

1767

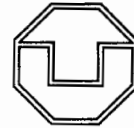
Bz. Nr.

2403



Peter Häupl
Heiko Fechner
Horst Stopp

TU Dresden
Institut für Bauklimatik
FH Lausitz Cottbus



97,5 %

Erarbeitung eines normungsfähigen Verfahrens und einer Planungsrichtlinie zur hygrischen Bemessung von Außenbauteilen

gefördert durch das
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
und die
CAPE CALSIL GmbH Köln

Projekt-Nr. BS 34 – 80 01 99 12

Abschlußbericht 2001
Kurzfassung

Dresden, April 2001

Erarbeitung eines normungsfähigen Verfahrens und einer Planungsrichtlinie zur hygrischen Bemessung von Außenbauteilen

Projekt-Nr. BS 34 – 80 01 99 12

Kurzfassung

1. Einleitung
2. Anpassung der DIN 4108-3 an die EN ISO 13788 "Berechnungsverfahren zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren"
3. Integration der kapillaren Feuchteleitung und der Hygroskopizität in das Glasermodell der EN ISO 13788 bzw. der DIN 4108-3
 - 3.1 Begründung am Beispiel der energetischen Sanierung einer Fachwerkwand mit einer kapillaraktiven Innendämmung
 - 3.2 Theoretische Grundlagen eines einfachen analytischen Modells
 - 3.3 Beispiel
 - Fall 1: Eine Kondensationsebene in einer sechsschichtigen Konstruktion
 - 3.4 Validierung der Ergebnisse mittels numerischer Simulationsverfahren - Computer-Code DIM 3.1
4. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen, Ausblick

1. Einleitung

Die feuchteschutztechnischen Normen DIN 4108-3 [1] und EN ISO 13788 [2] zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Berechnung der Tauwasserbildung im Bauteilinneren basieren auf dem sogenannten Glaserschema zur Wasserdampfdiffusion und berücksichtigen nicht die hygroskopische Speicherfähigkeit und die kapillare Flüssigwasserleitfähigkeit der Baustoffe.

Am Institut für Bauklimatik der TU Dresden sind in den letzten Jahren das Modell und der Computercode DIM [3], [4], Versionen 2.5 bis 3.1, zur Simulation des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Lufttransportes in Umfassungskonstruktionen bei realistischen Klimarandbedingungen (Stundenwerte der Lufttemperaturen, relativen Luftfeuchten, kurzwelligen Strahlung, langwelligen Strahlung, des Niederschlages, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit) unter Berücksichtigung aller thermischen und hygrischen Speicher- und Transportprozesse entwickelt worden. Dieser Code wird seit dem Jahr 1996 an mehreren Testhäusern (Gründerzeithaus in Dresden, Umgebendehaus in Ostsachsen, Fachwerkhaus in Niedersachsen, Monolithbetongebäude in Nürnberg und Bahnmeistereigebäude in Senftenberg) durch Vergleich der berechneten Feuchte- und Temperaturfelder mit in-situ Messungen verifiziert [5], [6]. Alle auszuarbeitenden Näherungsverfahren für die Planungspraxis werden mit diesem Code DIM überprüft und validiert.

Zunächst wird vorgeschlagen, das Monatsmittelverfahren der EN ISO 13788 durch ein geeignetes Block-Klimaverfahren (ähnlich der bisherigen deutschen Norm) zu ersetzen. Dadurch können zum einen ein zwölfmaliges Anwenden des unzureichenden Glasermodells mit evtl. monatlich wechselnden Kondensationsebenen vermieden und zum anderen die offensichtlichen Fehler in der bisherigen deutschen Norm 4108-5 bei der Warmdachberechnung ausgeräumt werden.

Im Hauptteil wird ein Weg aufgezeigt, auf relativ einfache Weise die hygroskopische Speicherfähigkeit und den Kapillarwassertransport in die analytischen Rechenmodelle zu integrieren. Zur Begründung wird am Beispiel einer Fachwerksanierung mit einer kapillaraktiven Innendämmung nachgewiesen, dass sich die winterliche Kondensatmenge von 2,5 kg/m² auf 0,6 kg/m² reduzieren lässt. Die gegenwärtige Bemessungspraxis ist also falsch bzw. verschenkt Reserven.

Das Grundmodell berücksichtigt die kapillare Leitung und die Hygroskopizität durch jeweils konstante Parameter k und w_h . Für eine sechsschichtige Konstruktion werden die Fälle eine bis drei fortlaufende Kondensationsebenen und zwei getrennte Kondensationsebenen einschließlich des sommerlichen Trocknungsverhaltens behandelt. Dafür liegt ein in MATHCAD lauffähiger Computercode vor. Mitgeteilt wird in dieser Kurzfassung nur der Fall 1 mit einer Kondensationsebene.

Von den Bearbeitern ist bisher für die Planungspraxis der Computercode COND [7], der ebenfalls vereinfacht die kapillare Leitung und Hygroskopizität berücksichtigt, entwickelt worden. COND ist im Rahmen dieser Arbeit als Alternative ebenfalls weiter gepflegt worden. Schließlich wird das Verfahren mit dem Vollmodell DIM überprüft.

Es empfiehlt sich, auf der Basis dieser gesicherten Rechenmodelle und solider Hintergrundinformationen, Konstruktionen (auch für solche, die nach DIN 4108-3 keines Nachweises bedürfen) in Form eines Feuchteatlases vorauszuberechnen und der Praxis zur Verfügung zu stellen.

2. Anpassung der DIN 4108-3 an die EN ISO 13788 "Berechnungsverfahren zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren"

Im Rahmen der Neufassung der DIN 4108 "Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden" liegt auch das Blatt 3 "Klimabedingter Feuchteschutz" in überarbeiteter Form vor. Gleichzeitig sind die EU-Staaten verpflichtet, die EN ISO 13788 "Berechnungsverfahren zur Vermeidung einer kritischen Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren" zu übernehmen. Ein Vergleich der Normenschlussentwürfe zeigt, dass die Kapitel 1 bis 6 der DIN 4108-3 in der dort vorliegenden Form beibehalten werden können.

Die bisher für Deutschland festgelegten Klimabedingungen (Tabelle A.1, DIN 4108-3) sind aber veraltet und unzureichend, Außentemperaturen von -10°C über 2 Monate treten nicht auf, Raumtemperaturen von $+12^{\circ}\text{C}$ für die 3 Sommermonate werden auch in kalten Sommern und unbeheizten Räumen überschritten.

Außerdem sind bisher die sommerlichen Trocknungsmengen für Warmdächer grundsätzlich falsch berechnet worden. Die Temperatur in der Dachoberfläche von 20°C (richtigerweise durch kurzweilige Strahlung hervorgerufen) führt zu einem Sättigungsdruck an der Außenseite der Dämmschicht von 2340 Pa. Die Raumtemperatur von 12°C liegt aber in etwa auch an der Innenoberfläche der Dämmschicht an. Das Partialdruckgefälle verschiebt die Kondensatfeuchte unter der Dachdichtungsbahn an die Innenseite der Dämmschicht (Umkehrdiffusion und Sommerkondensation), so dass dort der Wasserdampfdruck von 1403 Pa herrscht. Für die Trocknung in den Raum steht also nur noch das Wasserdampfdruckgefälle von $\Delta p_i = 1403 \text{ Pa} - \varphi_i 1403 \text{ Pa} = 420 \text{ Pa}$ zur Verfügung und nicht, wie in der DIN 4108 bisher angenommen, von $\Delta p_i = 2340 \text{ Pa} - \varphi_i 1403 \text{ Pa} = 1358 \text{ Pa}$ (φ_i jeweils 70 %). Viele Warmdachkonstruktionen, die durchaus feuchtetechnisch funktioniert haben, dürften nach dem bisherigen deutschen Verfahren überhaupt nicht zugelassen werden.

Die EN ISO 13788 fordert als Randbedingung Monatsmittelwerte und somit eine zwölfmalige Anwendung des Glasermodells (z. B. Tabelle C.1 in EN ISO 13788). Die raumseitigen Klimabedingungen sind im Winter wegen $\varphi_i > 50\%$ schärfer als in der DIN 4108-3, die außenseitigen Klimabedingungen sind allerdings zu mild.

Da sich die Randbedingungen von Monat zu Monat ändern, kann auch die Lage und Zahl der Kondensationsebenen im Inneren der Konstruktion ständig wechseln. Das führt zu einem unberechtigten hohen Rechenaufwand. Die feuchtetechnische Beurteilung einer Konstruktion wird auf keinen Fall sicherer, wenn man das physikalisch unzureichende Wasserdampfdiffusionsmodell von Glaser zwölfmal anwendet.

Die EN ISO 13788 beinhaltet aber Klauseln zur nationalen Festlegung der Klimarandbedingungen. Davon wird im folgenden Gebrauch gemacht und ein einfaches "worst case" Blockklima für die DIN 4108-3, Anhang A vorgeschlagen, das nicht im Widerspruch zur EN ISO 13788 steht (Tabelle 1).

Die Länge der Kondensationsperiode wird auf die Wintermonate Dezember bis Februar begrenzt. Die Außenlufttemperatur von $\theta_e = -5^{\circ}\text{C}$ über 3 Monate stellt jetzt wiederum eine scharfe Beanspruchung dar. Raum- und Außenklima stimmen außerdem mit den Daten für die Beurteilung der kritischen Feuchte an Bauteilinnenoberflächen überein. Das Diffusionschema braucht nur einmal bestimmt zu werden. Die winterlichen Kondensatmengen ergeben sich aus den Gleichungen (21) bis (24) der EN ISO 13788, indem die dortigen Kondensationsraten mit der Kondensationszeit t_c von 3 Monaten multipliziert werden.

Tabelle 1: Klimabedingungen für die Beurteilung der Tauwasserbildung im Inneren von Bauwerksteilen

Klima	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Wasserdampfdruck	Dauer		
	θ in °C	φ in %	p in Pa	t in d	h	s
Kondensationsperiode von Dezember bis Februar						
Wandbauteile und Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen, Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen						
Außenklima	-5	80	321	90	2160	$7,78 \cdot 10^6$
Innenklima	20	50	1170			
Verdunstungsperiode von Juni bis August						
Wandbauteile und Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen, Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen						
Außenklima	15	70	1193	90	2160	$7,78 \cdot 10^6$
Innenklima	18	60	1238			
Klima im Tauwasserbereich	15	100	1704			
Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen						
Außenklima	15	70	1193	90	2160	$7,78 \cdot 10^6$
Innenklima	18	60	1238			
Klima im Tauwasserbereich	18	100	2063			

Die Länge der Trocknungsperiode erstreckt sich auf die Sommermonate Juni bis August. Das Außenklima wird durch die vernünftigen Parameter $\theta_e = +15^\circ\text{C}$, $\phi_e = 70\%$ beschrieben. Wie man mittels thermischer Gebäudemodelle für den Sommerfall zeigen kann, stellen sich bei normaler Nutzung, Lüftung und reduzierter Strahlungsbelastung (verregneter Sommer) immer noch eine Raumlufthtemperatur von 18°C und eine Raumlufthfeuchte von 60% ein.

Durch die Festlegungen der Temperaturen im Tauwasserbereich (Wände $\theta_c = 15^\circ\text{C}$ wie Außenklima, Warmdächer $\theta_c = 18^\circ\text{C}$ wie Raumklima – Sonneneinstrahlung) wird die Berechnung der Verdunstungsmenge besonders einfach.

