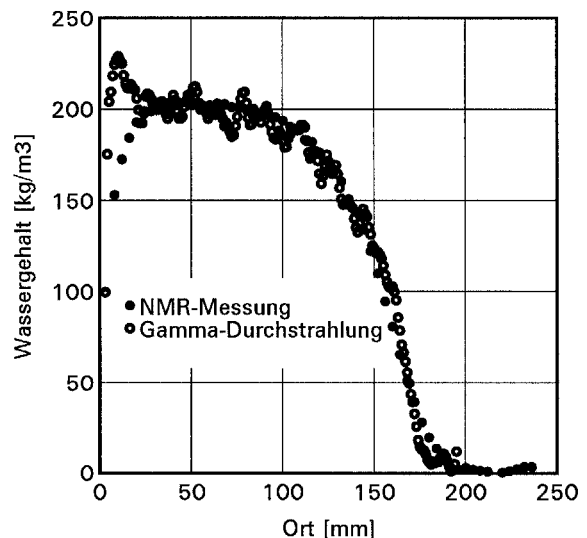


Bild 37 Vergleich der Messung der Wassergehaltsverteilung mit Hilfe der Gammadurchstrahlung und der magnetischen Kernresonanz. Die Messungen wurden an derselben Probe nach einer Saugzeit von mehreren Stunden unmittelbar hintereinander durchgeführt. Obwohl das verwendete Gammadurchstrahlungsgerät eine wesentlich höhere Ortsauflösung von nur einem Millimeter erreicht, geben beide Meßmethoden die Wassergehaltsgradienten annähernd gleich wieder.

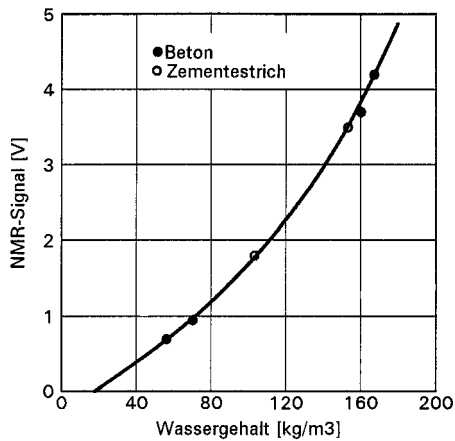


Bild 38 Gegenüberstellung von gravimetrisch bestimmten und mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehalten an Proben aus beton und Zementestrich. In den extrem kleinen Gelporen ist die Relaxationszeit so niedrig, daß sie in die Totzeit der Meßspule fällt. Der Wassergehalt dieser Gelporen wird deshalb nicht oder nur zum Teil mit erfaßt, weshalb die Kalibrierkurve für solche Materialien nicht durch den Ursprung des Koordinatensystems geht.

6.1.4 Meßdurchführung

Die Messungen der Feuchteverteilungen zur Bestimmung der Transportkoeffizienten wurden mit Hilfe des "kleinen" NMR-Gerätes an vorher getrockneten, seitlich mit Epoxidharz abgedichteten Proben mit einer Querschnittsabmessung von 2 x 2 cm und einer Länge von 10 bis 15 cm durchgeführt. An gesättigten Vergleichsproben wird die geeignete Abschwächung des NMR-Signals sowie der notwendige Zeitabstand zwischen den Messungen bestimmt. Bei den meisten Materialien ist ein Abstand von 0,2 s ausreichend, bei einer gewählten Anzahl von 25 Messungen je Ortspunkt bedeutet dies eine Meßzeit von 5 s. Gemessen wird in einem Abstand von 4 mm, d.h. bei einer Probenlänge von 15 cm ergeben sich etwa 40 Meßpunkte. Zusammen mit der Positionierzeit des Schlittens ergibt sich damit eine Gesamtmeßzeit für ein Feuchteprofil von unter 5 Minuten. Allerdings wird gerade für die schnell saugenden grobporigen Materialien ein größerer Meßzeitabstand von zum Teil bis zu einer vollen Sekunde benötigt. Um trotzdem zu einer ausreichend kurzen Meßzeit zu kommen, muß die Anzahl der zu mittelnden Messungen entsprechend reduziert werden. Dies ist insofern meistens unproblematisch, als diese Stoffe oft eine sehr große freie Wassersättigung aufweisen, wodurch sich ein besseres Signal/Rausch-Verhältnis ergibt.

Die Ankopplung der Probe an das gläserne Flüssigkeitszufuhrsystem wird mittels eines PVC-Schrumpf-

schlauches vorgenommen, wobei zwischen Probe und Schrumpfschlauch etwas Dichtungsmasse gebracht wird. Nachdem die Probenhalterung so exakt justiert worden ist, daß der Magnet mit der Meßspule ohne Probleme über die Probe geführt werden kann, wird eine Trockenmessung durchgeführt. Diese Trockenmessung ist notwendig, weil das Epoxidharz ebenso wie die Dichtungsmasse aufgrund ihres Gehaltes an Wasserstoffkernen ein NMR-Signal liefern, das von den späteren Messungen abgezogen werden muß.

Nach Eingabe der NMR-Parameter (Signalabschwächung, Anzahl der zu mittelnden Messungen, Zeitabstand zwischen den einzelnen NMR-Messungen) wird die Flüssigkeitszufuhr geöffnet und damit die Stirnfläche der Probe vollständig benetzt. Direkt anschließend wird die Meßreihe gestartet; die Probe wird in Saugrichtung abgescannt. Die Bestimmung des Feuchteprofils wird in konstanten Wurzel-Zeit-Abständen wiederholt, um trotz des immer langsamer werdenden Saugvorganges (\sqrt{t} -Gesetz) konstante Abstände der Profile zu erhalten. Auf dem Computerbildschirm werden die gemessenen Profile sofort dargestellt. Wenn die Flüssigkeit ausreichend tief eingedrungen ist und genügend Profile für die Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten ermittelt worden sind, kann die Messung beendet werden. Für eine sinnvolle Auswertung ist eine Eindringtiefe von etwa 6 bis 12 Zentimeter notwendig, wofür je nach Saugvermögen des Probenmaterials eine Gesamtmeßzeit von unter 2 Stunden bis zu mehreren Tagen benötigt wird.

Nach Beendigung der Feuchtezufuhr beginnt in der Probe der Prozeß der Weiterverteilung. Durch die weitere Bestimmung der Feuchteverteilungen läßt sich auch dieser deutlich langsamere Transportprozeß mit Hilfe der NMR-Anlage beobachten. Allerdings wird dafür eine Meßzeit benötigt, die je nach Probenmaterial von etwa einem Tag bis zu mehreren Wochen reicht. Durch den gleichzeitig ablaufenden Prozeß der Diffusion, der zu einem Austrocknen der Probe über die offene Querschnittsfläche am Ende der Probe führt, wird die Beobachtungszeit beschränkt. Sobald der Gesamtwassergehalt der Probe um mehr als 5% gesunken ist, wird der Meßvorgang abgebrochen.

6.2 Meßergebnisse

Bei den folgenden Erläuterungen der Meßergebnisse sind die vier Natursteinsorten und die vier verschiedenen künstlichen Baustoffe jeweils zu einem Gesamtbild, bestehend aus den vier einzelnen Bildern, zusammengefaßt worden. Diese Darstellungsweise wird auch für die Darstellung der Kapillartransportkoeffizienten gewählt. Neben den Meßpunkten sind in den Diagrammen auch berechnete Feuchteverteilungen mit eingetragen, auf die in Ziffer 6.3.1 noch genauer eingegangen wird.

6.2.1 Eindringverhalten von Wasser

In den Bildern 39 und 40 werden die Meßergebnisse für Natursandsteine und künstliche Baustoffe veranschaulicht. Die gemessenen Wasserverteilungen über die Probenlänge zu bestimmten Zeitpunkten des Saugvorganges zeigen eindeutig, daß das Wasser nicht in Form einer "definierten Wasserfront" eindringt. Theoretischen Ansätzen für das kapillare Eindringverhalten bei porösen Baustoffen mit unterschiedlichen Porengrößen voll entsprechend, dringt es in differenzierter Weise mit zeitlich und örtlich unterschiedlichen Gradienten ein. Die Natursteine zeigen dabei ein untereinander ähnliches Verhalten. An der Saugseite der Probe stellt sich schnell ein konstanter Feuchtegehalt ein, der der freien Sättigung entspricht. Der Wassergehalt nimmt in Saugrichtung kontinuierlich ab. Die gemessenen Wassergehaltsverteilungen haben stets eine konvexe Form. Bei immer größer werdenden Eindringtiefen ergeben sich immer flacher werdende Verläufe. Die einzelnen Sandsteinsorten unterscheiden sich in der Eindringgeschwindigkeit und der Steilheit der sich ergebenden Verläufe.

Baumberger und Sander Sandstein haben die niedrigste Eindringgeschwindigkeit. Daß Baumberger Sandstein trotz des etwa doppelt so großen Wasseraufnahmekoeffizienten etwa die gleiche Eindringgeschwindigkeit wie Sander Sandstein besitzt, ist in seiner nahezu doppelt so großen Wasseraufnahmekapazität begründet (vergleiche Tabelle 1). Oberkirchner Sandstein hat aufgrund seiner sehr geringen Aufnahmekapazität bei nur geringfügig höherem Wasseraufnahmekoeffizienten eine deutlich höhere Eindringgeschwindigkeit. Rühthener Sandstein mit seinem sehr hohen A-Wert zeigt die größte Eindringgeschwindigkeit und die steilsten Wassergehaltsprofile.

Von den künstlich hergestellten Baustoffen verhalten sich Gips und Kalksandstein analog den Natursandsteinen (siehe Bild 40). Kalksandstein hat mit seiner etwas größeren freien Sättigung aber auch seinem größeren A-Wert etwa ein mit Baumberger Sandstein zu vergleichendes Verhalten. Gips besitzt mit 400 kg/m^3 das größte Wasseraufnahmevermögen aller hier betrachteten Baustoffe, hat aber aufgrund seines relativ hohen A-Wertes trotzdem keine kleine Eindringgeschwindigkeit.

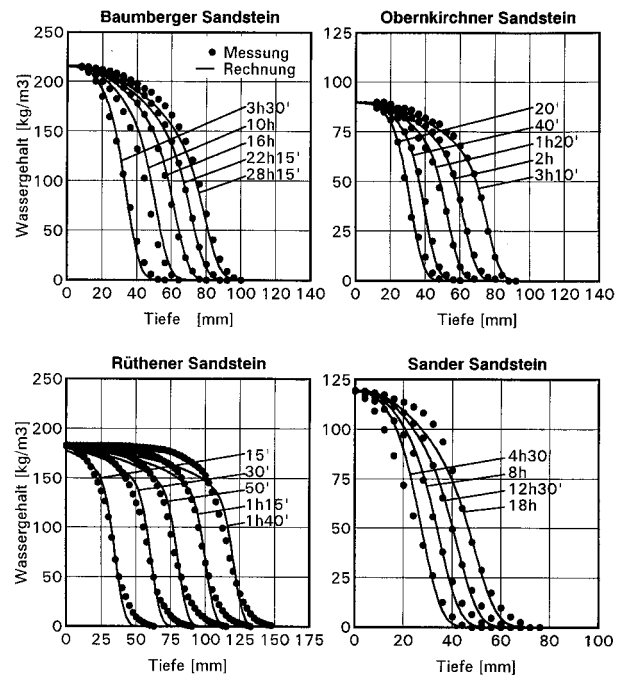


Bild 39 Wassergehaltsverteilungen über die Tiefe verschiedener Natursteinproben zu unterschiedlichen Zeitpunkten, anhand von NMR-Messungen bzw. Berechnungen eines Saugvorganges. Mit Hilfe einer exponentiellen Approximation wurden die mit einer durchgezogenen Linie dargestellten Verteilungen berechnet.

Anders sieht das Wassereindringverhalten für Porenbeton aus. Zeigt dieses Material für kurze Saugzeiten noch ein Wasseraufnahmeverhalten vergleichbar mit den bereits vorgestellten Ergebnissen, so ändert sich dies aber, sobald die Saugzeiten 24 Stunden überschreiten. Der Feuchtegehalt der Saugfläche steigt über die freie Wassersättigung auf 375 kg/m^3 an und es bilden sich bei der freien Sättigung und unterhalb bei etwa 200 kg/m^3 Feuchteplateaus, die mit steigender Saugzeit in das Materialinnere wandern. Nach einer Saugzeit von acht Tagen (192 h) steigt der Feuchtegehalt auf der Saugseite weiter an auf einen Wassergehalt von 450 kg/m^3 , wobei sich bei 375 kg/m^3 ein drittes Feuchteplateau auszubilden beginnt.

