

Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung  
des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in  
Bauteilen mit einfachen Kennwerten

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

**Vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Hartwig M. Künzel  
aus Tegernsee**

**Hauptberichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. h.c.  
Dr.-Ing. E.h. K. Gertis**  
**Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.W. Reinhardt**  
**Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juli 1994**

**Lehrstuhl für Konstruktive Bauphysik der Universität Stuttgart**

**1994**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen. Sie wurde im Rahmen eines Verbundprojektes zur Denkmalschutzforschung mit finanziellen Mitteln des Bundesforschungsministeriums gefördert.

Für die Betreuung dieser Arbeit und insbesondere für seine kritischen Anregungen, die maßgeblich zur Abrundung der Arbeit beigetragen haben, gilt mein besonderer Dank Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Dr. E.H. Karl Gertis.

Für die Mitbetreuung der Arbeit möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt herzlich bedanken.

Gleichzeitig möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. K. Kießl und Herrn Dipl.-Ing. M. Krus sowie bei vielen meiner Kollegen bedanken, die durch Anregungen und Hilfestellungen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Frau M. Westner für das geduldige Schreiben und Umschreiben des Manuskripts.

Ein besonderes Dankeschön gilt auch meiner Frau Sylvie für ihre verständnisvolle Unterstützung.

**Inhaltsverzeichnis**

	Seite		
Verzeichnis der Formelzeichen	4	<b><u>3. Numerische Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports</u></b>	40
<b><u>1. Bauphysikalische Problemstellung</u></b>	5	3.1 Ableitung der Transportgleichungen	40
<b><u>2. Kritische Auswertung der Literatur und neue Überlegungen zum gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport</u></b>	7	3.2 Diskretisierung der Differentialgleichungen	43
2.1 Hygrische Grundbegriffe und Formelzeichen	7	3.3 Lösung des Matrixgleichungssystems	45
2.2 Feuchtespeicherung	7	3.4 Ablaufschema des numerischen Berechnungsverfahrens	46
2.2.1 Sorptionsfeuchtebereich	9	3.5 Genauigkeit der numerischen Lösung	47
2.2.2 Kapillarwasserbereich	9	<b><u>4. Ergebnisvaluierung durch Vergleich mit Messungen anhand von Beispielen</u></b>	48
2.2.3 Übersättigungsbereich	13	4.1 Testbeispiel I (eindimensional): Naturstein-Fassadenausschnitt mit natürlicher Bewitterung	48
2.2.4 Bestimmung der Feuchtespeicherfunktionen	13	4.2 Testbeispiel II (eindimensional): Austrocknung eines Leichtbeton-Flachdaches	51
2.3 Feuchtetransportmechanismen	15	4.3 Testbeispiel III (zweidimensional): Befeuchtung und Trocknung eines Mauersteinmodellkörpers	56
2.3.1 Wasserdampfdiffusion	16	<b><u>5. Bewertung des Berechnungsverfahrens</u></b>	59
2.3.2 Oberflächendiffusion	17	5.1 Neue Ansätze und Funktionsmerkmale	59
2.3.3 Kapillarleitung	18	5.2 Weiterer Untersuchungsbedarf (offene Fragen)	60
2.3.4 Feuchtetransport im übersättigten Bereich	22	<b><u>6. Praktische Schlußfolgerungen</u></b>	60
2.3.5 Lösungsdiffusion	23	<b><u>7. Zusammenfassung</u></b>	61
2.3.6 Feuchtetransport unter dem Gefrierpunkt	24	<b><u>8. Literaturverzeichnis</u></b>	63
2.3.7 Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten	25		
2.4 Hygrischer Einfluß auf Wärmespeicherung und -transport	27		
2.4.1 Wärmespeicherung feuchter Baustoffe	27		
2.4.2 Wärmeleitung feuchter Baustoffe	28		
2.4.3 Wärmetransport durch Enthalpieströme mit Phasenänderung	29		
2.5 Wärme- und Feuchteübertragung an den Bauteilgrenzen	31		
2.6 Bisherige Berechnungsverfahren	35		

**Verzeichnis der Formelzeichen****Lateinische Zeichen**

$A$ [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$ ]	Wasseraufnahmekoeffizient
$a_r$ [-]	Niederschlagsabsorptionszahl
$a_s$ [-]	kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl
$B$ [ $\text{m}/\text{s}^{0.5}$ ]	Wassereindringkoeffizient
$b$ [%/M.-%]	feuchtebedingter Wärmeleitfähigkeitszuschlag
$c_e$ [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	spezifische Wärmekapazität von Eis
$c_s$ [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	spezifische Wärmekapazität des Baustoffes
$c_w$ [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	spezifische Wärmekapazität von Wasser
$D_L$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	Lösungsdiffusionskoeffizient
$D_p$ [ $\text{kg}/\text{msPa}$ ]	kapillardruckbezogener Transportkoeffizient
$D_w$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	Flüssigtransportkoeffizient
$D_{ws}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	Flüssigtransportkoeffizient für den Saugvorgang
$D_{ww}$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	Flüssigtransportkoeffizient für die kapillare Weiterverteilung
$D_T$ [ $\text{kg}/\text{msK}$ ]	Thermodiffusionskoeffizient
$D_\phi$ [ $\text{kg}/\text{ms}$ ]	Flüssigleitkoeffizient
$g_v$ [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]	Dampfdiffusionsstromdichte
$g_w$ [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]	Flüssigtransportstromdichte
$H$ [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]	Gesamtenthalpie
$H_s$ [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]	Enthalpie des trockenen Baustoffes
$H_w$ [ $\text{J}/\text{m}^3$ ]	Enthalpie der Baustoffeuchte
$h_e$ [ $\text{J}/\text{kg}$ ]	spezifische Schmelzenthalpie von Wasser
$h_v$ [ $\text{J}/\text{kg}$ ]	spezifische Verdunstungsenthalpie von Wasser
$L$ [ $\text{kg}/\text{m}^3\text{Pa}$ ]	Löslichkeit
$P_k$ [ $\text{Pa}$ ]	kapillarer Unterdruck, Saugspannung
$P_L$ [ $\text{Pa}$ ]	Umgebungsluftdruck
$p$ [ $\text{Pa}$ ]	Wasserdampfpartialdruck
$p_{\text{sat}}$ [ $\text{Pa}$ ]	Sättigungsdampfdruck
$q$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	Wärmestromdichte
$R$ [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]	Niederschlagsbelastung
$R_D$ [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	Gaskonstante für Wasserdampf
$R_N$ [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]	Normalregen
$R_s$ [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]	Schlagregen
$r$ [ $\text{m}$ ]	Porenradius
$r_s$ [ $\text{s}/\text{m}$ ]	positionsspezifischer Schlagregenkoeffizient
$S_h$ [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]	Wärmequelle oder -senke
$S_w$ [ $\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$ ]	Feuchtequelle oder -senke

$s$ [ $\text{m}$ ]	Wassereindringtiefe
$T$ [ $\text{K}$ ]	absolute Temperatur
$t$ [ $\text{s}$ ]	Zeit
$v$ [ $\text{m}/\text{s}$ ]	Windgeschwindigkeit
$w$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Wassergehalt
$w_e$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Gehalt des gefrorenen Wassers
$w_f$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	freie Wassersättigung
$w_{\text{max}}$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	maximale Wassersättigung
$x$ [ $\text{m}$ ]	Ortskoordinate
$y$ [ $\text{m}$ ]	Ortskoordinate

**Griechische Zeichen**

$\alpha$ [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	Gesamtwärmeübergangskoeffizient
$\alpha_k$ [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_s$ [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	strahlungsbedingter Wärmeübergangskoeffizient
$\beta_p$ [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$ ]	Wasserdampfübergangskoeffizient
$\delta$ [ $\text{kg}/\text{msPa}$ ]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
$\delta_p$ [ $\text{kg}/\text{msPa}$ ]	Wasserdampfpermeabilität des Baustoffes
$\eta$ [ $\text{kg}/\text{ms}$ ]	dynamische Viskosität von Wasser
$\Theta$ [ $\text{grad}$ ]	Randwinkel
$\vartheta$ [ $^\circ\text{C}$ ]	Temperatur
$\lambda$ [ $\text{W}/\text{mK}$ ]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes
$\lambda_0$ [ $\text{W}/\text{mK}$ ]	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes
$\mu$ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffes
$\mu^*$ [-]	fiktive Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des feuchten Baustoffes
$\rho_s$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Rohdichte des trockenen Baustoffes
$\rho_w$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Dichte von Wasser
$\sigma$ [ $\text{N}/\text{m}$ ]	Oberflächenspannung von Wasser
$\varphi$ [-]	relative Feuchte

**Mathematische Symbole**

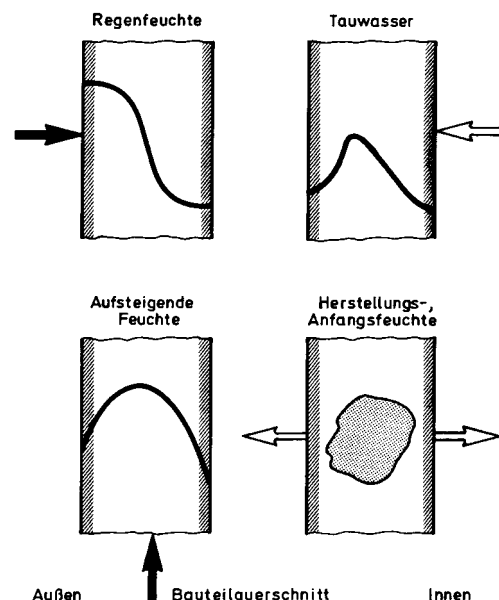
$d$	Operator für vollständiges Differential
$\partial$	Operator für partielles Differential
$\Delta$	Differenzenoperator
$\nabla$	Nablaoperator

## 1 Bauphysikalische Problemstellung

Jedes Jahr entstehen an der Bausubstanz allein in der Bundesrepublik Schäden in Milliardenhöhe, die direkt oder indirekt auf den Einfluß von Wasser zurückzuführen sind. Besonders deutlich wird dies bei historischen Bauwerken, die schon sehr lange der Wirkung des Wassers ausgesetzt sind [56]. Auch moderne Gebäude bleiben nicht verschont, wie z.B. die Betonplattenbauten in den Neuen Bundesländern beweisen [27]. Das Wasser ist aber nicht nur Ursache für Bauschäden. Auch der Wärmeschutz von Bauteilen kann durch Feuchte erheblich vermindert werden. Daß dies gerade heute wieder im Zusammenhang mit der notwendigen Verminderung des Kohlendioxidausstoßes im Wohnungsbau ein wesentliches Thema ist, wird in [35] gezeigt. Nicht zuletzt sind auch aus hygienischen Gründen hohe Bauteilfeuchten zu vermeiden. Erreicht die Oberflächenfeuchte in Wohnräumen z.B. im Bereich von Ecken oder Wärmebrücken über längere Zeiträume eine Ausgleichsfeuchte von 80 % relativer Luftfeuchte, so ist nach [49] mit Schimmelbildung zu rechnen. Aufgrund der Allergiewirkung und der Toxine einiger Schimmelpilzarten ist dies nicht nur ein Schönheitsfehler, sondern kann die Gesundheit der Bewohner beeinträchtigen [107].

Es gilt also, das Wasser aus Bauteilen zu verbannen oder den Wassergehalt zumindest so zu senken, daß sein schädigender Einfluß minimiert wird. Dazu muß zunächst geklärt werden, wie das Wasser in das Bauteil kommt und unter welchen Bedingungen es dort schädigend wirkt. Die wesentlichen Mechanismen, die zum Feuchteintrag in Bauteile beitragen, sind in Bild 1 schematisch dargestellt. Einmal kann Feuchte in flüssiger Form, als Regen oder aufsteigende Feuchte, auf ein Bauteil einwirken und zum anderen in Form von Wasserdampf, der an der Oberfläche oder im Inneren des Bauteils, bei mehrschichtigen Bauteilen meist an einer Schichtgrenze, ausfällt. Ein erhöhter Wassergehalt kann auch durch den Entstehungsprozeß

eines Bauteils bedingt sein, z.B. durch Anmachwasser von Mörteln und Beton, Produktionsfeuchte von Bausteinen oder mangelndem Regenschutz während der Bauphase. Zu welchen Feuchtebelastungen diese Einwirkungen führen und wie sie gegebenenfalls vermindert werden können, mußte bislang in der Regel durch langwierige und kostenintensive experimentelle Untersuchungen geklärt werden. Durch den Einsatz geeigneter Berechnungsverfahren könnten diese Untersuchungen jedoch in ihrem Umfang reduziert und in einigen Fällen ganz ersetzt oder wesentlich beschleunigt werden. Wie später in Ziffer 2.6 gezeigt werden wird, existiert bereits eine Reihe von Modellen zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen, von denen einige, wie z.B. das Modell von Kießl [57], nachweislich zuverlässige Ergebnisse liefern; andere sind nur begrenzt einsetzbar bzw. nicht oder nur relativ unvollkommen experimentell evaluiert. Die gesicherten Modelle verwenden jedoch zum Teil relativ komplexe Transport- und Speicherfunktionen, deren Bestimmung nicht nur einen hohen meßtechnischen Aufwand, sondern auch entsprechende Erfahrung erfordern. Aus diesem Grund



**Bild 1** Schematische Darstellung der Einwirkung und Verteilung von Feuchte in einer Außenwand durch Beregnung, Tauwasseranfall im Inneren bzw. an internen Schichtgrenzen, aufsteigende Grundfeuchte und anfängliche Baufeuchte.

hat sich die breite Anwendung von Feuchte-transportberechnungen, die über Dampfdiffusionsbetrachtungen wie beim Glaserverfahren [38] in DIN 4108 [23] hinausgehen, für bauphysikalische Fragestellungen bisher kaum durchgesetzt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, ausgehend von dem Berechnungsmodell von Kießl [57] unter Berücksichtigung neuer Ergebnisse ein Verfahren zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen zu entwickeln, das mit relativ einfachen, größtenteils aus Standardstoffkennwerten ableitbaren Transport- und Speicherfunktionen auskommt. Es soll für ein- und zwei-dimensionale Anwendungsfälle der bauphysikalischen Praxis geeignet sein und natürliche Klimaeinwirkungen, wie z.B. Regen, Frost und Sonnenstrahlung, berücksichtigen können. Die in der Praxis möglichen Wärme- und Feuchte-transportmechanismen in Bauteilen sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Bei der Berechnung des Wärmetransports werden Wärmeleitung und Enthalpieströme durch Feuchtebewegung mit Phasenänderung sowie die kurzwellige Son-

nenstrahlung berücksichtigt. Der langwellige Strahlungsaustausch wird in Form von Äquivalentleitfähigkeiten miteinbezogen. Da Luftströmungen durch Fugen und andere Undichtigkeiten nur schwer quantifizierbar sind, ist der luftkonvektionsbedingte Wärme- und Feuchte-transport durch ein Bauteil nicht Gegenstand dieser Arbeit. Von dieser Einschränkung abgesehen, werden beim Dampftransport alle anderen in Tabelle 1 aufgeführten Transportmechanismen analysiert. Die Kapillarleitung und die Oberflächendiffusion bilden die einzigen hier betrachteten Flüssigtransportmechanismen. Die Sickerströmung durch Gravitation spielt in der bauphysikalischen Praxis nur in Einzelfällen eine Rolle. Da sie außerdem beim eindimensionalen Feuchtetransport durch ein vertikales Bauteil nicht berücksichtigt werden kann, wird sie in dieser Arbeit nicht behandelt. Das gleiche gilt für den Flüssigtransport durch hydraulische Strömung, Elektrokinese und Osmose. Diese drei Transportmechanismen stellen für die Baupraxis Sonderfälle dar, für deren mathematische Beschreibung zuverlässige Transportansätze zum Teil noch fehlen [45].

Tabelle 1 Zusammenstellung der in der Praxis vorkommenden Wärme- und Feuchtetransportmechanismen, ihrer Ursachen und treibenden Potentiale.

	Transportmechanismus	Transportursache, -potential
Wärmetransport	Wärmeleitung	Temperatur
	Wärmestrahlung	Temperatur in der 4. Potenz
	Luftströmung	Gesamtdruck, Dichteunterschiede
	Enthalpieströme durch Feuchtebewegung	Dampfdiffusion mit Phasenwechsel und Flüssigtransportströme im Temperaturfeld
Dampftransport	Gasdiffusion	Dampfdruck (Temperatur, Gesamtdruck)
	Molekulartransport (Effusion)	Dampfdruck
	Lösungsdiffusion	Dampfdruck
	Konvektion	Gesamtdruckgefälle
Flüssigtransport	Kapillarleitung	Kapillarer Unterdruck
	Oberflächendiffusion	Relative Luftfeuchte
	Sickerströmung	Gravitation
	Hydraulische Strömung	Gesamtdruckunterschiede
	Elektrokinese	Elektrische Felder
	Osmose	Ionenkonzentrationen

Im folgenden werden die in dieser Arbeit betrachteten Feuchtetransportmechanismen bei unterschiedlichen Feuchtezuständen und deren Auswirkung auf den Wärmetransport genauer untersucht. Durch eine zusammenfassende Darstellung des derzeitigen Wissensstandes, ergänzt durch neueste Ergebnisse im Fraunhofer-Institut für Bauphysik, werden die physikalischen Grundlagen des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports ausgearbeitet. Nach einer kritischen Analyse von bereits veröffentlichten Feuchteberechnungsverfahren wird ein neues numerisches Lösungsverfahren für die resultierenden Transportgleichungen beschrieben. Das entwickelte Berechnungsverfahren und die damit gewonnenen Berechnungsergebnisse werden für zwei eindimensionale und ein zweidimensionales Anwendungsbeispiel mit Hilfe experimenteller Ergebnisse validiert. Eine Bewertung des neuen Berechnungsverfahrens und die sich ergebenden praktischen Schlussfolgerungen runden die Arbeit ab.

## **2 Kritische Auswertung der Literatur und neue Überlegungen zum gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport**

### **2.1 Hygrische Grundbegriffe und Formelzeichen**

Ein Baustoff wird als trocken bezeichnet, wenn er kein oder nur chemisch gebundenes Wasser enthält. Dieser Zustand wird gemäß DIN 52620 [26] durch Trocknen bis zur Gewichtskonstanz erreicht. In Kontakt mit feuchter Luft bleiben nicht hygroskopische Baustoffe trocken, während hygroskopische Stoffe so lange an den inneren Oberflächen ihres Porensystems Wassermoleküle binden, bis sie einen dem Feuchtezustand der umgebenden Luft entsprechenden Ausgleichwassergehalt erreichen.

Saugt ein Baustoff bei Berührung mit Wasser dieses auf, so wird er als kapillaraktiv bezeichnet; tut er dies nicht, gilt er als hydrophob. Ein kapillaraktiver Stoff saugt so lange flüssiges Wasser auf, bis er einen gewissen Sättigungszustand - die freie Wassersättigung - erreicht.

Höhere Wassergehalte bis hin zur Porensättigung oder maximalen Wassersättigung können nur durch das Anlegen von Druck oder durch Wasserdampfdiffusion im Temperaturgefälle erreicht werden. Dies gilt auch für hydrophobe Baustoffe. Häufig wird bei kapillaraktiven Baustoffen von einem kritischen Feuchtegehalt gesprochen. Er bezeichnet den Feuchtezustand, bis zu dem Kapillarleitung beobachtet werden kann, z.B. indem man die Ausbreitung eines Wassertropfens auf der Baustoffoberfläche betrachtet [116].

Die in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen entsprechen im großen und ganzen den Vorgaben der internationalen Normen ISO 7345 [51] und ISO 9346 [52]. Eine Ausnahme bildet der Wärmeübergangskoeffizient, der hier wegen seiner engen Koppelung an den Feuchteübergangskoeffizient  $\beta$  und wegen der Verwechslung mit der Enthalpie durch den griechischen Buchstaben  $\alpha$  dargestellt wird. Alle Maßeinheiten werden in SI-Einheiten angegeben. Dies widerspricht den deutschen Gepflogenheiten, hygrische Kenngrößen auf die Stunde und nicht auf die Sekunde zu beziehen. Es hat aber den Vorteil, Umrechnungsfaktoren bei gleichzeitiger Betrachtung von Wärme- und Feuchtetransport zu vermeiden, da die Angabe der thermischen Kenngrößen ebenfalls in SI-Einheiten üblich ist.

### **2.2 Feuchtespeicherung**

Die Feuchte in einem Baustoff kann je nach Umgebungsbedingungen fest, flüssig und dampfförmig bzw. in den Mikroporen auch in nicht exakt definierbaren Aggregatzuständen vorliegen. Da eine getrennte Erfassung der verschiedenen Aggregatzustände meßtechnisch oft schwierig ist und sich das Verhältnis der einzelnen Aggregatzustände unter natürlichen Bedingungen ständig ändert, ist es sinnvoll, nur ihre Summe zu betrachten. Diese Summe wird im folgenden als Wassergehalt  $w$  bezeichnet, auch wenn damit nur die Wasserdampfkonzentration in einem nicht hygroskopischen Baustoff beschrieben wird.

Ein Baustoff kann maximal so lange Feuchte aufnehmen, bis alle seine Poren mit Wasser gefüllt sind. Damit ist aber über sein reales Feuchtespeichervermögen unter natürlichen Bedingungen noch nichts bekannt. Deshalb ist es wichtig, einen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt eines Baustoffes und den Umgebungsbedingungen herzustellen. Voraussetzung für die mathematische Modellierung der Feuchtespeicherfähigkeit eines Baustoffes ist die Existenz einer möglichst eindeutigen Funktion des Wassergehaltes bezogen auf die wesentlichen Klimaparameter. Wie später noch gezeigt werden wird, ist der bestimmende Klimaparameter bei der Feuchtespeicherung die relative Luftfeuchte. Zur Ableitung einer solchen Funktion werden im folgenden drei Feuchtebereiche unterschieden, die sich bei Baustoffen aufgrund zunehmend intensiver werdenden Feuchtebelastungen einstellen können.

#### Bereich A

Der Sorptionsfeuchte- oder hygroscopische Bereich. In diesen Bereich, der sich bis zu Ausgleichsfeuchten von etwa 95 % relativer Feuchten erstreckt, fallen alle Wassergehalte, die sich durch Wasserdampfsorption bis zum Gleichgewichtszustand ergeben. Dieser Bereich kann mit Hilfe von Sorptionsisothermen charakterisiert werden.

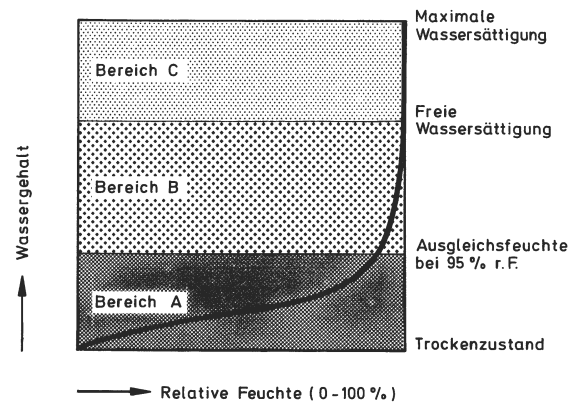
#### Bereich B

Der Kapillarwasserbereich, der sich an den Sorptionsfeuchtebereich anschließt und bis zur freien Wassersättigung reicht. Auch dieser Bereich ist durch Gleichgewichtszustände gekennzeichnet. Ähnlich wie in [57] vorgeschlagen, wird dieser Bereich durch Feuchtespeicherfunktionen über der Porenradienverteilung oder der Saugspannung beschrieben.

#### Bereich C

Der Übersättigungsbereich, der durch normales Saugen nicht mehr (oder nur nach sehr langer Zeit durch Lösen der eingeschlossenen Porenluft im Wasser) erreicht werden kann. Er tritt in

der Praxis durch Diffusion im Temperaturgefälle oder im Labor durch Saugen unter Druck auf. In diesem Bereich, der über der freien Wassersättigung liegt und bis zur Füllung sämtlicher Hohlräume reicht, gibt es keine Gleichgewichtszustände mehr.



**Bild 2** Schematische Darstellung der Feuchtespeicherfunktion eines hygroscopischen, kapillaraktiven Baustoffes.

**Bereich A:** Dieser Bereich charakterisiert den Sorptionsfeuchtebereich bis zu einer relativen Luftfeuchte von 95 %. Er wird in der Bauphysik durch Sorptionsisotherme beschrieben.

**Bereich B:** In diesem Bereich, der auch als überhygroscopischer Bereich bezeichnet wird, werden zunehmend größere Baustoffporen mit Wasser gefüllt bis zur freien Wassersättigung, der Gleichgewichtsfeuchte bei Kontakt mit Wasser.

**Bereich C:** In diesem Bereich, dem Übersättigungsbereich, gibt es keine Gleichgewichtszustände mehr. Die relative Feuchte beträgt dort unabhängig vom Wasser stets 100 %.

Die drei Bereiche charakterisieren das Feuchtespeicherverhalten von hygroscopischen, kapillaraktiven Baustoffen, z.B. Bausteinen, Mörteln und Holzbaustoffen, wie anhand einer schematischen Feuchtespeicherfunktion solcher Stoffe in Bild 2 dargestellt. Bei nicht hygroscopischen, nicht kapillaraktiven Stoffen, wie den meisten Dämmstoffen, kommt nur der Bereich C vor. Das bedeutet, daß Feuchte in flüssiger Form nur bei Taupunktbedingungen, also bei einer relativen Luftfeuchte von 100 %, in diesen Stoffen anzutreffen ist. Im Gegensatz dazu kommt bei polymeren Beschichtungen oder Folien nur der Bereich A (Sorptionsfeuchtebereich) vor, da hier zunächst keine wasseraufnahmefähigen Porenräume vorhanden sind. Die absorbierten Wassermoleküle müssen sich im Polymer-

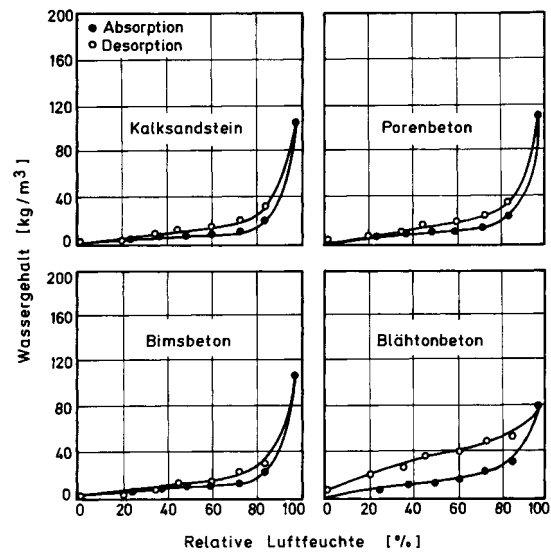


gefüge erst Platz schaffen, was meist mit einer mizellaren Quellung dieser Stoffe verbunden ist. Auch der direkte Übergang von Bereich A in den Bereich C ist möglich, wie z.B. bei hydrophobierten Mörteln oder Mauersteinen. Sie sind zwar noch hygroskopisch, aber nicht mehr kapillaraktiv. Im folgenden werden die Feuchtespeicherphänomene in den drei Bereichen und ihre modellmäßige Erfassung eingehender beschrieben.

### 2.2.1 Sorptionsfeuchtebereich

Im Kontakt mit feuchter Luft stellt sich bei hygroskopischen Baustoffen eine Gleichgewichtsfeuchte ein, die von der relativen Luftfeuchte in der Umgebung bestimmt wird, während der Einfluß der Temperatur nach Messungen von Kast und Jokisch [54] im Temperaturbereich von 20 bis 70 °C und von Künzel [74] bei 5 und 15 °C für bauphysikalische Betrachtungen zu vernachlässigen ist. Aus diesem Grund werden die hygroskopischen Ausgleichsfeuchten von Baustoffen in Form von sogenannten Sorptionsisothermen dargestellt. Die Hysterese zwischen Absorptions- und Desorptionsisotherme ist, wie Meßergebnisse in Bild 3 zeigen, bei den meisten Baustoffen so wenig ausgeprägt, daß zur Charakterisierung der Feuchtespeicherung eines Baustoffes die Absorptionsisotherme im allgemeinen ausreicht. Für den Fall einer etwas stärker ausgeprägten Hysterese, wie bei Blähtonbeton in Bild 3 rechts unten, ist nach Untersuchungen von Rode [110], der Berechnungsergebnisse mit und ohne Berücksichtigung der Hysterese verglich, durch die Mittelung von Ab- und Desorptionsisotherme eine ausreichend genaue Berechnung des Feuchteverhaltens solcher Stoffe möglich. Mit Hilfe von Sorptionsmessungen, die bis zu einer relativen Luftfeuchte von ca. 95 % durchführbar sind, ist damit eine eindeutige Zuordnung des Wassergehalts eines Baustoffes zur relativen Luftfeuchte möglich. Da die relative Luftfeuchte ein stetiges materialunabhängiges Potential darstellt und die tatsächlichen Feuchtegehalte am Bauwerk in der Praxis im Sorptionsbereich

liegen, ist die relative Luftfeuchte auch als Potential für die anderen Feuchtebereiche anzustreben.



**Bild 3** Absorptions- und Desorptionsisothermen von vier häufig verwendeten Bausteinen. Die Proben wurden granuliert und im Mittel 25 Tage bei einer Feuchtestufe gelagert [78]. Abgesehen vom Blähtonbeton ist der Unterschied zwischen Absorptions- und Desorptionsverlauf gering.

### 2.2.2 Kapillarwasserbereich

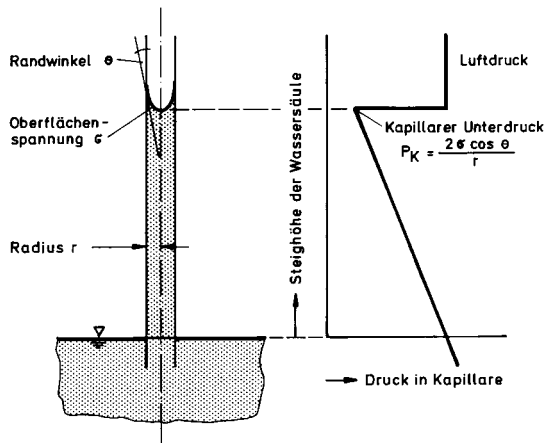
Kommt ein kapillaraktiver Baustoff in Kontakt mit flüssigem Wasser, so saugt er so lange Wasser auf, bis er die freie Wassersättigung  $w_f$  erreicht. Auch beim Kontakt mit einem anderen überhygroskopisch feuchten Stoff kommt es zum Feuchteaustausch, bis ein Gleichgewicht erreicht wird. Dabei geht man von der Vorstellung aus, daß kleinere Kapillaren aufgrund höherer Saugkräfte aus den größeren so lange Wasser absaugen, bis in beiden Stoffen alle Kapillaren bis zu einer bestimmten Größe mit Wasser gefüllt sind. Bei diesem Gleichgewichtszustand sind die Wassergehalte der beiden kapillar verbundenen Baustoffe in aller Regel nicht gleich.

Zur quantitativen Erfassung der kapillaren Saugkräfte wird im allgemeinen ein Zylinderkapillarenmodell, wie in Bild 4 gezeigt, herangezogen. Ausgehend von einer Benetzung der Porenoberfläche, wie sie für mineralische Baustoffe fast immer gegeben ist, ergibt sich daraus für den kapillaren Unterdruck, der auch

als Saugspannung bezeichnet wird, folgende Beziehung:

$$P_k = 2\sigma \cos \theta / r \quad (1)$$

$P_k$ [Pa]	Kapillarer Unterdruck
$\sigma$ [N/m]	Oberflächenspannung des Wassers
$r$ [m]	Kapillarradius
$\theta$ [grad]	Randwinkel



**Bild 4** Schematische Darstellung der Wassersäule (rechts) und Druckverhältnissen (links) in einer Zylinderkapillare. Über den Wasseroberflächen herrscht jeweils Luftdruck. Direkt unter dem Meniskus in der Kapillare wird der größte kapillare Unterdruck erreicht, der in Mikrokapillaren den Luftdruck in seinem Betrag überschreiten kann und dadurch zur Zugspannung wird. Aufgrund einer höheren Ordnung der Wassermoleküle in Mikrokapillaren kann das Wasser diese Zugspannungen aufnehmen.

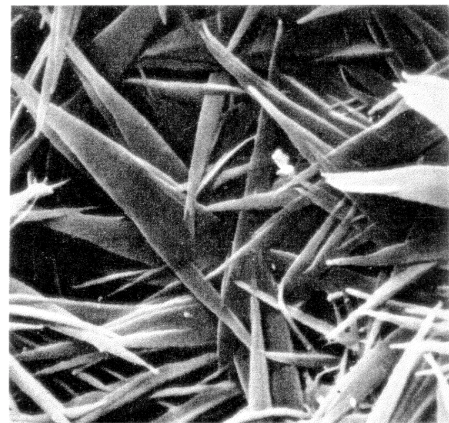
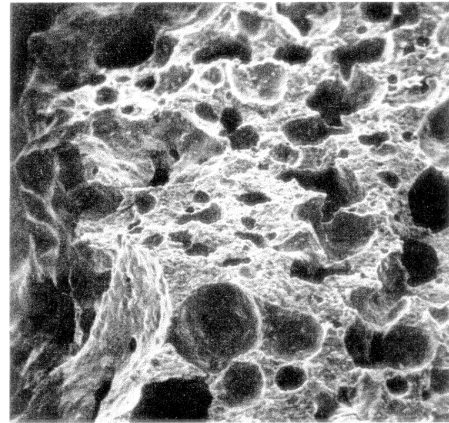
Dieser kapillare Unterdruck kann in porösen Baustoffen den Luftdruck in seinem Betrag überschreiten, ohne daß es zu Dampfblasenbildung kommt. Durch eine starke Ordnung der Wassermoleküle in den kleinen Poren kann das Wasser dort nämlich auch Zugspannungen aufnehmen [123]. So ist auch zu erklären, daß Bäume das Wasser über eine Höhe von 10 Metern hinaus kapillar transportieren können.

Betrachtet man das Porensystem eines Baustoffes unter dem Mikroskop, wie in Bild 5 zu sehen, erscheint ein Zylinderkapillarenmodell als sehr grobe Näherung der tatsächlichen Verhältnisse. Aus diesem Grund ist es sinnvoller, den kapillaren Unterdruck direkt und nicht über ein Kapillarenmodell aus den Porengrößen zu

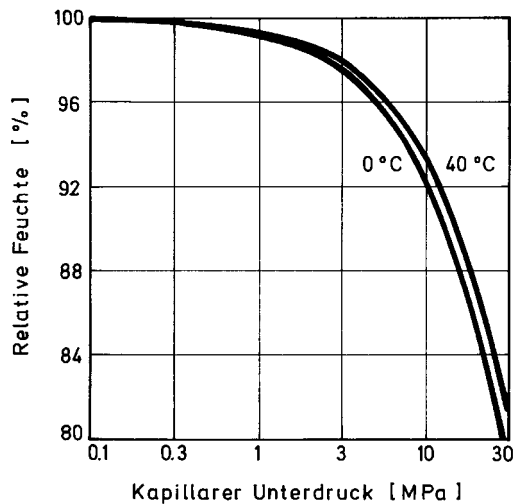
ermitteln. Unter Zuhilfenahme thermodynamischer Gleichgewichtsbedingungen kann, wie in [57] abgeleitet, die als Kelvinformel bekannte Beziehung zwischen der relativen Luftfeuchte  $\varphi$  über einer konkav gekrümmten Wasseroberfläche und dem sich einstellenden kapillaren Unterdruck errechnet werden (Bild 6):

$$\varphi = \exp\left(-\frac{P_k}{\rho_w R_D T}\right) \quad (2)$$

$P_k$ [Pa]	kapillarer Unterdruck
$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Wassers
$R_D$ [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
$T$ [K]	absolute Temperatur



**Bild 5** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Porenbeton [37] mit zweifundzwanzigfacher Vergrößerung (oben) und elftausendfacher Vergrößerung (unten). Während die Poren im Baustoffgerüst bei geringer Vergrößerung rundlich wirken, ist die bei hoher Vergrößerung sichtbare Mikrostruktur von spitzen Nadeln ausgeprägt. Ein Zylinderkapillarenmodell zur Beschreibung der Porenstruktur erscheint hier unpassend.

