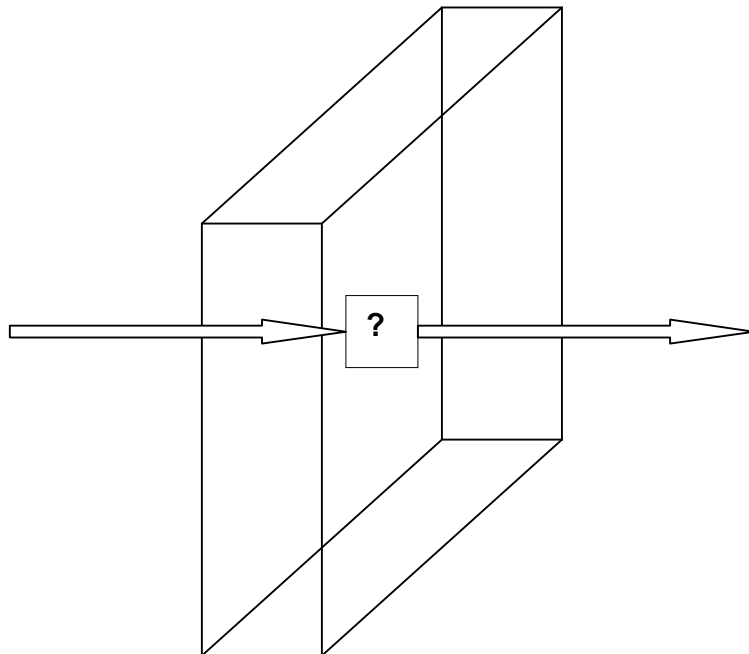


Kapillarität geometrisch-analytische Überlegungen zur Modellbildung

Bekanntlich folgt die Diffusion dem Dampfdruckgefälle; im Sommer ist dies nach innen gerichtet, woraus sich erklärt, dass ein Gebäude im Sommer feucht wird und im Winter der Trocknungsprozess stattfindet. Bezüglich der Sorptionsprozesse in einer Außenwand ist den bisherigen Ausführungen zu entnehmen, dass keiner vorhersagen kann, ob denn nun an einer bestimmten Stelle zu einer bestimmten Zeit eher Wasserdampf oder eher Flüssigkeit anliegt. Dazu finden Kondensations- und Verdampfungsprozesse örtlich versetzt gleichzeitig statt, es kann zu gegen gerichteten Diffusions- und Kapillarströmen kommen.

Kapillarität ist Wassertransport durch ein poröses Material, wobei es sich um Wasser in flüssiger Form handelt (im Gegensatz zur Dampfform in der Luft). Genügt der Ansatz, die Kapillarität eines Stoffes mit der Transportgeschwindigkeit [m/s] anzugeben? Welche Faktoren spielen eine Rolle und welchen Einfluss hat die Geometrie?

Die kapillare Transportrichtung geht von innen nach außen oder umgekehrt von außen nach innen. Diese Aussage erscheint auf den ersten Blick furchtbar trivial, jedoch führt sie uns zu der Frage, welche Faktoren darauf Einfluss auf die Gerichtetheit haben. Denn letztendlich ist auch hier das Einem-Gefälle-Folgen die Triebfeder.



Innenraum	Außenwand	Umgebung
Volumen	Dicke	offenes System
Hüllflächen	Oberfläche	
Raumlufttemperatur	Oberflächentemperatur	Außenlufttemperatur
	Temperaturprofil	
rLF innen	Feuchteprofil	rLF außen
Dampfdruck innen	Dampfdruckprofil	Dampfdruck außen
Luftdruck innen	Luft im Porenraum	Luftdruck außen
Konvektion (Heizung)	Diffusion / Sorption	Konvektion (Wind)
		Niederschläge
Einflussfaktor innen:	Transportvorgänge:	Einflussfaktor außen:
der Mensch mit seinen Lebensgewohnheiten	⇒ von innen nach außen ⇒ ⇐ von außen nach innen ⇐	das Wetter im offenen und dynamischen System

Bild KB1: Wandmodell, Faktoren und Parameter

Aus der Darstellung in Bild K1 folgt, dass der Mensch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst, während das Wetter neben Luftfeuchte auch mit Niederschlägen aufwartet. Hierbei handelt es sich um Wettererscheinungen, die nicht weiter erläuterebedürftig sind. Sollen daher die Lebensgewohnheiten des Menschen näher betrachtet werden, infolge derer der Mensch die Kenngröße Luftfeuchte beeinflusst.