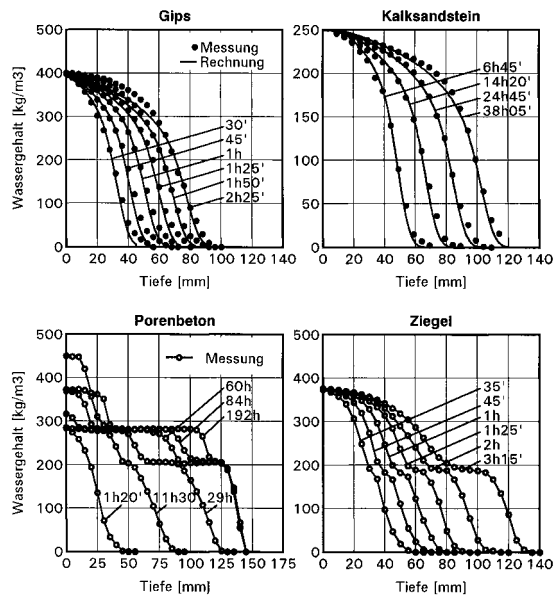


Bild 40 Wassergehaltsverteilung über die Tiefe verschiedener Baustoffproben zu unterschiedlichen Zeitpunkten, anhand von NMR-Messungen bzw. Berechnungen eines Saugvorganges. Die in den beiden oberen Diagrammen als durchgezogene Linien dargestellten Verteilungen wurden mit Hilfe einer exponentiellen Approximation berechnet. Zum besseren Erkennen der gemessenen Verläufe sind in den beiden unteren Diagrammen die Meßpunkte mit Linien verbunden.

Beim Ziegel bildet sich ebenfalls - allerdings schon nach etwa einer Stunde Saugzeit - ein Feuchteplateau aus. Dieses Plateau, das etwas schwächer ausgebildet ist als das des Porenbetons, tritt bei ungefähr der Hälfte der freien Wassersättigung auf. An der Saugfläche ist hier keine Veränderung des Wassergehaltes festzustellen.

Eine Erklärung für das abweichende Verhalten des Porenbetons und des Ziegels konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden. Messungen der im Ziegel vorliegenden Porenradialverteilung mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie ergaben zwei Porenradialhäufigkeitsmaxima. Dies könnte eine Erklärung für das Auftreten von Wassergehaltsplateaus sein.

6.2.2 Weiterverteilung von Wasser

Für die Untersuchung der Weiterverteilung werden die Proben zunächst bis zum Zeitpunkt $t = 0$ mit Wasser beaufschlagt, bis eine Eindringtiefe von etwa einem Drittel der Probenlänge erreicht ist. Dann wird die Wasserbeaufschlagung von außen unterbrochen. Die Meßkurven der Wassergehaltsverteilung zu Beginn der Weiterverteilung sind in den Bildern 41 und 42 mit $t = 0$ gekennzeichnet. Beim Prozeß der Weiterverteilung saugen die kleineren Poren mit ihrer

größeren Saugkraft die gefüllten größeren Poren leer. Dies führt dazu, daß das Wasser weiter in das Probeninnere vordringt, der Wassergehalt im vorderen Teil der Probe dagegen sinkt. Vergleicht man die dargestellten Wassergehaltsprofile mit den während des Saugvorganges bestimmten Profilen aus Bild 39 und 40, so fallen die wesentlich größeren Zeitabstände auf.

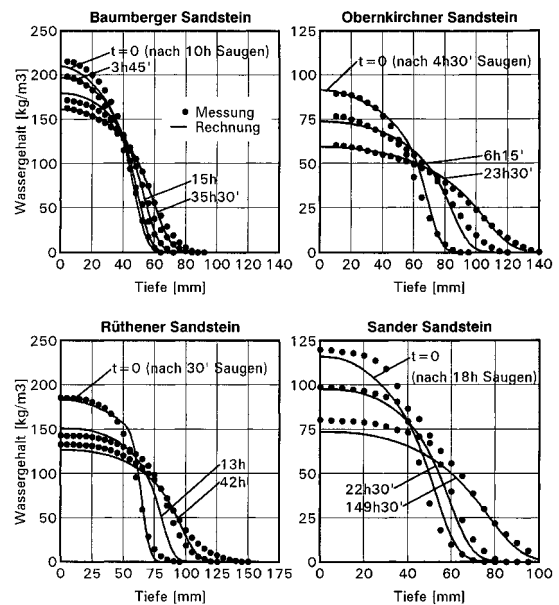


Bild 41 Wassergehaltsverteilung über die Tiefe verschiedener Natursandsteinproben zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Weiterverteilung, anhand von NMR-Messungen bzw. Berechnungen. Mit Hilfe einer exponentiellen Approximation wurden die mit einer durchgezogenen Linie dargestellten Verteilungen berechnet.

Während auch beim Weiterverteilen das Verhalten des Gips und des Kalksandsteines mit dem der Natursandsteine vergleichbar ist, weicht es auch hier beim Porenbeton und Ziegel davon ab. Der Wassergehalt des Porenbetons zeigte zu Beginn der Weiterverteilung nach einer Saugzeit von sieben-einhalb Stunden bei einem Wassergehalt von etwa 210 kg/m^3 ein nur schwach ausgebildetes Feuchteplateau. Dieses Plateau bildet sich weiter aus, bis nach einer Weiterverteilungszeit von etwas mehr als einem Tag der Wassergehalt an keiner Stelle der Probe den Wert dieses Plateaus übersteigt. Dabei bildet sich bei 175 kg/m^3 ein neues Plateau. Beim Ziegel ist zu Beginn der Weiterverteilung noch kein Feuchteplateau zu erkennen. Es bildet sich dann aber nach acht Stunden bei etwa dem gleichen Feuchtegehalt wie beim Saugvorgang zusammen mit einem zusätzlichen Feuchteplateau bei einem Feuchtegehalt von ungefähr 30 kg/m^3 .

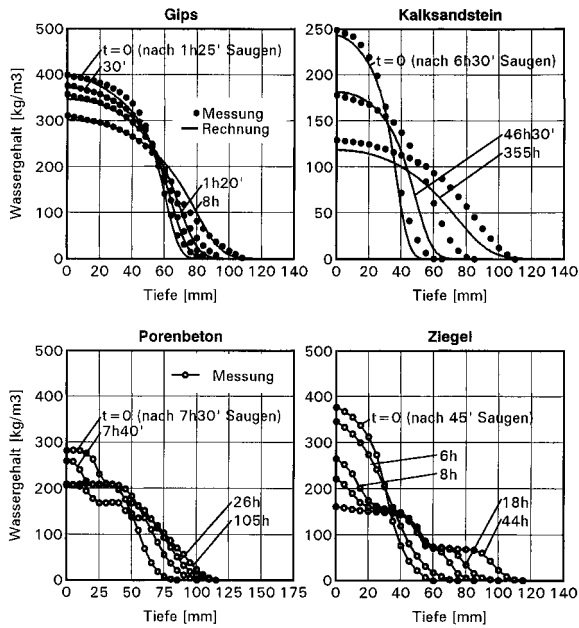


Bild 42 Wassergehaltsverteilung über die Tiefe verschiedener Baustoffproben zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Weiterverteilung, anhand von NMR-Messungen bzw. Berechnungen. Die in den beiden oberen Diagrammen als durchgezogene Linien dargestellten Verteilungen wurden mit Hilfe einer exponentiellen Approximation berechnet. Zum besseren Erkennen der gemessenen Verläufe sind in den beiden unteren Diagrammen die Meßpunkte mit Linien verbunden.

6.3 Ermittlung von Kapillartransportkoeffizienten

Für die Berechnung der Kapillartransportkoeffizienten aus den gemessenen zeitlich variierenden Wassergehaltsverteilungen sind zwei Methoden üblich. Durch eine Boltzmanntransformation wird Gleichung (12) zu einer gewöhnlichen Differentialgleichung

$$-\frac{1}{2} \frac{dw}{d\lambda} = \frac{d(D_{w(w)} dw/d\lambda)}{d\lambda} \quad (28)$$

$D_{w(w)}$ [m^2/s] Flüssigtransportkoeffizient
 w [kg/m^3] Wassergehalt

mit der Boltzmannvariablen $\lambda = x/\sqrt{t}$. Diese Gleichung gilt für das Eindringen von Flüssigkeit in einen Körper mit unendlicher Ausdehnung in Saugrichtung, mit konstantem Ausgangswassergehalt und konstantem Wassergehalt an der Saugfläche. Außerdem darf der Kapillartransport nur vom Wassergehalt abhängen, eine Forderung, die gleichbedeutend ist mit einer linearen Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit [19]. Die Methode der Berechnung der Transportkoeffizienten mit Hilfe der Boltzmanntransformation ist nicht anwendbar für die Weiterverteilung von

Flüssigkeiten, weshalb eine andere Methode angewendet wird. Gleichung (12) läßt sich direkt nach D_w auflösen:

$$D_w = -g_{w(x,t)} \left(\frac{dw_{(x,t)}}{dx} \right) \quad (29)$$

$g_{w(x,t)}$ [kg/m^2s] Flüssigmassenstromdichte

Für jeden Zeitpunkt ist der Transportkoeffizient durch das Verhältnis von Massenstrom und Wassergehaltsgradient gegeben. Dieses Verhältnis ist zeitunabhängig, wenn der kapillare Flüssigtransport durch einen Diffusionsansatz beschreibbar ist. Der Wassergehaltsgradient in Gleichung (29) läßt sich für jeden Meßzeitpunkt und Meßort direkt aus den gemessenen Profilen bestimmen.

Um eine bessere Auswertung zu ermöglichen, wird eine Regression durch die Meßpunkte geführt; die Kurven werden mit Hilfe eines Digitalisierungstabletts mit einem Datenpunkteabstand von 0,1 mm eingelezen. Diese Methode der Regression wird angewendet, da eine mathematische Regression für den gesamten Feuchtebereich nur durch Verwendung abschnittsweise verschiedener Ansätze möglich wäre. Dies würde aber zu Unstetigkeiten der ersten Ableitung an den Übergangsstellen und damit zu physikalisch nicht erkläraren Formen der Kapillartransportfunktion führen (wie z.B. bei Kumaran [79]).

Der Massentransport $g_{w(x,t)}$ läßt sich aus zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 und t_2 bestimmten Profilen bestimmen:

$$g_{w(x,t=\frac{t_1+t_2}{2})} = \frac{1}{2(t_2-t_1)} \int_{a=x}^{\infty} (w_{(a,t_2)} - w_{(a,t_1)}) da \quad (30)$$

Die obere Integrationsgrenze kann dabei durch den Ort der Feuchtefront ersetzt werden, da eine weitere Integration zu keiner Änderung führen kann.

6.3.1 Koeffizienten für die Befeuchtung

In Bild 43 sind die so ermittelten Transportkoeffizienten der verschiedenen Sandsteinsorten dargestellt. In allen Fällen ist der Transportkoeffizient stark vom Feuchtegehalt abhängig. Bei freier Sättigung liegt der Transportkoeffizient um etwa zwei Größenordnungen über dem im hygroscopischen Feuchtebereich.

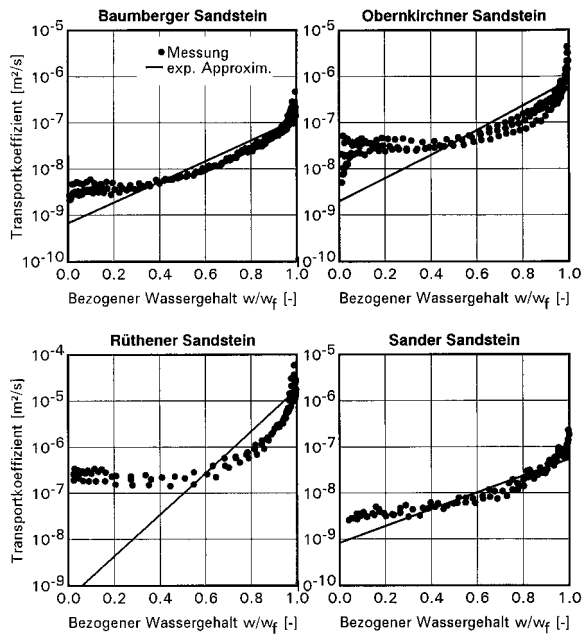


Bild 43 Aus den gemessenen Wassergehaltsverteilungen (Bild 39) berechnete Transportkoeffizienten für das kapillare Saugen in Abhängigkeit vom bezogenen Feuchtegehalt. Die durchgezogenen Linien stellen exponentielle Approximationen für die Transportkoeffizienten dar.