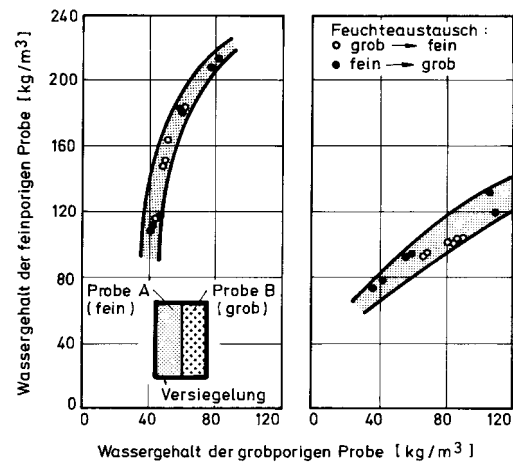


**Bild 6** Relative Luftfeuchte über einer Wasseroberfläche in Abhängigkeit vom kapillaren Unterdruck im Wasser. Die Verläufe wurden mit Hilfe der Kelvin-Formel in Gleichung (2) für eine Wassertemperatur von 0 °C und 40 °C ermittelt.

Gelingt es, durch Messungen die Abhängigkeit des Gleichgewichtswassergehaltes eines Baustoffes vom kapillaren Unterdruck in den gerade noch gefüllten Poren zu ermitteln, so ist durch Gleichung (2) auch für den Kapillarwasserbereich ein eindeutiger funktionaler Zusammenhang zwischen Wassergehalt und relativer Luftfeuchte gegeben.

Wie bei der Sorptionsisotherme, so könnte es auch bei dieser Funktion eine Hysterese zwischen Befeuchten und Trocknen geben. Eigene Untersuchungen an Natursteinproben zeigen, daß sich annähernd dieselben überhygroskopischen Feuchtegleichgewichte einstellen, unabhängig davon, ob sie durch Be- oder Entfeuchten der Bezugsproben erreicht wurden (Bild 7). Dies läßt darauf schließen, daß die Hysterese im Kapillarwasserbereich zumindest bei mineralischen Baustoffen nicht ausgeprägter als im Sorptionsfeuchtebereich ist. Deshalb erscheint auch hier eine einzige Speicherfunktion für das Trocknen und Befeuchten ausreichend. Als Meßverfahren zur Bestimmung der Speicherfunktion eignen sich Schleuderveruche [117] und Saugspannungsmessungen [108] und bei Baustoffen mit hohem Anteil an Mikroporen kalometrische Untersuchungen der Eisbildung des Porenwassers [88]. Bei diesen Meßverfahren wird direkt mit Wasser gearbeitet,

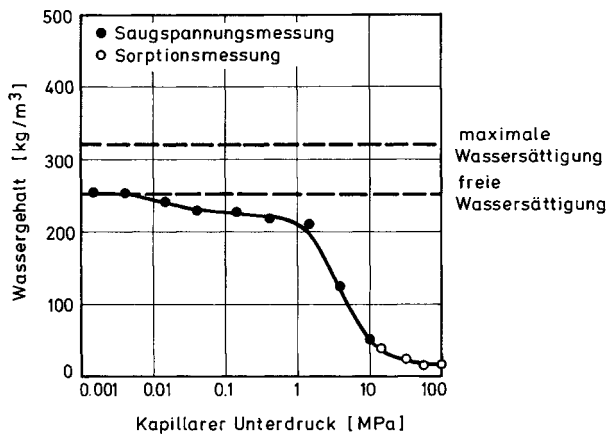
wodurch sich der Umweg über ein idealisiertes Zylinderkapillarenmodell zur Bestimmung des kapillaren Unterdrucks erübrigt. Wesentlich einfacher und schneller ist die Messung der Porenradialverteilung mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie. Deren Ergebnisse müssen jedoch wegen der Erfassung aller Poren - bei der freien Wassersättigung ist nur ein Teil der Poren mit Wasser gefüllt - entsprechend korrigiert werden. Bei Abwesenheit von Salzen ist aber auch diese Methode, wie Vergleichsmessungen in [69] zeigen, häufig ausreichend genau.



**Bild 7** Überhygroskopische Gleichgewichtsfeuchte zweier kapillar verbundener Baustoffe (grob- und feinporiger Sandstein mit großen (links) und kleinen (rechts) Porositätsunterschieden). Die Anfangswassergehalte der Proben wurden so gewählt, daß jeweils eine Hälfte durch Feuchteabgabe den Ausgleichswassergehalt erreichte. Die engen Bereiche (schraffierter Kurvenbereich) der Lage der Gleichgewichtszustände, unabhängig von der Anfangsfeuchtesituation, lassen auf eine unbedeutende Hysterese des kapillaren Feuchteaustausches bei Natursandsteinen schließen.

Als Beispiel für den nahtlosen Übergang vom mittels Sorptionsmessungen bestimmten hygroskopischen Teil zum durch Saugspannungsmessungen bestimmten überhygroskopischen Teil der Feuchtespeicherfunktion dienen Ergebnisse von [59], dargestellt in Bild 8. Hier ist der Wassergehalt von Kalksandstein über der im Gleichgewichtszustand gemessenen bzw. nach Gleichung (2) berechneten Saugspannung zu sehen. Dieselben Meßwerte, diesmal über der relativen Feuchte aufgetragen, sind in Bild 9 oben zu sehen. Es wird deutlich, daß für Poren-

radien über  $10^{-7}$  m - das entspricht einer relativen Feuchte von 99 % - die Feuchtespeicherfunktion steil ansteigt. Dieser steile Anstieg ist durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Porengröße und relativer Feuchte bedingt. In Tabelle 2 sind der kapillare Unterdruck, das Feuchtepotential von Kießl [57] und die relative Luftfeuchte in Abhängigkeit vom Porenradius aufgeführt. Im Vergleich zu den beiden erstgenannten Potentialen strebt die relative Feuchte für Porenradien über  $10^{-7}$  m sehr schnell ihrem Maximalwert zu. Daher ist die Steigung der Speicherfunktion in der Nähe der freien Sättigung oft um mehrere Größenordnungen höher als im Sorptionsbereich, was bei

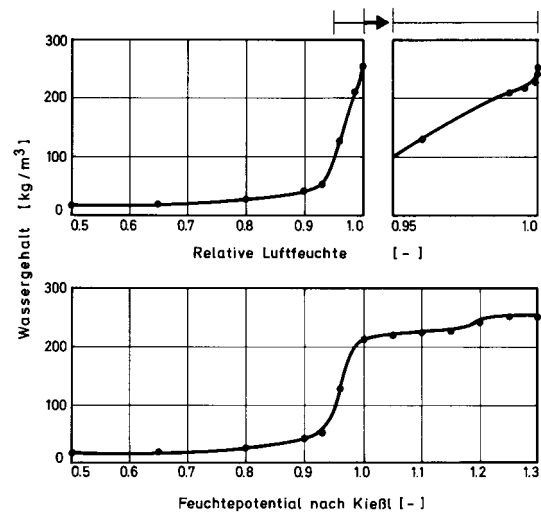


**Bild 8** Feuchtespeicherung von Kalksandstein in Abhängigkeit vom kapillaren Unterdruck im Porenwasser. Die Ausgleichswassergehalte im überhygroskopischen Bereich bis zu einem kapillaren Unterdruck von 10 MPa werden durch Saugspannungen, die anderen durch Sorptionsmessungen bestimmt. Der nahtlose Übergang der Ergebnisse beider Meßmethoden zeigt die Eignung der Saugspannungsmessung für die Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion im überhygroskopischen Bereich.

numerischen Berechnungsverfahren aufgrund von Rundungsfehlern zu Problemen führen kann. Aus diesem Grund hat Kießl [57] ein neues verallgemeinertes Feuchtepotential  $\phi$  eingeführt, das sich aus der relativen Luftfeuchte und der Porenradienverteilung wie folgt zusammensetzt:

$$\begin{aligned} \phi &= 1,7 + 0,1 \log r & \phi > 0,9 \\ \phi &= \varphi & \phi \leq 0,9 \end{aligned} \quad (3)$$

$r$  [m] Kapillarradius  
 $\varphi$  [-] relative Luftfeuchte



**Bild 9** Vergleich der Feuchtespeicherung eines Baustoffes in Abhängigkeit von der relativen Feuchte (oben) und vom Feuchtepotential nach Kießl [57] (unten) am Beispiel von Kalksandstein. Das Potential von Kießl erlaubt eine bessere Auflösung der Feuchtespeicherfunktion im Bereich hoher Wassergehalte. Dies führt allerdings nicht unbedingt zu einer höheren Berechnungsgenauigkeit, da bei einer relativen Feuchte von 99 % (Feuchtepotential nach Kießl ist gleich „Eins“) bei vielen Baustoffen der größte Teil der Poren bereits wassergefüllt ist.

**Tabelle 2** Zusammenhang zwischen dem kapillaren Unterdruck in einer Kapillare, dem Feuchtepotential nach Kießl [57], der relativen Luftfeuchte und dem äquivalenten Porenradius. Da die relative Luftfeuchte im Vergleich zu den beiden erstgenannten Potentialen für Porenradien über  $10^{-7}$  m schnell ihrem Maximalwert zustrebt, steigt die Feuchtespeicherfunktion von grobporösen Baustoffen im Bereich der freien Wassersättigung steil an.

Porenradius [m]	Kapillarer Unterdruck [MPa]	Feuchtepotential nach Kießl [-]	Relative Luftfeuchte [-]
$10^{-8}$	15	0,9	0,9
$10^{-7}$	1,5	1,0	0,99
$10^{-6}$	0,15	1,1	0,999
$10^{-5}$	0,015	1,2	0,9999
$10^{-4}$	0,0015	1,3	~1,0

Die sich daraus ergebende Feuchtespeicherfunktion ist in Bild 9 unten dargestellt. Der maximale Wert für  $\phi$  beträgt 1,3, was einem Porenradius von 0,1 mm entspricht. Diese Grenze ist sinnvoll, da größere Poren durch Saugen normalerweise nicht mehr mit Wasser gefüllt werden, bedenkt man, daß die maximale Steighöhe in einer Pore von  $r = 0,1$  mm weniger als 15 cm beträgt. Für die Wasseraufnahme größerer Poren würden Gravitation und Staudruck eine bedeutendere Rolle spielen als die hier zu untersuchenden kapillaren Saugkräfte.

Zwei Probleme ergeben sich allerdings aus dem so definierten Feuchtepotential: Erstens muß für den Diffusionstransport im Bauteil und an seinen Oberflächen eine weitere Differenzierung  $\partial\phi/\partial\varphi$  durchgeführt werden und zweitens fällt der steile Anstieg der Feuchtespeicherfunktion im Sorptionsbereich, im anschließenden Kapillarwasserbereich ( $\phi \geq 1$ ) bei den meisten kapillaraktiven Baustoffen wieder stark ab. Da auch dies zu Ungenauigkeiten bei der numerischen Berechnung führen kann, wird das von Kießl vorgeschlagene Feuchtepotential hier nicht verwendet. Statt dessen wird die relative Luftfeuchte erstmals auch im Kapillarwasserbereich als treibendes Potential eingesetzt. Der Einfluß von numerischen Rundungsfehlern kann durch ein entsprechend genaues Lösungsverfahren [11] minimiert werden.

### 2.2.3 Übersättigungsbereich

In diesem Bereich ist die relative Luftfeuchte immer Eins oder größer; beispielsweise gilt dies für die Tauwasserbildung in hydrophoben Dämmstoffen. Hier können aufgrund der zunächst sehr kleinen Radien der Tauwassertropfchen durch die konvexe Krümmung der Oberfläche kurzzeitig relative Luftfeuchten über 100 % auftreten. Dieser Bereich ist außerdem durch instationäre Abläufe gekennzeichnet, stationäre Feuchtegleichgewichte können sich unter natürlichen Bedingungen nicht einstellen. Am besten ist dieser Bereich bei hydrophoben Dämmstoffen definiert. Sobald durch Dampf-

diffusion im Temperaturgefälle Tauwasser auftritt, wird der Übersättigungsbereich erreicht. Unabhängig vom Wassergehalt ist dann die relative Feuchte stets Eins. Aber auch für kapillarporöse Baustoffe kann ein Übersättigungsbereich definiert werden. Bei Wassergehalten oberhalb der freien Wassersättigung sind auch hier Poren gefüllt, die sich durch Saugvorgänge unter natürlichen Bedingungen nicht füllen würden und die auch zum Kapillartransport nicht beitragen. Wassergehalte im Übersättigungsbereich können bei den meisten Baustoffen aufgrund von Dampfdiffusion auftreten, so daß auch die Möglichkeit ihrer Berechnung gegeben sein muß. Da aber in diesem Bereich, wie in [13] festgestellt, kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Feuchtepotential und Wassergehalt besteht - mathematisch gesehen hat die Feuchtespeicherfunktion zwischen der freien Wassersättigung  $w_f$  und der maximalen Sättigung  $w_{max}$  eine unendlich große Steigung - kann er nur durch eine potentialunabhängige Feuchtespeicherkapazität  $\Delta w_{\bar{u}}$  beschrieben werden, die sich aus der Differenz aus maximaler und freier Wassersättigung ergibt:

$$\Delta w_{\bar{u}} = w_{max} - w_f \quad (4)$$

$w_f$  [kg/m<sup>3</sup>] freie Wassersättigung  
 $w_{max}$  [kg/m<sup>3</sup>] maximale Wassersättigung

Bei hydrophoben Dämmstoffen entspricht die freie Wassersättigung der Sättigungsdampfkonzentration im Porenraum, während die maximale Wassersättigung durch die Wasserfüllung aller Poren gekennzeichnet ist.

### 2.2.4 Bestimmung der Feuchtespeicherfunktionen

Die Sorptionsisothermen bis etwa 90 % relative Feuchte sind für viele Baustoffe bekannt. Ein recht umfassender Katalog ist in [42] zu finden. Bei einigen Materialien ist die Variationsbreite allerdings relativ groß, so daß oft gesonderte Messungen vorzuziehen sind. In diesem Fall reicht es meist, den Wassergehalt bei 80 % relativer Feuchte zu messen, der als Bezugs-

feuchtegehalt nach DIN 52620 [26] zur Festlegung des Rechenwertes der Wärmeleitfähigkeit gefordert wird, und als Basis zur Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion zu verwenden.

Wesentlich schwieriger ist es, Saugspannungskurven oder Porenradienverteilungen für Baustoffe in Literaturquellen zu finden. Allerdings ist eine genaue Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion nur nötig bei direkt kapillarverbundenen Bauteilschichten, in denen der Flüssigtransport von Schicht zu Schicht eine große Rolle spielt (z.B. bei Verputz auf Mauerwerk). In einem solchen Fall sind die Verläufe der Feuchtespeicherfunktionen der aneinandergrenzenden Materialien von entscheidender Bedeutung für den Flüssigtransport über die Grenzschicht hinweg, wie in [71] gezeigt wird. Bei anderen Konstruktionen mit kapillarbrechenden Trennschichten ist eine genaue Speicherfunktionsbestimmung nicht nötig. Unnötig wird sie auch dann, wenn in einer Bauteilschicht höhere Wassergehalte nicht oder nur kurzfristig zu erwarten sind. In diesen Fällen ist eine Approximation der Feuchtespeicherfunktion auf der Basis einfach zu bestimmender Kennwerte ausreichend.

In der Literatur mangelt es nicht an Ansätzen zur Beschreibung von Sorptionsisothermen. Für die Sorption poröser Baustoffe wird von [47] und [109] folgende Näherung verwendet:

$$w = w_0 - \frac{\ln(1-\varphi)}{d} \quad (5)$$

$w$  [kg/m<sup>3</sup>]    Ausgleichswassergehalt  
 $w_0$  [kg/m<sup>3</sup>]    Wassergehalt bei Luftfeuchte Null  
 $d$  [m<sup>3</sup>/kg]    Approximationskoeffizient  
 $\varphi$  [-]    relative Luftfeuchte

Der Wassergehalt für  $\varphi = 0$  entspricht hier dem Ausgleichswassergehalt bei 30 % relativer Feuchte. Der Approximationskoeffizient  $d$  wird durch Einsetzen eines weiteren Stützpunktes der gemessenen Sorptionsisothermen bestimmt. Im Gegensatz zu diesem rein empirischen Ansatz wurde von [61] eine einfache Beziehung für mineralische Baustoffe aus

der nach den Anfangsbuchstaben ihrer Verfasser genannten BET-Theorie [14] abgeleitet:

$$w = w_m \cdot \frac{1}{1-\varphi} \quad (6)$$

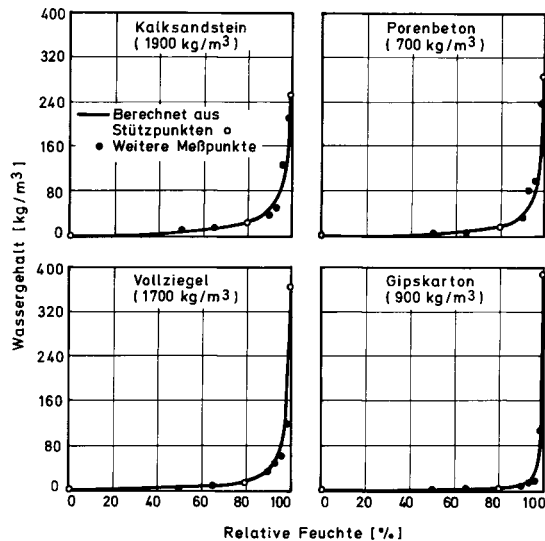
$w$  [kg/m<sup>3</sup>]    Ausgleichswassergehalt  
 $\varphi$  [-]    relative Luftfeuchte

Der Wassergehalt bei monomolekularer Belegung der inneren Oberfläche  $w_m$  muß aus Sorptionsversuchen ermittelt werden. Die beiden Ansätze (5) und (6) haben einen entscheidenden Nachteil. Bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % geht der rechnerische Ausgleichswassergehalt gegen Unendlich, während er in Wirklichkeit durch die freie Wassersättigung begrenzt ist. Deshalb wird hier folgende, der Gleichung (6) ähnliche Näherung für die Feuchtespeicherfunktion vorgeschlagen:

$$w = w_f \cdot \frac{(b-1)\varphi}{b-\varphi} \quad (7)$$

$w$  [kg/m<sup>3</sup>]    Ausgleichswassergehalt  
 $w_f$  [kg/m<sup>3</sup>]    freie Wassersättigung  
 $b$  [-]    Approximationsfaktor  
 $\varphi$  [-]    relative Luftfeuchte

Der Approximationsfaktor  $b$  muß immer größer sein als Eins. Er läßt sich aus dem Ausgleichswassergehalt bei 80 % relativer Feuchte durch Einsetzen der entsprechenden Zahlenwerte in Gleichung (7) bestimmen. In Bild 10 sind so approximierte Feuchtespeicherfunktionen für Kalksandstein, Porenbeton, Ziegel und Gipskarton im Vergleich zu weiteren Meßwerten dargestellt. Die gute Übereinstimmung zwischen Approximation und Meßwerten dieser vier Baustoffe beweist jedoch noch nicht generell, daß diese Approximation für alle Baustoffe geeignet ist; sie ist daher zunächst nur für abschätzende Berechnungen zu empfehlen.



**Bild 10** Vergleich der nach Gleichung (7) approximierten Feuchtespeicherfunktion von Kalksandstein, Porenbeton, Ziegel und Gipskarton mit den aus Sorptions- und Saugspannungsversuchen ermittelten Meßwerten [65]. Als Stützpunkte für die Approximation dienen die Ausgleichsfeuchte bei 80 % relativer Feuchte und der freie Wassergehalt.

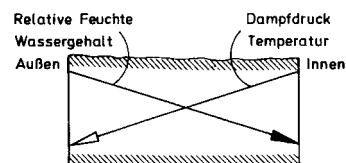
### 2.3 Feuchtetransportmechanismen

Wie in Ziffer 1 bereits dargelegt, werden Konvektionseffekte in Bauteilen aufgrund von Gesamtdruckdifferenzen weder beim Flüssig- noch beim Dampftransport berücksichtigt. Dasselbe gilt auch für die Einflüsse von Gravitation, elektrischen Feldern und Ionenkonzentrationsgradienten auf den Feuchtetransport. Die für bauphysikalische Berechnungen wesentlichen Feuchtetransportmechanismen bilden die Wasserdampfdiffusion und der Flüssigtransport durch Kapillarkräfte.

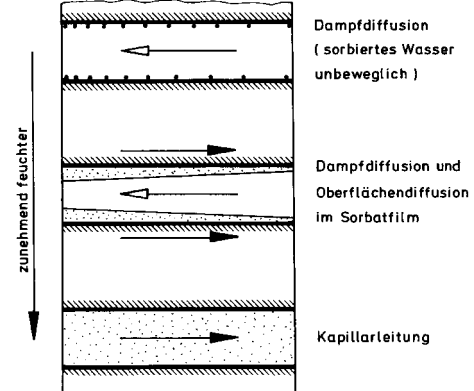
Das Zusammenwirken von Wasserdampfdiffusion und Flüssigtransport im Bauteil läßt sich am besten anhand des Schemas in Bild 11 erklären. Betrachtet man eine Kapillare im Bauteil, so herrscht unter winterlichen Bedingungen an der Innenraumseite eine höhere Temperatur und damit auch ein höherer Dampfdruck als auf der Außenseite. Aufgrund der höheren Außenluftfeuchte (etwa 80 % relative Feuchte im Jahresmittel in Deutschland) verläuft der Gradient der relativen Feuchte bzw. des Wassergehalts entgegengesetzt dazu. Ist das Bauteil

trocken, so findet in den betrachteten Kapillare nur Dampfdiffusion von innen nach außen statt; das an den Wandungen sorbierte Wasser bleibt unbeweglich aufgrund hoher Adhäsionskräfte. Steigt die Feuchte insgesamt an, so bildet sich auf der Porenwand ein Sorbatfilm, der im Außenbereich wegen der dort herrschenden größeren relativen Feuchte dicker ist als im Innenbereich. Je höher allerdings die Filmdicke ist, um so beweglicher werden die Wassermoleküle, wobei sie sich von Bereichen höherer Filmdicke in Bereiche mit geringerer Filmdicke bewegen. Dieser Vorgang wird als Oberflächendiffusion bezeichnet. Sein treibendes Gefälle ist der kapillare Unterdruck bzw. die relative Luftfeuchte. Damit gehört die Oberflächendiffusion wie die Kapillarleitung zum Flüssigtransport und nicht zur Dampfdiffusion, wie häufig angenommen. Durch die Oberflächendiffusion, die der Dampfdiffusion entgegengerichtet ist, wird der Feuchtetransport von innen nach außen in der betrachteten Kapillare vermindert, bei einer weiteren Zunahme der Gesamtfuchte durch Einsetzen der Kapillarleitung sogar umgekehrt.

#### Feuchtetransportpotentiale im Bauteil



#### Transportmechanismen in Baustoffporen



**Bild 11** Schematische Darstellung des Feuchtetransports in einem porösen hygroskopischen Baustoff bei entgegengerichteten Gradienten von Dampfdruck und relativer Feuchte (winterliche Bedingungen). Je höher die Bauteilfeuchte, desto größer wird der Flüssigtransport gegenüber der Dampfdiffusion bis zur Umkehr der Transportrichtung.

Daß diese anhand einer Modellkapillare durchgeführten Überlegungen tatsächlich zutreffen, wird in [67] bestätigt. Voraussetzung ist allerdings, daß die dem Kapillarenmodell zugrunde liegende Annahme, daß sich Dampf- und Flüssigtransport gegenseitig nicht beeinflussen, erfüllt ist. Im Sorptionsfeuchtebereich ist diese Voraussetzung bei den meisten Baustoffen erfüllt, da die Dampfdiffusion vor allem in den größeren Poren stattfindet, während der Flüssigtransport unabhängig davon über die Mikroporen und an den Porenwandungen abläuft. Die Einführung eines feuchteabhängigen Diffusionswiderstandes für Wasserdampfdiffusionsberechnungen, wie von verschiedenen Autoren vorgeschlagen, z.B. [41, 93, 109], trägt daher den physikalischen Gegebenheiten nicht Rechnung und führt zu Fehleinschätzungen.

### 2.3.1 Wasserdampfdiffusion

Die kinetische Gastheorie beschreibt die Diffusion von Molekülen in mehrkomponentigen Gasgemischungen durch Ansätze, die im wesentlichen drei Diffusionspotentiale, den Massenanteil, die Temperatur und den Gesamtdruck beinhalten [9]. Auf die Diffusion von Wasserdampf in Luft übertragen, ergibt sich daraus für bauphysikalische Betrachtungen bei vernachlässigbaren Gesamtdruckgradienten folgende vereinfachte Beziehung:

$$g_v = -(D_m \nabla m + D_T \nabla T) \quad (8)$$

$g_v$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Dampfdiffusionsstromdichte
$m$ [-]	Massenanteil des Wasserdampfes an der Gesamtmasse des Dampf-Luft-Gemisches
$T$ [K]	absolute Temperatur
$D_m$ [kg/ms]	massebezogener Diffusionskoeffizient
$D_T$ [kg/msK]	Thermodiffusionskoeffizient

Die durch Unterschiede im Massenanteil hervorgerufene Diffusion wird oft auch als Fick'sche Diffusion bezeichnet. Im Vergleich dazu ist die Thermodiffusion aufgrund von Temperaturgradienten - auch Soret-Diffusion genannt - in Bau-

teilen vernachlässigbar klein [4]. Da bei idealen Gasen ein proportionaler Zusammenhang zwischen dem Massenanteil einer Komponente und seinem Anteil am Gesamtdruck besteht [8], wird die Wasserdampfdiffusion in Luft zweckmäßigerweise durch folgende Gleichung beschrieben:

$$g_v = -\delta \nabla p \quad (9)$$

$g_v$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Wasserdampfdiffusionsstromdichte
$\delta$ [kg/msPa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
$p$ [Pa]	Wasserdampfpartialdruck

Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft kann nach DIN 52615 [24] in Abhängigkeit von der absoluten Temperatur und vom Luftdruck bestimmt werden:

$$\delta = 2,0 \cdot 10^{-7} T^{0,81} / P_L \quad (10)$$

$T$ [K]	Umgebungstemperatur
$P_L$ [Pa]	Umgebungsluftdruck

Statt des Wasserdampfpartialdrucks wird für Diffusionsberechnungen häufig die Dampfkonzentration verwendet. Bei nicht isothermen Verhältnissen ist dies im Grunde nicht zulässig. Die dadurch bedingten Fehler bei Diffusionsberechnungen sind allerdings unter praktischen Bedingungen klein [36].

Die Dampfdiffusion in porösen Baustoffen ist nur in großen Poren mit der Diffusion von Wasserdampf in Luft vergleichbar. Sind die Poren so klein, daß Zusammenstöße der Moleküle mit den Porenwandungen häufiger auftreten als Zusammenstöße der Moleküle untereinander, spricht man von Effusion oder Knudsentransport. Bei Umgebungsdruck herrscht in den Poren mit Radius  $< 5 \cdot 10^{-9}$  m reine Effusion und in den Poren größer als  $10^{-6}$  m Fick'sche Diffusion vor [34]. In den Porengrößen dazwischen kann man von einem Mischtransport sprechen. Bei der Effusion ist wie bei der Fick'schen Diffusion der Dampfdruck das treibende Gefälle. Die Temperaturabhängigkeit des Diffusions-



koeffizienten [58] und die Abhängigkeit vom Gesamtdruck - die Effusion ist druckunabhängig - unterscheiden sich von der Fick'schen Diffusion. Dennoch kann für die Belange der Bauphysik der Wasserdampftransport durch poröse Medien mit einem Ansatz beschrieben werden, bei dem das Zusammenwirken von Effusion und Fick'scher Diffusion in einer für den jeweiligen Baustoff charakteristischen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [64] berücksichtigt wird:

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} \nabla p \quad (11)$$

$g_v$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Wasserdampfdiffusionsstromdichte
$p$ [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
$\delta$ [kg/msPa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
$\mu$ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Gleichung ist allerdings, daß der Dampfdruck etwa 10 % des Gesamtdruckes nicht übersteigt, da es sonst vor allem in porösen Baustoffen zu Konvektionserscheinungen kommt, die besser mit dem Stefan'schen Ansatz [64] zu beschreiben sind. Für Temperaturen unter 40 °C ist diese Voraussetzung immer erfüllt [61], wobei bei kleinen relativen Feuchten auch höhere Temperaturen zulässig sind.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, die das Verhältnis aus den Diffusionsleitkoeffizienten von Wasserdampf in Luft und im Baustoff darstellt, ist nach Messungen in [93] und [118] temperaturunabhängig. Ihre Abhängigkeit vom Wassergehalt soll im folgenden noch kurz diskutiert werden. Wie bereits erwähnt, kann der Diffusionswiderstand der meisten Baustoffe im Sorptionsfeuchtebereich als konstant angesehen werden. Da in diesem Feuchtebereich Dampf- und Flüssigtransport weitgehend unabhängig voneinander ablaufen, ist das auch physikalisch plausibel. Im Kapillarwasserbereich kann diese Unabhängigkeit nicht mehr eindeutig vorausgesetzt werden. Da hier auch größere

Poren mit Wasser gefüllt sind, kann es zur Behinderung oder wie vielfach angenommen, zur Beschleunigung des Diffusionstransportes durch Wasserinseln kommen. Theoretische Überlegungen, deren Konsequenzen mit Meßergebnissen verglichen wurden [80], deuten darauf hin, daß die Beantwortung der Frage, ob Wasserinseln in den Baustoffporen beschleunigend oder bremsend auf die Dampfdiffusion wirken, von den lokalen Temperatur- und Feuchteverhältnissen im Bauteil abhängt. In Bereichen mit hohen Temperatur-, aber kleinen Feuchtegradienten kommt es zu einer Beschleunigung des Dampftransportes durch Wasserinseln im Porengefüge, während bei hohen Feuchtegradienten, beispielsweise in der Trocknungszone, mit dem gegenteiligen Effekt zu rechnen ist. Quantifizierbar sind diese Einflüsse bisher nicht. Da es sich außerdem um ein Phänomen handelt, das nur bei höheren Wassergehalten auftritt, wenn die Kapillarleitung über die Dampfdiffusion dominiert, erscheint es angemessen, beim Konzept des feuchteunabhängigen Dampfdiffusionswiderstandes zu bleiben.

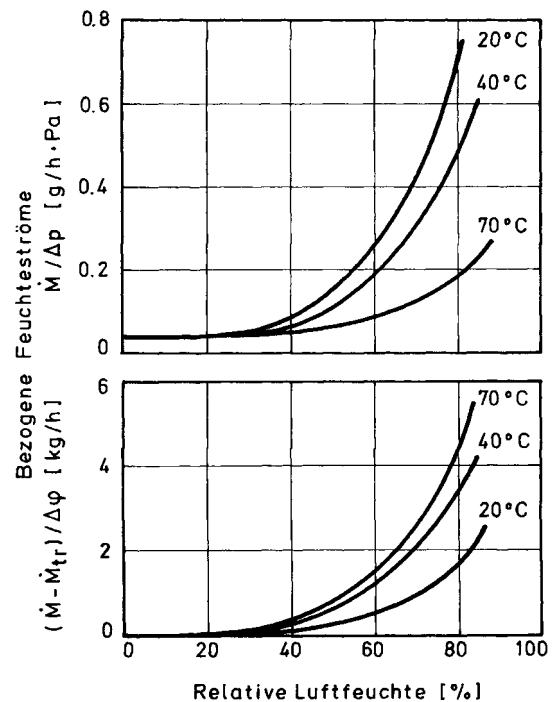
### 2.3.2 Oberflächendiffusion

Wie eingangs ausgeführt, wird als Oberflächendiffusion der Feuchtetransport in den an den Porenwänden hygroskopischer Stoffe sorbierten Wassermolekülschichten und in Mikrokapillaren bezeichnet. Im Gegensatz zur Kapillarleitung, von der man normalerweise erst bei Wassergehalten über der in [116] beschriebenen kritischen Feuchte im überhygroskopischen Bereich spricht, fängt die Oberflächendiffusion bei Papieren [112] bereits bei 30 % relativer Feuchte und bei Sandsteinen [65] bei etwa 60 % relativer Feuchte spürbar an. Welche Ausmaße die Oberflächendiffusion im Vergleich zur Dampfdiffusion annehmen kann, ist in Bild 12 am Beispiel einer Papiermembran dargestellt. Im oberen Diagramm ist der Diffusionsstrom durch die Membran bezogen auf die Partialdruckdifferenz dargestellt, wobei es sich unter 20 % relativer Feuchte um reine Dampfdiffusion handelt, während der bei etwa 30 % relativer

Feuchte einsetzende Anstieg des Diffusionsstroms mit der Feuchte ausschließlich auf Oberflächendiffusion zurückzuführen ist. Daß es sich bei der Oberflächendiffusion um einen Flüssigtransport handelt, dessen treibendes Potential die relative Feuchte ist, kann ebenfalls anhand von Bild 12 erläutert werden. Die wesentlich stärkere Zunahme des auf den Partialdruck bezogenen Diffusionsstroms bei tieferen Temperaturen, obwohl der Dampfdiffusionskoeffizient mit der Temperatur steigt (Gleichung 10), zeigt, daß der Partialdruck nicht das treibende Potential sein kann. Wird jedoch der reine Oberflächendifusionsstrom auf die relative Feuchte statt auf den Partialdruck bezogen und über der Feuchte aufgetragen (Bild 12 unten), zeigt sich bei höheren Temperaturen auch ein höherer Oberflächenstrom, was aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Oberflächendifusionskoeffizienten zu erwarten ist, nach [97] ist er umgekehrt proportional zur Viskosität des Wassers. Dieses Beispiel zeigt gleichzeitig, daß selbst unter isothermen Bedingungen, wenn die treibenden Potentiale für den Dampf- und Flüssigtransport gleichgeschaltet sind, das Einbeziehen der Oberflächendifusion in den Dampfdiffusionsansatz mittels feuchteabhängiger Diffusionswiderstandszahl zu Fehlern bei der Berechnung führt, wenn Unterschiede zwischen der Temperatur der Koeffizientenbestimmung und der Berechnungstemperatur vorliegen. Es ist daher sinnvoll, die Oberflächendifusion zusammen mit der Kapillarleitung durch einen von der Dampfdiffusion unabhängigen Ansatz zu berücksichtigen.