Zu den Lebensgewohnheiten des Menschen gehören die folgenden Vorgänge, welche feuchte freisetzen und an die Raumluft abgeben:

- Ausatmen, Schwitzen
- Kochen, Backen, Braten
- Duschen, Baden
- Waschen, Trocknen
- Grünpflanzen in der Wohnung
- Haushaltstätigkeiten
- offene Wasserflächen (z.B. Aquarium)

Während man das Wetter in einer Klimadatei hinreichend genau und auch statistisch belegt erfassen kann, dürften sich hinsichtlich der Erfassung der Feuchteabgabe an die Raumluft aus den Lebensgewohnheiten des Menschen Probleme auftun. Dass ein normierter Ansatz zu große Streubreiten nach sich zieht, kann jeder nachvollziehen, und nur bei großen Wohneinheiten relativiert sich der Fehler allein aus statistischen Gesetzmäßigkeiten.

Bei kleineren Einheiten kann man die Fehlerquote durch eine sinnvoll begrenzte Genauigkeit verringern. Dazu gibt es in manchen Simulationsprogrammen die Personenzahl tags und abends als Eingabegrößen, weiterhin die tageszeitlichen Entnahmemengen an Warmwasser. Dies ließe sich noch erweitern durch einen Ausstattungsgrad an Grünpflanzen, die Ausstattung mit Duschen und/oder Wannen, Benutzungsintervallen, Familienprofilen (viele Kinder bedeuten viel Wäsche), tatsächliche Lüftungsgewohnheiten usw.

Irgendwo kommt der Punkt zu fragen, wie viel Genauigkeit denn noch sinnvoll ist. Andererseits kann es nicht unerheblich sein, ob 5 Liter Wasser mehr oder weniger an die Raumluft abgegeben werden. Irgendwo muss es bleiben, und welcher Bewohner hält sich stets brav an die Empfehlungen „Richtig Heizen und Lüften“?

Wo bleibt das Wasser und wie wird Wasserdampf flüchtig? An zur Raumluft kühleren Oberflächen kondensiert Wasserdampf aus. Dieses Tauwasser wird entweder abtransportiert – oder es wird zu einem Problem. Eine Form der Manifestation dieses Problems ist die Schimmelbildung. Weiterhin folgt Wasserdampf dem Dampfdruckgefälle und die Kenngröße Ausgleichsfeuchte korrespondiert mit der relativen (Raum-) Luftfeuchte. Dazu kommt, dass in Abhängigkeit vom Porenradius die Kapillarkondensation unterschiedlich früh einsetzt. Zudem sind die Adsorptionsvorgänge von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig.

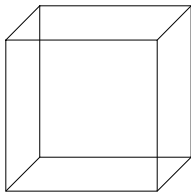


Bild KB2: Kubus als Ausschnitt aus einer Vollmaterialwand, Referenzfläche = 1 qm

Die einfache Abbildung eines Quaders in Bild K2 illustriert einige geometrische Zusammenhänge. Die dargestellte Referenzfläche der Außenwand ist ein Bruchteil der energiebilanzrelevanten Hüllfläche. Sie wird vom Referenzvolumen 1 cbm Raumluft begrenzt. In diesem cbm Raumluft befindet sich eine bestimmte Menge an Wasser in Dampfform.

Bekannt ist das gesamte Innenraumvolumen und aus dem Wert der relativen Luftfeuchte lässt sich bei gegebener Temperatur die hierin enthaltene Wassermenge bestimmen. Bekannt ist ferner die Summe der Außenwandinnenflächen, die in der Regel kühlere Oberflächen haben als z.B. die Innenwände. Hier entsteht Kondensat und hier wandert Wasserdampf diffundiv ein. Ein Teil davon wird infolge Kapillarkondensation verflüssigt.

Im Ergebnis der oben genannten Vorgänge entsteht im oberflächennahen Bereich der Außenwandinnenfläche eine bestimmte Menge flüssigen Wassers. Diese wird kapillar geleitet, wobei zunächst der Übergangswiderstand vom Innenputz zum Mauerwerk zu überwinden ist. Im Winter wird das Gebäude trocken geheizt und das Wasser wandert nach außen. Dieser Vorgang ist im Sommer umgekehrt.

Wovon hängt die Transportgeschwindigkeit ab? Eine wichtige Kenngröße ist der Porenradius, wichtig sind aber auch Porengrößen, Porenform und der Grad der Durchgängigkeit (Verbundenheit bzw. Vernetzung der Poren).