Die Feuchtetransportkoeffizienten des Baumberger Sandsteins und des Sander Sandsteins, die beide etwa die gleiche Eindringgeschwindigkeit besitzen, zeigen einen ähnlichen Verlauf. Obernkirchner Sandstein, der trotz seiner niedrigen Wasseraufnahmekapazität einen geringfügig höheren Wasseraufnahmekoeffizienten als Baumberger Sandstein besitzt, hat dementsprechend deutlich höhere Transportkoeffizienten. Der große Wasseraufnahmekoeffizient des Rühthener Sandsteines führt erwartungsgemäß auch zu einem um mehr als eine Größenordnung höheren Transportkoeffizienten.

Bei den in Bild 44 dargestellten Transportkoeffizienten der künstlichen Baustoffe zeigen Kalksandstein und Gips den Natursandsteinen vergleichbare Transportkoeffizienten. Beim Porenbeton ergibt sich dagegen, wie zu erwarten, ein anderes Bild. Bei den Feuchtegehalten der sich bildenden Feuchteplateaus (siehe Bild 40) treten wegen der dort vorliegenden extrem niedrigen Gradienten hohe Transportkoeffizienten auf. Außerdem ist die Feuchtetransportfunktion nicht nur vom Wassergehalt, sondern auch von der Zeit abhängig, da sich die Plateaus erst mit der Zeit ausbilden und sich der Wassergehalt der Saugfläche kontinuierlich ändert. Ein solches Verhalten ist mit einem Diffusionsansatz nicht mehr zu beschreiben. Auch beim Ziegel führt das sich bei

halber Sättigung bildende Plateau zu einem Ansteigen des Transportkoeffizienten. Allerdings ist die Zeitabhängigkeit nur gering. Nach Kießl [56] lassen sich für die meisten Baustoffe die Kapillartransportkoeffizienten recht gut mit einer Exponentialfunktion approximieren. Um dies zu überprüfen, ist in den Bildern 43 und 44 für alle Baustoffe (mit Ausnahme des Porenbetons und des Ziegels) eine exponentielle Näherung mit angegeben. Die Exponentialfunktion ist so ausgewählt, daß damit berechnete Wassergehaltsverteilungen die geringsten Abweichungen von den gemessenen Profilen ergeben. Die berechneten Verteilungen sind in den Bildern 39 und 40 dargestellt und zeigen eine für viele Anwendungen ausreichend gute Übereinstimmung. In [74] ist eine Verfahrensweise angegeben, um aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten eine gute exponentielle Näherung für die Kapillartransportkoeffizienten zu bestimmen.

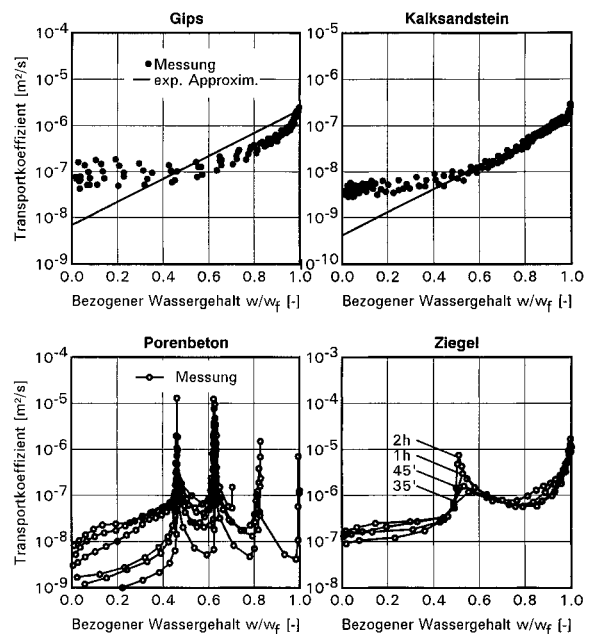


Bild 44 Aus den gemessenen Wassergehaltsverteilungen (Bild 40) berechnete Transportkoeffizienten für das kapillare Saugen in Abhängigkeit vom bezogenen Feuchtegehalt. Die durchgezogenen Linien in den beiden oberen Diagrammen stellen exponentielle Approximationen für die Transportkoeffizienten dar. Zum besseren Erkennen der Verläufe sind in den beiden unteren Diagrammen die Meßpunkte durch Linien verbunden.

6.3.2 Koeffizienten für die Weiterverteilung

Für die vier Sandsteinsorten und die vier künstlichen Baustoffe sind die Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung in Bild 45 und 46 dargestellt. Da beim Weiterverteilen der maximale Wassergehalt an der Stirnseite der Probe stetig sinkt, können die Transportkoeffizienten mit steigender Weiterverteilungszeit nur bis zu einem immer weiter sinkenden maximalen Feuchtegehalt bestimmt werden. Auch beim Weiterverteilen ist der Verlauf der Transportkoeffizienten von Baumberger und Sander Sandstein einander ähnlich. Die Transportkoeffizienten des Rühther Sandsteins liegen, wie zu erwarten, höher. Trotz des niedrigeren A-Wertes liegen die Transportkoeffizienten für das Weiterverteilen von Obernkirchner Sandstein etwas höher als die von Rühther Sandstein.

Die Transportkoeffizienten von Gips liegen oberhalb von denen des Baumberger Sandsteins, wogegen sie beim Kalksandstein leicht darunter liegen. Aus den gemessenen Profilen des Porenbetons, aber in starkem Maße auch aus den Profilen des Ziegels, ergeben sich zeitlich verändernde Transportkoeffizienten, die eine rechnerische Beschreibung der Transportvorgänge derzeit unmöglich machen.

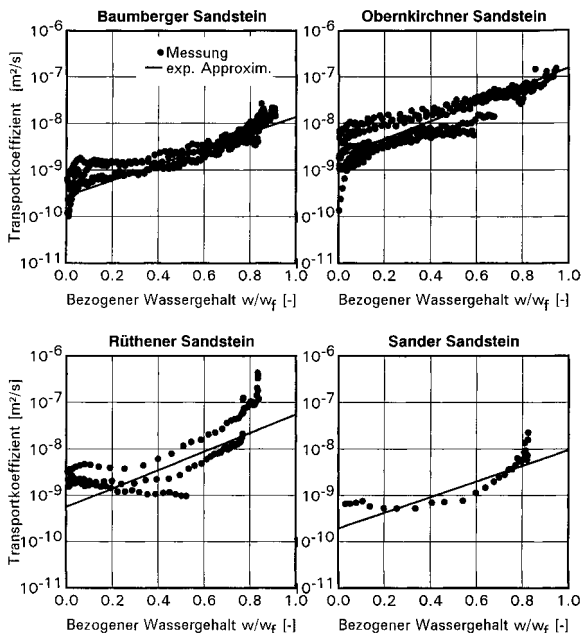


Bild 45 Aus den gemessenen Wassergehaltsverteilungen (Bild 41) berechnete Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung in Abhängigkeit vom bezogenen Feuchtegehalt. Die durchgezogene Linie stellt eine exponentielle Approximation für die Transportkoeffizienten dar.

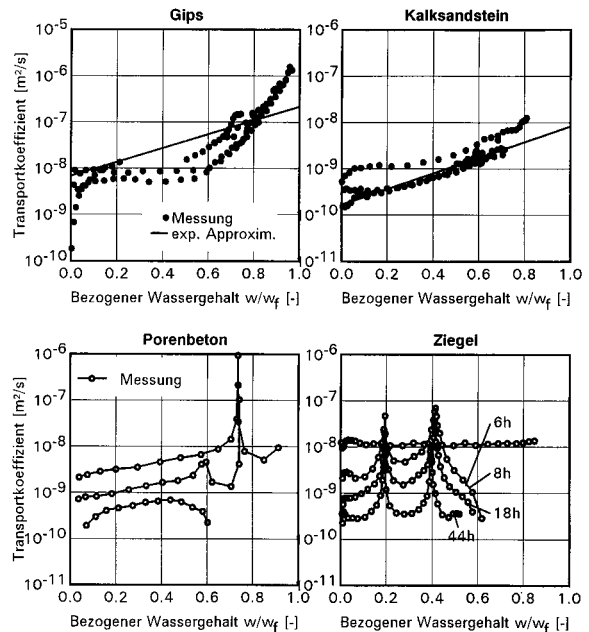


Bild 46 Aus den gemessenen Wassergehaltsverteilungen (Bild 42) berechnete Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung in Abhängigkeit vom bezogenen Feuchtegehalt. Die durchgezogenen Linien in den beiden oberen Diagrammen stellen exponentielle Approximationen für die Transportkoeffizienten dar. Zum besseren Erkennen der Verläufe sind in den beiden unteren Diagrammen die Meßpunkte durch Linien verbunden.

Auch für die Weiterverteilung sind für die vier Sandsteinsorten sowie für Gips und den Kalksandstein exponentielle Approximationen der Transportkoeffizienten mitangegeben. Wie aus Bild 41 und 42 ersichtlich, ergeben die damit berechneten Feuchteprofile recht gute Übereinstimmungen mit den Messungen. Allerdings ist - im Gegensatz zu den exponentiellen Approximationen der Transportkoeffizienten des Befeuchtungsvorganges - noch keine Möglichkeit bekannt, diese für die Weiterverteilung aus einfachen Versuchen, die ohne eine Feuchteprofilmessung auskommen, anzunähern.

6.3.3 Vergleich der Koeffizienten Befeuchtung - Weiterverteilung

Ein Vergleich der Bilder 43 und 44 mit 45 und 46 zeigt, daß die Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung stets kleiner als die der Befeuchtung sind. Beim Baumberger und Sander Sandstein liegen die Transportkoeffizienten etwa um den Faktor 5 tiefer, beim Obernkirchner Sandstein dagegen nur um den Faktor 2 und beim Rühther Sandstein etwa um den Faktor 15.

Beim Kalksandstein und dem Gips unterscheiden sich die Transportkoeffizienten wie beim Baumberger

Sandstein ebenfalls etwa um den Faktor 5. Für Porenbeton und Ziegel fällt der Vergleich aufgrund der großen Spanne, die von den berechneten Transportkoeffizienten überdeckt wird, schwerer. Vergleicht man jeweils den mittleren Verlauf der Koeffizienten für das Befeuchten und die Weiterverteilung, liegen die Transportkoeffizienten für die Befeuchtung des Porenbetons etwa um den Faktor 20, die des Ziegels dagegen um etwa zwei Zehnerpotenzen höher. Der extreme Unterschied zwischen Befeuchtung und Weiterverteilung beim Ziegel läßt sich durch seine Porenstruktur erklären. Im Gegensatz zu den anderen Baustoffen besitzt der Ziegel tatsächlich Zylinderkapillaren. Eine Weiterverteilung findet nur über die wenigen Querverbindungen zwischen den Kapillaren statt, wogegen bei den anderen Baustoffen die Flüssigkeit zusätzlich in den Zwickeln jeder Kapillare weiterverteilt wird (siehe Bild 11).