Dadurch, dass bei Dächern die Temperaturen im Raum und in der Tauwasserebene gleich sind, tritt das leidige Problem der Sommerkondensation nicht mehr auf, und im Rahmen des Glaserschemas wird jetzt auch richtig gerechnet.

Im ausführlichen Forschungsbericht sind Wand- und Dachkonstruktionen mit diesen Randbedingungen gerechnet und die Ergebnisse mit denen des Euro-Codes 13788 und der genauen numerischen Simulation verglichen worden. Beide Normen beruhen auf dem einfachen Wasserdampfdruckschema nach Glaser, berücksichtigen also nicht den Kapillarwassertransport und die hygroskopische Speicherefähigkeit der Baustoffe.

3. Integration der kapillaren Feuchteleitung und der Hygroscopicität in das Glasermodell der EN ISO 13788 bzw. der DIN 4108-3

3.1 Begründung am Beispiel der energetischen Sanierung einer Fachwerkwand mit einer kapillaraktiven Innendämmung

Enthalten die Außenbauwerksteile Baustoffe mit höherer kapillarer Leitfähigkeit (etwa ab $D_w = 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$), führt die hygrische Bemessung nach Glaser zu falschen Ergebnissen. Die Bearbeiter untersuchen seit einigen Jahren bewohnte Testhäuser, um zum einen Konstruktionen mit einem guten Wärmeschutz aber ohne feuchtetechnische Probleme zu entwickeln und zum anderen die genaue numerische Simulation mit dem Code DIM zu validieren. Ein Beispiel soll zur Begründung des Näherungsverfahrens nach Abschnitt 3.2 herausgegriffen werden.

An einem 200 Jahre alten Umgebindehaus in Ebersbach / Ostsachsen sind von 1996 bis 1999 umfangreiche Messungen an Innendämmsystemen für erhaltenswerte historische Fassaden sowohl in der Blockstube als auch im Fachwerkbereich durchgeführt worden. An der Fachwerkwand im ersten Stock ist in drei Gefachen ein neues Ausfachungsmaterial (Leichttonmörtel) eingebaut und zusätzlich eine Innendämmung mit Mineralwolle (50 mm, mit Gipskarton verkleidet) und eine kapillaraktiven Calciumsilikatdämmplatte (50 mm) angebracht worden (Abb. 1). Von 1998 bis 1999 ist auch die originale, mit Strohlehm ausgefachten Fachwerkaußenwand durch eine kapillaraktive Calciumsilikatplatte energetisch verbessert worden. Die Ankopplung erfolgt mit einem zweischichtigen Lehmputz (Ausgleichs- und Koppelputz). Die Dämmplatte mit aufgebrachtem Koppelputz zeigt Abb. 3.

Für alle untersuchten Konstruktionen werden außerdem Simulationen des hygrothermischen Verhaltens mit dem Code DIM durchgeführt. Die dafür verwendeten Materialkennwerte sind größtenteils durch eigene Messungen bestimmt worden.

Für die kontinuierliche Untersuchung sind Sensoren für die Messung von Temperaturen, Luftfeuchten, Wärmestrom und Holzfeuchtegehalt eingebaut worden. Abbildung 3 zeigt einen vertikalen Schnitt durch die Konstruktion (Ausfachung und Fachwerkbalken) mit der Anordnung der Messfühler. Die Messungen erfolgen sowohl in Ausfachungsmitte (Index F in Abb. 2) als auch am Holzbalken (Index B). Am Beispiel der Calciumsilikatinnendämmung an der originalen Strohlehmausfachung soll der Effekt der Kapillaraktivität für das Feuchteverhalten der Wand demonstriert werden.

Die Felder der Ausfachung sind mit ca. 0,8 m x 0,8 m groß genug, um sie in der Mitte der Ausfachung mit einer eindimensionalen Simulation zu untersuchen. Abbildung 4 bis 7 zeigen den Vergleich Messung-Rechnung für ausgewählte Messwerte. Die Temperatur zwischen Dämmung und Ausfachung (Abb. 4) fällt im Winter nur kurz unter den Nullpunkt und zeigt im übrigen die jahreszeitlichen Schwankungen. Die Wärmestromdichte durch die Konstruktion (Abb. 6) wird mit einer Wärmestromplatte auf der Wandinnenseite gemessen. Die Luftfeuchte zwischen Dämmung und Altkonstruktion (Abb. 5) wird in einem kleinen Hohlraum gemessen. Sie zeigt anfangs das Abfallen der Luftfeuchte nach Austrocknen der Einbaufeuchte und im nächsten Winter die Länge der Kondensationsperiode an. Die Holzfeuchtegehalte im Balken werden kontinuierlich gemessen (Abb. 7). Die kritische Feuchte von etwa 10 Vol% wird bei Einbau und während der Kondensationsperiode erreicht, aber nicht wesentlich überschritten. Die hohe kapillare Saugkraft des Calciumsilikats fördert den Abtransport der entstehenden Feuchte und begrenzt somit die Gefährdung des Holzes.

Generell ist eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und den Simulationen festzustellen. Die Bewertung der Konstruktion aufgrund weitergehender Berechnungen ist damit möglich.

Die Feuchtetransportvorgänge im Inneren der Konstruktion sind anschaulich in den Darstellungen des zeitlichen Verlaufs des Feuchteprofils zu erkennen. Die Simulation wird für zwei

Fälle durchgeführt: zum einen der reale Fall (alle Materialien besitzen eine – wenn auch unterschiedliche – kapillare Leitfähigkeit), zum anderen eine Berechnung ohne kapillare Saugkraft, wie sie den Normen DIN 4108-3 und EN ISO 13788 zugrunde liegt.

Abbildung 8 zeigt am Anfang die Abtrocknung der Einbaufeuchte aus dem Lehmputz. Die kapillare Saugkraft des Dämmstoffes unterstützt die Trocknung erheblich. Das „Absaugen“ von Feuchte ist an der Durchfeuchtungsbreite der Dämmschicht zu erkennen. Während der zweiten Kondensationsperiode ist die Durchfeuchtung geringer. Sie pegelt sich auf einen eingeschwungenen Zustand ein. Abbildung 9 stellt den analogen Fall ohne Berücksichtigung der Kapillarität dar. Die Verteilung der Feuchte im Inneren der Konstruktion kann hier ausschließlich über Dampftransport stattfinden. Entsprechend langsam verläuft die Austrocknung der Einbaufeuchte in der feuchten Lehmputzschicht. Auch in der zweiten Kondensationsphase tritt nur eine geringe Durchfeuchtungsbreite der an die Kondensationsebene grenzenden Materialien auf (Dämmschicht und Lehmputz). Der maximale Feuchtegehalt infolge innerer Kondensation ist jetzt wesentlich höher.

Abbildung 10 zeigt die integrale überhygroskopische Feuchtemasse für beide Fälle bezogen auf eine Wandfläche von 1 m^2 . Schon bei der Trocknung der Einbaufeuchte ist die entspannende Wirkung der kapillaraktiven Innendämmung erkennbar. Ohne kapillare Leitfähigkeit bleibt die Konstruktion sogar bis zum Beginn der ersten Kondensationsperiode feucht und kann erst im darauffolgenden Spätsommer austrocknen. Im zweiten Jahr ist die überhygroskopische Feuchte nur auf Kondensation in der Konstruktion zurückzuführen. Auch hier zeigt sich, dass die Kondensatmenge durch das kapillaraktive Innendämmmaterial begrenzt wird. Die Konstruktion ist mit $0,65 \text{ kg/m}^2$ noch zulässig, während ohne Kapillarität die vierfache Menge auftritt ($2,6 \text{ kg/m}^2$). Die Austrocknungszeiten in der warmen Jahreszeit verhalten sich entsprechend.

In Abbildung 11 ist die berechnete Feuchteverteilung in einem zweidimensionalen Schnitt durch die Konstruktion am 18. Februar 1999 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt erreicht der Feuchtegehalt im Calciumsilikat das Maximum mit 5,25 Vol%. Aufgrund der Saugfähigkeit wird die entstehende Feuchte gut verteilt, das Feuchteprofil verläuft relativ flach über die Dämmschicht. Da die Wärmeleitfähigkeit des Ausfachungsmaterials geringer ist als die des Holzbalkens, befindet sich der maximale Feuchtegehalt im Holzbalken an der inneren Ecke zum Gefach hin. Er beträgt etwa 9,1 Vol% und liegt damit noch unter der kritischen Holzfeuchte von 10 Vol%. Der Feuchtegehalt auf der Außenseite (links in Abb. 11) wird durch Außenluftzustand und Regen bestimmt. Der Feuchteverlauf entlang des oberen Randes in Abb. 11 entspricht dem eindimensionalen Fall in Abb. 8 zum Zeitpunkt 18.2.1999.

Für den vorliegenden Fall, eine Innendämmung mit einem kapillaraktiven Material, stellt die kapillare Saugkraft eine entscheidende Materialeigenschaft dar, die eine Konstruktion ohne Verwendung einer Dampfbremse überhaupt erst ermöglicht. Die eventuell durch Kondensation entstehende Feuchte wird durch das Dämmmaterial aufgenommen und kapillar verteilt. Ohne diese Eigenschaft verbleibt das gesamte Kondensat in der Ebene Dämmung-Alt konstruktion und führt zu erhöhten Feuchtegehalten der angrenzenden Materialien. Besonders bei Holzbauteilen ist dadurch eine hohe Schadenswahrscheinlichkeit abzusehen. Bei einer Bemessung der Konstruktion mittels der entstehenden Kondensatmenge oder der Wassergehalte der Materialien ist daher die Berücksichtigung der kapillaren Materialeigenschaften essentiell. Weiterführende Messungen werden seit Mai 2000 an einem bewohnten Fachwerkhaus in Niedersachsen durchgeführt, das im Fachwerkbereich komplett mit Calciumsilikatplatten als Innendämmung saniert worden ist.