### 2.3.3 Kapillarleitung

Wengleich von Kapillarleitung, wie bereits erwähnt, erst bei Wassergehalten über der kritischen Feuchte gesprochen wird, tritt diese Form des Flüssigtransports in Mikrokapillaren schon wesentlich darunter auf. Ähnlich wie beim Dampftransport, der je nach Porengröße in Form von Effusion oder Fick'scher Diffusion stattfindet, treten auch beim Flüssigtransport in der Regel die Kapillarleitung und die Oberflä-



**Bild 12** Abhängigkeit der gemessenen Feuchteströme  $\dot{M}$  durch eine Papiermembran [112] von der mittleren relativen Feuchte  $\varphi$  und der Umgebungstemperatur. Bezieht man den Feuchtestrom auf die Dampfdruckdifferenz  $\Delta p$  (oben), so nimmt er im Widerspruch zu den Gasdiffusionsgesetzen mit steigender Temperatur ab. Bezieht man die feuchtebedingte Erhöhung der Feuchteströme (Feuchtestrom  $\dot{M}$  minus Feuchtestrom unter trockenen Bedingungen  $\dot{M}_{tr}$ ) auf die relative Feuchte (unten), entspricht die Temperaturabhängigkeit den physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

chendiffusion gleichzeitig auf. Deshalb können sie rechnerisch auch nur gemeinsam erfaßt werden. Zunächst stellt sich die Frage, ob der Flüssigtransport überhaupt, wie in [64] und [57] vorgeschlagen, durch einen Diffusionsansatz sinnvoll beschreibbar ist. Ein Diffusionsansatz setzt voraus, daß der Feuchtestrom an jeder Stelle proportional zu dem dort auftretenden Wassergehaltsgefälle ist. Während dies für die Oberflächendiffusion zutrifft, ist diese Voraussetzung beim Saugen in einer isoliert

betrachteten Kapillaren nicht gegeben. Dort ist der Konzentrationsgradient überall Null, bis auf jene Stelle, wo sich der Meniskus mit theoretisch "unendlichem" Feuchtegradienten befindet. Die sich beim Saugen im Kontakt mit Wasser zeitlich verändernde Position des Meniskus läßt sich für eine zylindrische Kapillare mit Hilfe des Hagen-Poiseuill'schem Gesetzes und Gleichung (12) berechnen:

$$s = \sqrt{\frac{\sigma r \cos \Theta}{2\eta} t} \quad (12)$$

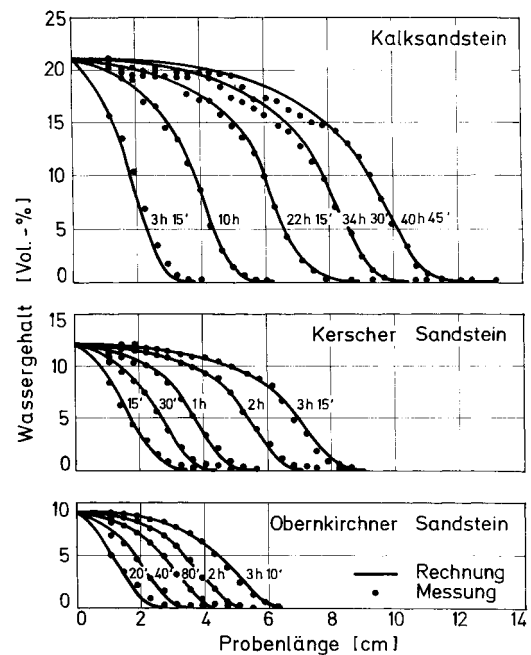
s [m]	Wassereindringtiefe
r [m]	Kapillarradius
$\sigma$ [N/m]	Oberflächenspannung des Wassers
$\Theta$	Randwinkel
$\eta$ [kg/ms]	Viskosität des Wassers
t [s]	Saugzeit

Obwohl es sich beim kapillaren Saugen eindeutig um eine "Strömung" handelt, kann der von vielen Autoren verwendete Diffusionsansatz

$$g_w = -D_w(w) \nabla w \quad (13)$$

$g_w$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Flüssigtransportstromdichte
w [kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt
$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	Kapillartransportkoeffizient

mit stark wassergehaltsabhängigen Kapillartransportkoeffizienten  $D_w$  unter bestimmten Voraussetzungen zu guten Approximationen des Saugvorgangs führen. Das hat folgenden Grund: Nach Crank [18] zeigt ein Diffusionsansatz auch mit konzentrationsabhängigen Diffusionskoeffizienten die gleiche Wurzelzeitabhängigkeit der Massenzunahme wie der kapillare Saugvorgang (Gleichung 12). Durch exponentielle Variation des Flüssigtransportkoeffizienten lassen sich, wie der Vergleich von Messungen und Berechnungen in Bild 13 zeigt, Wassergehaltsprofile erzeugen, die denen beim Saugvorgang sehr ähnlich sind.



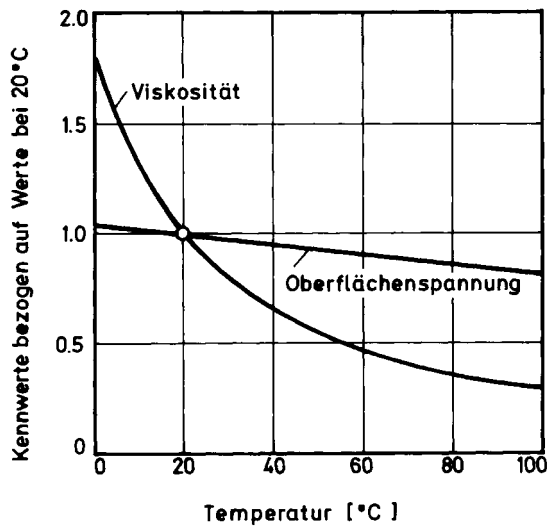
**Bild 13** Gemessene und gemäß Gleichung (13) berechnete Feuchteprofile in Steinprismen zu verschiedenen Zeiten während des kapillaren Saugvorgangs [68]. Die gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung wurde durch Anpassung der exponentiell mit dem Wassergehalt ansteigenden Kapillartransportkoeffizienten erreicht, die bei den drei Steinsorten einen Bereich von etwa drei Zehnerpotenzen durchlaufen.

Die Temperaturabhängigkeit von  $D_w$  basiert auf der Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung  $\sigma$  und Viskosität  $\eta$  des Wassers [57], wobei erstere, wie Bild 14 zeigt, vernachlässigbar ist. Es kann daher, wie in [19] auch experimentell bestätigt, folgende Beziehung für die Temperaturabhängigkeit von  $D_w$  angegeben werden:

$$D_w(\vartheta) = \frac{\eta_{\text{ref.}}}{\eta(\vartheta)} D_{w,\text{ref.}} \quad (14)$$

$\eta$  [kg/ms] Viskosität des Wassers

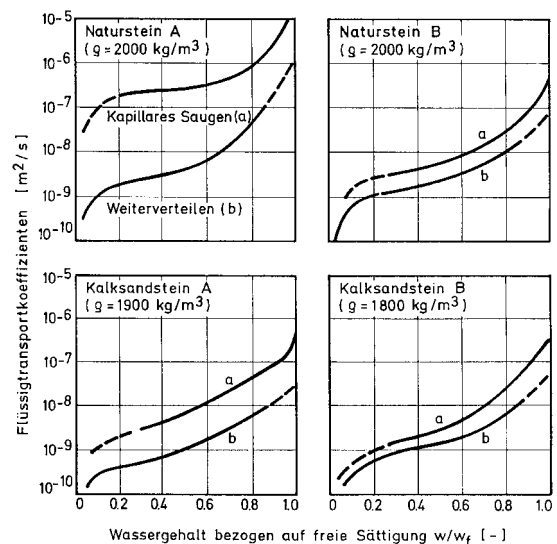
Als Referenztemperatur sollte zweckmäßigerweise 20 °C gewählt werden, da die Bestimmung der Flüssigleitkoeffizienten meist im Labor bei Zimmertemperatur durchgeführt wird.



**Bild 14** Änderung der Viskosität und der Oberflächenspannung von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur, bezogen auf die Werte bei 20 °C, nach [21]. Während die Viskosität im bauphysikalisch wichtigen Bereich von 0 bis 40 °C fast auf ein Drittel absinkt, verändert sich die Oberflächenspannung um weniger als 10 %.

Trotz der guten Übereinstimmung von Messung und Rechnung in Bild 13 ist der Ansatz nach Gleichung (13) problematisch. Bereits Krischer [64] hat darauf hingewiesen, daß der Kapillartransportkoeffizient  $D_W$  auch von den Randbedingungen abhängt, eine Tatsache, die durch Untersuchungen in [106] bestätigt wurde. Besonders deutlich wird dieses Problem bei Unterbrechung des Saugvorganges, der von den größeren Kapillaren aufgrund ihrer höheren Saugeschwindigkeit bestimmt wird. Sobald das Wasser von der Saugfläche entfernt wird, kommt es dort zu einer Krümmung der Menisken, bis sich die Saugkräfte dieser Menisken und der Menisken im Bereich der Wasserfront gegenseitig annähernd aufheben. Die kapillare Weiterverteilung der Feuchtigkeit kann jetzt nur noch durch das Füllen kleiner Poren auf Kosten der größeren stattfinden, ein Vorgang, der relativ langsam abläuft. Meßergebnisse in [40] und [59] an verschiedenen kapillaraktiven Baustoffen zeigen, daß die bei der Weiterverteilung ermittelten Kapillartransportkoeffizienten im Vergleich zum Saugvorgang um mehr als eine Zehnerpotenz kleiner sein können. Dies wird in Bild 15 anhand der feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten von vier verschiedenen

Baustoffen verdeutlicht. Während bei ähnlicher Größenordnung der Flüssigtransportkoeffizienten für die Weiterverteilung der Abstand zu den Koeffizienten für das kapillare Saugen beim feinporösen Naturstein B und dem Kalksandstein B etwa den Faktor 3 bis 5 ausmacht, erreicht er beim Kalksandstein A ca. eine und beim grobporigen Naturstein A sogar bis zu zwei Zehnerpotenzen. Es ist deshalb sinnvoll, den kapillaren Flüssigtransport in porösen Stoffen durch zwei verschiedene Transportkoeffizienten für das Saugen und Weiterverteilen zu charakterisieren. Der Vorgang der Weiterverteilung, der in einer isoliert betrachteten Kapillare nicht stattfinden kann, sondern nur durch das Zusammenspiel unterschiedlich großer Poren zu verstehen ist, entspricht makroskopisch betrachtet den Bedingungen eines Diffusionsmodells.



**Bild 15** Flüssigtransportkoeffizienten von vier verschiedenen Bausteinen in Abhängigkeit vom normierten Wassergehalt [65]. Der Unterschied zwischen den Koeffizienten für das kapillare Saugen in Kontakt mit Wasser (a) und für das Weiterverteilen nach Unterbrechung der Wasserzufuhr (b) ist beim grobporigen Naturstein A wesentlich größer als beim feinporigen Naturstein B. Auch beim Kalksandstein gibt es dichte- oder produktionsbedingte Unterschiede bei den Transportkoeffizienten, die jedoch weniger ausgeprägt sind.

Physikalisch einleuchtender ist die Beschreibung des Flüssigtransports in porösen Baustoffen durch ein Strömungsmodell. Ausgehend

vom im Wasserbau üblichen Darcy-Ansatz [9] für laminare Strömungen in wassergesättigten porösen Stoffen läßt sich für den Flüssigtransport folgende Beziehung angeben:

$$g_w = K_1 \nabla P_k \quad (15)$$

$g_w$  [kg/m<sup>2</sup>s] Flüssigtransportstromdichte  
 $K_1$  [kg/msPa] Durchlässigkeitskoeffizient  
 $P_k$  [Pa] kapillarer Unterdruck

Im Gegensatz zur Strömung durch wassergesättigte Stoffe, bei der von einem näherungsweise konstanten Durchlässigkeitskoeffizienten  $K_1$  ausgegangen wird, ist dieser Koeffizient unterhalb der freien Wassersättigung stark feuchteabhängig, da der Strömungswiderstand von Kapillaren mit kleiner werdendem Radius quadratisch ansteigt. Ersetzt man den kapillaren Unterdruck in Gleichung (15) durch die Kelvin-Beziehung in Gleichung (2) und multipliziert die konstanten Glieder zu  $K_1$ , folgt daraus für den Kapillartransport:

$$g_w = -K_2 \nabla (T \ln \varphi) \quad (16)$$

$K_2$  [kg/msK] Kapillarleitkoeffizient  
 $T$  [K] absolute Temperatur  
 $\varphi$  [-] relative Feuchte

Differenziert man Gleichung (16) nach der Temperatur und der relativen Feuchte, ergibt sich:

$$g_w = -K_2 \frac{T}{\varphi} \nabla \varphi - K_2 \ln \varphi \nabla T \quad (17)$$

$g_w$  [kg/m<sup>2</sup>s] Flüssigtransportstromdichte  
 $K_2$  [kg/msK] Kapillarleitkoeffizient  
 $T$  [K] absolute Temperatur  
 $\varphi$  [-] relative Feuchte

Der zweite Term dieser Gleichung, der den Kapillartransport aufgrund eines Temperaturgradienten beschreibt, ist unter praktischen Bedingungen klein im Vergleich zum ersten Term; bei einer relativen Feuchte von Eins wird er sogar Null. Er wird deshalb im folgenden vernachlässigt. Faßt man im ersten Term die Glieder vor dem Gradienten in einem Koeffizienten zusammen, der hier als Flüssigleitkoeffizient  $D_\varphi$

bezeichnet werden soll, so kann der Flüssigtransport in porösen Baustoffen durch folgende vereinfachte Beziehung beschrieben werden:

$$g_w = -D_\varphi \nabla \varphi \quad (18)$$

$g_w$  [kg/m<sup>2</sup>s] Flüssigtransportstromdichte  
 $D_\varphi$  [kg/ms] Flüssigleitkoeffizient  
 $\varphi$  [-] relative Feuchte

Im Gegensatz zu Gleichung (13) enthält Gleichung (18) ein stoffunabhängiges, auch an Schichtgrenzen stetiges Feuchtepotential. Durch Vergleich dieser beiden Gleichungen läßt sich jedoch folgender Zusammenhang zwischen ihren Transportkoeffizienten herstellen:

$$D_\varphi = D_w \cdot dw / d\varphi \quad (19)$$

$D_\varphi$  [kg/ms] Flüssigleitkoeffizient  
 $D_w$  [m<sup>2</sup>/s] Kapillartransportkoeffizient  
 $dw/d\varphi$  [kg/m<sup>3</sup>] Ableitung der Feuchtespeicherfunktion

Diese Beziehung erlaubt es, bei Wassergehalten im Kapillarwasserbereich (> 95 % relative Feuchte), in dem die relative Feuchte meßtechnisch nicht mehr exakt erfaßt werden kann, den Flüssigleitkoeffizienten  $D_\varphi$  aus der Feuchtespeicherfunktion und dem Kapillartransportkoeffizienten  $D_w$  zu bestimmen. Konsequenterweise müßte dann auch für  $D_\varphi$  eine Differenzierung zwischen dem kapillaren Saugvorgang und der Weiterverteilung vorgenommen werden, obwohl es dafür - dem Ansatz (18) liegt ein Strömungsmodell zugrunde - keine physikalische Begründung gibt. Es handelt sich hier um ein Hilfsmodell, durch das schwer erfaßbare Hystereseeffekte in der Feuchtespeicherfunktion unberücksichtigt bleiben können. In Wirklichkeit ändert sich  $D_\varphi$  beim Übergang vom Saugen zum Weiterverteilen nicht. Durch die Krümmung der Menisken auf der Befeuchtungsseite nach Unterbrechung der Wasserzufuhr steigt dort jedoch der kapillare Unterdruck rasch an und die relative Feuchte fällt entsprechend ab, was zu der bereits geschilderten Verzögerung des Feuchteausgleichs führt. Da sich dabei der

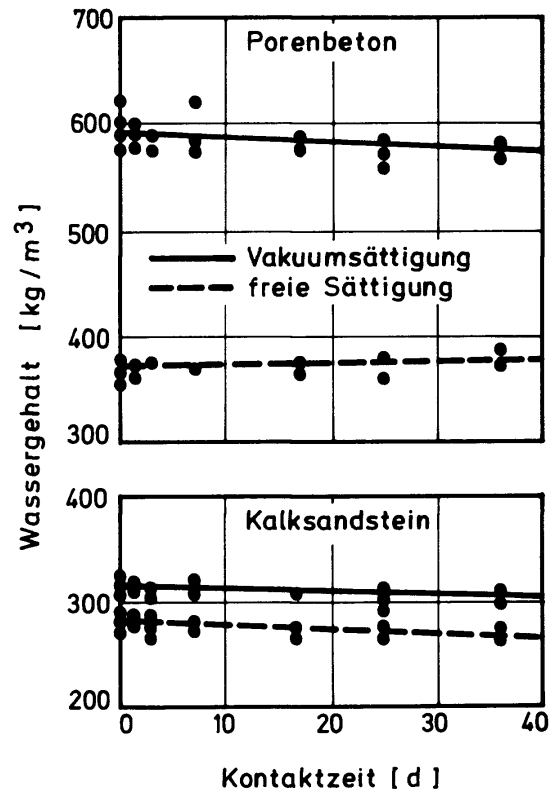
lokale Wassergehalt kaum ändert, handelt es sich hier um eine Art "instationäre Hysterese" der Feuchtespeicherfunktion.

### 2.3.4 Feuchtetransport im übersättigten Bereich

Wie bereits in Ziffer 2.2.3 beschrieben, ist im Übersättigungsbereich, also bei Wassergehalten über der freien Wassersättigung, die relative Feuchte überall 100 %. Damit ist aber auch der kapillare Unterdruck praktisch Null, d.h. Flüssigtransport durch Kapillarleitung kann es im Prinzip nicht geben. Diese Feststellung wird durch eigene Untersuchungen [70] bestätigt. Bei der dortigen Meßreihe wurden Proben aus Porenbeton und Kalksandstein jeweils paarweise mittels einer dünnen Schicht aus Kaolin kapillar miteinander verbunden, wobei jeweils eine Scheibe frei gesättigt und die andere vakuumgesättigt war. Anschließend wurden die Probenpaare versiegelt und bis zu vierzig Tagen gelagert. Trotz der Unterschiede im Wassergehalt der miteinander verbundenen Scheiben fand so gut wie kein Feuchteausgleich statt, wie in Bild 16 anhand der Meßwerte von Porenbeton- und Kalksandsteinproben zu sehen ist.

Als weiteres Beispiel für einen nur sehr geringen Kapillartransport im Übersättigungsbereich können Feuchteprofil-Messungen von Nielsen [99] dienen. In Bild 17 sind die Feuchteprofile in einer unter Laborbedingungen einseitig austrocknenden maximal wassergesättigten Porenbetonprobe für verschiedene Zeitpunkte dargestellt. Nach anfangs zur Versuchsfläche hin stark abfallenden Feuchteprofilen stellt sich bei Erreichen der freien Wassersättigung (etwa  $320 \text{ kg/m}^3$ ) ein ausgeglichenes Feuchtefeld ein, das erst bei Unterschreiten des kritischen Wassergehalts (ca.  $180 \text{ kg/m}^3$ ) wieder einen stärkeren Abfall auf der Trocknungsseite zeigt. Dieses Phänomen ist nur dadurch zu erklären, daß im übersättigten Bereich kaum Kapillartransportvorgänge stattfinden, denn das Transportpotential, der kapillare Unterdruck bzw. die relative Feuchte sind über den Querschnitt gleich. Erst bei Unterschreiten der freien

Wassersättigung entsteht ein definierter Zusammenhang zwischen Feuchtepotential und Wassergehalt, wobei ein leichtes Potentialgefälle bei hoher Kapillarleitfähigkeit zu einem über dem Querschnitt fast ausgeglichenen Feuchtefeld führt. Erst bei weiterer Verminderung der Kapillarleitung entstehen durch Unterschreiten der kritischen Feuchte wieder ausgeprägte Wassergehaltsprofile.

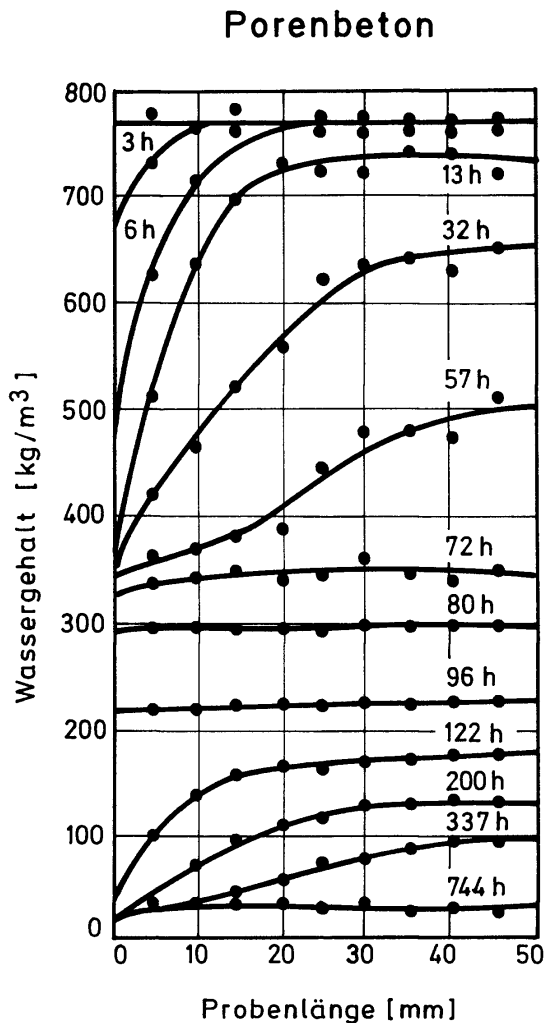


**Bild 16** Feuchtezustand von kapillar verbundenen Probenpaaren mit je einer vakuum- und einer frei gesättigten Proben-scheibe aus Porenbeton (oben) bzw. Kalksandstein (unten) in Abhängigkeit von der Kontaktzeit.

Der über 40 Tage fast gleichbleibende Feuchteunterschied der verbundenen Probenpaare zeigt den geringen Feuchteausgleich im Übersättigungsbereich.

Auch wenn die Kapillarleitung im Übersättigungsbereich keine Rolle spielt, so kann dennoch eine Feuchtwanderung zu beobachten sein. Vor allem bei grobporigen Baustoffen sind hierfür Gravitationseffekte verantwortlich. Unter dem Einfluß von Temperaturgradienten kann auch die Dampfdiffusion je nach Porenfüllgrad eine wesentliche Rolle spielen. Ebenso können Dampfdruckunterschiede, die bei Behinderung des Luftaustausches zu Gesamtdruckunter-

schieden werden, das Porenwasser bewegen. Insgesamt ist der Feuchtetransport im übersättigten Bereich kapillaraktiver Baustoffe modellmäßig schwer zu erfassen. Da diese Zustände meist nur vorübergehend auftreten, ist es im allgemeinen ausreichend, mit den vorhandenen Kapillartransportansätzen zu rechnen, wobei die Transportkoeffizienten für den jeweiligen Fall ermittelt werden müssen.



**Bild 17** Gemessene Feuchtprofile in einer einseitig austrocknenden 50 mm langen, vollständig wassergesättigten Porenbetonprobe zu verschiedenen Zeitpunkten nach Beginn der Trocknung. Die Messungen wurde mit Hilfe von Gammastrahlen unter Umgebungsbedingungen von 21,5 °C und 52 % relativer Feuchte bei einer Luftgeschwindigkeit von 1,5 m/s durchgeführt [99].

### 2.3.5 Lösungsdiffusion

Als Lösungsdiffusion wird der Feuchtetransport in organischen Polymeren bezeichnet, die am Bauwerk z.B. für Abdichtungen und Beschich-

tungen als Dampfsperren oder -bremsen sowie Unterspannbahnen verwendet werden. Im Gegensatz zu mineralischen Baustoffen und den meisten Dämmmaterialien, die ein weitgehend starres Porensystem besitzen, in dem Feuchte flüssig oder dampfförmig transportiert wird, schafft sich das Wasser in Polymeren durch Anlagerung an die Makromoleküle diesen Porenraum selbst, wobei die Kunststoffe quellen. Da die Bewegung der eingelagerten Wassermoleküle an die Bewegung der Polymermoleküle gekoppelt ist, muß zunächst untersucht werden, ob die Lösungsdiffusion mit den bisher vorgestellten Ansätzen beschrieben werden kann. Nach einer Ausarbeitung von Buchner [15] ist die Lösungsdiffusion von Gasen und Dämpfen in organischen Polymeren durch folgende Beziehung berechenbar:

$$g = -D_L \cdot L \nabla p \quad (20)$$

$g$  [kg/m<sup>2</sup>s] Diffusionsstromdichte  
 $D_L$  [m<sup>2</sup>/s] Lösungsdiffusionskoeffizient  
 $L$  [kg/m<sup>3</sup>Pa] Löslichkeit  
 $p$  [Pa] Partialdruck

Die Löslichkeit des Polymers für Wasserdampf hängt davon ab, ob die Makromolekülketten sowie der Weichmacher polar oder unpolar sind. Sie nimmt mit der Temperatur exponentiell ab. Der Lösungsdiffusionskoeffizient hängt von der Struktur und dem Vernetzungsgrad des Polymers ab. Er nimmt mit der Temperatur stark zu.

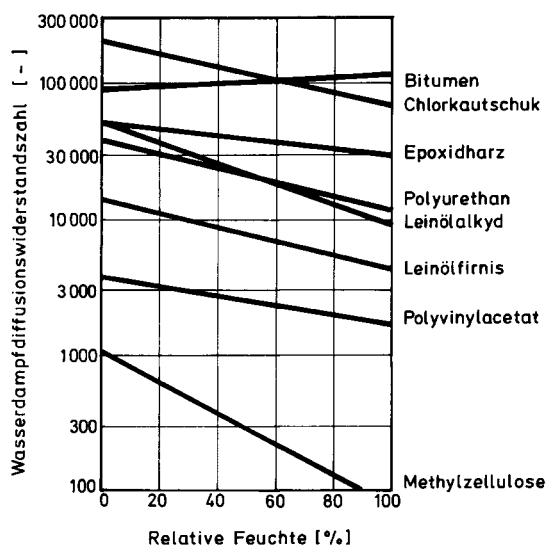
Verglichen mit den bereits beschriebenen Feuchtetransportansätzen läßt sich die Lösungsdiffusion am besten mit der Dampfdiffusionsgleichung (11) vergleichen, wobei für die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  gilt:

$$\mu = \frac{\delta}{D_L \cdot L} \quad (21)$$

$\mu$  [-] Dampfdiffusionswiderstandszahl  
 $\delta$  [kg/msPa] Dampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft

Die so definierte Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  für polymere Filme oder Folien ist im Gegensatz zu anderen Baustoffen temperatur- und feuchteab-

hängig, wobei sie je nach Kunststoffart mit steigender Temperatur bzw. Feuchte abnehmen, aber auch zunehmen kann. Die Abnahme des Diffusionswiderstands von hydrophilen Polymeren mit steigender Feuchte ist besonders ausgeprägt [60]. Da zwischen dem Wert im trockenen Zustand und bei annähernd 100 % relativer Feuchte, wie in Bild 18 zu sehen, bis zu eine Zehnerpotenz liegen kann, sollte die Feuchteabhängigkeit in jedem Fall durch eine variable Diffusionswiderstandszahl berücksichtigt werden, während die Temperaturabhängigkeit im allgemeinen aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt werden darf.



**Bild 18** Feuchteabhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl verschiedener organischer Bau- und Beschichtungstoffe nach [61].  
Der Unterschied zwischen dem Diffusionswiderstand im trockenen und nassen Zustand kann bei einigen Kunststoffen bis zu einer Zehnerpotenz ausmachen.

### 2.3.6 Feuchtetransport unter dem Gefrierpunkt

Im Gegensatz zum Dampfdiffusionswiderstand über dem Gefrierpunkt, der, wie in Ziffer 2.3.1 begründet, als feuchteunabhängig anzusetzen ist, kann es durch Eisbildung bei hohen Baustofffeuchten zu einer Sperrwirkung gegenüber der Dampfdiffusion kommen. Untersuchungen in [4] an Kugelschüttungen zeigen, daß sich der Diffusionswiderstand durch Reifbildung bis zu einem Porenfüllgrad von etwa 60 % nur wenig ändert. Dies ist durch die Dominanz des

Diffusionsstroms in den großen, wenig verzweigten Poren, die erst bei hohen Wassergehalten gefüllt werden, zu erklären. Deshalb kann in den meisten Fällen der Einfluß von Eisbildung auf die Dampfdiffusion unberücksichtigt bleiben.

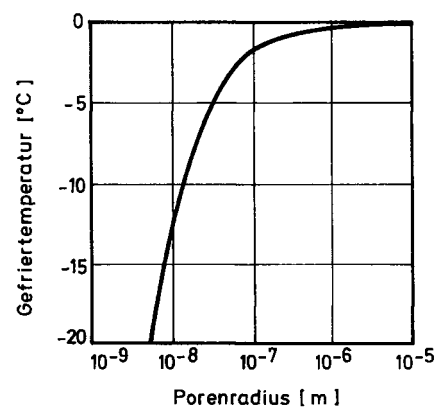
Stärker als der Dampftransport wird der Flüssigtransport durch Frost beeinflusst. Unter Null Grad Celsius findet kein kapillares Saugen mehr statt. Das Wasser in den Mikroporen und an den Porenwänden gefriert jedoch erst bei tieferen Temperaturen, so daß auch unter Null Grad noch ein Flüssigtransport relativ unbehindert durch die Eisbildung in den großen Poren möglich ist [97]. In Bild 19 ist die Gefriertemperatur des Porenwassers in Abhängigkeit vom Porenradius dargestellt. Die aus dem Porenradius mit Hilfe der Kelvinbeziehung (Gleichung (2)) und Gleichung (1) berechnete relative Feuchte über den Menisken des gerade noch nicht gefrorenen Porenwassers wird als Gefrierpotenzial bezeichnet. Seine Abhängigkeit von der Temperatur ist in Bild 20 dargestellt. Aus diesem Grenzpotenzial ergibt sich mit Hilfe der Feuchtespeicherfunktion der maximale Gehalt noch flüssigen und damit beweglichen Wassers bei der entsprechenden Bauteiltemperatur. Für den Flüssigleitkoeffizienten unter Null Grad Celsius folgt daraus:

$$D_{\varphi}(\varphi) \leq D_{\varphi}(\varphi_e) \quad (22)$$

$D_{\varphi}$ [kg/ms] Flüssigleitkoeffizient

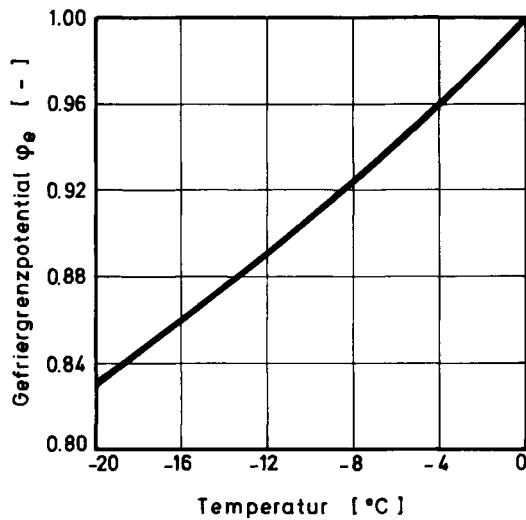
$\varphi$  [-] relative Feuchte

$\varphi_e$  [-] Gefrierpotenzial



**Bild 19** Abhängigkeit der Gefriertemperatur des Porenwassers in Zylinderkapillaren vom Porenradius nach [97].





**Bild 20** Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Gefriergrenzpotential, das der relativen Feuchte über dem gerade noch nicht gefrorenen Porenwasser entspricht, in porösen kapillaraktiven Baustoffen.

### 2.3.7 Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten

Für die Diffusionswiderstandszahlen  $\mu$  von Baustoffen sind Anhaltswerte in DIN 4108, Teil 4 [23] tabelliert. Zur genauen Bestimmung des Dampfdiffusionswiderstandes eines Baustoffes können stationäre Diffusionsmessungen, wie in DIN 52 615 [24] beschrieben, oder bei homogenen Stoffen auch instationäre Diffusionsmessungen [85] durchgeführt werden. Wie bereits dargelegt, ist bei der Wahl des Meßfeuchtebereichs darauf zu achten, daß Oberflächendiffusionseffekte vernachlässigbar klein sind. Dies ist im allgemeinen für den in DIN 52 615 [24] definierten Trockenbereich (3 bis 50 % relative Feuchte) der Fall.

Die Bestimmung der Feuchteleitkoeffizienten  $D_\varphi$  ist demgegenüber aufwendiger. Im Sorptionsfeuchtebereich kann  $D_\varphi$  durch die Bestimmung fiktiver\*) Dampfdiffusionswiderstandszahlen  $\mu^*$  analog zur Messung in DIN 52 615 [24], aber in

\*) Als fiktiv werden in dieser Arbeit Kennwerte bezeichnet, die einem bestimmten Transportansatz (hier Diffusionsansatz) zugeordnet werden, jedoch aufgrund ihrer experimentellen Bestimmung auch andere mit den Versuchsbedingungen variierende Transportanteile (hier Flüssigtransport) enthalten.

höheren Feuchtebereichen aus folgender Beziehung berechnet werden:

$$D_\varphi(\varphi) = p_{\text{sat}} \delta \left( \frac{1}{\mu^*(\varphi)} - \frac{1}{\mu} \right) \quad (23)$$

$D_\varphi$  [kg/ms] Flüssigleitkoeffizient

$p_{\text{sat}}$  [Pa] Sättigungsdampfdruck bei Versuchstemperatur

$\delta$  [kg/msPa] Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft

$\mu$  [-] Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (im trockenen Zustand)

$\mu^*$  [-] fiktive Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (bei höherer Feuchte gemessen)

Als Beispiel sind in Tabelle 3 die Dampfdiffusionswiderstände im Trocken- und Feuchtebereich für verschiedene kapillaraktive Baustoffe aufgeführt. Während die im Feuchtebereich gemessene Diffusionswiderstandszahl  $\mu^*$  bei einigen Stoffen kaum kleiner ist als die im Trockenbereich bestimmte Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ , ergibt sich bei den drei am Ende von Tabelle 3 dargestellten Natursteinen eine Halbierung des Diffusionswiderstandes im Feuchtebereich. Entsprechend unterschiedlich sind auch die aus diesen Ergebnissen mit Hilfe von Gleichung (23) berechneten Flüssigleitkoeffizienten der verschiedenen Baustoffe im zugrundeliegenden Feuchtebereich.

Im Kapillarwasserbereich wird  $D_\varphi$  als Produkt aus der Ableitung der Feuchtespeicherfunktion und des wassergehaltsabhängigen Kapillarttransportkoeffizienten errechnet. Die meßtechnische Bestimmung von  $D_W$  kann durch Messung instationärer Feuchteprofile in Baustoffproben, wie in [59] beschrieben, erfolgen: Da die meßtechnische Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten aufwendig ist, soll im folgenden eine vereinfachte Bestimmungsmethode vorgestellt werden, die in vielen Fällen ausreichend genau ist.

**Tabelle 3** Dampfdiffusionswiderstandszahlen verschiedener Baustoffe gemessen nach DIN 52615 [24] im Trocken- und Feuchtbereich.  
Die Unterschiede der Ergebnisse von Trocken- und Feuchtbereichsmessung, die auf Flüssigtransporteffekte zurückzuführen sind, können zur Bestimmung des Flüssigleitkoeffizienten dienen.

Baustoff	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Dampfdiffusionswiderstandszahl	
		Trockenbereich (3 % - 50 % r.F.)	Feuchtbereich (50 % - 93 % r.F.)
Porenbeton	500	7,7	7,1
Kalksandstein	1700	27	18
Vollziegel	1600	9,5	8,0
Gipskarton	900	8,3	7,3
Beton	2250	260	210
Kalkzementmörtel	1900	19	18
Kalkmörtel	1400	7,3	6,4
Saaler Sandstein	2300	60	28
Wüstenzeller Sandstein	2300	62	38
Worzeldorfer Sandstein	2250	38	22

Der bekannte Kennwert zur Beschreibung der kapillaren Saugeigenschaften eines Baustoffes im Kontakt mit Wasser ist der Wasseraufnahmekoeffizient A (in DIN 52 617 [25] mit w bezeichnet). Zwischen diesem Wasseraufnahmekoeffizient A und dem Kapillartransportkoeffizient bei Kontakt mit Wasser  $D_{WS}$  besteht ein Zusammenhang, der allerdings aufgrund der Feuchteabhängigkeit von  $D_{WS}$  nicht eindeutig ist. Deshalb sind weitere Annahmen erforderlich, die diese Feuchteabhängigkeit genauer beschreiben. Wie Kießl [57] zeigt, läßt sich der Anstieg von  $D_{WS}$  mit dem Wassergehalt in vielen Fällen näherungsweise durch eine Exponentialfunktion darstellen, die sich bei den meisten mineralischen Baustoffen über etwa drei Zehnerpotenzen erstreckt. Unter diesen Voraussetzungen läßt sich der Kapillartransportkoeffizient für den Saugvorgang wie folgt bestimmen:

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot (A / w_f)^2 \cdot 1000^{w/w_f - 1} \quad (24)$$

$D_{ws}$  [m<sup>2</sup>/s] Kapillartransportkoeffizient für den Saugvorgang

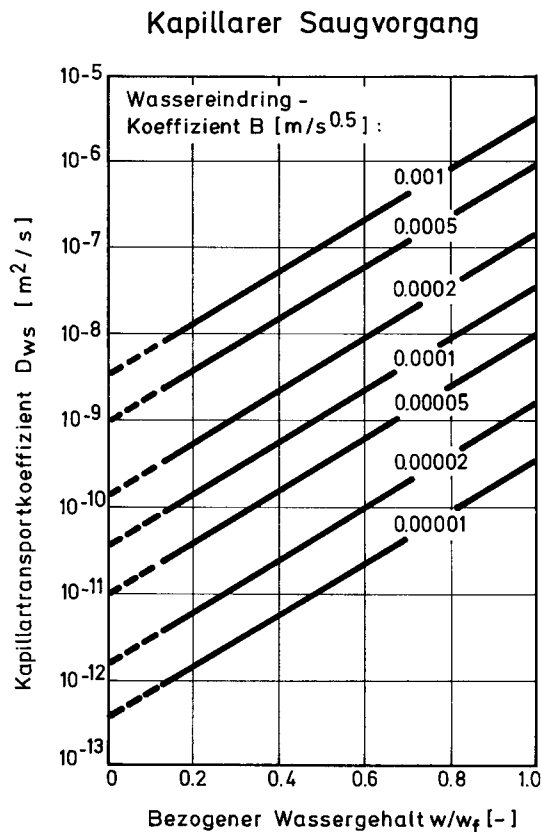
A [kg/m<sup>2</sup>s<sup>0,5</sup>] Wasseraufnahmekoeffizient

w [kg/m<sup>3</sup>] Wassergehalt

$w_f$  [kg/m<sup>3</sup>] freie Wassersättigung

Das Verhältnis aus A und  $w_f$  wird auch als Wassereindringkoeffizient B bezeichnet. Die Beziehung (24) gilt nicht für Wassergehalte, die über der freien Wassersättigung liegen, da in diesem Bereich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Kapillartransport und dem Wassergehalt existiert. Die daraus folgende Abhängigkeit des Kapillartransportkoeffizienten eines Baustoffes vom Wassergehalt ist in Bild 21 für verschiedene Wassereindringkoeffizienten dargestellt. Für die Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen, die immer nur kurzfristig mit Wasser in Kontakt kommen, z.B. bei Regen, ist diese Approximation ausreichend genau. Eine ähnlich einfache, wenn auch nur abschätzende Bestimmungsmethode wie beim Kapillartransportkoeffizient für den Saugvorgang, gibt es für die Weiterverteilung bisher nicht. Auch Porenmodelle, wie z.B. in [33] und [94] beschrieben, helfen hier nicht weiter, weil sie bisher ausschließlich für die Approximation des kapillaren Saugens konzipiert und getestet wurden. Da der Flüssigtransportkoeffizient der Weiterverteilung  $D_{WW}$  für die Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aber wichtig ist, soll hier versucht werden, zumindest eine

grobe Abschätzung dieses Koeffizienten zu geben.