Allerdings liegen auch im hygrokopischen Feuchtebereich die ermittelten Transportkoeffizienten für die Befeuchtung höher als die für die Weiterverteilung. In diesem Bereich, in dem der Flüssigtransport im Sorbatfilm abläuft, ist eine Unterscheidung in Saugen und Weiterverteilen physikalisch nicht sinnvoll erklärbar. In Bild 48 ist ein Vergleich der mit den Transportkoeffizienten für das Saugen (Bild 47) berechneten Profile für den Baumberger, Rütthener und Sander Sandstein sowie den Gips dargestellt. Diese Materialien wurden ausgesucht, weil bei ihnen die exponentiellen Approximationen keine perfekte Übereinstimmung von Rechnung und Messung bringen (siehe Bild 39 und 40). Während sich im oberen Feuchtebereich eine Verbesserung ergibt, ist der Kurvenverlauf im hygrokopischen Feuchtebereich stets zu flach. Dies deutet darauf hin, daß in diesem Bereich die Transportkoeffizienten zu hoch gewählt wurden. Es ist allerdings nicht verwunderlich, daß in diesem Bereich die ermittelten Transportkoeffizienten nicht korrekt sind. Der im hygrischen Feuchtebereich stattfindende Transport ist nämlich um mehrere Größenordnungen kleiner als der Gesamttransport. Selbst bei hohen Rechengenauigkeiten treten in diesem Feuchtebereich bei der Bestimmung der Massenstromdichte nach Gleichung (30) und den Berechnungen der Transportkoeffizienten nach Gleichung (29) Fehler auf. Die Transportfunktion muß in diesem Bereich durch mit einem anderen Verfahren

ermittelte Transportkoeffizienten korrigiert werden. Geht man davon aus, daß auch für das Saugen in diesem Bereich, die durch Diffusionsmessungen ermittelten Transportkoeffizienten Gültigkeit besitzen, so läßt sich eine korrigierte Transportfunktion erstellen. In Bild 47 ist für die vier Baustoffe jeweils der Flüssigtransportkoeffizient, der aus isothermen Diffusionsmessungen im Trocken- und Feuchtebereich berechnet wurde, miteingetragen. Durch diesen Punkt wird eine Gerade gelegt, die die aus NMR-Messungen bestimmte Transportfunktion bei dem Wassergehalt schneidet, der dem Ende des hygrokopischen Feuchtegehaltes entspricht (Sorptionsfeuchtegehalt bei 95% r.F.). Nach unten wird diese Gerade bis zum Schnittpunkt mit der Ordinate verlängert. Für den hygrokopischen Feuchtebereich sind für die Transportfunktion die mit einer gestrichelten Linie eingezeichneten Werte zu verwenden, oberhalb davon die Werte der durchgezogenen Linie. Die mit diesen

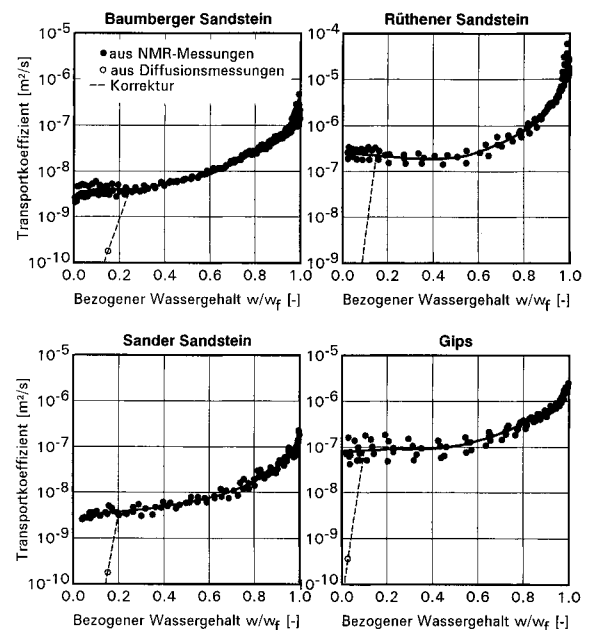


Bild 47 Aus den gemessenen Wassergehaltsverteilungen (Bild 39 und 40) berechnete Transportkoeffizienten für das kapillare Saugen in Abhängigkeit vom bezogenen Feuchtegehalt. Da die berechneten Transportkoeffizienten im hygrokopischen Feuchtebereich aufgrund von Rechengenauigkeiten stets zu hoch sind, wurden sie in diesem Bereich korrigiert (gestrichelte Linie). Die Korrektur besteht aus einer Geraden, die durch den aus dry- und wet-cup-Messungen berechneten Transportkoeffizienten geht und in die NMR-Meßwerte bei der Sorptionsfeuchte von 95 % r.F. übergeht.

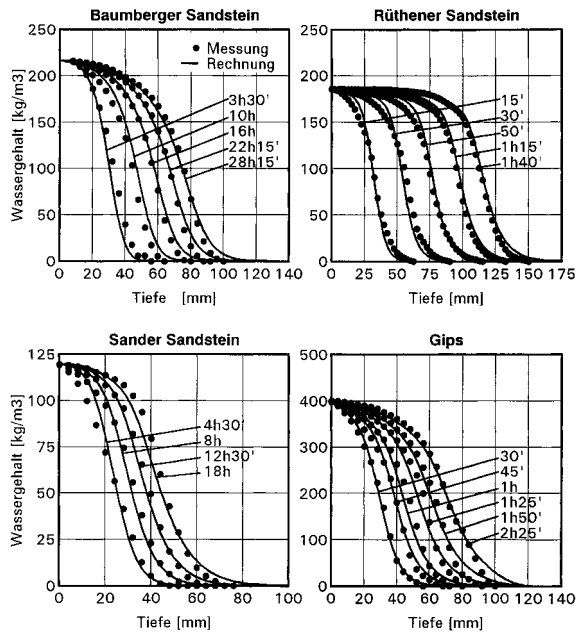


Bild 48 Vergleich der mit aus den Verteilungen ermittelten Transportkoeffizienten (Bild 47) berechneten Verteilungen des Wassergehaltes über die Probentiefe mit den Meßergebnissen. Aufgrund von Rechenungenauigkeiten sind die berechneten Transportkoeffizienten im niedrigen Feuchtebereich zu hoch. Dies führt zu den dargestellten Abweichungen im Feuchtebereich unterhalb von ca. 20 % der freien Sättigung.

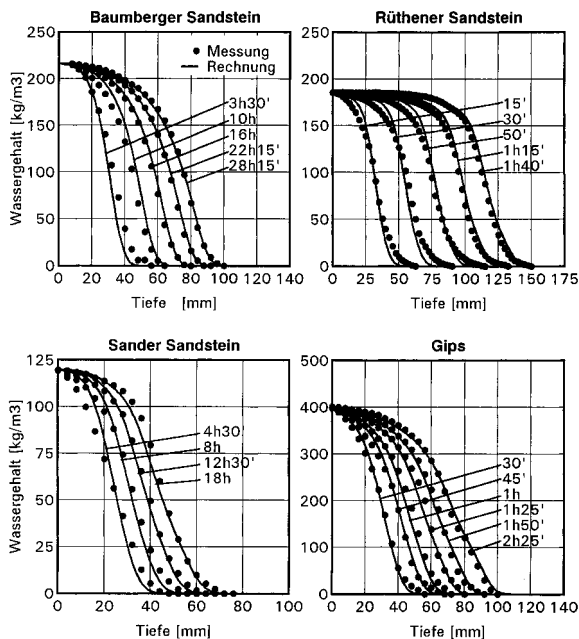


Bild 49 Verteilungen des Wassergehaltes über die Tiefe von Baustoffproben zu verschiedenen Zeitpunkten.

Die mit durchgezogenen Linien dargestellten Verteilungen wurden mit den Transportkoeffizienten, die im hygroscopischen Feuchtebereich gemäß Bild 47 korrigiert wurden, berechnet. Sie zeigen im niedrigen Feuchtebereich eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Verteilungen.

Transportfunktionen berechneten Wassergehaltsprofile zeigen, wie in Bild 49 dargestellt, eine bessere Übereinstimmung im hygroscopischen Feuchtebereich.

Auch für die Weiterverteilung läßt sich die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung verbessern, wenn anstelle der exponentiellen Approximationen die aus den gemessenen Feuchteprofilen ermittelte Transportfunktion verwendet wird (siehe Bild 50). Anstelle des Gips, bei dem für die Weiterverteilungsfunktion mit der exponentiellen Näherung bereits eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen zeigt (siehe Bild 42), ist in diesem Bild der Kalksandstein aufgeführt. Eine Korrektur im hygroscopischen Feuchtebereich ist hierbei nicht notwendig, da die aus Wassergehaltsprofilen ermittelten Transportkoeffizienten nur wenig von den aus Diffusionsmessungen berechneten Werten abweichen.

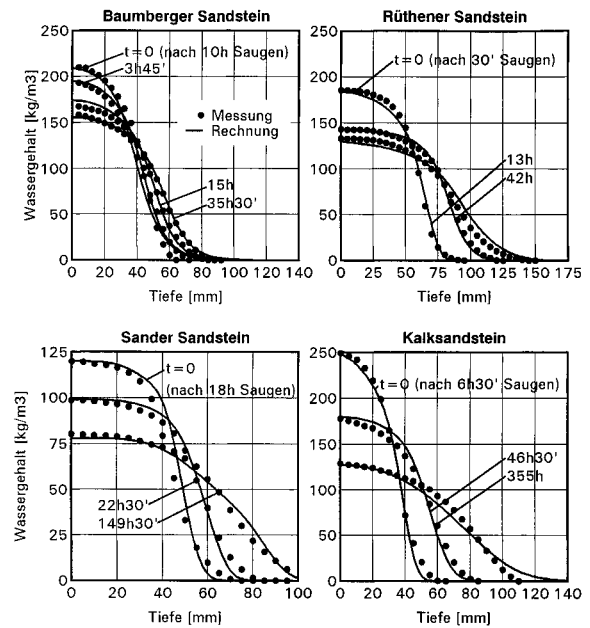


Bild 50 Vergleich der mit aus den Verteilungen ermittelten Transportkoeffizienten (Bild 45 und 46) berechneten Verteilungen des Wassergehaltes über die Probentiefe mit den Meßergebnissen. Diese berechneten Verläufe stimmen besser mit den gemessenen überein als die mit einer exponentiellen Approximation berechneten (Bild 41 und 42). Eine zusätzliche Korrektur der Transportkoeffizienten im Sorptionsfeuchtebereich ist hier nicht notwendig.

7. Berechnungsbeispiele zum Feuchtehaushalt mittels der neuen Koeffizienten und Vergleich mit praktischen Ergebnissen

Die neu definierte Stofftransportkoeffizienten und Speicherfunktionen sollen, bevor sie allgemein verwendet werden, anhand von Anwendungsbeispielen, bei denen das Feuchteverhalten von Bauteilen experimentell untersucht wurde, validiert werden, um zu zeigen, daß sie nicht nur unter vereinfachten Versuchsbedingungen Gültigkeit besitzen. Dazu ist ein Berechnungsverfahren notwendig, mit dem es möglich ist, unter Verwendung dieser Stoffkennwerte das Feuchteverhalten von Bauteilen auch unter komplexen Bedingungen vorzuberechnen. Das von H.M. Künzel [88] entwickelte Rechenprogramm erfüllt diese Voraussetzung und hat bei zahlreichen Anwendungen eine weitgehende Übereinstimmung zwischen rechnerischen und experimentellen Ergebnissen erzielt ([86] [87] [88]).

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. In der Literatur sind keine Stoffkennwerte für die Weiterverteilung zu finden; die verwendeten Materialien stehen für eine eigene Bestimmung der Stoffeigenschaften auch nicht mehr zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden eigene, experimentelle Untersuchungen durchgeführt, auf denen die Nachrechnungen basieren.

7.1 Naturstein-Fassadenausschnitt unter natürlicher Bewitterung

Das erste Berechnungsbeispiel veranschaulicht die Untersuchung des Feuchteverhaltens eines nach Westen orientierten Naturstein-Fassadenausschnittes nach H.M. Künzel [88]. Für die Berechnung des Feuchteverhaltens des Fassadenausschnittes aus Sander Schilfsandstein wurden die gemessene, in Bild 21 rechts unten dargestellten Speicherfunktion sowie die in den Bildern 47 links unten und 45 rechts unten dargestellten Kapillartransportkoeffizienten für das Saugen und Weiterverteilen verwendet. Die zusätzlich notwendigen Stoffeigenschaften sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9 Zusammenstellung der für das Berechnungsbeispiel zusätzlich notwendigen Stoffeigenschaften des Sander Sandsteins.

Stoffeigenschaften	Sander Sandstein
Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]	850
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	1,6
Feuchtezuschlag [%/M.-%]	8
Kurzweilige Absorptionszahl	trocken: 0,71 naß: 0,83

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 51 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. Als Übergangskoeffizienten für Wärme und Feuchte wurden die Werte von Tabelle 10 eingesetzt.

Tabelle 10 Mittlere Oberflächenübergangskoeffizienten zur Berechnung des Wärme- und Feuchteaustausches zwischen außen- bzw. raumseitigen Bauteiloberflächen und der Umgebung [87].