Abb. 1: Einbau des neuen Ausfachungsmaterials in drei Gefache der Testwand im Umgebindehaus Ebersbach / Oberlausitz

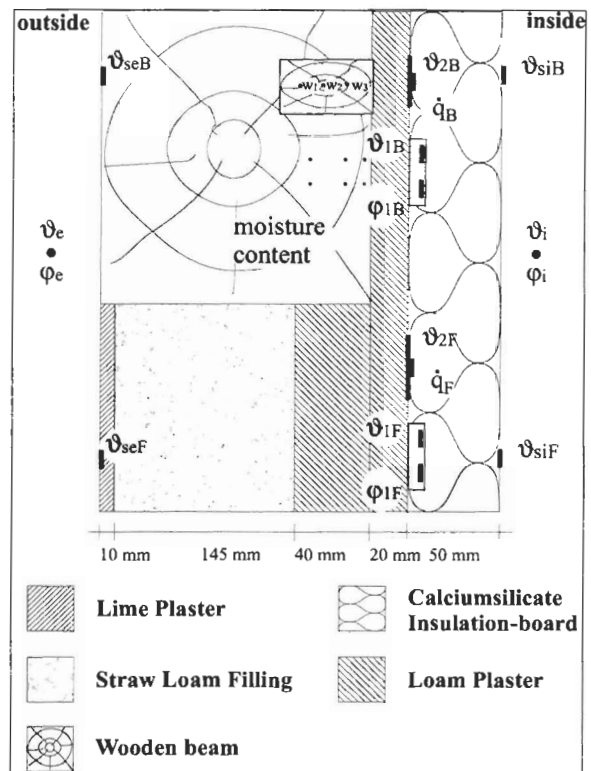


Abb. 2: Anordnung der Messstellen in der Fachwerkwand (Horizontalschnitt durch die Konstruktion)



Abb. 3: Dämmplatte aus Calciumsilikat vor dem Einbau mit aufgebrachteter Koppelschicht aus Lehmputz

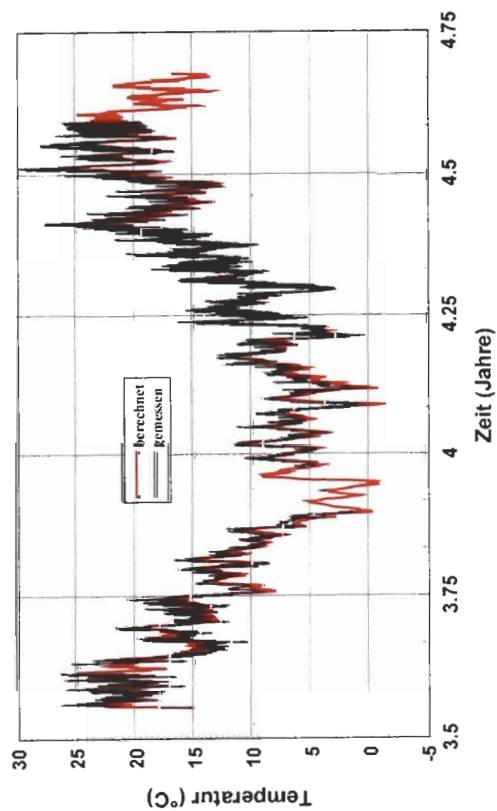


Abb. 4: Temperatur zwischen Dämmung und Koppelputz

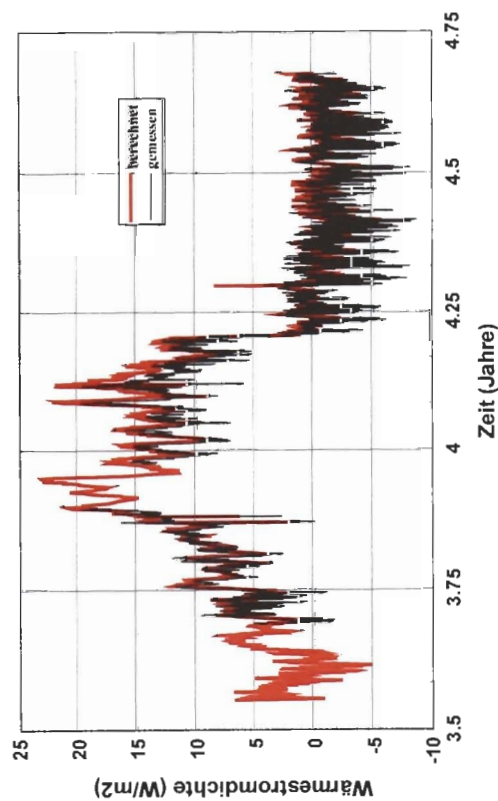


Abb. 6: Wärmestromdichte durch die Konstruktion

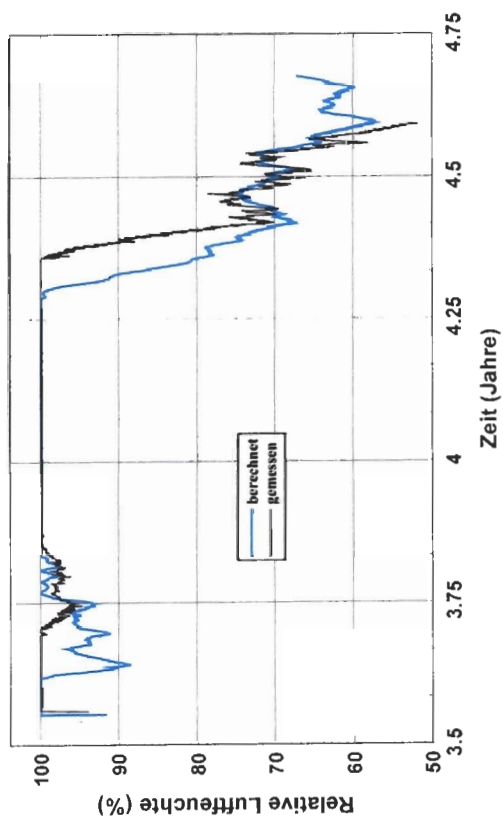


Abb. 5: Relative Luftfeuchte in einem Hohlraum zwischen Dämmung und Koppelputz

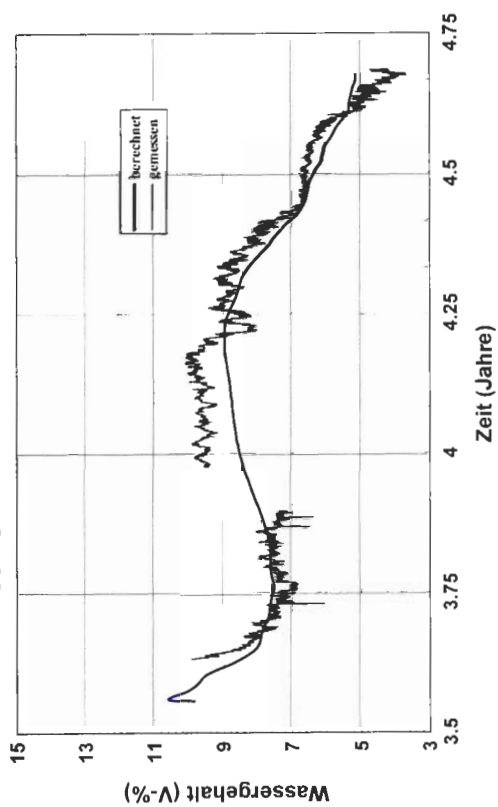


Abb. 7: Wassergehalt des vertikalen Holzbalkens hinter der Calciumsilikatdämmung in 13 mm Tiefe

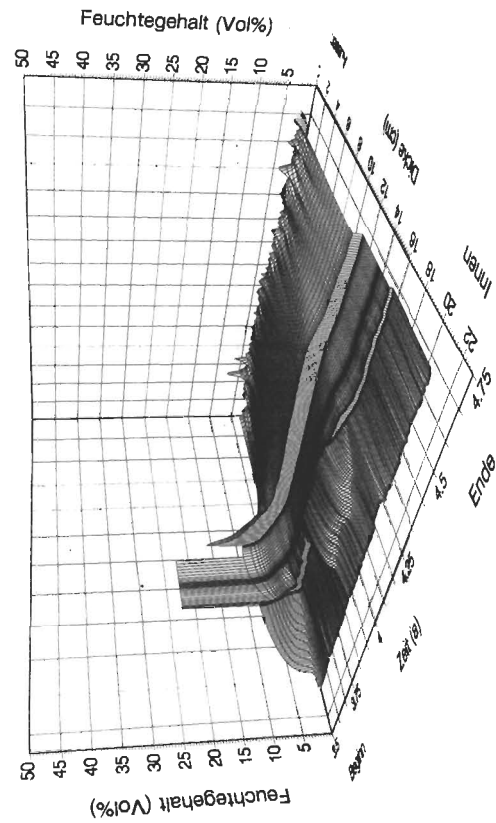


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Feuchtegehaltes in der Mitte der Ausfa-
 chung, Materialien mit der wirklichen kapillaren Leitfähigkeit

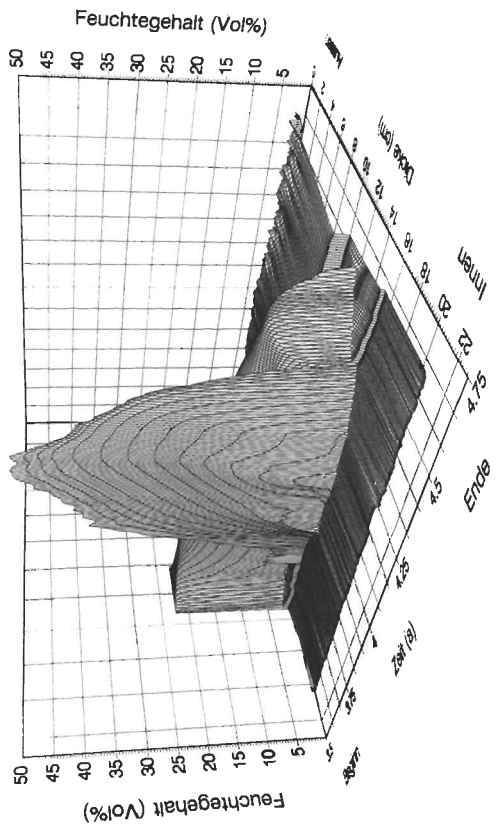


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf des Feuchtegehaltes in der Mitte der Ausfa-
 chung, alle Materialien ohne kapillare Leitfähigkeit

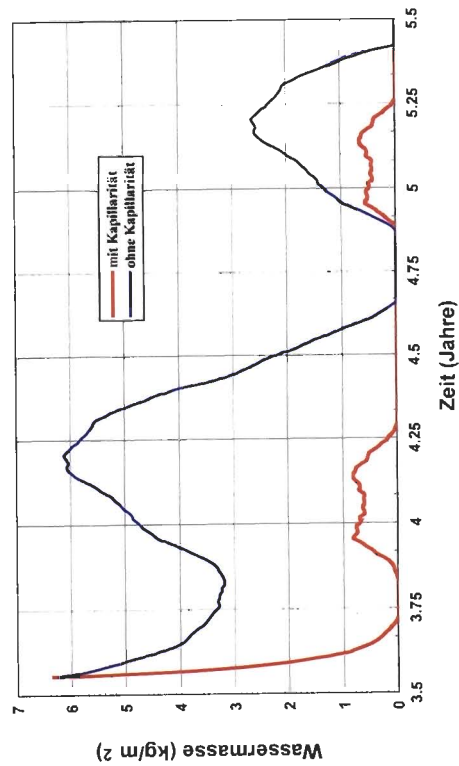


Abb. 10: Vergleich der überhygroskopischen Wassermasse mit und ohne
 Kapillarität

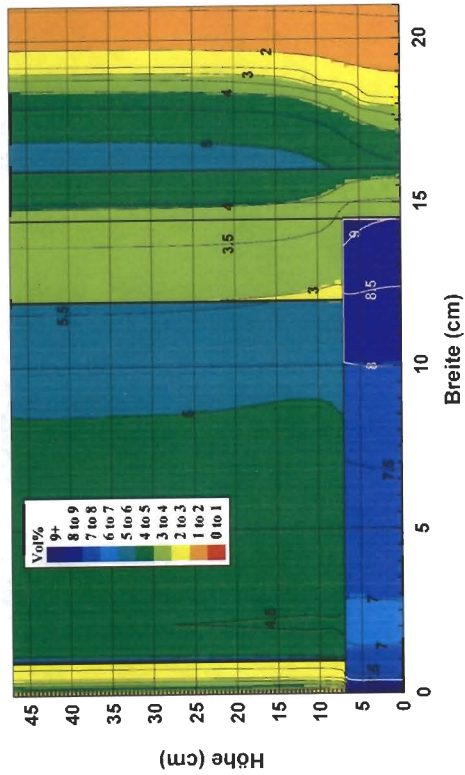


Abb. 11: Berechnete zweidimensionale Feuchteverteilung im Vertikal-
 schnitt am 18. Februar 1999