**Bild 21** Abhängigkeit des Kapillarttransportkoeffizienten für den Saugvorgang vom Wassergehalt und vom Wassereindringkoeffizient des Baustoffes, ermittelt mit Hilfe der Näherungsbeziehung in Gleichung (24).

Geht man auch bei der Weiterverteilung von einer näherungsweise exponentiellen Abhängigkeit des Flüssigtransportkoeffizienten vom Wassergehalt aus, dann sind zur Beschreibung dieser Funktion nur zwei Werte erforderlich. Der erste Wert im hygroskopischen Feuchtebereich läßt sich, wie bereits gezeigt, mit Hilfe der Gleichungen (19) und (23) aus den Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen im Trocken- und Feuchtebereich bestimmen. Der zweite Wert im Bereich der freien Wassersättigung liegt aufgrund bisheriger Untersuchungen [65] etwa eine Zehnerpotenz unter dem Wert des Transportkoeffizienten für das Saugen  $D_{ws}$ . Die so ermittelten Koeffizienten sind jedoch nur für abschätzende Berechnungen oder Berechnungen von Bauteilen, in denen Flüssigtransportvorgänge keine dominante Rolle spielen, einsetzbar.

## 2.4 Hygrischer Einfluß auf Wärmespeicherung und -transport

Die Grundgesetze zur Berechnung des thermischen Verhaltens von Bauteilen im trockenen Zustand sind in der Bauphysik bekannt. Da es in dieser Arbeit in erster Linie um den Feuchtetransport und seine Auswirkung auf den Wärmetransport geht, wird auf die reine Temperaturabhängigkeit thermischer Größen wie Wärmekapazität, Wärmeleitung, Schmelzwärme und Verdunstungswärme hier nicht eingegangen; die hygrischen Einflüsse auf diese Größen sind jedoch bedeutsam.

### 2.4.1 Wärmespeicherung feuchter Baustoffe

Der Wärmehalt eines Materials wird unter isobaren Verhältnissen als Enthalpie bezeichnet. Zwischen der Enthalpie eines Stoffes und seiner Temperatur besteht im bauphysikalisch wichtigen Temperaturbereich ein näherungsweise linearer Zusammenhang. Die Enthalpie eines trockenen Baustoffes, bezogen auf die Enthalpie bei 0 °C, wird deshalb durch folgende Beziehung beschrieben:

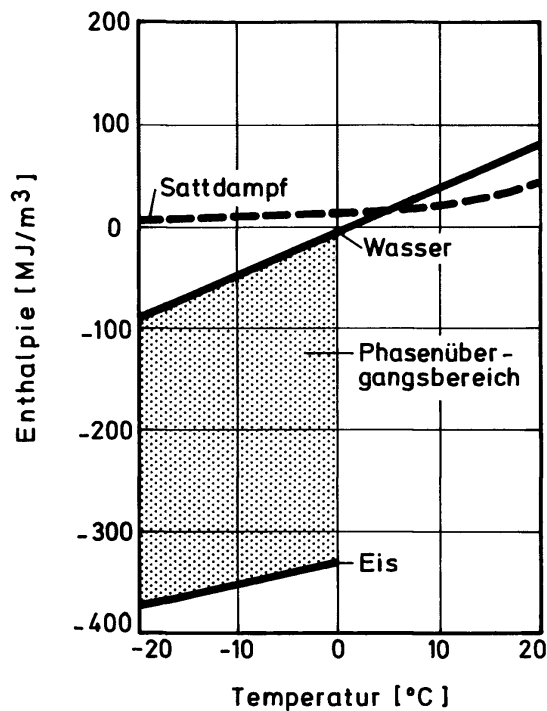
$$H_s = \rho_s c_s \vartheta \quad (25)$$

$H_s$  [J/m<sup>3</sup>] Enthalpie des trockenen Baustoffes  
 $\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] Rohdichte des Baustoffes  
 $c_s$  [J/kgK] spezifische Wärmekapazität des Baustoffes  
 $\vartheta$  [°C] Temperatur

Bei feuchten Baustoffen addiert sich zu dieser Enthalpie die Enthalpie des im Baustoff enthaltenen Wassers. Die Enthalpie des Wassers ist jedoch abhängig von den vorliegenden Aggregatzuständen, deren genaue Definition in den Mikroporen, wie bereits erwähnt, schwierig ist.

In Bild 22 ist der Verlauf der volumenbezogenen Enthalpie von Eis, flüssigem Wasser und Satt-dampf über der Temperatur dargestellt. Bei Temperaturen unter dem Nullpunkt bewegt sich die Enthalpie des Wassers im schraffierten

Bereich. Eine genaue Bestimmung der Enthalpie des Phasengemisches ist nur bei Kenntnis der Porenradialverteilung bzw. der Feuchtespeicherfunktion des Baustoffes möglich. Die gestrichelt gezeichnete Linie beschreibt die Enthalpie des Wasserdampfes im freien Porenraum unter Sättigungsbedingungen, wobei Latentwärmeeffekte beim Phasenwechsel zur Aufrechterhaltung des Sättigungszustandes berücksichtigt wurden. Ein Transport des Wasserdampfes ist hierbei jedoch ausgeschlossen. Die Änderung der Sattdampfenthalpie mit der Temperatur, die ein Maß für die Wärmekapazität der Porenfeuchte darstellt, ist im Vergleich zur entsprechenden Enthalpieänderung von flüssigem Wasser und Eis im dargestellten Temperaturbereich gering und wird aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt.



**Bild 22** Volumenbezogene Enthalpie der verschiedenen Aggregatzustände des Wassers bei Normaldruck in Abhängigkeit von der Temperatur (Referenzenthalpie des Wassers bei 0 °C).

Während die temperaturbedingte Enthalpieänderung des gesättigten Wasserdampfes aufgrund seiner geringen Dichte vernachlässigbar klein ist, spielt sie beim Phasenübergang vom Wasser zum Eis (schraffierter Bereich) eine große Rolle.

Für die Enthalpie des Wassers im Baustoff läßt sich somit folgende Bestimmungsgleichung angeben:

$$H_W = \left[ (w - w_e)c_w + w_e c_e - h_e \frac{dw_e}{d\vartheta} \right] \cdot \vartheta \quad (26)$$

- $H_W$  [J/m<sup>3</sup>] Enthalpie der Baustofffeuchte  
 $c_w$  [J/kgK] spezifische Wärmekapazität des flüssigen Wassers  
 $c_e$  [J/kgK] spezifische Wärmekapazität des Eises  
 $h_e$  [J/kg] spezifische Schmelzenthalpie (Schmelzwärme)  
 $w$  [kg/m<sup>3</sup>] Gesamtwassergehalt  
 $w_e$  [kg/m<sup>3</sup>] Gehalt des gefrorenen Wassers  
 $\vartheta$  [°C] Temperatur

Der Eisgehalt im Baustoff  $w_e$  wird mit Hilfe der Feuchtespeicherfunktion sowie der Beziehung zwischen dem Gefrierpotenzial  $\varphi_e$  und der Temperatur in Bild 20 bestimmt.

#### 2.4.2 Wärmeleitung feuchter Baustoffe

Mit dem Begriff Wärmeleitung feuchter Baustoffe wird hier ausschließlich der Einfluß ortsgebundenen Wassers auf den Wärmetransport bezeichnet. Das Verdunsten und Tauen des transportierten Wassers trägt zwar auch zum Wärmetransport bei, läßt sich aber durch den Wärmeleitungsansatz nicht sinnvoll beschreiben. Angaben über die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt sind in [16] für verschiedene Baustoffe zu finden. Da bei den Standardmessungen der Einfluß der Wasserdampfdiffusion mit erfaßt wird, sind Ergebnisse von Messungen im Plattenapparat für diffusionsoffene Materialien, wie z.B. Mineralwolle, nur unter Vorbehalt zu verwenden. Zur Berechnung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(w)$  mineralischer Baustoffe eignet sich nach [72] folgende Beziehung:

$$\lambda(w) = \lambda_o(1 + b \cdot w / \rho_s) \quad (27)$$

- $\lambda(w)$  [W/mK] Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes

$\lambda_0$ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes
$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte des trockenen Baustoffes
b [%/M.-%]	Wärmeleitfähigkeitszuschlag

Der Zuschlag b gibt an, um wieviel Prozent die Wärmeleitfähigkeit pro Masseprozent Feuchte steigt. Seine Größe wird von der Art des Baustoffes bestimmt; sie ist jedoch bei hygroskopischen Baustoffen weitgehend unabhängig von deren Rohdichte. In Tabelle 4 ist eine Reihe dieser Zuschläge für verschiedene Baustoffe zusammengefaßt.

Trotz der viermal höheren Wärmeleitfähigkeit von Eis verglichen mit Wasser, ist es im allgemeinen nicht möglich, zwischen der Wärmeleitfähigkeit über und unter dem Gefrierpunkt zu unterscheiden, da für die meisten Baustoffe keine entsprechenden Meßwerte vorhanden sind. Wie Untersuchungen in [64] bei verschiedenen Wassergehalten zeigen, sind die Unterschiede der Wärmeleitfähigkeiten über und unter Null Grad Celsius kleiner als der Unter-

schied der Leitfähigkeiten von Eis und Wasser erwarten läßt.

### 2.4.3 Wärmetransport durch Enthalpieströme mit Phasenänderung

Im Gegensatz zu Wärmeströmen aufgrund von Temperaturgradienten sind Enthalpieströme immer an ein strömendes Medium gebunden. Da Konvektionseffekte durch Gesamtdruckunterschiede, wie bereits erwähnt, hier unberücksichtigt bleiben, kommen als Medium nur der diffundierende Wasserdampf oder das durch Kapillardrücke bewegte flüssige Wasser in Frage. Wie bedeutend die so verursachten Enthalpieströme im Vergleich zur Wärmeleitung sind, soll anhand eines Beispiels abgeschätzt werden. Der größte Einfluß von Feuchtebewegungen ist bei einem Bauteil zu erwarten, das hohen Feuchtebelastungen bei gleichzeitiger Anwesenheit von Temperaturgradienten ausgesetzt ist. Dies ist zum Beispiel bei einer westorientierten zweischaligen Außenwand mit Sichtmauerwerk während des Winterhalbjahres

**Tabelle 4** Zusammenstellung des prozentualen Feuchtezuschlags auf Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffe bezogen auf den Wassergehalt in Masse-% nach [16].

Baustoff	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Feuchtezuschlag [%/M.-%]
Porenbeton	400 – 800	0,09 – 0,19	4
Kalksandstein	1800	0,7	8
Blähton-, Bimsbeton	1400 – 1800	0,5 – 1,0	4
Leichtbeton mit EPS-Zuschlag	300 – 900	0,07 – 0,28	3
Normalbeton	2300	1,3 – 1,5	8
Holz	400 – 700	0,08 – 0,15	1,5
Polystyrol Hart-schaum (EPS)	15 - 30	0,04	0,05 *)
Polystyrol Extruderschaum (XPS)	28 - 40	0,03	0,1 *)
Polyurethan Hart-schaum (PUR)	40 - 80	0,03	0,4 *)

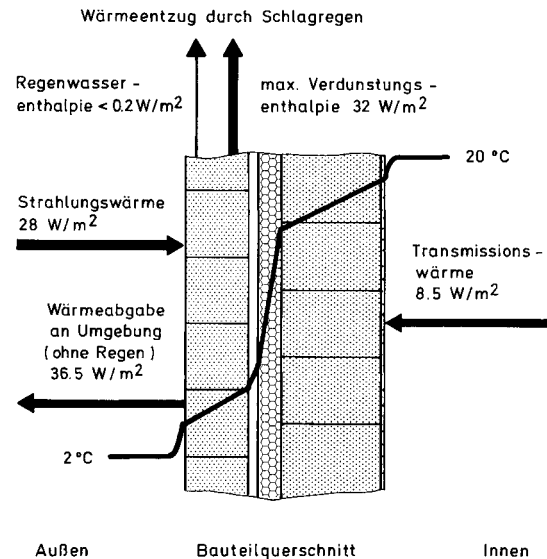
\*)Werte gelten nur bis zu einem Wassergehalt von ca. 100 Masse-%. Bei organischen Dämmstoffen besteht kein linearer Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand und dem Wassergehalt.

der Fall. Bei folgenden, dem Klima im Alpenvorland entsprechenden Durchschnittsbedingungen im Winterhalbjahr mit hoher Schlagregenbelastung:

Außenlufttemperatur	2,0 °C
Weststrahlung	40 W/m <sup>2</sup>
Schlagregensumme	200 kg/m <sup>2</sup>
Raumlufttemperatur	20 °C

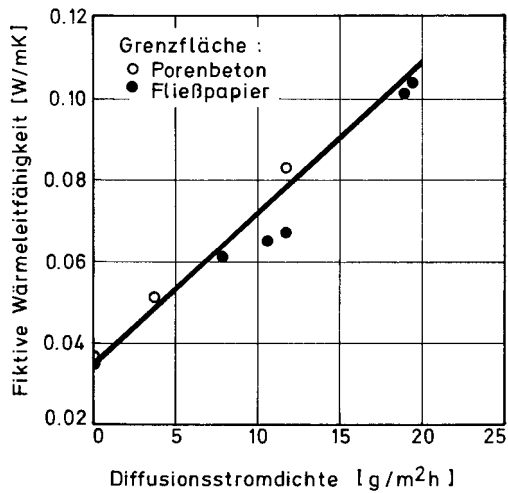
einer kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,7, und einem Wärmedurchgangskoeffizient der Wand von 0,5 W/m<sup>2</sup>K ergibt sich für die Konstruktion in Bild 23 die nachfolgende, über das Winterhalbjahr gemittelte Wärmebilanz. Ohne Berücksichtigung von Feuchteinflüssen beträgt die raumseitige Wärmezufuhr zur Außenoberfläche 8,5 W/m<sup>2</sup> und die durch Strahlung 28 W/m<sup>2</sup> (siehe Bild 23). Dadurch resultiert eine Oberflächentemperatur der Fassade von ca. 4 °C und eine über den Querschnitt der Außenschale gemittelte Temperatur von 5 °C. Unter der Annahme, daß der Schlagregen mit Außenlufttemperatur auf die Fassade trifft, vollständig aufgesaugt wird und sich gleichmäßig in der Wetterschale verteilt, ergibt sich eine Wärmeabfuhr durch den Flüssigtransport von weniger als 0,2 W/m<sup>2</sup>. Geht man jedoch davon aus, daß die Regenfeuchte während des Winterhalbjahres wieder austrocknet, resultiert aus der Verdunstungskühlung ein Wärmeverlust der Außenschale von 32 W/m<sup>2</sup>, der bei diesem relativ extremen Beispiel in der Größenordnung der Strahlungsgewinne liegt.

Dieses Beispiel zeigt, daß Enthalpieströme durch Flüssigtransport im Vergleich zu anderen Wärmeströmen in der Praxis eine zu vernachlässigende Rolle spielen, während Dampfdiffusionsströme verbunden mit Phasenänderungen, wie z.B. bei Trocknungsvorgängen, für die Wärmebilanz von großer Bedeutung sein können.



**Bild 23** Schematische Darstellung der stationären Wärmebilanz einer zweischaligen Außenwand im Winterhalbjahr unter Münchner Klimabedingungen. Im Vergleich zur Strahlungs- und Transmissionswärme ist der mittlere Wärmeentzug durch Regenwasserpenetration der Wetterseite selbst bei hoher Schlagregenbelastung vernachlässigbar klein. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch der Wärmeentzug durch die anschließende Verdunstung des Regenwassers.

Ein experimentelles Beispiel für den starken Einfluß dieser Latentwärmeeffekte bei hohen Dampfdiffusionsströmen stellen Untersuchungen von [1] dar, deren Ergebnisse in Bild 24 zu sehen sind. Dort ist die fiktive Wärmeleitfähigkeit von trockenen Mineralfaserplatten zwischen befeuchtetem Filterpapier oder Porenbetonplatten in Abhängigkeit von der Dampfdiffusionsstromdichte aufgetragen. Bedenkt man, daß bei einem Diffusionsstrom von 12 g/m<sup>2</sup>h der etwa einem Zehntel der Wasserabgabe einer nassen Bauteiloberfläche unter Außenluftbedingungen entspricht, der Wärmestrom durch die Dämmschicht sich bereits verdoppelt, wird deutlich, daß diese Enthalpieströme durch einen eigenen Ansatz berücksichtigt werden müssen. Ein entsprechender Feuchtezuschlag auf die Wärmeleitfähigkeit wird den realen Gegebenheiten nicht gerecht, da nicht die Feuchte in der Dämmschicht, sondern der Wassergehalt der an sie angrenzenden Schichten sowie der Diffusionswiderstand der Dämmung den feuchtebedingten Wärmetransport beeinflussen.



**Bild 24** Zusammenhang zwischen der fiktiven Wärmeleitfähigkeit einer Mineralfaserplatte und der Wasserdampfdiffusionsstromdichte durch den Dämmstoff, gemessen in einem modifizierten Plattenapparat mit Porenbeton und mit Filterpapier, jeweils als feuchteabgebendes und -aufnehmendes, die Mineralfaserplatte umgebendes Medium [1]. Die lineare Beziehung zwischen der fiktiven Wärmeleitfähigkeit und dem Diffusionsstrom deutet darauf hin, daß eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit ausschließlich auf Latentwärmeeffekte durch Phasenänderung zurückzuführen ist und mit der eigentlichen Wärmeleitung nichts zu tun hat.

Das Zusammenspiel von Dampfdiffusion und Phasenänderung wird deshalb in Form eines Quell- bzw. Senkenterms in der Wärmebilanzgleichung berücksichtigt:

$$S_h = h_v \nabla \cdot g_v \quad (28)$$

$S_h$  [J/m<sup>3</sup>s] Wärmequelle/-senke durch Tauen/Verdunsten

$h_v$  [J/kg] Latentwärme bei Phasenänderung

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] Wasserdampfdiffusionsstromdichte

Die Latentwärme bei der Phasenänderung setzt sich aus der spezifischen Verdunstungsenthalpie des reinen Wassers ( $h_v = 2500$  kJ/kg) und der baustoffabhängigen Sorptionsenthalpie zusammen. Diese Sorptionsenthalpie ist jedoch nach Untersuchungen in [34] im bauphysikalisch bedeutsamen Feuchtebereich über 50 % relative Feuchte für die meisten Baustoffe gegenüber der Verdunstungsenthalpie vernachlässigbar.

## 2.5 Wärme- und Feuchteübertragung an den Bauteilgrenzen

Der Wärme- und Feuchteausaustausch eines Bauteils mit seiner Umgebung kann durch Randbedingungen erster, zweiter und dritter Art beschrieben werden. Randbedingungen erster Art, bei denen die Oberflächenverhältnisse gleich den Umgebungsverhältnissen sind, treten für den Wärme- und Dampftransport nur bei Wasser- oder Erdberührung des Bauteils auf. Für den Flüssigtransport gilt diese Randbedingung im Falle einer vollständigen Wasserbenetzung der Bauteiloberfläche durch Regen oder Grundwasser. Randbedingungen zweiter Art, die an der Oberfläche einen konstanten Wärme- oder Massenstrom vorgeben, charakterisieren den Einfluß der Sonnenstrahlung auf den Wärmetransport und die Aufnahme von Regenwasser bei nicht vollständig benetzter Oberfläche. Durch den Sonderfall, daß die Ströme Null sind, werden Symmetriebedingungen sowie adiabate bzw. wasser- oder dampfdichte Verhältnisse an den Bauteilgrenzen erfaßt. Randbedingungen dritter Art, die einen Übergangswiderstand zwischen Bauteiloberfläche und Umgebung voraussetzen, stellen die häufigste Form des Wärme- und Feuchteausaustausches dar. Die beim Wärme- und Feuchte transport unter praktischen Bedingungen vorkommenden Randbedingungen sind in Bild 25 zusammenfassend dargestellt. Treten zwei verschiedene Randbedingungen gleichzeitig auf, wie bei der Wärmebilanz von Außenoberflächen (Sonnenstrahlung und konvektiver Wärmeübergang), kann dies bei der Lösung durch den Einsatz entsprechender Quellterme erfaßt werden.

Randbedingungen ( Skizze )	1. Art	2. Art	3. Art
Bedeutung	Wasserkontakt	Strahlung Regen	Normalfall
Wärme	$\vartheta_0 = \vartheta_u$	$q = a_s \cdot I$	$q = \alpha(\vartheta_0 - \vartheta_u)$
Dampf	$p_0 = p_{\text{sat}}$	—	$g = \beta_p(p_0 - p_u)$
Wasser	$\varphi = 1$	$g = a_r \cdot R$	—

Bild 25 Schematische Darstellung der Randbedingungen erster, zweiter und dritter Art und ihre Bedeutung für den Wärme- und Feuchteübergang an Bauteiloberflächen. Randbedingungen erster Art, bei denen die Oberflächenbedingungen mit den Umgebungsbedingungen identisch sind, treten in der Praxis nur bei Kontakt mit Wasser auf. Die Einwirkung von Sonnenstrahlung und Regen kann durch Randbedingungen zweiter Art beschrieben werden, Der Normalfall ist jedoch, daß zwischen der Bauteiloberfläche  $o$  und der Umgebung  $u$  ein Übergangswiderstand vorhanden ist, der durch Randbedingungen dritter Art zu charakterisieren ist.

Der Wärmeaustausch an der Oberfläche aufgrund von Konvektion und langwelliger Strahlung wird in der Bauphysik mit Hilfe folgender Beziehung berechnet [39] [91]:

$$q = \alpha(\vartheta_u - \vartheta_0) \quad (29)$$

mit  $\alpha = \alpha_k + \alpha_s$

$q$ [W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestromdichte
$\alpha_k$ [W/m <sup>2</sup> K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_s$ [W/m <sup>2</sup> K]	strahlungsbedingter Wärmeübergangskoeffizient
$\vartheta_0$ [°C]	Oberflächentemperatur
$\vartheta_u$ [°C]	Umgebungstemperatur

Die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  von den lokalen Strömungsverhältnissen, der Temperatur und der Bauteilgeometrie ist relativ komplex; er wird für bauphysikalische Berechnungen vereinfacht als konstant ange-

nommen. Zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen ( $k$ -Wert) sind in der DIN 4108 [23] folgende Wärmeübergangskoeffizienten vorgeschrieben:

$$\text{außen } \alpha = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{innen } \alpha = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Während der Wert des Wärmeübergangskoeffizienten für die raumseitige Bauteiloberfläche durch Meßergebnisse in [29] für die ungestörte Wand bei homogener Raumlufttemperatur bestätigt wird, ist der Wert des außenseitigen Übergangskoeffizienten für hiesige Klimaverhältnisse zu hoch. Auf der Grundlage einer mittleren Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s in Deutschland, wird in [113] ein Wert von 17 W/m<sup>2</sup>K vorgeschlagen, wobei der konvektive Anteil etwa 10 W/m<sup>2</sup>K ausmacht. Dieser Durchschnittswert gilt nicht für stark exponierte Bauteile oder Gebäudeoberflächen in großer Höhe. Hier sind entsprechend höhere Wärmeübergangskoeffizienten anzusetzen. Der raumseitige Wärmeübergangskoeffizient liegt im Bereich von Ecken oder Kanten im allgemeinen unter dem Normwert von 8 W/m<sup>2</sup>K. Eine eventuell vorhandene Temperaturschichtung im Raum darf bei Feuchtetransportberechnungen nicht durch einen auf die Mitteltemperatur bezogenen Übergangskoeffizienten, wie in [29] beschrieben, erfaßt werden, da dies zu Fehlern bei der Beurteilung der Feuchteverhältnisse an raumseitigen Bauteiloberflächen führt. Soll die Raumlufttemperaturverteilung bei der Berechnung berücksichtigt werden, so ist dies nur über die höhenabhängige Spezifizierung der Randbedingungen möglich.

Ähnlich wie der Wärmeübergang läßt sich auch der Wasserdampfübergang beschreiben:

$$g_v = \beta_p(p_u - p_0) \quad (30)$$

$g_v$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Wasserdampfstromdichte
$\beta_p$ [kg/m <sup>2</sup> sPa]	Wasserdampfübergangskoeffizient
$p_0$ [Pa]	Wasserdampfpartialdruck an der Bauteiloberfläche



$p_u$  [Pa] Wasserdampfpartialdruck der Umgebung

wobei  $\beta_p$  durch Analogiebeziehungen, wie in [48] bestätigt, durch Meßergebnisse in [114] aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten errechnet werden kann:

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \alpha_k \quad (31)$$

$\alpha_k$  [W/m<sup>2</sup>K] konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Die sich daraus ergebenden Werte für den Wasserdampfübergang von außen- und raumseitigen Bauteiloberflächen sind zusammen mit den Koeffizienten für den Wärmeübergang in Tabelle 5 dargestellt.

**Tabelle 5** Mittlere Oberflächenübergangskoeffizienten zur Berechnung des Wärme- und Feuchteausstausches zwischen außen- bzw. raumseitigen Bauteiloberflächen und der Umgebung.

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

Die Einflüsse von Sonnenstrahlung und Regen lassen sich durch Randbedingungen zweiter Art erfassen. Der Wärmestrom durch Sonnenstrahlung auf die Oberfläche läßt sich folgendermaßen berechnen:

$$q = a_s \cdot I \quad (32)$$

$q$  [W/m<sup>2</sup>] Wärmestrom durch kurzwellige Sonnenstrahlung

$a_s$  [-] Strahlungsabsorptionszahl (kurzwelliger Bereich)

$I$  [W/m<sup>2</sup>] Strahlungsleistung senkrecht zur Bauteiloberfläche

Die Strahlungsleistung senkrecht zur Bauteiloberfläche kann in Abhängigkeit von der

Neigung und Orientierung der Oberfläche aus der direkten (bzw. globalen) und der diffusen Sonnenstrahlung auf eine horizontale Fläche mit Hilfe der Näherungsbeziehungen in [119] berechnet werden. Dabei ist allerdings auch eine eventuelle Verschattung der Oberfläche zu berücksichtigen. Die Absorptionszahl läßt sich gemäß [6] aus dem Hellbezugswert und einem farbtonepezifischen Parameter bestimmen. Eine Zusammenstellung von kurzwelligen Absorptionszahlen und Hellbezugswerten ist für verschiedene Baustoffoberflächen in Tabelle 6 aufgelistet.

**Tabelle 6** Zusammenstellung der kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl und des Hellbezugswertes verschiedener Baustoffoberflächen [89]. Bei roten Baustoffen und bei Holz ist die Lichtabsorption, ausgedrückt durch den Hellbezugswert, größer als die Energieabsorption im gesamten kurzwelligen Spektralbereich.

Baustoff	Kurzwellige Absorptions- zahl [-]	Hell bezugs wert [%]
Dachziegel rot	0,6	20
braun	0,8	10
Bitumendachhaut	0,9	10
Putz weiß (gealtert)	0,4	60
Klinker dunkelrot	0,7	15
Kalksandstein		
trocken	0,45	55
naß	0,6	40
Schilfsandstein		
trocken	0,7	30
naß	0,85	15
Roter Mainsandstein	0,75	19
Sandstein mit Patina	0,9	10
Holz (Fichte)		
unbehandelt	0,4	50
verwittert (silbergrau)	0,7	20
braun gestrichen	0,8	10

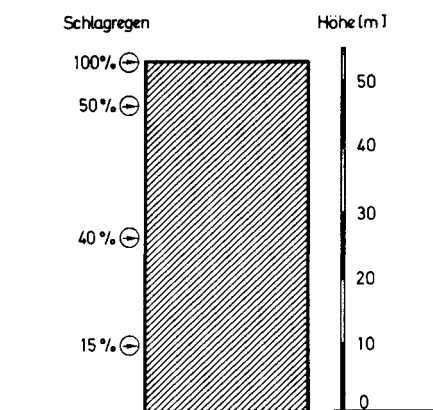
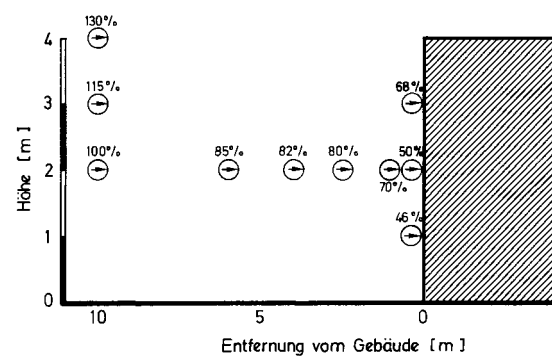
Schwieriger als die Bestimmung der Sonneneinstrahlung ist die Ermittlung der Regen- bzw. Schlagregenbelastung einer Bauteiloberfläche, sofern sie nicht für die Berechnungszeit direkt an der Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils gemessen wurde. Für annähernd horizontale Oberflächen können Normalregendaten nahegelegener Wetterstationen verwendet werden. Dies gilt nicht für Oberflächen mit extremen Umströmungsbedingungen wie beispielsweise Fassaden oder Dächer von Hochhäusern; hier muß auf lokale Meßergebnisse zurückgegriffen werden, wenn die Regenmenge genau quantifiziert werden soll. Beim Einsatz von Regendaten aus deutschen Test-Referenzjahren [12] ist ebenfalls Vorsicht geboten. Wie in [84] gezeigt, sind in diesen künstlich erzeugten Wetterdatensätzen zwar die Gesamtniederschlagssummen realistisch, nicht jedoch die durchschnittliche Regendauer. Die Summe der Stunden mit Niederschlagsereignissen ist dort um mindestens den Faktor zwei zu hoch. Das kann bei Bauteilen mit nur mäßig saugenden Oberflächen zu erheblichen Fehleinschätzungen führen. Da das überschüssige Regenwasser abläuft, ist hier die Dauer der Oberflächenbefeuchtung entscheidender als die jeweilige Niederschlagsintensität.

Die Bestimmung der Schlagregenbelastung auf vertikale Bauteilflächen findet am besten durch Messung vor Ort statt. Wie Schlagregenermessungen von [79] und [115], dargestellt in Bild 26, gezeigt haben, können sich die Schlagregenintensitäten an einem Gebäude in Abhängigkeit von der Höhe des Gebäudes und der Position der betrachteten Fassadenfläche um fast eine Zehnerpotenz unterscheiden. Da jedoch langzeitige Schlagregenermessungen oft nicht durchführbar sind, soll hier eine Möglichkeit angegeben werden, die Schlagregenbelastung aus den Wetterdaten Normalregen, Windgeschwindigkeit und Windrichtung abzuschätzen. Wie Untersuchungen in [79] und [84] zeigen, besteht aufgrund sich häufig wiederholender Umströmungsmuster von Gebäuden ein einigermaßen linearer Zusammenhang zwischen der vektoriellen Windgeschwindigkeit, multipliziert

mit dem Normalregen, gemessen an einer von Gebäuden unbeeinflussten Stelle und der Schlagregenbelastung eines Fassadenausschnitts:

$$R_S = r_s \cdot v \cdot R_N \quad (33)$$

$R_S$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Schlagregenbelastung des Fassadenausschnitts
$R_N$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Normalregen
$r_s$ [s/m]	positionsspezifischer Schlagregenkoeffizient
$v$ [m/s]	Windgeschwindigkeit senkrecht zur Fassade



**Bild 26** Verteilung der Schlagregenmenge an der Wetterseite eines 4 m hohen Testhauses und in verschiedenen Abständen davor (Schlagregenmenge in 2 m Höhe und 10 m Entfernung von der Fassade ist gleich 100 %) nach [79] sowie an der Wetterfassade eines 53 m hohen Gebäudes (Schlagregenmenge am höchsten Punkt der Fassade ist gleich 100 %) [115].

Der positionsspezifische Schlagregenkoeffizient beträgt für eine etwa zwei Meter über dem Erdboden freistehende Fläche (ungestörte Strömungsverhältnisse) ca. 0,2 [87]. Mit Hilfe von Bild 26 kann daraus der Koeffizient  $r_s$  für einen

Fassadenausschnitt geschätzt werden. Besser ist es jedoch,  $r_s$  durch kurzzeitige Schlagregennmessung an der entsprechenden Fassadenposition experimentell zu bestimmen.

Ist die Regen- bzw. Schlagregenbelastung einer Bauteiloberfläche bekannt, läßt sich der Feuchtezustand der Oberfläche, solange diese nicht vollständig benetzt ist, mit einem Ansatz ähnlich wie bei der Sonnenstrahlung berechnen:

$$g_w = a_r \cdot R \quad (34)$$

$g_w$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Oberflächenflüssigtransportstromdichte
$R$ [kg/m <sup>2</sup> s]	Niederschlagsbelastung senkrecht zur Bauteiloberfläche
$a_r$ [-]	Niederschlagsabsorptionszahl

Durch die Niederschlagsabsorptionszahl soll berücksichtigt werden, daß ein Teil des auftreffenden Regenwassers bei vertikalen Flächen wieder wegspritzt. Die Größe von  $a_r$  ist abhängig von der Rauigkeit der Oberfläche und von der Beschaffenheit des Niederschlags. Bei Hagel oder Schnee ist  $a_r$  näherungsweise Null. Da bisher keine systematischen Untersuchungen in diesem Zusammenhang vorliegen, muß die Niederschlagsabsorptionszahl geschätzt werden oder durch Vergleich von Messungen und Berechnungen ermittelt werden. Bei horizontalen Bauteilen ist  $a_r$  im allgemeinen Eins, da wegspritzendes Regenwasser wieder auf die Oberfläche zurückfällt.

Sobald die Oberfläche vollständig mit Wasser benetzt ist (d.h. es kommt mehr Regen an als das Bauteil aufnimmt), muß von der Randbedingung zweiter Art in Gleichung (34) auf eine Randbedingung erster Art "umgeschaltet" werden, indem die relative Feuchte an der Oberfläche Eins gesetzt wird. Ändern sich die Verhältnisse wieder, z.B. durch eine Verringerung der Niederschlagsintensität, wird wieder zur Randbedingung zweiter Art "zurückgeschaltet". Die Frage, welche der beiden Randbedingungen häufiger auftritt, hängt von der jeweiligen Niederschlagsbelastung und von der Saugfähigkeit der Bauteiloberfläche ab. Da die

meisten Bauteiloberflächen mit Ausnahme von Sichtmauerwerk und Natursteinfassaden eine nur mäßige kapillare Wasseraufnahmefähigkeit besitzen, ist die Randbedingung erster Art dominierend. Das heißt aber auch, daß in diesen Fällen eine genaue Kenntnis der quantitativen Regenbelastung gar nicht so wesentlich ist und Schätzungen der Niederschlagsabsorptionszahl und des positionsspezifischen Schlagregenkoeffizienten zulässig sind.