Bauteiloberfläche	Übergangskoeffizienten	
	Wärmeübergang α [W/m ² K]	Wasserdampf- übergang β_p [kg/m ² sPa]
außen	17	$75 \cdot 10^{-9}$
innen	8	$25 \cdot 10^{-9}$

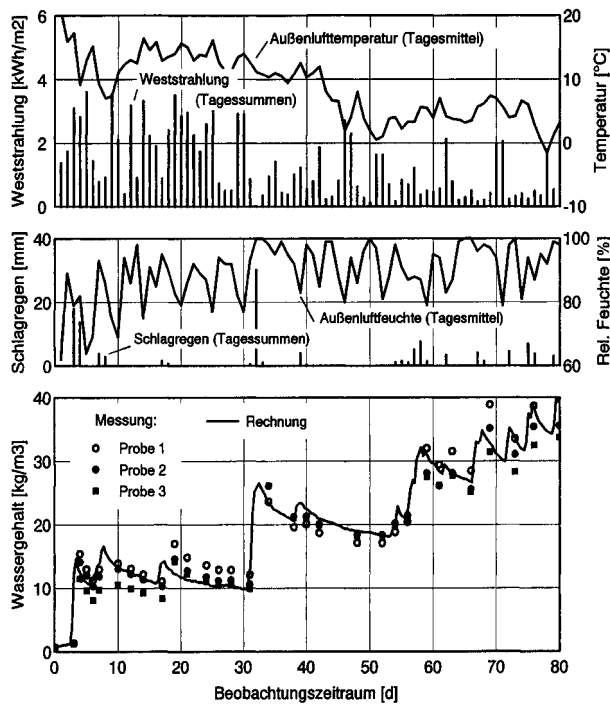


Bild 51 Gemessener Verlauf von Außenlufttemperatur und Weststrahlung (oben) sowie Außenluftfeuchte und Schlagregen (Mitte) zur besseren Darstellung in Form von Tagesmittelwerten bzw. -summen über einen 80-tägigen Beobachtungszeitraum [87]. Der mit diesen klimatischen Randbedingungen (in Form von Stundenmittelwerten) berechnete Feuchteverlauf einer 25 cm dicken, anfangs trockenen Natursteinwand ist im Vergleich zu Messungen an 3 Natursteinfassadenproben dargestellt (unten).

In Bild 51 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 51 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 52 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 auf bei annähernd freier Wassersättigung der Außenoberfläche und immer noch sehr geringem Wassergehalt im Bereich der Innenoberfläche. 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.

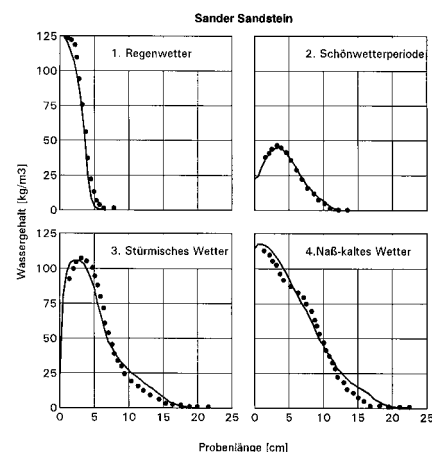


Bild 52 Vergleich der berechneten und an Sander Sandstein (Bild 51, Probe 2) gemessenen Feuchteprofile in vier markanten Wetterperioden: Nach dem ersten längeren Regen zu Versuchsbeginn, nach einer einwöchigen Schönwetterperiode, bei auf Regen folgendem stürmisch trockenem Wetter und bei längerfristig naßkaltem Wetter am Ende des Beobachtungszeitraumes (aus [87]).

7.2 Flüssigtransport über die Schichtgrenzen zweier miteinander verbundener kapillarporöser Materialien

Bis jetzt wurden meist nur an monolithischem Material für den Feuchtetransport Vergleiche zwischen Messungen und Rechnungen durchgeführt. Eine Ausnahme bildet dabei Kießl [55], der den gemessenen Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme zweier Vollziegelsteine mit dazwischenliegender 1 cm dicker Mörtelfuge [80] mit Rechenergebnissen vergleicht. Allerdings endet der Vergleich mit dem Zeitpunkt der Durchfeuchtung dieser dünnen Mörtelfuge. Um diese Lücke zu schließen, wurden Messungen der Wasseraufnahme über die Schichtgrenzen zweier miteinander verbundener kapillarporöser Materialien hinweg durchgeführt und mit Rechenergebnissen verglichen.

Die Untersuchungen, die ausführlicher in [75] beschrieben sind, wurden mit drei verschiedenen Natursandsteinsorten durchgeführt: Rühthener, 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 53). Die zeitabhängige Wasseraufnahme wurde durch Wägung bestimmt. Wie Vorversuche ergaben, hat die dünne Kaolinschicht keinen nennenswerten Einfluß auf den Wasseraufnahmevorgang.

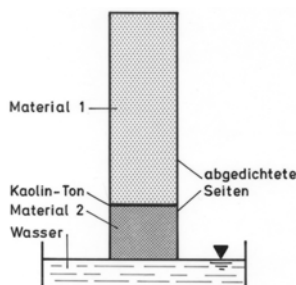


Bild 53

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.

Meßergebnisse

In den Bildern 54 und 55 sind die durch wiederholte Wägungen erhaltenen Verläufe für die Wasseraufnahme als Meßpunkte dargestellt. Bild 54 links zeigt die Wasseraufnahme der Kombination aus 2 cm Rühthener Sandstein und 18 cm Baumberger Sandstein. Nach einer kurzen Aufnahmezeit des Rühthener 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 Rühthener Sandstein fast völlig unbeeinflusst das Wasser auf.

Die Kombination Baumberger/Rühthener 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 Rühthener Sandsteins. Trotz seines großen Wasseraufnahmekoeffizienten nimmt der Rühthener Sandstein das Wasser sogar langsamer als der Baumberger Sandstein auf. Mit steigender Saugzeit bzw. mit steigender Wassereindringtiefe steigt die Wasseraufnahmegeschwindigkeit des Rühthener Sandsteins. Dieser Effekt ist zu erwarten, da mit steigender Eindringtiefe durch die niedriger werdende Strömungsgeschwindigkeit der im Vergleich zum Rühthener Sandstein deutlich höhere Strömungswiderstand abnimmt.

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 55 links). Bei umgekehrter Kombination erhält man dagegen ein Verhalten vergleichbar dem der Kombination Baumberger/Rühthener. 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.

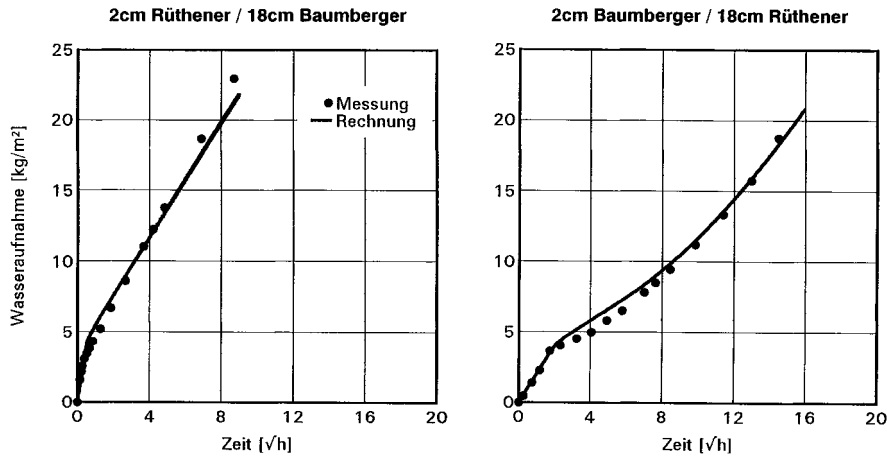


Bild 54

Zeitlicher Verlauf (Wurzel-Maßstab) der Wasseraufnahme über die Schichtgrenze von zwei miteinander in hygri-schem 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).

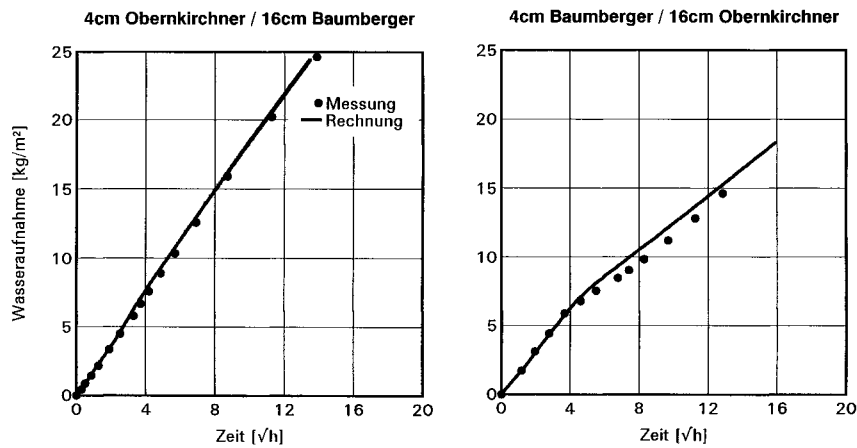


Bild 55

Zeitlicher Verlauf (Wurzel-Maßstab) der Wasseraufnahme über die Schichtgrenze von zwei miteinander in hygri-schem 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 (siehe Bild 17). 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.

7.2.1 Rechenergebnisse

Die Rechnungen wurden mit dem Feuchttransportprogramm [88] durchgeführt. Wie aus Tabelle 11 hervorgeht, variiert der Wasseraufnahmekoeffizient jeder Sandsteinsorte in einem gewissen Bereich. Um die Genauigkeit zu erhöhen, wurde für die Berechnungen der an jeder einzelnen Probe gemessene Wasseraufnahmekoeffizient verwendet. Aus diesem Koeffizienten wurden gemäß [74] die exponentiellen Näherungen für die Flüssigtransportkoeffizienten berechnet; die Variationsbreiten der Koeffizienten sind in Tabelle 11 mit aufgeführt. Die Rechenergebnisse sind in den Bildern 54 und 55 als durchgezogene Linien dargestellt. In allen Fällen ergibt sich eine ausgezeichnete

Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung, die Charakteristik und die Aufnahmemenge wird (mit nur sehr geringen Abweichungen) korrekt wiedergegeben.

Berechnungen, bei denen die Transportkoeffizienten und die Saugspannungskurve variiert wurden, ergaben einen dominanten Einfluß der Saugspannungskurve auf die berechnete Charakteristik des Wasseraufnahmeverlaufes. Dies zeigt, daß eine korrekte Bestimmung der Speicherfunktion, z.B. mit Hilfe einer Saugspannungsmessanlage, von entscheidender Bedeutung ist, wenn bei zwei in Kontakt miteinander stehenden kapillaraktiven Baustoffen der Feuchttransport berechnet werden soll.

Tabelle 11 Zusammenstellung der Variationsbreite der Wasseraufnahmekoeffizienten der für das Berechnungsbeispiel verwendeten Sandsteinproben. Aus diesen Wasseraufnahmekoeffizienten wurden die Variationsbreiten der exponentiellen Näherungen der Flüssigtransportkoeffizienten berechnet.

Sandsteinvarietät	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient (Exponentielle Näherung)	
		D _{wo} [m ² /s]	D _{wf} [m ² /s]
Baumberger	0,04 - 0,048	6 - 7,2 • 10 ⁻¹⁰	1,05 - 1,3 • 10 ⁻⁷
Obernkirchner	0,042 - 0,05	1,8 - 2,2 • 10 ⁻⁹	5,8 - 7 • 10 ⁻⁷
Rüthener	0,28 - 0,35	5,4 - 6,2 • 10 ⁻¹⁰	1,5 - 2,3 • 10 ⁻⁵

D_{wo}: Flüssigtransportkoeffizient bei trockenem Baustoff

D_{wf}: Flüssigtransportkoeffizient bei freier Sättigung

8. Zusammenfassung und Konsequenzen

Das Ziel der Arbeit bestand darin, die zur Berechnung des Feuchtehaushaltes notwendigen Speicher- und Feuchtetransportkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird zunächst anhand einer kritischen Analyse der Literatur der Stand des Wissens über die Feuchtespeicher- und Transportmechanismen dargelegt. Feuchtebewegungen in porösen Baustoffen aufgrund von Luftströmungen, Gravitation, hydraulischen Druckunterschieden sowie osmotischen oder elektrokinetischen Effekten werden ausgeschlossen, weil sie für bauphysikalische Betrachtungen in der Regel unerheblich sind. Aufgrund eigener neuer Ansätze werden für die Bauphysik neue Meßtechniken entwickelt. Die Meßergebnisse führen zum Teil zu neuen, physikalisch begründeten Transportkoeffizienten, teilweise können diese auch mit einfachen klassischen Hilfsmitteln bestimmt o. angenähert werden.