3.2 Theoretische Grundlagen eines einfachen analytischen Modells für die innere Kondensatbildung

Für den Standardfall einer Kondensationsebene zwischen den Schichten k und $k+1$ ist das allgemeine Feuchtetransportmodell in Abb. 12 dargestellt. Wie im Glasermodell dringt auf Grund des Dampfdruckgefälles Feuchte in die Konstruktion ein und kondensiert entsprechen des Temperaturgefälles im kalten Teil der k -ten und im warmen Teil der $(k+1)$ -ten Schicht. Der Aufbau des überhygroskopischen Feuchtefeldes ist mit einem kapillaren Rücktransport zur warmen Seite in der k -ten Schicht und eine Verstärkung des Dampfstromes durch einen Kapillarwasserstrom nach außen in der $(k+1)$ -ten Schicht verbunden. Wird das einfache Blockklima angelegt, erfolgt die Aufladung mit Tauwasser in etwa mit einer Exponentialfunktion bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Im Gleichgewichtszustand ist die Gesamtfeuchtestromdichte an jeder Stelle im Bauteil konstant. In den trockenen Schichten 1 bis $k-1$ besteht sie nur aus Dampf, in den feuchten Teilen der Schichten k und $k+1$ aus Dampf und Flüssigwasser und in den trockenen Schichten $k+2$ bis n wieder nur aus Dampf. Die kapillare Leitfähigkeit soll durch einen konstanten Materialparameter k , der sich aus der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN EN ISO 15148 [8] bestimmen lässt [9], beschrieben werden. Dadurch haben die Wärme- und Feuchtestromdichten die gleiche mathematische Form

$$\text{Wärmestromdichte} \quad \dot{q} = \frac{\Delta T}{R} \quad R = \frac{s}{\lambda} \quad (1)$$

$$\text{Dampfstromdichte} \quad g_D = \frac{\Delta p}{r_D} \quad r_D = \frac{s_d}{\delta_0} = \frac{\mu s}{\delta_0} \quad (2)$$

$$\text{Kapillarwasserstromdichte} \quad g_w = \frac{\Delta w}{r_w} \quad r_w = \frac{s}{k\rho_w} \quad (3)$$

Die Feuchtespeicherung wird im hygroskopischen Bereich durch die Sorptionsisotherme nach DIN EN ISO 12571 [10] und im überhygroskopischen Bereich durch die Saugspannungskurve charakterisiert. Die Sorptionsisotherme wird linearisiert. Der maximale hygroskopische Feuchtwert bei $\phi = 1$ beträgt w_h . Treten zwei Stoffe in Kontakt, ergibt sich als Feuchtesprung an der Schichtgrenze

$$w_{k+1} = \frac{w_k}{G_{k,k+1,h}} \quad G_{k,k+1,h} = \frac{w_{hk}}{w_{h,k+1}} \quad (4)$$

Im überhygroskopischen Bereich steigt bei $\phi = 1$ die Feuchte weiter von w_h bis zur Sättigung w_s an. Das Feuchtegleichgewicht an der Schichtgrenze soll auch hier linearisiert werden

$$w_{k+1} = w_{h,k+1} + \frac{w_k - w_{hk}}{G_{k,k+1,üh}} \quad G_{k,k+1,üh} = \frac{w_{sk} - w_{hk}}{w_{s,k+1} - w_{h,k+1}} \quad (5)$$

Dahinter verbirgt sich die gleiche Form der Saugspannungskurve und eine gleichartige nur linear verschobene Porenradienverteilung der beiden Materialien.

Im Regelfall ist beim Anlegen des Klimasprungs in der potentiellen Kondensationsebene die Luftfeuchte ϕ noch kleiner als 1. Die Differenz aus ein- und austretender Dampfstromdichte wird dort zunächst hygroskopisch angelagert. Die dazu erforderliche Zeit wird als hygroskopische Aufladezeit t_h bezeichnet. Erst für $t \geq t_h$ beginnt die eigentliche Kondensation. Dieser Fall ist in Abbildung 12 dargestellt.

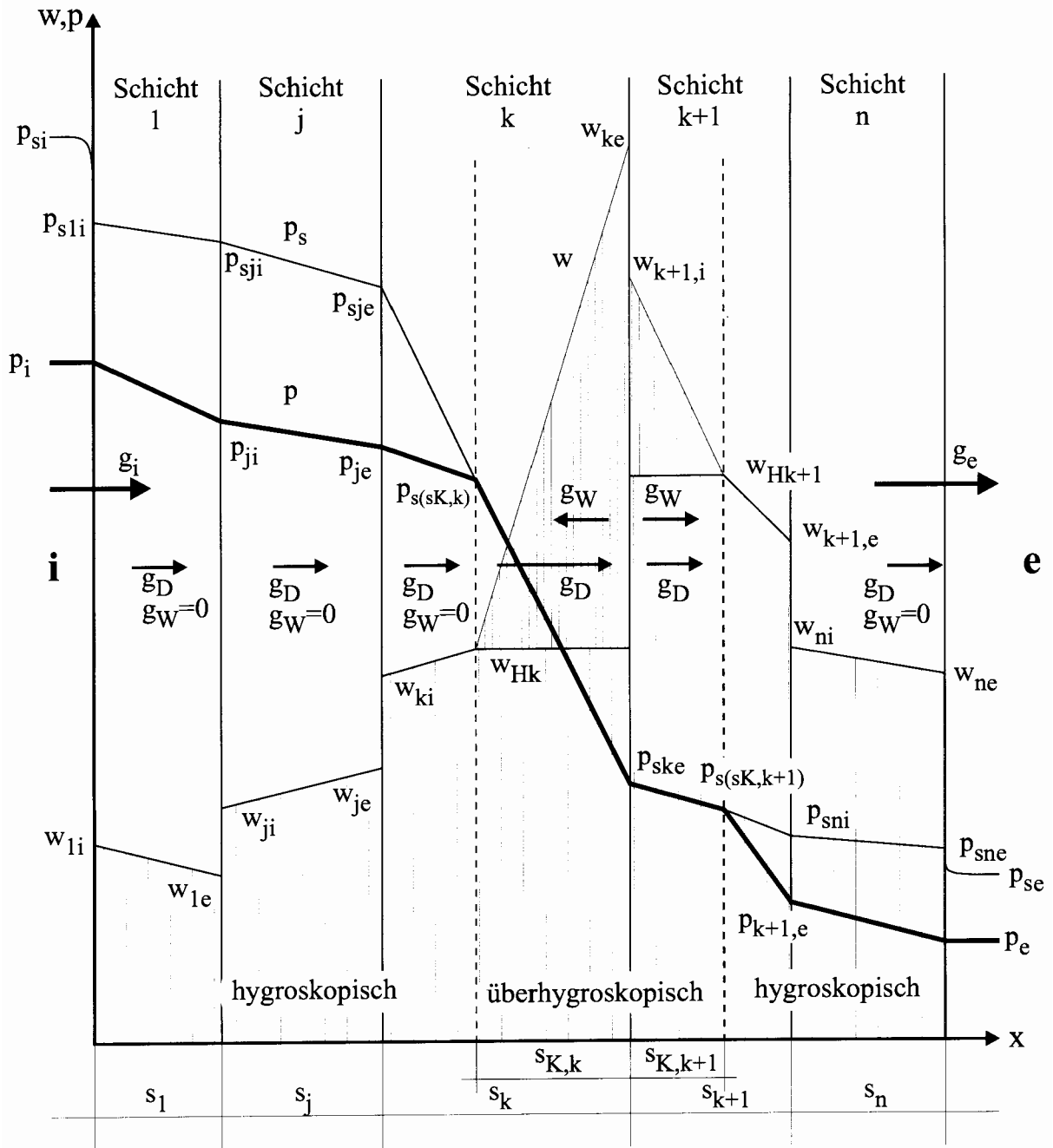


Abb. 12: Transportmodell für eine Konstruktion mit n Schichten
Fall1: Kondensatbildung in der k -ten und in der $(k+1)$ -ten Schicht

Für die Feuchtestromdichten in den inneren Schichten bis zur Kondensationsebene gilt

Schicht 1: $g_i = \frac{\Delta p_1}{r_{D1}}$ nur Dampftransport von innen nach außen (6)

Schicht 2: $g_i = \frac{\Delta p_2}{r_{D2}}$ nur Dampftransport von innen nach außen (7)

Schicht k: $g_i = \frac{\Delta p_{k1}}{r_{Dk} \left(1 - \frac{s_{Kk}}{s_k} \right)}$ nur Dampftransport im trockenen Teil der Schicht k (8)

$g_i = \frac{\Delta p_{k2}}{r_{Dk} \frac{s_{Kk}}{s_k}} - \frac{\Delta w_{ke}}{r_{wk} \frac{s_{Kk}}{s_k}}$ Dampftransport von innen nach außen, überlagert durch einen entgegengerichteten Kapillarwassertransport (9)

Aus Gleichungen (6) bis (9) folgt

$$\Delta p_1 = g_i r_{D1} \quad (10)$$

$$\Delta p_2 = g_i r_{D2} \quad (11)$$

$$\Delta p_{k1} = g_i r_{Dk} \left(1 - \frac{s_{Kk}}{s_k} \right) \quad (12)$$

$$\Delta p_{k2} = g_i r_{Dk} \frac{s_{Kk}}{s_k} + \frac{\Delta w_{ke}}{r_{wk}} r_{Dk} \quad (13)$$

Die Summe aus allen Wasserdampfdruckdifferenzen ergibt die Gesamtdruckdifferenz von innen bis zur Kondensationsebene

$$\Delta p_i = g_i (r_{D1} + r_{D2} + \dots r_{Dk}) + \frac{\Delta w_{ke} r_{Dk}}{r_{wk}}$$

oder die Feuchtestromdichte von innen zur K-Ebene lautet

$$g_i = \frac{\Delta p_i}{r_{Di}} - \frac{\Delta w_{ke}}{r_{wk}} \frac{r_{Dk}}{r_{Di}} \quad (14)$$

mit $r_{Di} = r_{D1} + r_{D2} + \dots r_{Dk}$, $g_{Di} = \frac{\Delta p_i}{r_{Di}}$ und $g_{wk} = \frac{\Delta w_{ke}}{r_{wk}}$

Die gleiche Betrachtung führt für die Schichten k+1 bis n, d. h. von der K-Ebene nach außen zu

$$g_e = \frac{\Delta p_e}{r_{De}} + \frac{\Delta w_{k+1,i}}{r_{w,k+1}} \frac{r_{D,k+1}}{r_{De}} \quad (15)$$

mit $r_{De} = r_{Dk} + \dots r_{Dn}$, $g_{De} = \frac{\Delta p_e}{r_{De}}$, $g_{w,k+1} = \frac{\Delta w_{k+1,i}}{r_{w,k+1}}$

Der eindringende Dampfstrom g_{Di} wird also durch den Kapillarwasserstrom abgeschwächt, der nach außen gehende Dampfstrom g_{De} durch den Kapillarwasserstrom verstärkt.

Im Gleichgewichtszustand stimmen g_i und g_e überein ($g_i = g_e = g$). Außerdem wird ein einfaches Saugspannungsgleichgewicht zwischen den Schichten k und $k+1$ angenommen

$$\frac{\Delta w_{ke}}{\Delta w_{k+1,i}} = \frac{w_{sk} - w_{hk}}{w_{s,k+1} - w_{h,k+1}} = G_{k,k+1} \quad (16)$$

Damit folgt aus (3.14), (3.15) und (3.16), wenn man Δw_{ke} zunächst eliminiert, für die Gesamtfeuchtestromdichte im Gleichgewichtszustand als eine Art Basisgröße des vereinfachten Modells

$$g = \frac{g_{Di} r_{wk} \frac{r_{Di}}{r_{Dk}} + g_{De} r_{w,k+1} \frac{r_{De}}{r_{D,k+1}} G_{k,k+1}}{r_{wk} \frac{r_{Di}}{r_{Dk}} + r_{w,k+1} \frac{r_{De}}{r_{D,k+1}} G_{k,k+1}} \quad (17)$$

Der Gesamtfeuchtestrom g ist ein mit den kombinierten Dampf- und Kapillarwasserwiderständen gewichteter Mittelwert aus g_{Di} und g_{De} . Da g_{Di} und g_{De} vom Glaserverfahren her bekannt sind, läßt sich dieser Wert ohne Mühe bestimmen. Daraus folgen auch sofort die Höhen der überhygroskopischen Durchfeuchtung in den Schichten k und $k+1$.

$$\Delta w_{ke} = w_{ke} - w_{hk} = (g_{Di} - g) r_{wk} \frac{r_{Di}}{r_{Dk}} \quad (18)$$

$$\Delta w_{k+1,i} = w_{k+1,i} - w_{h,k+1} = (g_{Di} - g) \frac{r_{wk}}{G_{k,k+1}} \frac{r_{Di}}{r_{Dk}} \quad (19)$$

Außerdem läßt sich aus dem Transportschema Abb. 12 für die Breiten der überhygroskopisch durchfeuchteten Zonen in den Schichten k und $k+1$ ablesen

$$\frac{\Delta p_{sk}}{s_k} = \frac{\Delta p_{k2}}{s_{Kk}} \quad (20)$$

Mit Δp_{k2} aus (13) folgt

$$\Delta p_{sk} = g r_{Dk} + \frac{\Delta w_{ke}}{r_{wk}} \frac{r_{Dk} s_k}{s_{Kk}} = g r_{Dk} + (g_{Di} - g) r_{Di} \frac{s_k}{s_{Kk}}$$

bzw.

$$s_{Kk} = \frac{(g_{Di} - g) r_{Di}}{\frac{\Delta p_{sk}}{r_{Dk}} - g} s_k \quad (21)$$

Entsprechend ergibt sich für

$$s_{K,k+1} = \frac{g - g_{De}}{g - \frac{\Delta p_{s,k+1}}{r_{D,k+1}}} \frac{r_{De}}{r_{D,k+1}} s_{k+1} \quad (22)$$

mit $\Delta p_{s,k+1} = p_{ske} - p_{s,k+1,i}$.

Die Kondensatmengen können aus Δw_k bzw. Δw_{k+1} und s_{Kk} bzw. $s_{K,k+1}$ berechnet werden.

$$\frac{m_{Kk}}{A} = \rho_w \frac{\Delta w_{ke} s_{Kk}}{2} \quad (23)$$

$$\frac{m_{K,k+1}}{A} = \rho_w \frac{\Delta w_{k+1,i} s_{K,k+1}}{2} \quad (24)$$

Alle ermittelten Werte gelten für den Gleichgewichtszustand, also für eine unendlich lange Zeit nach Anlegen des Klimasprunges. Nach dem Glasermodell ergibt sich für $t \rightarrow \infty$ immer auch die sinnlose Kondensatmenge $m_k \rightarrow \infty$. Die Aufladung für $t < \infty$ erfolgt nach einem Exponentialgesetz. Für eine endliche Belastungszeit t lautet die Bilanzgleichung:

In die Konstruktion fließende Feuchtestromdichte

$$g_i = \frac{\Delta p_i}{r_{Di}} - \frac{\Delta w_{ke}(t)}{r_{wk}} \frac{r_{Dk}}{r_{Di}} \quad (25)$$

vermindert um die aus der Konstruktion austretende Feuchtestromdichte

$$g_e = \frac{\Delta p_e}{r_{De}} + \frac{\Delta w_{ke}(t)}{G_{k,k+1} r_{w,k+1}} \frac{r_{D,k+1}}{r_{De}} \quad (26)$$

ergibt die gespeicherte Feuchtemenge

$$\frac{\dot{m}_K(t)}{A} = \frac{\dot{m}_{Kk}(t)}{A} + \frac{\dot{m}_{K,k+1}(t)}{A} = \frac{\rho_w}{2} \Delta \dot{w}_{ke}(t) \left[s_{Kk} + \frac{s_{K,k+1}}{G_{k,k+1}} \right] \quad (27)$$

$$g_{Di} - \frac{\Delta w_{ke}(t)}{r_{wk}} \frac{r_{Dk}}{r_{Di}} - g_{De} - \frac{\Delta w_{ke}(t)}{G_{k,k+1} r_{w,k+1}} \frac{r_{D,k+1}}{r_{De}} = \frac{\rho_w}{2} \Delta \dot{w}_{ke}(t) \left[s_{Kk} + \frac{s_{K,k+1}}{G_{k,k+1}} \right] \quad (28)$$

Die einfache Differentialgleichung (28) hat als Lösung eine Exponentialfunktion für $\Delta w_{ke}(t)$, vorausgesetzt, die Breiten der durchfeuchteten Zonen bleiben konstant.

$$\Delta w_{ke}(t) = \Delta w_{ke} \left(1 - \exp \left(-3 \frac{t}{t_{üh}} \right) \right) \quad (29)$$

mit der Einstellzeit $t_{üh}$ (95% des Endwertes sind erreicht) für die überhygroskopische Feuchte

$$t_{üh} = 3 \frac{m_{Kk} + m_{K,k+1}}{A(g_{Di} - g_{De})} \quad (30)$$

Das gleiche Zeitgesetz ergibt sich für die Zunahme der Kondensationsfeuchte $m_K(t)$

$$m_K(t) = m_K \left(1 - \exp \left(-3 \frac{t}{t_{üh}} \right) \right) \quad (31)$$

mit $m_K = m_{Kk} + m_{K,k+1}$. Die Kondensatmenge sollte unter 1 kg/m^2 bleiben.

Entwickelt man die Gleichung (24) für kleine Kondensationszeiten $t \ll t_{üh}$, folgt für $m_K(t)$

$$m_K(t) = m_K \cdot 3 \frac{t}{t_{üh}} = (g_{Di} - g_{De}) t \quad (32)$$

Das ist aber wieder die einfache Massenzunahme nach Glaser, wie sie in der DIN 4108-3 bzw. der EN ISO 13788 benutzt wird.

3.3 Beispiel

Fall 1: Eine Kondensationsebene in einer sechsschichtigen Konstruktion

Der Berechnungsalgorithmus des Abschnittes 3.2 wird als MATHCAD Programm formuliert und auf die folgende Konstruktion, ein Mauerwerk mit nachträglicher Innendämmung, angewendet.

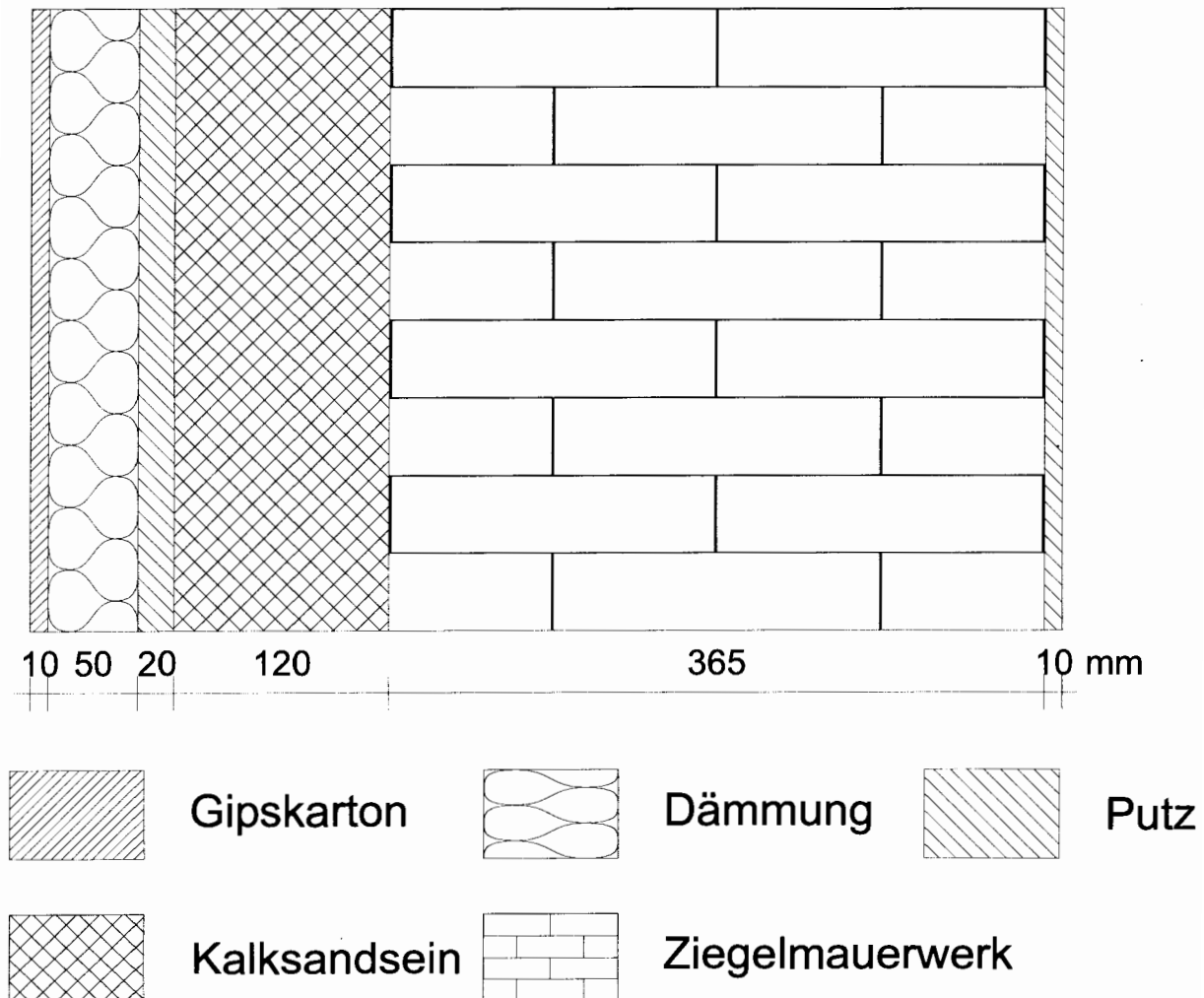


Abb. 13 Wandaufbau zur Berechnung des Feuchteprofils

Die einzelnen Rechenschritte befinden sich in [11], hier werden lediglich das Eingabeblatt S. 17 und das Ergebnisblatt S. 18 sowie das Feuchteprofil mitgeteilt.

Die Kondensation beginnt nach etwa eine Woche hygroskopischer Feuchteanlagerung. Am Ende der winterlichen Kondensationsperiode haben sich ca. $0,65 \text{ kg/m}^2$ Kondensat gebildet. Diese Menge trocknet beim Anliegen der sommerlichen Randbedingungen innerhalb 12 Tagen wieder aus. Zum Vergleich liefert das Glaser-schema eine winterliche Kondensatmenge von $2,6 \text{ kg/m}^2$!

FEUCHTEVERHALTEN VON UMFASSUNGSKONSTRUKTIONEN

Dampftransportschema unter Berücksichtigung des Kapillarwasserttransportes und der Hygroskopizität

ERFORDERLICHE MATERIALKENNWERTE

Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK

Dampfleitfähigkeit $1/\mu$ in 1

Kapillarwasserleitfähigkeit k konstant(wird aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten ermittelt) in m^2/s

Maximale hygroskopische Feuchte wh in m^3/m^3

Sättigungsfeuchte ws in m^3/m^3

FALL 1 1 KONDENSATIONSEBENE

Beispiel

6-SCHICHTIGE KONSTRUKTION

Kondensatebene zwischen 2/3

Schicht 1 : trocken
Ebene 1/2 : trocken
Schicht 2 : teilweise durchfeuchtet
Ebene 2/3 : feucht
Schicht 3 : teilweise durchfeuchtet
Ebene 3/4 : trocken
Schicht 4 : trocken
Ebene 4/5 : trocken
Schicht 5 : trocken
Schicht 5/6 : trocken
Schicht 6 : trocken

EINGABE : BLOCKKLIMA 3 MONATE WINTER

Raumklima Winter
T in °C, ϕ in %, p in Pa

Anfangsluft-
feuchte in der
Ebene 2/3

Aussenklima Winter,
T in °C, ϕ in %, p in Pa

$$T_i := 20$$

$$T_e := -5$$

$$\phi_i := \frac{50}{100}$$

$$\phi_o := \frac{98}{100}$$

$$\phi_e := \frac{80}{100}$$

$$psi := 288.68 \left(1.098 + \frac{T_i}{100} \right)^{8.02}$$

$$pse := 4.689 \left(1.486 + \frac{T_e}{100} \right)^{12.3}$$

$$psi = 2338.19$$

$$pse = 401.86$$

$$pi := \phi_i \cdot psi$$

$$pe := \phi_e \cdot pse$$

$$pi = 1169.09$$

$$pe = 321.49$$

EINGABE : SCHICHTDICKEN, MATERIALEIGENSCHAFTEN

s in m, μ in 1, κ in m^2/s , λ in W/mK, wh in m^3/m^3 , ws in m^3/m^3

Schicht 1		$s1 := 0.01$		$\mu1 := 17$		$k1 := 1 \cdot 10^{-10}$		$\lambda1 := 0.34$		$wh1 := 0.01$		$ws1 := 0.40$
Schicht 2		$s2 := 0.05$		$\mu2 := 1$		$k2 := 1 \cdot 10^{-9}$		$\lambda2 := 0.04$		$wh2 := 0.005$		$ws2 := 0.80$
Schicht 3		$s3 := 0.02$		$\mu3 := 30$		$k3 := 5 \cdot 10^{-12}$		$\lambda3 := 0.95$		$wh3 := 0.03$		$ws3 := 0.30$
Schicht 4		$s4 := 0.12$		$\mu4 := 10$		$k4 := 3 \cdot 10^{-10}$		$\lambda4 := 1.25$		$wh4 := 0.08$		$ws4 := 0.30$
Schicht 5		$s5 := 0.365$		$\mu5 := 8$		$k5 := 6 \cdot 10^{-10}$		$\lambda5 := 0.75$		$wh5 := 0.01$		$ws5 := 0.30$
Schicht 6		$s6 := 0.01$		$\mu6 := 7$		$k6 := 1 \cdot 10^{-10}$		$\lambda6 := 0.95$		$wh6 := 0.02$		$ws6 := 0.40$

ZUSAMMENSTELLUNG DER ERGEBNISSE

SCHICHT	TEMPERATUR in °C	DAMPFDRUCK in Pa	FEUCHTE- WERT in m³/m³	BREITE DER FEUCHTZONE in m	KONDENSAT MENGE in kg/m²
Innere Oberfläche	$T_{oi} = 18.43$	$p_i = 1169.09$	$w_{oi} = 0.01$		
Schicht 1					
$s_1 = 0.01$		$p_{s1} = 2120.12$	$w_{h1} = 0.01$	$sK_1 := 0$	$mK_1 = 0.00$
$\lambda_1 = 0.34$					
$\mu_1 = 17.00$			$w_{le} = 0.01$		
$k_1 = 1.00 \times 10^{-10}$					
Schicht 2	$T_{12} = 18.07$	$p_{12} = 1153.02$	$w_{2i} = 0.00$		
		$p_{s12} = 2073.33$			
$s_2 = 0.05$			$w_{h2} = 0.01$		
$\lambda_2 = 0.04$					
$\mu_2 = 1.00$			$w_{2e} = 0.08$	$sK_2 = 0.015$	$mK_2(90) = 0.532$
$k_2 = 1.00 \times 10^{-9}$			$w_{2et(90)} = 0.08$		
Schicht 3	$T_{23} = 2.93$	$p_{s23} = 754.47$	$w_{3it(90)} = 0.05$		
$s_3 = 0.02$			$w_{3i} = 0.05$		
$\lambda_3 = 0.95$			$w_{h3} = 0.03$	$sK_3 = 0.009$	$mK_3(90) = 0.112$
$\mu_3 = 30.00$			$w_{3e} = 0.03$		
$k_3 = 5.00 \times 10^{-12}$					
Schicht 4	$T_{34} = 2.67$	$p_{s34} = 740.89$	$w_{4it(90)} = 0.09$		
$s_4 = 0.12$			$w_{4i} = 0.08$		
$\lambda_4 = 1.25$			$w_{h4} = 0.08$	$sK_4 = 0.0000$	$mK_4 = 0.00$
$\mu_4 = 10.00$			$w_{4e} = 0.07$		
$k_4 = 3.00 \times 10^{-10}$					
Schicht 5	$T_{45} = 1.51$	$p_{s45} = 681.63$	$w_{5i} = 0.01$		
$s_5 = 0.36$			$w_{h5} = 0.01$	$sK_5 = 0.00$	$mK_5 = 0.00$
$\lambda_5 = 0.75$			$w_{5e} = 0.01$		
$\mu_5 = 8.00$					
$k_5 = 6.00 \times 10^{-10}$					
Schicht 6	$T_{56} = -4.39$	$p_{s56} = 328.11$	$w_{6i} = 0.02$		
		$p_{s56} = 423.45$			
$s_6 = 0.01$					
$\lambda_6 = 0.95$			$w_{h6} = 0.02$	$sK_6 := 0$	$mK_6 = 0.00$
$\mu_6 = 7.00$					
$k_6 = 1.00 \times 10^{-10}$		$p_{soe} = 418.87$			
Äussere Oberfläche	$T_{oe} = -4.52$	$p_e = 321.49$	$w_{oe} = 0.02$		
U-WERT in W/m²K	KONDENSATIONSBEGINN nach $t = t_{hd}$, t_{hd} in Tagen KONDENSATMENGE am Ende der Kondensationsperiode in kg/m² KONDENSATMENGE nach $t = \infty$ in kg/m² TROCKNUNGSZEIT t_{evd} in Tagen				$t_{hd} = 6.7$ $mK_t(90) = 0.644$ $mK = 0.661$ $t_{evd} = 11.4$
$U = 0.485$					

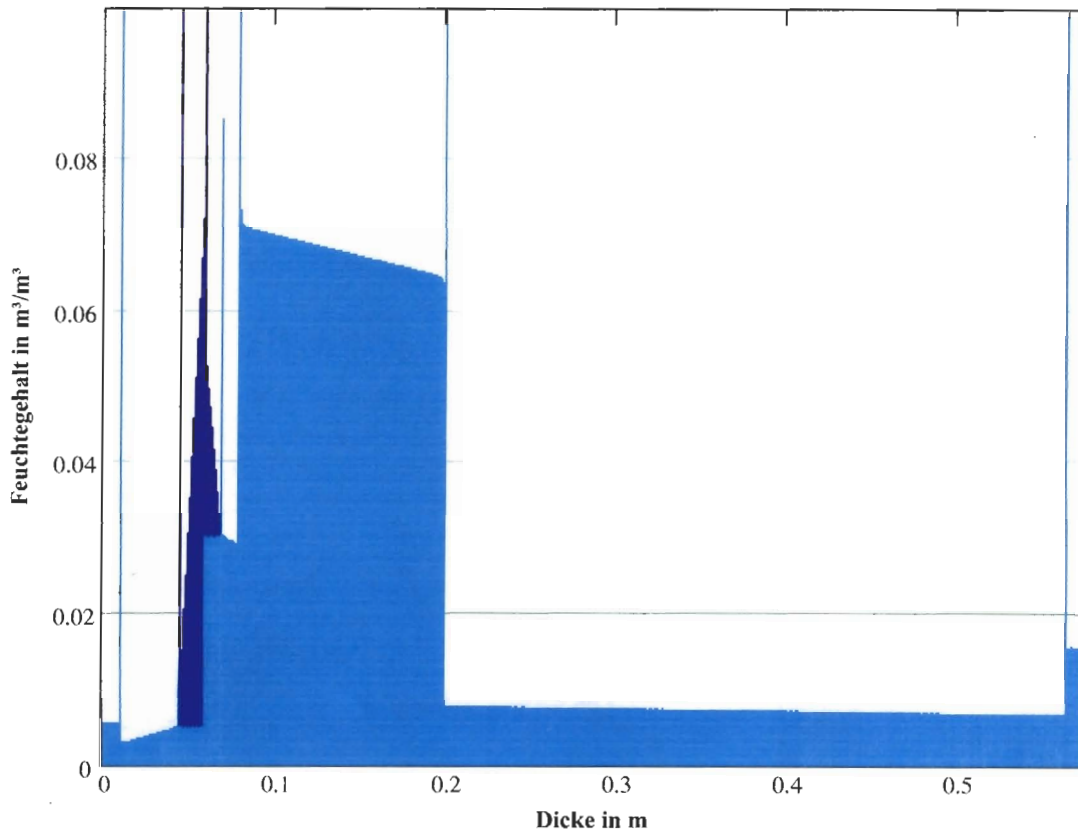


Abb. 14 Feuchteverteilung in der Außenwandkonstruktion mit einer Kondensatebene am Ende der Kondensationsperiode (Kondensatebene zwischen den Schichten 2 und 3)

3.4 Validierung der Ergebnisse mittels numerischer Simulationsverfahren - Computer Code DIM 3.1 -

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit soll nur für die Konstruktion in Abb. 13 die Validierung vorgenommen werden. Zunächst werden das vereinfachte Blockklima, die Schichtdicken und Materialkennwerte in den exakten Computercode DIM 3.1 eingegeben und die integrale Befeuchtung und Trocknung sowie das Feuchteprofil am Ende der winterlichen Kondensationsperiode berechnet. Der Aufladevorgang bis zum Kondensatwert von $0,64 \text{ kg/m}^2$ in den vereinbarten 90 Tagen wird durch die genaue Rechnung recht gut bestätigt (Abb. 15). Abbildung 16 zeigt die genaue Berechnung der Befeuchtungs- und Trocknungsphase. Die Trocknungszeit von etwa 2 Wochen beim Anlegen des sommerlichen Sprungklimas wird ebenfalls bestätigt. Das Feuchteprofil am Ende der Kondensationsperiode, Abb. 14, stimmt aber nur in etwa mit der Näherungsrechnung überein (vergleiche Abb. 14). Die Höhe der überhygroskopischen Durchfeuchtung in der Dämmschicht 2 ist etwas niedriger, dafür die Breite der Durchfeuchtungszone größer als nach dem Näherungsmodell.

Beinahe gleiche Ergebnisse zeigen auch die COND-Rechnungen: $0,68 \text{ kg/m}^2$ Kondensat nach 90 Tagen Winter (* in Tabelle 4) und eine ähnliche Feuchteverteilung. Da die COND-Tabelle 4 auch die Ergebnisse nach dem einfachen Glaserschema enthält – $2,24 \text{ kg/m}^2$ Kondensat (**) – wird jetzt der Einfluss der kapillaren Leitfähigkeit der Baustoffe, hier besonders der innenliegenden Dämmschicht, sichtbar. Das bestätigen auch die genauen Rechnungen nach DIM 3.1, wenn dort die kapillaren Leitfähigkeiten abgeschaltet werden (Abb. 19). Die Kondensatmenge steigt im Winter linear auf $2,40 \text{ kg/m}^2$ an und trocknet im Sommer innerhalb von 60 Tagen zurück.

Außerdem werden alle Rechnungen mit dem Programm DIM 3.1 für das EURO-Klima (Monatsmittelwerte [2]) durchgeführt. Die maximale integrale Menge beträgt $0,56 \text{ kg/m}^2$ und wird am 28. Februar erreicht (siehe Abb. 20). Ohne Kapillarkräfte wird die Dämmschicht bis zur Sättigung $w_s = 80 \text{ Vol\%}$ durchfeuchtet, und die integrale überhygroskopische Feuchtemenge steigt auf indiskutable $2,26 \text{ kg/m}^2$. Das ist genau der Wert, der auch nach der EN ISO 13788 ermittelt wird. Es zeigt sich noch einmal, dass bei Vernachlässigung der Kapillarkräfte der porigen Bau- und Dämmstoffe das Glaserschema falsche Werte liefert und Reserven verschenkt.

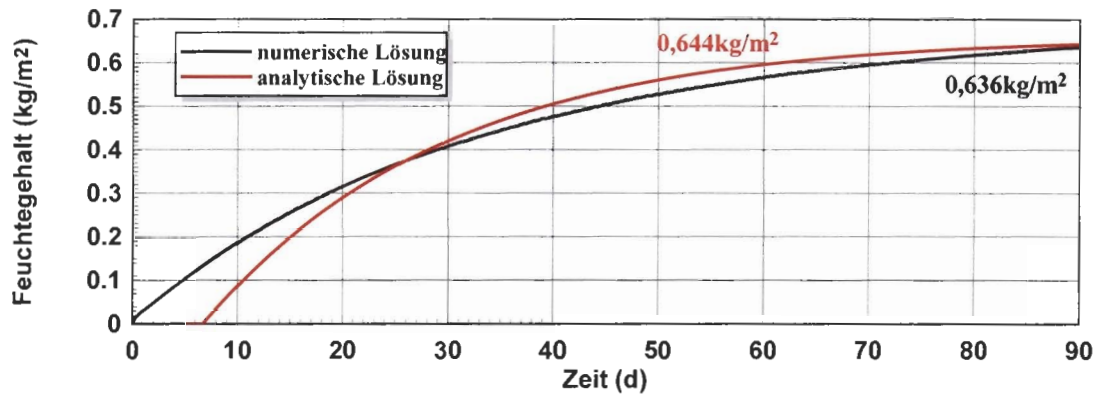


Abb. 15: Vergleich der numerisch berechneten (DIM 3.1) mit der analytisch berechneten Zunahme der Kondensatmenge während der Kondensationsperiode

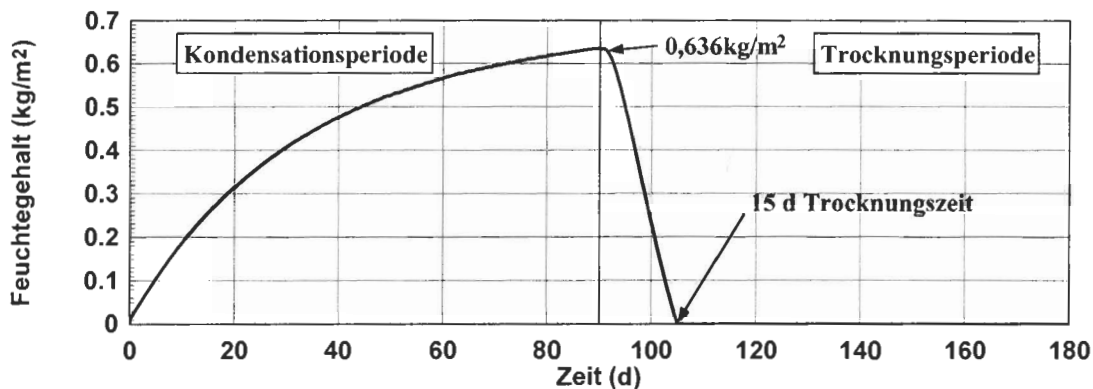


Abb. 16: Zunahme der Kondensatmenge während der Kondensationsperiode und die nachfolgende Austrocknung in der Trocknungsperiode

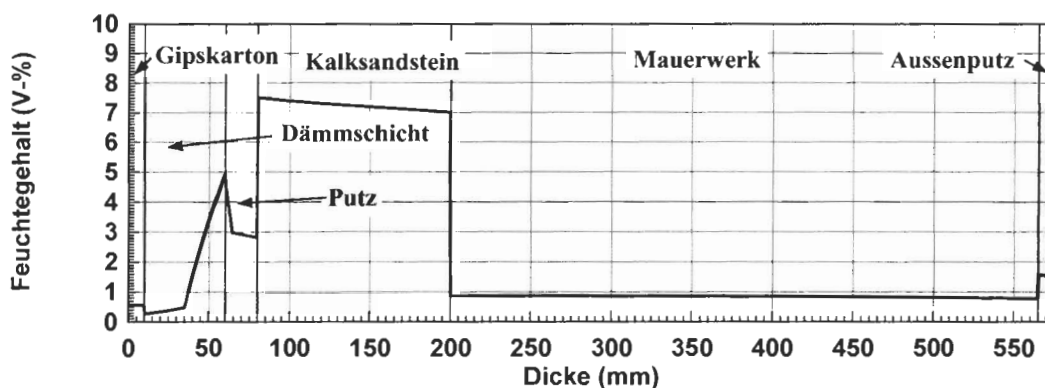


Abb. 17: Feuchteprofil am Ende der Kondensationsperiode

JUMP CLIMATE									
10/ 1/2001		Eingabewerte			Programm COND V ISO				
Lufttemperatur i= 20.0 °C e= -5.0 °C		relative Luftfeuchte i= 50.0 % e= 80.0 %		Übergangswiderstand i= 0.13 m²K/W e= 0.04 m²K/W					
Material	Breite (mm)	wh (Vol%)	ws (Vol%)	K (m²/s)	μ (-)	wv Vol%	λ W/mK		
gypsum board	10	1.0	40.0	1.0E-09	19*19	1.95	0.340		
mineral wool	50	0.50	80.0	3.0E-08	1.2*1.2	0.33	0.040		
plaster	20	3.0	30.0	4.0E-10	35*35	2.60	0.950		
lime sand stone	120	8.0	30.0	2.0E-09	14*14	4.55	1.250		
brickwall	365	1.0	30.0	5.0E-09	5.9*5.0	0.65	0.750		
plaster	10	2.0	40.0	1.0E-10	9.0*9.0	1.95	0.950		
Algorithmus 1 Kondensat in der 2. und 3. Schicht									
t= 90.0 d		Ergebnisse				Iterat.: 1			
Schicht	Temp. °C	Ps Pa	P Pa	*R Rvorh m²K/W	wi we Vol%	Breite sk mm	Feuchtemengen kg/m²		
Luft innen	20.0	2337	1168	0.130					
gypsum board	18.4	2119	1168		0.3		h 0.0329		
[1] 10 mm				*0.029 0.032	0.3	-	ü 0		
mineral wool	18.1	2072	1136		0.2		Σ 0.0329		
[2] 50 mm				*1.250 1.141	6.7	14	h 0.1704		
plaster	2.9	754	754		5.1		ü 0.5968		
[3] 20 mm				*0.021 0.021	2.3	5.7	Σ 0.7673		
lime sand stone	2.7	740	697		6.1		h 0.5311		
[4] 120 mm				*0.096 0.094	4.1	-	ü 0.0798		
brickwall	1.5	681	523		0.5		Σ 0.6109		
[5] 365 mm				*0.487 0.489	0.5	-	h 1.9037		
plaster	-4.4	423	331		1.1		ü 0		
[6] 10 mm				*0.011 0.011	1.0	-	Σ 1.9037		
Luft außen	-5.0	402	321	0.040			h 0.1046		
» E Wärmewiderstände R				1.894	E hygrosk. Feuchte		h 8.4743		
E vorh. Wärmewiderstände Rvorh				1.788	E üb. hygr. Feuchte		ü 0.6766		
Wärmedurchgangswert U (W/m²K)				0.485	E Gesamt- Feuchte		Σ 9.1509		
Gesamtstromdichte				Werte nach Glaser					
innen: Gi= 1.13E-4 kg/m²h				Kondensat					
außen: Ge= 6.97E-5 kg/m²h				Verd. Wand (90 Tage) : Wt= 2.2416 kg/m²					
Einstellzeit τ = 59 Tage				Verd. Dach (90 Tage) : Wv= 2.8616 kg/m²					
				Ti=18°C RH=60% Te=15°C RHe=70% Tk=15°C					
				Ti=18°C RH=60% Te=15°C RHe=70% Tk=18°C					

Tabelle 4: Ergebnistabelle des Programmes COND

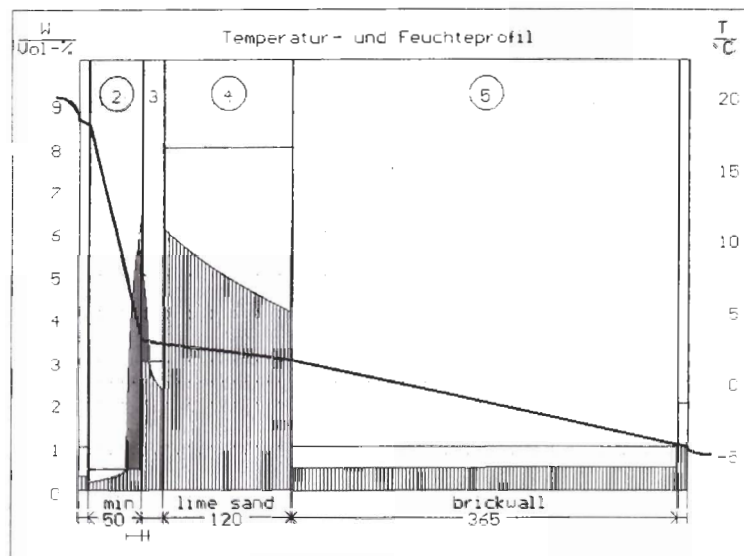


Abb. 18: Feuchteprofil am Ende der Kondensationsperiode nach COND

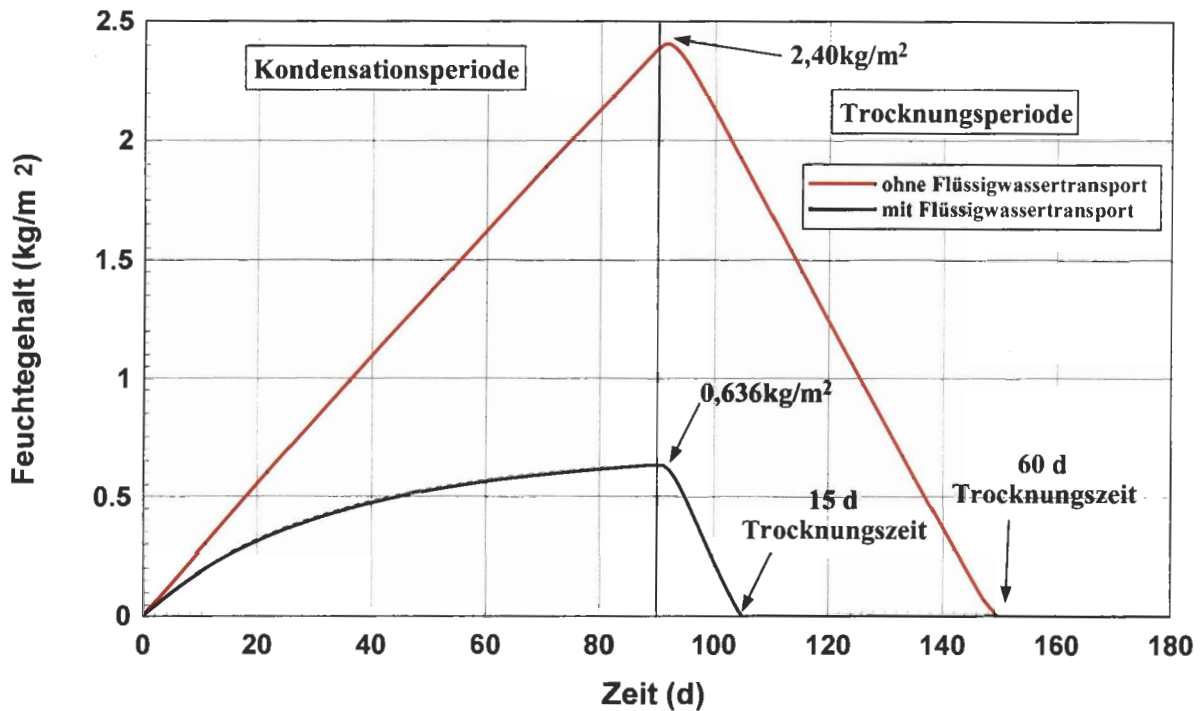


Abb. 19: Zunahme der Kondensatmenge während der Kondensationsperiode sowie Austrocknung während der Trocknungsperiode, Vergleich der numerischen Berechnungen mit und ohne Kapillarwassertransport

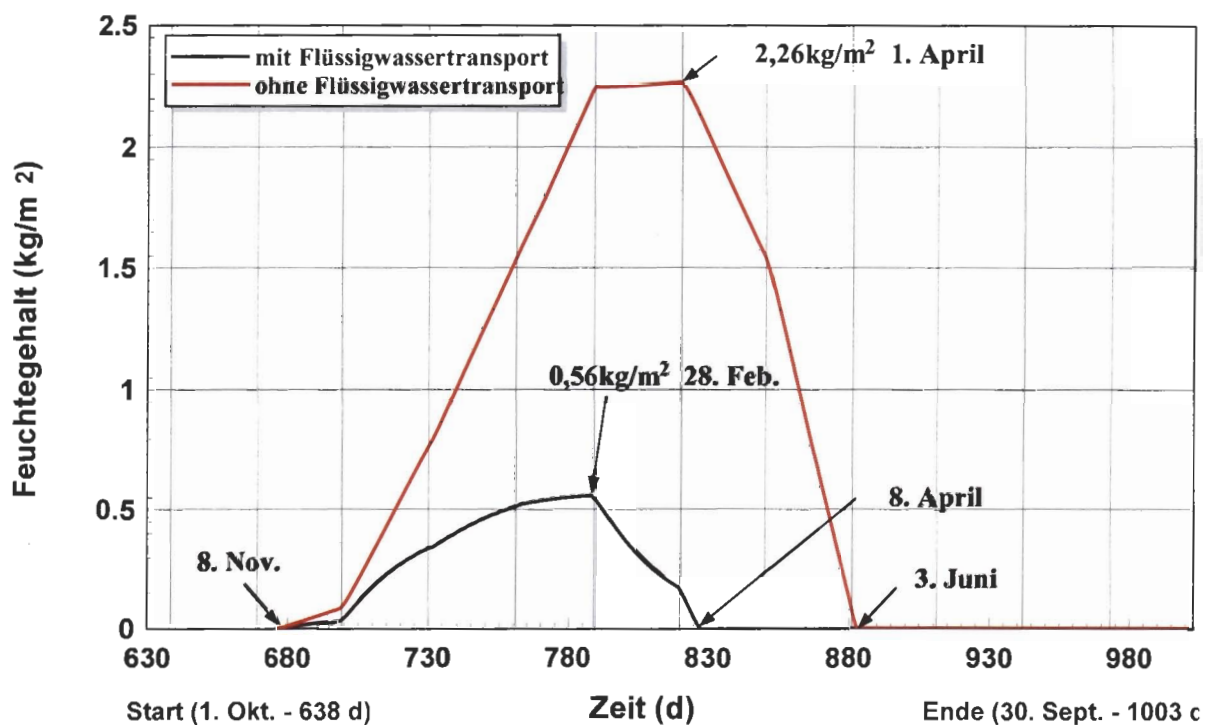


Abb. 20: Kondensatmenge im Verlauf des zweiten Jahres, Vergleich der numerischen Berechnungen mit und ohne Kapillarwassertransport)
Klima innen und außen: Monatsmittelwerte nach EN ISO 13788

4. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen, Ausblick

Im Rahmen der Neufassung der bauphysikalischen Standards DIN 4108 sind auch die Nachweis- und Rechenverfahren zum "Bautechnischen Feuchteschutz" DIN 4108-3 zu überarbeiten. Handlungsbedarf besteht auch deshalb, weil die EN ISO 13788 "Berechnungsverfahren zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren" in die DIN 4108-3 übernommen werden muss.

Um kurzfristig Planungssicherheit zu erreichen, wird vorgeschlagen – wenn schon das Wasserdampfdiffusionsmodell nach Glaser vorerst beibehalten werden soll – das Monatsmittelverfahren der EN ISO 13788 durch ein geeignetes Blockklima (3 Monate Winter: $\theta_e = -5^\circ\text{C}$, $\varphi_e = 80\%$, $\theta_i = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_i = 50\%$, 3 Monate Sommer: $\theta_e = 15^\circ\text{C}$, $\varphi_e = 70\%$, $\theta_i = 18^\circ\text{C}$, $\varphi_i = 60\%$) zu ersetzen. Die EN ISO 13788 enthält einige Freiheiten, Lücken und Fehler, die ein solches Vorgehen ohne Verletzung der EU-Normungsrichtlinien erlauben. Dadurch kann zum einen ein zwölfmaliges Anwenden des unzulänglichen Glasermodells mit monatlich wechselnden Kondensatebenen vermieden und zum anderen die offensichtlichen Fehler in der bisherigen deutschen Norm bei der Warmdachberechnung ausgeräumt werden.

Das Glasersche Dampfdiffusionsmodell vernachlässigt die kapillare Saugfähigkeit und Hygroskopizität der Baustoffe. Die langjährigen Untersuchungen der Bearbeiter zur physikalischen Modellierung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes, der Entwicklung von Simulationssoftware und der Vergleich von Mess- und Rechenergebnissen an zahlreichen Testhäusern zeigen jedoch, dass auch diese Größen in ein einfaches Rechenverfahren zur Quantifizierung der inneren Kondensatbildung (und auch anderer, in diesem Beitrag nicht angesprochenen Feuchtebelastungen) erforderlich sind. Im Beitrag wird hierzu ein einfacher Algorithmus vorgestellt. Dieses Verfahren wird im Forschungsbericht [11] an zahlreichen Beispielen erläutert, vertieft und durch eine Handsoftware unterstützt.

So ergibt sich für die im Beitrag ausgewählte Konstruktion mit nachträglicher Innendämmung ohne Dampfbremse (Gipskarton, dampfdurchlässige Dämmschicht, Putz, Kalksandstein, Ziegelmauerwerk, Außenputz) die Glaserrechnung nach DIN 4108-3 beim Anlegen der neuen Blockklimawerte oder nach EN ISO 13788 eine Kondensatmenge von $2,4 \text{ kg/m}^2$. Die Konstruktion erfüllt demnach das übliche Kriterium von maximal 1 kg/m^2 Kondensat nicht. Wie jedoch die Nachweisrechnungen mit Berücksichtigung der kapillaren Saugfähigkeit und der Hygroskopizität für die gleichen Klimawerte zeigen, kann die Tauwassermenge in der Konstruktion bei Benutzung eines kapillaraktiven Dämmstoffes (z.B. faserdotiertes Calciumsilikat) auf $0,6 \text{ kg/m}^2$ entspannt werden.

Auch für den Fall, dass sich mehrere hintereinander liegende oder durch ein trockenes Gebiet getrennte Kondensationsebenen bilden, sind die kapillare Saugfähigkeit und die Hygroskopizität der Baustoffe in das Glasermodell eingebaut worden. Der Rechenaufwand vergrößert sich dann zwar etwas, gemessen an anderen bauphysikalischen Standards bleibt er dennoch in vertretbaren Grenzen.

Alle Beispiele werden mit dem genauen numerischen Simulationsverfahren DIM für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Lufttransport validiert, so dass für den Feuchteschutznachweis an Umfassungskonstruktionen von Gebäuden ein genaueres Bemessungsverfahren vorliegt.

Literatur

- [1] DIN 4108-3 Entwurf 2000
Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden
Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen und Hinweise
für Planung und Ausführung
- [2] EN ISO 13788 Schlusssentwurf 2000
Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und
Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren
- [3] Häupl, P., Stopp, H.
Feuchtetransport in Baustoffen und Bauwerksteilen
Diss. B, 1986, TU Dresden
- [4] Grunewald, J.
Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen
Baustoffen
Diss., 1996, TU Dresden
- [5] Fechner, H. Häupl, P., Martin, R., Neue, J., Petzold, H.
Thermische Sanierung von Fachwerkbauten mittels Innendämmung
Dresdener Bauklimatische Hefte, Heft 5, 1998
- [6] Häupl, P., Grunewald, J., Fechner, H. Jurk, K., Martin, R.
Hygrisch motivierter Wärmeschutz - Thermische Sanierung eines
Gründerzeithauses mit einer kapillaraktiven Calciumsilikatinnendämmung
Abschlußbericht zum BMBF-Projekt 0329663A, 1999
- [7] Häupl, P., Stopp, H., Strangfeld, P.
Feuchteatlas für Außenwandkonstruktionen
Rudolf Müller Verlag, Köln, 1990
- [8] DIN EN ISO 15148
Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen, Entwurf 1996
- [9] Häupl, P., Fechner, H., Neue, J., Stopp, H.
Bestimmung der Parameter der Kapillarwasserleitfähigkeit aus dem
Wasseraufnahmekoeffizienten
10. Bauklimatisches Symposium, Band 2, S. 483 – 494, TU Dresden, 1999
- [10] DIN EN ISO 12571
Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften
von Baustoffen, Entwurf 1999
- [11] Häupl, P., Fechner, H., Stopp, H.
Erarbeitung eines Verfahrens und einer Planungsrichtlinie zur hygrischen Bemessung
von Außenbauteilen
Abschlußbericht für das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung,
Projekt-Nr. 85 34 – 80 01 99 – 12, TU Dresden, April 2000