## 2.6 Bisherige Berechnungsverfahren

Eine umfangreiche Zusammenfassung von Untersuchungen und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung des Feuchtetransports in Baustoffen wurde bereits von Kießl und Gertis [57], [58] durchgeführt. Darauf aufbauend werden neuere Arbeiten betrachtet und zusammen mit den grundlegenden Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Feuchtetransportberechnungen nach ihren Transportansätzen und -potentialen klassifiziert, wobei gleichzeitig versucht wird, die Vor- und Nachteile der verschiedenen Modellansätze aus heutiger Sicht aufzuzeigen.

Im Gegensatz zum Wärmetransport in Bauteilen, dessen treibendes Potential unbestritten die Temperatur ist, herrscht über die Verwendung der treibenden Potentiale für den Feuchtetransport keine Einigkeit. Trotz der theoretischen Möglichkeit, ein Potential in ein anderes umzurechnen, ist die Wahl dieser Potentiale von großer Bedeutung für die Allgemeingültigkeit und die Genauigkeit der mathematischen Modelle und der daraus entwickelten EDV-Programme. Da sich Feuchte als Dampf und in flüssiger Form in porösen Stoffen bewegen kann, wobei die treibenden Kräfte unterschiedlich sind, werden in den meisten Veröffentlichungen zwei oder mehr Potentiale für den Feuchtetransport angenommen.

Nach wie vor werden jedoch auch in neuerer Zeit Berechnungsverfahren entwickelt, die wie das auf Glaser [38] beruhende Normverfahren in der DIN 4108 [23] ausschließlich den Dampftransport in Bauteilen berücksichtigen. Als Bei-

spiel seien hier die Arbeiten von Hussein [47] und Ricken [109] sowie das auf einem Ansatz von Crank [18] aufbauende Verfahren von Kerecioglu und Gu [55] genannt. Im Gegensatz zum oben genannten Normverfahren werden in diesen Verfahren die Feuchtespeicherung durch Sorption und die Feuchteabhängigkeit des Dampfdiffusionswiderstandes durch vereinfachte Ansätze erfaßt. Das Berechnungsmodell von Ricken berücksichtigt außerdem die Kapillarleitung durch einen besonderen Algorithmus, der bei Erreichen des kritischen Feuchtegehalts in einem Element des numerischen Gitters das überschüssige Wasser durch "rechnerisches Schaufeln" auf die Nachbarelemente verteilt. Da diese Modelle aufgrund nicht vorhandener oder unphysikalischer Erfassung von Flüssigtransporteffekten nur begrenzt einsetzbar sind, wird hier nicht weiter auf sie eingegangen.

Einer der ersten, die sich eingehend mit Feuchtigkeitsbewegungen in porösen Stoffen unter Einfluß von Temperaturgradienten befaßt hat, ist Krischer [64]. Er stellte durch Analyse des Wassergehalts von Sanden beim Befeuchten und Trocknen im Temperaturgefälle fest, daß es zwei Transportmechanismen für die Stoffeuchte gibt, die auch gegeneinander wirken können. Der eine ist die Dampfdiffusion, die bei Raumlufttemperatur durch Gleichung (11) beschrieben werden kann. Der andere Transportmechanismus wird von Krischer als Kapillarwasserbewegung bezeichnet und auf den kapillaren Unterdruck, der durch gekrümmte Wasseroberflächen im Porensystem feuchter Baustoffe entsteht, zurückgeführt. Für kapillaraktive Baustoffe mit breitem Porengrößenspektrum leitet er einen materialspezifischen Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Kapillardruck ab, so daß der Feuchtetransport in flüssiger Phase, wie in Gleichung (13), mit dem Wassergehalt als treibendem Potential beschrieben werden kann. Für den baupraktischen Temperaturbereich, bei dem der von Krischer gewählte Stefan'sche Diffusionsansatz durch den Fick'schen Diffusionsansatz ersetzt werden kann, ergibt sich daraus folgende instationäre

Differentialgleichung zur Berechnung des Feuchtetransports in porösen Baustoffen:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (D_w \nabla w + \delta_p \nabla p) \quad (35)$$

$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt
$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	Kapillartransportkoeffizient
$p$ [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
$\delta_p$ [kg/msPa]	Wasserdampfpermeabilität

Aufbauend auf einem Ansatz wie in Gleichung (35) haben Gagarin [32], Bagda [5], Greubel [41] und Andersson [2] EDV-Programme zur Berechnung von instationären Wärme- und Feuchtetrömen in Bauteilen entwickelt. Gagarin [32], der in seinem Modell von einem stationären Temperaturfeld ausgeht, berechnet das Feuchteverhalten von gedämmten, in Leichtbetontafelbauweise ausgeführten Stallungen mit und ohne Dampfsperre und vergleicht diese Ergebnisse mit Messungen. Das EDV-Programm von Bagda [5] ist mehr für die Berechnung des Feuchteverhaltens von homogenen Bauteilen konzipiert. Für die Berechnung mehrschichtiger Bauteile ist die Bestimmung von sogenannten Kopplungskonstanten erforderlich. Eingesetzt wird es in erster Linie zur Abschätzung des Einflusses von Beschichtungen auf das Wasseraufnahme- bzw. das Austrocknungsverhalten von Bauteilen. Greubel [41] untersucht rechnerisch und experimentell das Verhalten von Holzbaustoffen bei Dampfdiffusion im Temperaturgefälle. Als Berechnungsbeispiel von Andersson [2] dient das Austrocknungsverhalten einer Kellerwand aus Leichtbeton. Ein experimenteller Vergleich zur Beurteilung des Rechenverfahrens wird jedoch nicht gegeben.

Ein Nachteil der auf Gleichung (35) aufbauenden Modelle ist die Diskontinuität des Wassergehalts in mehrschichtigen Bauteilen. Deutliche Sprünge des Wassergehalts, wie sie beispielsweise an den Schichtgrenzen zwischen Putz und Mauerwerk auftreten, machen eine Berechnung des Feuchtetransports mit Hilfe dieses Potentials durch komplexe Übergangsfunktionen an den Materialgrenzen aufwendig.

Außerdem besteht im Übersättigungsbereich, wie unter Ziffer 2.3.5 gezeigt, kein direkter Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der treibenden Kraft für den Flüssigtransport, dem kapillaren Unterdruck. In diesem Bereich kann daher der Einsatz des Wassergehalts als Feuchtepotential zu Fehleinschätzungen führen.

Keine Verbesserung bringt in diesem Zusammenhang der Bezug des Wassergehalts eines Baustoffes auf den Wassergehalt eines Referenzmaterials, wie von Fischer et al. [31] vorgeschlagen. Der so erhaltene normierte Wassergehalt ist zwar an Schichtgrenzen stetig, die in [31] zugrundegelegte Bedingung, daß alle Feuchtespeicherfunktionen der des Referenzmaterials ähnlich sein müssen, ist jedoch nur in Ausnahmefällen erfüllt. Für den Übersättigungsbereich gilt hier dasselbe wie oben.

Anstatt den Wassergehalt eines Referenzmaterials, das Eigenschaftsschwankungen unterliegen kann, als treibendes Potential für den Kapillartransport zu wählen, ist es daher physikalisch sinnvoller, den bereits erwähnten Kapillardruck zu verwenden. Auch ohne spezielle Porenmodelle läßt sich für hygroskopische kapillaraktive Stoffe mit Hilfe von Saugspannungsmessungen, wie in Ziffer 2.2.2 beschrieben, ein direkter Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und dem kapillaren Gleichgewichtsdruck im höheren Feuchtebereich ermitteln. Im Sorptionsfeuchtebereich läßt sich der Kapillardruck mit Hilfe der Kelvin'schen Beziehung (Gleichung (2)) aus der relativen Luftfeuchte errechnen. Für nicht kapillaraktive Baustoffe, wie z.B. die meisten Dämmstoffe, ist der Kapillardruck nicht definierbar, dort tritt aber auch kein Flüssigtransport auf. Wird der Wassergehalt in Gleichung (35) durch den kapillaren Unterdruck  $P_k$  ersetzt, erhält man unter Berücksichtigung eines auf den Kapillardruck bezogenen Transportkoeffizienten  $D_p$  folgende Beziehung:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (\delta_p \nabla p - D_p \nabla P_k) \quad (36)$$

$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt
$p$ [Pa]	Wasserdampfpartialdruck
$\delta_p$ [kg/msPa]	Wasserdampfpermeabilität

Diese Gleichung liegt den Modellen von Rode [110] und Nicolas [98] zugrunde, wobei Rode Gleichung (36) in getrennte Transportgleichungen für Dampf und Flüssigkeit unterteilt, die durch iteratives Anpassen in Zusammenhang mit der Wärmeleitungsgleichung gelöst werden. Das zweidimensionale Modell von Nicolas berücksichtigt zusätzlich zu den in dieser Gleichung angegebenen Feuchtepotentialen noch den Einfluß der Porenluft. Die von ihm durchgeführten Berechnungen beschränken sich allerdings auf homogene Probekörper aus Sand bzw. Zementmörtel.

Eine andere, mehr mathematische Betrachtungsweise, die auf Luikov [90] bzw. Phillip und de Vries [104] zurückgeht, behandelt poröse Stoffe als eine Art "Black Box", in der Feuchte aufgrund von Temperatur- und Wassergehaltsgradienten transportiert wird. Dieser Ansatz, der aus der Vorgehensweise der Thermodynamik irreversibler Prozesse abgeleitet werden kann, führt zu folgender Beschreibung des Feuchtetransports:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (k_w \nabla w + k_\vartheta \nabla \vartheta) \quad (37)$$

$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt
$k_w$ [m <sup>2</sup> /s]	feuchte- und temperaturabhängiger Transportkoeffizient zum Wassergehaltsgradienten
$\vartheta$ [°C]	Temperatur
$k_\vartheta$ [kg/msK]	feuchte- und temperaturabhängiger Transportkoeffizient zum Temperaturgradienten

Bei dieser Formulierung, die in vielen Veröffentlichungen zu finden ist - z.B. bei Crausse [19], Häupl et al. [43], Kari et al. [53], Kohonen [62], van der Kooij [63] und Mizuhata et al. [95] - sind die beiden Transportkoeffizienten  $k_w$  und  $k_\vartheta$  jeweils von beiden Potentialen abhängig. Diese doppelte Abhängigkeit ist selbst bei hohem

experimentellen Aufwand so gut wie nicht exakt zu bestimmen, wie Untersuchungen in [20] belegen. Aus diesem Grund und wegen des bereits beschriebenen Problems der Unstetigkeit des Wassergehalts wurde dieser Ansatz bei Crausse [19], Kari et al. [53] und van der Kooij [63] nur für homogene Baustoffe bzw. Sande und nicht für mehrschichtige Bauteile verwendet. Die Ausnahme bildet das zweidimensionale Feuchtetransportprogramm von Kohonen [62]. Hier ist, gestützt auf umfangreiche Messungen der Transportkoeffizienten, auch die Berechnung von mehrschichtigen Bauteilen unter Einbeziehung von Konvektionseinflüssen möglich. Die recht komplexen Übergangsbedingungen an der Grenze zweier Baustoffe können aber nach Angaben des Autors zu numerischen Problemen führen.

Der zunächst vorhandene Vorteil der Modelle auf der Basis von Gleichung (37), den Feuchtetransport ohne genaue Kenntnis der physikalischen Hintergründe beschreiben zu können, wird durch den hohen experimentellen Aufwand zur Bestimmung der Transportkoeffizienten wieder aufgewogen. Legt man Krischers Modell [64] zugrunde, bei dem sich Dampf- und Kapillarwassertransport gegenseitig nicht beeinflussen, dann lassen sich die Koeffizienten  $k_w$  und  $k_\delta$  in Gleichung (37) durch Differenzieren wie folgt darstellen:

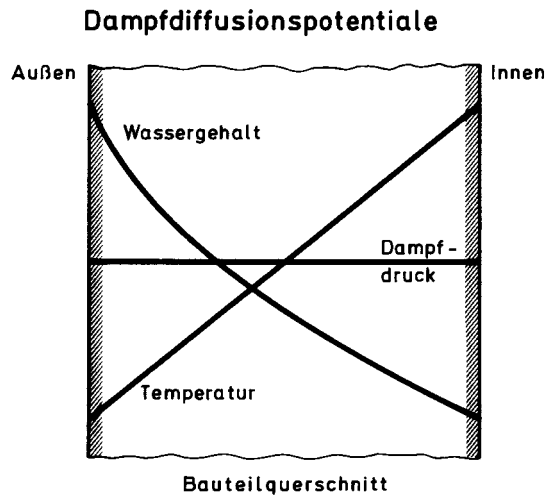
$$k_w = D_w + \delta_p p_{\text{sat}} \frac{d\varphi}{dw} \quad (38)$$

$$k_\delta = \delta_p \varphi \frac{dp_{\text{sat}}}{d\vartheta} \quad (39)$$

$D_w$ [m <sup>2</sup> /s]	Kapillarleitkoeffizient
$\delta_p$ [kg/msPa]	Wasserdampfpermeabilität
$p_{\text{sat}}$ [Pa]	Wasserdampfsättigungsdruck
$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt
$\varphi$ [-]	relative Feuchte
$\vartheta$ [°C]	Temperatur

Durch diese Umformung der Koeffizienten, wie sie z.B. Häupl et al. [43] anwenden, wird zwar der experimentelle Aufwand zur Bestimmung dieser Koeffizienten geringer, mathematisch ist

dieses Modell jedoch mit dem Modell von Krischer [64] identisch, d.h. eine mögliche Beeinflussung des Dampftransportes durch Kapillarwasser in den Poren ist nicht mehr erfaßbar. Werden die Transportkoeffizienten in Gleichung (37) mit den Beziehungen (38) und (39) spezifiziert, dann sind die Feuchtetransportansätze (35) und (37) mathematisch identisch. Das heißt aber, daß in diesem Fall die bereits beschriebenen Unzulänglichkeiten des Wassergehaltes als Feuchtepotential auch für Gleichung (37) zutreffen. Außerdem treten bei der numerischen Lösung von Gleichung (37) durch die Aufspaltung der Dampfdiffusion in einen temperatur- und feuchtebedingten Anteil Probleme auf, die bei Verwendung von Gleichung (35) vermieden werden. Dies soll anhand von Bild 27 erläutert werden. Für das Beispiel eines beheizten Raumes ohne Feuchteproduktion (gleiche absolute Feuchte innen und außen) sind dort die Profile von Temperatur, Wassergehalt und Dampfdruck schematisch über dem Außenwandquerschnitt aufgetragen. Bei Vernachlässigung von Flüssigtransportphänomenen ergibt sich im stationären Fall bei entgegengesetzten Gradienten von Temperatur und Wassergehalt ein konstanter Dampfdruck im Bauteilquerschnitt und damit auch kein Dampftransport. Die rechnerischen Diffusionsströme, die sich durch die Feuchtetransportpotentiale "Temperatur" und "Wassergehalt" in Gleichung (37) ergeben, müssen sich deshalb über dem gesamten Querschnitt zu Null addieren. Durch die exponentielle Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur und durch Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der lokalen Steigung der Sorptionsisothermen ergeben sich jedoch kleine Fehler bei der numerischen Berechnung, die zu unterschiedlich großen lokalen Dampfdiffusionsströmen führen können. Da in den meisten Baukonstruktionen die Dampfdiffusion den entscheidenden Feuchtetransportmechanismus darstellt, ist dieser Ansatz prinzipiell problematisch.



**Bild 27** Schematische Darstellung der stationären Wassergehalts-, Temperatur- und Dampfdruckgradienten in der Außenwand eines beheizten Raumes ohne Feuchteproduktion (gleiche absolute Feuchte innen und außen). Durch die Dampftransportpotentiale „Temperatur“ und „Wassergehalt“ in Gleichung (37) ergeben sich fiktive Diffusionsströme aufgrund der entgegengesetzten Gradienten, die sich in diesem Beispiel über den gesamten Querschnitt zu Null addieren müssen. (Durch kleine Ungenauigkeiten bei der numerischen Berechnung ist dies allerdings nie exakt zu erreichen.).

Eine ähnliche Aufspaltung der Dampfdiffusion in einen temperaturbedingten und einen feuchtebedingten Anteil nimmt Kießl [57] vor. Für den Kapillartransport führt er jedoch ein neues stoffunabhängiges und damit auch in mehrschichtigen Bauteilen stetiges Feuchtepotential ein, das er mit  $\phi$  bezeichnet. Dieses Potential, das bereits unter Ziffer 2.2.2 beschrieben wurde, ist im hygrokopischen Bereich identisch mit der relativen Feuchte und geht dann in eine aus der Porenradialverteilung errechnete Funktion über. Der kapillare Feuchte-transport über Materialgrenzen hinweg und die Gleichgewichtszustände im überhygrokopischen Bereich lassen sich mit diesem Modell ohne Zusatzfunktionen berechnen. Die sich ergebende Feuchte-transportgleichung sieht mit den vom Autor [57] gewählten Feuchte-transportkoeffizienten FDP und FDT für die Dampfdiffusion und FKU für die Kapillarleitung wie folgt aus:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot \left( FKU \frac{dw}{d\phi} \nabla \phi + \rho_w (FDP \nabla \vartheta + FDT \nabla \vartheta) \right) \quad (40)$$

$w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt
$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Wassers
$\phi$ [-]	verallgemeinertes Feuchtepotential
$\varphi$ [-]	relative Luftfeuchte
$\vartheta$ [°C]	Temperatur

Diese Gleichung dient als Grundlage für ein EDV-Programm, mit dem das nichtisotherme Feuchteverhalten von verschiedenen Dach- und Wandkonstruktionen berechnet wurde. Die Validierung der Rechenergebnisse erfolgte u.a. am Beispiel eines Porenbetonflachdaches, dessen Austrocknungsverhalten von [77] experimentell erfaßt wurde.

Das Modell von Kießl wurde auch von Garrecht [33] übernommen und auf zweidimensionale, allerdings nur isotherme Verhältnisse übertragen. Mit Hilfe eines Finite-Elemente-Programmsystems berechnet dieser den Feuchtehaushalt von im Fundamentbereich befeuchtetem Mauerwerk. Da in vielen Gebäuden Temperaturgradienten im Mauerwerk eine bedeutende Rolle spielen, ist dieses Programm jedoch nur begrenzt einsetzbar. Nicht isotherm, aber nur für stationäre Verhältnisse anwendbar, ist die zweidimensionale Erweiterung des Kießl'schen Modells von Elsner und Winter [28] zur Berechnung des Feuchteinflusses auf den Wärmetransport von Hochlochmauersteinen.

Aufbauend auf dem Diffusionsmodell von Kerestecioglu [55] unter Hinzunahme der Kießl'schen Kapillarleitansätze haben Kupke und Pfrommer [86] ein Rechenverfahren entwickelt, das mit den Feuchtepotentialen "Temperatur" und "Wasserdampfkonzentration" arbeitet. Die dafür notwendigen mathematischen Umformungen führen allerdings zu Transportkoeffizienten, die keine physikalische Vorstellung mehr erlauben. So wird beispielsweise der Kapillartransport in einen konzentrations- und einen temperaturbedingten Anteil aufgespalten, wobei der temperaturbedingte Feuchtestrom dem Temperaturgefälle entgegen, d.h. von der kalten zur warmen Seite läuft.

Obwohl nachweislich für die Berechnung des Feuchtetransports in Bauteilen prinzipiell geeignet, liegen die Nachteile des Kießl'schen Modells (Gleichung (40)) und der darauf aufbauenden Berechnungsverfahren in der experimentell aufwendigen Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten FDP und FDT und in der etwas abstrakten Definition des verallgemeinerten Feuchtepotentials (Gleichung (3)). Ähnliche Feuchtepotentiale wie Kießl verwenden Neiß [97] und Matsumoto und Sato [92] in ihren Feuchtetransportmodellen. Das zweidimensionale Verfahren von Neiß ist für die Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden konzipiert. Es basiert auf den Feuchtepotentialen Temperatur und Saugspannung. Anstelle der Saugspannung wählen Matsumoto und Sato das chemische Potential des Wassers zur Berechnung von Tauwasserbildung in Bauteilen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß zur Berechnung des nichtisothermen Feuchtetransports zwei unabhängige treibende Potentiale erforderlich sind. Am häufigsten werden die Temperatur, der Wassergehalt, der Dampfdruck und die Saugspannung (kapillarer Unterdruck) als Feuchtetransportpotentiale verwendet. Betrachtet man die physikalischen Hintergründe des Dampf- und Flüssigtransports, so stellen die Temperatur und der Wassergehalt nur indirekte Feuchtepotentiale dar. Die sich bei der Kombination dieser beiden Potentiale ergebenden Transportkoeffizienten sind im allgemeinen schwer zu bestimmen und führen zu relativ komplizierten Funktionen. Einfachere und physikalisch plausible Transportkoeffizienten ergeben sich bei der Wahl der echten Feuchtetriebkräfte "Dampfdruck" und "Kapillardruck". Der Kapillardruck hat allerdings den Nachteil, daß er in nicht kapillaraktiven oder trockenen Stoffen nicht definierbar ist. Außerdem läßt er sich nicht direkt im feuchten Stoff messen. Er kann aber, wie in Ziffer 2.2.2 gezeigt, durch die relative Feuchte ersetzt werden. Der Dampfdruck und die relative Feuchte stellen somit zwei physikalisch begründete Feuchtetransportpotentiale dar, die allgemein bekannt und einfach zu

messen sind. Dies hat insbesondere für die Formulierung der Randbedingungen große Vorteile. Trotz dieser Vorteile wurden diese beiden Potentiale in ihrer Kombination bisher nicht für Feuchteberechnungsverfahren eingesetzt.

### **3 Numerische Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports**

Aus den beschriebenen physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports läßt sich ein geschlossenes Differentialgleichungssystem entwickeln, mit dem sich das Feuchteverhalten mehrschichtiger Bauteile unter natürlichen Klimarandbedingungen berechnen läßt. Da es sich um ein nichtlineares Gleichungssystem mit stark potentialabhängigen Koeffizienten handelt, ist eine analytische Lösung nicht möglich. Im folgenden werden die Ableitung des gekoppelten Gleichungssystems und das numerische Lösungsverfahren, das die Grundlage des neu entwickelten EDV-Programmes WUFIZ (Wärme- und Feuchtetransport instationär zweidimensional) bildet, genauer erläutert. Anschließend werden Hinweise zur sinnvollen Wahl des numerischen Gitters und der Zeitschritte gegeben. Außerdem werden die Konvergenzkriterien und Kontrollen zur Genauigkeit der numerischen Berechnung beschrieben.

#### **3.1 Ableitung der Transportgleichungen**

Sowohl für die Wärme als auch für die Feuchte gilt der Erhaltungssatz, d.h. die Änderung der Enthalpie bzw. der Feuchtemenge in einem Volumenelement wird bestimmt durch die Divergenz der Wärme- bzw. Feuchtestrome durch die Oberfläche dieses Elements und die Wärme- bzw. Feuchtequellen oder -senken im Element. Für die Wärme ergibt sich daraus folgende Bilanzgleichung:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\nabla \cdot q + S_h \quad (41)$$

H [J/m<sup>3</sup>]    Gesamtenthalpie  
q [W/m<sup>2</sup>]    Wärmestromdichte



$S_h$  [W/m<sup>3</sup>] Wärmequelle oder -senke

Die Gesamtenthalpie der Bauteilschicht setzt sich aus der Enthalpie des Baustoffgerüsts in Gleichung (25) und der Enthalpie des darin enthaltenen Wassers in Gleichung (26) zusammen:

$$H = H_s + H_w \quad (42)$$

$H_s$  [J/m<sup>3</sup>] Enthalpie des trockenen Baustoffes

$H_w$  [J/m<sup>3</sup>] Enthalpie der Baustoffeuchte

Die Wärmestromdichte ist proportional zur Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs in Gleichung (27) und zum Temperaturgradient:

$$q = -\lambda \nabla \vartheta \quad (43)$$

$q$  [W/m<sup>2</sup>] Wärmestromdichte

$\lambda$  [W/mK] Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes

$\vartheta$  [°C] Temperatur

Die Enthalpieströme durch Feuchtebewegung und Phasenumwandlung können in Form von Quelltermen in der Wärmebilanzgleichung berücksichtigt werden. Da, wie in Ziffer 2.4.3 dargelegt, nur die Dampfdiffusion mit gleichzeitiger Phasenumwandlung von praktischer Bedeutung ist, resultiert für den Quellterm folgende Beziehung:

$$S_h = -h_v \nabla \cdot g_v \quad (44)$$

$S_h$  [J/m<sup>3</sup>s] Wärmequelle/senke durch Tau- en/Verdunsten

$h_v$  [J/kg] Latentwärme beim Phasenübergang

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] Dampfdiffusionsstromdichte

Die Latentwärme beim Phasenübergang setzt sich aus der spezifischen Verdunstungsenthalpie des reinen Wassers ( $h_v = 2500$  kJ/kg) und der baustoffabhängigen Sorptionsenthalpie zusammen. Die Sorptionsenthalpie ist jedoch, wie bereits erwähnt, im bauphysikalisch bedeutsamen Feuchtebereich über 50 % relativer Feuchte für die meisten Baustoffe gegenüber der Verdunstungsenthalpie vernachlässigbar. Die Dampfdiffusionsstromdichte  $g_v$  wird durch

die Feuchtebilanzgleichung berechnet, die sich analog zur Wärmebilanzgleichung wie folgt darstellen läßt:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot (g_w + g_v) + S_w \quad (45)$$

$w$  [kg/m<sup>3</sup>] Wassergehalt der Bauteilschicht

$g_w$  [kg/m<sup>2</sup>s] Flüssigtransportstromdichte

$g_v$  [kg/m<sup>2</sup>s] Dampfdiffusionsstromdichte

$S_w$  [kg/m<sup>3</sup>s] Feuchtequelle oder -senke

Die Flüssigtransportstromdichte  $g_w$  ist, wie in Ziffer 2.3 abgeleitet, abhängig vom Gradienten der relativen Luftfeuchte:

$$g_w = -D_\varphi \nabla \varphi \quad (46)$$

$D_\varphi$  [kg/ms] Flüssigleitkoeffizient

$\varphi$  [-] relative Feuchte

Die Dampfdiffusionsstromdichte  $g_v$  kann nach Ziffer 2.3 folgendermaßen bestimmt werden:

$$g_v = -\delta_p \nabla p \quad (47)$$

$\delta_p$  [kg/msPa] Wasserdampfpermeabilität des Baustoffs

$p$  [Pa] Wasserdampfpartialdruck

Die Wasserdampfpermeabilität des Baustoffes ist der Quotient aus dem Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten in Luft und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  des Baustoffes, wie durch Vergleich mit Gleichung (11) deutlich wird. Feuchtequellen treten in Bauteilen nur sehr selten (z.B. bei einem Wasserrohrbruch) auf; sie werden hier nicht berücksichtigt. Feuchtesenken sind für die Praxis von größerer Bedeutung, da durch sie das Abbindeverhalten von Beton und Mörteln charakterisiert werden kann. Da es sich dabei aber um chemische Vorgänge handelt, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, werden Feuchtesenken hier ausgeklammert.

Die Gleichungen für die Wärmebilanz (41) und die Feuchtebilanz (45) sind durch die Feuchteabhängigkeit der Gesamtenthalpie, der Wärmeleitfähigkeit und des Quellterms in Gleichung

(41) und durch die Temperaturabhängigkeit der Feuchteströme in Gleichung (45) eng aneinander gekoppelt. Sie können nur dann geschlossen gelöst werden, wenn die Gesamtzahl der Variablen in beiden Gleichungen auf zwei beschränkt wird. Diese beiden Variablen, aus denen sich alle anderen durch einfache Beziehungen ableiten lassen, sind die Temperatur und die relative Feuchte. Daraus folgt für den gekoppelten Wärme- und Feuchte-transport:

$$\frac{dH}{d\vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \vartheta) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi p_{\text{sat}})) \quad (48)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{\text{sat}})) \quad (49)$$

$dH/d\vartheta$ [J/m <sup>3</sup> K]	Wärmespeicherfähigkeit des feuchten Baustoffs
$dw/d\varphi$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Feuchtespeicherfähigkeit des Baustoffs
$\lambda$ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs
$D_\varphi$ [kg/ms]	Flüssigleitkoeffizient des Baustoffs
$\delta_p$ [kg/msPa]	Wasserdampfpermeabilität des Baustoffs
$h_v$ [J/kg]	Verdunstungsenthalpie des Wassers
$p_{\text{sat}}$ [Pa]	Wasserdampfsättigungsdruck
$\vartheta$ [°C]	Temperatur
$\varphi$ [-]	relative Feuchte

Der Wasserdampfsättigungsdruck  $p_s$  lässt sich mit Hilfe einer empirischen Beziehung [22] in Abhängigkeit von der Temperatur  $\vartheta$  berechnen:

$$p_{\text{sat}} = 611 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot \vartheta}{\vartheta_0 + \vartheta}\right) \quad (50)$$

mit

$$a = 22,44 \quad \vartheta_0 = 272,44 \text{ °C} \quad \vartheta < 0 \text{ °C}$$

$$a = 17,08 \quad \vartheta_0 = 234,18 \text{ °C} \quad \vartheta > 0 \text{ °C}$$

Für zweidimensionale Verhältnisse und kartesische Koordinaten erhält man aus den Gleichungen (48) und (49) unter Berücksichtigung der für einige Bauteile bedeutsamen Anisotropie in den

Stoffeigenschaften folgende Transportgleichungen für die Wärme und Feuchte:

$$\frac{dH}{d\vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_{px} \frac{\partial \varphi p_{\text{sat}}}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial y} \left( \delta_{py} \frac{\partial \varphi p_{\text{sat}}}{\partial y} \right) \quad (51)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{\varphi x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \delta_{px} \frac{\partial \varphi p_{\text{sat}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{\varphi y} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \delta_{py} \frac{\partial \varphi p_{\text{sat}}}{\partial y} \right) \quad (52)$$

$\lambda_x, \lambda_y$ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit in x- bzw. y-Richtung
$D_{\varphi x}, D_{\varphi y}$ [kg/ms]	Flüssigleitkoeffizient in x- bzw. y-Richtung
$\delta_{px}, \delta_{py}$ [kg/msPa]	Dampfpermeabilität in x- bzw. y-Richtung

Da auch achsensymmetrische Bauteile, wie Säulen, Schornsteine etc. mit dem EDV-Programm WUFIZ berechnet werden können, werden die Transportgleichungen hier auch in Zylinderkoordinaten angegeben:

$$\frac{dH}{d\vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_r \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) + \frac{h_v}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \delta_{pr} \frac{\partial \varphi p_{\text{sat}}}{\partial r} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial z} \left( \delta_{pz} \frac{\partial \varphi p_{\text{sat}}}{\partial z} \right) \quad (53)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_{\varphi r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + r \delta_{pr} \frac{\partial \varphi p_{\text{sat}}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{\varphi z} \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \delta_{pz} \frac{\partial \varphi p_{\text{sat}}}{\partial z} \right) \quad (54)$$

$\lambda_r, \lambda_z$ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit in radialer bzw. axialer Richtung
$D_{\varphi r}, D_{\varphi z}$ [kg/ms]	Flüssigleitkoeffizient in radialer bzw. axialer Richtung
$\delta_{pr}, \delta_{pz}$ [kg/msPa]	Dampfpermeabilität in radialer bzw. axialer Richtung

Die Flüssigleitkoeffizienten und die Wasserdampfpermeabilität in x- und y-Richtung bzw. in r- und z-Richtung können sich je nach Baustoff mehr oder weniger stark unterscheiden. Besonders bei Holz und Holzwerkstoffen ist diese Richtungsabhängigkeit der Transportkoeffizien-

ten ausgeprägt [60]. Aber auch mineralische Baustoffe, wie z.B. manche Natursteine [73], können aufgrund von Sedimentationseinflüssen anisotrope Eigenschaften besitzen. Die gekoppelten Gleichungssysteme sind nur numerisch lösbar, wobei die Kopplung der Wärme- und Feuchtetransportgleichungen iterativ durch wiederholtes Nacheinanderlösen der einzelnen Gleichungen erfolgen muß. Die numerische Diskretisierung und das Lösungsverfahren werden anhand der Gleichungen (51) und (52) im folgenden genauer beschrieben.

### 3.2 Diskretisierung der Differentialgleichungen

Für die örtliche Diskretisierung der partiellen Differentialgleichungen wird ein Finite-Volumen-Verfahren [101] der Finite-Element-Methode [46] vorgezogen. Die Diskretisierung durch Finite Elemente ist im Vergleich zum Finite-Volumen-Verfahren komplexer und bisher für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport noch nicht zufriedenstellend gelöst. Andererseits spielen die Vorteile der Finiten Elemente, die in der besseren Annäherung komplizierter Geometrien liegen, für die Bauphysik eine untergeordnete Rolle, da die meisten feuchte-technisch zu untersuchenden Bauteile rechteckig oder zylinderförmig sind. Die zeitliche Diskretisierung kann durch eine explizite oder implizite Formulierung erfolgen [17], [50]. Bei der expliziten Formulierung werden die Variablen zum neuen Zeitpunkt ausschließlich aus zu diesem Zeitpunkt bereits bekannten Werten ermittelt. Die Stabilität dieser Formulierung ist allerdings an bestimmte Bedingungen geknüpft, die bei entsprechender Ortsauflösung zu sehr kleinen Zeitschritten führen [50]. Der durch die geforderten kleinen Zeitschritte bedingte Rechenaufwand übersteigt im allgemeinen bei weitem den Aufwand bei Verwendung der etwas komplexeren impliziten Formulierung. Die implizite Formulierung mündet in eine Matrixgleichung, da alle Variablen zum neuen Zeitpunkt gleichzeitig gelöst werden müssen. Sie ist jedoch für alle Zeitschrittgrößen stabil. Das gleiche gilt für

eine Kombination aus expliziter und impliziter Formulierung, die nach ihren Autoren genannte Crank-Nicolson-Formulierung [18]. Die Crank-Nicolson-Formulierung ist von höherer Ordnung und damit theoretisch genauer und wird deshalb häufiger verwendet als die voll implizite Formulierung. Beim Einsatz für Transportberechnungen ist sie jedoch aufgrund der nichtlinearen Transportkoeffizienten anfällig für numerisch induzierte Schwingungen, wie Arbeiten von [102] und [111] gezeigt haben. Aber auch aus prinzipiellen Gründen, die in [101] dargelegt sind, ist die voll implizite Formulierung insbesondere bei größeren Zeitschritten eine bessere Näherung der physikalischen Gegebenheiten als die Crank-Nicolson-Formulierung. Deshalb wird zur zeitlichen Diskretisierung der Transportgleichungen die implizite Formulierung verwendet.