Bei dem Kubus aus porösem Vollmaterial (z.B. Ziegel) sind folgende Zusammenhänge festzustellen:

Das Gesamtvolumen setzt sich zusammen aus dem Porenvolumen und dem Feststoffvolumen:

$$V_{\text{ges}} = V_{\text{P}} + V_{\text{F}}$$

Im Falle der eintretenden Sättigung wird nicht alle Luft vom Wasser aus den Poren verdrängt:

$$V_{\text{P}} = V_{\text{W}} + V_{\text{L}}$$

Beispiel:

$V_{\text{ges}} = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0,40 \text{ m} = 0,4 \text{ cbm}$; Porenanteil: 60%, Sättigung bei 50%,
dann beträgt das kapillar wirksame Volumen $V_{\text{K}} = 0,4 \text{ cbm} \times 1,0 = 0,4 \text{ cbm}$, also 100%,
und das Luftvolumen im Trockenzustand $V_{\text{L}} = 0,4 \text{ cbm} \times 0,6 = 0,24 \text{ cbm}$, also 60%,
wobei das wassergefüllte Volumen nur betragen kann $V_{\text{W}} = 0,24 \times 0,5 = 0,12 \text{ cbm}$,
das sind $0,5 \times 0,6 = 0,3$ bzw. 30% und bei $\rho_{\text{Wasser}} = 1,0$ ergeben sich somit 120 l Wasser
auf einen qm der 40 cm starken Wand
– bei einer Füllung des Raumvolumens mit 100% porösem Stoff (z.B. ein Vollziegelmaterial).

Nach DIN 4108 beträgt der Grenzwert der Tauwasserbildung 1 l/m² und 0,5 l/m² bei Wänden mit Dämmstoffschichten. Die oben berechneten 120 Liter sind ein theoretischer Wert, der angibt, wie viel Wasser maximal ein Quadratmeter dieser Wand aufnehmen kann. Um einen praktischen Bezug herzustellen, sei die Relation zur Masse hergestellt:

Das Ziegelmaterial habe $\rho = 1.400 \text{ kg/m}^3$, dann wiegt der Quadratmeter Wand 560 kg.

Davon sind die 120 l bzw. kg Wasser 21% und
man kann den Sättigungsgrad wie folgt angeben:

21 M.-% bzw. 30 V.-%

– bei einer Füllung des Raumvolumens mit 100% porösem Stoff (z.B. ein Vollziegelmaterial).

Bislang wurde ein Vollmaterial behandelt, bei dem 100% des Raumvolumens mit dem porösen (und somit kapillar wirksamen) Material gefüllt sind. Ein Sonderfall, bei welchem die geometrischen Relationen sehr deutlich zutage treten, ist der Hohlblockstein. Dabei handelt es sich um einen gekammerten Mauerstein aus Beton, Leichtbeton, Schlacke, Bims u.ä.

Betrachten wir einen typischen Vertreter, wie er in [Ahnert et.al.] aufgeführt wird. Der Hohlblockstein aus Naturbimsbeton bzw. aus Hüttenbimsbeton hat Abmessungen von 50 x 30 x 21,9 cm (B x T x H). Dieser Stein mit der Höhe 21,9 cm ersetzt drei Schichten Mauerwerk im Reichsformat (das Reichsformat beträgt 250 x 120 x 65 mm, es wurde 1870 eingeführt). Der Stein ist ein oben geschlossener Kammer-Hohlblockstein, d.h. man mauert ihn mit dem Boden nach oben.

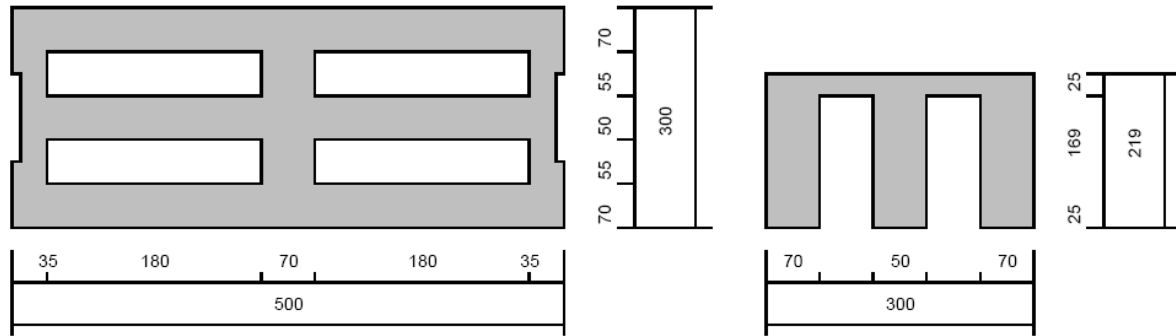


Bild KB3: Skizze zur Steingeometrie

Die Wandungen der Längsseiten sind ca. 7 cm stark, die Seitenwandungen ca. 3,5 cm, der Mittelsteg ca. 7 cm (quer) bzw. ca. 5 cm (längs) und die Bodenstärke beträgt 2,5 cm. Er hat 4 Kammern mit den jeweiligen Abmessungen 18,0 x 5,5 x 19,4 cm. Das sind je Kammer 0,001.921 cbm und insgesamt 0,007.682 cbm Kammervolumen. Das Raumvolumen des Steins beträgt 0,032.850 cbm.