Die Feuchtespeicherung in Baustoffen ist durch drei Bereiche charakterisiert: Der erste Bereich kennzeichnet sog. hygroscopischen Ausgleichswassergehalte. Daran schließt sich bei kapillaraktiven Stoffen der Kapillarwasserbereich mit Wassergehalten bis zur freien Sättigung an. Ein Überschreiten der freien Sättigung ist nur durch Anlegen eines Über- oder Unterdruckes, durch erzwungene Kondensation durch Taupunktunterschreitung oder durch sehr lange Wasserlagerung möglich. Da in diesem Übersättigungsbereich keine hygrischen Gleichgewichtszustände mehr existieren, ist auch keine eindeutige Speicherfunktion definierbar. Die Speicherfunktion

für den hygroscopischen Feuchtebereich wird durch die Sorptionsisotherme charakterisiert. Die relativ einfache, aber meist zeitintensive gravimetrische Bestimmung der Sorptionsisotherme ist bis zu einer oberen Grenze von 95 % r.F. durchführbar. Da die Sorptionsisotherme der meisten Baustoffe bei höheren relativen Luftfeuchten einen extrem steilen Verlauf besitzt, ist eine eindeutige Sorptionsmessung und Zuordnung der Wassergehalte zur Luftfeuchte oberhalb dieses Wertes nicht mehr möglich. Die Feuchtespeicherfunktion des hier anschließenden Kapillarwasserbereiches muß deshalb auf anderem Wege bestimmt werden. Bei kapillarporösen hygroscopischen Materialien mit stetiger Porengrößenverteilung kann jedem Wassergehalt bis hin zur freien Wassersättigung jeweils eine maximal noch mit Wasser gefüllte Porengröße zugeordnet werden. Diese Zuordnung beruht darauf, daß alle vom Wasser erreichten Poren miteinander Verbindung haben und die kleineren Poren mit ihrer höheren Saugkraft so lange aus den größeren Poren Wasser saugen, bis für einen bestimmten Wassergehalt ein Kapillardruckgleichgewicht erreicht ist. Für den Bereich der überhygroscopischen Wassergehalte ergibt dies eine charakteristische Abhängigkeit, die sogenannte Kapillardruck- oder Saugspannungskurve. Zur Bestimmung dieser Saugspannungskurve wird erstmalig für die Bauphysik eine aus der Bodenkunde bekannte, für diesen Zweck modifizierte Saugspannungsmeßanlage eingesetzt. Im Gegensatz zur Quecksilberdruckporosimetrie gewährleistet dieses Verfahren, das als Meßmedium Wasser benutzt, eine realistischere Zustandsbeschreibung. Mit die-

sem Verfahren werden die Wechselwirkungen zwischen Wasser und Porenwand, wie sie auch unter natürlichen Bedingungen vorkommen, erfaßt. Außerdem ist es damit möglich, nicht den gesamten, sondern den dem Feuchtetransport zugänglichen Porenraum zu erfassen, indem bei der Messung von frei gesättigten Proben ausgegangen wird.

Die Sorptionsisotherme und die Saugspannungskurve geben den Wassergehalt jeweils in Abhängigkeit von echten stoffunabhängigen Potentialgrößen an, der relativen Luftfeuchte und dem Kapillardruck. Über die thermodynamische Gleichgewichtsbedingung nach Kelvin sind beide Größen miteinander verbunden. Damit lassen sich die Sorptionsisotherme und die Saugspannungskurve zu einer im gesamten Bereich stetigen Feuchtespeicherfunktion verknüpfen, welche alle praktisch wesentlichen Feuchtespeichereigenschaften eines porösen Baustoffes bis hin zur freien Wassersättigung enthält.

Bei nach DIN 52615 durchgeführten Messungen des Wasserdampfdiffusionswiderstandes poröser hygroskopischer Baustoffe ergeben sich für den Feuchtebereich meist kleinere Diffusionswiderstände als für den Trockenbereich. Diese unter isothermen Bedingungen ermittelte Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit wird allgemein auf Feuchteeffekte zurückgeführt, die den Dampfdiffusionsstrom beschleunigen. Bei den isothermen Diffusionsmessungen im höheren Feuchtebereich entsteht nämlich im Porenraum hygroskopischer Baustoffe ein Sorptionsfeuchtegefälle an den Porenwänden. In diesem Sorbatfilm finden Transportvorgänge in flüssiger Phase statt. Dieser Flüssigtransport hat als treibendes Potential die relative Luftfeuchte, deren Gradient unter isothermen Bedingungen in derselben Richtung wie der die Diffusion antreibende Wasserdampfpartialdruckgradient wirkt. Wenn dieser der Diffusion überlagerte Flüssigtransport für die unter isothermen Bedingungen ermittelte Erhöhung des Gesamtmassenstromes verantwortlich wäre, dann müßte im Fall entgegengesetzter Gradienten für Dampfdruck und relative Luftfeuchte (nichtisothermer Fall) ein reduzierter Massenstrom gemessen werden. Durch Messungen mit einer eigens dafür entwickelten Meßanlage, mit der über den Probenquerschnitt ein Temperaturgefälle so eingestellt werden kann, daß sich ein Gradient der relativen Luft-

feuchte und somit der Sorptionsfeuchte entgegen dem Partialdruckgefälle ergibt, werden diese Überlegungen erstmals klar herausgearbeitet und bestätigt. Zusätzlich werden anhand weiterer eigener Messungen und der Interpretation von Messungen anderer Autoren weitere Hinweise für die Richtigkeit dieser neuartigen Interpretation gegeben. Somit kann nur eine im Trockenbereich bestimmte Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ohne Flüssigtransport als echte Stoffeigenschaft für den Dampftransport angesehen werden.

Die Behandlung des Flüssigtransports in porösen Baustoffen erfordert eine differenzierte Betrachtung. Es sind im wesentlichen drei Effekte zu unterscheiden: Das kapillare Saugen bei Wasserkontakt mit Haupttransportintensitäten in den hohen Wassergehaltsbereichen, das kapillare Weiterverteilen ohne Befeuchtung und der Sorptionsfeuchte mit relativ kleinen, jedoch in der Größenordnung der Diffusion liegenden Transportintensitäten. Die genaue Beschreibung zeitlich und örtlich variabler Wassergehaltsverteilungen unter natürlichen Bedingungen erfordert wassergehaltsabhängige Flüssigtransportkoeffizienten. Zur Bestimmung der Transportkoeffizienten sind zwei NMR-Meßanlagen konzipiert und aufgebaut worden, mit denen es aufgrund der relativ hohen Meßgenauigkeit und Meßgeschwindigkeit möglich ist, Wassergehaltsverteilungen in prismatischen Probekörpern während des kapillaren Saugversuches, aber auch nach Unterbrechung der Wasserzufuhr während der kapillaren Weiterverteilung zerstörungsfrei und kontinuierlich zu messen. Aus diesen Verteilungen, zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt, lassen sich die Flüssigtransportkoeffizienten für das Saugen und das Weiterverteilen relativ rasch bestimmen. Dabei zeigt sich, daß die Transportkoeffizienten für das Weiterverteilen meistens niedriger als die des Saugens sind. Die Feuchte-transportfunktionen für die Befeuchtung und das Weiterverteilen laufen im hygroskopischen Feuchtebereich zusammen, da der Flüssigtransport hier in der Sorbatphase abläuft und eine Unterscheidung in Befeuchtung und Weiterverteilung physikalisch nicht mehr sinnvoll ist. Sowohl für das Befeuchten als auch für die Weiterverteilung ergeben sich Feuchte-transportfunktionen, die mit dem Feuchtegehalt über zum Teil mehrere Zehnerpotenzen ansteigen. Mit

hinreichender Genauigkeit können die Funktionen oftmals auch durch eine einfache Exponentialfunktion angenähert werden. Dabei läßt sich eine exponentielle Approximation für das Saugen aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten ermitteln, während für das Weiterverteilen noch kein einfaches Bestimmungsverfahren bekannt ist.

Die neu definierten Stofftransportkoeffizienten und Speicherfunktionen werden anhand von Anwendungsbeispielen validiert, um zu zeigen, daß sie nicht nur unter vereinfachten Versuchsbedingungen, sondern auch in der Praxis Gültigkeit besitzen. Im ersten Beispiel handelt es sich um das Feuchteverhalten eines nach Westen orientierten Natursteinfassadenausschnittes unter natürlicher Bewitterung während eines Zeitraumes von 80 Tagen. Die unter Verwendung der im Labor bestimmten Transportkoeffizienten und Speicherfunktion berechneten Verläufe und Verteilungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Wassergehaltsverläufen und -verteilungen. Beim zweiten Beispiel wird der Feuchtetransport über die Schichtgrenze zweier in hygri-schem Kontakt miteinander stehender Proben aus unterschiedlichen kapillaraktiven Baustoffen untersucht. Auch in diesem Beispiel, bei dem vor allem der Einfluß der Saugspannung der verwendeten Materialien von entscheidender Bedeutung ist, geben die berechneten Wassergehaltsverläufe die Messungen korrekt wieder.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen über Feuchtespeicher- und Transportprozesse kapillarporöser mineralischer Baustoffe führen hinsichtlich der Verwendung der Koeffizienten für Berechnungen des Feuchtehaushaltes zu folgenden Konsequenzen:

- Für die Berechnung des Flüssigtransports über die Schichtgrenzen zweier in Kontakt miteinander stehender kapillaraktiver Materialien ist die Verwendung einer korrekten Feuchtespeicherfunktion unerläßlich. Vor allem im überhygroskopischen Feuchtebereich ist eine genaue Bestimmung, vorzugsweise mittels einer Meßmethode mit Wasser als Bestimmungsmedium, von großer Bedeutung.
- Bei hygroskopischen Baustoffen unter praktischen, nicht isothermen Bedingungen ist die übliche Beschreibung des Feuchtetransports im hygroskopi-

schen Feuchtebereich (flüssig und dampfförmig) als feuchteabhängige Diffusion nicht zulässig. Auf diese Weise gewonnene Berechnungsergebnisse sind falsch. Diffusions- bzw. Feuchteberechnungen müssen für solche Baustoffe getrennt nach Diffusion und Flüssigtransport durchgeführt werden. Die Diffusion muß mit einer im Trockenbereich bestimmten Diffusionswiderstandszahl berechnet werden. Für die Berechnung des gleichzeitig ablaufenden Transports in flüssiger Phase müssen Flüssigtransportkoeffizienten verwendet werden.

- Bei der Berechnung des Flüssigtransportkoeffizienten ist nach zwei Transportarten, der Befeuchtung und dem Weiterverteilen, zu unterscheiden. Für beide Transportarten ergeben sich feuchteabhängige und zum Teil stark unterschiedliche Transportkoeffizienten. Die Funktionen der Flüssigtransportkoeffizienten beider Transportarten sind aus physikalischen Gründen im hygroskopischen Feuchtebereich gleich. Für diesen Bereich ist eine Bestimmung der Koeffizienten aus Diffusionsmessungen vorzuziehen. Sowohl für das Weiterverteilen als auch für den Saugvorgang lassen sich die Transportkoeffizienten mit für viele Zwecke ausreichender Genauigkeit durch eine Exponentialfunktion approximieren. Dabei ist es bei einigen Baustoffen möglich, die exponentielle Approximation für den Saugvorgang aus den Wasseraufnahmekoeffizienten abzuleiten.

Insgesamt konnten durch diese Arbeit die feuchte-technischen Meßtechniken wesentlich verfeinert und bereichert werden. Während bislang in der Bauphysik hauptsächlich normierte Wasserdampfdiffusionsmessungen bzw. Saugversuche vorgenommen wurden, schuf insbesondere die hier erstmalig angewandte NMR-Feuchtemeßtechnik die Voraussetzung für eine gezielte Ermittlung jener hygri-schen Stoffkennwerte, die für die rechnerische Behandlung von Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen und Bauteilen unerläßlich sind.