Anhand der zweidimensionalen Transportgleichung (51) und (52) für kartesische Koordinaten wird im folgenden das Diskretisierungsverfahren, das in analoger Form auch für die achsensymmetrischen Transportgleichungen durchgeführt werden kann, erläutert. Zunächst werden die Gleichungen über ein diskretes Volumen, dargestellt in Bild 28, von der West- (w) zur Ostseite (e) in x-Richtung und von Süd- (s) zur Nordseite (n) in y-Richtung integriert. Zur Diskretisierung wird vorausgesetzt, daß im betrachteten Volumen überall die gleichen Bedingungen herrschen und die Wärme- bzw. Feuchteströme über die jeweiligen Volumengrenzen mit den Längen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  konstant sind. Bei linearer Interpolation der Transportkoeffizienten ergibt sich unter Berücksichtigung der Bezeichnungen in Bild 28 im betrachteten Volumenelement zum neuen Zeitpunkt (n+1) für eine skalare Größe (hier mit  $\phi$  bezeichnet), wie die Temperatur oder die relative Feuchte folgende Differenzgleichung:

$$\begin{aligned}
& c \left( \phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^n \right) \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} = \\
& = \Gamma_{xe} \left( \phi_{i+1,j}^{n+1} - \phi_{i,j}^{n+1} \right) \frac{\Delta y}{\Delta x_e} - \Gamma_{xw} \left( \phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i-1,j}^{n+1} \right) \frac{\Delta y}{\Delta x_w} + \\
& + \Gamma_{yn} \left( \phi_{i,j+1}^{n+1} - \phi_{i,j}^{n+1} \right) \frac{\Delta x}{\Delta y_n} - \Gamma_{ys} \left( \phi_{i,j}^{n+1} - \phi_{i,j-1}^{n+1} \right) \frac{\Delta x}{\Delta y_s} + \\
& + S \Delta x \Delta y
\end{aligned} \tag{55}$$

$\phi$	skalare Größe (Temperatur oder relative Feuchte)
$c$	Speicherfähigkeit des Volumenelements an der Stelle $i, j$
$\Gamma_{xe}, \Gamma_{xw}$	Transportkoeffizienten an der Ost-, West-, Nord- bzw. Südgrenze des Volumenelements $i, j$
$\Gamma_{yn}, \Gamma_{ys}$	Transportkoeffizienten an der Ost-, West-, Nord- bzw. Südgrenze des Volumenelements $i, j$
$S$	Quelle oder Senke im Volumenelement $i, j$
$\Delta t$	Weite des Zeitschritts
$\Delta x, \Delta y$	Ausdehnung des Volumenelements $i, j$ in $x$ - bzw. $y$ -Richtung
$\Delta x_e, \Delta x_w$	Abstände zwischen der Mitte des Volumenelements $i, j$ und den Mittelpunkten der Nachbarlemente in Ost-, West-, Nord- bzw. Südrichtung
$\Delta y_n, \Delta y_s$	Abstände zwischen der Mitte des Volumenelements $i, j$ und den Mittelpunkten der Nachbarlemente in Ost-, West-, Nord- bzw. Südrichtung
$i$	Indizierung der Volumenelemente in $x$ -Richtung
$j$	Indizierung der Volumenelemente in $y$ -Richtung
$n$	Indizierung der Zeitschritte

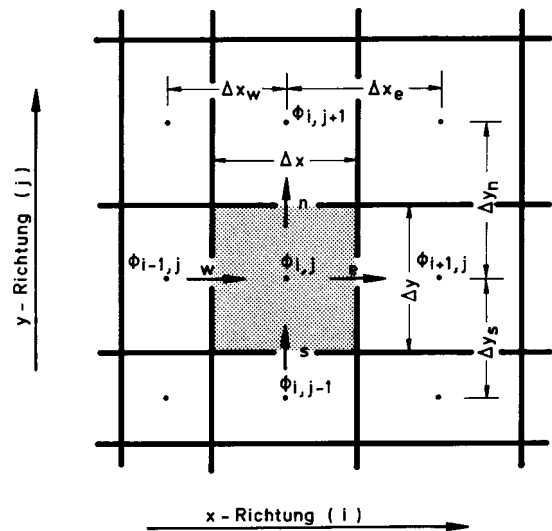
Durch Auflösen dieser Gleichung nach den Unbekannten  $\phi$  erhält man bei Betrachtung aller Volumenelemente folgende Matrixgleichung:

$$a_p \phi_{i,j}^{n+1} + a_e \phi_{i+1,j}^{n+1} + a_w \phi_{i-1,j}^{n+1} + a_n \phi_{i,j+1}^{n+1} + a_s \phi_{i,j-1}^{n+1} = b \tag{56}$$

$a_p$	Matrixkoeffizient zum Volumenelement an der Stelle $i, j$
$a_e$	Matrixkoeffizient zum östlichen Nachbarlement
$a_w$	Matrixkoeffizient zum westlichen Nachbarlement
$a_n$	Matrixkoeffizient zum nördlichen Nachbarlement
$a_s$	Matrixkoeffizient zum südlichen Nachbarlement

## b Komponente des Bestimmungsvektors

Die Matrixkoeffizienten charakterisieren die Verknüpfung der einzelnen Volumenelemente. Sie bilden zusammen fünf Diagonalen in der quadratischen Koeffizientenmatrix. Die Komponenten des Bestimmungsvektors enthalten die Rand- und Anfangsbedingungen sowie eventuelle Quellterme. Die Matrixkoeffizienten und Bestimmungsvektorkomponenten, die sich bei der Diskretisierung der Wärme- bzw. Feuchtetransportgleichung ergeben, indem man in Gleichung (56) die skalare Größe  $\phi$  durch die Temperatur  $\vartheta$  oder die relative Feuchte  $\phi$  ersetzt, sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Auf diese Weise ist aus den Differentialgleichungen (51) und (52) ein gekoppeltes Matrixgleichungssystem entstanden, dessen Lösung im folgenden erläutert wird.



**Bild 28** Schematische Darstellung der Finite-Volumen-Diskretisierung anhand eines Kontrollvolumens mit den Seitenlängen  $\Delta x$  und  $\Delta y$  (schraffiert) und seiner Nachbarlemente. Die Variablen im betrachteten Kontrollvolumen  $\phi_{i,j}$  stehen durch die mit Pfeilen gekennzeichneten Transportströme mit den Nachbarvariablen in West- ( $w$ ) und Ostrichtung ( $e$ ) sowie in Nord- ( $n$ ) und Südrichtung ( $s$ ) in Verbindung.

**Tabelle 7** Zusammensetzung der Matrixkoeffizienten und der Bestimmungsvektoren der diskretisierten kartesischen Wärme- und Feuchtetransportgleichungen. Die Indizes beziehen sich auf die in Bild 28 dargestellten Raumrichtungen.

Matrixkoeffizienten	Diskretisierte Differentialgleichungen	
	Wärmetransport	Feuchtetransport
$a_p$	$-\lambda_{xe}\Delta y / \Delta x_e$ $-\lambda_{xw}\Delta y / \Delta x_e$ $-\lambda_{yn}\Delta x / \Delta y_n$ $-\lambda_{ys}\Delta x / \Delta y_s$ $-dH/d\vartheta \cdot \Delta x \Delta y / \Delta t$	$-D_{\varphi_{xe}}\Delta y / \Delta x_e - p_{sati,j}\delta_{pxe}\Delta y / \Delta x_e$ $-D_{\varphi_{xw}}\Delta y / \Delta x_w - p_{sati,j}\delta_{pxw}\Delta y / \Delta x_w$ $-D_{\varphi_{yn}}\Delta x / \Delta y_n - p_{sati,j}\delta_{pyn}\Delta x / \Delta y_n$ $-D_{\varphi_{ys}}\Delta x / \Delta y_s - p_{sati,j}\delta_{pys}\Delta x / \Delta y_s$ $-dw/d\varphi \cdot \Delta x \Delta y / \Delta t$
$a_e$	$\lambda_{xe}\Delta y / \Delta x_e$	$D_{\varphi_{xe}}\Delta y / \Delta x_e - p_{sati+1,j}\delta_{pxe}\Delta y / \Delta x_e$
$a_w$	$\lambda_{xw}\Delta y / \Delta x_e$	$D_{\varphi_{xw}}\Delta y / \Delta x_w - p_{sati-1,j}\delta_{pxw}\Delta y / \Delta x_w$
$a_n$	$\lambda_{yn}\Delta x / \Delta y_n$	$D_{\varphi_{yn}}\Delta x / \Delta y_n - p_{sati,j+1}\delta_{pyn}\Delta x / \Delta y_n$
$a_s$	$\lambda_{ys}\Delta x / \Delta y_s$	$D_{\varphi_{ys}}\Delta x / \Delta y_s - p_{sati,j-1}\delta_{pys}\Delta x / \Delta y_s$
$b$	$-\vartheta_{i,j}^n dH/d\vartheta \cdot \Delta x \Delta y / \Delta t$ $+ S_h \Delta x \Delta y / \Delta t$	$-\varphi_{i,j}^n dw/d\varphi \cdot \Delta x \Delta y / \Delta t$

### 3.3 Lösung des Matrixgleichungssystems

Die Matrixgleichungen für den Wärme- und Feuchtetransport werden durch eine sehr effiziente Kombination aus einem direkten Lösungsverfahren, dem Tridiagonalalgorithmus und einem iterativen Lösungsverfahren ähnlich dem sogenannten "Gauß-Seidl"-Algorithmus gelöst [105]. Angewendet auf Gleichung (56) bedeutet dies, daß zunächst die Pentadiagonalmatrix in eine Matrix mit nur drei besetzten Diagonalen umgewandelt werden muß, indem beispielsweise die Terme für die Nord- und Südrichtung vom Bestimmungsvektor  $b$  abgezogen werden:

$$a_p \phi_{i,j} + a_e \phi_{i+1,j} + a_w \phi_{i-1,j} = b_1 \quad (57)$$

$a_e, a_p, a_w$  Matrixkoeffizienten in Ost-West-Richtung

$\phi_{i+1,j}, \phi_{i,j}, \phi_{i-1,j}$  Variable in Ost-West-Richtung

$b_1$  Neuer Bestimmungsvektor mit Nord-Süd-Verknüpfungstermen

Anschließend wird Gleichung (57) mit Hilfe des Tridiagonalalgorithmus, einem direkten Eliminationsalgorithmus, gelöst. Da jedoch die Verknüpfungen in Nord-Süd-Richtung im Bestimmungsvektor nur Schätzwerte waren, handelt es sich bei dem so erhaltenen Lösungsvektor noch nicht um die exakte Lösung. Deshalb wird Gleichung (56) jetzt so umgestellt, daß die Ost-West-Verknüpfungsterme dem Bestimmungsvektor zugeschlagen werden:

$$a_p \phi_{i,j} + a_n \phi_{i,j+1} + a_s \phi_{i,j-1} = b_2 \quad (58)$$

$a_n, a_p, a_s$  Matrixkoeffizienten in Nord-Süd-Richtung

$\phi_{i,j+1}, \phi_{i,j}, \phi_{i,j-1}$  Variable in Nord-Süd-Richtung

$b_2$  Neuer Bestimmungsvektor mit Ost-West-Verknüpfungstermen

Auch Gleichung (58) kann jetzt mit dem Tridiagonalalgorithmus gelöst werden. Die beiden Gleichungen (57) und (58) werden solange abwechselnd gelöst, wobei die Variablen ständig aktualisiert werden (d.h. mit den zuletzt berechneten Werten belegt werden), bis das jeweilige

Konvergenzkriterium erreicht wird. Dieses Lösungsverfahren wird als ADI-Methode (Alternating Direction Implicit) bezeichnet [103], da das Variablenfeld abwechselnd in der x- und y-Richtung berechnet wird.

Die Kopplung der Wärme- und Feuchtetransportgleichung erfolgt durch ein mehrfaches Nacheinanderlösen der beiden Gleichungen mit Hilfe der ADI-Methode, wobei die Speicher- und Transportkoeffizienten vor jedem Lösungsschritt an die neuen Temperatur- bzw. Feuchtefelder angepaßt werden. Die endgültigen Variablenfelder für den jeweiligen Zeitschritt gelten als erreicht, wenn die maximalen Veränderungen von Temperatur und Feuchte in einem Bauteil von einem Iterationsschritt zum nächsten vorher festgesetzte Grenzwerte unterschreitet. Da die Feuchtetransportkoeffizienten im allgemeinen sehr stark wassergehaltsabhängig sind, ist es meist vorteilhaft, das aktuelle Feuchtefeld durch Mittelung aus den momentanen Werten und den Werten des vorhergehenden Iterationsschrittes zu errechnen. Diese Maßnahme hat keinerlei Auswirkungen auf die Genauigkeit der Berechnung, sondern dient lediglich der Konvergenzbeschleunigung.

### 3.4 Ablaufschema des numerischen Berechnungsverfahrens

Zur Erläuterung der wesentlichen Schritte bei der Lösung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportgleichungen wird das Ablaufschema des Berechnungsverfahrens, das dem EDV-Programm WUFIZ zugrundeliegt, anhand des Flußdiagrammes in Bild 29 beschrieben. Zur Berechnung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauteilen ist zunächst die Erstellung folgender Datensätze erforderlich:

- Der Aufbau des zu berechnenden Bauteils und das numerische Gitter, dessen Elementgrößen dem Schichtaufbau und den zu erwartenden lokalen Klimaeinwirkungen angepaßt werden müssen, wie z.B. in Ziffer 4.3 (Bild 41) gezeigt.

- Die thermisch und hygrischen Stoffkennwerte und Stofffunktionen, der am Aufbau beteiligten Baustoffe; d.h., die Rohdichte, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität, die feuchte- und eventuell richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit, die feuchte- (nur bei polymeren Kunststoffen) und eventuell richtungsabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl sowie bei hygroskopischen, kapillaraktiven Stoffen auch die Feuchtespeicherfunktion und die eventuell richtungsabhängigen Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterverteilung. Beispiele für die Zusammenstellung dieser Daten folgen in Ziffer 4.

- Die klimatischen Randbedingungen innen und außen bzw. an vier verschiedenen Seiten im zweidimensionalen Fall sowie die Vorgabe der Zeitschritte, die von den Klimadaten und der geforderten Rechengenauigkeit abhängt. Als Klimaparameter dienen die Temperatur und die relative Luftfeuchte. Außerdem können die kurzweilige Strahlung und der Niederschlag auf die Bauteiloberfläche berücksichtigt werden, wie am Beispiel einer Natursteinfassade in Ziffer 4.1 gezeigt wird.

- Die Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen an den Bauteilgrenzen sowie die Steuerparameter. Zu den Übergangsbedingungen gehören der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient sowie der Strahlungsabsorptionsgrad und der Regenfaktor, die im Falle einer Symmetriebedingung an der entsprechenden Stelle alle zu Null werden. Durch die Steuerparameter werden die Rechengenauigkeit (siehe Ziffer 3.5) die Form der Anfangsbedingungen und andere berechnungsspezifische Parameter eingestellt.

Nach der Eingabe dieser Datensätze werden zunächst die stationären Anfangsverteilungen von Feuchte und Temperatur berechnet oder beliebige Ausgangszustände, z.B. Verteilungen aus Messungen oder anderen Berechnungen eingelesen. Nun beginnt die instationäre Berechnung der Temperatur- und Feuchtefelder. Für jeden neuen Zeitschritt werden die gekop-

pelten Wärme- und Feuchtetransportgleichungen solange abwechselnd gelöst, bis das vorgegebene Abbruchkriterium erreicht ist. Dabei werden vor jeder iterativen Lösung der Wärmetransportgleichung alle feuchte- und temperaturabhängigen thermischen Speicher- und Transportkoeffizienten aktualisiert. Das gleiche gilt für die Berechnung der hygrischen Koeffizienten vor der Lösung der Feuchtetransportgleichung. Am Ende des vorgegebenen Berechnungszeitraumes beginnt die Ausgabe der gewünschten Temperatur- und Feuchtefelder bzw. der Wärme- und Feuchteströme sowie der zeitlichen Verläufe dieser Variablen. Die Feuchte- und Temperaturfelder können wiederum als Anfangsbedingungen für weiterführende Berechnungen dienen.

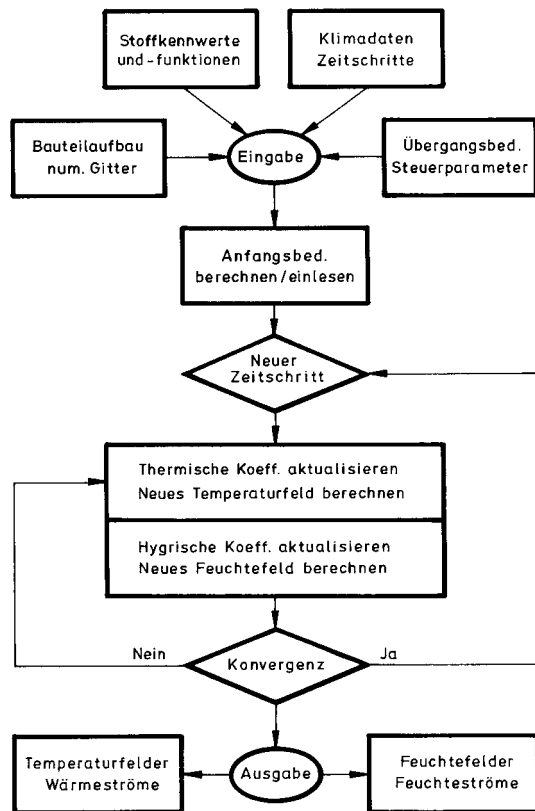


Bild 29 Ablaufschema des Berechnungsverfahrens, da dem EDV-Programm WUFIZ zugrunde liegt.

### 3.5 Genauigkeit der numerischen Lösung

Die Genauigkeit des numerischen Lösungsverfahrens hängt von der Wahl der Abbruchkriterien, der Größe der Zeitschritte und den Maschenweiten des numerischen Gitters ab. Als

Abbruchkriterien für die numerische Iteration ist es in den meisten Fällen ausreichend, wenn die maximale Änderung der Variablen im Berechnungsgebiet während zweier aufeinanderfolgender Iterationsschritte bei der relativen Feuchte ein Tausendstel Prozent und bei der Temperatur ein Tausendstel Grad Celsius unterschreitet. Bei langanhaltenden hohen Wassergehalten im Bauteil sollte das Abbruchkriterium für die Feuchte nochmals um den Faktor zehn vermindert werden, da kleine Änderungen in der relativen Feuchte relativ große Änderungen im Wassergehalt zur Folge haben können.

Die Größe der Zeitschritte hängt von der Zeitstruktur der Randbedingungen und den zu erwartenden Temperatur- und Feuchtetransienten im Bauteil ab. Bei Verwendung stündlicher Klimarandbedingungen ist eine Zeitschrittweite von einer Stunde ausreichend. Für bauphysikalische Feuchtetransportberechnungen sind Zeitschrittweiten zwischen ca. 10 Minuten und etwa 24 Stunden sinnvoll. Bei kleineren Zeitschritten wird die Rechenzeit sehr hoch und bei größeren Zeitschritten kann die Berechnung zu ungenau werden. Zur Optimierung der Berechnung sollte die Größe der Zeitschritte bei konstanten Randbedingungen an die Temperatur- und Feuchteänderungen im Bauteil kontinuierlich angepasst werden.

Die Maschenweiten des numerischen Gitters richten sich nach den zu erwartenden Feuchte- und Temperaturfeldern im Bauteil. Im Bereich hoher Feuchte- oder Temperaturgradienten sowie eventuell an Schichtgrenzen sind Maschenweiten von nur wenigen Millimetern erforderlich, während die Gitterabstände im Bereich geringer Gradienten einige Zentimeter, in Ausnahmefällen auch Dezimeter betragen können, ohne einen Verlust an Rechengenauigkeit befürchten zu müssen. Um Speicherkapazität und Rechenzeit zu sparen ohne Einbußen an Genauigkeit, ist deshalb die Erzeugung eines numerischen Gitters mit variablen Maschenweiten notwendig. Dabei sollten die Gitterelemente örtlich kontinuierlich und nicht sprunghaft den zu erwartenden Gradienten im Bauteil angepasst werden.

Ein Beispiel für ein solchermaßen angepaßtes Gitter wird in Ziffer 4.3 (Bild 41) gezeigt. Die kontinuierliche Veränderung der Maschenweiten eines Gitters wird am besten mit Hilfe von Expansion- bzw. Kontraktionsfaktoren erreicht:

$$\Delta x_{i+1} = \varepsilon \cdot \Delta x_i \quad (59)$$

$\Delta x_i, \Delta x_{i+1}$  Maschenweite benachbarter Gitterelemente  
 $\varepsilon$  Expansion- bzw. Kontraktionsfaktor

Ist der Faktor  $\varepsilon$  größer als Eins erfolgt eine Expansion des Gitters, für Werte kleiner Eins erfolgt eine Kontraktion. Der Faktor  $\varepsilon$  muß nicht im ganzen Gitter konstant sein. Er kann von einer Bauteilschicht zur anderen variieren.

Zur Überprüfung der richtigen Wahl der Abbruchkriterien sowie der Zeitschrittweiten und des numerischen Gitters sind außer einer Plausibilitätskontrolle folgende Tests durchzuführen:

- a) Wiederholung der gesamten Berechnung mit um den Faktor zehn verminderten Abbruchkriterien und jeweils um den Faktor zwei verkleinerten Zeitschritten und Maschenweiten des numerischen Gitters und Vergleich der Ergebnisse mit denen der ersten Berechnung.
- b) Vergleich der aufsummierten Feuchteströme über die Bauteilgrenzen mit der Differenz des Wassergehalts im Bauteil am Ende und zu Beginn der Berechnung.

Sind die Unterschiede in den jeweiligen Ergebnissen beim Test a) und b) im Rahmen der Aufgabenstellung vernachlässigbar, kann von einer ausreichend genauen numerischen Lösung ausgegangen werden. Ist das bei Test a) nicht der Fall, so sind die entsprechenden Parameter neu festzulegen und der Test zu wiederholen. Treten bei Test b) zu hohe Diskrepanzen auf, so kann das an Rundungsfehlern bei der Computerarithmetik liegen [100]. In diesem Fall sollte mit einer höheren Präzision gerechnet werden. Eine genaue numerische Lösung sagt jedoch noch nichts über die

Qualität des zugrunde liegenden Transportmodells oder die Zuverlässigkeit der Stoffkennwerte aus. Hierzu ist ein Abgleich mit experimentellen Untersuchungen notwendig, der in Ziffer 4 erfolgt.

#### **4 Ergebnisvaluierung durch Vergleich mit Messungen anhand von Beispielen**

Ein neues Berechnungsverfahren muß, bevor es allgemein eingesetzt werden kann, anhand von Anwendungsbeispielen, bei denen das Wärme- und Feuchteverhalten von Bauteilen experimentell untersucht wurde, validiert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Rechenergebnisse nicht nur vom zugrunde liegenden mathematischen Modell, sondern auch von den Stoffkennwerten und den Klimadaten maßgeblich abhängen. Deshalb sind nur solche Testbeispiele geeignet, bei denen die Anfangs- und Randbedingungen sowie der Aufbau des Bauteils gut dokumentiert sind und repräsentative Stoffkennwerte zur Verfügung stehen. Wenn das nicht der Fall ist, besteht die Gefahr, daß fehlende Daten durch "frisierte" Annahmen ersetzt werden, die es erlauben, die gewünschten Rechenergebnisse zu erzielen, wobei eventuell Modellfehler verborgen bleiben. Leider gibt es in der Literatur nur sehr wenige experimentelle Untersuchungen, die die oben genannten Kriterien erfüllen. Aus diesem Grund beziehen sich die hier betrachteten Beispiele zum Teil auch auf noch unveröffentlichte experimentelle Untersuchungen.

##### **4.1 Testbeispiel I (eindimensional): Naturstein-Fassadenausschnitt mit natürlicher Bewitterung**

Das erste Testbeispiel, die Untersuchung des Feuchteverhaltens eines nach Westen orientierten Naturstein-Fassadenausschnitts [66], erfüllt die oben genannten Bedingungen vollständig. Sowohl die Stoffeigenschaften des Natursteins als auch die klimatischen Randbedingungen während des Experiments sind gut dokumentiert. Die Standardstoff-



kennwerte des Natursteines, einem Schilfsandstein, sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Die mit Hilfe von Sorptions- und Saugspannungsmessungen ermittelte Feuchtespeicherfunktion für dieses Material ist in Bild 30 dargestellt. Im nächsten Bild (Bild 31) sind die mit Hilfe von NMR-Feuchteprofilmessungen bestimmten Flüssigtransportkoeffizienten für den Saugvorgang und die kapillare Weiterverteilung aufgeführt. Die kurzweilige Absorptionszahl der Schilfsandsteinoberfläche liegt nach Messungen von [89] zwischen 0,7 im trockenen und 0,85 im nassen Zustand (siehe Tabelle 6). Damit sind alle für die Berechnung notwendigen Stoffeigenschaften in gemessener Form vorhanden.

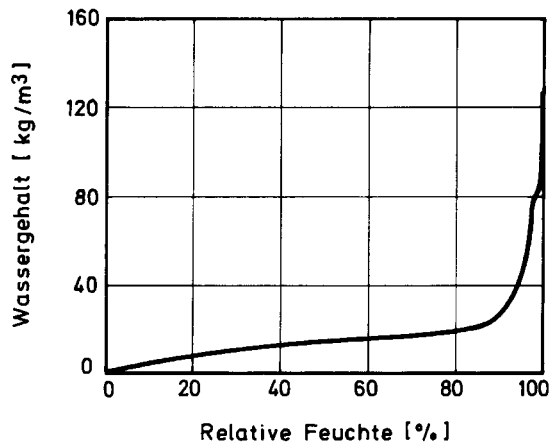


Bild 30 Durch Sorptions- und Saugspannungsmessungen ermittelte Feuchtespeicherfunktion von Sander Schilfsandstein [65].

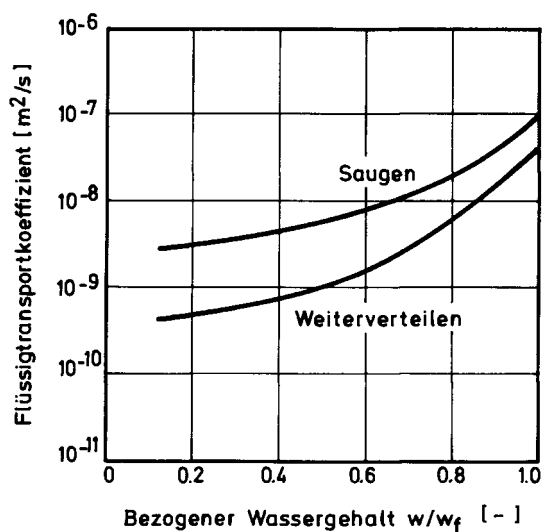


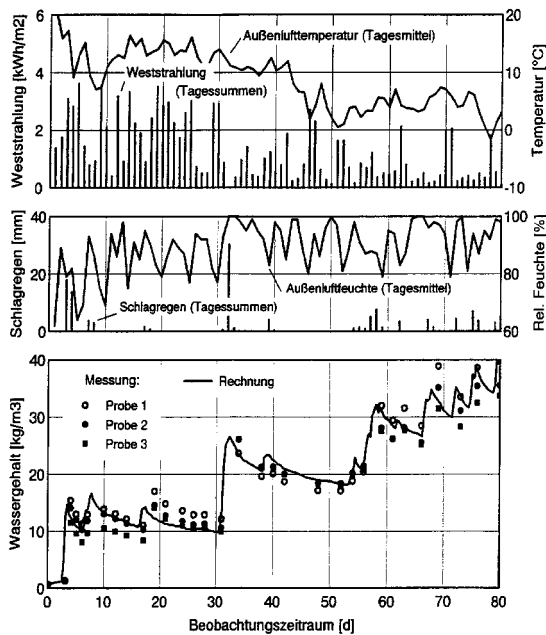
Bild 31 Flüssigtransportkoeffizienten für den Saugvorgang und die kapillare Weiterverteilung von Sander Schilfsandstein aus NMR-Feuchteprofilmessungen [65].

Tabelle 8 Zusammenstellung der Standard-Stoffkennwerte der für die Berechnungsbeispiele in Ziffer 4 verwendeten Baustoffe.

Baustoff		Schilfsandstein	Porenbeton	Kalksandstein
Grundkennwerte	Rohdichte [kg/m³]	2100	600	1800
	Porosität [-]	0,16	0,72	0,35
Thermische Kennwerte	Wärmekapazität [J/kgK]	850	850	850
	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	1,6	0,14	0,9
	Feuchtezu-schlag [%/M.-%]	8	3	8
Hygrische Kennwerte	Sorptionsfeuchte bei 80 % r.F. [kg/m³]	19	27	38
	Freie Wassersättigung [kg/m³]	128	340	275
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]	32	8	28
	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m²s⁰,5]	0,02	0,10	0,05

Das Experiment wurde an 25 cm langen flankenversiegelten Gesteinsprismen mit einem Querschnitt von 5 x 5 cm<sup>2</sup> 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 Außenlufttemperatur und -feuchte sowie der Weststrahlung und 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 32 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 Abschichtung 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.



**Bild 32** Berechneter Zeitverlauf des Wassergehaltes einer 25 cm dicken Westwand aus Natursteinmauerwerk im Vergleich zu Messungen an 3 Natursteinfassadenproben gemäß [66], mit Angabe der im Beobachtungszeitraum vorhandenen meteorologischen Randbedingungen.

Oben: Gemessener Verlauf der Strahlungsintensität und der Außenlufttemperatur.

Mitte: Gemessener Verlauf des Schlagregens und der relativen Feuchte der Außenluft.

Unten: Wassergehaltsverlauf (berechnet und gemessen):

Zur Berechnung des Feuchteverhaltens einer Natursteinfassade unter den hier angegebenen Bedingungen werden Stundenmittelwerte der registrierten Klimaparameter verwendet. Als Übergangskoeffizienten für Wärme und Feuchte werden die Werte von Tabelle 5 eingesetzt. Da über realistische Regenabsorptionszahlen, die das Verhältnis zwischen auftreffenden und auf der Oberfläche verbleibenden Regenwasser quantifizieren, keine Erfahrungen vorliegen, wird

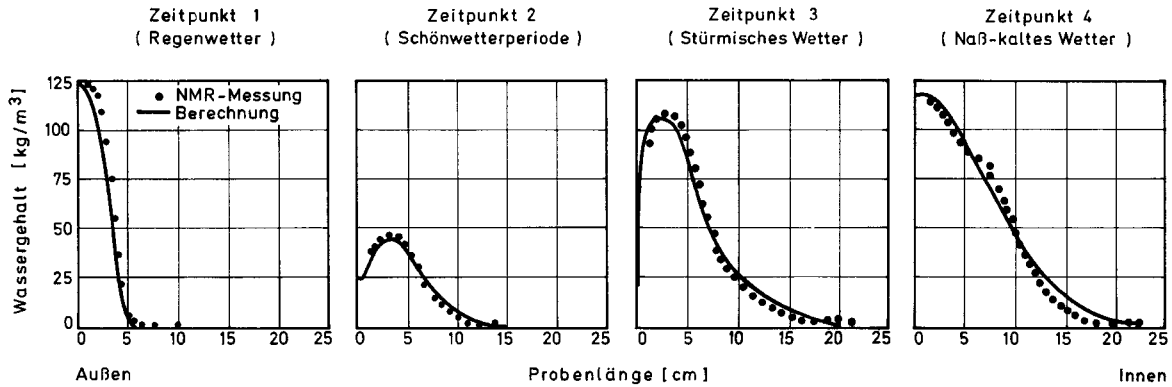
die Regenabsorptionszahl für die Berechnung zwischen 0,5 und 1,0 variiert.

In Bild 32 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 gute Übereinstimmung von berechnetem und gemessenem Feuchteverlauf in diesem Bild wurde mit einer Regenabsorptionszahl von 0,7 erzielt. Der Einfluß der Regenabsorptionszahl ist in dem hier untersuchten Beispiel allerdings nicht sehr groß. Wird die Rechnung mit einer Regenabsorptionszahl von 1,0 wiederholt, so erreicht der Wassergehalt nach 80 Tagen einen nur um  $2 \text{ kg/m}^3$  höheren Wert, was einer Differenz von weniger als 5 % entspricht. Die Messung und Berechnung zeigen deutlich einen von kurzen Trocknungsperioden unterbrochenen Anstieg der Bauteilfeuchte aufgrund des Schlagregens (in der Mitte von Bild 32 dargestellt), der auch nach 80 Tagen noch andauert.

Die sich im gleichen Zeitraum in den Fassadenprismen einstellenden Feuchteprofile sind für vier markante Zeitpunkte in Bild 33 zu sehen. Das Profil zum Zeitpunkt 1 zeigt die Gesteinsfeuchte nach der ersten Regenperiode. Ähnlich wie 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 zeigt ein Feuchteprofil bei stürmischem Wetter mit niedriger Außenluftfeuchte (im Alpenvorland als Föhnsturm bekannt). Deutlich ist hier der steile Wassergehaltsgradient in der Oberflächenzone zu erkennen, der aus der hohen Trocknungsgeschwindigkeit bei diesen Klimabedingungen resultiert. Das Feuchteprofil am Ende der 80-tägigen Beobachtungszeitraumes (Zeitpunkt 4) zeigt ein relativ gleichmäßiges Feuchtegefälle in der Fassade bei annähernd freier Wassersättigung der Außenober-

fläche und immer noch sehr geringem Wassergehalt im Bereich der Innenoberfläche. Zu allen vier Zeitpunkten ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung fast perfekt. Damit wird bestätigt, daß das Berechnungs-

modell WUFIZ bei genauer Kenntnis der Stoffkennwerte und der klimatischen Randbedingungen zuverlässige Ergebnisse erbringt.



**Bild 33** Vergleich der berechneten und an der Probe 2 in Bild 32 gemessenen [66] Feuchteprofile zu vier markanten Zeitpunkten.

Zeitpunkt 1: Nach dem ersten längeren Regen zu Versuchsbeginn.

Zeitpunkt 2: Nach einer einwöchigen Schönwetterperiode.

Zeitpunkt 3: Bei auf Regen folgendem stürmisch trockenem Wetter.

Zeitpunkt 4: Bei längerfristig naßkaltem Wetter am Ende des Beobachtungszeitraumes.

#### 4.2 Testbeispiel II (eindimensional):

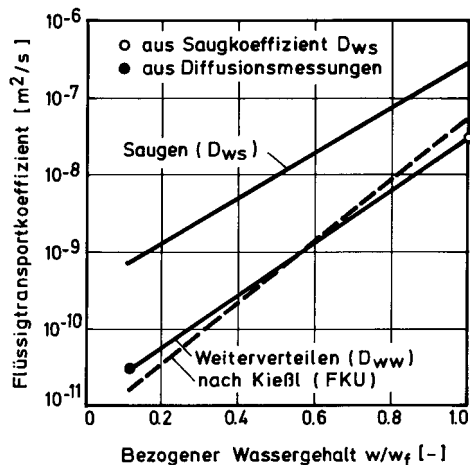
##### **Austrocknung eines Leichtbeton-Flachdaches**

Im Gegensatz zum vorangegangenen Testbeispiel wird hier ein Beispiel betrachtet, bei dem die Feuchtespeicher- und -transportfunktionen sowie die Klimabedingungen nicht genau bekannt sind, wie es in der Praxis leider häufig der Fall ist. Das Austrocknungsverhalten eines baufeuchten Leichtbetondaches kann durch Dampfdiffusionsbetrachtungen alleine nicht erklärt werden, weshalb dieser Vorgang von verschiedenen Bauphysikern (z.B. Künzel [77] und Vos [121]) eingehender meßtechnisch untersucht wurde. Berechnungen von Kießl [57] für ein Porenbetonflachdach mit einer Dicke von 15 cm bei Holzkirchner Witterungsbedingungen haben eine gute Übereinstimmung seiner Rechenergebnisse mit den Meßergebnissen in [77] ergeben. Das gleiche Beispiel soll auch als Test für das Rechenmodell WUFIZ dienen, wobei zur Ermittlung der Feuchtespeicher- und Flüssigtransportfunktionen ausschließlich auf thermische und hygrische Standardstoffkennwerte des Baustoffes zurückgegriffen wird. Diese Stoff-

kennwerte des Porenbetons, bei denen es sich um Mittelwerte der Meßergebnisse in [76] handelt, sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Die Feuchtespeicherfunktion wird mit Hilfe von Gleichung (7) aus der Sorptionsfeuchte des Baustoffes bei 80 % relativer Feuchte und der freien Wassersättigung berechnet; sie entspricht der Speicherfunktion des Porenbetons in Bild 10 rechts oben. Der wassergehaltsabhängige Kapillartransportkoeffizient für den Saugvorgang wird durch die Beziehung (24) aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten ermittelt. Er ist für Werte über der Ausgleichsfeuchte von 80 % relativer Feuchte in Bild 34 in Abhängigkeit vom Wassergehalt aufgetragen. Im gleichen Bild ist auch der Flüssigtransportkoeffizient für die Wieterverteilung dargestellt, deren oberer und unterer Eckpunkt wie folgt abgeschätzt wurde. Wie bereits in Ziffer 2.3.7 erläutert, liegt der Flüssigtransportkoeffizient für die Wieterverteilung bei freier Wassersättigung des Materials rund eine Zehnerpotenz unter dem Wert für den Saugvorgang. Der untere Eckwert des Transportkoeffizienten für die Wieterverteilung kann mit Hilfe von Gleichung (23) aus den Wasser-

dampfdiffusionswiderstandszahlen ( $\mu$ -Wert) im Trocken- und im Feuchtbereich nach DIN 52 615 [24] bestimmt werden. Die entsprechenden  $\mu$ -Werte für Porenbeton sind in Tabelle 3 aufgeführt. Der so erhaltene Transportkoeffizient wird dem Wassergehalt zugeordnet, der sich aus dem Mittel der Ausgleichsfeuchten bei 50 % und 93 % relativer Feuchte ergibt. Damit ist der untere Eckwert des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung bestimmt. Er ist zusammen mit dem oberen Eckwert in Bild 34 eingezeichnet. Die Zwischenwerte für andere Wassergehalte werden durch logarithmische Interpolation (lineare Interpolation im logarithmischen Maßstab) ermittelt. Der von Kießl [57] verwendete Kapillartransportkoeffizient FKU für die Berechnung des Austrocknungsverhaltens eines Porenbetonflachdaches ist im gleichen Bild gestrichelt gezeichnet. Er stimmt weitgehend mit dem angenäherten Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung überein. Der Koeffizient für den Saugvorgang ist in diesem Beispiel ohne Bedeutung, da der Porenbeton nach dem Einbau der Dachhaut nicht mehr mit Wasser in Kontakt kommt. Die bituminöse Dachhaut wird als wasser- und dampfdicht angenommen. Die kurzweilige Strahlungs-

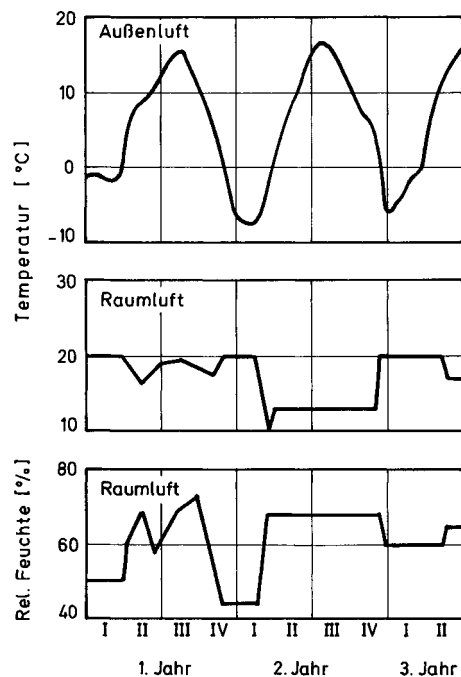


**Bild 34** Flüssigtransportkoeffizienten von Porenbeton in Abhängigkeit vom bezogenen Wassergehalt.

Der Transportkoeffizient für den Saugvorgang wurde mit Hilfe von Gleichung (24) aus dem Wassereindringkoeffizient bestimmt. Daraus und aus Diffusionsmessungen wurde der für das Berechnungsbeispiel erforderliche Koeffizient für die Weiterverteilung bestimmt, der mit dem von Kießl [57] verwendeten Transportkoeffizient FKU (gestrichelt gezeichnet) näherungsweise übereinstimmt.

absorptionszahl der Dachoberfläche beträgt 0,9 gemäß Tabelle 6, was einer relativ dunklen Dachoberfläche entspricht.