Somit ergeben sich folgende aus der Geometrie abzuleitende Kennwerte:

Kenngroße	Formelz.	Wert	Einheit	Relation
Raumvolumen	V_R	0,032.850	cbm	100,0 %
Kammervolumen	V_{RP}	0,006.692	cbm	20,4 %
Materialvolumen	V_K	0,026.158	cbm	79,6 %
Rohdichte Material	ρ_{Beton}	1.100,0	kg/m ³	
Steinrohddichte	ρ_{Stein}	876,0	kg/m ³	
Porenanteil	P	40,0	%	
Porenvolumen	V_P	0,010.463	cbm	31,9 %
Materialreinvolumen	V_M	0,015.090	cbm	47,8 %
Sättigung	S	50,0	%	
Sättigungsvolumen	V_S	0,005.232	cbm	15,9 %
Sättigungswasser	V_W	5,2	l	
Sättigungswasser		18,5	M.-%	15,9 V.-%
Querschnittsfläche	F_Q	0,109.500	qm	100,0 %
Materialquerschn.fl.	F_K	0,025.245	qm	23,1 %

Tabelle KT1: Datentabelle mit Materialkennwerten des betrachteten Steines ($V_R = 100\%$)

An diesem Beispiel erkennt man, dass der Sättigungswassergehalt dieses Hohlblocksteines nicht über 16 V.-% bzw. nicht über 20 M.-% liegen kann. Dies mag lapidar erscheinen, ist jedoch für die Bewertung der hygrischen Kennwerte von Bedeutung. Insbesondere wenn man bedenkt, dass nur 23 % der Querschnittsfläche kapillar leitend wirken (beim Vollstein sind es 100%), also weniger als ein Viertel der Querschnittsfläche.

Bei einer Verringerung der kapillar wirksamen Querschnittsfläche auf weniger als $\frac{1}{4}$ bleibt die zu überwindende Distanz gleich, die Dicke (Tiefe) beträgt unverändert 40 cm. Das bedeutet, dass der durch kapillares Saugen zurückgelegte Weg in derselben Zeit bewältigt wird, wie im Vollstein. Aufgrund der Relationen der Querschnittsfläche wird deutlich, dass die transportierte Wassermenge nicht dieselbe sein kann. Bei gleicher Geschwindigkeit kann über ein Viertel der Fläche auch nur ein Viertel der Wassermenge transportiert werden.

Daraus folgt, dass die Sauggeschwindigkeit nicht genügt, um die hygrischen Vorgänge hinreichend zu beschreiben. Die Fragestellung muss lauten: wie schnell wird eine bestimmte Wassermenge kapillar über eine bestimmte Querschnittsfläche und einen bestimmten Weg geleitet? Dabei ist im bislang betrachteten Fall die Weglänge unverändert geblieben.

Eine einfache Überlegung sei voran gestellt: verringert sich der kapillar wirksame Querschnitt auf 50%, so verringert sich die Kapillarität um den Faktor 2. Wird dann noch der Weg auf das Doppelte verlängert, so verringert sich die Kapillarität noch einmal um den Faktor 2. Insgesamt verringert sich die Kapillarität, bei gleichem Material, zum Vollstein um das 4-fache.

Um diesen Einfluss der Geometrie auf die Kapillarität zu verdeutlichen, sei im Folgenden ein vereinfachendes Modell eingebracht. Hierbei geht es um einen Stein mit versetzt angeordneten Kammern.

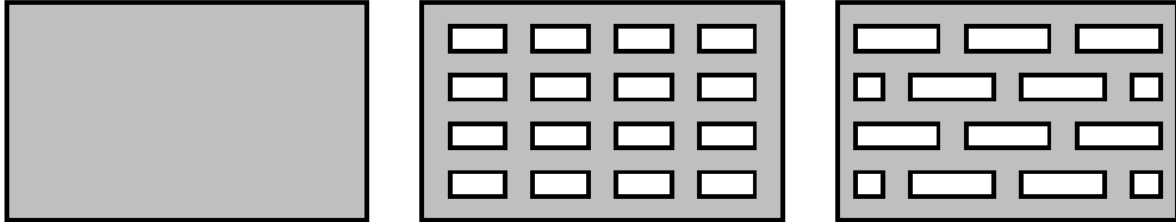


Bild KB4: Prinzipskizzen zum Verdeutlichen der Geometrie der Kammern (3 Steintypen)