9. Literatur

- [1] Achtziger, J.: Messung der Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen mit beliebigem Feuchtigkeitsgehalt. *Kunststoffe im Bau* (1971), H. 23, S.19-22.
- [2] Altmann, K.: Neues Feuchtigkeitsmeßverfahren für Bauteile. *Die Bautechnik* 47 (1970), H. 8, S. 269-272.
- [3] Apel, P., Schmidt, J.: Feuchtemessungen an Betonzuschlagstoffen mit der Mikrowellenmeßtechnik. *BWT* 25 (1982), H. 5, S. 12-13.
- [4] Augustin, H.: Elektrokinetische Vorgänge im Mauerwerk. *Bauphysik* 3 (1981), H. 5, S. 174-177.
- [5] Auracher, H.: Wasserdampfdiffusion und Reifbildung in porösen Stoffen. *VDI-Forschungsheft* 566 (1974).
- [6] Belgith, A., Le Fur, B.: Etude de la diffusivité dans un milieu poreux en fonction de la teneur en eau et de la temperature. *C.R.A.S.T.* 268 (1989).
- [7] Berliner, M.A.: Feuchtemessung. *VEB Verlag Technik, Berlin* (1980).
- [8] Bertelsen, N.H.: Moisture Transport Measured by Cup-Methods. Round Robin Tests and Uncertainties. *Building Technology, Technological Institute Lyngby/Dänemark, Nov.* (1987).
- [9] Bomberg, M.: Water flow through porous materials. Division of Building Technology, Lund/Schweden, Institute of Technology, Report 21 (1972).
- [10] Bruce, R.R., Klute, A.: The Measurement of Soil Moisture Diffusivity. *Soil Science Society Proceedings* 20 (1956), H. 1, S. 458-462.
- [11] Brunauer, S., Emmett, P.H. und Teller, E.: Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journ. Amer. Chem. Soc.* 60 (1938), H. 2, S. 309-319.
- [12] Brunauer, S., Mikhail, R. Sh., Bodor, E.E.: Pore Structure Analysis without a Pore Shape Model. *Journ. of Colloid and Interface Science* 24 (1967), H. 4, S. 451-463.
- [13] Cammerer, J.S., Görling P.: Die Messung der Durchlässigkeit von Kälteschutzstoffen für Wasserdampfdiffusion. *Kältetechnik* 3 (1951), H. 1, S. 2-7.
- [14] Cammerer, W.F.: Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern. *VDI-Forschung* 29 (1963), H. 500.
- [15] Cammerer, W.F.: Untersuchungsergebnisse über die kapillare Leitfähigkeit von Baustoffen. *Wärme und Stoffübertr.* 9 (1976), H. 2, S. 159-166.
- [16] McCarten, J.: Fat Analysis in Margarine Base Products. *Minispec Application Note* 1, Bruker Physik AG, Karlsruhe.
- [17] Chang, S.C., Hutcheon, N.B.: Dependence of Water Vapour Permeability on Temperature and Humidity. *ASHRAE Journ. Sect. Heating, Piping & Air Conditioning* 28 (1956), H. 3, S. 149-155.
- [18] Cohan, L.H.: Hysteresis and the Capillary Theory of Adsorption of Vapors. *Journ. American. Chem. Soc.* 66 (1944), H. 66, S. 98-105.
- [19] Crank, J.: *The mathematics of diffusion.* Oxford University Press (1975).
- [20] Crausse, P.: Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux. *Dissertation L' Institut National Polytechnique de Toulouse* (1983).
- [21] Croney, D., Coleman, J.D., Bridge, P.M.: The suction of moisture held in the soil and other porous materials. *Road Res. Techn. Paper No. 24.* Her Majesty's Stationary Office, London (1952).
- [22] Davidson, J.H. et al.: Gamma-Radiation Attenuation for Measuring Bulk Density and Transient Water Flow in Porous Materials. *Journal of Geophysical Research* Vol 68 (1968), H. 16, S. 4777-4783.
- [23] Derjaguin B.V. et al.: Effect of film transfer upon evaporation of liquids from capillaries. *Bulletin Rilem No. 29* (1965), H. 29, S. 93-98.
- [24] Descamps, F.: Moisture Content Measurement using Gamma Ray Attenuation. *Research Report* (1990). Katholieke Universiteit Leuven, Laboratorium Bouwfysica.
- [25] DIN 4108 *Wärmeschutz im Hochbau.* August 1981.
- [26] DIN 52615 *Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen.* November 1987.
- [27] DIN 52617 *Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen.* Mai 1987.
- [28] DIN 52620 *Bestimmung des Bezugsfeuchtegehaltes von Baustoffen.* April 1991.
- [29] Fagerlund, G.: Determination of pore-size distribution from freezing-point depression. *Matériaux et construction* 6 (1973), H. 33, S.215-225.

- [30] Fanney, A.H. et al.: Measurements of moisture diffusion in building materials. ASHRAE Transactions 97 (1991), H. 2, S. 99-112.
- [31] Farrar, T.C., Becker, E.D.: Pulse and Fourier Transform NMR. New York, London Academic Press (1971).
- [32] Fitzner, B.: Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Hohlraumgefüge von Naturstein und physikalischen Verwitterungsvorgängen. Mitteilung zur Ingenieur-geologie und Hydrogeologie (1988), H. 29.
- [33] Fukushima, E., Roeder, S.: Experimental Pulse NMR. Addison-Wesley Publishing Company Inc. London (1981).
- [34] Gagarin, V.G., Mogutov, V.A.: Unsteady Movement of Fluid in Building Materials. Proceedings of the ICHMT Symposium "Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structures". Hemisphere Publishing Corporation, New York (1990), S. 43-62.
- [35] Galbraith, G.H., McLean, R.C.: Realistic Vapour Permeability Values. Heat and Mass Transfer. CI/SfB (L27) UDC 697147, S. 98-103.
- [36] Gardner, W.R.: Calculation of capillary conductivity from pressure plate flow out data. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 20 (1956).H. 3, S. 317-320.
- [37] Garrecht, H.: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Diss. Universität Karlsruhe (1992).
- [38] Gèmesi, J.: Untersuchung der Kapillarer-scheinungen in Beton mit zerstörungsfreien Methoden. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen, Leipzig (1969), H. 3, S. 175-177.
- [39] Gertis, K. und Werner, H.: Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (1972), H. 258, S. 6-36.
- [40] Glaser, H.: Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. Kältetechnik 11 (1959), H. 10, S. 345-349.
- [41] Grimm, W.D.: Bildatlas wichtiger Denkmal-gesteine der Bundesrepublik Deutschland. Arbeitsheft 50 (1990), Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.
- [42] Grüneberg, H., Lehmann, S.: Zur Entwick-lung eines elektrischen Bodenfeuchtegebers für die automatische Beregnungssteuerung. Automatisierungspraxis 12 (1975), H. 5, S. 123-124.
- [43] Günther, H.: NMR-Spektroskopie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York (1983).
- [44] Hansen, K. K.: Sorption isotherms Cata-logue. Technical report 162/86, Technical University of Denmark (1986).
- [45] Harmathy, T.Z.: Moisture Sorption of Build-ing Materials. NRC Canada, Div. Building Research, Techn. paper No. 242 (1967).
- [46] Hart, H.: Radioaktive Isotope in der Be-triebssmeßtechnik. 2. Auflage Berlin VEB Verlag Technik (1962).
- [47] Hartge, K.H.: Die physikalische Untersu-chung von Böden. Enke Verlag Stuttgart (1971).
- [48] Harz, H.P., Weisser, H.: Einsatz von Kern-resonanzspektrometern in der Lebensmit-telindustrie. ZFL 4 (1986), H. 4, S. 278-281.
- [49] Hausser, K.H.: Kernmagnetische Resonanz in Biologie und Medizin. Physik. Blätter 42 (1986), H. 7, S. 225-233.
- [50] Henrich, G.: Feuchteschäden zerstörungsfrei analysiert mit der Neutronensonde. Bautenschutz+Bausanierung 12 (1989), H. 1, S. 24-27.
- [51] Holz, M., Knüttel, B.: Gepulste Kernspin-resonanz. Physikalische Blätter 38 (1982), H. 12, S. 368-374.
- [52] Hounsfield, G.N.: Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography): Part I. Description of System. British Journal Radiology 46 (1973), H. 552, S. 1016-1022.
- [53] Hundt, J., Buschmann, J.: Moisture Measurement in Concrete. Materiaux et Constructions 4 (1971), H. 22, S. 253-259.
- [54] Hussein, F.: Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion. Diss. Universität Dortmund (1982).
- [55] Kießl, K., Gertis, K.: Feuchtetransport in Baustoffen. Eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen 13 (1980), Universität Essen Gesamthochschule.
- [56] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Diss. Universität Gesamthochschule Essen (1983).
- [57] Kießl, K., Krus, M., Künzel, H.M.: Weiterentwickelte Meß- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen. Praktische Anwendungsbeispiele. Bauphysik 15 (1993), H. 2, S. 61-67.
- [58] Kießl, K., Gertis, K.: Isothermer Feuchte-transport in porösen Baustoffen. Sonderdruck aus "Deutscher Ausschuß für Stahlbeton" (1976), H. 258, S. 86-110.

- [59] Klein, A.: Microwave Determination of Moisture in Coal. Comparison of Attenuation and Phase Measurement. *Journal of Microwave Power* 16 (1981), H. 3 und 4, S. 290-304.
- [60] Klein, A.: Erfahrungen beim Einsatz von Meßgeräten zur Schnellbestimmung des Wassergehaltes. *Aufbereitungstechnik* 28 (1987), H. 1, S. 10-16.
- [61] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH. Wiesbaden (1974).
- [62] Kober, K., Mehlhorn, L.: Radiometrische Feuchtemessung in Bauteilen mit hoher räumlicher Auflösung. *Bauphysik* 13 (1991), H. 2, S. 43-49.
- [63] Kohonen, R.: A method to analyze the transient hygrothermal behaviour of building materials and components. Diss. Helsinki University Espoo (1984).
- [64] Kooi van der, J.: Moisture Transport in Cellular Concrete Roofs. Diss. TH Eindhoven (1971).
- [65] Krause, D. et al.: Kapazitive Messung des Wassergehaltes von Böden in Kulturgefäßen. *GIT Fachz. Labor* 29 (1985), H. 2, S. 91-105.
- [66] Krestel, E.: Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik. Siemens AG Berlin, München (1980).
- [67] Krischer, O. und Mahler, K.: Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der kapillaren Flüssigkeitsleitfähigkeit aus stationären und instationären Vorgängen. *VDI-Forschungsheft* 473 (1959), Ausgabe B, Band 25.
- [68] Krischer, O. und Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. 3. Auflage, Springer Verlag Berlin (1978).
- [69] Krus, M. und Kießl, K.: NMR-Messung kapillarer Flüssigkeitsbewegungen in porösen Gesteinen und Ableitung neuer Kapillartransport-Kenngrößen. Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung (1989), Band 1, Verlag Ernst & Sohn, S. 39-45.
- [70] Krus, M. und Kießl, K.: Vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung der Porenradialverteilung von Natursandstein mittels Saugspannungsmessung und Quecksilber-Druckporosimetrie. IBP-Bericht FtB-11/1991.
- [71] Krus, M. und Kießl, K.: Ist der Diffusionswiderstand von Baustoffen wirklich feuchteabhängig? IBP-Mitteilung 18 (1991) Nr. 208.
- [72] Krus, M.: Does vapour diffusion really depend on moisture content? IEA-Annex 24 Projekt, Report T3-D-92/02.
- [73] Krus, M. und Künzel, H.M.: Liquid water transport above capillary saturation. IEA-Annex 24 Projekt, Report T3-D-92/03.
- [74] Krus, M.: Determination of D_w from A-value. IEA-Annex 24-Projekt, Report T3-D93/01.
- [75] Krus, M., Künzel, H.M., Klier, M.: Liquid Transport Over the Boundary Layers of Two Different Hygroscopic Capillary Active Materials. IEA-Annex 24 Projekt, Report T1-D93/08.
- [76] Ksenschek, O.S. et al.: Centrifugal Method for Finding Pore-size Distribution Function in Porous Media. *Russian Journal of Phys. Chem.* 41 (1967), H. 7, S. 856-863.
- [77] Kuhn, K.: Kernresonanzmessungen und Wasseraktivitätsbestimmungen zur Aufklärung des Trocknungsverhaltens von Kartoffeln. Diss. Universität Hamburg (1986).
- [78] Kumaran, M.K., Bomberg, M.: A Gamma-Spectrometer for Determination of Density Distribution and Moisture Distribution in Building Materials. Proc. of the International Symposium on Moisture and Humidity, Washington D.C., (1985), S. 485-490.
- [79] Kumaran, M.K.: Moisture diffusivity of gypsum board from gamma-ray attenuation measurements. IEA-Annex 24 Projekt, Report T3-CA-93/03.
- [80] Künzel, H. und Schwarz, B.: Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. *Berichte aus der Bauforschung* (1968) H. 51, S. 99-113, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- [81] Künzel, H. und Bernhardt, P.: Wasserdampfdurchlässigkeit von Baustoffen bei verschiedenen Feuchtezuständen. *Berichte aus der Bauforschung* (1973), H. 80, S. 15-19, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- [82] Künzel, H.: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. *Bauphysik* 4 (1982), H. 3, S. 101-107.
- [83] Künzel, H. und Holz, D.: Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten und beheizten Kirchen alter Bauart. IBP-Bericht FB-32/1991.
- [84] Künzel, H.M. und Kießl, K.: Ist Vakuumtrocknung günstiger als Konvektionstrocknung? Untersuchungsergebnisse für Natursteine. *Bauphysik* 12 (1990), H. 1, S. 27-30.
- [85] Künzel, H.M. und Kießl, K.: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von mineralischen Baustoffen aus Sorptionsversuchen. *Bauphysik* 12 (1990), H. 5, S. 140-144.

- [86] Künzel, H.M.: Heat and Moisture Transfer in Porous Media; a comparison of measurement and calculation and its consequences for the treatment of vapour diffusion. IEA-Annex 24 Projekt, Report T1-D92/01.
- [87] Künzel, H.M.: Rechnerische Untersuchungen des Langzeit-Feuchteverhaltens von Wärmedämmschichten in Umkehrdächern mit Begrünung. IBP-Bericht FtB-23/1993.
- [88] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zwei-dimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss. Universität Stuttgart (1994).
- [89] Kupfer, K.: Feuchtemessung an Zuschlagstoffen für die Betonherstellung unter Verwendung der Mikrowellenmeßtechnik. Diss. Hochschule für Architektur und Bauwesen Wismar (1990).
- [90] McLean, R.C., Galbraith, G.H., Sanders, C.: Moisture transmission testing of building materials and the presentation of vapour permeability values. Building Research And Practice. The Journal of CIB, No. 2 (1990).
- [91] Lück, W.: Feuchtigkeit. Verlag R. Oldenbourg, München (1964).
- [92] Luikov, A.V.: Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies (Review). Intern. Journ. Heat & Mass Transfer 18 (1975), H. 1, S. 1-14, Pergamon Press.
- [93] Lykow, A.W.: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. Akademie Verlag Berlin (1958).
- [94] Mahler, K.: Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der kapillaren Flüssigkeitsleitfähigkeit aus stationären und instationären Vorgängen. Diss. Technische Hochschule Darmstadt 1958.
- [95] Martin, M.: Practical NMR Spectroscopy. Heyden Verlag London, Philadelphia, Rheine (1980).
- [96] Matzkanin, G.A.: Application of Spatially Localized NMR to Non-destructive Evaluation. Proc. of the second World Conf. on NDT, 3-8. Nov. 1985, Las Vegas.
- [97] Michel, D.: Grundlagen und Methoden der kernmagnetischen Resonanz. Akademie-Verlag Berlin (1981).
- [98] Molenda, C.H.A., Crausse, P. und Lemarchand, D.: The influence of capillary hysteresis effects on the humidity and heat coupled transfer in a non-saturated porous medium. Intern. Journal Heat & Mass Transfer 35 (1992), H. 6, S. 1385-1396.
- [99] Neiß, J.: Numerische Simulation des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden. Fortschrittsbericht VDI-Z. 3 (1982), H. 73, S. 1-293.
- [100] Neue, J.: Anwendung des dielektrischen Meßprinzips zur Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung in Baumaterial. 2. Bauklimatisches Symposium der Sektion Architektur. Schriftenreihe der Sektion Architektur der TU Dresden (1978), H. 11, S.133-143.
- [101] Nielsen, A.F.: Gamma-Ray-Attenuation Used for Measuring the Moisture Content and Homogeneity of Porous Concrete. Building Science 7 (1972), H. 4, S. 257-263.
- [102] Ostman, E.: The Use of Computed Tomography in Non-destructive Testing of Polymeric Materials, Aluminium and Concrete. 2. Intern. Conference on Testing, Evaluation and Quality Control of Composites - TEQC 87. University of Surrey, Guildford, U.K., 22.-24. Sept. 1987.
- [103] Paetzold, R.F., Matzkanin, G.A., De Los Santos, A.: Surface Soil Water Content Measurement Using Pulsed NMR Techniques. Soil Science Society of America Journal 49 (1985), H. 3, S. 537-540.
- [104] Peck, A.J.: Diffusivity Determination by a New Outflow Method. Proc. Wageningen Symposium (1969), S. 191-202.
- [105] Perrin, B. et al.: Détermination du Coefficient de Diffusion Isotherme de l'Humidité dans des Matériaux de Construction. Matériaux et Construction Vol. 16 (1983), H. 91, S. 27-33.
- [106] Philip, J.R., de Vries, D.A.: Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients. Transactions, Amer. Geophysical Union 38 (1957), H. 2, S. 222-232.
- [107] Pratt, A.W.: Some observations on the variation of the thermal conductivity of porous inorganic solids with moisture content. Thermal Conductivity Conference. National Physical Laboratory, Great Britain, (1964).
- [108] Prazak, J. et al.: Bemerkungen zur Beschreibung des Flüssigtransportes in porösen Baumaterialien. Gesundheits-Ingenieur 110 (1989), H. 6, S. 308-312.
- [109] Queisser, A.: Zerstörungsfreie Materialuntersuchungen an Natursandstein mittels Computertomographie. Bautenschutz und Bausanierung 11(1988), S. 54-60.
- [110] Quenard, D., Sallee, H.: A Gamma-Ray Spectrometer for Measurement of the Water Diffusivity of Cementitious Material. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 137 (1989), S. 165-169.
- [111] Rao, K.S.: Hysteresis in Sorption. Journ. Phys. Chem. 45 (1941), H. 45, S. 500-539.

- [112] Reinhardt, H.W., Gaber, K.: Equivalent pore size characterizing the pore size distribution of cement mortar. *Advances in Cementitious Materials*, Sidney Mindess (ed.), Ceramic Transactions, Am. Ceram. Soc., Westerville 16 (1990), S. 319-335.
- [113] Richards, L.A.: Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science* 68 (1949), H. 68, S. 95-112.
- [114] Ricken, D.: Ein einfaches Berechnungsverfahren für die instationäre Wasserdampfdiffusion. *Bauphysik* 13 (1991), H. 2, S. 33-37.
- [115] Rode, C.: Combined heat and moisture transfer in building constructions. Diss. Technical University of Denmark (1990).
- [116] Rollwitz, W.C.: Moisture Measurement in various hygroscopic materials using nuclear magnetic resonance. *Humidity and Moisture*, Vol. 2 (1965), New York.
- [117] Roos, H., Niesel, K., Hoffmann, D.: Über Phänomene des Feuchtigkeitstransports in Ziegeln und Mauerwerk. *GIT Fachz. f. d. Lab.* 32 (1988), H. 5, S. 16-21.
- [118] Rose, D.A.: Water movement in porous materials. *Brit. Journal Appl. Phys.*, Vol. 14 (1963), H. 5, S. 256-262.
- [119] Rowell, R.L. et al.: Gas and Vapour Permeability: Surface Flow Through Porous Media. *Journ. of Colloid and Interface Sc.* 37 (1971), H. 1, S. 242-246.
- [120] Rowley, F.B. und Lund, C.E.: Vapour Transmission Analysis of Structural Insulating Board. *Bulletin Nr. 22* (1944), University of Minnesota.
- [121] Schaefer, K.: Messung des Wassergehaltes und der Wasserbindung in Papier mit Hilfe der gepulsten Kernresonanz-Spektroskopie. Diplomarbeit Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittelverpackungstechnik, Weihenstephan (1988).
- [122] Schaschek, H.: Bewegungsmechanismus von Wasserdampf in porösen blattförmigen Materialien. *Chemie-Ingenieur-Technik* 28 (1956), H. 11, S. 698-702.
- [123] Scheffer, F. und Schachtschabel, P.: *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke-Verlag Stuttgart (1976).
- [124] Schirmer, R.: Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. 2. VDI Beil. *Verfahrenstechnik* (1938), H. 6, S. 170-177.
- [125] Schubert, H.: *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen*. Springer-Verlag Berlin (1982).
- [126] Schwarz, B.: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. *Gesundheits-Ingenieur* 93 (1972), H. 7, S. 206-211.
- [127] Sommer, E.: Beitrag zur Frage der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porigen Stoffen bei Be- und Entfeuchtungsvorgängen. Diss. TU Darmstadt (1971).
- [128] Stroosnijder, L. and De Swart, J.G.: Column Scanning with Simultaneous Use of ^{241}Am and ^{137}Cs Gamma radiation. *Soil Science* 118 (1978), H. 2, S. 61-69.
- [129] De Swart, J.G. and Groenevelt, P.: Column Scanning with 60 keV. Gamma Radiation. *Soil Sci. Vol. 112* (1971), H. 6, S. 419-424.
- [130] Timofijew, D.P.: *Adsorptionskinetik*. VEB-Verlag Leipzig (1967).
- [131] Timur, A.: Pulsed NMR Studies of Porosity, Movable Fluid and Permeability of Sandstones. *Journal of Petroleum Techn.* 21 (1969); H. 5, S. 775-786.
- [132] Trost, A.: Industrielle Feuchtemessung mit Neutronen. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 73 (1965), H. 12, S. 329-336.
- [133] Tveit, A.: Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Norwegian Building Research Institute, Oslo (1966), Rapport 45.
- [134] Tyvoniak, J. et al.: Feuchtemessung mittels Neutronenradiographie. *Bautenschutz + Bausanierung* 14 (1991), H. 2, S. 20-23.
- [135] Vetterlein, E.: Untersuchungen über den Einfluß der Temperatur auf die kapillare Leitfähigkeit und Wasserbindung in Böden. *Albrecht-Thaer-Arch.*, 12 (1968), H. ??, S. 385-400.
- [136] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Bericht aus dem Bauforschungsinstitut (1991) Technische Universität München, H. 1, S. 1-131.
- [137] Vos, B.H.: Meßmethoden zur Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes, des Feuchtegehaltes und der Feuchteverteilung. *Gesundheits-Ingenieur* 89 (1968), H. 3, S. 74-80 und H. 4, S. 115-118.
- [138] Wißmann W.: Über das Verhalten von Baustoffen gegen Feuchtigkeitseinwirkungen aus der umgebenden Luft. Diss. TH Darmstadt (1964).
- [139] Wittig, G. und Lingott, H.: Untersuchungen mit Mikrowellen zur Feuchtwanderung in Baustoffproben. *Bauphysik* 14 (1992), H. 2, S. 45-49.

- [140] Wittmann, H.: Kann das Prinzip der Elektroosmose zur Trockenlegung von Mauerwerk angewendet werden? *Bautenschutz und Bausanierung* 4 (1981), H. 4, S. 126-132.
- [141] Zacharias, B., Venzmer, H.: Ein Kapillarmodell zur Abschätzung der Wirkung äußerer Kräfte auf den kapillaren Feuchte-transport. Tagung "Feuchtegeschädigte Wände", TH Wismar (1989).
- [142] Zehndner, H.: Ein Meßverfahren zur Bestimmung des Wasserdampf-Diffusionswiderstandsfaktors von Bau- und Wärmedämmstoffen. *Kältetechnik-Klimatisierung* 19 (1967), H. 5, S.141-146.
- [143] Zeilinger, A.: Untersuchung des Feuchtetransports in Beton des SNR-300 durch Neutronentransmission. *Kerntechnik* 18 (1976), H. 3, S. 119-125.