Die im Untersuchungszeitraum [77] registrierten klimatischen Randbedingungen sind in Bild 35 dargestellt. Die Erfassung der Raumlufttemperatur (Bild 35 Mitte) und der Raumluftfeuchte (Bild 35 unten) ist kontinuierlich fast über den gesamten Versuchszeitraum vorgenommen worden. Von den meteorologischen Daten liegt nur die Außenlufttemperatur (Bild 35 oben) in Form von Monatsmittelwerten vor. Daten über die Globalstrahlung, die für Flachdachberechnungen eine wesentliche Rolle spielen, existieren für den Untersuchungszeitraum nicht. Aus diesem Grund wird bei der Wahl der meteorologischen Randbedingungen auf neuere Klimadatensätze, die alle wesentlichen Parameter in Form von Stundenmittelwerten enthalten, zurückgegriffen. Um zu prüfen, ob diese Vorgehensweise zulässig ist, soll zunächst der Einfluß der meteorologischen Randbedingungen auf das Berechnungsergebnis anhand des Feuchteverlaufes im Dach während des ersten Jahres untersucht werden.



**Bild 35** Verlauf der Monatsmittel von Außen- und Raumlufttemperatur sowie der Raumluftfeuchte während der Austrocknung des Porenbetonflachdaches nach [77].

Zur Vorauswahl der Klimadatenätze sind die mittleren Außenlufttemperaturen im Sommer und im Winterhalbjahr der ersten beiden Jahre des Untersuchungszeitraumes den entsprechenden Werten der meteorologischen Daten der letzten Jahre vor Ort und dem Test-Referenz-Jahr von München [12] (ca. 30 km von Holzkirchen entfernt) in Tabelle 9 gegenübergestellt. In bezug auf diese saisonalen Temperaturmittel wird der damalige Meßzeitraum am besten durch das Jahr A, gefolgt vom Jahr B repräsentiert. Im Vergleich dazu erscheinen das Jahr C wegen des wärmeren Winters und das Jahr D wegen des wärmeren Sommers weniger gut geeignet. Das gleiche gilt für das Test-Referenz-Jahr von München, das etwa dem Holzkirchner Jahr D entspricht. Der Einfluß des Außenklimas auf das Rechenergebnis ist anhand der Feuchteverläufe im Flachdach beim Einsatz der stündlichen Datensätze der Jahre A und B sowie des Münchner Test-Referenz-Jahres in Bild 36 links dargestellt. Daneben - in Bild 36 rechts - sind die entsprechenden Verläufe gerechnet mit den Daten des Jahres A, die diesmal auch in Form von Tages- und Monatsmittelwerten verwendet werden, dargestellt. Während die verschiedenen Witterungsbedingungen einzelner Jahre kaum einen Einfluß auf das Rechenergebnis haben, scheint die Mittelwertbildung der Rand-

bedingungen insbesondere in der Sommerzeit das Ergebnis leicht zu verändern. Dies wird deutlicher bei der Betrachtung der Feuchteprofile im Dachquerschnitt am Ende des Sommers in Bild 37. Auch hier ist der Einfluß verschiedener Klimadatenätze (links) geringer als derjenige der Mittelung der Daten (rechts). Dabei scheint es relativ unerheblich zu sein, ob Tages- oder Monatsmittelwerte verwendet werden. Die Ergebnisse weichen von denen der Stundenmittelwerte in etwa dem gleichen Maße ab. Dies läßt sich vor allem durch die starke Dämpfung von Temperaturspitzen an der Dachoberfläche bei der Mittelung der Globalstrahlung über einen Zeitraum von 24 Stunden erklären. Aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes von der Temperatur sind gerade diese Temperaturspitzen für die Dampfdiffusion von großer Bedeutung. Anstatt die Monatsmittelwerte des Meßzeitraumes zu verwenden, ist es daher sinnvoller, stündliche Klimadaten desselben Ortes eines anderen Jahres für die Berechnung einzusetzen. Den folgenden Rechenergebnissen liegt das Holzkirchner Jahr A in Tabelle 9 zugrunde, wobei die Strahlungsabsorption in den Wintermonaten Januar bis März schneebedingt Null gesetzt wird.

**Tabelle 9** Gegenüberstellung der Halbjahresmittelwerte der Außenlufttemperatur verschiedener Jahre in Holzkirchen und des Test-Referenz-Jahres von München [12].

Klimadaten	Temperaturmittel [°C]	
	Sommer	Winter
Meßzeitraum 1. Jahr	11,8	-0,5
Meßzeitraum 2. Jahr	12,7	-1,8
Holzkirchen Jahr A	12,4	0,2
Holzkirchen Jahr B	12,7	1,7
Holzkirchen Jahr C	12,8	3,2
Holzkirchen Jahr D	14,1	1,6
München Test-Referenz-Jahr	14,1	1,9

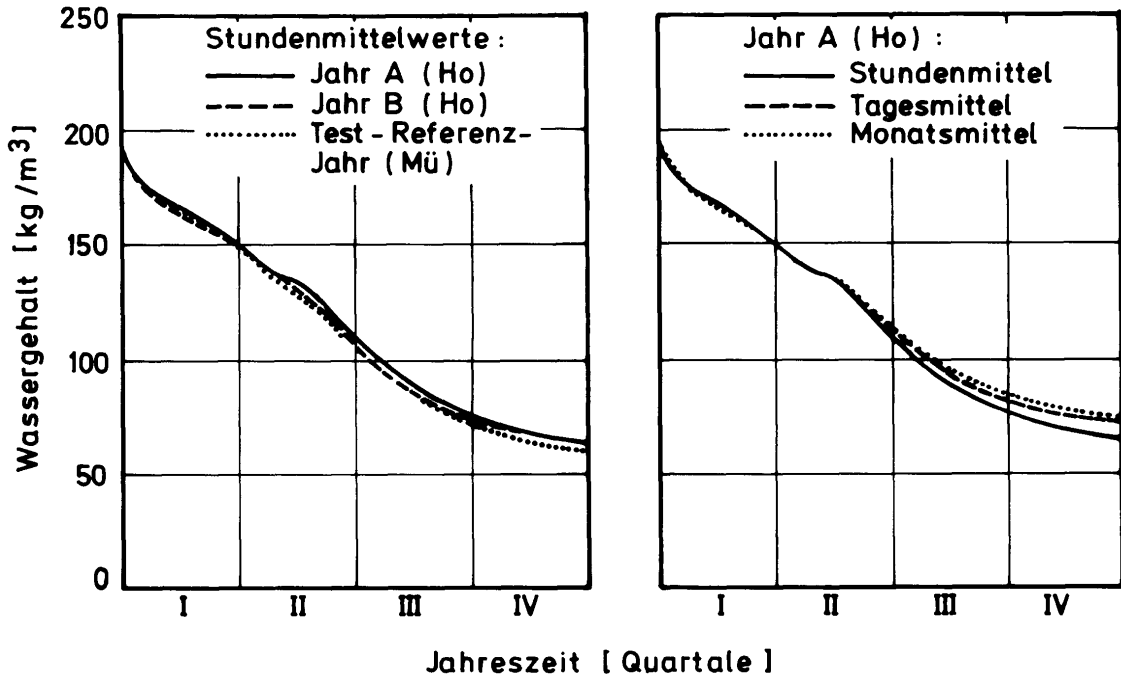


Bild 36 Berechnete Verläufe des über den Querschnitt gemittelten Wassergehaltes im Porenbetondach während des ersten Jahres nach der Fertigstellung bei Verwendung der stündlichen Klimadaten verschiedener Jahre (links) bzw. verschiedener Mittelwerte der Klimaparameter eines Jahres (rechts).

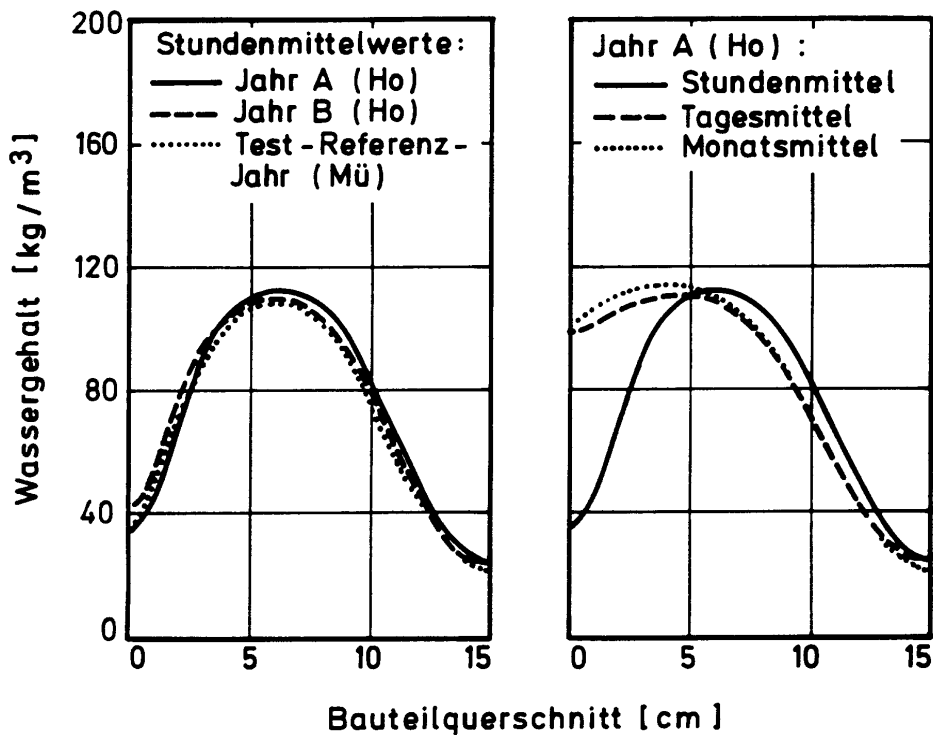
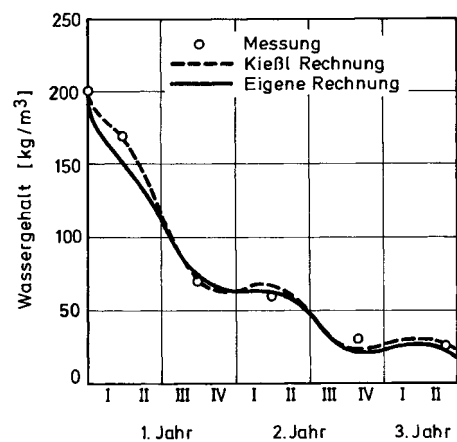


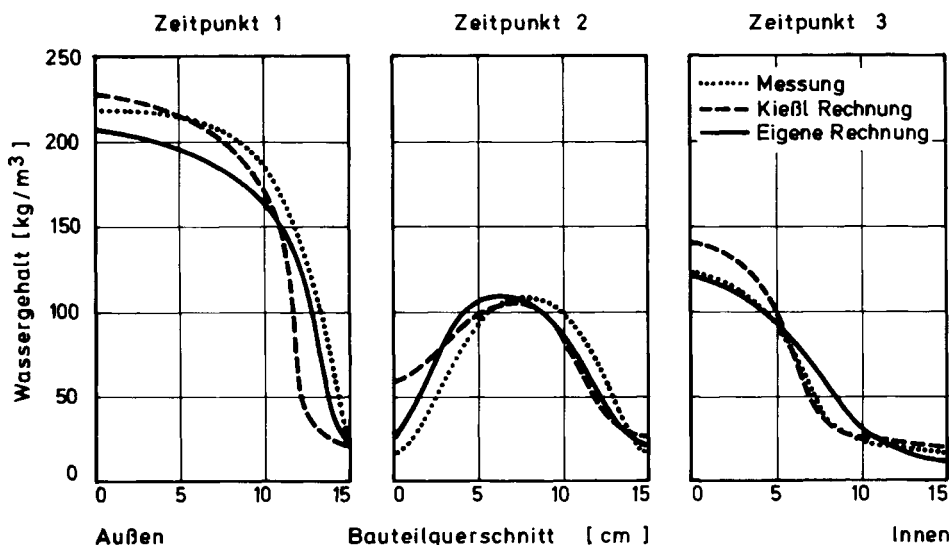
Bild 37 Berechnete Feuchteverteilung über den Querschnitt des Porenbetonflachdaches am Ende des ersten Sommers nach Versuchsbeginn bei Verwendung derselben Randbedingungen wie in Bild 36. Während der Einfluß der stündlichen Klimadaten verschiedener Jahre vernachlässigbar klein ist (links), besteht bei der Verwendung von Tages- und Monatsmittelwerten ein deutlicher Unterschied zur Berechnung mit Stundenmittelwerten (rechts).

Der berechnete Verlauf der mittleren Feuchte im Flachdach im Zeitraum von zweieinhalb Jahren nach der Fertigstellung des Daches ist im Vergleich zu den Meßergebnissen von Künzel [77] und den Rechenergebnissen von Kießl [57] in Bild 38 dargestellt. Es zeigt sich, daß das anfänglich nasse Dach trotz teilweiser hoher Raumlufffeuchte (Bild 35) innerhalb von zwei Jahren bis zur hygroskopischen Ausgleichsfeuchte austrocknet. Die Übereinstimmung von Rechnung und Experiment ist dabei für beide Berechnungsverfahren als gut zu bezeichnen. Das gleiche gilt für die Berechnung der Feuchteverteilungen im Dachquerschnitt, die für drei markante Zeitpunkte im Vergleich zu den gemessenen Profilen in Bild 39 zu sehen sind. Zum ersten Zeitpunkt etwa drei Monate nach Beginn der Austrocknung stellt sich ein relativ steiler Wassergehaltsgradient im unteren Drittel der Porenbetondecke ein. Am Ende des ersten Sommers (Zeitpunkt 2) ist dieser raumseitige Gradient zwar etwas flacher, er befindet sich aber näherungsweise immer noch an der gleichen Stelle. Fast symmetrisch dazu bildet sich ein Feuchtegradient zur Außenoberfläche des Daches aus. Dies ist durch die strahlungsbedingt hohen Oberflächentemperaturen der Dachhaut zu erklären. Durch Dampfdiffusion - der Flüssigtransport ist bei einem Wassergehalt von  $100 \text{ kg/m}^3$  bereits deutlich reduziert - wird

so ein "Feuchteberg" in der Mitte des Dachquerschnittes erzeugt. Am Ende des zweiten Winters, etwa 15 Monate nach Beginn der Austrocknung (Zeitpunkt 3), hat sich dieser "Feuchteberg" wieder zur Dachoberfläche hin verlagert. Beide Berechnungsverfahren geben das komplexe Feuchteverhalten eines Porenbetondaches in realistischer Weise wieder. Im Gegensatz zur Berechnung von Kießl [57] wurden hier jedoch nur einfache, leicht meßbare Materialkennwerte verwendet, ohne daß die Qualität der Rechenergebnisse dadurch negativ beeinflusst werden würde.



**Bild 38** Darstellung der im Zeitraum von zweieinhalb Jahren nach Versuchsbeginn gemessenen mittleren Wassergehalte im Porenbetondach [77] im Vergleich zu den berechneten Feuchteverläufen nach Kießl [57] und nach dem eigenen Verfahren.



**Bild 39** Vergleich der gemessenen [77] und nach Kießl [57] bzw. nach eigenen Verfahren berechneten Feuchteverteilungen im Flachdach zu drei markanten Zeitpunkten nach Versuchsbeginn.

Zeitpunkt 1: Am Ende des ersten Winters.  
Zeitpunkt 2: Am Ende des ersten Sommers.

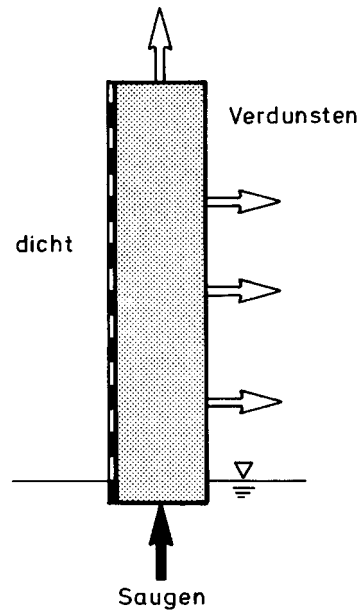
Zeitpunkt 3: Am Ende des zweiten Winters.

### 4.3 Testbeispiel III (zweidimensional): Befeuchtung und Trocknung eines Mauersteinmodellkörpers

Die beiden ersten Testbeispiele haben gezeigt, daß die Berechnungsergebnisse mit dem EDV-Programm "WUFIZ" für eindimensionale Fälle gut mit experimentellen Ergebnissen übereinstimmen. Da zwischen einer zweidimensionalen und einer eindimensionalen Berechnung kein prinzipieller Unterschied besteht, ist davon auszugehen, daß die eindimensionale Validierung des Berechnungsmodells auch für zweidimensionale Anwendungsfälle gilt. Um diese Behauptung zu unterstützen, wird als drittes Testbeispiel ein zweidimensionaler Modellversuch an Mauersteinprüfkörpern gewählt, der im folgenden genauer beschrieben wird.

Die Mauersteinprüfkörper bestehen aus Kalksandstein und haben eine Abmessung von  $49 \times 11 \times 7 \text{ cm}^3$ . Ihre beiden größten Oberflächen ( $49 \times 11 \text{ cm}^2$ ), die als Vorder- und Rückseite bezeichnet werden, und eine Flankenseite ( $49 \times 7 \text{ cm}^2$ ) sind wasser- und dampfdicht versiegelt. Ihr Anfangswassergehalt entspricht der Ausgleichsfeuchte bei  $23 \text{ °C}$  und  $50 \%$  relativer Feuchte. Zu Beginn des Versuches werden die Prüfkörper mit einer Stirnseite ( $11 \times 7 \text{ cm}^2$ ) etwa einen Zentimeter tief in ein Wasserbad gestellt, wie in Bild 40 schematisch dargestellt. Die Umgebungsbedingungen werden während des gesamten Versuchszeitraumes konstant auf  $23 \text{ °C}$  und  $50 \%$  relative Feuchte gehalten. Die Temperatur des Wassers im Wasserbad beträgt aufgrund der Verdunstungskühlung etwa  $20 \text{ °C}$ . Der Gesamtwassergehalt der Modellkörper, der sich aus der Wasseraufnahme durch die untere Stirnseite bei gleichzeitiger Verdunstung über die obere Stirnseite und eine Flankenseite ergibt, wird durch regelmäßiges Wiegen der Proben bestimmt. Nach 72 Tagen wird ein Modellkörper, im folgenden mit Probe A bezeichnet, zur Bestimmung der zweidimensionalen Feuchteverteilung in 50 gleich große Teile durch 9 Schnitte in der Höhe ( $49 \text{ cm}$ ) und 4 Schnitte in der Breite ( $11 \text{ cm}$ ) aufgesägt. Der Wassergehalt der einzelnen Teilstücke wird durch an-

schließende Trocknung bestimmt. Ein zweiter Modellkörper, im folgenden mit Probe B bezeichnet, bleibt zunächst weiter, insgesamt 120 Tage, mit einer Stirnseite im Wasserbad. Danach wird Probe B aus dem Wasserbad entfernt, so daß das aufgenommene Wasser bei gleichen Umgebungsbedingungen über beide Stirnseiten und eine Flankenseite wieder austrocknen kann.



**Bild 40** Schematische Darstellung des Mauersteinmodellkörpers während des Saugvorgangs.

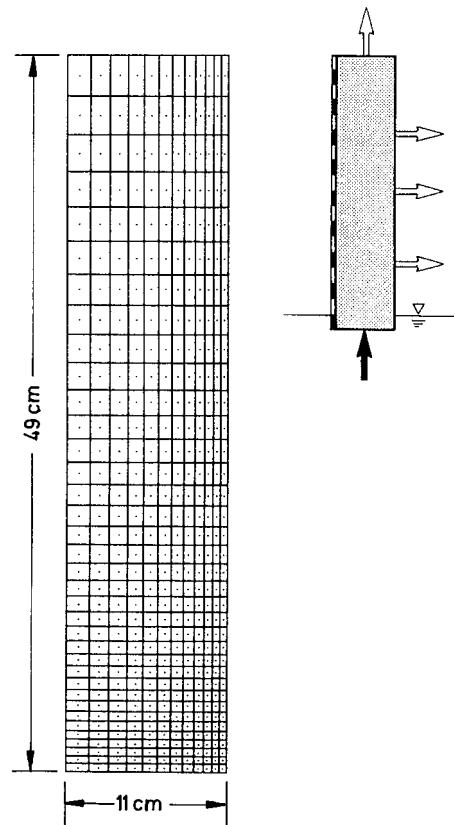
Der Prüfkörper ist  $49 \text{ cm}$  hoch,  $11 \text{ cm}$  breit und  $7 \text{ cm}$  tief. Seine Vorder- und Rückseite sowie die Flanke sind versiegelt. Die Wasseraufnahme erfolgt über die untere Stirnseite bei gleichzeitiger Verdunstung über die obere Stirnseite und die rechte Flanke. Bei der anschließenden Trocknung erfolgt die Feuchteabgabe auch über die untere Stirnseite.

Zur Berechnung der Feuchte-transportvorgänge während des Modellversuches sind außer den bereits angegebenen Rand- und Anfangsbedingungen, die Oberflächenübergangsbedingungen und die Stoffkennwerte der Mauersteinmodellkörper erforderlich. Die Randbedingungen an den Oberflächen, die mit der Raumluft in Kontakt sind, werden durch Randbedingungen dritter Art beschrieben. Die Oberflächenübergangsbedingungen entsprechen den raumseitigen Bedingungen in Tabelle 5. Beim Kontakt mit Wasser handelt es sich um Randbedingungen



erster Art, d.h. die Oberflächentemperatur ist identisch mit der Wassertemperatur. Dasselbe gilt für den Dampfdruck, der dem Sättigungsdampfdruck bei der Wassertemperatur entspricht und die relative Feuchte, die an der Wasserkontaktfläche gleich "Eins" ist. Die Standardstoffkennwerte für die Kalksandsteinmodellprüfkörper sind in Tabelle 8 zusammengefaßt. Die Feuchtespeicherfunktion wurde bereits in Bild 10 vorgestellt. Die Flüssigtransportkoeffizienten für den Saugvorgang und die Weiterverteilung bzw. Trocknung sind in Bild 15 unten rechts ("Kalksandstein B") dargestellt.

Bei der Erzeugung des numerischen Gitters müssen, wie bereits in Ziffer 3.5 erklärt, die zu erwartenden Feuchtegradienten berücksichtigt werden. In Bereichen mit steilen Gradienten, wie sie beim instationären Saugvorgang in der Zone der unteren Stirnfläche oder in der Austrocknungszone in der Nähe der unversiegelten Flanke auftreten, sollte das Gitter möglichst enge Maschen haben. Zur Minimierung des Berechnungsaufwandes ist es jedoch günstig, in Bereichen kleiner Feuchtegradienten mit größeren Gitterabständen zu arbeiten. Diese Bereiche sind in diesem Beispiel in der Zone der versiegelten Flanke (direkt an der Oberfläche ist dort der Gradient theoretisch "Null") und im oberen Teil des Modellkörpers zu erwarten. Das hier verwendete numerische Gitter ist in Bild 41 zu sehen. Mit einer Maschenweite von nur 5 mm im Bereich der Wasserkontaktzone und der flankennahen Verdunstungszone, die sich in die Richtungen mit kleiner werdenden Gradienten kontinuierlich vergrößert, entspricht dieses Gitter den genannten Vorgaben. Es besteht insgesamt aus 12 x 36 Elementen, deren Mittelpunkte die Variablenpositionen darstellen. Ähnlich wie beim numerischen Gitter wird bei der Wahl der Zeitschrittweiten verfahren. Die Größe der Zeitschritte variiert deshalb zwischen 10 Minuten in der Anfangsphase des Saug- bzw. Trocknungsvorganges und 12 Stunden in der jeweiligen Endphase.



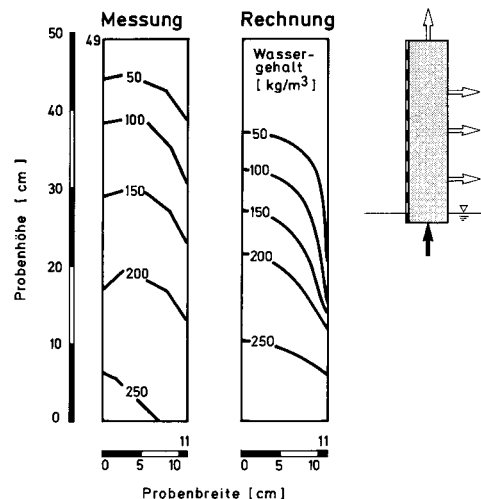
**Bild 41** Darstellung des numerischen Gitters für die zweidimensionale Berechnung der Feuchtevorgänge im Mauersteinmodellkörper. Die Punkte in der Mitte der Gitterelemente stellen die Variablenposition dar. Die Bereiche, in denen sich große Wassergehaltsgradienten einstellen (Saugzone und rechte Verdunstungszone) sind durch kleine Maschenweiten des Gitters gekennzeichnet.

Die experimentellen und rechnerischen Ergebnisse für den Verlauf der Wasseraufnahme und -abgabe der Modellkörper sind in Bild 42 gegenübergestellt. Die Unterschiede in der Wasseraufnahme von Probe A und B sind bis zum Zeitpunkt der Zerteilung von Probe A für Profilmessungen relativ klein. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung bis etwa 50 Tage nach Beginn des Versuchs. Danach flacht der rechnerische Verlauf stärker ab als die gemessenen Verläufe bis zu einem Unterschied von ca.  $25 \text{ kg/m}^3$  nach 120 Tagen. Dieser Unterschied, der etwa 15 % vom Gesamtwassergehalt ausmacht, könnte auf den in [122] beschriebenen "Nachsaugeneffekt" zurückzuführen sein. Dieser Effekt beruht auf der Beobachtung, daß kapillaraktive Baustoffe bei längerfristigem Kontakt mit Wasser im

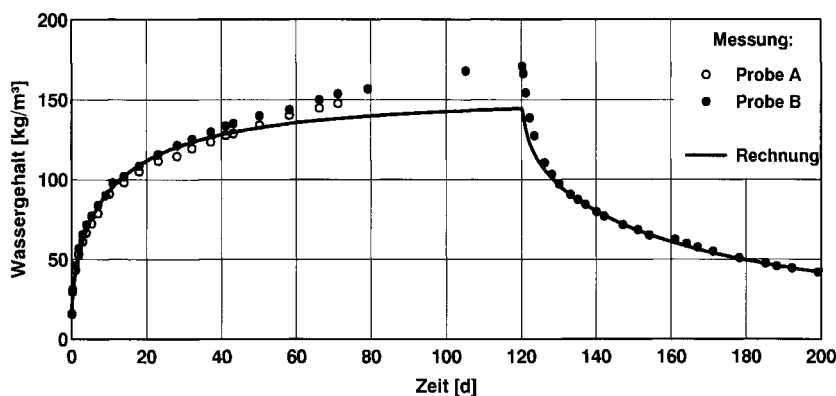
Bereich der Kontaktzone mehr Wasser aufnehmen als ihrer freien Wassersättigung entspricht. Das "Nachsaugen" resultiert aus der langsamen Lösung von Porenluft im Wasser, wobei diese Porenluft dann durch Wasser ersetzt wird. Im Berechnungsmodell ist dieser Nachsaugeneffekt, der unter praktischen Bedingungen nur selten auftritt, nicht berücksichtigt, was die nach etwa 50 Tagen auftretende Diskrepanz zwischen den gemessenen und berechneten Verläufen gegen Ende des Saugvorganges erklärt. Durch Entfernen des Modellkörpers aus dem Wasserbad wird die Trocknung eingeleitet, deren gemessene und gerechnete Verläufe an den Saugvorgang in Bild 42 anschließen. Der zu Beginn der Trocknung vorhandene Unterschied zwischen Messung und Rechnung reduziert sich innerhalb weniger Tage. Anschließend ergibt sich eine gute Übereinstimmung der beiden Verläufe bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes nach 200 Tagen. Das schnelle Angleichen der Meß- und Rechenergebnisse ist durch die rasche Abgabe des nachgesaugten Wassers zu erklären, da dieses sich im Bereich der Saugoberfläche befindet, die zur Trocknungszone geworden ist.

In Bild 43 sind die gemessenen und berechneten Feuchteverteilungen im Modellkörper nach 72 Tagen Wasserkontakt in Form von Isolinien dargestellt. Die Übereinstimmung des Profils der Isolinien kann als gut bezeichnet werden, wenn man bedenkt, daß der steile Abfall dieser Linien in der Verdunstungszone, die die rechnerische Verteilung zeigt, meßtechnisch nur als Mittelwert über die Dicke der Teilstücke erfassbar ist, was einer Nivellierung der Gradienten gleichkommt. Die Spreizung der Feuchtever-

teilung, die durch den Abstand der Isolinien untereinander gekennzeichnet wird, ist jedoch bei der Messung größer als bei der Rechnung. Dies ist mit einer möglichen Anisotropie im kapillaren Saugverhalten des Mauersteins zu erklären, die zu einem größeren Flüssigtransport in der vertikalen im Vergleich zur horizontalen Richtung führt. Trotz gewisser Unterschiede zwischen den experimentellen und den rechnerischen Ergebnissen zeigt dieses Beispiel die relativ gute Eignung des Berechnungsmodells "WUFIZ" auch für zweidimensionale Feuchte-transportvorgänge, insbesondere wenn man bedenkt, daß zweidimensionale Verfahren grundsätzlich empfindlicher auf Ungenauigkeiten bei den Stoffkennwerten reagieren als eindimensionale.



**Bild 43** Vergleich der gemessenen und berechneten Wassergehaltsverteilung im Mauersteinmodellkörper nach 72 Tagen im Wasserbad anhand von Isolinien. Die berechnete Feuchteverteilung zeigt gegenüber der gemessenen einen etwas steileren Übergang von den nassen zu den trockenen Bereichen des Modellkörpers.



**Bild 42**

Vergleich der Verläufe des gemessenen und berechneten mittleren Wassergehaltes der Modellprüfkörper beim Saugvorgang und bei der nach 120 Tagen einsetzenden Trocknung durch Entfernen des Wasserbades. Die Probe A wurde nach 72 Tage Versuchszeit für die Bestimmung der Feuchteverteilung zersägt.

## **5 Bewertung des Berechnungsverfahrens**

Im folgenden werden zunächst die neuen Ansätze und Funktionsmerkmale des neu entwickelten Berechnungsverfahrens, die sich von bisherigen Modellen zum Teil deutlich unterscheiden, zusammengestellt und bewertet. Anschließend wird auf noch offene Fragen beim Feuchtetransport in Baustoffen, die zeitlichen Eigenschaftsveränderungen unterworfen sind, eingegangen.

### **5.1 Neue Ansätze und Funktionsmerkmale**

Das vorgestellte Verfahren wurde für die Berechnung des gekoppelten ein- und zweidimensionalen instationären Wärme- und Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen entwickelt. Es berücksichtigt die in [59] und [67] veröffentlichten neuen Erkenntnisse bezüglich der hygrischen Stoffeigenschaften poröser Baustoffe. Das heißt, es wird bei mineralischen Baustoffen ein feuchteunabhängiger Dampfdiffusionswiderstand vorausgesetzt und die in höheren Feuchtebereichen zu beobachtenden, unter isothermen Bedingungen die Dampfdiffusion verstärkenden Transportphänomene dem Flüssigtransport zugeordnet. Außerdem wird beim Flüssigtransport eine Unterscheidung in zwei getrennte Transportkoeffizienten vorgenommen, um den unterschiedlichen Kapillarttransportintensitäten beim Saugvorgang in Kontakt mit Wasser und bei der Weiterverteilung nach Unterbrechung der Wasserzufuhr Rechnung zu tragen. Die Feuchtetransportphänomene unterhalb des Gefrierpunktes und bei der Lösungsdiffusion in organischen Polymeren sind im Rechenmodell enthalten. Das gleiche gilt für den hygrischen Einfluß auf die Wärmespeicherung und den Wärmetransport, dessen für die Bauphysik wesentlichen Auswirkungen berücksichtigt sind.

Als treibende Potentiale für den Dampf- und Flüssigtransport werden die stoffunabhängigen Klimagrößen "Dampfdruck" und "relative Feuchte" verwendet. Da der Dampfdruck bei Kenntnis der Temperatur und der relativen Feuchte eindeutig bestimmt ist, reduzieren sich die unab-

hängigen Variablen bei der Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports auf die skalaren Feldgrößen "Temperatur" und "relative Feuchte", die durch die Lösung von zwei partiellen Differentialgleichungen bestimmt werden können. Durch eine neuartige, problemorientierte Diskretisierung der Feuchtetransportgleichung sowie durch einen leistungsfähigen Lösungsalgorithmus wird ein stabiles und schwingungsfreies numerisches Lösungsverfahren gewährleistet, das aufgrund seiner hohen Effizienz in bezug auf die örtliche und zeitliche Auflösung detaillierte Berechnungen ohne großen Zeitaufwand erlaubt.