Allein aus dem Betrachten der Skizzen wird deutlich, dass die Geometrie der Kammern einen erheblichen Einfluss auf die Kapillarität haben muss. Beim Vollstein beträgt der kapillar wirksame Querschnitt 100% (1 Steg), beim gleichmäßig gekammerten Stein sind es nur noch 38,5 % (5 Stege) und beim versetzt gekammerten Stein sind es an der dünnsten Stelle 25,5 % (2 + 2/2 Stege). Dazu kommt die Veränderung des Weges. Der Weg beträgt beim Vollstein und beim gleichmäßig gekammerten Stein 100%, beim versetzt gekammerten Stein beträgt er 161 %. Hieraus lassen sich für dieses Beispiel folgende Relationen für die Kapillarität ableiten:

Variante (Steinart)	V_K	A_K	L_K	Kapillarität
Vollstein	100 %	100 %	100 %	1,00 (1 : 1,0)
gleichmäßig gekammerter	73 %	39 %	100 %	0,39 (1 : 2,6)
versetzt gekammerter	71 %	23 %	161 %	0,14 (1 : 7,1)

Tabelle KT2: Veränderung der Kapillarität aus der Geometrie heraus

An diesem konkret berechneten Beispiel wird deutlich, wie sich die Geometrie auf die Kapillarität auswirkt: beim gleichmäßig gekammerten Stein wird sie um das 2,6-fache auf 39 % reduziert (der Weg bleibt unverändert) und beim versetzt gekammerten Stein sogar um das 7,1-fache auf nur noch 14 %.

Was bedeutet das? Im Fall des gleichmäßig gekammerten Steins wird – bei gleicher Ansichtsfläche der Wand (oder aber auch bei einer Standard-Referenzfläche von 1 m²) – in vergleichbarer Zeit nur der 0,39-fache Bruchteil der Wassermenge transportiert. Oder anders ausgedrückt: es dauert die 2,6-fache Zeit, um eine vergleichbare Wassermenge von innen nach außen zu transportieren. Vorausgesetzt wird eine Materialhomogenität des Steinmaterials sowie bislang eine Vernachlässigung des Anteils des Mörtels.

Zudem geht aus diesen Betrachtungen zur Geometrie hervor, dass die beiden gekammerten Steine nur rd. 70% der Sättigungsmenge an Wasser im Vergleich zum Vollstein aufnehmen können (bei stets gleichem Steinmaterial mit gleichen Werten für Rohdichte, Porenanteil und Sättigung). Dies sieht man auch in dem Beispiel oben mit dem Hohlblockstein, wo der Materialumfang rd. 80% des Volumens beträgt.

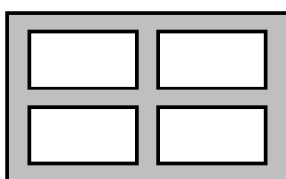


Bild KB5: Modell eines Hohlblocksteins, als Ergänzung zu den 3 Steintypen oben

Um die Relationen darzustellen, wurde das in Bild KB5 dargestellte Modell eingeführt. Anhand der Vergleichsrechnungen zu den nunmehr 4 Steintypen soll auf analytischem Wege ein erster Überblick zu den Werten erzielt werden.

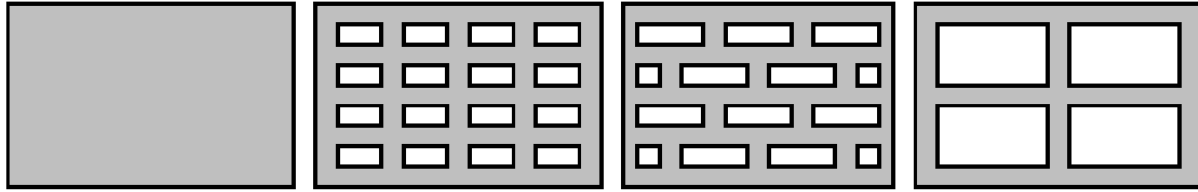


Bild KB 6: Skizzen zu den 4 Steintypen, v.l.n.r 1-4

			Typ 1 Voll- stein	Typ 2 gleichm. gekammert	Typ 3 versetzt gekammert	Typ 4 Hohl- blockstein
Kenngroße	Fz.	ME				
Breite	b	m	0,50000	0,50000	0,50000	0,50000
Tiefe	t	m	0,30000	0,30000	0,30000	0,30000
Höhe	h	m	0,25000	0,25000	0,25000	0,25000
Raumvolumen	V_R	m ³	0,03750	0,03750	0,03750	0,03750
Relation zu Typ 1		%	100,00000	100,00000	100,00000	100,00000
Kammerbreite	b_K	m	0,00000	0,07692	0,11550	0,19230
Kammertiefe	t_K	m	0,00000	0,03300	0,03300	0,10000
Kammerhöhe	h_K	m	0,00000	0,25000	0,25000	0,22500
Kammeranzahl	n_K	St	0,00000	16,00000	11,33000	4,00000
Kammervolumen	V_K	m ³	0,00000	0,01015	0,01080	0,01731
Relation zum V_R		%	0,00000	27,07584	28,78953	46,15200
Materialvolumen	V_M	m ³	0,03750	0,02735	0,02670	0,02019
Relation zum V_R		%	100,00000	72,92416	71,21047	53,84800
Querschnittsfläche	A_Q	m ²	0,12500	0,12500	0,12500	0,12500
Relation zu Typ 1		%	100,00000	100,00000	100,00000	100,00000
Materialbreite ges.	b_M	m	0,50000	0,19231	0,15385	0,50000
Materialhöhe ges.	h_M	m	0,25000	0,25000	0,25000	0,07675
Materialquerschn.fl.	A_{QM}	m ²	0,12500	0,04808	0,03846	0,03838
Relation zu Typ 1		%	100,00000	38,46154	30,76923	30,70000
Rohdichte Stein	ρ_S	kg/m ³	1.100,00000	802,16576	783,31517	592,32800
Gewicht Stein	G_S	kg	41,25000	30,08122	29,37432	22,21230
Porenraum	V_S	m ³	0,00750	0,00547	0,00534	0,00404
Relation zum V_R		%	20,00000	14,58483	14,24209	10,76960
Relation zum V_M		%	20,00000	20,00000	20,00000	20,00000
Sättigungswassermenge	G_{SW}	kg	7,49325	5,46439	5,33598	4,03497
Sättigungswasser (V_R)		M.-%	18,16545	18,16545	18,16545	18,16545
Sättigungswasser (V_R)		V.-%	20,00000	14,58483	14,24209	10,76960
Sättigungswasser (V_M)		V.-%	18,16545	18,16545	18,16545	18,16545

Tabelle KT3: Datentabelle zur Vergleichsrechnung der 4 Steintypen

Rechenwerte:

Porenanteil $P = 40\%$, Sättigung $S = 50\%$, Sättigungsporenraum $PS = 20\%$

Rohdichte Material $\rho_S = 1.100 \text{ kg/m}^3$, Rohdichte Wasser $\rho_W (15^\circ\text{C}, \text{NN}) = 999,1 \text{ kg/m}^3$

Die Auswertung des so gewonnenen Datenmaterials veranschaulicht anhand der aufgezeigten Relationen Material- zu Raumvolumen, Materialquerschnitt (kapillar wirksamer Querschnitt) und Porenraum zu Raumvolumen, dass die Geometrie einen erheblichen Einfluss auf die Kapillarität hat.

An einem weiteren Beispiel soll die praktische Bedeutung hinsichtlich der Wassergehalte untersucht werden, auch dies soll rein analytisch geschehen. Die Rohdaten liefert die folgende Tabelle.

Tafel 5. Durchschnittliche und maximale Feuchtigkeitsgehalte in Bau- und Dämmstoffen (nach verschiedenen Autoren und Messungen in Kühlhäusern der DDR) *(Gleichgewichtsfeuchte nach 1 Jahr)*

Nr. Stoffbezeichnung	Dichte [kg/m ³]	Masseprozent		Volumenprozent	
		Durchschnitt [M-%]	Maximum [M-%]	Durchschnitt [V-%]	Maximum [V-%]
1. Ziegel in Außenwänden Raumklima normal feucht Raumklima feucht, naß	1800	0,6	1,4	1,0	2,5
		1,0	1,5	1,7	2,7
2. Hochlochziegel	1600	1,0	2,5	1,5	4,0
	1400	1,0	2,9	1,4	4,0
3. Schwer-, Stahlbeton	≥ 2200	2,1	3,8	5,0	9,0
	1800	2,5	4,5	5,0	9,0
4. Hüttenbimsbeton	1600	3,1	6,2	5,0	10
	1400	3,5	7,5	5,0	10,5
	1200	4,2	9,0	5,0	11
5. Gas-, Schaumbeton	≤ 800	4,5	17	3,5	13
6. Vorsatzbeton außen	2000	1,5	3,5	3,0	7,0
7. Außenputz mit Zementmörtel mit Kalkzementmörtel	2000	1,3	3,0	2,5	6,0
	1800	1,7	3,9	3,0	7,0
8. Innenputz mit Kalkzementmörtel Kalkgipsmörtel Gipsmörtel	1600	2,0	5,0	3,0	8,0
	1400	2,0	6,0	3,0	8,5
	1200	1,8	5,8	2,0	7,0

Bild KB7: Tabellenausschnitt aus: Tafel 5. Durchschnittliche und maximale Feuchtigkeitsgehalte in Bau- und Dämmstoffen (nach verschiedenen Autoren und Messungen in Kühlhäusern der DDR) [Gleichgewichtsfeuchte nach 1 Jahr],

Aus den Rohdaten der obigen Tabelle lassen sich die Wassermengen je Kubikmeter des Materials berechnen. Die Umrechnung auf V.-% in Abhängigkeit von der Dichte ergibt dabei Rechenwerte, die nur sehr gering von den Tabellenwerten der beiden rechten Spalten abweichen.

Material	Dichte	M.-%	Wasser kg/m ³ max.	M.-%	Wasser kg/m ³ Ø	Streuung max. - Ø
Gasbeton	800 kg/m ³	17,0	136,00	4,50	36,00	100,00
Hüttenbimsbeton	1.200 kg/m ³	7,5	90,00	3,50	42,00	48,00
Innenputz (K-Z)	1.200 kg/m ³	5,8	69,60	1,80	21,60	48,00
Hochlochziegel	1.400 kg/m ³	2,9	40,60	1,00	14,00	26,60
Hüttenbimsbeton	1.400 kg/m ³	6,2	86,80	3,10	43,40	43,40
Innenputz (K-G)	1.400 kg/m ³	6,0	84,00	2,00	28,00	56,00
Hochlochziegel	1.600 kg/m ³	2,5	40,00	1,00	16,00	24,00
Hüttenbimsbeton	1.600 kg/m ³	6,2	99,20	3,10	49,60	49,60
Innenputz (K-Z)	1.600 kg/m ³	5,0	80,00	2,00	32,00	48,00
Ziegel (RK normal)	1.800 kg/m ³	1,0	18,00	0,60	10,80	7,20
Ziegel (RK naß)	1.800 kg/m ³	1,5	27,00	1,40	25,20	1,80
Stahlbeton	1.800 kg/m ³	3,8	68,40	2,10	37,80	30,60
Außenputz (K-Z.)	1.800 kg/m ³	3,9	70,20	1,70	30,60	39,60
Vorsatzbeton	2.000 kg/m ³	2,5	50,00	1,50	30,00	20,00
Außenputz (Z.)	2.000 kg/m ³	1,7	34,00	1,30	26,00	8,00
Schwerbeton	2.200 kg/m ³	3,8	83,60	2,10	46,20	37,40

Tabelle KT4: Datentabelle zur Berechnung der Wassermengen, sortiert nach der Dichte

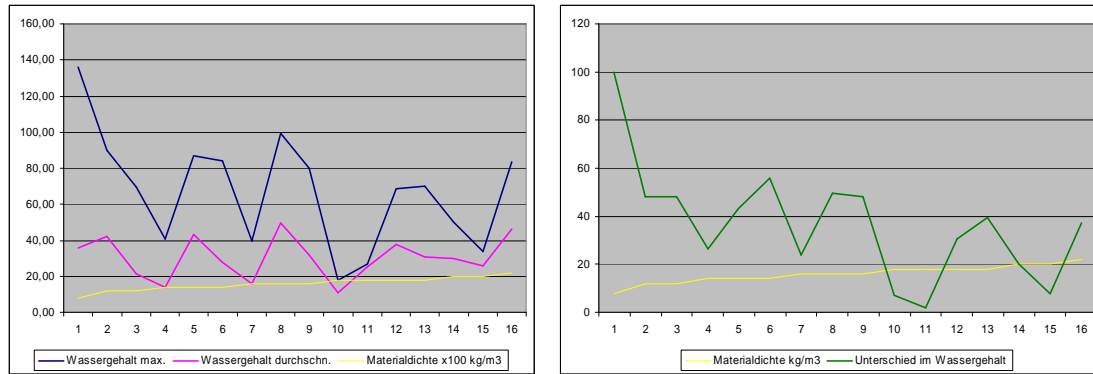


Bild KB8: Graf zur Datentabelle mit der Materialdichte und den Wassergehalten (max. und Ø) (links)

Bild KB9: Graf zur Datentabelle mit der Materialdichte und den Differenzwerten der Wassergehalte

Aus der Datentabelle zur Berechnung der gemessenen praktischen Wassergehalte sind die Grafen in den Bildern oben gebildet worden. Das Ziel besteht nun darin, einen etwaigen Zusammenhang zwischen der Materialdichte und den praktischen Wassergehalten festzustellen.

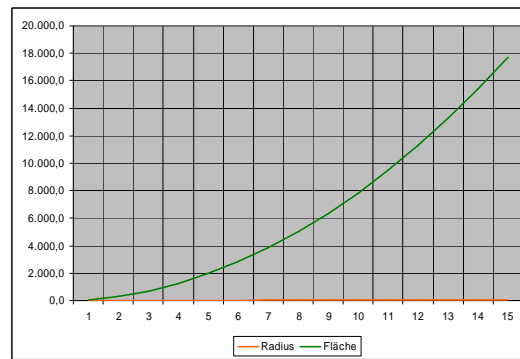
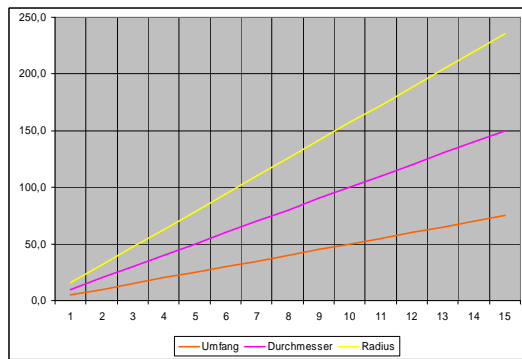
Abzulesen ist – bei optimistischer Interpretation – ein Trend: mit zunehmender Dichte nimmt im Trend der maximale Wassergehalt ab und mit zunehmender Dichte nimmt im Trend die Differenz zwischen maximalem und durchschnittlichem Wassergehalt ab. Eine Gesetzmäßigkeit (Funktionalität) lässt sich nicht ableiten. Also sind noch andere Kenngrößen heranzuziehen.

Bislang wurden hier Probleme der Makrogeometrie behandelt. Auf den Zusammenhang zwischen Porenradius und Kapillarkondensation wurde eingangs verwiesen, dies ist ein Problem der Mikrogeometrie. Um dies zu verdeutlichen, sei eine Zahlenfolge unterschiedlicher Porenradien und deren geometrische Abhängigkeiten betrachtet.

Radius	Durchmesser	Umfang	Fläche
r	d	U	F
µm	µm	µm	µm ²
5,0	10,0	15,7	78,5
10,0	20,0	31,4	314,2
15,0	30,0	47,1	706,9
20,0	40,0	62,8	1.256,6
25,0	50,0	78,5	1.963,5
30,0	60,0	94,2	2.827,4
35,0	70,0	110,0	3.848,5
40,0	80,0	125,7	5.026,5
45,0	90,0	141,4	6.361,7
50,0	100,0	157,1	7.854,0
55,0	110,0	172,8	9.503,3
60,0	120,0	188,5	11.309,7
65,0	130,0	204,2	13.273,2
70,0	140,0	219,9	15.393,8
75,0	150,0	235,6	17.671,5

Tabelle KT 5: Geometrische Verhältnisse unterschiedlicher Porengrößen (1 µm = 1/1.000 mm)

Der lineare Verlauf ist unschwer nachvollziehbar, er ergibt sich aus den Beziehungen $d = 2 \times r$ und $U = \pi \times r$. In dieser Modellierung wird unterstellt, dass die Poren Kapillaren bilden, die als Röhrenform abzubilden sind, d.h. mit durchlaufend gleichem Radius. Die Mantelfläche F_M nimmt ebenfalls linear zu, weil sie sich aus dem Umfang $U \times l$ ergibt.



Bilder KB 10 und 11: Grafen zur Datentabelle KT5 (r, d, U bzw. F_M und r, F bzw. V_M)

Die potenzierte Zunahme beim Raumvolumen (V_M sei das Mantelvolumen) erklärt sich aus $F \times 1E$. 1E ist eine Einheit, z.B. $1 \mu\text{m}$. Ersichtlich wird: mit zunehmendem Porenradius nimmt die Mantelfläche, wo die Moleküle andocken können, linear zu – der Raum, in dem sie sich frei bewegen können, ohne an der Mantelfläche anzustoßen, jedoch exponentiell und somit um ein Vielfaches mehr.

Literatur

- [Ahnert et.al.] Ahnert, R., Krause, K.H.: Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960, Band I, 6. Auflage, 2000, Verlag Bauwesen, Berlin
- [Eichler 72] Eichler, F.: Bauphysikalische Entwurfslehre, Band 2, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1972

© dimagb, Arbeitsstand 22.07.2005