Durch die Verwendung einfacher hygrothermischer Stoffkennwerte, die größtenteils aus Standardstoffkennwerten ableitbar sind, reduziert sich im Vergleich zu bisherigen Berechnungsverfahren der Aufwand für die Ermittlung der baustofforientierten Eingabedaten. Die physikalischen Berechnungsgrößen der Temperatur und der relative Feuchte sind leicht vorstellbar und erlauben eine einfache Plausibilitätskontrolle der Rechenergebnisse und Eingabedaten. Als Randbedingungen sind diese beiden Größen in fast allen Klimadatensätzen vorhanden. Sie bilden außerdem die wesentlichen Parameter zur Beschreibung des Raumklimas von Gebäuden. Durch die zusätzliche Berücksichtigung von Regen und Sonnenstrahlung ist der Einfluß der natürlichen Witterungsbedingungen auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Bauteilen in realitätsnaher Weise berechenbar. Daß dies tatsächlich der Fall ist, belegt das erste Testbeispiel zur Validierung der Rechenergebnisse, bei dem der Regen und auch die Sonnenstrahlung das Feuchteverhalten des Bauteils wesentlich bestimmen. Daß selbst beim Einsatz von approximierten Feuchtetransport- und Speicherfunktionen eine gute Übereinstimmung von experimentellen und rechnerischen Ergebnissen erzielt werden kann, zeigt das zweite Testbeispiel anhand der Austrocknung eines baufeuchten Leichtbetondaches. Ein besonderer Vorteil des Berechnungsverfahrens ist, daß es auch für zweidimensionale kartesische und rotationssymmetrische Anwendungsfälle

zuverlässige Ergebnisse liefert, wie durch vergleichende Untersuchungen an einem Mauersteinmodellkörper im dritten Testbeispiel dargelegt. Damit werden die Einsatzmöglichkeiten des Rechenmodells auf Bereiche ausgedehnt, die meßtechnisch nicht oder nur bei großem Aufwand erfaßt werden können.

## 5.2 Weiterer Untersuchungsbedarf (offene Fragen)

Trotz der positiven Bewertung des Verfahrens aufgrund der guten Übereinstimmung von Rechen- und Meßergebnissen in Ziffer 4 und in weiteren, hier nicht beschriebenen rechnerischen Untersuchungen [z.B. 81, 82, 83], bleibt die Frage offen, wie gut das vorliegende Berechnungsmodell das Feuchteverhalten solcher Baustoffe beschreibt, die durch feuchtebedingte Veränderung ihrer Porenstruktur ein ausgeprägtes zeitabhängiges Verhalten zeigen. Dieses zeitabhängige Verhalten kann kurzfristiger reversibler Natur sein, wie zum Beispiel beim Quellen und Schwinden der Zellwände von Holz, das bei gleichem Wassergehalt je nach Ausgangszustand zu höheren oder niedrigeren Flüssigtransportkoeffizienten führt [44]. Es kann aber auch ein langfristiger irreversibler Prozeß sein, wie bei der feuchteabhängigen Karbonatisierung von Mörtel und Putzen, der ebenfalls zu einer Veränderung der hygri-schen Transporteigenschaften führt [75]. Bei Beton, einem der wichtigsten Baustoffe, scheinen reversible und irreversible feuchtebedingte Porenstrukturänderungen überlagert aufzutreten. Die langfristigen Umwandlungsprozesse finden analog zu Mörteln und Putzen durch Karbonatisierung oder fortlaufendes hydraulisches Aushärten statt, was eine kontinuierliche Veränderung der hygri-schen Transportkoeffizienten zur Folge hat [7]. Die in [120] beobachtete Tatsache, daß die Wasseraufnahme von Beton bei längerem Saugen von der erwarteten, zur Wurzel der Zeit proportionalen Zunahme abweichen kann, ist auf reversible Quellvorgänge zurückzuführen, durch die die Größe der kapillaraktiven Poren verringert wird. Darauf deutet auch ein analoges

Verhalten von Beton beim Eindringen organischer Flüssigkeiten hin [30].

Während langfristige, kontinuierliche Veränderungen der thermischen oder hygri-schen Stoffeigenschaften durch abschnittsweise Berechnung mit entsprechend modifizierten Koeffizienten ausreichend berücksichtigt werden können, ist dies bei kurzfristigen Eigenschaftsschwankungen durch Quell- und Schwindvorgänge im Porenraum nicht machbar. Deshalb müssen hier zeitlich unabhängige Stoffkennwerte verwendet werden, die dem Problem angepaßte Mittelwerte der kurzfristigen Eigenschaftsschwankungen darstellen. Wie so eine problemorientierte Mittelung durchzuführen ist und welchen Einfluß sie auf die Berechnungsergebnisse hat, muß durch zukünftige Untersuchungen noch geklärt werden.

## 6 Praktische Schlußfolgerungen

Die Eigenschaften des neuen Berechnungsverfahrens, das sich im Vergleich zu vielen bisherigen Modellen vor allem durch den Einsatz einfacher, physikalisch plausibler Größen und Stoffkennwerte sowie durch mehrfache experimentelle Validierung auszeichnet, lassen Feuchte-transportberechnungen zu einer kostengünstigen Alternative oder Ergänzung von meßtechnischen Untersuchungen werden. Außerdem ermöglicht die Berechnung die Behandlung von Fragestellungen, die durch Messungen nicht gelöst werden können. Zum Beispiel ist die experimentelle Bestimmung des hygrothermischen Verhaltens neuer Bauprodukte bezüglich ihres Langzeitverhaltens nicht möglich. Eine derartige Extrapolation kann nur rechnerisch erfolgen. Ebenso hilfreich ist die Berechnung für die Quantifizierung einzelner Einflußgrößen durch Parameterstudien, da im Experiment häufig nur das Zusammenwirken vieler Einflüsse in überlagerter Form erfaßt werden kann. In Verbindung mit weiterführenden Rechenmodellen, zum Beispiel zur Bestimmung der hygrothermischen Spannungen in einem Bauteil, kann die Feuchteberechnung bei der Interpretation von Schadensmechanismen gute Dienste leisten, wie

Möller [96] anhand von Natursteinmauern zeigt. Auch die Bearbeitung von zyklisch wiederkehrenden Oberflächenerscheinungen, wie Salzausblühungen [3] oder Tauwasserbildung, ist einfacher rechnerisch als meßtechnisch durchzuführen, da sich diese Vorgänge nur auf dünne Schichten im Bereich der Oberflächen auswirken. In diesen Beispielen kann durch Feuchteberechnungen Ursachenforschung betrieben werden und die Variationsbreite des zu erwartenden Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauteilen abgeschätzt werden.

Da in der Praxis jedoch die der Berechnung zugrunde liegenden Stoffkennwerte und die klimatischen Randbedingungen häufig mit Unsicherheiten behaftet sind bzw. Einflußfaktoren von Bedeutung sind, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden (z.B. Luftdurchströmung eines Bauteils), ist für quantitativ zuverlässige Aussagen die meßtechnische Validierung der Rechenergebnisse durch Stichproben erforderlich. Unter der Voraussetzung eines erfolgreichen experimentellen Abgleichs kann das hygrothermische Bauteilverhalten rechnerisch auf andere Klimabedingungen übertragen oder in die Zukunft extrapoliert werden, sofern das Alterungsverhalten abgeschätzt werden kann. Ebenso ist die Umrechnung auf andere Größenverhältnisse möglich. Gerade diese Ergänzungen experimenteller Untersuchungen lassen den für die Zukunft größten Einsatzbereich der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportrechnung erwarten, da die Zuverlässigkeit der Rechenergebnisse durch den meßtechnischen Vergleich gewährleistet werden kann.

## **7 Zusammenfassung**

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Verfahrens zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Zu diesem Zweck werden zunächst die Feuchtespeicher- und -transportmechanismen sowie ihr Einfluß auf den Wärmetransport genauer untersucht. Feuchtebewegungen aufgrund von Luftströmungen, Gravitation, hydrau-

lischen Druckunterschieden sowie osmotischen oder elektrokinetischen Effekten werden ausgeschlossen.

Die Feuchtespeicherung von Baustoffen wird in drei Bereiche eingeteilt. Der erste Bereich ist durch hygroskopische Ausgleichswassergehalte (Sorptionisothermen) gekennzeichnet. Daran schließt sich bei kapillaraktiven Stoffen der überhygroskopische Bereich an mit Wassergehalten bis zur freien Sättigung. Die Gleichgewichtsfeuchte in diesem Bereich hängt vom kapillaren Unterdruck in den wassergefüllten Poren bzw. von der relativen Luftfeuchte über dem Porenwasser ab. Diese Abhängigkeit, die meßtechnisch bestimmt werden kann, bildet die Basis einer Ergänzung der Sorptionsisotherme für hohe Wassergehalte. Dadurch entsteht eine stetige, im gesamten Feuchtebereich von 0 bis 100 % relative Feuchte definierbare Speicherfunktion. Wassergehalte über der freien Sättigung werden durch einen dritten Bereich charakterisiert. In diesem Bereich gibt es keine hygrischen Gleichgewichtszustände mehr. Der Baustoff ist übersättigt, d.h. die relative Feuchte beträgt unabhängig vom Wassergehalt immer 100 %. Anhand von Ergebnissen aus der Literatur und eigenen Untersuchungen wird die Bedeutung der Temperaturabhängigkeit und der Hysterese der Feuchtespeicherfunktion für Feuchtetransportberechnung analysiert. Zur Ermittlung der Feuchtespeicherfunktion wird eine einfache Approximation angegeben, die in Fällen ohne Flüssigtransport über Schichtgrenzen hinweg eine ausreichende Genauigkeit besitzt.

Durch die kritische Analyse der Literatur werden unter Einbeziehung neuer Meßergebnisse die physikalischen Grundlagen der Feuchtetransportmechanismen aufgezeigt. Die daraus resultierenden Ansätze beschreiben die Dampfdiffusion in porösen Baustoffen als einen Transport infolge von Dampfdruckgradienten mit feuchteunabhängigen Wasserdampfdiffusionswiderständen. Die vielfach beobachtete "Verstärkung" der Dampfdiffusion im höheren Feuchtebereich ist auf Flüssigtransporteffekte, die auch als Oberflächendiffusion bezeichnet werden,

zurückzuführen. Da ihr treibendes Potential nicht der Dampfdruck, sondern die relative Feuchte ist, werden sie zusammen mit der Kapillarleitung in einem Ansatz erfaßt. Dieser Ansatz wird aus einem Strömungsmodell abgeleitet, dessen treibendes Potential, der kapillare Unterdruck, auf die relative Luftfeuchte umgerechnet werden kann. Der Transportkoeffizient ist nicht nur stark feuchteabhängig, sondern variiert auch mit den Randbedingungen. Aus diesem Grund werden zwei unterschiedliche Koeffizienten eingeführt, einer für das kapillare Saugen im Kontakt mit Wasser und ein anderer für die Weiterverteilung bzw. Trocknung nach Unterbrechung der Wasserzufuhr. Zur Bestimmung dieser Flüssigtransportkoeffizienten wird ein einfaches Näherungsverfahren angegeben, das auf hygrischen Standardstoffkennwerten basiert. Eine genauere Bestimmung kann durch instationäre Feuchteprofilmessungen erfolgen. Durch die Wahl der relativen Feuchte als Potential für den Flüssigtransport muß die Transportintensität im übersättigten Bereich gegen Null gehen. Daß dies bei kapillaraktiven Baustoffen auch tatsächlich der Fall ist, wird anhand experimenteller Untersuchungen gezeigt.

Nicht vergleichbar mit dem Transport in porösen Baustoffen ist die Lösungsdiffusion in polymeren Kunststoffen. Sie wird durch einen Ansatz beschrieben, der der Dampfdiffusion entspricht, wobei aufgrund der Besonderheiten der Interaktion von Wasser- und Polymermolekülen der Diffusionswiderstand feuchteabhängig sein kann. Ein Randbereich, der jedoch in der Praxis große Bedeutung haben kann, ist der Feuchtetransport unterhalb des Gefrierpunktes. Während die Dampfdiffusion durch Temperaturen unter 0 °C im allgemeinen nur wenig beeinflußt wird, findet kapillares Saugen nicht mehr statt. Dennoch verbleibt ein reduzierter Flüssigtransport durch ungefrorenes Wasser in Mikroporen und an Porenwandungen. Er kann durch die Einführung eines Gefriergrenzpotentials, das die relative Feuchte über dem nicht gefrorenen Porenwasser charakterisiert, näherungsweise berechnet werden.

In ähnlicher Weise werden auch die Auswirkungen von Latentwärmeeffekten beim Übergang von Wasser zu Eis auf die Wärmespeicherung feuchter Baustoffe erfaßt. Beim hygrischen Einfluß auf die Wärmeleitung wird aufgrund der geringen Bedeutung nicht zwischen den Aggregatzuständen des Wasser unterschieden. Im allgemeinen wird von einem linearen Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes und seinem Wassergehalt ausgegangen. Deutlich wird zwischen der feuchtebedingten Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und dem Wärmetransport durch Dampfdiffusion mit Phasenänderung unterschieden. Dieser Wärmetransport wird getrennt berücksichtigt, da er nicht proportional zum Temperaturgradienten stattfindet. Sein Einfluß kann, wie an Beispielen gezeigt, bedeutend sein, während der Wärmetransport durch die Enthalpieströme bewegten Wassers vernachlässigbar klein ist.

Als klimatische Randbedingungen werden die Temperatur und relative Feuchte der Oberfläche oder der Umgebung angegeben. Zusätzlich werden die Sonnenstrahlung und der Niederschlag berücksichtigt. Die Erfassung der Wasseraufnahme durch Regen findet durch eine Randbedingung zweiter Art statt, die bei vollständiger Benetzung der Bauteiloberfläche in eine Randbedingung erster Art umgewandelt wird. Auf diese Weise wird gewährleistet, daß das Bauteil nur so viel Wasser aufnehmen kann, wie als Regen auf seine Oberfläche trifft. Da Regenschlagsmessungen und insbesondere Schlagregenschlagsmessungen vor Ort oft nicht oder nicht über einen längeren Zeitraum durchführbar sind, wird die Möglichkeit untersucht, diese Daten aus meteorologischen Klimadatensätzen abzuleiten.

Aufbauend auf den dargelegten Grundlagen des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports werden bisherige Berechnungsverfahren nach den verwendeten Transportpotentialen für die Dampfdiffusion und den Flüssigtransport klassifiziert. Die daraus resultierenden Transportansätze werden auf ihre Anwendungsbreite und die Koeffizientenwahl hin untersucht und bewertet. Ergänzend werden die Berechnungs-

beispiele betrachtet, an denen die jeweiligen Modelle getestet wurden.

Die kritische Auswertung der Literatur führt zusammen mit den beschriebenen neuen Überlegungen zur Ableitung der Transportgleichungen. Die für den Wärme- und Feuchtetransport am besten geeigneten Potentiale "Temperatur", "Dampfdruck" und "relative Feuchte" können aufgrund der Abhängigkeit des Dampfdruckes von den beiden anderen Potentialen auf die beiden unabhängigen Variablen "Temperatur" und "relative Feuchte" zurückgeführt werden. Durch zwei gekoppelte partielle Differentialgleichungen für den Wärme- und Feuchtetransport sind diese Variablen numerisch geschlossen lösbar. Zur Diskretisierung dieser Gleichungen wird eine implizite Finite-Volumen-Methode verwendet, die zur Vermeidung von Ungenauigkeiten bei der Berechnung des Dampftransportes durch eine neuartige Formulierung der Feuchteberechnung angepaßt wurde. Die Lösung der resultierenden Matrixgleichungssysteme erfolgt durch einen alternierend direkt-iterativen Algorithmus. Anhand eines Ablaufschemas wird die Funktionsweise des auf dieser Basis entwickelten EDV-Programmes WUFIZ erläutert, wobei auf die sinnvolle Wahl des numerischen Gitters und der Zeitschritte sowie auf die

Genauigkeit der Berechnung und die erforderlichen Konvergenzkriterien eingegangen wird.

Die Ergebnisevaluierung des Berechnungsverfahrens erfolgt durch den Vergleich mit gemessenen Feuchteverläufen und Feuchteverteilungen anhand von drei Testbeispielen. Die beiden ersten Beispiele sind eindimensionale Anwendungsfälle. In ihnen wird das Feuchteverhalten eines nach Westen orientierten Natursteinfassadenausschnitts bei natürlicher Bewitterung und die Austrocknung eines baufeuchten Leichtbeton-Flachdaches untersucht. Als zweidimensionales Testbeispiel dient die Bestimmung des Wasseraufnahme- und -abgabeverhaltens eines Mauersteinmodellkörpers. Die weitgehende Übereinstimmung von rechnerischen und experimentellen Ergebnissen sowie die Tatsache, daß im Vergleich zu vielen bisherigen Modellen relativ einfach zu bestimmende Stoffkennwerte verwendet werden, führt zu einer positiven Einschätzung der praktischen Einsetzbarkeit des Berechnungsverfahrens. Weiterer Untersuchungsbedarf besteht jedoch in bezug auf das Feuchteverhalten von Baustoffen, deren hygrische Eigenschaften zeitlichen Veränderungen unterworfen sind.

## **8 Literaturverzeichnis**

- [1] Achtziger, J.: Kerndämmung von zweischaligem Mauerwerk; Einfluß des Wassergehalts und der Feuchtigkeitsverteilung auf die Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht. Bauphysik 7 (1985), H. 4, S. 121-124.
- [2] Andersson, A.: Computer programs for two-dimensional heat, moisture, air flow. Division of Building Technology, Lund, Institute of Technology, Report TVBH-3005, Schweden 1981.
- [3] Arnold, A.: Salze: Lästige weiße Ausblühungen oder Hauptschadensursache? Jahresbericht Steinzerfall - Steinkonserverung 1990, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1992.
- [4] Auracher, H.: Wasserdampfdiffusion und Reifbildung in porösen Stoffen. VDI-Forschungsheft 566, Düsseldorf 1974.
- [5] Bagda, E.: Berechnen instationärer Wärme- und Feuchteströme. Expert Verlag, Böblingen 1991.
- [6] Bagda, E.: Bestimmung der Absorptionszahl der Sonnenstrahlung. Bauphysik 13 (1991), H. 6, S. 243-245.
- [7] Balayssac, J.-P., Detriche, C.-H. und Grandet, J.: Interêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caracterisation du béton d'enrobage. Materials and Structures 26 (1993), S. 226-230.
- [8] Barrow, G.M.: Physikalische Chemie. Bohmann-Verlag, Wien 1979.
- [9] Bear, J.: Dynamics of fluids in porous media. Elsevier Verlag, New York 1972.
- [10] Bird, R.B. Stewart, W.E. und Lightfoot, E.N.: Transport phenomena. John Wiley & Sons, New York 1960.

- [11] Bjorck, A. und Dahlquist, G.: Numerische Methoden. Oldenbourg Verlag, München 1972.
- [12] Blümel, K. et al.: Die Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland. Bericht des Bundesministeriums für Forschung und Technologie BMFT-FB-T - 86-051, 1986.
- [13] Bomberg, M.: Water flow through porous materials. Division of Building Technology, Lund, Institute of Technology, Report 21, Schweden 1972.
- [14] 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.
- [15] Buchner, N.: Theorie der Gasdurchlässigkeit von Kunststoff-Folien. Kunststoffe 49 (1959), H. 8, S. 401-406.
- [16] Cammerer, J. und Achtziger, J.: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Kurzberichte aus der Bauforschung 1985, Bericht Nr. 115, S. 491-494.
- [17] Carnahan, B. et al.: Applied numerical methods. Verlag John Wiley & Sons, New York 1969.
- [18] Crank, J.: The mathematics of diffusion. Oxford University Press 1975.
- [19] Crausse, P.: Etude fondamentale des transfer couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé. Dissertation Institut National Polytechnique de Toulouse 1983.
- [20] Da Cunha Neto, J. und Daian, J.-F.: Experimental analysis of moisture transport in consolidate porous media under temperature gradient. International seminar on heat and mass transfer, Dubrovnik 1991.
- [21] D'Ans, J. und Lax, E.: Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Springer Verlag, Berlin 1970.
- [22] Deutscher Wetterdienst: Aspirationspsychrometer-Tafeln. 5. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig 1976.
- [23] DIN 4108: Wärmeschutz im Hochbau. August 1981.
- [24] DIN 52615: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen. November 1987.
- [25] DIN 52617: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. Mai 1987.
- [26] DIN 52620: Bestimmung des Bezugfeuchtegehalts von Baustoffen. April 1991.
- [27] Eichler, K.: 2 von 3 Wohnungen sind sanierungsreif. Bausubstanz 6 (1990), H. 8, S. 42-45.
- [28] Elsner, M. und Winter, E.: Wärme- und Feuchtetransport in Hochlochziegeln. Bauphysik 11 (1989), H. 5, S. 190-197.
- [29] Erhorn, H. und Szerman, M.: Überprüfung der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten in Außenwandecken von Wohnbauten. Gesundheitsingenieur 113 (1992), H. 4, S. 177-186.
- [30] Fehlhaber, T. und Reinhardt, H.-W.: Beton beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Teilbericht 2, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Beuth Verlag, Berlin 1991.
- [31] Fischer, S. et al.: Ein Beitrag zur Behandlung von Temperatur und Feuchteproblemen mittels der Finite-Elemente-Methode. Bauingenieur 66 (1991), S. 53-60, Springer-Verlag.
- [32] Gagarin, V.G. und Mogutov, V.A.: Vapour barrier in three-layer concrete wall panels with efficient insulation. Bericht des Forschungsinstituts für Bauphysik Gosstroy, Moskau.
- [33] Garrecht, H.: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Dissertation Universität Karlsruhe 1992.
- [34] Gertis, K.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen. Schriftenreihe des Deutschen Ausschuß für Stahlbeton, H. 258, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1976.
- [35] Gertis, K.: Verstärkter baulicher Wärmeschutz - ein Weg zur Vermeidung der bevorstehenden Klimaveränderung? Bauphysik 13 (1991), H. 5, S. 132-137.
- [36] Gertis, K. und Erhorn, H.: Wasserdampfdiffusion in Außenbauteilen unter nicht-isothermen Bedingungen. Bauphysik 3 (1981), H. 5, S. 169-173.
- [37] Gertis, K. und Werner, H.: Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen. Kritische Ansätze zur Interpretation des Porengefüges. Schriftenreihe des Deutschen Ausschuß für Stahlbeton, H. 258, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1976.
- [38] Glaser, H.: Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis. Kältetechnik 10 (1958), H. 11, S. 358-364 und H. 12, S. 386-390.



- [39] Gösele, K. und Schüle, W.: Schall, Wärme, Feuchte. 9. Auflage, Bauverlag, Wiesbaden 1989.
- [40] Göttig, R.: Untersuchung von Feuchte-transportvorgängen (kapillares Saugen und Weiterverteilen nach Unterbrechung der Flüssigkeitszufuhr) in porösen Baustoffen mit Hilfe der kernmagnetischen Resonanz. Diplomarbeit Fachhochschule München 1991.
- [41] Greubel, D.: Vergleich von Rechen- und Meßergebnissen zum Feuchtehaushalt hölzerner Wandelemente unter instationären Klimarandbedingungen. Bauphysik 8 (1986), H. 6, S. 183-188 und Bauphysik 9 (1987), H. 1, S. 21-25.
- [42] Hansen, K.K.: Sorption isotherms catalogue. Technical report 162/86, Technical University of Denmark 1986.
- [43] Häupl, P., Stopp, H. und Strangfeld, P.: Feuchteprofilbestimmung in Umfassungskonstruktionen mit dem Bürocomputer unter Berücksichtigung der kapillaren Leitfähigkeit. Bauzeitung 42 (1988), H. 3, S. 113-119.
- [44] Heizmann, P.: Die Bewegung von flüsigem Wasser in kapillarporösen Körpern unter dem Einfluß kapillarer Zugkräfte sowie dem Einfluß von Zentrifugalkräften. Dissertation Technische Hochschule München, 1969.
- [45] Hettmann, D.: Zur Beeinflussung des Feuchte- und Salzgehaltes in Mauerwerk. Bautenschutz + Bausanierung 16 (1993), H. 5, S. 72-75.
- [46] Huebner, K.H.: The finite element method for engineers. John Wiley & Sons, New York 1975.
- [47] Hussein, F.: Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion. Dissertation Universität Dortmund, 1982.
- [48] Illig, W.: Die Größe der Wasserdampfübergangszahl bei Diffusionsvorgängen in Wänden von Wohnungen, Stallungen und Kühlräumen. Gesundheits-Ingenieur 73 (1952), H. 7/8, S. 124-127.
- [49] International Energy Agency: Guidelines & Practice. Report Vol. 2, IEA-Annex XIV, Leuven 1990.
- [50] Isaacson, E. und Keller, H.: Analyse numerischer Verfahren, Verlag Harri Deutsch, Zürich 1973.
- [51] ISO 7345: Thermal insulation - Physical quantities and definitions. Second edition, 1987.
- [52] ISO 9346: Thermal insulation - Mass transfer - Physical quantities and definitions. First edition, 1987,
- [53] Kari, B., Perrin, B. und Foures, J.C.: Modelisation macroscopique des transferts de chaleur et d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Manuskript zur Veröffentlichung in RILEM. Université de Toulouse 1992.
- [54] Kast, W. und Jokisch, F.: Überlegungen zum Verlauf von Sorptionsisothermen und zur Sorptionskinetik an porösen Feststoffen. Chemie-Ingenieur Technik 44 (1972), H. 8, S. 556-563.
- [55] Kerestecioglu, A. und Gu, L.: Theoretical and computational investigation of simultaneous heat and moisture transfer in buildings: "Evaporation and condensation" theory. ASHRAE Transactions, USA 1990.
- [56] Kießl, K.: Bauphysikalische Einflüsse bei der Krustenbildung am Gestein alter Bauwerke. Bauphysik 11 (1989), H. 1, S. 44-49.
- [57] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen 1983.
- [58] Kießl, K. und Gertis, K.: Feuchtetransport in Baustoffen. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen, H. 13, Universität-Gesamthochschule Essen 1980.
- [59] Kießl, K., Krus, M. und Künzel, H.M.: Weiterentwickelte Meß- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen. Bauphysik 15 (1993), H. 2, S. 61-67.
- [60] Kießl, K. und Möller, U.: Zur Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff 47 (1989), S. 317-322.
- [61] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH, Wiesbaden 1974.
- [62] Kohonen, R.: A method to analyze the transient hygrothermal behaviour of building materials and components. Dissertation Helsinki University of Technology 1984.
- [63] Van der Kooij, J.: Moisture transport in cellular concrete roofs. Dissertation Technische Hochschule Delft 1971.
- [64] Krischer, O. und Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Dritte Auflage, Springer-Verlag Berlin 1978.
- [65] Krus, M.: Laufende Untersuchungen. Noch nicht veröffentlicht.

- [66] Krus, M.: Bestimmung der Tiefenwirkung von Klimaeinflüssen in Natursteinmauern durch Feuchteprofilmessungen an ausgewählten Probekörpern. Unveröffentlichte Untersuchungen im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes Steinzerfall, Holzkirchen 1992.
- [67] Krus, M. und Kießl, K.: Ist der Diffusionswiderstand von Baustoffen wirklich feuchteabhängig? IBP-Mitteilung 18 (1991), Nr. 208.
- [68] Krus, M. und Kießl, K.: Kapillartransportkoeffizienten von Baustoffen aus NMR-Messungen. IBP-Mitteilung 16 (1989), Nr. 175.
- [69] Krus, M. und Kießl, K.: Vergleichende Messungen der Porenradienverteilung von Natursteinen mittels Saugspannung und Druckporosimetrie. IBP-Bericht FtB-11/1991.
- [70] Krus, M. und Künzel, H.M.: Liquid water transport above capillary saturation. Beitrag zur Tagung des IEA-Projektes Annex 24, Eindhoven 1992.
- [71] Krus, M., Künzel, H.M. und Klier, M.: Liquid transport over the boundary layer of two different hygroscopic capillary active materials. Beitrag zur Tagung des IEA-Projektes Annex 24, Holzkirchen 1993.
- [72] Künzel, H.: Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen? Bauphysik 8 (1986), H. 2, S. 33-39.
- [73] Künzel, H.: Der Regenschutz von Mauerwerk aus Natursteinen. Bauphysik 10 (1988), H. 1, S. 12-16.
- [74] Künzel, H.: Feuchteinfluß auf die Wärmeleitfähigkeit bei hygroskopischen und nicht hygroskopischen Stoffen. WKSB 36 (1991), H. 29, S. 15-18.
- [75] Künzel, H.: Feuchtigkeitstechnische Untersuchungen an Außenputzen und verputzten Wänden. Dissertation Technische Hochschule Stuttgart 1964.
- [76] Künzel, H.: Gasbeton, Wärme- und Feuchteverhalten. Bauverlag GmbH., Wiesbaden 1971.
- [77] Künzel, H.: Untersuchungen über Feuchtigkeitsverhältnisse in verschiedenen Flachdachkonstruktionen. Berichte aus der Bauforschung, H. 48, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1966.
- [78] Künzel, H.: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. Bauphysik 4 (1982), H. 3, S. 101-107.
- [79] Künzel, H. und Schwarz, B.: Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. Berichte aus der Bauforschung, H. 61, Berlin 1968.
- [80] Künzel, H.M.: Connection between liquid water and vapour transport in porous media and its consequences for heat and moisture transfer models. Beitrag zur Tagung des EG-Projektes SCIENCE, London 1992.
- [81] Künzel, H.M.: Untersuchung des Austrocknungsverhaltens von im CSO-Verfahren applizierten Wärmedämmschichten aus Isofloc. IBP-Bericht FtB-18/1992.
- [82] 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 project, Report T1-D-92/01, 1992.
- [83] Künzel, H.M.: Rechnerische Untersuchungen des Langzeit-Feuchteverhaltens von Wärmedämmschichten in Umkehrdächern mit Begrünung. IBP-Bericht FtB-23/1993.
- [84] Künzel, H.M.: Rainloads on building elements. Beitrag zur Tagung des IEA-Projektes Annex 24, Holzkirchen 1993.
- [85] Künzel, H.M. und Kießl, K.: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von mineralischen Baustoffen aus Sorptionsversuchen. Bauphysik 12 (1990), H. 5, S. 140-144.
- [86] Kupke, C. und Pfrommer, P.: Ein Modell zur Beschreibung des instationären Wärme-, Wasserdampfdiffusions- und Kapillartransports in porösen Bauteilen. Gesundheits-Ingenieur 113 (1992), H. 4, S. 187-197.
- [87] Lacy, R.E. und Shelland, H.C.: An index of driving rain. The Meteorological Magazine (1962), H. 91, S. 177-184.
- [88] Le Sage de Fontenay, C. und Sellevold, E.J.: Ice Formation in Hardened Cement Paste. Durability of Building Materials and Components, ASTM STP 691 (1980), S. 425-438.
- [89] Lindauer, E. und Snatzke, Ch.: Spektrale Messung des Absorptionsgrades. Persönliche Mitteilung, Holzkirchen 1993.
- [90] Luikov, A.V.: Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. International Journal of Heat and Mass Transfer (1975), H. 18, S. 1-14.
- [91] Lutz, P. et al.: Lehrbuch der Bauphysik. Teubner Verlag, Stuttgart 1985.

- [92] Matsumoto, M. und Sato, M.: A harmonic analysis of periodic steady state solution of the internal condensation process. Proceedings zum CIB W67-Symposium in Rotterdam 1990.
- [93] McLean, R. Galbraith, G. und Sanders, C.: Moisture transmission testing of building materials and the presentation of vapour permeability values. Building research and practice, the Journal of CIB 2 (1990), S. 82-91.
- [94] Meng, B.: Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen. Dissertation RWTH Aachen 1993.
- [95] Mizuhata, M. et al.: Moisture transfer in material. Proceedings zum CIB W67-Symposium in Rotterdam 1990.
- [96] Möller, U.: Thermo-hygrische Formänderungen und Eigenspannungen von natürlichen und künstlichen Mauersteinen. Dissertation Universität Stuttgart 1992.
- [97] Neiß, J.: Numerische Simulation des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf 1982.
- [98] Nicolas, P.: Modelisation mathematique et numerique des transferts d'humidité en milieu poreux. Dissertation Université Paris VI 1992.
- [99] Nielsen, A.F.: Measurements of drying-out of cellular concrete. Meddelelse Nr. 26, Thermal Insulation Laboratory, Technical University Denmark 1973.
- [100] Nonweiler, T.R.F.: Computational mathematics. Ellis Horwood Limited, Chichester 1984.
- [101] Patankar, S.V.: Numerical heat transfer and fluid flow. Verlag McGraw-Hill, Washington 1980.
- [102] Patankar, S.V. und Baliga, B.R.: A new finite-difference scheme for parabolic differential equations. Numerical Heat Transfer, vol. 1 (1978), p. 27.
- [103] Peaceman, D.W. und Rachford, H.H.: The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations. Journal of Industrial Applied Mathematics 1 (1955), H. 3, S. 28-41.
- [104] Phillip, J.R. und de Vries, D.A.: Moisture movement in porous materials under temperature gradients. Transactions, American Geophysical Union 38 (1957), H. 2, S. 222-232.
- [105] Potter, D.: Computational Physics. John Wiley & Sons, London 1972.
- [106] Prazak, J. et al.: Bemerkungen zur Beschreibung des Flüssigtransports in porösen Baumaterialien. Gesundheits-Ingenieur 110 (1989), H. 6, S. 308-312.
- [107] Pult, P.: Krankheiten durch Schimmelpilze. Beitrag zu den Aachener Bausachverständigentagen 1992, Bauverlag Wiesbaden 1992.
- [108] Richards, L.A.: Methods of measuring soil moisture tensions. Soil Science (1949), H. 68, S. 95-112.
- [109] Ricken, D.: Ein einfaches Berechnungsverfahren für die eindimensionale, instationäre Wasserdampfdiffusion in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität Dortmund 1989.
- [110] Rode, C.: Combined heat and moisture transfer in building constructions. Dissertation Technical University of Denmark 1990.
- [111] Rosenberg, D.U.: Methods for the numerical solution of partial differential equations. American Elsevier Publishing Company, New York 1969.
- [112] Schaschek, H.: Bewegungsmechanismus von Wasserdampf in porösen blattförmigen Materialien. Chemie-Ingenieur Technik 28 (1956), H. 11, S. 698-702.
- [113] Schaub, H. und Werner H.: Wärmeübergangskoeffizient unter natürlichen Klimabedingungen. IBP-Mitteilung 13 (1986), Nr. 109.
- [114] Schwarz, B.: Die Wärme- und Stoffübertragung an Außenwandoberflächen. Dissertation Universität Stuttgart 1971.
- [115] Schwarz, B.: Witterungsbeanspruchung von Hochhausfassaden. Heizung, Lüftung, Haustechnik 24 (1973), H. 12, S. 376-384.
- [116] Schwarz, B. und Künzel, H.: Der kritische Feuchtegehalt von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur 95 (1974), H. 9, S. 241-246.
- [117] Sommer, E.: Beitrag zur Frage der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porigen Stoffen bei Be- und Entfeuchtungsvorgängen. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt 1971.
- [118] Tveit, A.: Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Norwegian Building Research Institute, Rapport 45, Oslo 1966.
- [119] VDI 3789 Umweltmeteorologie, Blatt 2: Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen; Berechnung der kurz- und der langwelligen Strahlung. Entwurf, Dezember 1992.

- [120] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Bericht aus dem Bauforschungsinstitut Heft 1/1991, Technische Universität München, 1991.
- [121] Vos, B.H.: Kondensation in Dächern. Gesundheits-Ingenieur 90 (1969), H. 11, S. 334-342.
- [122] Wagner, A. und Niesel, K.: Kapillaritätskenngrößen von Mauerziegeln. Materialprüfung 31 (1989), H. 4, S. 109-113.
- [123] Ziegler, et al.: Lehrbuch der Botanik. 31. Auflage, Gustav Fischer Verlag 1978.

## Lebenslauf

### Persönliche Angaben

Name: Hartwig Michael Künzel  
 Geboren: 15. Februar 1959 in Tegernsee  
 Eltern: Dr. Helmut Künzel  
 Gisela Künzel, geb. Weiß  
 Familienstand: verheiratet seit 1986  
 mit Sylvie Künzel, geb. Petit  
 Kinder: Lorenz, Roxana und Jesabel Künzel

### Ausbildung

1965 – 1969 Volksschule Valley  
 1969 – 1978 Gymnasium Miesbach  
 10/79 – 5/82 Studium des Chemieingenieurwesens an der Universität Erlangen-Nürnberg  
 Abschluß: Vordiplom  
 10/83 – 12/86 Studium des Chemieingenieurwesens an der Universität Erlangen-Nürnberg  
 Abschluß: Diplom  
 Auslandsstudienaufenthalte:  
 10/84 – 2/85 an der Universität Manchester (Studienarbeit)  
 7/86 – 10/86 an der Ecole Central des Arts et Manufactures in Paris (Diplomarbeit)

### Berufliche Tätigkeit

12/78 – 7/79 Wissenschaftliche Hilfskraft am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen (Vollzeit)  
 6/82 – 8/82 Reiseleiter im Auftrag der Firma Experworld in Freilassing  
 9/82 – 3/83 Receptionist im Hotel Leinster in London  
 Seit 1/87 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen