

# Sorption

## Eine Betrachtung zum Thema „Feuchte im Bauteil Außenwand“

von Dipl.-Ing. Matthias G. Bumann

Dritte, überarbeitete und ergänzte Auflage (Arbeitsexemplar)  
© DIMaGB, Berlin, 2009

Zusammenführung der Teile vom  
27.04.2005 (1. Auflage, 2005)  
29.07.2005 (1. Ergänzungsskript, 2005)  
24.10.2005 (2. Ergänzungsskript, 2005)  
Ergänzungen mit weiteren Teilen (Skripte, 2006-2008)  
Ergänzungen mit weiterem Material  
Arbeitsstand: 07.2009

### Vorwort zur 2. Auflage

Begriffe wie „sd-Wert“, „Diffusion“ und „diffusionsoffen“ scheinen mittlerweile bereits so fest im Alltagsgebrauch verankert zu sein, dass fast jeder locker damit umgeht. Es steht dennoch zu befürchten, dass davon auszugehen ist, dass nicht jeder auch die korrekte Bedeutung zuzuordnen vermag. Noch dazu ist - auch - auf dem Gebiet der Bauphysik eine erstaunliche Vielfalt der Begriffe anzutreffen, die sich sowohl in Neuschöpfungen äußert als auch in variabler Anwendung bekannter Begriffe.

Unbestritten ist, dass der Faktor „Feuchte im Bauwerk“ in der Relevanz ganz oben anzuordnen ist. Es muss einen guten Grund dafür geben, dass die Suchbegriffe „Schimmel“, „Abdichtung“ und „nasse Keller“ oben auf der Liste der Suchbegriffe in der Statistik vieler Internetseiten stehen. Dieser Artikel soll einen Überblick zu den Formen des Wassertransportes durch Außenbauteile von Gebäuden liefern und dabei die wenig behandelte Thematik des kapillaren Transportes flüssigen Wassers beleuchten.

### Vorwort zur 3. Auflage

Im Laufe der Zeit stellt sich der Bedarf ein, zu ergänzen und ein klein wenig redaktionell zu überarbeiten. Material sammelt sich wie von selbst, wenn man sich beruflich mit den Problemen der Feuchte an und in Bauteilen befasst. Doch, wie heißt es so schön: jegliches braucht seine Zeit. Daher werden Sie hier bis zum – zeitlich nicht definierten – Abschluss das jeweilige Arbeitsexemplar vorfinden. *Panta rhei*, sagt der Grieche.

[- nach oben -](#)

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Vorwort zur 2. Auflage .....</b>	<b>1</b>
<b>Vorwort zur 3. Auflage .....</b>	<b>1</b>
<b>Sorption .....</b>	<b>3</b>
<b>Wasser – ein Steckbrief.....</b>	<b>3</b>
<b>Der Kreislauf des Wassers .....</b>	<b>5</b>
<b>Ursachen der Feuchte .....</b>	<b>7</b>
<b>Feuchtetransporte.....</b>	<b>8</b>
<b>„Atmende Wände“ – die atmende Wand .....</b>	<b>9</b>
<b>Enthalpie .....</b>	<b>12</b>
<b>Desorption, Verdunstung .....</b>	<b>14</b>
<b>Diffusion .....</b>	<b>17</b>
<b>Wasserdampfwanderung .....</b>	<b>17</b>
<b>Glaser-Verfahren: Theorie.....</b>	<b>18</b>
<b>Glaser-Verfahren: Praxis .....</b>	<b>19</b>
<b>Unrealistische Normen .....</b>	<b>21</b>
<b>Ausgleichsfeuchte .....</b>	<b>24</b>
<b>Kapillarität .....</b>	<b>27</b>
<b>Grundlagen .....</b>	<b>27</b>
<b>Porosität.....</b>	<b>30</b>
<b>KenngroÙe Porenraum .....</b>	<b>33</b>
<b>Geometrisch-analytische Überlegungen zur Modellbildung .....</b>	<b>37</b>
<b>Rechnen mit hygrischen GröÙen.....</b>	<b>46</b>
<b>Tauwasserbildung / Kondensation .....</b>	<b>46</b>
<b>Normierte Feuchte .....</b>	<b>49</b>
<b>Hygrische KenngroÙen.....</b>	<b>52</b>
<b>Alles bekannt?.....</b>	<b>54</b>
<b>Wassergehalt, -aufnahme und -abgabe in der Simulation.....</b>	<b>56</b>
<b>ThermoShield.....</b>	<b>65</b>
<b>Technologie statt nur Farbe.....</b>	<b>65</b>
<b>Wirkmechanismen .....</b>	<b>66</b>
<b>Entfeuchten und Schützen / Trocknen und Trockenhalten .....</b>	<b>66</b>
<b>Feuchteadaptivität .....</b>	<b>70</b>
<b>Hygrische Diode.....</b>	<b>72</b>
<b>Literatur/Quellen .....</b>	<b>73</b>
<b>Literatur/in den Quellen zitierte &amp; weiterführende.....</b>	<b>75</b>

# Sorption

## ***Wasser – ein Steckbrief***

75% des menschlichen Körpers bestehen aus Wasser, 2/3 der Erdoberfläche ist mit Wasser bedeckt. Die Wasservorkommen der Erde belaufen sich auf ca. 1,38 Milliarden km<sup>3</sup>. Der weitaus größte Teil, 97,4 % davon ist das in den Weltmeeren vorkommende Salzwasser. Nur 2,6 % davon (36 Millionen km<sup>3</sup>) liegen als Süßwasser vor. Das meiste Süßwasser ist als Eis an den Polen und in Gletschern gebunden; nur 0,3 % der weltweiten Wasservorräte (3,6 Millionen km<sup>3</sup>) sind als Trinkwasser verfügbar.

Wasser bedeutet aber auch Feuchte am Bau. Die Folgen sind hinlänglich bekannt. Diese Übersicht in Steckbriefform soll uns diesen Stoff näher bringen.

Aggregatzustände:	fest (Eis, Schnee oder Hagel), flüssig (Wasser), gasförmig (Dampf, Dunst, Nebel, Wolke); er hängt von der Temperatur und vom Druck ab
Anomalie:	trotz Erwärmung zieht sich Wasser bis 4°C zusammen und dehnt sich erst oberhalb von 4°C wieder aus; unterhalb von 4°C wird die Dichte kleiner, dadurch bildet sich bei Frost das Eis zuerst auf der Oberfläche und bleibt dort, weil es eine geringere Dichte als die Flüssigkeit hat
Bindung:	Dipolmoment in der Gasphase: 1,84 D, Bindungslänge in der Gasphase: 95,7 pm, Bindungswinkel in der Gasphase: 104,5°
Dampfdruck:	für das dynamischen Gleichgewicht zwischen Verdampfen und Kondensieren ist im Gasraum eine bestimmte Dichte von Molekülen notwendig, es stellt sich der zugehörige Dampfdruck $p$ zur Temperatur ein
Dampfdruckkurve:	die Trennlinie im Zustandsdiagramm zwischen gasförmig und flüssig/fest
Dichte:	1 g/dm <sup>3</sup> bzw. 1 kg/l bzw. 1 t/m <sup>3</sup> bei +4 °C (277,16 K); verschiedene Dichtewerte des Wassers bei Normaldruck in Meereshöhe: 0°C: 0,9168; 1°C: 0,9999; 4°C: 1,0000; 10°C: 0,997; 15°C: 0,9991; 20°C: 0,9982; 25°C: 0,9971; 100°C: 0,9584
Eis:	ist leichter als Wasser: unter 0°C überwiegt die Elektrostatik (abnehmende Wärmebewegung bei niedrigen Temperaturen), und es bildet sich eine feste Struktur aus (Eiskristall); durch Wasserstoffbrückenbindungen im Eiskristall entsteht eine Struktur mit vielen Hohlräumen, deshalb ist die Dichte von Eis um etwa 9% geringer als die von Wasser bei 4°C
Elektrische Leitfähigkeit:	reines Wasser ist nicht elektrisch leitend, nur die im Wasser gelösten Stoffe (Ionen) wirken leitend
Erwärmung:	übt man einen steigenden Druck aus, erwärmt sich Wasser auch bei Druckerhöhung nur bis 35,6°C
Farbe:	farblos bzw. klar
Feuchte:	ist das Verhältnis zwischen tatsächlichem Partialdruck und Sättigungsdruck, angegeben in %

Festpunkt:	= Gefrierpunkt: bis zu einer bestimmten Temperatur liegt Wasser in fester Form vor; weil die Atome sich so wenig bewegen, dass ein fester Stoff vorliegt (Kristallgitter)
Formel, chemische:	H <sub>2</sub> O
Gefrierpunkt:	± 0 °C (273,15 K): Wasser geht unter Ausdehnung seines Volumens um 1/11 vom flüssigen in den gefrorenen Zustand über
Geschmack:	reines Wasser ist geschmacklos
Geruch:	reines Wasser ist geruchlos
Hydrophilie:	Teilchen mit elektrischen Ladungen oder Teilladungen ziehen Wassermoleküle an und umgeben sie mit einer Wasserhydrathülle, dadurch wird die Löslichkeit von Ionen und von Molekülen mit polaren Gruppen (-OH-, -COO- und NH <sub>4</sub> +) ermöglicht - Stoffe mit polaren Gruppen sind daher hydrophil (Wasser mögend, Wasser anziehend)
Hydrophobie:	Stoffe mit apolaren Gruppen (z.B. -CH <sub>3</sub> ) sind hydrophob (Wasser meidend, Wasser abweisend), das ist das Gegenteil zu Hydrophilie
Kapillarität:	Eigenschaft des Wassers, sich in engen Spalten und Röhrchen unterschiedlich auszubreiten; sie hängt eng mit Adhäsion, Kohäsion und Oberflächenspannung zusammen. Wasser als eine benetzende Flüssigkeit wird in einer Kapillare nach oben gezogen, wenn die Adhäsion größer als die Kohäsion ist.
Kondensation:	tritt ein, wenn der Partialdruck über den Sättigungsdruck steigt (auch Nebelbildung genannt)
Lösemittel:	Wasser ist ein hervorragendes Lösemittel gerade für polare Stoffe wie Salze, weil es zwischen Ionen und Wassermolekülen starke elektrostatische Wechselwirkungen gibt; die Hydrathüllen von Ionen spielen für den Transport durch die Membran eine wichtige Rolle
Molekül:	Wasser ist eine Molekülverbindung (Dipol), und keine Ionenverbindung; das O-Atom hat zwei einfach besetzte Kugelwolken, die mit den Kugelwolken von zwei H-Atomen überlappen können; die Atome Wasserstoff und Sauerstoff können gegeneinander schwingen und das gesamte Molekül kann rotieren; Die Wasserstoffatome sind in einem Winkel von 104° um das Sauerstoffatom angeordnet. Die Sauerstoffatome besitzen eine stärkere negative Ladungsverteilung innerhalb des Moleküls, dabei bildet das Sauerstoffatom den negativen Pol und die Wasserstoffatome die positiven Pole.
Molekularbewegung:	Brownsche M.: es gibt statistisch in jedem Körper bei jeder Temperatur immer mindestens einige Moleküle, die genügend kinetische Energie besitzen, um die potentielle Energie (Bindungsenergie) im Körper zu überwinden
Oberflächenspannung:	die zwischen den Wassermolekülen wirkenden Anziehungskräfte (Wasserstoffbrückenbindungen) wirken gleichmäßig nach allen Seiten und heben sich daher in ihrer Wirkung gegenseitig auf; an der Oberfläche wirken ins Innere gerichtete Kräfte, weil die Oberflächenmoleküle nur an der Unterseite weitere Moleküle angelagert haben; die Summe dieser Kräfte ist die O.
Partialdruck:	gibt es immer in der Luft, er kann nicht höher sein als der nach der herrschenden Temperatur zu erwartende Dampfdruck (Sättigung)

Schmelzpunkt:	$\pm 0 \text{ }^\circ\text{C}$
Schmelzpunktkurve:	die Trennlinie im Zustandsdiagramm zwischen fest und flüssig
Schmelzwärme:	die S. erscheint nicht als Erhöhung der Temperatur (latente Wärme), da beim Schmelzen die potentielle Energie der Moleküle untereinander erhöht wird
Schmelzwärme, spezifische:	$\Lambda_E = 334 \text{ J/g}$ bei $0^\circ\text{C}$
Sieden:	beobachtet man, wenn der äußere Druck auf die Substanz (meist der äußere Luftdruck) gleich dem Dampfdruck bei dieser Temperatur ist
Siedepunkt:	$+ 100 \text{ }^\circ\text{C}$ (373,15 K), sie ist abhängig vom Luftdruck
Tripelpunkt:	273,16 K (+ 0,01 $^\circ\text{C}$ ), hier sind Druck und Temperatur absolut festgelegt; es ist der Punkt, bei dem alle drei Phasen (Aggregatzustände) simultan beobachtet werden können
Tropfen:	diese Form ergibt sich durch Gravitationswirkung aus der Kugelform (eine Wasserportion will eine möglichst kleine Oberfläche ausbilden, damit möglichst wenige Wassermoleküle an der Oberfläche liegen müssen)
Verdampfen:	Moleküle verlassen den Körper, sie dampfen ab
Verdampfungspunkt:	ab einer bestimmten Temperatur bewegen sich die Teilchen so stark, dass sie in den gasförmigen Zustand übergehen (Siedepunkt)
Verdampfungswärme, spez.:	$\Lambda_S = 2.255 \text{ J/g}$ bei $100^\circ\text{C}$
Wärmekapazität, molare:	$c_m (\text{H}_2\text{O}) \approx (2+16) \cdot 10^{-3} \cdot c (\text{H}_2\text{O}) = 75 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$
Wärmekapazität, spezifische:	$c (\text{H}_2\text{O}) = 4,18 \text{ kJ/(K}\cdot\text{kg)}$ , Wasser speichert also verhältnismäßig viel Wärmeenergie (bei Raumtemperatur etwa das doppelte von z. B. Öl) bzw. es benötigt, um erhitzt zu werden, vergleichsweise viel thermische Energie
Wasserstoffatom:	ein Wasserstoffatom wiegt $m(\text{H}) = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001\ 674 \text{ g}$
Wasserstoffbrückenbindung:	die positiv geladenen Wasserstoffatome stehen mit dem Elektronenpaar des Sauerstoffatoms eines weiteren Wasserstoffmoleküls in Wechselbeziehung (relativ starke Bindung); dadurch besitzt Wasser einen höheren Siede- und Schmelzpunkt als andere Stoffe in der Zelle, eine große Oberflächenspannung und eine höhere spezifische Wärmekapazität

## ***Der Kreislauf des Wassers***

Das Wasser auf der Erde befindet sich in einem ständigen Kreislauf. Die Antriebskräfte sind die Solarenergie sowie die Gravitation.

2/3 der Erdoberfläche ist mit Wasser bedeckt. Die Wasservorkommen der Erde belaufen sich auf ca. 1,38 Milliarden km<sup>3</sup>. Der weitaus größte Teil, 97,4 % davon ist das in den Weltmeeren vorkommende Salzwasser. Nur 2,6 % davon (36 Millionen km<sup>3</sup>) liegen als Süßwasser vor. Das meiste Süßwasser ist als Eis an den Polen und in Gletschern gebunden; nur 0,3 % der weltweiten Wasservorräte (3,6 Millionen km<sup>3</sup>) sind als Trinkwasser verfügbar.

111	Niederschläge Land	71	Verdunstung Land
385	Niederschläge See	425	Verdunstung See
40	Wasserdampftransport	40	Rückfluss
<u>536</u>	zusammen	<u>536</u>	zusammen

Tabelle 1: Der Energiekreislauf des Wassers, Transport in 1.000 km<sup>3</sup> p.a. nach [Tuck] nach Beobachtungen von Baumgartner und Reichel, 1975

Tuckermann gibt den in der Atmosphäre befindlichen Teil der Hydrosphäre mit 12.900 km<sup>3</sup> an, was bezogen auf 1.385.984.610 km<sup>3</sup> einem Anteil von 0,0009 % entspricht.<sup>1</sup>

### Niederschläge als Teil des Wetters

	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Jahr
Lufttemperatur (°C)	-0,4	0,6	4,0	8,4	13,5	16,7	17,9	17,2	13,5	9,3	4,6	1,2	
Absolute Höchsttemperatur (°C *)	15,2	18,6	25,1	30,9	33,2	35,0	37,8	37,7	34,2	27,5	19,5	15,7	37,8
Mittlere tägliche Höchsttemperatur (°C)	1,8	3,5	7,9	13,1	18,6	21,8	23,1	22,8	18,7	13,3	7,0	3,2	12,9
Absolute Tiefsttemperatur (°C *)	-21,0	-26,0	-16,5	-6,7	-2,9	0,8	5,4	4,7	-0,5	-9,6	-16,1	-20,2	-26,0
Mittlere tägliche Tiefsttemperatur (°C)	-2,9	-2,2	0,5	3,9	8,2	11,4	12,9	12,4	9,4	5,9	2,1	-1,1	5,1
Eistage	9,2	5,9	1,3	<0,1	0	0	0	0	0	<0,1	1,3	7,2	24,8
Frosttage	19,9	17,6	12,6	3,4	0,2	0	0	0	<0,1	1,3	8,4	17,0	80,3
Heiztage	31,0	28,0	31,0	29,8	13,2	3,9	0,8	0,7	9,4	31,0	30,0	31,0	239,8
Sommertage	0	0	<0,1	0,4	3,3	7,8	10,3	9,1	2,1	0,1	0	0	33,1
Heiße Tage	0	0	0	0,1	0,2	1,2	2,5	1,6	0,1	0	0	0	5,6
Niederschlagstage ≥ 0,1 mm	17,8	14,3	15,5	14,2	14,0	14,9	13,9	13,4	14,4	14,3	17,0	18,2	181,9
Niederschlag (l/m <sup>2</sup> )	43,2	36,6	37,5	42,2	55,3	70,7	53,1	65,3	45,5	35,8	49,5	54,5	589,2
Windgeschwindigkeit (m/s)	3,4	3,5	3,8	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8	2,9	3,3	3,3	3,2
Sonnenhöchststand (° am 15. des M.)	16,4	24,8	35,4	47,3	56,4	60,8	59,1	51,6	40,6	29,0	19,0	14,3	37,5
Sonnenscheindauer (Stunden)	45,4	72,3	122,1	157,7	221,6	220,9	218,0	210,2	156,3	110,8	52,4	37,4	1624,8
Sonnenscheindauer (Stunden/Tag)	1,5	2,6	3,9	5,3	7,1	7,4	7,0	6,8	5,2	3,6	1,7	1,2	4,4
Globalstrahlung (W/m <sup>2</sup> )	23	48	98	142	195	217	198	160	122	65	27	17	110
Globalstrahlung (kWh/m <sup>2</sup> je Tag)	0,52	1,14	2,34	3,39	4,66	5,18	4,73	3,82	2,91	1,55	0,64	0,40	2,62

Tabelle 2: Mittlere Klimadaten (1961-1990) Berlin-Dahlem, Datenquelle: Beilagen zur Berliner Wetterkarte (KBD), Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin; Hupfer, P. und Chmielewski, F.-M.: Das Klima von Berlin, 1990; Legende: \*) 1909-1999

In der Tabelle nicht enthalten sind die Angaben für den Wasserdampf in der Luft. Er kann durch verschiedene Größen angegeben werden: den Dampfdruck  $e$  (in hPa), die Relative Luftfeuchtigkeit (in %), die Absolute Feuchte  $a$  (in g/m<sup>3</sup> feuchte Luft), die Spezifische Feuchte  $s$  (in g/kg feuchte Luft), das Mischungsverhältnis  $m$  (in g/kg trockene Luft), den Taupunkt (in °C) und die Taupunktdifferenz (in K). Diese Wetterdaten u.v.a. kann man bei verschiedenen Wetterdiensten beziehen. [dibAET]

<sup>1</sup>

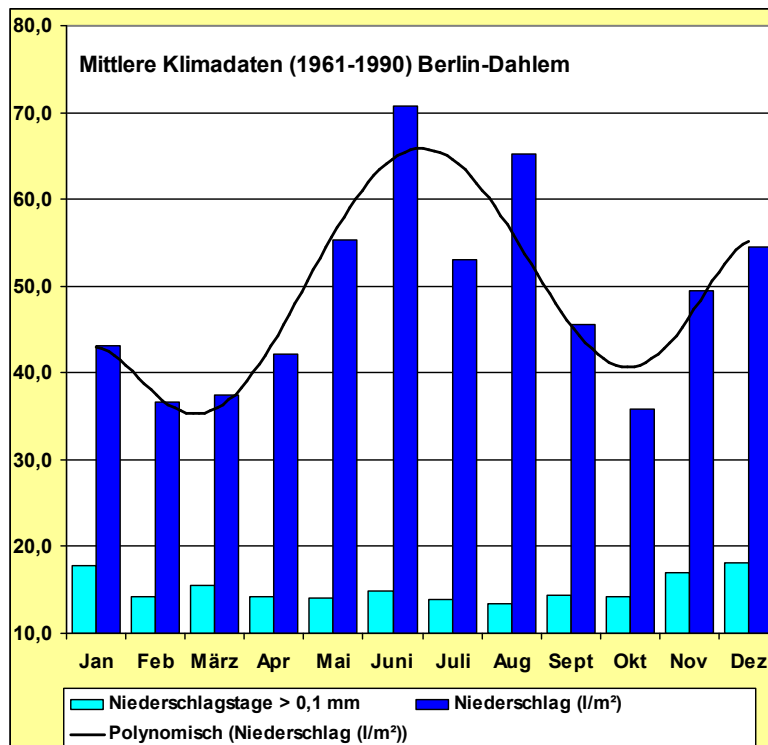


Abbildung 1: Graph of precipitation, data source is table 2 above [7], made by the author.

## Literatur

[Tuck] Tuckermann, Dr. R.: "Atmosphärenchemie, WS 2005/06"  
Seite 2: Wasserkreislauf, Seite 5: Hydrosphäre, 04.12.2005

## Ursachen der Feuchte

Über die Ursachen der Feuchte bestehen gesicherte Kenntnisse, die keine Zweifel aufkommen lassen. Noch dazu sind sie für jedermann leicht nachvollziehbar:

1. aufsteigende und einziehende Feuchte in Sohlen und Wänden (z.B. wegen fehlender Abdichtungen, im Altbaubestand häufig anzutreffen)
2. konstruktionsbedingt eindringende Feuchte (z.B. WU-Beton, siehe Kapitel Porosität)
3. aus Niederschlägen eingetragene Feuchte (z.B. Schlagregen, tauender Schnee)
4. Tauwasserbildung (in unterschiedlichen Bauteilen und Schichten)
5. Leckage bedingt eingetragene Feuchte (z.B. beschädigte Abdichtungen, Rohre)
6. aus der Umgebungsluft aufgenommene Feuchte (relative Luftfeuchte innen und außen)

Im günstigen Fall ist alles schön abgedichtet, um es korrekt auszudrücken: fachgerecht und dauerhaft. Und durch sinnvolle Planungsansätze sowie die Entscheidungen zum Einsatz der geeigneten Baustoffe lässt sich der konstruktive Feuchteschutz optimieren. Dennoch verbleibt ein Faktor, der durch bauliche Maßnahmen nicht beeinflusst werden kann: die Luftfeuchte.

Im Freien entsteht die Luftfeuchte als Ergebnis der Wetterlage und erfahrungsgemäß ist sie im Sommer höher und im Winter niedriger, weil die Luft mit höherer Temperatur mehr Wasser aufnehmen kann. Das bedeutet auch, dass bei niedriger Temperatur der Sättigungsgrad der Wasserdampfaufnahme durch die Luft eher erreicht ist. Angegeben wird die Luftfeuchte als „relative Luftfeuchte“ in %, d.h. zur jeweiligen Lufttemperatur wird die Relation zum maximal möglichen Wassergehalt angegeben.

Im Inneren von Gebäuden sind die Quellen nutzungsbedingt. Der Mensch gibt Wasser ab, indem er ausatmet (CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) und indem er transpiriert; diese Feuchteabgabe über die Haut wirkt Temperatur regulierend, weil die Verdunstung beim Schwitzen Verdunstungskälte erzeugt. Ansonsten gibt es noch zahlreiche Quellen, die Wasser durch Verdunsten abgeben:

- Pflanzen
- freie Wasserflächen
- Kochen, Waschen, Trocknen
- Duschen, Baden

Diese Feuchtequellen gehören zum Wohnen d.h. Leben dazu. Man kann sie daher nicht beseitigen, man muss mit Ihnen richtig umgehen. Eine bekannte und verbreitete Methode ist das Lüften. Durch den Luftaustausch wird feuchte gegen trockenere Luft ausgetauscht.

[- nach oben -](#)

## Feuchtetransporte

Bislang ging es um Feuchte in Form von Wasserdampf, der das Bedürfnis hat, bei geschlossenen Fenstern durch Bauteile hindurch zu diffundieren. Die Theorie hierzu ist recht simpel: aufgrund des Gefälles (der Luftfeuchte von hoch nach niedrig) wandert der Wasserdampf durch die Außenbauteile.

Je nachdem, wie viel Widerstand diesem Hindurchwandern entgegen gesetzt wird, spricht man von „diffusionsoffen“ bzw. „diffusionsdicht“. Diese Betrachtungsweise genügt jedoch für die Praxis nicht. In der Praxis existiert das Wasser in Außenbauteilen in zwei Aggregatzuständen (gasförmig und flüssig), u.U. sogar partiell als Eis.

Daher ist es zweckmäßiger, von Sorptionsvorgängen zu sprechen. Die Diffusion gehört dazu. Sorption bedeutet die Aufnahme eines Stoffes durch Adsorption und/oder Absorption.

Absorption kommt vom lateinischen „absorbere“ und bedeutet aufsaugen, verschlucken. Den Stoff, der einen anderen absorbiert, nennt man Absorbens. Damit das Wasser aus der Luft von der Wand absorbiert wird, muss es sich zunächst einmal an der Oberfläche anlagern. Adsorption ist Anlagerung von Gasen, Dämpfen oder gelösten Stoffen an feste Körper. Adsorbens ist bei der Adsorption der adsorbierende Stoff (Adsorber).

Bereits bei der Adsorption kann Wasser aus dem gasförmigen in den flüssigen Zustand übergehen, indem sich an kühlen Oberflächen Tauwasser bildet. Tauwasser bildet sich aber auch in – von innen gesehen – tieferen Schichten.

Insofern ist es zweckmäßig und geboten, den Zustand „flüssig“ in die Betrachtung einfließen zu lassen.

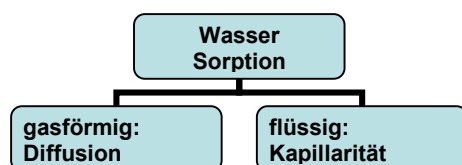


Bild 1: Unterscheidung der Sorptionsvorgänge nach Aggregatzustand

Betrachten wir noch die Moleküle des Wassers: was unterscheidet sie hinsichtlich flüssigem und gasförmigem Zustand? Die Moleküle sind dieselben, sie unterscheiden sich nur durch die Heftigkeit ihrer Schwingungen (Energiegehalt, ausgedrückt durch die Temperatur), somit ihrer Bindungskräfte und folglich ihrer Dichte.



Insofern sind auch beständige Phasenübergänge festzustellen, zumeist zwischen flüssig und gasförmig, in den äußeren Bereichen auch in fester Form, wenn das Wasser aufgrund der niedrigen Temperaturen gefriert. Dieser Zustand tritt auch im molekularen Bereich auf, wenngleich ein Vergleich mit einer überfrorenen Wasserfläche hinken mag.

Die Übergänge zwischen gasförmig und flüssig unterscheidet man nach den Kriterien Sorptionsabschnitt und Aufnahme- und Transportvorgänge. Hierbei spielen Menge und Zustand der Wassermoleküle eine wichtige Rolle:

Kriterium: Sorptionsabschnitt	Kriterium: Aufnahme- u. Transportvorgänge
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monomolekulare Wasserbindung</li> <li>• Multimolekulare Wasserbindung</li> <li>• Kapillare Wasserbindung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chemosorption</li> <li>• Adsorption</li> <li>• Kapillarkondensation</li> </ul>

Tabelle 1: Kennzeichnung der verschiedenen Sorptionszustände

In dieser Übersicht ist jeweils in der Aufzählung eine Zunahme von gasförmig in Richtung Kapillarität gegeben. Die für die Kapillarität wichtigen Eigenschaften sind:

- Kohäsion
- Adhäsion
- Oberflächenspannung

Kohäsion und Adhäsion betrifft die Anziehungskräfte der Teilchen gleicher bzw. unterschiedlicher Stoffe und der Grad der Oberflächenspannung des Wassers bewirkt in der Kapillare die konkave oder konvexe Wölbung des Endes der Wassersäule.

Die zwischen den Wassermolekülen wirkenden Anziehungskräfte (Wasserstoffbrückenbindungen) wirken gleichmäßig nach allen Seiten und heben sich daher in ihrer Wirkung gegenseitig auf; an der Oberfläche wirken ins Innere gerichtete Kräfte, weil die Oberflächenmoleküle nur an der Unterseite weitere Moleküle angelagert haben; die Summe dieser Kräfte ist die Oberflächenspannung.

Bei relativ großen Kapillaren (Trinkröhrchen und größer) spielt die Anziehungskraft der Erde eine Rolle, was man jedoch im mikroporösen Bereich vernachlässigen kann. Zwar besteht das richtige Modell in der 3D-Betrachtung, jedoch ist die Resultierende beim Durchgang durch das Bauteil Außenwand letztendlich stets in der Horizontalen angeordnet. Das liegt daran, dass sich entgegen gesetzte Kräfte aufheben und dass die Gefällerrichtung (Temperatur, Feuchte, Druck) in dieser Richtung angelegt ist.

[- nach oben -](#)

## **„Atmende Wände“ – die atmende Wand**

Unter der Überschrift „Populäre Vorurteile Folge 1: „Atmende Wände““ erschien im Dezember 2006 ein Artikel des GdW [1]. Darin wird der Zustand bedauert, dass sich „im Bewusstsein von Bauherren und Architekten auch vermeintliche Tatsachen festgesetzt“ hätten, die praktisch längst widerlegt seien.

Drei Viertel des Artikels behandeln eine angebliche Historie, die auf eine Meinung des deutschen Wissenschaftlers Max Pettenkofer aus dem 19. Jahrhundert zurückzuführen sein soll. Ein ungeeigneter Versuchsaufbau und später die Verbreitung im Kneipp-Kalender sollen dafür gesorgt haben, dass sich ein fundamentaler Irrtum bis heute gehalten haben soll.

Nicht nur in Fachkreisen ist bekannt, dass gewisse Kreise die Mär von den atmenden Wänden immer wieder gern sinnentstellend bzw. sinnentstellt verwenden, um Fachleute verächtlich zu machen, die immer wieder - aus ihrem Verantwortung gegenüber Bauherren und Bewohnern heraus – betonen, dass die Wände durchaus atmen können müssen.

Dass damit eine Atmung wie beim Menschen oder der Effekt des Luftaustauschs bzw. des Feuchteabtransportes beim Lüften mit weit aufgerissenen oder nur angekippten Fenstern gemeint ist, ist eine konstruierte Unterstellung. Gemeint sind damit die Sorptionsvorgänge an und in (also auch durch) monolithische Massivwände, die das Gros im Gebäudebestand darstellen.

Das eigentliche Problem ist, dass selbst Leuten vom Fach der Begriff Sorption entweder gänzlich unbekannt ist oder er verwendet wird, ohne dass der komplexe Inhalt bekannt ist. Ähnliches ist in dem Artikel festzustellen: hier werden die Sorptionsvorgänge auf den Vorgang der „Feuchtepufferung“ reduziert.

Hierbei geht es lediglich um die Anlagerung, Zwischenspeicherung und Abgabe von Feuchte aus und in der Luft im Oberflächenbereich der Außenwandinnenseite. Es ist natürlich nicht falsch, diesen Vorgang in die Betrachtungen einzubeziehen, jedoch ist es fachlich nicht richtig, die Sorption hierauf zu reduzieren.

Letztendlich geht es um WDVS\* an Mauerwerkswänden. „Eine äußere Wärmedämmung halbiert zwar den Feuchtetransport durch die Wand, ändert aber nichts daran, dass die Feuchte durch Lüftung abtransportiert werden muss.“ Es geht demnach um die inneren 1 bis 1,5 cm des Wandaufbaus. „Darunter liegende diffusionsdichte Schichten verändern die Raumfeuchte nicht.“

Diese Behauptung hält einer fachlichen Prüfung nicht Stand. Es wird suggeriert, dass eine diffusionsdichte Schicht außen, wie eben ein WDVS für die Sorptionsvorgänge der Mauerwerkswand unbedenklich sei. Der Stand der Wissenschaft und der Technik sowie die Erfahrungen aus der Praxis zeichnen uns ein ganz anderes Bild.

Zurück zum Luftaustausch: Cammerer, der in „Der Luftaustausch durch Wände, Fenster und Türen“ [2] auf Pettenkofers bekannten Versuch, der durch einen Ziegelstein hindurch ein Licht ausblies, erwähnt, behandelt das Thema sachlich und hinterlegt, jedoch nicht vordergründig. Sein Buch erschien vor 70 Jahren.

In Zahlentafel 38 gibt Cammerer für eine beiderseits verputzte Ziegelmauer von 40 cm Stärke ein Luftdurchgang in Höhe von 0,28 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h bei einer Druckdifferenz von 1 mm WS an, für 6,5 cm starkes Ziegelsteinmaterial hingegen nur 0,0043 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h.

Hieraus und aus weiteren gemessenen Werten lassen sich folgende grundsätzliche Folgerungen ziehen:

1. der Luftwiderstand eines Mauerwerkes ist nicht durch das Steinmaterial bedingt, sondern allein durch den Putz
2. der Zusatz von Zement und jeder Anstrich verringert den Luftdurchgang erheblich
3. der Luftaustausch durch die Außenflächen eines Hauses erfolgt so gut wie ausschließlich durch Fenster und Türen
4. die Luftdurchlässigkeit eines Fensters hängt vom genauen Passen der Falze ab

Dies ist selbst für den Laien ohne weiteres nachvollziehbar, so dass man an dieser Stelle das Kapitel „Luftdurchgang durch die Außenwand“ abschließen kann.

Aufgrund seiner umfangreichen Messversuche - von denen die meisten statt im Labor in der Praxis erfolgten; heute ist es umgekehrt – kam Cammerer aber auch zu der Erkenntnis, dass die Feuchte in Baustoffen ein ernst zu nehmender Faktor ist [3] [4]. Allerdings hatte er sich damals noch nicht mit den Problemen herumschlagen, die ein Vierteljahrhundert später die WDVS in der Praxis bescherten.

Wenn man von Sorption redet, muss man zwischen Adsorption, Absorption und Desorption unterscheiden. Hinsichtlich des Feuchtetransportes unterscheidet man zwischen Diffusion und Kapillarleitung, wobei das eine das andere nicht ausschließt. [5] Selten ist nur eine Form des feuchtegekoppelten Wärmetransportes anzutreffen, zudem gibt es beständige Übergänge von gasförmig zu flüssig und umgekehrt.

Dass die Problematik nicht nur in Fachkreisen auf ungebremstes Interesse stößt, lässt sich auch daran erkennen, dass der Fachartikel „Sorption“ [5] allein im November 2006 über 800 Mal herunter geladen wurde. [A] Dies trifft auch für andere themenbezogene und verwandte Fachartikel zu. [E]

Angesichts der Tatsache, dass Feuchtetransporte stets mit Energietransporten gekoppelt sind, dass der Wert der Wärmeleitfähigkeit stark vom Feuchtgehalt beeinflusst wird und dass der Faktor Feuchte nicht zuletzt angesichts ungelöster Probleme am Bau immer mehr an Aufmerksamkeit gewinnt, gewinnt die Betrachtung des hygrischen Verhaltens der Baustoffe an Bedeutung.

Mit einigen wenigen Werten und Gleichnissen scheint es jedoch nicht getan zu sein, wenn man bedenkt, dass Diffusions- und kapillare Leitungsvorgänge gleichzeitig gegengerichtet ablaufen können, was sogar partiell zu Kreislaufsituationen führen kann. [6]

Ein auf Mauerwerkswände aufgebrachtes WDVS widerspricht der allgemein anerkannten Regel der Bautechnik „von innen nach außen offener“ zu bauen, wie der textarme aber gut mit Zahlen hinterlegte Artikel „WDVS auf Mauerwerkswänden - von innen nach außen dichter“ belegt. [B]

Styropor und Mineralwolle sind keine sorptionsfähigen Baustoffe, sie besitzen keine Kapillarität und sie lassen lediglich Diffusionsvorgänge zu. In der Folge ist die Praxis feuchter als die trockene Theorie, wie auch die 1972 von F. Eichler veröffentlichten Messwerte belegen [7]

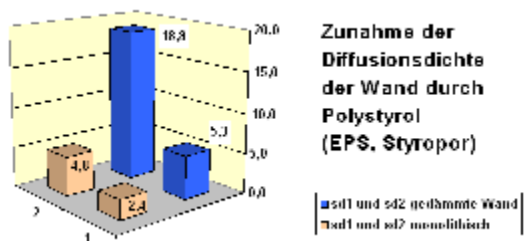


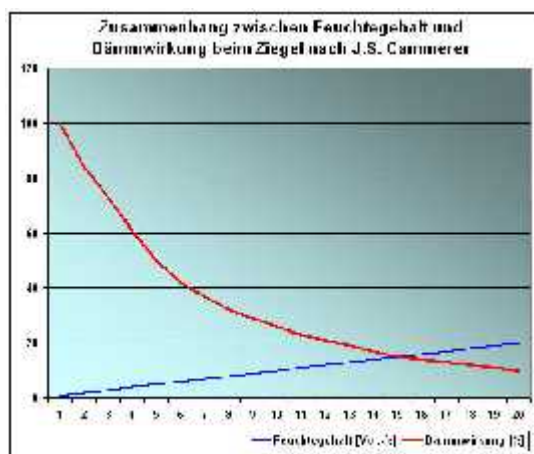
Bild 2: Zunahme der Diffusionsdichte der Wand durch Polystyrol [B]

Tauwasserbildung an der Grenzfläche zwischen WDVS und Mauerwerk tritt häufig auf, so dass gedämmtes Mauerwerk oft deutlich feuchter ist als ungedämmtes. [B] Dass es nach Glaser genügt, dass die Verdunstungsmenge größer ist als die Tauwassermenge, ist oftmals leider nur eine theoretische Lösung. [5]

Wird das Wasser in seinem sorptiven Durchgang durch die Wand behindert, führt dieser Zustand zu Problemen mit der Feuchte, die Wand, die nicht mehr atmet, wird krank. "Breathability is a key to understanding not only building performance, but how we should design, build and renovate our buildings from now on." Neil May, 16.04.2005, „Breathability in Buildings – die atmende Außenwand“. [A]

Das ist auch schon alles.

Atmen im Sinne von Luftdurchlässigkeit können und müssen Wände nicht, Atmen im Sinne von Feuchtetransport müssen Wände ungehindert können.



Feuchtegehalt und Dämmwirkung beim Ziegel [B]

Literatur:

- [1] Vogler, Ingrid: „Populäre Vorurteile Folge 1: „Atmende Wände““, GdW Gesamtverband deutscher Wohnungsunternehmen e.V., Berlin, 2006, in: Zeitschrift des Berliner ImpulsE Programms „Energie-Impulse“, Ausgabe 4.06, Seite 7
- [2] Cammerer, J.S. Dr.-Ing. habil.: „Die konstruktiven Grundlagen des Wärme- und Kälteschutzes im Wohn- und Industriebau“, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1936
- [3] Cammerer, I.S. Dr.-Ing. habil.: „Tabellarium aller wichtigen Größen für Wärme-, Kälte- und Schallschutz“, Rheinhold & Co. GmbH, Berlin, 1936
- [4] Cammerer, J.S. Dr.-Ing. habil.: „Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie“, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1928
- [5] dib: „Sorption. Eine Betrachtung zum Thema „Feuchte im Bauteil Außenwand“ SICC GmbH, Berlin, Arbeitsexemplar, Stand: 27.04.2005
- [6] dib: „Rechnen mit hygrischen Größen. 2.1 Wassergehalt, Wasseraufnahme und – abgabe“, SICC GmbH, Berlin, Arbeitsexemplar, Stand: 24.10.2005
- [7] dimagb: „Kapillarität. geometrisch-analytische Überlegungen zur Modellbildung“, DIMaGB, Berlin, Arbeitsstand 22.07.2005
- \* Wärme-Dämm-Verbund-System

Informationen im Internet:

- [A] <http://www.richtigbauen.de> - Informationen für Bauherren
- [B] <http://www.richtigsanieren.de> - Informationen für Bauherren
- [C] <http://www.dimagb.de> - Informationen für Bauherren
- [D] <http://www.schimmelpilz-sanieren.de> - Informationen für Bauherren
- [E] Zahlreiche Fachartikel kostenlos im **Download** dieser Domains.

[- nach oben -](#)

## Enthalpie

Die Enthalpie ist ein Maß für die Energie eines Systems. Sie wird in der Regel durch den Buchstaben H symbolisiert. Sie setzt sich additiv aus zwei Teilen zusammen: der Inneren Energie U und der Volumenarbeit.

Die Innere Energie bezeichnet die kinetische Energie der Teilchen des betrachteten Systems, die Energie der chemischen Bindungen der Teilchen des Systems, etc. Sie nimmt proportional zur Temperatur des Systems zu; am absoluten Nullpunkt ist sie 0. Die Volumenarbeit ist in diesem Fall anschaulich die Arbeit, die verrichtet werden musste, um das Volumen V und den Druck p zu erzeugen, das das System zum jetzigen Zeitpunkt hat.

$$H = U + p \times V \quad \text{bzw. differenziell ausgedrückt} \quad dH = dU + p \times dV + V \times dp$$

Will man die Änderung der Enthalpie eines Systems messen, so misst man in der Regel die Änderung der Temperatur und die des Volumens bei konstantem Druck.

Es handelt sich um isobare Prozesse ( $p = \text{konstant}$ , weil das Porensystem der Membran nach außen offen ist) und die Arbeit besteht in reversibler Volumenarbeit. Für die differentielle Änderung der Enthalpie gilt  $dH = dU + p dV + V dp$  und wegen  $p_0 \text{konstant}$ ,  $dp=0$  und  $dU = dQ + dW$  ergibt sich  $dH = dQ - p dV + p dV = dQ$ . Die Enthalpie ist eine Kombination bekannter Größen ( $U$ ,  $p$ ,  $V$ ) und eine extensive Zustandsgröße.

#### Enthalpie

Enthalpie, SI-Einheit Joule (J), von Bedeutung bei der Beschreibung von Prozessen, die bei konstantem Druck (isobar) stattfinden. Chemische Prozesse laufen in der Praxis oft bei konstantem Druck ab. Enthalpie ist die Summe aus innerer Energie und Verdrängungsarbeit. Die Enthalpie wird als Funktion von Entropie, Druck und Teilchenzahl geschrieben.

#### freie Enthalpie

Freie Enthalpie, auch Gibbssches Potential, SI-Einheit Joule (J), eine von J. W. Gibbs (1875) eingeführte Größe, die sich besonders für Systeme bei vorgegebener Temperatur und vorgegebenem Druck eignet. Die freie Enthalpie pro Teilchen stimmt mit dem chemischen Potential überein. Die freie Enthalpie wird als Funktion von Temperatur, Druck und Teilchenzahl geschrieben.

#### Enthalpie

Das energetische Verhalten eines Fluids wird durch die sogenannte kalorische Zustandsgleichung beschrieben. In Abhängigkeit von Druck und Temperatur wird die kalorische Zustandsgleichung in der Enthalpie  $h(p,T)$  formuliert, die mit der inneren Energie  $u$  über  $h = u + pv$  zusammenhängt.

Die Zustandsfläche sieht ähnlich aus wie die Fläche der Entropie-Zustandsgleichung. Sowohl Enthalpie und Entropie sind über ihre erste Temperaturableitung mit der isobaren Wärmekapazität verknüpft. Hohe Enthalpien sind charakteristisch für das Gasgebiet, kleine Enthalpien für die Flüssigkeit.

Die Grenzen des Zweiphasengebietes sind wiederum eindeutig erkennbar. Taulinie (bei großen Enthalpien) und Siedelinie (bei kleinen Enthalpien) laufen am kritischen Punkt zusammen, der in dieser Darstellung beim Druckmaximum der Zweiphasengrenze liegt.

Die Differenz der Enthalpien entlang einer Isothermen, bzw. Isobaren (Linien konstanter Temperatur bzw. Druck) zwischen den Grenzen des Naßdampfgebietes entspricht der Verdampfungsenthalpie. Kondensiert ein Fluid, so wird dieser Enthalpiebetrag von System abgegeben, verdampft ein Fluid, muß Enthalpie zugeführt werden. Eine für technische Anwendungen bedeutsame Darstellung der kalorischen Zustandsgleichung erhält man durch die Projektion der Zustandsfläche in  $p,h$ -Ebene. Sie entspricht dem so genannten  $\log(p)$ - $h$ -Diagramm, das in der Kälte- und Klimatechnik bei der Auslegung von Prozessen weit verbreitet ist.

#### Enthalpie (meteorologisch)

Die Enthalpie  $H$  ist eine thermodynamische Zustandsgröße für den gesamten Wärmehalt eines Luftpaketes. Sie setzt sich zusammen aus der inneren Energie plus der Ausdehnungsarbeit eines Gases.

#### Entropie

Die Entropie ist ein Maß für die Unordnung eines Systems. Sie wurde ursprünglich als phänomenologisches Maß auf dem Gebiet der Thermodynamik in der Physik bzw. Chemie eingeführt. Insbesondere lässt sich mit Hilfe des Entropiebegriffs der 2. Hauptsatz der Thermodynamik besonders einfach formulieren. Später wurde die Entropie per Analogieschluss von Claude Shannon in die Informationstheorie übernommen. Inzwischen gibt es jedoch mit der theoretischen Thermodynamik bzw. statistischen Mechanik auch eine gut überprüfte physikalische Theorie, die einen direkten und exakt quantifizierten Zusammenhang zwischen der informationstheoretischen und physikalischen Entropie herstellt.

Ein System mit Entropie 0 ist perfekt geordnet. Ein physikalisches System, das diesem Zustand nahe kommt, ist das Bose-Einstein-Kondensat, da sich alle Teilchen im selben Zustand befinden. Ein informationstechnisches System mit Entropie 0 ist ein Speicher, der nur 0en beinhaltet. Sobald ein System diesen Zustand der "totalen Gleichschaltung" verlässt, steigt die Entropie auf einen von 0 verschiedenen Wert. Sie kann einen vom System abhängigen Maximalwert jedoch nicht überschreiten, der sich bei einer Festplatte beispielsweise durch die Speicherkapazität, bei einem physikalischen System durch die enthaltenen Teilchen ergibt. Üblicherweise ist das Erreichen des maximalen Entropiewertes mit "perfekter Unordnung" gleichzusetzen, Physiker sprechen auch vom thermischen Gleichgewicht.

Der Maxwellscher Dämon ist ein Gedankenexperiment zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Er verbindet Entropie nicht nur mit Energie, sondern auch mit dem Begriff Information.

### Druck

Druck ist das Verhältnis  $p$  der Kraft  $F$  zur Fläche  $A$ , auf die sie wirkt:  $p=F/A$ . Die Kraft wird in Newton (N) gemessen. Die Druckeinheit ist Pascal (Pa):  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ .

### Energie

ursprünglich die Fähigkeit eines Körpers, Arbeit zu leisten. So hat jeder Körper aufgrund seiner Lage und seiner Bewegung in Bezug auf andere Körper eine Lageenergie (potenzielle Energie: z. B. kann ein angehobenes Gewicht durch seinen Fall Arbeit leisten) und eine Bewegungsenergie (kinetische Energie: z. B. ein fahrendes Auto). R. Mayer entdeckte, dass diese mechanische Energie völlig in Wärme, eine andere Energieform, umgewandelt werden kann, und sprach den Satz von der Erhaltung der Energie aus. Heute definiert man Energie als eine messbare Größe, die auf verschiedene Weise in Erscheinung treten kann, deren Zahlwert aber immer gleichbleibt. So spricht man z. B. auch von elektrischer, magnetischer und Ruheenergie. Die Ruheenergie eines Teilchens ist seiner Masse  $m$  äquivalent, denn nach der Relativitätstheorie besteht zwischen beiden die Beziehung  $E = m c^2$ , wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum ist. Die Ruhe- oder auch Masseenergie kann also in andere Energieformen, z. B. Wärme, umgewandelt werden und umgekehrt. Hierauf beruht z. B. die Gewinnung von Kernenergie. M. Planck entdeckte, dass ein Atom nicht stetig Energie in Form von Lichtstrahlung aufnehmen oder abgeben kann, sondern nur bestimmte ("diskrete") Energiebeträge (Energiequanten), deren Größe von der Quantentheorie berechnet werden kann. - Die Maßeinheiten der Energie sind: Joule, Kilowattstunde und Elektronenvolt.

### Temperatur

eine Größe, die den Wärmezustand eines physikalischen Systems, z. B. eines Körpers, einer Flüssigkeit oder eines Gases kennzeichnet. Die Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie des Systems. Je größer die Wärmebewegung der Teilchen, desto höher ist die Temperatur (kinetische Gastheorie). Die Temperatur ist zu unterscheiden von der Wärme, einer Energieform. Sie wird gemessen mit Thermometern, mit Thermoelementen und (bei hohen Temperaturen) mit Strahlungsmessern. Der absolute Nullpunkt (0 K [Kelvin]) ist die kleinste überhaupt mögliche Temperatur; man kann ihn nur näherungsweise erreichen (Nernst'sches Wärmetheorem). In der Physik ist die "thermodynamische Temperaturskala" (Kelvinskala) gebräuchlich; im täglichen Leben hat sich die Celsius Temperaturskala durchgesetzt. In den USA werden Temperaturen überwiegend noch in Fahrenheit angegeben.

### Wärme

Wärme ist eine spezielle Energieform, die mit der Temperaturzunahme eines Stoffes zusammenhängt. Eine Wärmeaufnahme verursacht eine Temperaturerhöhung. Der Zusammenhang zwischen Wärmeaufnahme und Temperaturerhöhung wird durch eine Stoffeigenschaft, die Wärmekapazität, bestimmt. Bei einem Phasenübergang kann auch Wärme (etwa Schmelz- oder Verdampfungswärme) aufgenommen oder abgegeben werden, ohne dass eine Temperaturänderung stattfindet.

### Wärmekapazität

Wärmekapazität,  $C$ , SI-Einheit Joule pro Kelvin, manchmal auch totale Wärmekapazität genannt, Materialeigenschaft eines Körpers, seine Temperatur bei einer bestimmten Wärmezufuhr zu ändern. Sie ist abhängig von der Stoffmenge. Die Wärmekapazität eines Stoffes kann bei einem Phasenübergang formal unendlich werden, da hier Wärme aufgenommen werden kann, ohne zu einer Temperaturänderung zu führen. Die Wärmekapazität eines unbekanntes Stoffes kann durch Feststellung der Temperaturänderung bei bekannter Wärmezufuhr gemessen werden.

[- nach oben -](#)

## **Desorption, Verdunstung**

### **Regen, Feuchte, Enthalpie, Energiebilanz**

Teil 1.1: Exzerpt aus [5], Suchwort: „Regen“

aus Verzeichnis der Formelzeichen:

$R_N$ [kg/m <sup>2</sup> s] Normalregen	
$R_S$ [kg/m <sup>2</sup> s] Schlagregen	
$r_s$ [s/m] positionsspezifischer Schlagregenkoeffizient	
Außenlufttemperatur	2.0 °C
Weststrahlung	40 W/m <sup>2</sup>
Schlagregensumme	200 kg/m <sup>2</sup>
Raumlufttemperatur	20 °C
<b>Absorption (short wavelength)</b>	0.7
<b>U value of the wall</b>	0.5 W/m <sup>2</sup> K

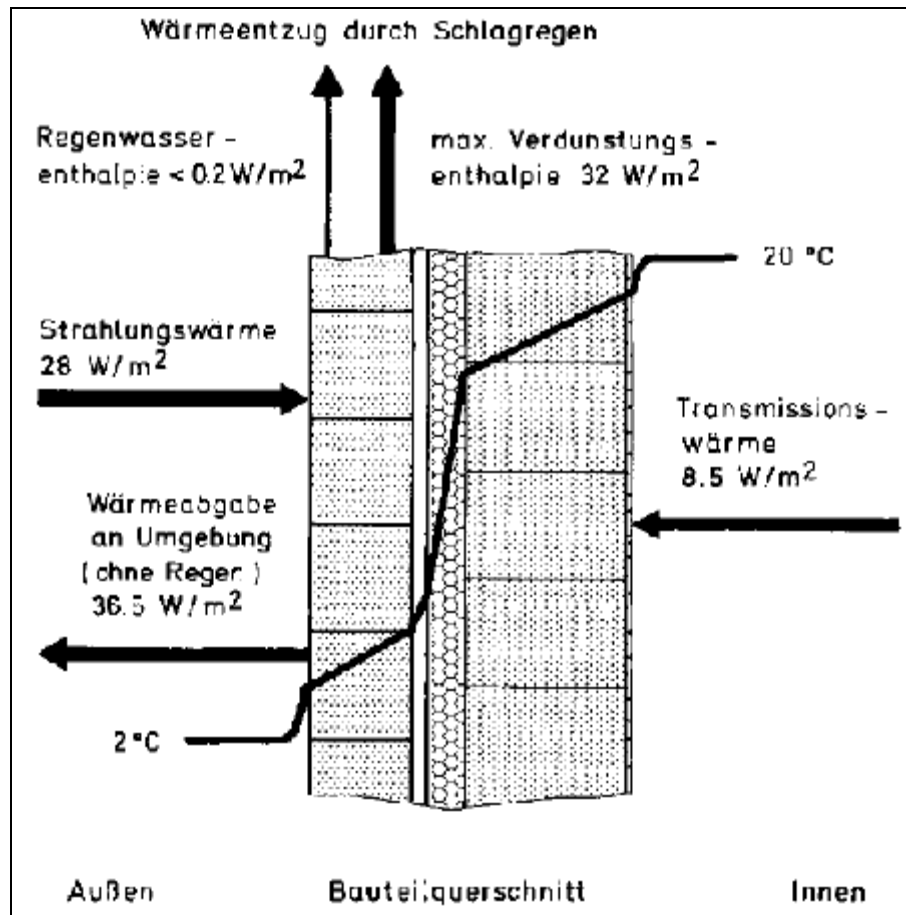


Bild 23

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.

[Erläuterungen zum Bild:

Wärmebilanz:

1. Wärmeentzug durch Schlagregen	
1.1 Regenwasserenthalpie	- 0,2 W/m <sup>2</sup>
1.2 max. Verdunstungsenthalpie	- 32,0 W/m <sup>2</sup>
2. Wärmeabgabe an Umgebung (ohne Regen)	- 36,5 W/m <sup>2</sup>
3. Transmissionswärme	- 8,5 W/m <sup>2</sup>
4. Strahlungswärme	+ 28,0 W/m <sup>2</sup>
<b>Saldo</b>	<b>- 49,2 W/m<sup>2</sup></b>

Man beachte: die max. Verdunstungsenthalpie beträgt ca. das Vierfache der Transmissionsverluste!  
Zum Verständnis des Zeitfaktors: beschrieben ist eine „über das Winterhalbjahr gemittelte Wärmebilanz“, [M.B.].

$$R_s = r_s \cdot v \cdot RN \quad (33)$$

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

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

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

Teil 1.2: Exzerpt aus [5], Suchwort: „Enthalpie“

aus Verzeichnis der Formelzeichen:

$H$ [J/m <sup>3</sup> ]	Gesamtenthalpie
$H_s$ [J/m <sup>3</sup> ]	Enthalpie des trockenen Baustoffes
$H_w$ [J/m <sup>3</sup> ]	Enthalpie der Baustoffeuchte
$h_e$ [J/kg]	spezifische Schmelzenthalpie von Wasser
$h_v$ [J/kg]	spezifische Verdunstungsenthalpie von Wasser

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

$H_s$ [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

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

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

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

$H$ [J/m <sup>3</sup> ]	Gesamtenthalpie
$H_s$ [J/m <sup>3</sup> ]	Enthalpie des trockenen Baustoffes
$H_w$ [J/m <sup>3</sup> ]	Enthalpie der Baustoffeuchte

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

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



$\lambda$  [W/mK]      Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes  
 $\vartheta$  [°C]        Temperatur

**Similar Themes and formulas: see [6].**

[- nach oben -](#)

## Diffusion

[- nach oben -](#)

### **Wasserdampfwanderung**

Diffusion bedeutet nach landläufiger Betrachtung und nach normierter Regelung das Hindurchwandern von Wasserdampf durch ein Bauteil.

Diffusion im physikalischen Sinne bedeutet allerdings die Stoffvermischung. Beispiel: man schichtet Tinte und Wasser in ein Glas – aufgrund der Brownschen Molekularbewegung kommt es zur Auflösung der Trennschicht, die Stoffe mischen sich, sie werden diffus.

Der Motor hierfür ist die thermische Bewegung und am Ende gibt es ein dynamisches Gleichgewicht: die Teilchenanzahldichte bleibt konstant, obwohl alles in Bewegung bleibt.

Zurück zum bauphysikalischen Begriff der Diffusion, d.h. der Wasserdampfwanderung durch ein Außenbauteil (Dach oder Wand), von dem hier die Außenwand betrachtet werden soll. Auch hier spielt die Thermik eine Rolle: der Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen erzeugt ein Gefälle.

Die Temperatur „will dahin, wo es kälter ist“. Temperatur ist an Stoff gebunden, man kann ohne einen Stoff keine Temperatur messen. Die Stoffe „Luft- und die Wassermoleküle“ wandern also. Eine erhöhte Temperatur erhöht den Wasserdampfdruck, und weil es woanders kälter ist, entsteht ein Dampfdruckgefälle. Bei der gefällebedingten Wanderung hat der Wasserdampf aber Hindernisse zu überwinden. Ein ernsthafter Widerstand ist die Diffusionsdichtigkeit des Baustoffes.

Das Maß dafür wird durch den  $\mu$ -Wert angegeben. Der Wert  $\mu$  ist eine Relation und er kennzeichnet das Verhältnis der Dampfdichtigkeit von 1m eines Materials zu 1 m Luftschicht. Nimmt man den Diffusionswiderstand  $\mu$  und die Materialdicke  $s$ , kann man den allseits gut bekannten  $s_d$ -Wert bestimmen.  $s_d$  ist die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke.

Die wirkliche Dampfdichtigkeit ist mittels des Dampfdurchlasswiderstandes  $1/\Delta$  anzugeben. Dazu benötigt man neben Diffusionswiderstand  $\mu$  und die Materialdicke der Bauteilschicht noch den Wert für die Dampfleitzahl der Luft. Die Dampfleitzahl der Luft  $\delta_L$  ist nur gering temperaturabhängig und sie darf daher als Konstante betrachtet werden.

Material	Diffusionswiderstand Rechenwert $\mu R$
Luft	1
Faserdämmstoff	1
HWL-Platten	2-5

Holzfaserdämmstoff	5
GK-Platten	8
Vollziegel	5/10
Porenbeton	5/10
Mörtel	15/35
Holz	40
Polystyrol WLG 025 bis 040	20/50 bis 40/100
Polyurethan-Hartschaum	30/100
Normalbeton	70/150

Tabelle 2: eine Übersicht zu Diffusionswiderstandswerten verschiedener Baustoffe

Metalle, z.B. Aluminiumfolie, sind diffusionsdicht. Hier haben die 0,3 nm „dicken“ Wassermoleküle keine Chance, hindurch zu diffundieren [1 Nanometer = 1 millionstel Millimeter, 0,3 nm = 0,000.000.000.3 m =  $0,3 \times 10^{-9}$  m]. Beton ist nicht diffusionsdicht, weswegen ein WU-Beton Wasserdampf hindurch wandern lässt, was für den Innenausbau zu berücksichtigen ist.

In Abhängigkeit von der Temperatur stellt sich eine Sättigungsdichte ein. Das ist der Wassergehalt in der Luft, der für den jeweiligen Temperaturzustand möglich ist. Im Kapitel „Tauwasserbildung / Kondensation„ wird dieses Thema später näher behandelt werden.

[- nach oben -](#)

## Glaser-Verfahren: Theorie

Wasserdampf kann wegen der Diffusionsleitfähigkeit  $\delta$  von Baustoffen bei einem Wasserdampfdruckgefälle ( $p_2-p_1$ ) auch Bauteilschichten durchdringen, wobei sich ein eine Wasserdampf-Diffusionsstromdichte  $g$  einstellt, die sich umgekehrt proportional zum Diffusionswiderstand  $Z$  verhält.

Eigenschaft der Schicht	Sperrwert $s_d$
diffusionsoffen	$\leq 0,5$ m
diffusionshemmend	$0,5$ m $< s_d < 1.500$ m
diffusionsdicht	$\geq 1.500$ m

Tabelle 4: Eigenschaften von Schichten gem.  $s_d$ -Wert nach DIN 4108-3

Tauwasser entsteht, wenn der Wasserdampfteildruck den Sättigungsdruck erreicht. Man geht davon aus, dass dieses Tauwasser unschädlich ist, sofern ein bestimmter Grenzwert nicht überschritten wird und solange die Verdunstungsmenge größer ist als die Tauwassermenge. Für den Berechnungsansatz sind die Klimawerte genormt. Es darf berechtigt angenommen werden, dass diese normierten 150 Tage für die Witterungsverhältnisse eines Jahres nicht repräsentativ sein sollten.

	Tauperiode	Verdunstungsperiode
Außenklima	-10 °C, $\phi = 80\%$ , $p_a = 208$ Pa	12 °C, $\phi = 70\%$
Innenklima	20 °C, $\phi = 50\%$ , $p_a = 1.170$ Pa	12 °C, $\phi = 70\%$
Dauer	1.440 h (60 d)	2.160 h (90 d)

Tabelle 5: Normierte Randbedingungen des Klimas nach DIN 4108-3

Man berechnet mit dem Glaser-Verfahren Diffusionsdiagramme für Tauwasser ( $p$ -Linie schneidet  $p_s$ -Linie) und Verdunstung und errechnet somit die Tauwasser- (TW) und die Verdunstungsmenge (VM).

Wenn  $TW < TW_{max}$  und  $VM > TW$ , dann ist alles gut. Wie sich das Tauwasser verhält, wird nicht behandelt.

Anhand dieser Kurzzvorstellung wird schnell klar, dass Normen gut dafür Taugen, z.B. Schraubendurchmesser einheitlich zu definieren – für solch dynamische Größen wie das Wetter sollte man die Eignung von Normbedingungen anzweifeln.

Es gibt in DIN 4108-3 eine Aufstellung von Bauteilen, für die kein rechnerischer Nachweis des Tauwasserausfalls erforderlich ist.

[- nach oben -](#)

## **Glaser-Verfahren: Praxis**

Das Glaser-Verfahren ist bislang das in der Normung verankerte Verfahren zur Berechnung der Diffusionsvorgänge. Aufgrund seiner Einschränkungen ist es seit Jahren umstritten und es darf sich jeder seine eigenen Gedanken darüber machen, warum es so vieler Jahre bedarf, bis Fehler korrigiert werden.

Die folgenden Zitate sind aktuellen Dokumenten von der Homepage des Instituts für Bauphysik, welches i.a. als bauphysikalischer Vorreiter oder auch als „Gralshüter der deutschen Bauphysik“ betrachtet wird, entnommen. Die getroffenen Aussagen sind bezeichnend und selbsterklärend, so dass sich eine Kommentierung erübrigt. Eine zusammenfassende Bemerkung sei gestattet: schön, was alles bekannt ist. Es waren nicht zu allen Dokumenten die Erstellungsdaten verfügbar.

"Dort, wo die Weisheit des Glaser- Verfahrens endet, beginnt die Arbeit der ingenieurmäßigen Planung einer hygrothermisch tauglichen Konstruktion." (Jenseits von Glaser, AufbauSeminar Holz, IBP). Themen: 1. Jenseits von Glaser – Feuchtdynamik bei Holz und Holzwerkstoffen (RBL) ... 5. WUFI® 2D: Zweidimensionale Simulation von Wärme- und Feuchtetransport an Hand von Holzbaubeispielen (Zirkelbach).

"Für die Beurteilung umstrittener Bauteilkonstruktionen hat das alte "Glaser-Verfahren" ausgedient. Warmdächer mit Sondereindeckungen (z.B. Blech, Gründächer und Schiefer), Innendämmungen von Altbauwänden und andere alltägliche Spezialfälle können mit modernen instationären hygrothermischen Berechnungsverfahren weit sicherer beurteilt werden als mit der statischen Diffusionsberechnung nach DIN 4108-3. Deshalb ist es nur folgerichtig, dass in der Neufassung von 2001 die "Tauwasser-Norm" an verschiedenen Stellen auf genauere, ingenieurmäßige Rechenmethoden verweist." (Jenseits von Glaser – Basisseminar, Neue Möglichkeiten der bauphysikalischen Planung, IBP), Themen: Praktischer Einsatz moderner Rechenverfahren, Grenzen des Glaserverfahrens.

"Stattdessen scheint man sich auf eine grundlegende Modifikation des Verfahrens zu einigen, die aus der quasi-stationären Berechnung ein instationäres Verfahren ... machen soll. Da dadurch die generellen Probleme des Glaser-Verfahrens, nämlich das Vernachlässigen von Sorptions- und Flüssigtransporteffekten nicht behoben werden, stellt diese Modifikation aus bauphysikalischer Sicht keine Verbesserung der Situation dar. (IBP-Mitteilung 355, 26 (1999)).

"Während die rechnerische Erfassung der Wärme- und Feuchteverhältnisse in Bauteilen bisher im Wesentlichen auf stark vereinfachte Bewertungsmethoden wie z.B. das Glaser-Verfahren beschränkt war, existieren mittlerweile Computerprogramme, die eine realistische und detaillierte Simulation des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen unter natürlichen Randbedingungen erlauben." (Merkblatt 6-1-01/D, Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen, IBP)

"Die beschriebenen Simulationsverfahren berücksichtigen im Gegensatz zu den stationären Normberechnungen nach Glaser die Wärme- und Feuchtespeicherung von Baustoffen sowie Latentwärmeeffekte durch Verdunstung und Kondensation und das parallele Auftreten von Dampfdiffusion und Flüssigtransport. Als klimatische Randbedingungen sind neben Temperatur und relativer Feuchte auch Strahlungs- und Niederschlagseinflüsse erfassbar. Die hygrothermischen Materialkennwerte werden in der Regel aus den Datenbanken der Simulationsprogramme entnommen." (Merkblatt 6-2-01/D, Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, IBP)

"Zur Beurteilung von Feuchtetransportvorgängen betrachtete man in der sog. Praxis bislang als einzige Ursache die Dampfdiffusion mit Tauwasserbildung und verwendete dazu das allgemein anerkannte und genormte Glaser-Verfahren. Dieses wird deshalb auch entsprechend häufig benutzt, leider auch in zahlreichen Fällen, in denen die Anwendungsvoraussetzungen nicht erfüllt sind." (Software / WUFI / Seminare, IBP)

"Ein bisher gängiges Verfahren zur Beurteilung des Feuchtehaushalts eines Bauteils durch Betrachtung des auftretenden Diffusionstransports stellt das Glaser-Verfahren nach DIN 4108 dar. Dieses Verfahren berücksichtigt jedoch weder den kapillaren Feuchtetransport im Bauteil, noch dessen sorptive Aufnahmefähigkeit für ausfallende Feuchte. Ferner kann das mit stationären Zuständen unter pauschalen Blockrandbedingungen arbeitende Verfahren weder kurzfristige Ereignisse abbilden, noch Regen und Strahlung berücksichtigen. Es ist für die feuchteschutztechnische Bewertung eines Bauteils gedacht, nicht für die Simulation realistischer Wärme- und Feuchtezustände eines Bauteils unter standortbedingten Klimaverhältnissen." (Software / WUFI / Einführung, IBP)

"Beim Thema Feuchtetransport durch Bauteile denkt der Praktiker in erster Linie an Dampfdiffusion, Taupunkt und das Glaser-Verfahren in der DIN 4108. Wird ein Bauteil nach "Glaser" als unbedenklich eingestuft, so ist in der Regel damit für den Planer alles erledigt. Erst wenn dennoch unerwartet Feuchteschäden auftreten, oder das geplante Bauteil bei der Normberechnung nach Glaser durchfällt, wird nach alternativen Beurteilungsmöglichkeiten gesucht. Da die winterliche Tauwasserbildung durch Dampfdiffusion nur eine Feuchtebelastung unter vielen darstellt, kann eine positive Bewertung nach DIN 4108 eine nicht vorhandene Feuchtesicherheit vortäuschen." (Software / WUFI / Grundlagen / Überblick über WUFI , IBP)

"Um auch diese Einflüsse [gemeint ist Feuchte, dib] erfassen zu können, muß von dem einfachen stationären Bewertungsverfahren nach Glaser zur realitätsnahen Simulation der Feuchteverhältnisse in Bauteilen übergegangen werden. Zu diesem Zweck sind in den letzten Jahren neue instationäre Rechenverfahren entwickelt und experimentell validiert worden, deren Zuverlässigkeit inzwischen so groß ist, daß sich ihr Einsatz auch in der Praxis immer mehr durchsetzt. Dieser Tatsache wird auch im Neuentwurf der DIN 4108 Teil 3 durch entsprechende Hinweise Rechnung getragen." (Software / WUFI / Grundlagen / Überblick über WUFI , IBP)

"Die rechnerische Simulation des instationären Wärme- und Feuchtetransports bietet auch für die Praxis zahlreiche Vorteile. So sind etwa die folgenden Einsatzbereiche und Aussagemöglichkeiten in Bezug auf das klimabedingte hygrothermische Bauteilverhalten zu nennen, die über die bisherigen Beurteilungsmöglichkeiten nach Glaser deutlich hinausgehen:

- reale Tauwassersituation während der Heizperiode unter Berücksichtigung von Wasserdampfsorption und Kapillarleitung
- Austrocknen von Baufeuchte
- Sommerkondensation durch Umkehrdiffusion
- solare Einstrahlung, Schlagregenbelastung und Oberflächenbetauung bei Dächern und Fassaden
- Feuchteeinfluß auf Energiehaushalt" (Software / WUFI / Grundlagen / Überblick über WUFI , IBP)

"Eine genaue Erfassung der wärme- und feuchtechnischen Prozesse in Baustoffen und Bauteilen ist deshalb nicht nur wünschenswert sondern dringend erforderlich. Beurteilungen mit den bisher eingeführten, ausschließlich auf der Dampfdiffusion basierenden Berechnungsmethoden, wie z.B. dem Glaser-Verfahren, sind hierfür nur in Ausnahmefällen geeignet. Die rechnerische Simulation des instationären Temperatur und Feuchteverhaltens unter Berücksichtigung aller wesentlichen Transportmechanismen bei natürlichen Klimabedingungen ist inzwischen jedoch so weit entwickelt und auch in der Praxis erprobt, daß ihre konsequente Anwendung in vielen Bereichen des Hochbaus sinnvoll erscheint." (Software / WUFI / Grundlagen / Überblick über WUFI , IBP)

"Das Glaser-Verfahren ist für eine solche Prüfung [es geht hierbei um den Abtransport von Tauwasser, dib] nur sehr bedingt geeignet, da die pauschalierten Randbedingungen den tatsächlichen Gegebenheiten nicht gerecht werden können. Im Gegensatz zur landläufigen Meinung liegen die mit diesem Verfahren erhaltenen Ergebnisse auch nicht immer auf der sicheren Seite..." (Hartwig M. Künzel, Feuchteschutz unbelüfteter Steildächer)

"Es soll hier ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass mit Hilfe des genormten Glaser-Verfahrens keine Aussagen zum allgemeinen Feuchteschutz möglich sind, da ausschließlich die

winterliche Tauwassergefahr unter stationären Bedingungen beurteilt werden kann. Andere Feuchtelasten, wie z.B. Baufeuchte, Niederschlagswasser und Sommerkondensation oder Klima- bzw. Nutzungsbedingungen, die nicht der üblichen Situation in Wohngebäuden entsprechen, können nicht angemessen berücksichtigt werden. Dazu sind hygrothermische Bauteilsimulationen erforderlich" (Software / WUFI / Anwendung / Normen und Merkblätter)

"Die üblichen Baumaterialien haben immer eine gewisse Aufnahmefähigkeit für Feuchte (Sorptionfähigkeit). Diese Sorptionsfähigkeit puffert Änderungen der relativen Feuchte in der Wand. Wenn Sie Randbedingungen anlegen, die in einer Glaserrechnung zu sofortigem Tauwasserausfall führen würden, werden Sie in einer realistischen Untersuchung (wie sie von WUFI durchgeführt wird) in den meisten Fällen kein Tauwasser erhalten.

Das liegt daran, daß eine relative Feuchte von 100% (Voraussetzung für Kondensation) einem Wassergehalt gleich der freien Sättigung des betreffenden Materials entspricht, und daß diese Wassermenge daher erst in die Tauregion transportiert werden müßte, um 100% rF zu erreichen. Die Diffusionsströme sind zwar in der Tat zur Tauregion hin gerichtet, aber die so transportierten Feuchtemengen sind in der Regel klein und die rF wird daher nur langsam ansteigen, z.B. von ursprünglich 80% auf 81%, etwas später auf 82% usw. Es kann unter Umständen Tage oder Wochen dauern, bis genügend Wasser in die Tauregion transportiert wurde, so daß dort schließlich die freie Sättigung des Materials (und damit rF=100%) erreicht wird. Währenddessen werden sich die Randbedingungen geändert haben und es liegen gar keine Taubedingungen mehr vor.

Die Glaser-Methode nimmt stattdessen einfach an, daß sofort 100% erreicht werden, sie berücksichtigt nicht die Notwendigkeit, erst Wasser transportieren zu müssen, um einen Wassergehalt zu erreichen, der 100% rF entspricht.

Darüber hinaus haben reale Materialien (im Gegensatz zu Glaser) meist eine gewisse kapillare Leitfähigkeit, welche versucht, Feuchteansammlungen wieder auseinanderlaufen zu lassen. Dieser Effekt arbeitet also aktiv gegen lokale Feuchteansammlungen, so daß es nicht leicht ist, 100% rF zu erreichen.

Natürlich können und werden Sie in Ihrem Bauteil Feuchteansammlungen erhalten, wenn die Randbedingungen dafür günstig sind. Diese erhöhten Feuchtegehalte werden aber selten mit 100% rF einhergehen. Wenn Sie sehen, daß die relative Feuchte irgendwo in ihrem Bauteil sich 100% nähert, ist der Schaden vermutlich schon passiert... " (Software / WUFI / Anwendung / F&A)

"Feuchteschutz wird in der Praxis häufig mit Tauwasserschutz verwechselt. Eine Glaser-Berechnung wird oft fälschlicherweise als Beweis für die Feuchtesicherheit von Baukonstruktionen angesehen. Die Folgen dieser Fehleinschätzung sind Gerichts- und Reparaturkosten in Milliardenhöhe allein in der Bundesrepublik Deutschland. Dabei sagt bereits die DIN 4108-3 in der Fassung vom Juli 2001 ganz deutlich, dass das Glaserverfahren z.B. zur Beurteilung von Gründächern oder Konstruktionen mit Rohbaufeuchte ungeeignet ist und verweist in diesem Zusammenhang auf hygrothermische Simulationsrechnungen." (Pressemitteilung 22.10.2002, IBP)

"Dieses einfache stationäre Bewertungsverfahren weist jedoch folgende wesentliche Beschränkungen und Näherungen auf:

- Berechnungen sind nur mit stationären Randbedingungen möglich
- Feuchtetransportvorgänge werden nur infolge Wasserdampfdiffusion berücksichtigt
- sämtliche Speichervorgänge und Weiterleitungseffekte werden nicht erfasst
- Temperatur- und Feuchteberechnungen werden unabhängig voneinander betrachtet" (Holm, Sedlbauer, Künzel, Moderne Rechenverfahren für die Diagnostik, November 2000)

[- nach oben -](#)

## **Unrealistische Normen**

**Die Berechnungsverfahren der Normen erlauben keine realistische Einschätzung der Feuchte- und Wärmebilanz von Bauteilen**

Das zur Beurteilung des Wärmeschutzes von Gebäuden einschließlich der Berechnungen zu den Bedarfswerten an Heiz-, End- und Primärenergie gemäß Verordnung heranzuziehende Normenwerk

stellt sich bei genauerer Betrachtung als in der Fachwelt sehr umstritten dar. Zahlreiche Fachleute stellen das Rechenwerk nach DIN 4108, respektive EN 832, DIN 4701 u. a., in Frage.

Dass eine große Masse von Fachleuten die Ergebnisse der Normungstätigkeit des privat organisierten Deutschen Instituts für Normung (DIN e.V.) kommentarlos hinnimmt, muss daher nicht zwangsläufig darauf hinweisen, dass es sich bei diesem speziellen Normenwerk um allgemein anerkannte Regeln der Technik handelt.

Vielen Fachleuten sind sich dessen bewusst, dass die DIN-Normen das Ergebnis privatwirtschaftlichen Handelns bzw. Vereinbarungen interessierter Kreise sind. Insofern gibt sich der Fachmann einer trügerischen Hoffnung hin, der mit Verweis auf die „Einhaltung der gültigen DIN-Normen“ meint, den anerkannten Regeln der Technik zu genügen.

Hierzu hat der BGH mit Urteil vom 14.05.1998 - VII ZR 184/97 (Immobilien- & Baurecht 1998, S. 377) festgestellt, dass die DIN-Normen keine Rechtsnormen sind, sondern private technische Regelungen mit Empfehlungscharakter. Sie können die anerkannten Regeln der Technik wiedergeben oder hinter diesen zurückbleiben.

Es gibt insbesondere auf dem Gebiet des Wärmeschutzes von Gebäuden seit Jahren ernsthafte Hinweise von Fachleuten auf offensichtliche Defizite im hierzu bestehenden Normenwerk. Diese werden durch Untersuchungen von Prof. Hauser aus 2002 bestätigt. Der Autor plädiert dafür, die Kenraussagen in den Rang von Lehrsätzen zu erheben. Sie sind deshalb exponiert dargestellt.

Im Jahre 2002 führte das Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH - gefördert durch die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. und mit Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik - ein Forschungsvorhaben zu Auswirkungen der neuen europäischen Norm EN ISO 13788 „Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren“ durch.

In der Zusammenfassung [1] wird dargelegt, wie eine Bewertung von Dächern und Wänden nach DIN 4108 und DIN EN ISO 13788 sowie nach dem in DIN 4108-3 (vorher in Teil 5) verankerten Glaserverfahren erfolgt. Weiterhin geht es um die Ermittlung der Feuchteverteilung in Bauteilen unter natürlichen Randbedingungen auf der Grundlage von thermischen und hygri-schen Simulationsrechnungen.

Der Feuchteschutz nach DIN 4108-07 soll bewirken, dass

- die Tauwassermenge im Bauteilinneren begrenzt wird,
- eine kritische Oberflächenfeuchte vermieden wird und
- das Eindringen von Schlagregen minimiert wird.

Dadurch sollen

- Schäden an Bauteilen,
- eine Beeinträchtigung des Wärmeschutzes und
- eine Schimmelpilzbildung

vermieden werden.

Aufgrund der Nutzungs- und Einbausituation ist in jedem Einzelfall zu prüfen, ob ergänzende Untersuchungen zu führen sind. Die Normen gehen von abgetrockneter Einbaufeuchte und nur von Feuchteeinwirkung über das Innen- und Außenklima aus. Wer sich als Planer und/oder Sachverständiger allein auf DIN 4108 und das Glaserverfahren verlässt bzw. sich darauf beruft, der vergebewärtigt sich Prof. Hausers warnenden Hinweis hierzu:

**„Der in Ansatz gebrachte Wassertransport in den Bauteilen berücksichtigt allein die Wasserbewegung infolge von Diffusion. Andere Transportphänomene, die wie die Kapillarleitung den Feuchtetransport dominieren können, bleiben unberücksichtigt. Auch die von den Materialeigenschaften abhängige Wasserspeicherfähigkeit wird nicht in Ansatz gebracht. Deshalb ist es mit dem Nachweisverfahren nicht möglich, Rückschlüsse auf die sich in Bauteilen ansammelnde Wassermenge zu ziehen und realistische Wassergehalte zu ermitteln.“**

Auf die Anforderungen zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte wird in DIN EN ISO 13788 nicht eingegangen. Gemäß Norm muss der Anwender darüber entscheiden, ob Einschränkungen vernachlässigbar sind und damit das vereinfachte Nachweisverfahren geeignet ist. Dies dürfte für den vorgegebenen Anwender durchaus eine Herausforderung darstellen.

An Phänomenen, welche das Berechnungsmodell vernachlässigt, nennt Prof. Hauser:

- die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt,
- die Freisetzung und der Verbrauch latenter Wärme,
- die Veränderung der Stoffeigenschaften in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt,
- die Saugwirkung von Kapillaren und der Transport von Feuchte in der flüssigen Phase
- die Luftbewegung durch Spalten oder in Luftschichten,
- das hygroskopische Verhalten von Baustoffen

Manch ein Sachverständiger wird an dieser Stelle rekapitulieren, diese Dinge zumindest während des Studiums behandelt zu haben und durchaus bereit sein, diese Dinge als gemeinhin bekannt anzuerkennen. Daraus folgt dann aber die Konsequenz, in Frage zu stellen, dass es nach dem Glaserverfahren genügt, dass die Tauwassermenge nicht den (nach Norm) kritischen Wert von 1,0 Liter/m<sup>2</sup> überschreitet und dass die mögliche Verdunstungsmenge größer ist als die Tauwassermenge.

Weiter oben haben wir erfahren, dass gemäß Norm der Anwender darüber entscheiden muss, ob diese Einschränkungen vernachlässigbar sind. Hierzu führt Prof. Hauser aus:

***„Die Berechnungsverfahren der Normen enthalten Vereinfachungen, die es nicht erlauben, eine realistische Einschätzung der Feuchtebilanz von Bauteilen vorzunehmen. Die Ergebnisse können nur mit modellkonformen Kriterien eingeschätzt werden.“***

Zudem stellt Prof. Hauser im Ergebnis der Untersuchungen fest, dass nur durch eine hygrische und thermische Simulation eine realitätsnahe Beurteilung von Konstruktionen möglich ist.

***„Soll die Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen überprüft werden, reicht ein formaler Nachweis, wie ihn das Glaserverfahren gemäß 4108-3:2001-07 darstellt, nicht aus. Unter praktischen Bedingungen zu erwartende Wassergehalte müssen ermittelt und kritisch beurteilt werden.“***

Einschränkend verweist Prof. Hauser darauf hin, dass Anfang 2003 allgemeingültige Kriterien für die Beurteilung des Feuchteschutzes auf der Grundlage von Simulationsergebnissen noch nicht zur Verfügung stehen. Dem Autor sind keine neueren Quellen bekannt, die diese Einschränkung revidieren.

***„Die Auswertung der Berechnungsergebnisse von DIN EN ISO 13788:2001-11 und den Simulationsrechnungen zeigen, dass bei monolithischen und zweischaligen Wänden eine Bewertung ohne Erweiterung des Berechnungsverfahrens zur Berücksichtigung der Kapillarleitung nicht sinnvoll ist.“***

Die Forderung, dass der Wärmeschutz von Außenbauteilen durch die Einwirkung von Feuchte nicht verschlechtert werden darf und dass daher die maximalen Wassergehalte von Bauteilschichten, die für die Wärmedämmung verantwortlich sind, weit unter der Sättigung bleiben müssen, sollte als nicht zu beanstanden und selbst für den Laien nachvollziehbar zu betrachten sein.

Mit den folgenden zwei Aussagen kann der Autor nicht konform gehen.

1. „Die bestimmende Größe für den Wärmestrom durch Außenbauteile ist die Wärmeleitfähigkeit, deren maßgebender Bemessungswert nach DIN V 4108-4:2002-02 bei einer Temperatur von 23°C und einer Ausgleichsfeuchte von 80% r.F. festgelegt wird.“

Die bestimmenden Größen für den Wärmestrom durch Außenbauteile ist neben der Rohdichte und der Wärmekapazität die Wärmeleitfähigkeit, wie es die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung beschreibt. Die normativ veranlasste Nullsetzung des Terms mit  $\rho$  und  $c_p$  (siehe BGH zum Wesen der

DIN-Normen, oben) mag für den stationären Laborbetrieb gelten – eine Praxistauglichkeit ist aufgrund der instationären Zustände daraus nicht abzuleiten.

2. „Verbleibt der maximale Wassergehalt innerhalb der für den Wärmeschutz maßgebenden Bauteilschichten unter der Ausgleichsfeuchte von 80% r.F., liegt keine Verschlechterung des Wärmeschutzes vor.“

Die Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes wird sowohl von der Temperatur und in besonderem Maße von der Feuchte beeinflusst. 80% rel. Luftfeuchte sind bei +20°C mehr an Wasser in g/m<sup>3</sup> als bei nur noch +10°C oder bei 0°C. Je kälter die Luft ist, desto weniger Wasser kann sie in Dampfform aufnehmen. Unterstellt man eine im Bauteil durchgehende rel. Luftfeuchte von 80%, ergibt sich bei von innen nach außen sinkender Temperatur, dass die Differenz dieser Wassermengen als ausgefallenes Tauwasser im Bauteil verbleibt. Eine Feuchtezunahme bewirkt eine Verschlechterung des Wärmeschutzes. [2]

Hierzu kann man sich eine eigene Meinung bilden; ein Blick in die Tabellen zur Wasserdampfsättigungsdichte, der Taupunkttemperatur und zum Wasserdampfsättigungsdruck stützt die hier getroffene Aussage. Zudem ist aus verschiedenen Quellen bekannt, dass Schimmelpilze zum Wachstum (eine Temperatur von ca. 20 °C, es reicht auch weniger, und) eine Luftfeuchtigkeit von über 70 % benötigen; es wird auch von 80 % unmittelbar entlang von Wandoberflächen als Grenzmaß berichtet.

Insofern darf hier der Verweis auf die Pflicht zur komplexen Betrachtung gestattet sein. Dass das Festhalten an normativen Vorgaben hierfür nur eine trügerische Sicherheit geben kann, bestätigen die Untersuchungsergebnisse von Prof. Hauser sehr deutlich.

[1] Hauser, Prof. Dr.: Forschungsvorhaben „Auswirkungen der neuen europäischen Norm EN ISO 13788 „Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren“ auf Konstruktion und Holzschutz von Außenbauteilen in Holzbauart“, Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH, Wärme, Energie, Feuchte, Schall, Tageslicht, Baunatal, Zusammenfassung, Aktenz.: IBH 457/02, 31.01.2003

[2] Bumann, Matthias: Sorption. Eine Betrachtung zum Thema „Feuchte im Bauteil Außenwand“, SICC GmbH, 27.04.2005

Literatortipp: Sie erhalten den Fachartikel „Sorption“ kostenlos im Internet bei [www.richtigbauen.de](http://www.richtigbauen.de) im Download.

[- nach oben -](#)

## Ausgleichsfeuchte

Die Ausgleichsfeuchte ist die stoffspezifische Feuchte eines porösen Baustoffs, die mit der Luftfeuchte der Umgebung im Gleichgewicht steht. Die Ausgleichsfeuchte, früher auch Haushaltsfeuchte genannt, wird mit einem CM-Feuchtigkeitsmessgerät am Bau gemessen und soll für sach- und fachgerechte, schadensfreie Arbeiten bestimmte Werte nicht überschreiten.

Die folgende Zusammenstellung von Werten der Ausgleichsfeuchte liefert einen repräsentativen Querschnitt. Angegeben sind die Werte für verschiedene Materialien, wobei der Schwerpunkt auf Holz zu liegen scheint. Tatsächlich hat man sich hinsichtlich der Feuchte hinsichtlich Forschung und Quantifizierung anfänglich schwerpunktmäßig mit dem Baustoff Holz befasst.

% relative Luftfeuchte	Werte für Holzausgleichsfeuchte						
	90 %	21,1	21,0	21,0	20,8	20,0	19,8
85 %	18,1	18,0	18,0	17,9	17,5	17,1	16,9



80 %	16,2	16,0	16,0	15,8	15,5	15,1	14,9
75 %	14,7	14,5	14,3	14,0	13,9	13,5	13,2
70 %	13,2	13,1	13,0	12,8	12,4	12,1	11,8
65 %	12,0	12,0	11,8	11,5	11,2	11,0	10,7
60 %	11,0	10,9	10,8	10,5	10,3	10,0	9,7
55 %	10,1	10,0	9,9	9,7	9,4	9,1	8,8
50 %	9,4	9,2	9,0	8,9	8,6	8,4	8,0
45 %	8,6	8,4	8,3	8,1	7,9	7,5	7,1
40 %	7,8	7,7	7,5	7,3	7,0	6,6	6,3
35 %	7,0	6,9	6,7	6,4	6,2	5,8	5,5
30 %	6,2	6,1	5,9	5,6	5,3	5,0	4,7
25 %	5,4	5,3	5,0	4,8	4,5	4,2	3,8
Temp. [°C]	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°

Tabelle 17: Werte für Holzgleichsfeuchte nach R. Kaylwert und Angaben des U.S. Forest Products Laboratory, Madison 1951

Bauwerke allseitig geschlossen mit Heizung	6% - 12%
Bauwerke allseitig geschlossen ohne Heizung	9% - 15%
Bauwerke überdeckt, offen	12% - 18%
Konstruktionen, die der Witterung allseitig ausgesetzt sind	12% - 24%

Tabelle 18: Werte der Holzfeuchte als Gleichgewichtsfeuchte nach DIN 1052-1

Frisch geschlagenes Holz	mind. 40 ... 60 %
Holzfeuchte beim Einbau	Ausgleichsfeuchte
Parkettverlegearbeiten	Raumklima ↔ Ausgleichsfeuchte 9... 11 %
sichtbare Balken beim Einbau	15 %
Bauschnittholz	max. 20 %
Bauschnittholz, Austrocknen ungehindert möglich	> 20 %

Tabelle 19: Verschiedene zulässige Werte der Holzfeuchte

Historischer Vollziegel	2 - 3%
Vollziegel (Rohdichte 1.900)	< 1%
Porosierter Hochlochziegel	0,75%
Kalkputz, Kalkmörtel	< 0,5%
Kalkzementputz	< 1,5%
Kalksandstein	1,3%
Toniger Sandstein	< 1,3%
Karbonatischer Sandstein	< 0,8%
Granit	0,1%
Marmor	0,01%

Tabelle 20: Ausgleichsfeuchten unterschiedlicher mineralischer Baustoffe (bei 75% ... 80% rel. LF)

Bodenbelag	Zement-Estrich	Anhydrit-Estrich
------------	----------------	------------------

Stein- und keramische Beläge im Dünnbett	2,0%	0,5%
Stein- und keramische Beläge im Mörtelschicht auf Trennschicht	2,0%	0,5%
Stein- und keramische Beläge im Dickbett	2,5%	0,5%
Dampfdurchlässige textile Bodenbeläge	2,5%	1,0%
Dampfbremsende textile Bodenbeläge	2,0%	0,5%
Elastische Bodenbeläge (z.B. PVC, Gummi, Linoleum)	2,0%	0,5%
Parkett	2,0%	0,5%

Tabelle 21 Maximaler Feuchtigkeitsgehalt von Estrichen, maßgebend für die Belegereife

Betongrund	< 3,0 CM %
Zementestrich	< 2,5 CM %
Gips- und Anhydritestrich	< 0,7 CM %
Anhydritfließestrich	< 0,5 CM %
Magnesit-Estrich	< 4,0 CM %
Steinholz-Estrich	< 10,0 CM %

Tabelle 22: Grenzwerte für Bodenbelag- und Parkettarbeiten

Porenbeton hat eine Ausgleichsfeuchte 2 Vol.-% / 4 M.-%, baufeucht eingebaut bringt er es auf 18...24 Vol.-%. Das frei bewitterte, außen beschichtete Teil trocknet nach innen schneller ab als nach außen. Nach 2 Jahren stellt sich die Ausgleichsfeuchte ein. Quelle: Versuchsbericht Porenbetonindustrie

Anfang der 70er hat F. Eichler durchschnittliche und maximale Feuchtegehalte in Bau- und Dämmstoffen nach verschiedenen Autoren und Messungen in Kühlhäusern zusammengestellt. Aus der Übersicht geht hervor, dass eine konsequente Unterscheidung nach Masse- (M-%) und nach Volumenprozent (V-%) zu treffen ist und dass insbesondere Dämmstoffe ein ernst zu nehmendes Problem darstellen. Wenngleich sich die klimatischen Verhältnisse von Kühlhäusern nicht so ohne weiteres auf Wohngebäude übertragen lassen, sollten die Relationen zu denken geben. Denn: gemessen wurde die Gleichgewichtsfeuchte nach einem Jahr.

Baustoff	Masseprozent	Volumenprozent	Relation
Ziegel	1,4	2,5	1 : 1,8
Porenbeton	17,0	13,0	1,3 : 1
Holzwohleplatten	35,0	15,0	2,3 : 1
Holzfaserweichplatten	28,0	7,0	4,0 : 1
Polystyrol	33,5	0,5	67 : 1
Mineralfasermatten	10,0	1,0	10 : 1

Tabelle 23: Beispielwerte zum Vergleich von Masse- und Volumenprozent des Feuchtegehalts

Die in der obigen Tabelle aufgeführten Relationen sollten nicht allzu sehr verwundern, da eine gewisse Kenntnis der Materialeigenschaften vorausgesetzt werden darf. Bei Dichteunterschieden von über 1.500 kg/m<sup>3</sup> leuchtet das ein. Hingegen mögen die gemessenen Werte auch viele Vertreter der Fachwelt überraschen, zumal einige drastisch von dem entfernt liegen, was als normierter Wert angegeben ist. Der Tabellenauszug beschränkt sich auf die gängigsten Baustoffe (z.B. ist Harnstoff-Formaldehyd-Dämmstoff 15 kg/m<sup>3</sup> mit 40,0 (65,0) -% dabei).

Baustoff	Dichte	M-% Ø (max.)	V-% Ø (max.)
Ziegel, Raumklima normal feucht	1.800	0,6 (1,4)	1,0 (2,5)
Ziegel, Raumklima feucht, naß	1.800	1,0 (1,5)	1,7 (2,7)
Hochlochziegel	1.600	1,0 (2,5)	1,5 (4,0)

Hochlochziegel	1.400	1,0 (2,9)	1,4 (4,0)
Stahlbeton	> 2.200	2,1 (3,8)	5,0 (9,0)
Stahlbeton	1.800	2,5 (4,5)	5,0 (9,0)
Gasbeton	< 800	4,5 (17,0)	3,5 (13,0)
Außenputz (Zementmörtel)	2.000	1,3 (3,0)	2,5 (6,0)
Außenputz (Kalkzementmörtel)	1.800	1,7 (3,9)	3,0 (7,0)
Innenputz (Kalkzementmörtel)	1.600	2,0 (5,0)	3,0 (8,0)
Innenputz (Kalkgipsmörtel)	1.400	2,0 (6,0)	3,0 (8,5)
Innenputz (Gipsmörtel)	1.200	1,8 (5,8)	2,0 (7,0)
Weichholz	500	12,0 (24,0)	6,0 (12,0)
Holzwohleplatten (Zement)	420	14,0 (35,0)	6,0 (12,0)
Holzfaserplatten	~ 300	10,0 (22,0)	5,0 (10,0)
<b>Dämmstoff</b>			
Mineralfasermatten	100	5,0 (10,0)	0,5 (1,0)
Holzfaserweichplatten	250	10,0 (28,0)	2,5 (7,0)
Polystyrolschaumplatten	15	13,3 (33,5)	0,2 (0,5)
Polystyrolschaumplatten	25	12,0 (24,0)	0,3 (0,6)
Polystyrolschaumplatten	40	7,5 (18,5)	0,3 (0,7)
Polyurethanschaumplatten	20	10,0 (30,0)	0,2 (0,6)
Polyurethanschaumplatten	35	8,5 (28,5)	0,3 (1,0)

Tabelle 24: Gemessene Werte der Gleichgewichtsfeuchte von Baustoffen in Kühlhäusern nach 1 Jahr

[- nach oben -](#)

## Kapillarität

[- nach oben -](#)

### Grundlagen

Unter Kapillarität versteht man die Erscheinung, dass in einer engen Röhre (Kapillare) eine Flüssigkeit höher oder tiefer steht, als es nach dem Gesetz von verbundenen Gefäßen sein dürfte. Zu den Eigenschaften von Wasser sei hier auf den [Link: Fachartikel „Wasser“] verwiesen (Grundlagenwissen).

Die Kapillarität ist eine physikalische Eigenschaft, die den Transport von Flüssigkeiten und darin enthaltenen Stoffen innerhalb feinsten Haarröhrchen, Poren und Spalten in alle Richtungen, also auch entgegengesetzt zur Schwerkraft bewirkt. Im Unterschied zu Leitungen größeren Querschnitts kann somit der Transport von benetzenden Flüssigkeiten ohne zusätzliche Energie erfolgen.

Am bekanntesten ist der Versuch mit den unterschiedlich dünnen Glasröhrchen, in denen die Flüssigkeit beim Eintauchen unterschiedlich hoch steigt. Aus der Formel für die kapillare Steighöhe

$$h_{\text{kapillar}} = 2 \sigma \cos\theta / r_{\text{kapillar}} \rho g \quad (\text{mit } \sigma = 72 \times 10^{-3} \text{ N/m}, \rho = 1,0 \text{ und } \theta = 90^\circ)$$

lässt sich die Relation  $h_{\text{kapillar}} = 1,468 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / r_{\text{kapillar}} = 0,01468 \text{ m} \times \text{mm} / r_{\text{kapillar}}$  ableiten.

Man erhält damit kapillare Steighöhen:

$h_{\text{kapillar}}$	1,47 cm	14,7 cm	1,47 m	14,7 m	147,0 m
-----------------------	---------	---------	--------	--------	---------

r <sub>kapillar</sub>	1,0 mm	0,1 mm	0,01 mm	0,001 mm	0,000.1 mm
	Porenbeton		Mörtel	Ziegel	Beton

Tabelle 10: Kapillare Steighöhe und Kapillarradius

Die Kapillarität wird begründet durch Adhäsion, Kohäsion und Oberflächenspannung. Unter Oberflächenspannung versteht man das Verhältnis der zur Vergrößerung der Oberfläche erforderlichen Arbeit zur Oberflächenänderung (vergl. oben: Kapitel „Sorption“).

Eine benetzende Flüssigkeit wird in einer Kapillare (auch nach oben) weiter gezogen. Ursache ist die Oberflächenspannung. Die nötige Energie kommt aus der Wechselwirkung der Flüssigkeit mit der Kapillarwand. Wasser ist eine benetzende Flüssigkeit, es wird in Richtung der Kapillare gezogen. Zum Vergleich: Quecksilber ist eine nicht benetzende Flüssigkeit, es zieht sich zurück.

Der Grad der Benetzbarkeit ist durch Hilfsstoffe beeinflussbar, er reicht von hydrophil (Wassertropfen wird von der Oberfläche aufgenommen, Bsp.: Löschpapier) bis hydrophob (Wassertropfen liegt auf der Oberfläche, Bsp.: gewachster Autolack).

Material	σ in mN/m (dyn/cm)
Äther	17
Teflon	18
Polystyrol	33
PVC	39
Wasser	73
Quecksilber	> 500

Tabelle 11: Werte der Oberflächenspannung versch. Materialien

In Bauteilen aus Schichten mit unterschiedlicher Kapillarstruktur wandert das Wasser immer in Richtung der Schicht mit den feineren Kapillaren, die somit den höheren Wasseraufnahmekoeffizienten besitzt – es gilt das bauphysikalische Grundprinzip „von groß nach klein“ bezüglich des Kapillartransports. Beim Kapillartransport werden bedeutend größere Wassermengen transportiert als bei Diffusionsvorgängen.

Poröse Stoffe nehmen auf Grund ihrer Struktur durch die an den Porenwänden wirkenden van der Waal-Kräfte Feuchtigkeit auf, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Mit steigender Luftfeuchte nimmt die Gleichgewichtsfeuchte zu. Eingelagerte Salze verstärken die Feuchteeinlagerung im Baustoff (Wasserbindung).

Als Hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet man den Feuchtegehalt bei Lagerung in einer Atmosphäre mit einer bestimmten Luftfeuchte (z.B.: rel. LF 50%:  $u_{50}$ ); der praktische Feuchtegehalt ist der Feuchtegehalt, der bei Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Menschen dienen, in 90% aller Fälle nicht unterschritten wird ( $u_p$ ).

Der Wassergehalt eines Baustoffes wird masse- ( $u_m$ ) oder volumenbezogen ( $u_v$ ) angegeben, indem die Massen bzw. die Volumina von Wasser und Baustoff in Relation gesetzt werden. Bei massebezogener Angabe wird die Masse des trockenen Baustoffes – darunter versteht man die Masse des bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Stoffes – zugrunde gelegt. Eine Umrechnung kann mithilfe der Dichten erfolgen:  $u_m = \rho_{\text{Wasser}} / \rho_{\text{proh,baustoff}} \times u_v$ .

Mit zunehmender rel. Luftfeuchte und zunehmendem Kapillardurchmesser (in der Größenordnung  $10^{-6}$  ...  $10^{-5}$  mm!) nimmt der Anteil des gebundenen Wassers zu (vergl. Einführende Hinweise im Kapitel „Sorption“). Mit Annäherung an  $\phi = 100\%$  endet die hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme; ab da wirken Adhäsion und Kohäsion für die Wasseraufnahme eines porösen Stoffes (Übergang vom hygrischen in den kapillaren Bereich).

Kapillarradius	Wasserbindung		
$3 \times 10^{-6}$ ... $5 \times 10^{-6}$ mm	monomolekular		

$5 \times 10^{-6} \dots 1 \times 10^{-5}$ mm	multimolekular		
$1 \times 10^{-5} \dots 6 \times 10^{-5}$ mm	Kapillarkondensation		

Tabelle 12: Kapillarenradius und Wasserbindung

Baustoff	praktischer Wassergehalt			Poren-Raum
	nach DIN 4108 T4		n. Cammerer	
	V.-%	M.-%	V.-%	
Ziegel	1,5			17-26
Vollziegelwand			1-2,5	
Hohlziegelwand			1,5-4	
Sandstein				14-22
Kalksandstein	5		3,5-13	
Bims			3,5-13	
Beton				14-16
Beton m. geschlossenem Gefüge mit dichten Zuschlägen	5			
Beton m. geschlossenem Gefüge mit porigen Zuschlägen	15			
Leichtbeton m. haufwerksporigem Gefüge m. dichten Zuschlägen	5			
Leichtbeton m. haufwerksporigem Gefüge m. porigen Zuschlägen	4			
Kies- und Splittbeton			3,5-13	
Porenbeton	3,5		3,5-13	72
Gips, Anhydrit	2			
Kalkputz				24
Zementputz				14
Innenputze			1-10	
Außenputze			1-7	
Organische Stoffe (lose Schüttung), extr. Gesteinsglas, Bläherlit	5			
Mineral. Faserdämmstoffe (Glas, Stein, Hochofenschlacke)	1,5			
Holz, Sperrholz, Spanplatten, Holzfaserplatten, HWL-Pl., Schilfrohrplatten und -matten, organische Faserdämmstoffe	15			
Pflanzliche Faserdämmstoffe aus Seegrass, Holz-, Torf- und Kokosfasern und sonstigen Fasern	15			
Korkdämmstoffe	10			
Schaumstoffe aus Polystyrol, Polyurethan (hart)	5			

Tabelle 13: Werte der Kapillarität verschiedener Baustoffe

Der Wassergehalt lässt sich in Abhängigkeit von der Art der Wasseraufnahme weiter differenzieren:

Wassergehalt	Bezeichnung	Wasseraufnahme	Grad der Wasserfüllung
freiwilliger	Wasserkapazität	Saugen	kapillar aktive Poren sind gefüllt
normaler		Saugen & leichter Druck	offener Porenraum außer Sackporen ist gefüllt
maximaler	Sättigungswassergehalt	Saugen, Druck und Austreiben der Luft	der gesamte offene Porenraum ist egfüllt

Tabelle 14: Zustände des Wassergehaltes

Ein weiterer Begriff kommt hinzu, wenn man den Vorgang reversibel betrachtet, d.h. das Trocknen des porösen Stoffes. Es geht um den „kritischen Wassergehalt“. In diesem Zustand der Trocknung sind die Kapillaren nicht mehr durchgängig mit Wasser gefüllt; es findet kein Kapillartransport mehr statt, sondern nur noch Diffusionstrocknung.

Die hygroskopische Ausgleichsfeuchte ist der Wert, wo die Kapillarkondensation beginnt. Der Durchfeuchtungsgrad  $D$  ist gekennzeichnet als das Verhältnis von Feuchtegehalt zu Sättigungsfeuchte [ $D = u / u_{max}$ ].

Dass man hinsichtlich der Kapillarität mehrere feuchtetechnische Grundkennwerte kennen und anwenden muss, ist seit Mitte der 90er bekannt, 2001 haben Krus und Holm diese Erkenntnis in ihrem Approximationsverfahren für die Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte verarbeitet. Für den Transportkoeffizienten bei  $u_{80}$  wurde ein Wert von  $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  festgelegt. Die Transportkoeffizienten für den Saugvorgang sowie für die Trocknung wurden mittels Approximation gewonnen.

Material	Bezugsfeuchtegehalt $u_{90}$ [Vol.-%]	freie Wassersättigung $u_f$ [Vol.-%]	Wasser- aufnahme- koeffizient $w$ [kg/m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Transport- koeffizient Saugen $D_{s, (u)}$ [m <sup>2</sup> /s]	Transport- koeffizient Trocknen $D_{t, (u)}$ [m <sup>2</sup> /s]	Verhältnis $D_{t, (u)} / D_{s, (u)}$ [-]
Daumberger	3,6	21	2,6	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	2
Obernkirchner	0,28	9	2,8	$1,15 \cdot 10^{-6}$	nicht best.	-
Rätliener	1,2	18,5	18	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	3
Sender	1,9	12	1,2	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$4,13 \cdot 10^{-8}$	3
Kalksandstein	2,5	25	3,2	$3,14 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	5
Ziegel	0,31	34	15	$5,38 \cdot 10^{-6}$	$3,58 \cdot 10^{-6}$	1,5
Gipsputz	0,79	35	5,1	$2,0 \cdot 10^{-7}$	nicht best.	-

Bild 5: Feuchtetechnische Grundkennwerte der verwendeten Materialien und daraus berechnete exponentielle Approximationen der Flüssigtransportkoeffizienten bei freier Wassersättigung (Tabelle 2, Krus/Holm)

[- nach oben -](#)

## Porosität

Baustoffe sind mehr oder weniger porös, was sich auf ihr hygrisches Verhalten auswirkt.

Charakteristische Materialdichteangaben sind:

- Reindichte: Volumen des bis zur Porenfreiheit zerkleinerten Stoffes
- Rohdichte: Volumen des Kornes einschl. der Poren
- Schüttdichte: Volumen des Kornes einschl. der Poren und Kornzwischenräume

Hinsichtlich der Poren sind folgende Kenngrößen maßgebend:

- Volumenanteil in %
- Porenanzahl und -größe (> Oberflächensumme, Verdunstungsoberfläche)
- Porenform und -anordnung
- Öffnungscharakter (offenporig oder geschlossenzellig)
- Grad der Verzweigkeit und Durchgängigkeit

Die Porosität wirkt sich auf die Kapillarität (siehe folgendes Kapitel) aus. Die Auswirkung ist wie folgt gekennzeichnet:

- Wie schnell nimmt der Baustoff Wasser auf?
- Wie schnell gibt der Baustoff Wasser wieder ab?
- Wie viel Wasser wird bis zur Sättigung in den Poren aufgenommen?

Die Frage „Wie schnell nimmt der Baustoff Wasser auf?“ beantwortet der Wasseraufnahmekoeffizient, er gibt an, wie viel Wasser der Stoff innerhalb einer bestimmten Zeit aufnimmt. Angegeben wird der Wasseraufnahmekoeffizient  $w$  in  $\text{kg} / \text{m}^2 \times \text{h}^{0,5}$ . Für  $\text{h}^{0,5}$  kann man auch  $\sqrt{h}$  schreiben (Quadratwurzel).

Aussagen zum Porengehalt und zur Sättigung werden damit aber noch nicht getroffen. Interessant ist auch die Frage: „Weiß ich, wie schnell der Baustoff Wasser wieder ab gibt, wenn ich weiß, wie schnell der Baustoff Wasser aufnimmt?“ Aus der praktischen Erfahrung heraus muss dies verneint werden.

Die Annahme „Wasseraufnahmekoeffizient = Wasserabgabekoeffizient“ wäre zu einfach, um wahr zu sein. In diesem Bereich der Bauphysik gilt: „rein geht's leichter als wieder raus“. Wie dies möglich ist und welche Rolle die oben aufgeführten Kenngrößen der Poren spielen, soll im Weiteren behandelt werden.

Hinsichtlich der Porengröße unterscheidet man nach Grob-, Fein- und Feinstporen. Grobporen (Makroporen) haben einen Porendurchmesser  $> 0,1 \text{ mm}$ , sie sind mit bloßem Auge sichtbar. Ab einem Porendurchmesser von  $0,3 \text{ mm}$  kann der Wind Regenwasser in die Kapillaren drücken, vergl. hierzu die Rissbeurteilung in der gutachterlichen Praxis.

Feinporen (Mikroporen) sind die Kapillarporen mit einem Porendurchmesser von  $0,1 \text{ mm}$  bis  $0,1 \mu\text{m}$  ( $0,0001 \text{ mm}$ ). Diese Kapillarporen transportieren das flüssige Wasser. Die Feinstporen (Ultramikroporen, Gelporen) mit einem Porendurchmesser von  $< 0,1 \mu\text{m}$  verursachen den Gleichgewichtsfeuchtegehalt und sie wirken beim langsamen, lang anhaltenden Wassertransport mit.

Hinsichtlich der Porenform ist zu unterscheiden nach

- Kugelform
- Stabform (Kanäle)
- Zwischenformen (resultierende)

Und hinsichtlich der Beschaffenheit der Wandungen (Öffnungscharakter) ist zu unterscheiden nach

- geschlossenzellig
- offenporig

Am besten lassen sich die Zustände anhand von Stoffbeispielen erklären. Die Kugelform lässt sich gut anhand von Tischtennisbällen modellieren, die man in eine Kiste schüttet. Es berühren sich immer mehrere Kugeln, im idealisierten Fall [Link: siehe Rechnen mit Bubbles II] wird die Mittelkugel in einem Würfelcluster von 18 Kugeln ( $3 \times 3 \times 3$ ) von 6 Kugeln berührt. Sind die Bälle unterschiedlich groß, wird das Modell realitätsnäher sein. Unabhängig davon ergeben sich für den Transportweg 2 Varianten:

- durch das Kugellinnere und über Wandungsöffnungen von Kugel zu Kugel (offenporig)
- immer zwischen den Kugeln hindurch bzw. um diese herum (geschlossenzellig)

**Porenbeton**

(auch Gasbeton und Ytong genannt) Die Kugelform ergibt sich herstellungsbedingt, hier entstehen die Kugelporen durch die Gasbläschen ( $\text{CO}_2$ ) beim Herstellungsprozess. Die Struktur ist offenporig, der Transportweg verläuft durch das Kugellinnere und über die Wandungsöffnungen von Kugel zu Kugel. Je kleiner die Wandungsöffnungen, umso schwieriger verläuft der Transport. Zudem verbleibt Wasser in der Kugel, weil es nicht an die Wandungsöffnung heran reicht (wie in einer Schüssel).

**ThermoShield**

Die Kugelform ergibt sich beimischungsbedingt aus den Keramik-Kugeln, die allerdings geschlossenzellig sind. Sie bilden lediglich eine gewisse Oberfläche, die bereits rechnerisch bestimmt wurde [Link: siehe Rechnen mit Bubbles II] Hier können sich Wassermoleküle anlagern und hier gehen Wärmestrahlungen hindurch [Link: Scattering]. Der Transportweg des Wassers ist also immer zwischen den Kugeln hindurch bzw. um diese herum. Hier liegen Mikroporen vor, die aus der getrockneten Substanz aus Bindemittel und Füllstoffen entstanden sind. Die geschlossenzelligen Keramik-Kugeln halten das Netz aus langen Molekülen des Bindemittels dauerelastisch, woraus sich eine Stabilisierung der Struktur ergibt (Alterungsbeständigkeit). Das System der Mikroporen von ThermoShield ist bedeutend feiner als das Porensystem von Ziegeln und Putzen.

**Perimeterdämmstoffe**

seien hier nur erwähnt, um den Grad der Geschlossenenzelligkeit bei Kugelformen zu erläutern, denn ihre eigentliche Aufgabe besteht darin, kein Wasser aufzunehmen um zuverlässig zu dämmen. Eine Schaumglasdämmung ist 100% geschlossenzellig, jedoch setzt der hohe Materialpreis den Einsatzentscheidungen Grenzen. Eine Perimeterdämmung aus extrudiertem Hartschaum (XPS) wird als praktisch geschlossenzellig angeboten, jedoch ist die Konsequenz wie bei Schaumglas nicht gegeben, das muss man wertungsfrei feststellen.

#### Mineralfaserdämmstoffe

sind Faserdämmstoffe aus versponnenen Glas- oder Gesteinsfasern, die durch Aufschmelzen gewonnen wurden. Dass dieses Gespinnst nur einen rechnerischen Wert für den Wasserdampfdiffusionswiderstand wie Luft ( $\mu=1$ ) hat, überrascht angesichts der Struktur nicht. Auch dass die Kapillarität 0 beträgt, kann man sich gut vorstellen, da es sich um eine Ansammlung von Makroporen handelt, die nicht kapillar leiten. Zwar vermag Wasser an den Fasern entlang zu laufen, das hat aber nichts mit Kapillarität zu tun, sondern hier wirken Adhäsionskräfte.

#### Polystyrolämmstoffe

als EPS auch Styropor genannt (in der extrudierten Ausführung, XPS - Styrodur, als feuchtebeständig angeboten). Die Kapillarität wird mit 0 angegeben, weil man von einer Geschlossenenzelligkeit ausgeht, die Grundform ist die Kugelpore, die beim Aufschäumen des Styrols mit Penthan entsteht (Gasbläschen). Der Wasserdampfdiffusionswiderstand ist 5-10 mal höher als der von Vollziegeln. Aus der praktischen Erfahrung heraus sei darauf hingewiesen, dass man beim Kapillarwert 0 für Styropor nur von einer theoretischen Annahme ausgeht. Bleibt dieser Dämmstoff lange genug mit flüssigem Wasser in Berührung – z.B. als Dämmplatte unter nass gewordenem Estrich oder als vertikale Dämmplatte eines WDVS an der Wand – kommt es zu Zersetzungerscheinungen und Wasser wandert ein. Neben physikalisch-chemischen Prozessen sind hier auch Mikroorganismen beteiligt. Es ist in der Praxis beobachtbar, dass Styropor geradezu wegfaulen kann.

#### Mauerziegel

Der Klassiker ist beim Gros der Bestandsbauten anzutreffen: Mauerziegel im Normalformat (240 x 115 x 71 mm oder Reichsformat). Man sagt diesem Baustoff ein schlechtes Wärmedämmvermögen nach, obwohl Kapillarität und Speichervermögen als sehr gut einzuschätzen sind. Nur mit Wärmeleitung lässt sich der Umstand nicht erklären, dass viele Bestandsbauten in praxi bessere Verbrauchswerte aufweisen, als theoretisch bestimmt. Ziegel weisen und gut ausgebautes und durchgängiges Kapillarsystem auf. Aufgrund ihrer sehr guten Sorptionseigenschaften spricht man auch von „Atmungsfähigkeit“ (die nichts mit Luftaustausch zu tun hat). Eine Form mit schlechteren Kapillaritätswerten sind Lang- und Hochlochziegel. Dass die mit Luft gefüllten Riesenporen kein Wasser leiten, leuchtet jedem ein. Aufgrund der Größe kommt es zudem zu lokalen Konvektionserscheinungen. Da keine Außenwand aus gestapelten Ziegeln errichtet wird, ist zu berücksichtigen, dass es sich beim Außenwandmauerwerk um einen Verbundbaustoff handelt. Die Wand besteht aus Ziegeln und Mörtelschichten dazwischen und auf der Oberfläche. In der Regel ist von einem feineren Porensystem im Mörtel auszugehen. Für Fassaden ist wichtig, dass gekammerte Ziegel auf der Oberfläche vorteilhaft sind. Sie haben aufgrund ihrer Riesenporen (Lang- bzw. Hochlöcher) eine geringere Kapillarität als Vollziegel, leiten also auch weniger Wasser nach innen.

#### Porosierte Ziegel

Das Grundmaterial ist noch immer der Tonscherben für die Ziegelherstellung. Man kombiniert diesen natürlichen Baustoff zunehmend mit Kunststoffen (Styropor), Natur- bzw. naturnahen Stoffen (Perlite), bzw. setzt man Stoffe zu (z.B. Sägespäne, die verbrennen und Hohlräume erzeugen). Das Ziel besteht darin, einen möglichst geringen Wert der rechnerischen Wärmeleitfähigkeit zu erzielen. Luftkammern und Styroporeinschlüsse ermöglichen dies, jedoch geht das zu Lasten der Kapillarität: im Volumen sind weniger Kapillaren enthalten, die sich um die geschlossenzelligen „Inseln“ (Makroporen) herumschlingeln müssen.

#### Beton

Die Sorten sind recht vielfältig: Beton gibt es als Leicht- bis Schwerbeton, bewehrt und unbewehrt, Rezepturen für unterschiedliche Lastfälle und Expositionen, Sonderbetone wie selbst verdichtende und wasserundurchlässige Betone. Mit zunehmender Schwere des Betons werden Poren und Kapillaren weniger. Die Vernetzung nimmt ab, es kommt zu abgeschlossenen Poren- und Kapillarbereichen. Ein bekanntes Anwendungsbeispiel ist der WU-Beton (wasserundurchlässiger Beton, Weiße Wanne): er besitzt eine definierte begrenzte Eindringtiefe für Wasser, lässt jedoch in bestimmtem Maße Wasserdampf diffundieren. Eine geschlossenzellige Struktur mit wenigen



Kapillaren zwischen den Zellen weist Porenbeton auf. Er besitzt ein gutes Wasseraufnahmevermögen bei gleichzeitig geringem Feuchteabgabevermögen.

#### Holz

Wir haben zu unterscheiden: gewachsenes Holz und Holzwerkstoffe. Eine besondere Gruppe sind Dämmstoffe auf der Basis von Holzfasern. Die Struktur gewachsenen Holzes ist die Faserform, die wir von den pflanzlichen Zellen kennen. Diese stabförmigen Zellen sind sozusagen der Urtyp der Porenform „stabförmig“: lang gestreckte, parallel verlaufende Zellen. Diese Struktur ist beim ungeschlagenen Holz mit dem Begriff Osmosesog verbunden, der aus der Wasserverdunstung auf der Oberfläche resultiert. Quellen und Schwinden kennzeichnen das Verhalten von Holz bei Feuchteänderungen, Holz arbeitet nicht nur bei thermischer Einwirkung. Das hygrische Verhalten von Holz ist sehr gut erforscht, was man von den anderen Baustoffen nicht behaupten kann. Aus der Kenntnis des hygrischen Verhaltens resultieren Vorgaben für Material (z.B. Hirnholz), Verarbeitung (Faserrichtung) und Einsatzgebiet (Klimabeanspruchungsklassen). Bei Holzwerkstoffen findet man häufig die so genannte Lösblattstruktur vor. Aufgrund der unregelmäßigen Anordnung der gepressten Fasern und Späne ergeben sich vielfältige Mischformen zu Stab und Kugel. Durch den Anteil von Klebern und anderen Zusatzstoffen wird die Porenstruktur weiter beeinflusst. Das kann bis zu hydrophoben Werkstoffen gehen, z.B. nehmen wasserfest verleimte Platten kein druckloses Wasser an.

#### Putze

Die bekanntesten Vertreter mit gut ausgebildetem Kapillarsystem sind die mineralischen Putze: Kalkputz und Kalkzementputz. Die Kapillaren sind material- und strukturbedingt kleiner als beim Ziegel. Diese Putze besitzen ein ausgeprägtes Wasseraufnahmevermögen, aber auch ein gutes Feuchteabgabevermögen. Klar ist, dass jede Hauswand bei Regen nass wird. Jede Fassadenoberschicht nimmt Regenwasser auf ( $w$ -Wert). Interessant zu beobachten ist, wie schnell das Wasser auch wieder abgegeben wird. Hierbei schneiden die mineralischen Putze im Vergleich zu „kunststoffmodifizierten“ bzw. „kunststoffvergüteten“ Putzen sehr gut ab. Dazu kommt, dass sie sehr alterungsstabil sind, sie behalten ihre Struktur nahezu lebenslang bei.

[- nach oben -](#)

## **Kenngröße Porenraum**

Wie eingangs bereits geschildert, ist zwischen Mikro-, Makro- und Riesenporen zu unterscheiden. Der „Begriff Riesenporen“ mag wenig akademisch erscheinen, er dient jedoch zur Unterscheidung. Mikro- und Makroporen sind kleine Poren, die relativ unterschiedlich groß sein können. Gemeinsam haben sie, dass sie kapillar leitfähig sind.

Die Riesenporen haben mit den vor genannten nur gemeinsam, dass sie einen Luftraum bilden. Sie sind zudem unverhältnismäßig größer. Der entscheidende Unterschied liegt jedoch darin, dass sie kein kapillares Leitvermögen besitzen – dafür sind sie zu groß. Beispiele hierfür sind die Luftkammern von

- Hochlochziegeln
- Langlochziegeln
- Kalksandsteinen (Grifftasche)
- Hohlblocksteinen

Mit der Luftschicht einer zweischaligen Außenwandkonstruktion sind diese Riesenporen nicht zu vergleichen, weil sie kein zusammenhängendes flächiges Gebilde ergeben. Gemeinsam mit einer konstruktiven Luftschicht haben sie die Eigenschaft, dass sich bei einer Größe über 2 cm Konvektionserscheinungen einstellen können.

Es sind somit zwei Randbedingungen festzustellen:

1. ab einer gewissen Porengröße findet keine kapillare Leitung mehr statt
2. ab einer Größe von 2 cm kann Konvektion eintreten

Konvektion ist auf Diffusion zurück zu führen. Es findet ein Stofftransport statt und die Stoffe werden vermischt. Wir betrachten die Stoffe Luft und Wasser im gasförmigen Zustand. Motor für die Bewegung sind Temperaturunterschiede. Dieses Prinzip ist aus dem Bereich der Gebäudeheizung bekannt: Luft wird am Heizkörper erwärmt, steigt nach oben, kalte Luft strömt unten nach usw.

Diese Vorgänge können auch in den Riesenporen (Luftkammern) auftreten. Der Temperaturunterschied besteht zwischen vorn/hinten bzw. außen/innen oder oben/unten. Die Ursachen – Wärme steigt nach oben und zwischen innen und außen besteht ein Temperaturgefälle – sind hinlänglich bekannt.

Insofern wird nachvollziehbar, dass auch Kondensbildung möglich ist. Wenn die Luftfeuchte in der Kammer hoch genug ist und wenn die Oberflächentemperatur einer Kammerwand niedrig genug ist, bildet sich Tauwasser. Hieran wird deutlich, dass diese Riesenporen eine wichtige Kenngröße darstellen, wenngleich sie nicht kapillar leitend sind.

Der Porenanteil ist zu unterscheiden in den

1. Luft führenden Porenraum (sämtliche Poren, einschließlich der Riesenporen)
2. kapillar leitfähigen, Luft führenden Porenraum (Mikro- und Makroporen)

Bei der Beurteilung der Kapillarität kommt es darauf an, wie viel Wasser in einem Stoff auf einer Referenzfläche in einer Zeiteinheit transportiert wird. Bei ungestörtem Material (ohne Kammern bzw. Hohlräume) ergibt sich bei gegebener Materialstärke ein Referenzvolumen zur Referenzfläche, z.B.  $0,365 \text{ m}^3/\text{m}^2$  bei einer  $36,5 \text{ cm}$  dicken Wand. Dies ist mit 100% anzusetzen.

Eine Reduzierung dieses kapillar leitenden Referenzvolumens erfolgt in folgenden Fällen:

1. eine mittelgroße vertikale Kammer (z.B. Kalksandstein mit Grifftasche)
2. mehrere hinter- und nebeneinander angeordnete vertikale Kammern (z.B. Hochlochziegel)
3. mehrere nebeneinander angeordnete horizontale Kammern (z.B. Langlochziegel)
4. eine oder mehrere nebeneinander angeordnete vertikale Kammern (z.B. Hohlblockstein)

Bei dieser systematisierenden Betrachtung wird von fachgerechter Einbaulage ausgegangen, wenngleich in der Praxis immer wieder Abweichungen festzustellen sind, wie z. B. hochkant eingebaute Hochlochziegel. Die hier aufgeführten Mauersteine sind hinlänglich bekannt, so dass die folgenden Betrachtungen nachvollziehbar sind. Beurteilt werden die Transportvorgänge des Wassers quer zur Längsachse der Wand (von innen nach außen oder umgekehrt, je nach Gefällegelage).

#### **Fall 1: eine mittelgroße vertikale Kammer (z.B. Kalksandstein mit Grifftasche)**

Die Volumenveränderung fällt relativ gering aus, sowohl die Reduzierung des kapillar leitfähigen Volumens als auch die Vergrößerung des Luftraumes sind nicht so groß. Wesentlich ist die Querschnittsreduzierung, d.h. die kapillar leitende Querschnittsfläche je Referenzfläche wird kleiner. Zudem erhöht sich der Transportweg des in Steinmitte eintretenden und dann kapillar geleiteten Wassers, weil der Transportweg um die Kammerwandung herum geht.

#### **Fall 2: mehrere hinter- und nebeneinander angeordnete vertikale Kammern (z.B. Hochlochziegel)**

Die vielen kleinen Luftkammern in vertikaler Anordnung reduzieren die kapillar leitende Schnittfläche auf Werte um 50% und kleiner. In diese Kategorie lassen sich auch die Porotonziegel einordnen. Sie sind ebenfalls vertikal gekammert und die kapillare Leitung erfolgt nur über die dünnen Stege.

#### **Fall 3: mehrere nebeneinander angeordnete horizontale Kammern (z.B. Langlochziegel)**

Für den Wassertransport steht nur die untere und die obere Schnittfläche durch die Lagerwandung zur Verfügung, nur kurz in der Mitte ergibt sich durch den Steg eine Erweiterung auf 100% der Schnittfläche. Zwischen den Längswandungen und dem Mittelsteg liegen die 2 Riesenporen der Langlöcher, sie haben einen großen Luftraum, aber sie leiten nicht kapillar. Die praktische Anwendung

erkennt man bei älteren Gebäuden, wo eine Vorsatzschale aus Langlochziegeln das Eindringen von Schlagregenwasser ins Wandinnere erschwert.

**Fall 4: eine oder mehrere nebeneinander angeordnete vertikale Kammern  
(z.B. Hohlblockstein)**

Ein Hohlblockstein besteht aus vier Seitenwänden, der oberen Deckwand und aus einer oder mehreren Stegwänden (in Abhängigkeit von der Kammerzahl). Nach unten ist der Stein offen bzw. nach oben falls es sich um eine Ausführungsvariante mit ausgegossenen Kammern handelt. Es besteht ein sehr großes Luftvolumen und das kapillar leitende Volumen ist gering. Sonderformen bestehen auch ohne die Deckwand, entsprechend ergibt sich weniger Mörtelersatz in der Lagerfuge.

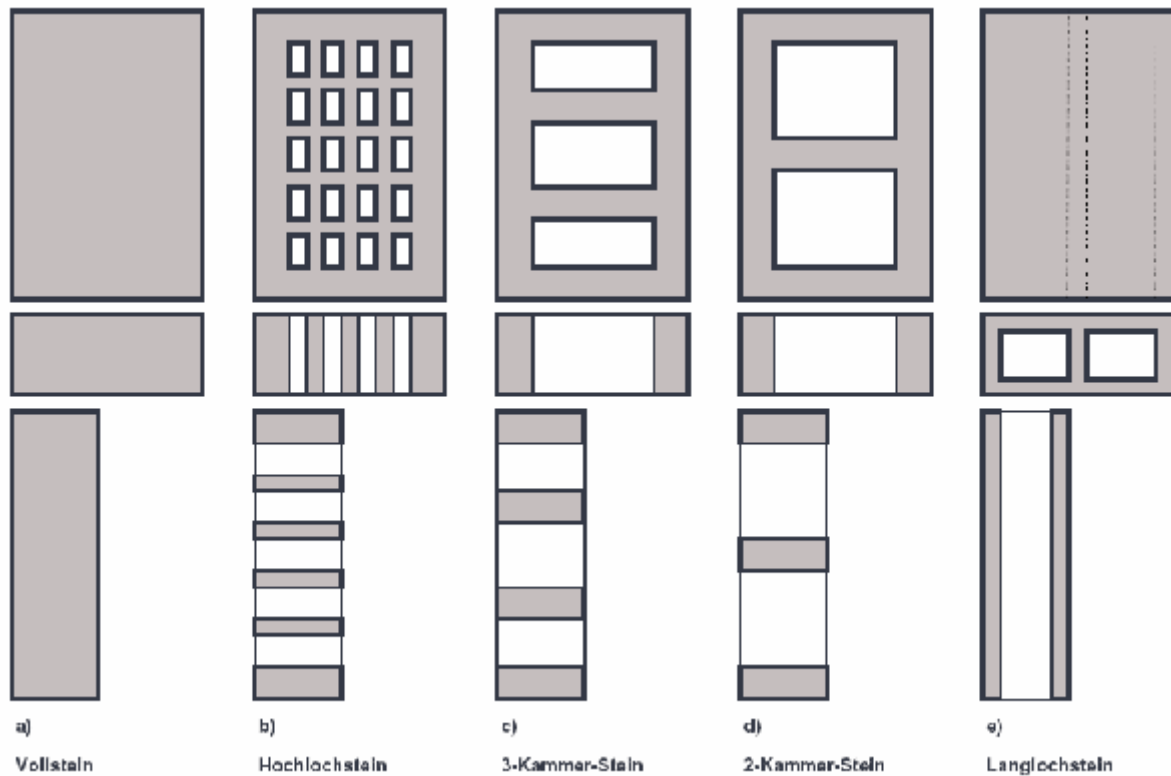


Bild 6: Schematische Übersicht zu verschiedenen Steinsorten

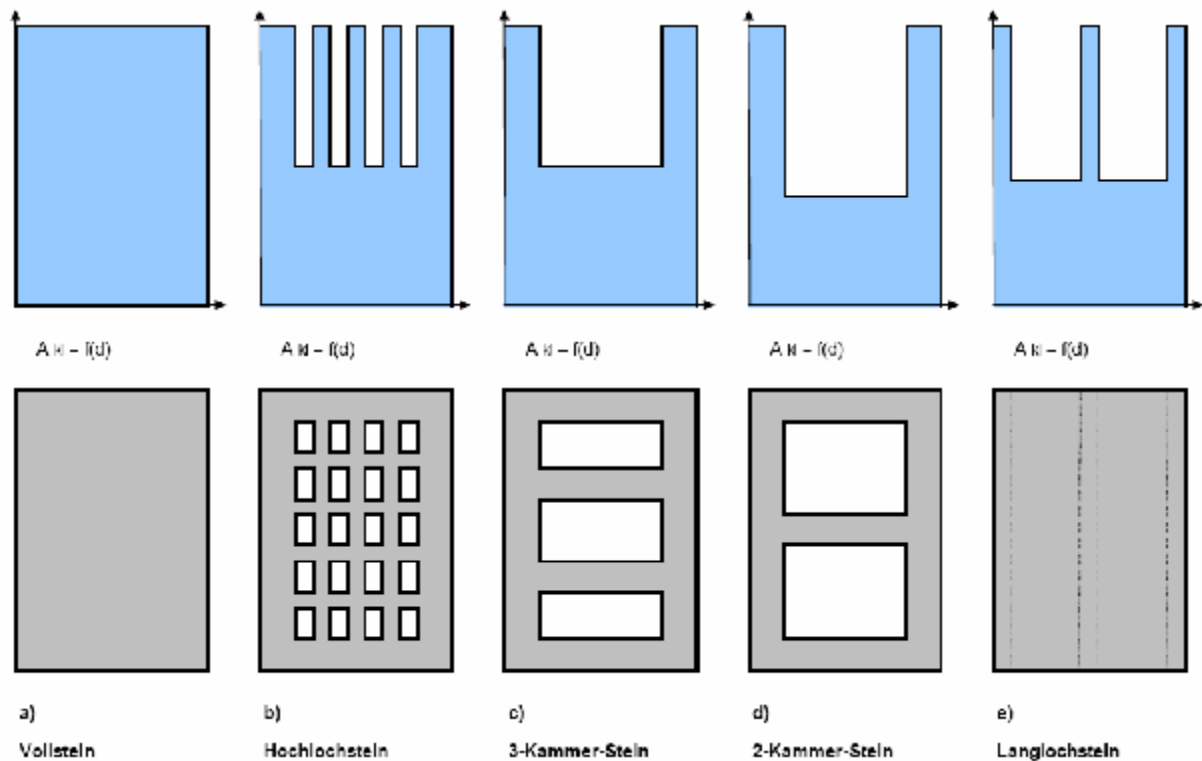


Bild 7: Grafiken der Funktion  $A_{kl} = f(d)$  der verschiedenen Steinsorten

Die schematische Darstellung soll lediglich der Schaffung einer Systematik dienen, auf die unterschiedlichen Steinformate soll hier nicht eingegangen werden.  $D$  ist die Materialstärke und  $f(d)$  bedeutet den örtlichen Verlauf in Richtung des Wassertransportes, nämlich quer zur Wand.  $A_{kl}$  ist die kapillar leitende Schnittfläche, die sich beim Durchgang durch den Stein verändert. Beim Vollstein sind es durchgängig 100% der Schnittfläche

Nr.	Steinart	L	B	H	Kubus	F(Schn.)	Riesenporen			Vol.(RP)	Vol.(kl)	rel.	Kubus
a	Vollstein	18	11	5	990	90	0	0	0	0	990	100,0%	990
b	Hochlochstein	18	11	5	990	90	20	2	1	5	790	79,8%	990
c	3-Kammer-St.	18	11	5	990	90	3	3,3	7	5	640	64,7%	990
d	2-Kammer-St.	18	11	5	990	90	2	6	7	5	570	57,6%	990
e	Langlochstein	18	11	5	990	90	2	18	3	4	558	56,4%	990

Tabelle 26: Volumen der Riesenporen Vol.(RP) und des kapillar leitenden Volumens Vol.(kl)

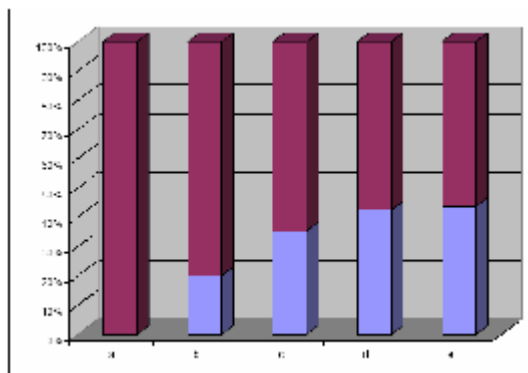


Bild 8: Grafik zu den Volumenrelationen aus Tabelle 26 (blau: Volumen der Riesenporen)

Nr.	Steinart	L	B	H	Kubus cbE	Schnittfläche je Schicht (qE)											Summe qE	Durchschnitt		
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
a	Vollst.	18	11	5	990	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	990	90,0
b	Hochl.	18	11	5	990	90	90	40	90	40	90	40	90	40	90	40	90	90	790	71,8
c	3-Kam.	18	11	5	990	90	90	40	40	40	40	40	40	40	90	90		640	58,2	
d	2-Kam.	18	11	5	990	90	90	30	30	30	30	30	30	30	90	90		570	51,8	
e	Langl.	18	11	5	990	90	36	36	36	36	90	36	36	36	90			558	50,7	

Tabelle 27: Kapillar leitender Querschnitt als Schnittfläche quer zur Transportrichtung je Schicht

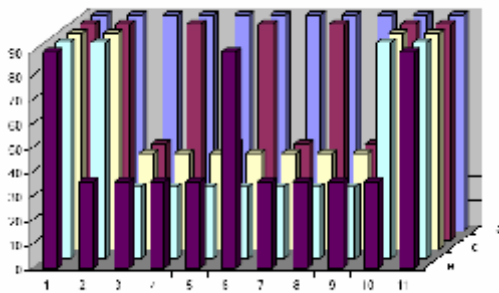


Bild 9: Grafische Auswertung d. Tabelle 27

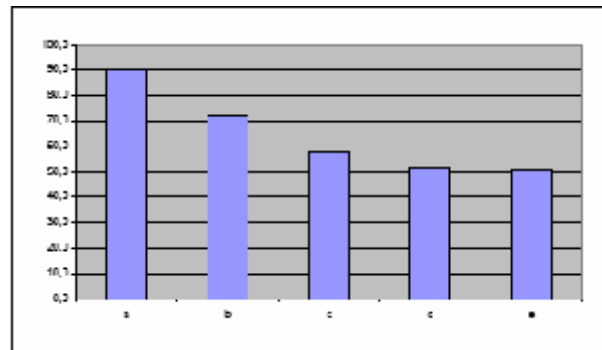


Bild 10: Abnahme des kapillar leitenden Querschnittes

Die bislang angestellten Betrachtungen wären konsequenterweise noch auf das Verhältnis von Mauersteinen zu Fugenmörtel zu erweitern, um dem Anspruch der Vollständigkeit gerecht werden zu wollen. Mauerwerk sind Mörtel der Gruppen II und III, also Kalkzement- und Zementmörtel. Sie haben viel feinere Poren als die Steine und daher leiten sie kapillar viel besser.

Je nach Steinformat und Fugenstärke schwanken die Relationen der Steine- und Mörtelanteile je m<sup>3</sup> Mauerwerk. Benötigt man für 1 m<sup>3</sup> einer 49er Wand mit Ziegeln NF (Normalformat) 394 Steine und 0,285 m<sup>3</sup> Mörtel, sind es bei Verwendung von Hochlochziegeln 1,5 NF nur 263 Steine und 0,249 m<sup>3</sup> Mörtel. Bei einer halb so starken 24er Wand sind es 402 Steine und 0,238 m<sup>3</sup> Mörtel bzw. 268 Steine und 0,229 m<sup>3</sup> Mörtel. Der eine m<sup>3</sup> für sich betrachtet, macht nicht viel aus, in der Summe eines Gebäudes kommen hunderte m<sup>3</sup> zusammen und zig Liter Wasser.

[- nach oben -](#)

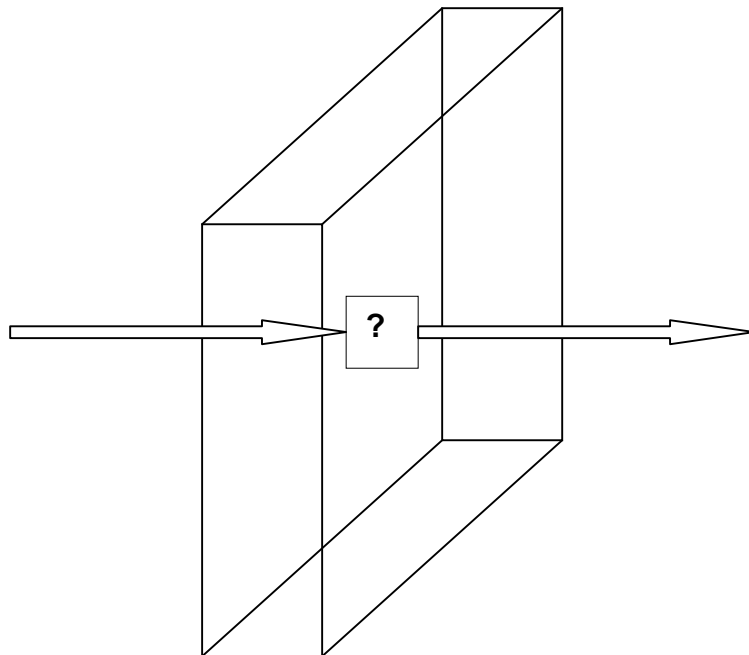
## Geometrisch-analytische Überlegungen zur Modellbildung

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 <b>Mensch</b> mit seinen Lebensgewohnheiten	⇒ von innen nach außen ⇒ ⇐ von außen nach innen ⇐	das <b>Wetter</b> 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, in Folge 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.

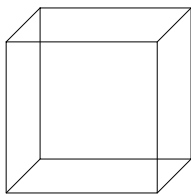


Bild KB2: Kubus als Ausschnitt aus einer Vollmaterialwand, Referenzfläche = 1 qm

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 diffusiv 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:

$$V_P = V_W + V_L$$

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  $V_K = 0,4 \text{ cbm} \times 1,0 = 0,4 \text{ cbm}$ , also 100%,  
und das Luftvolumen im Trockenzustand  $V_L = 0,4 \text{ cbm} \times 0,6 = 0,24 \text{ cbm}$ , also 60%,  
wobei das wassergefüllte Volumen nur betragen kann  $V_W = 0,24 \times 0,5 = 0,12 \text{ cbm}$ ,  
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/m<sup>2</sup> und 0,5 l/m<sup>2</sup> 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.

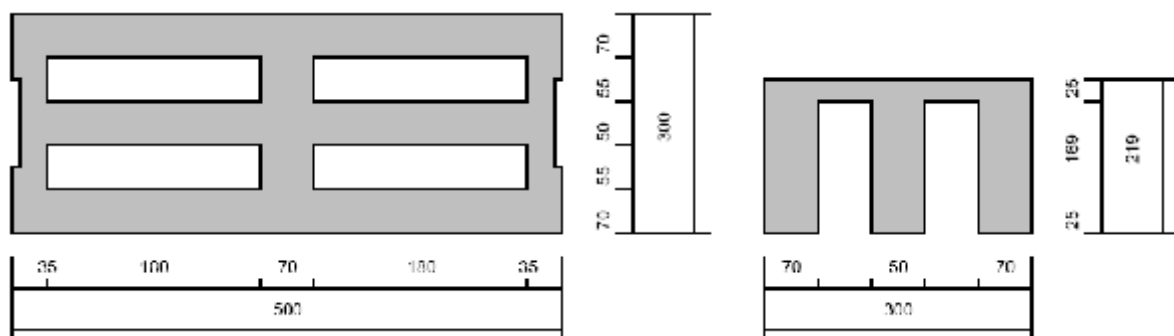


Bild KB3: Skizze zur Steingeometrie

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:

Kenngröße	Formelz.	Wert	Einheit	Relation
Raumvolumen	$V_R$	0,032.850	cbm	<b>100,0 %</b>
Kammervolumen	$V_{RP}$	0,006.692	cbm	20,4 %



Materialvolumen	$V_K$	0,026.158	cbm	79,6 %
Rohdichte Material	$\rho_{\text{Beton}}$	1.100,0	kg/m <sup>3</sup>	
Steinrohddichte	$\rho_{\text{Stein}}$	876,0	kg/m <sup>3</sup>	
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	<b>100,0 %</b>
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.

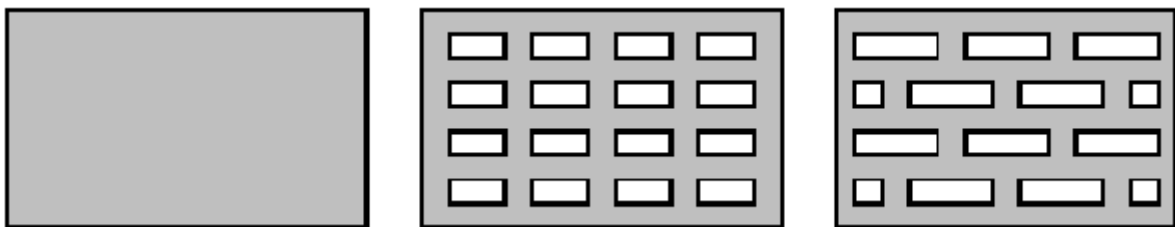


Bild KB4: Prinzipskizzen zum Verdeutlichen der Geometrie der Kammern (3 Steintypen)

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 m<sup>2</sup>) – 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.

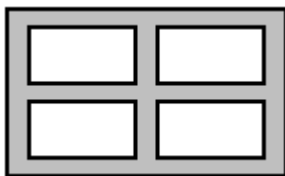


Bild KB5: Modell eines Hohlblocksteins, als Ergänzung zu den 3 Steintypen oben

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.

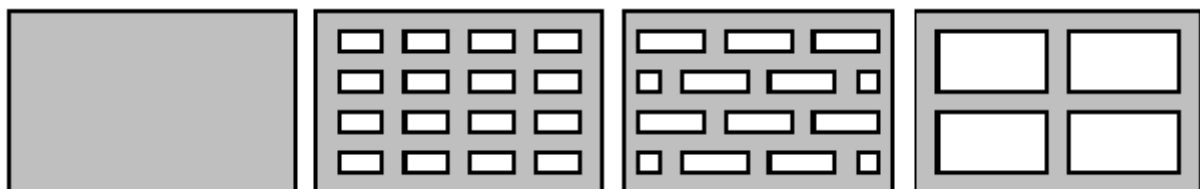


Bild KB 6: Skizzen zu den 4 Steintypen, v.l.n.r 1-4

Kenngröße	Fz.	ME	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
			Vollstein	gleichm. gekammert	versetzt gekammert	Hohlblockstein
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
<b>Raumvolumen</b>	$V_R$	m <sup>3</sup>	0,03750	0,03750	0,03750	0,03750
<b>Relation zu Typ 1</b>		%	<b>100,00000</b>	<b>100,00000</b>	<b>100,00000</b>	<b>100,00000</b>
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 <sup>3</sup>	0,00000	0,01015	0,01080	0,01731
Relation zum $V_R$		%	0,00000	27,07584	28,78953	46,15200
<b>Materialvolumen</b>	$V_M$	m <sup>3</sup>	0,03750	0,02735	0,02670	0,02019
<b>Relation zum <math>V_R</math></b>		%	<b>100,00000</b>	<b>72,92416</b>	<b>71,21047</b>	<b>53,84800</b>
Querschnittsfläche	$A_Q$	m <sup>2</sup>	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
<b>Materialquerschn.fl.</b>	$A_{QM}$	m <sup>2</sup>	0,12500	0,04808	0,03846	0,03838
<b>Relation zu Typ 1</b>		%	<b>100,00000</b>	<b>38,46154</b>	<b>30,76923</b>	<b>30,70000</b>
Rohdichte Stein	$\rho_S$	kg/m <sup>3</sup>	1.100,00000	802,16576	783,31517	592,32800
Gewicht Stein	$G_S$	kg	41,25000	30,08122	29,37432	22,21230
<b>Porenraum</b>	$V_S$	m <sup>3</sup>	0,00750	0,00547	0,00534	0,00404
<b>Relation zum <math>V_R</math></b>		%	<b>20,00000</b>	<b>14,58483</b>	<b>14,24209</b>	<b>10,76960</b>
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 (Gleichgewichtsfeuchte nach 1 Jahr)

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

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

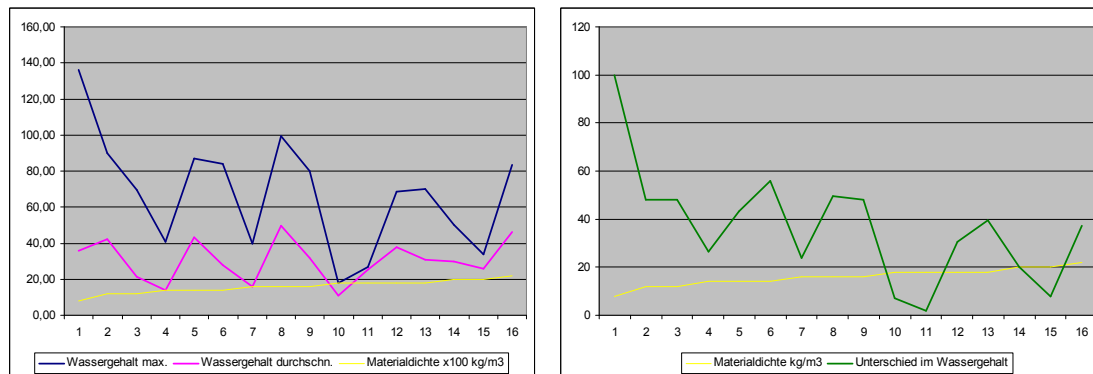


Bild KB8: Graf zur Datentabelle mit der Materialdichte und den Wassergehalten (max. und Ø) (links)

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.

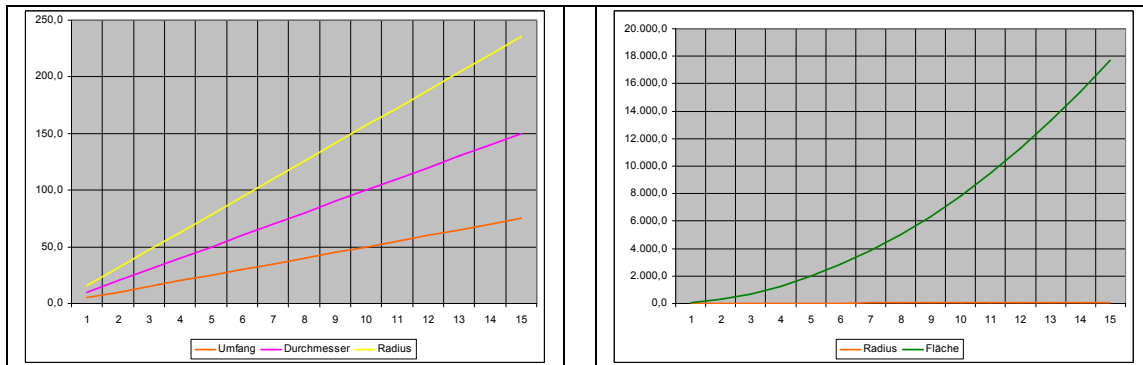
Bislang wurden hier Probleme der Makrogeometrie behandelt. Auf den Zusammenhang zwischen Porenradius und Kapillarkondensation wurde eingangs verwiesen, dies ist ein Problem der Mikrogeometrie. Um dies zu verdeutlichen, sei eine Zahlenfolge unterschiedlicher Porenradien und deren geometrische Abhängigkeiten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

Radius	Durchmesser	Umfang	Fläche
r	d	U	F
µm	µm	µm	µm <sup>2</sup>
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  $U \times 1E$  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.  $1 \mu m$ . 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

[- nach oben -](#)

## Rechnen mit hygrischen Größen

[- nach oben -](#)

### Tauwasserbildung / Kondensation

Tauwasserbildung ist eine Form der Kondensation. Es ist der Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand, als Kondensat entsteht Wasser in flüssiger Form. Die entscheidenden Kenngrößen sind die relative Luftfeuchte und die Temperaturen der Luft und einer Oberfläche.

		Taupunkttemperatur in °C bei einer relativen Luftfeuchte von													
°C	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	
30	10,5	12,9	14,9	16,8	18,4	20,0	21,4	22,7	23,9	25,1	26,2	27,2	28,2	29,1	
29	9,7	12,0	14,0	15,9	17,5	19,0	20,4	21,7	23,0	24,1	25,2	26,2	27,2	28,1	
28	8,8	11,1	13,1	15,0	16,6	18,1	19,5	20,8	22,0	23,2	24,2	25,2	26,2	27,1	
27	8,0	10,2	12,2	14,1	15,7	17,2	18,6	19,9	21,1	22,2	23,3	24,3	25,2	26,1	

26	7,1	9,4	11,4	13,2	14,8	16,3	17,6	18,9	20,1	21,2	22,3	23,3	24,2	25,1
25	6,2	8,5	10,5	12,2	13,9	15,3	16,7	18,0	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1
24	5,4	7,6	9,6	11,3	12,9	14,4	15,8	17,0	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1
23	4,5	6,7	8,7	10,4	12,0	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,2
22	3,6	5,9	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,2
21	2,8	5,0	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2
20	1,9	4,1	6,0	7,7	9,3	10,7	12,0	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,3	19,2
19	1,0	3,2	5,1	6,8	8,3	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	16,4	17,3	18,2
18	0,2	2,3	4,2	5,9	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2
17	-0,6	1,4	3,3	5,0	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2
16	-1,4	0,5	2,4	4,1	5,6	7,0	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2
15	-2,2	-0,3	1,5	3,2	4,7	6,1	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2
14	-2,9	-1,0	0,6	2,3	3,7	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2
13	-3,7	-1,9	-0,1	1,3	2,8	4,2	5,5	6,6	7,7	8,7	9,6	10,5	11,4	12,2
12	-4,5	-2,6	-1,0	0,4	1,9	3,2	4,5	5,7	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2
11	-5,2	-3,4	-1,8	-0,4	1,0	2,3	3,5	4,7	5,8	6,7	7,7	8,6	9,4	10,2
10	-6,0	-4,2	-2,6	-1,2	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2

Tabelle 6: Taupunkttemperaturen

Interpretation der Tabelle: man erkennt recht deutlich eine Zunahme der Taupunkttemperatur in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte. Mit zunehmender Lufttemperatur und mit zunehmender relativer Luftfeuchte steigt die Taupunkttemperatur. Dies lässt sich grafisch verdeutlichen:

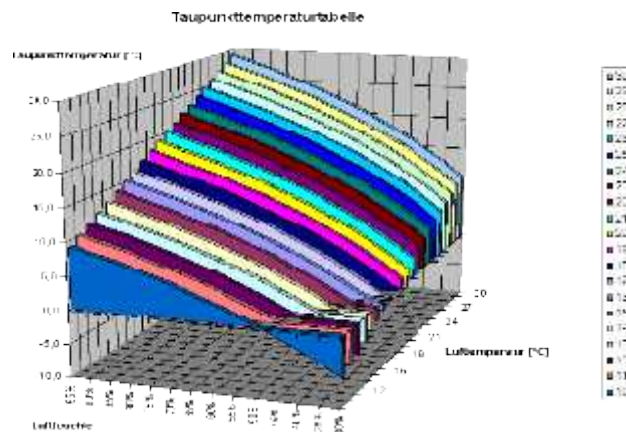


Bild 2: Grafische Darstellung der Werte der Taupunkttable

Die Relationen verdeutlicht die folgende Tabelle mit den Differenzwerten aus Lufttemperatur und Taupunkttemperatur. Man erkennt, dass mit zunehmender Luftfeuchte der für die Tauwasserbildung erforderliche Temperaturunterschied kleiner wird und dass dieser Unterschied bei einer gegebenen Luftfeuchte relativ gering ausfällt.

Differenz Taupunkttemperatur zu Lufttemperatur in °C bei einer relativen Luftfeuchte von														
°C	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
30	19,5	17,1	15,1	13,2	11,6	10,0	8,6	7,3	6,1	4,9	3,8	2,8	1,8	0,9
29	19,3	17,0	15,0	13,1	11,5	10,0	8,6	7,3	6,0	4,9	3,8	2,8	1,8	0,9
28	19,2	16,9	14,9	13,0	11,4	9,9	8,5	7,2	6,0	4,8	3,8	2,8	1,8	0,9

27	19,0	16,8	14,8	12,9	11,3	9,8	8,4	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,8	0,9
26	18,9	16,6	14,6	12,8	11,2	9,7	8,4	7,1	5,9	4,8	3,7	2,7	1,8	0,9
25	18,8	16,5	14,5	12,8	11,1	9,7	8,3	7,0	5,9	4,7	3,7	2,7	1,8	0,9
24	18,6	16,4	14,4	12,7	11,1	9,6	8,2	7,0	5,8	4,7	3,7	2,7	1,7	0,9
23	18,5	16,3	14,3	12,6	11,0	9,5	8,2	6,9	5,8	4,7	3,6	2,7	1,7	0,8
22	18,4	16,1	14,2	12,5	10,9	9,5	8,1	6,9	5,7	4,6	3,6	2,6	1,7	0,8
21	18,2	16,0	14,1	12,4	10,8	9,4	8,1	6,8	5,7	4,6	3,6	2,6	1,7	0,8
20	18,1	15,9	14,0	12,3	10,7	9,3	8,0	6,8	5,6	4,6	3,6	2,6	1,7	0,8
19	18,0	15,8	13,9	12,2	10,7	9,2	7,9	6,7	5,6	4,5	3,5	2,6	1,7	0,8
18	17,8	15,7	13,8	12,1	10,6	9,2	7,9	6,7	5,5	4,5	3,5	2,6	1,7	0,8
17	17,6	15,6	13,7	12,0	10,5	9,1	7,8	6,6	5,5	4,5	3,5	2,5	1,7	0,8
16	17,4	15,5	13,6	11,9	10,4	9,0	7,8	6,6	5,5	4,4	3,4	2,5	1,6	0,8
15	17,2	15,3	13,5	11,8	10,3	8,9	7,7	6,5	5,4	4,4	3,4	2,5	1,6	0,8
14	16,9	15,0	13,4	11,7	10,3	8,9	7,6	6,5	5,4	4,4	3,4	2,5	1,6	0,8
13	16,7	14,9	13,1	11,7	10,2	8,8	7,5	6,4	5,3	4,3	3,4	2,5	1,6	0,8
12	16,5	14,6	13,0	11,6	10,1	8,8	7,5	6,3	5,3	4,3	3,3	2,4	1,6	0,8
11	16,2	14,4	12,8	11,4	10,0	8,7	7,5	6,3	5,2	4,3	3,3	2,4	1,6	0,8
10	16,0	14,2	12,6	11,2	9,9	8,6	7,4	6,3	5,2	4,2	3,3	2,4	1,6	0,8

Tabelle 7: Relation der Taupunkttemperatur zur Lufttemperatur

Auch dies lässt sich grafisch verdeutlichen:

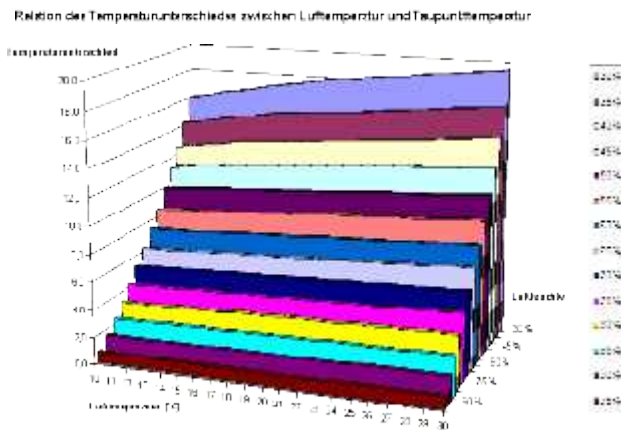


Bild 3: Grafische Darstellung der relativen Werte der Taupunkttafel

In dem Bild nimmt die Luftfeuchte in der Darstellung von hinten nach vorn zu und die Neigung der dem jeweiligen Wert der relativen Luftfeuchte zugeordneten Farbscheibe nimmt ab, von 3,5 ° bei 30% rel. LF auf 0,1 ° bei 95% rel. LF. So viel zu den gegebenen Quantitäten.

Aus den oben dargestellten Werten lässt sich ableiten, dass warme Luft mehr Wasser aufnehmen kann als kalte und dass die Werte sich nicht linear verändern. Das spiegelt sich in der Betrachtung der Werte der Sättigung der Luft mit Wasserdampf wieder, was folgende Tabelle und Bild wiedergeben.

Lufttemperatur	°C	-20,0	-15,0	-10,0	-5,0	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0
Sättigungsdichte	g/m³	0,9	1,5	2,1	3,2	4,9	6,8	9,4	12,8	17,3	23,0	30,3

Tabelle 8: Werte der Sättigungsdichte des Wasserdampfes in Abhängigkeit von der Lufttemperatur



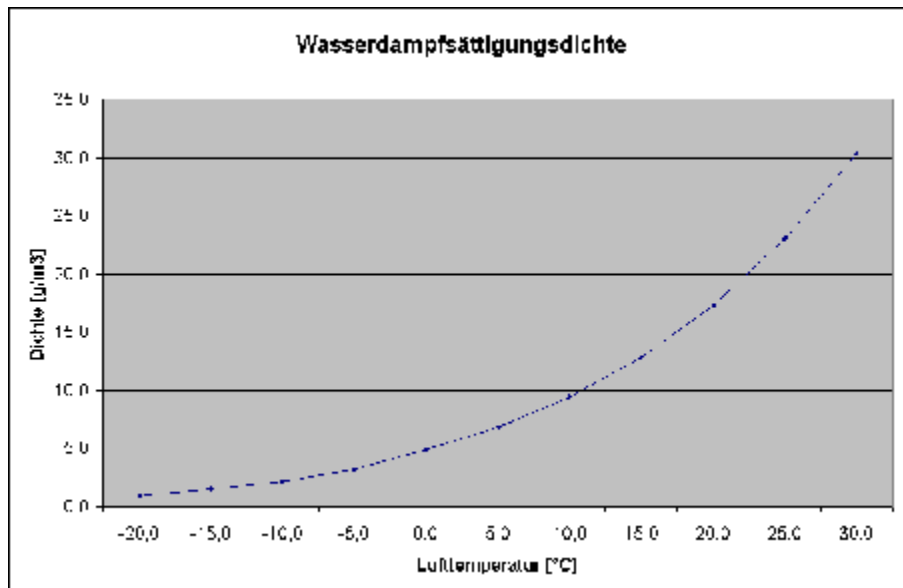


Bild 4: Graph der Wasserdampfsättigungsdichte in Abhängigkeit von der Lufttemperatur

Die dargestellte Kurve ließe sich weiterführen, wobei der Ausschnitt des Bereiches für die Temperaturordinate als repräsentativ zu betrachten ist. Hier sind die Außentemperaturen in realistischer Spreizung erfasst, das Jahresmittel beträgt hierzulande 6...9 °C. Auch für die betrachteten bereiche der Luftfeuchte kann dies eingeschätzt werden: unter 30% sinkt sie praktisch nicht ab und in einem Badezimmer kann man schnell einmal an 100% heran kommen. Den Temperaturwerten lassen sich Werte des Wasserdampfsättigungsdruckes zuordnen.

Bei saugfähigen Baustoffoberflächen (mineral. Putz, Gipskartonplatten, Kalkfarbe) setzt in den Poren die Kapillarkondensation (siehe Kapitel „Sorption“ oben) bereits ein, wenn die Luftfeuchtigkeit der Grenzschicht  $\phi_{si}$ , bezogen auf die Oberflächentemperatur  $\theta_{si}$ , noch nicht gesättigt ist. Es muss demnach noch kein frei sichtbares Tauwasser entstanden sein – und dennoch sind bereits Lebensbedingungen für den Schimmelpilz entstanden. Tauwasser kann nur verhindert werden, solange  $\theta_{si} > \theta_s$  (Oberflächentemperatur der Grenzschicht > Taupunkttemperatur).

$\theta_i$ [°C]	$\phi$ [%]i	$P_i$ [Pa]	$\theta_{si}$ [°C] ( $\phi_{si} = 100\%$ )	$\theta_{si}$ [°C] ( $\phi_{si} 80\%$ )
20	50	1.170	9,3	12,6
20	60	1.404	12,0	15,4
20	65	1.521	13,2	16,7

Tabelle 9: Beispiel für Randbedingungen der Kapillarkondensation bei (Schimmelpilz)

[- nach oben -](#)

## Normierte Feuchte

Angesicht der theoretischen und praktischen Betrachtungen mag man zu der Frage gelangen, ob es denn nicht auch einfacher geht. Diese Frage ist leicht zu beantworten, wenn man sich beim DIN kundig macht. Bei der Abhandlung des Themas Wärmeschutz geht man hinsichtlich des Faktors Feuchte recht kulant damit um. Dies soll folgender Auszug aus DIN 4108-4 demonstrieren.

Zeile	Baustoffe	Massebezogener Feuchtegehalt $u_m$ [%]
1	Ziegel	1
2	Kalksandstein	3
3	3.1 Beton mit geschlossenem Gefüge mit dichten Zuschlägen	2
	3.2 Beton mit geschlossenem Gefüge mit porigen Zuschlägen	13
4	4.1 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit dichten Zuschlägen nach DIN 4226-1	3
	4.2 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit porigen Zuschlägen nach DIN 4226-2	4,5
5	Porenbeton	6,5
6	Gips, Anhydrit	2
7	Gußasphalt, Asphaltmastix	0
8	Anorganische Stoffe in loser Schüttung; expandiertes Gesteinglas (z. B. Blähperlit)	1
9	Mineralische Faserdämmstoffe aus Glas-, Stein-, Hochofenschlacken-(Hütten) Fasern	1,5
10	Schaumglas	0
11	Holz, Sperrholz, Spanplatten, Holzfaserplatten, Schilfrohrplatten und -matten, organische Faserdämmstoffe	15
12	Holzwohle-Leichtbauplatten	13
13	Pflanzliche Faserdämmstoffe aus Seegras, Holz-, Torf- und Kokosfasern und sonstigen Fasern	15
14	Korkdämmstoffe	10
15	Schaumkunststoffe aus Polystyrol, Polyurethan (hart)	1

Tabelle 28: Normierte Feuchtegehalte von Baustoffen nach DIN 4108-4, Tabelle A.1: Praktische Feuchtegehalte von Baustoffen

Zur Erläuterung des Begriffes „Massebezogener Feuchtegehalt“ wird in DIN 4108-4 ausgeführt: „Unter Ausgleichsfeuchtegehalt wird der Feuchtegehalt verstanden, der bei der Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Personen dienen, in 90 % aller Fälle nicht überschritten wird oder den Feuchtegehalt, der nach DIN EN ISO 12570 bestimmt wurde.“

Offensichtlich ist alles nur eine Frage der Definition: untersucht wurden demnach nur „genügend ausgetrocknete Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Personen dienen“. Die DIN EN ISO 12570 : 2000-04 behandelt "Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur (ISO 12570:2000); Deutsche Fassung EN ISO 12570 : 2000", also eine rein messtechnische Regelung.

Es scheint also lediglich darauf anzukommen, in welchem Zustand man misst, um dann daraus einen normierten Feuchtwert abzuleiten. Dieser Anschein wird durch die Erläuterung in der DIN 4108-3 bestätigt, wo man unter der Überschrift „Ausgleichsfeuchtegehalte und Zuschlagswerte von Baustoffen“ ausführt: „Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_R$  in Tabelle 1 sind aufgrund der Ausgleichsfeuchtegehalte nach Tabelle A.1 und den Zuschlagswerten nach Tabelle A.2 und Tabelle A.3 festgelegt worden.“

Um die Sache auf den Nenner zu bringen: es handelt sich um Idealfälle, die zugrunde gelegt wurden. Nun mag es ja vorkommen, dass bestimmte Rechenwerte für gewisse Anwendungen genügen. Angesichts einer Energieeinsparverordnung, die in ihren nachgeordneten Anhängen (DIN und EN) umfangreich ausföhrt, wo für Nachkommastellen novelliert wird und wo am Ende doch nur ein überschlägiger Richtwert als Ergebnis genügt, stellt sich schon die Frage nach der Sinnhaftigkeit.

Um ein Gespür für den Unterschied zwischen idealem und gemessenem Wert zu entwickeln, seien einige Werte aus den Tabellen 24 und 28 verglichen.

Baustoff	Dichte	M-% Ø (max.)	Entsprechung in DIN 4108-3, M-%
Ziegel, Raumklima normal feucht	1.800	0,6 (1,4)	Ziegel 1,0

Ziegel, Raumklima feucht, naß	1.800	1,0 (1,5)		
Stahlbeton	> 2.200	2,1 (3,8)	Beton (geschl. Gefüge mit dichten Zuschlägen)	2,0
Stahlbeton	1.800	2,5 (4,5)		
Gasbeton	< 800	4,5 (17,0)	Porenbeton	6,5
Innenputz (Gipsmörtel)	1.200	1,8 (5,8)	Gips	2,0
Holzwolleplatten (Zement)	420	14,0 (35,0)	Holzwolle-Leichtbauplatten	13,0
Holzfaserplatten	~ 300	10,0 (22,0)	Holzfaserplatten	11,0
<b>Dämmstoff</b>				
Mineralfasermatten	100	5,0 (10,0)	Mineralische Faserdämmstoffe	1,5
Polystyrolschaumplatten	15	13,3 (33,5)	Schaumkunststoffe aus Polystyrol	1,0
Polystyrolschaumplatten	25	12,0 (24,0)		
Polystyrolschaumplatten	40	7,5 (18,5)		
Polyurethanschaumplatten	20	10,0 (30,0)	Schaumkunststoffe aus Polyurethan (hart)	1,0
Polyurethanschaumplatten	35	8,5 (28,5)		

Tabelle 29: Vergleich von Werten aus Tabelle 24 und Tabelle 28

Zum Rekapitulieren: Tabelle 24 beinhaltet gemessene Werte der Gleichgewichtsfeuchte von Baustoffen in Kühlhäusern nach 1 Jahr und Tabelle 28 normierte Feuchtegehalte von Baustoffen nach DIN 4108-4 (Tabelle A.1: Praktische Feuchtegehalte von Baustoffen).

Auffällig hierbei ist die weitgehende Übereinstimmung bei den Baustoffen. Bei den Dämmstoffen liegt der Unterschied bei einem Faktor 3,33 bis 13,3. Angesichts dieser signifikanten Unterschiede zwischen Praxis und Theorie sollte man von bestehendem Handlungsbedarf ausgehen, den Dingen auf den Grund zu gehen.

% rLF	Holzausgleichsfeuchte			
75 %	14,7	14,5	14,3	14,0
70 %	13,2	13,1	13,0	12,8
65 %	12,0	12,0	11,8	11,5
60 %	11,0	10,9	10,8	10,5
55 %	10,1	10,0	9,9	9,7
50 %	9,4	9,2	9,0	8,9
45 %	8,6	8,4	8,3	8,1
Temp. [°C]	10°	15°	20°	25°

Tabelle 30: Auszug aus Tabelle 17 Werte für Holzausgleichsfeuchte

Tabelle 30 beinhaltet Werte aus einem üblichen Bereich. Vergleicht man die Holzausgleichsfeuchte bei 75%/10° und 45%/25°, wird man einen Unterschied im Faktor 1,8 feststellen. Dies kann nicht belanglos sein, da man bei einigen Gramm Wasser zu viel bereits Schäden am Baustoff zur Folge haben kann.

Nachdem festgestellt wurde, dass man je nach Betrachtung zu erstaunlichen Relationen gelangen kann, sei noch einmal rekapituliert, worum es dabei ging: es ging bislang um die Ausgleichsfeuchte. Die Ausgleichsfeuchte ist die stoffspezifische Feuchte eines porösen Baustoffs, die mit der Luftfeuchte der Umgebung im Gleichgewicht steht (siehe Kapitel: Ausgleichsfeuchte).

Im Kapitel „Kapillarität“ wurden weitere Feuchtezustände beschrieben, der Begriff der Ausgleichsfeuchte kann also nicht der allein wichtige Kennwert sein. Angesichts nass gewordener Dämmstoffe (siehe Tabelle 24), die theoretisch trocken zu sein haben (siehe Tabelle 28), sollte klar werden, dass die Betrachtung nur des gasförmigen Zustandes des Wassers keinesfalls genügt.

Bei bis über 30 M-% durchnässten Polystyrolplatten ist es müßig, noch über Diffusionsvorgänge zu sinnieren. Hier liegt reichlich auskondensiertes Wasser an, das nicht einfach mal schnell mittels

Korrespondenz mit der Umgebungsluft entfleucht. Hierbei handelt es sich um „den nassen Pullover, in dem man friert“.

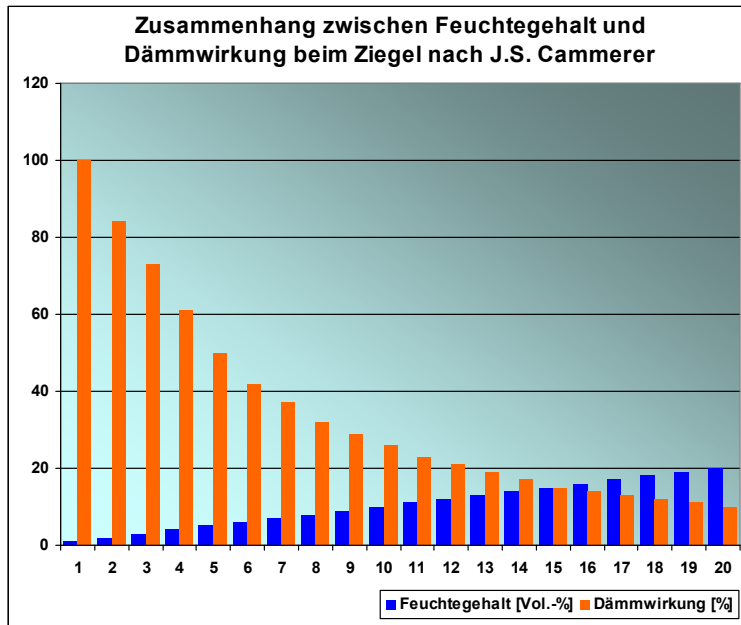


Bild 11: Veranschaulichung der Abnahme der Dämmwirkung bei Zunahme der Feuchte, nach J. S. Cammerer

Die Grafik verdeutlicht eine Tatsache, wie sie vom IBP wie folgt beschrieben wir: „Die in einer Wandkonstruktion enthaltene Feuchte vermindert deren Wärmedämmwirkung; deshalb ist eine rasche Austrocknung neben hygienischen auch aus energetischen Gründen wünschenswert.“

[- nach oben -](#)

## Hygrische Kenngrößen

In den vorangestellten Kapiteln wurden u.a. die verschiedenen Feuchtezustände und die sie beeinflussenden Faktoren betrachtet. Für einige Baustoffe lässt sich eine Übersicht hierzu gestalten.

Baustoff	u max	u f	u k	u p	u hy
Sandstein	0,13-0,15	0,07-0,11	0,024-0,047	0,05	0,015
Ziegel	0,17-0,26	0,16-0,24	0,07-0,09	0,015	0,007
Beton	0,14-0,19	0,11-0,13	0,08-0,09	0,05	0,03
Zementputz	0,14	0,13	0,08	0,05	0,04
Kalkputz	0,24	0,18	0,08	0,04	0,03
Porenbeton	0,73	0,38	0,20	0,035	0,03

Tabelle 25: Hygrische Kenngrößen verschiedener Baustoffe (TU Wien)

Legende zur Tabelle: u = Feuchte-/Wassergehalt, max = maximaler Wassergehalt (Sättigungfeuchte), f = freiwilliger Wassergehalt (Wasserkapazität), k = kritischer Feuchtegehalt, p = praktischer Feuchtegehalt, hy = hygrische Ausgleichsfeuchte (Erläuterungen siehe Kapitel „Kapillarität“).

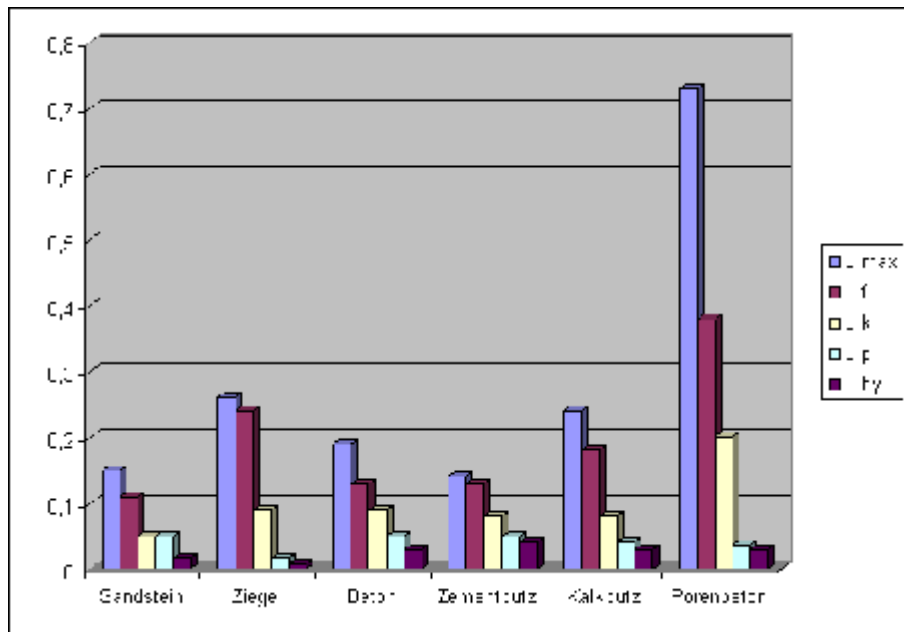


Bild 5: Graf zur Datentabelle hygrischer Größen

Anhand der Grafik wird deutlich, dass die im Kapitel „Porosität“ beschriebenen Thesen und Zustände nicht von der Hand zu weisen sind. Lineare Zusammenhänge lassen sich in der Grafik nicht erkennen, auch wenn man umsortiert. Hieran wird deutlich, dass die hygrischen Größen von Baustoffen schlecht zu schätzen sind und dass sie wohl eher empirisch zu bestimmen sind. Mit  $s_d$ - und  $\mu$ -Wert allein ist jedenfalls nicht getan.

Nach aufmerksamem Studium der einschlägigen Literatur gelangt man zu der Feststellung, dass zumindest hinsichtlich der Sorptionszustände und der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten ein Kenntnisstand geherrscht hat, der seitdem nicht wesentlich verbessert wurde. Insbesondere scheint es sehr schwer zu sein, eine Datenbank hygrischer Materialkenngrößen zusammen zu tragen. Der Grund ist ganz einfach: die dafür erforderlichen Kennwerte sind nicht ermittelt worden.

Zumindest besteht hinsichtlich der die Dämmleistung mindernden Wirkung der Baustofffeuchte eine einhellige Auffassung, zumal die Allegorie des nassen Pullovers, der beim besten Willen nicht wärmen kann, weit verbreitet ist und zudem durch akademischer wirkende Grafiken (abfallende Parabel) belegt wird.

In diesem Zusammenhang sei ein Forschungsbericht von Bossert et al aus 1984 erwähnt, in welchem man auf das Erfordernis einer gewissen Grundfeuchte verwies, bei deren Unterschreitung eine Verschlechterung des k-Wertes gemessen wurde. Damals war man noch so mutig einzugestehen, nicht für alle Veränderungszustände der gemessenen k-Werte eine wissenschaftliche Erklärung zu haben.

Bezüglich des Standes der Wissenschaft lässt sich feststellen, dass seit spätestens Mitte der 90er die Grundlagen des Feuchteverhaltens hinreichend erforscht waren. Dazu besteht ein gutes Grundlagenwissen, aber es wird wenig publiziert und die meisten Lehr- und Tabellenbücher begnügen sich mit dem Glaser-Verfahren.

Bezüglich des Standes der Software sei auf den Fachartikel „Zertifiziert oder bewährt? - Eine Betrachtung zum Stand der Software-Anwendung - Energetische Optimierung, thermische Simulation, Feuchtebetrachtung, Energiepass“ verwiesen [Link Fachartikel DIMaGB.de]. Es gibt Verfahren zur 2- und 3-dimensionalen Berechnung von Temperatur- und Sorptions- (also Feuchte-) Isothermen, mit denen eine realitätsnahe Abbildung möglich wird.

Hinreichend gute Programme sollten im Rahmen der dynamischen Simulation in der Lage sein, dem Phänomen Rechnung zu tragen, dass Diffusion und Kapillarität gleichzeitig ablaufen, wobei auch Kreisläufe möglich sind.

Das Manko hierbei: gute Ergebnisse benötigen gute Ausgangswerte, es sind aber nur wenige Kennwerte verfügbar und selbst die Hersteller tun sich schwer. Insofern besteht offensichtlich ein gewisser Mess- und Forschungsbedarf (vergl. Kapitel „Porosität“), denn in den letzten zehn Jahren ist man hier nicht viel weiter gekommen.

Die vom IBP geäußerten Kritiken am Glaser-Verfahren sollen nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich einerseits die Vermutung aufdrängt, die Betonung der Kapillarität gehe einher mit Entwicklung von der IBP-Software Wufi, quasi die Wiederentdeckung der Feuchte [Link zum Artikel bei DIMaGB.de], und dass sich andererseits nach mehreren DIN- und EnEV-Novellierungen immer noch nicht der Rechenansatz für den Feuchteanteil in die DIN 4108 verirrt hat.

Eine weitere Diskrepanz „theoria cum praxi“ tut sich auf, wenn man sich des Themas „Alterungsverhalten“ (Stichworte: Farben, Kunstharzputze / mineral. Putze) annimmt. Laborwerte helfen wenig, das zeigt die Praxis – dennoch wird damit gerechnet. Aber es ist doch so, dass komplexe Zustände komplexe Algorithmen benötigen.

Wozu erfolgt die ganze Rechnerei? Um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen? Liest man die Dokumente zur EnEV aufmerksam, stellt man – mehr oder weniger überrascht – dass der Gesetzgeber hier sehr großzügig herangeht. Angesichts der beträchtlichen tolerierten Abweichungen zwischen Theorie und Praxis stellt sich die Frage nach der Sinnhaftigkeit des Umfangs der für die Berechnungen zugrunde liegenden Unterlagen, derzeit sind es ca. 800 Seiten.

Letztendlich geht es um Energieeinsparungen, die zu erzielen sind. Angesichts steigender Preise dürfte allerdings der pädagogische Anspruch des Gesetzgebers gegenüber seinen Steuerzahlern hinsichtlich seines Erfordernisses in Frage zu stellen sein. Und dass theoretische Einsparungen wenig helfen, wird jeder feststellen, der einen Vergleich zwischen „berechnet“ und „eingetreten“ anstellt. Bei einem unerfreulichen Ausgang immer wieder das Nutzerverhalten als Begründung heran zu ziehen, erscheint schon etwas hilflos.

Der Weg zum Ziel wird durch die Energieeffizienz-Richtlinie der EU ganz gut vorgegeben. Ziel dieser Richtlinie ist es, die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der Gemeinschaft unter Berücksichtigung der jeweiligen äußeren klimatischen und lokalen Bedingungen sowie der Anforderungen an das Innenraumklima und der Kostenwirksamkeit zu unterstützen (Artikel 1).

Unter „Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes“ versteht man die Energiemenge, die tatsächlich verbraucht oder veranschlagt wird, um den unterschiedlichen Erfordernissen im Rahmen der Standardnutzung des Gebäudes (u. a. etwa Heizung, Warmwasserbereitung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung) gerecht zu werden. Diese Energiemenge ist durch einen oder mehrere numerische Indikatoren darzustellen, die unter Berücksichtigung von Wärmedämmung, technischen Merkmalen und Installationskennwerten, Bauart und Lage in Bezug auf klimatische Aspekte, Sonnenexposition und Einwirkung der benachbarten Strukturen, Eigenenergieerzeugung und anderer Faktoren, einschließlich Innenraumklima, die den Energiebedarf beeinflussen, berechnet wurden. (Artikel 2 Begriffsbestimmungen)

Artikel 12 Information gibt vor, dass die Mitgliedstaaten die erforderlichen Maßnahmen treffen können, um die Nutzer von Gebäuden über die verschiedenen Methoden und praktischen Verfahren zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz zu informieren. Bei aller Abneigung gegenüber jeglicher Bürokratie wünscht man sich an dieser Stelle, die EU hätte es zwingend vorgegeben.


[- nach oben -](#)

## **Alles bekannt?**

**Kapillarität und hygrische Werte – bekannt ist noch lange nicht alles**

### Feuchtetransport: Flüssigtransport

**Porenbeton**



- Poröse Baustoffe haben unterschiedliche Porenstruktur
- Aufgrund der komplexen Hohlraumstruktur bis heute keine exakte theoretische Beschreibung der Kapillarleitung
- Für Einzelkapillare (Cammerer):

$$x = B \sqrt{t}$$

$x$  [m] Wassereindringtiefe  
 $B$  [m<sup>2</sup>/s] Wassereindringkoeffizient

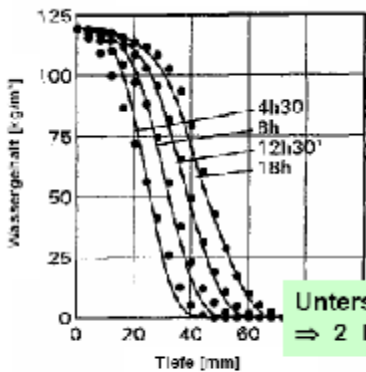
47

„Aufgrund der komplexen Hohlraumstruktur bis heute keine exakte theoretische Beschreibung der Kapillarleitung“

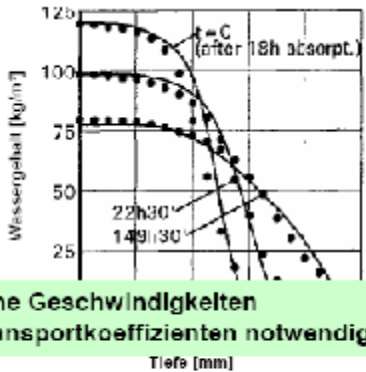
### Feuchtetransport: Flüssigtransport

**Messung der Feuchteprofile**

**Saugen**



**Weiterverteilen, Trocknen**



**Unterschiedliche Geschwindigkeiten  
⇒ 2 Flüssigtransportkoeffizienten notwendig!**

48

Es sind zwei Flüssigtransportkoeffizienten notwendig, weil die Geschwindigkeiten beim Saugen und beim Weiterverteilen bzw. Trocknen unterschiedlich sind.

Quelle: Dr. Andreas H. Holm: "Bauphysik – Feuchteschutz 5, Besuch in Holzkirchen", Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, 25. November 2003 – 14:30 bis ca. 17:00 Uhr

- nach oben -

## Wassergehalt, -aufnahme und -abgabe in der Simulation

Bei der dynamischen Simulation - z.B. mit dem Programm DK-solar der Delzer Kybernetik GmbH - ist es wichtig, die Definition der Rechengröße Startwassergehalt zu kennen: „Feuchte (Wassergehalt) ist in % vom möglichen Wassergehalt, wenn alle Poren mit Wasser gefüllt sind (Zahl im Zustandsvektor mal 100 ergibt %).“ Quelle: Delzer Kybernetik, 16.09.2005.

Das bedeutet, wenn man 50 eingibt, sind das 50 %. „Zahl im Zustandsvektor“ bedeutet, man liest oben in den Zahlenkolonnen für „Feuchte Außenfl. X, Schicht y“ 0,5000E-00 und das sind  $0,5 \times 1,0 \times 100 = 50$ . Eingabe 2.5 ergibt Anzeige 0.2500E-01:  $0,25 \times 0,1 \times 100 = 2,5$ .

Die praktische Bedeutung: 50% des füllbaren Porenvolumens sind mit Wasser gefüllt. Füllbar bedeutet hier drucklos füllbar, denn nur im Labor kann man die Luft (fast) vollständig aus den Poren austreiben. In der Praxis wird immer eine Restmenge Luft in den Poren bleiben.

Beispiel:

Ziegelwand mit 36,5 cm Vollziegeln  $\rho=1.200$  und Porenanteil 24% und Wassersättigung 50%  
Startwassergehalt = 50 = 50%

Das bedeutet: 50% vom Porenanteil sind mit Wasser füllbar, und davon sind 50 % gefüllt.

Rechenweg:  $0,24 \times 0,50 \times 0,50 = 0,06 = 6 \text{ V.-%}$

Ergebnis: 6% des Volumens sind mit Wasser gefüllt, 18% mit Luft und 76% sind Ziegelmaterial.

Auf den Volumenanteil kommt man somit allemal und auch gleichbedeutend.

Unterschiede ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Rohdichten für die Massenanteile (M.-%).

1 m<sup>3</sup> Ziegel: 6,0 V.-% Wasser mit 1.000 kg/m<sup>3</sup> und 94,0 V.-% Ziegel mit 1.200 kg/m<sup>3</sup>  
ergeben:

$1.000 \times 0,06 + 1.200 \times 0,94 = 60 + 1.128 = 1.188 \text{ kg/m}^3$

$60 / 1.188 = 0,05050 = 5,05 \text{ M.-%}$  für das Wasser bei 6,0 V.-% (Faktor = 0,8416)

$1.128 / 1.188 = 0,94949 = 94,95 \text{ M.-%}$  für den Ziegel bei 94,0 V.-% (Faktor = 1,0229)

Hierbei ist zu bemerken, dass es sich um eine sehr starke Vereinfachung handelt. Die bisherige Berechnung beinhaltet Wasser, Ziegel und Luft. Ziegelmauerwerk besteht aber aus Ziegeln und Mörtel und i.d.R. ist es beidseitig geputzt. Das Beispiel wird nachfolgend genau ausgerechnet.

1 m<sup>2</sup> der 365er Wand entspricht 0,365 m<sup>3</sup>. Bei 12 Schichten je 1 m benötigt man für diese Wandstärke 148 Steine. Normalformat bedeutet  $240 \times 115 \times 71 \text{ mm} = 0,001.959.6 \text{ m}^3$  je Stein und somit  $0,290.020.8 \text{ m}^3$  Ziegel je 1 m<sup>2</sup> (das sind 79,5 V.-%). Verbleiben für den Mörtel  $0,074.979.2 \text{ m}^3$  (das sind 20,5 V.-%).

Schicht	Dicke [mm]	Material	Anteil [V.-%]	Porenanteil [%]	Wassersättig. [%]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
1 Innenputz	15	Kalkmörtel	100,0%	28	50	1.800
2 Mauerwerk	365	Vollziegel NF	79,5%	24	50	1.200
		Kalkmörtel	20,5%	28	50	1.800
3 Außenputz	20	Kalkmörtel	100,0%	28	50	1.800

Tabelle 1. Schichtenaufbau der Wand

Schicht	Dicke [mm]	Material	Anteil [V.-%]	äqu. Schicht dicke [mm]	Anteil am Volumen
1 Innenputz	15	Kalkmörtel	100,0%	15,0	3,8%
2 Mauerwerk	365	Vollziegel NF	79,5%	290,2	72,5%
	365	Kalkmörtel	20,5%	74,8	18,7%
3 Außenputz	20	Kalkmörtel	100,0%	20,0	5,0%
Σ	400			400,0	100,0%



Tabelle 2: Wandgeometrie bezüglich der Volumenanteile

Die Tabellen 1 und 2 liefern die Ausgangsgrößen für das gewählte Beispiel. Die Materialkennwerte sind der Materialdatenbank entnommen: Spalten 1 und 66.

Die Rohdichte, auch Bulkdichte, scheinbare oder geometrische Dichte genannt, ist die Dichte eines porösen Festkörpers basierend auf dem Volumen einschließlich der Porenräume. Sie kann mit einem Medium gemessen werden, das nicht in die Poren eindringt, zum Beispiel Quecksilber. Dichte und Rohdichte unporöser Körper sind gleich.

Die Reindichte, auch Skelettdichte, absolute oder wahre Dichte genannt, ist die Dichte eines porösen Festkörpers basierend auf dem porenfreien Volumen, also ohne eine Berücksichtigung der Porenräume. Für die Bestimmung der Reindichte muss der Feststoff solange aufgemahlen werden, bis die Poren aufgeschlossen sind.

Aufgrund der in Tabelle 1 angegebenen Porenwerte (Porenanteil in %) ergeben sich aus der Rohdichte bedeutend höhere Werte für die Reindichte: 2.500 kg/m<sup>3</sup> beim Mörtel und 1.580 kg/m<sup>3</sup> beim Ziegel. Das sind die eigentlichen Rechenwerte. Es verbietet sich mit der Rohdichte zu rechnen, da diese bereits gewichtslose Porenanteile (Luft) enthält.

<b>StWG = 5%</b>						
<b>Material</b>	<b>Anteil</b>	<b>PA (WS)</b>	<b>WG</b>	<b>LG</b>	<b>MG (res.)</b>	<b>Σ</b>
Kalkmörtel	3,8%	14,00%	0,70%	13,30%	86,00%	100,00%
Vollziegel	72,5%	12,00%	0,60%	11,40%	88,00%	100,00%
Kalkmörtel	18,7%	14,00%	0,70%	13,30%	86,00%	100,00%
Kalkmörtel	5,0%	14,00%	0,70%	13,30%	86,00%	100,00%
Σ	100,0%					
<b>Material</b>	<b>Anteil</b>	<b>PA</b>	<b>WG</b>	<b>LG</b>	<b>MG (res.)</b>	<b>Σ</b>
Kalkmörtel	3,8%	0,53%	0,03%	0,50%	3,23%	3,75%
Vollziegel	72,5%	8,71%	0,44%	8,27%	63,84%	72,54%
Kalkmörtel	18,7%	2,62%	0,13%	2,49%	16,09%	18,71%
Kalkmörtel	5,0%	0,70%	0,04%	0,67%	4,30%	5,00%
<b>ME = V.-%</b>	100,0%		0,63%	11,92%	87,45%	<b>100,00%</b>
<b>Schicht</b>	<b>Dicke [mm]</b>	<b>Material</b>	<b>WG</b>	<b>LG</b>	<b>MG (res.)</b>	<b>Σ</b>
1 Innenputz	15	Kalkmörtel	0,26	0,00	80,63	80,9
2 Mauerwerk	365	Vollziegel	4,35	0,00	1.007,98	1.012,3
		Kalkmörtel	1,31	0,00	402,18	403,5
3 Außenputz	20	Kalkmörtel	0,35	0,00	107,50	107,9
<b>ME = kg</b>		Σ	6,27	0,00	1.598,29	<b>1.604,6</b>
<b>Schicht</b>	<b>Dicke [mm]</b>	<b>Material</b>	<b>WG</b>	<b>LG</b>	<b>MG</b>	<b>Σ</b>
1 Innenputz	15	Kalkmörtel	0,02%	0,00%	5,02%	5,04%
2 Mauerwerk	365	Vollziegel	0,27%	0,00%	62,82%	63,09%
		Kalkmörtel	0,08%	0,00%	25,07%	25,15%
3 Außenputz	20	Kalkmörtel	0,02%	0,00%	6,70%	6,72%
<b>ME = M.-%</b>		Σ	0,39%	0,00%	99,61%	<b>100,00%</b>

Tabelle 3: Berechnungen zu den Volumen- und Massenanteilen im Schichtenaufbau der Wand

Legende:

StWG = Startwassergehalt; PA (WS) = Porenanteil, Wasser gesättigt = Produkt aus Porenanteil x Wassersättigung, siehe oben: 0,28 x 0,50 bzw. 0,24 x 0,50; WG = Wassergehalt entsprechend dem StWG, hier: 14% x 5% = 0,7%; LG = Luftgehalt entsprechend dem StWG, das ist der wasserfreie Rest

des Porenvolumens; MG (res.) = der resultierende Materialgehalt; es gilt: Wassergehalt + Luftgehalt + Reinmaterialgehalt = 100%

Erläuterung:

Die erste Berechnungstabelle benötigt man, um – ausgehend vom festgelegten Startwassergehalt – den Wassergehalt der jeweiligen Schicht zu berechnen. In der zweiten Berechnungstabelle wird – ausgehend vom Anteil der jeweiligen Schicht am Gesamtvolumen – der Volumenanteil aller Komponenten (an 1 m<sup>2</sup> Wand) berechnet. Die Einheit ist V.-% und die Summe muss 100% sein. Anhand der Reindichte werden in der dritten Berechnungstabelle die Massenanteile aller Komponenten (an 1 m<sup>2</sup> Wand) berechnet. In der vierten Berechnungstabelle erfolgt die Umrechnung auf prozentuale Massenanteile. Die Einheit ist M.-% und die Summe muss wieder 100% sein.

Numerisch lassen sich diese Rechenschritte deutlich vereinfachen, da die Ausgangswerte ohnehin eingegeben sind und der Rest reine Tabellenkalkulation ist. Tabelle 3 soll die Rechenwege verdeutlichen. Setzt man unterschiedliche Werte für den Startwassergehalt fest, erhält man die Werte, die in Tabelle 4 zusammengestellt wurden.

<b>StWG</b>	<b>WG</b>	<b>LG</b>	<b>MG (res.)</b>
<b>5%</b>			
ME = V.-%	0,63%	11,92%	87,45%
ME = kg	6,27	0,00	1.598,29
ME = M.-%	0,39%	0,00%	99,61%
<b>10%</b>			
ME = V.-%	1,25%	11,29%	87,45%
ME = kg	12,55	0,00	1.598,29
ME = M.-%	0,78%	0,00%	99,22%
<b>15%</b>			
ME = V.-%	1,88%	10,67%	87,45%
ME = kg	18,82	0,00	1.598,29
ME = M.-%	1,16%	0,00%	98,84%
<b>20%</b>			
ME = V.-%	2,51%	10,04%	87,45%
ME = kg	25,10	0,00	1.598,29
ME = M.-%	1,55%	0,00%	98,45%
<b>25%</b>			
ME = V.-%	3,14%	9,41%	87,45%
ME = kg	31,37	0,00	1.598,29
ME = M.-%	1,93%	0,00%	98,07%
<b>30%</b>			
ME = V.-%	3,76%	8,78%	87,45%
ME = kg	37,65	0,00	1.598,29
ME = M.-%	2,30%	0,00%	97,70%
<b>35%</b>			
ME = V.-%	4,39%	8,16%	87,45%
ME = kg	43,92	0,00	1.598,29
ME = M.-%	2,67%	0,00%	97,33%
<b>40%</b>			
ME = V.-%	5,02%	7,53%	87,45%
ME = kg	50,20	0,00	1.598,29
ME = M.-%	3,05%	0,00%	96,95%
<b>45%</b>			
ME = V.-%	5,65%	6,90%	87,45%
ME = kg	56,47	0,00	1.598,29
ME = M.-%	3,41%	0,00%	96,59%
<b>50%</b>			
ME = V.-%	6,27%	6,27%	87,45%
ME = kg	62,75	0,00	1.598,29

ME = M.-%	3,78%	0,00%	96,22%
-----------	-------	-------	--------

Tabelle 4: Ergebniszusammenstellung für verschiedene Startwassergehalte

Man erkennt in Tabelle 4 unveränderliche Werte: Gewicht und Gewichtsanteil der Luft wegen der „Masselosigkeit“ sowie Volumenanteil und Gewicht des Reinmaterials. Der Grund dafür ist simpel: Porenluft wiegt aufgrund der Umgebungsluft nicht mit und der Materialanteil ist unverändert, es verändert sich nur die Relation der Gewichtsanteile. Diese Tabelle lässt sich zusammenfassen.

StWG %	WG			LG V.-%	MG V.-%
	V.-%	kg	M.-%		
5,00%	0,63%	6,27	0,39%	11,92%	99,61%
10,00%	1,25%	12,55	0,78%	11,29%	99,22%
15,00%	1,88%	18,82	1,16%	10,67%	98,84%
20,00%	2,51%	25,10	1,55%	10,04%	98,45%
25,00%	3,14%	31,37	1,93%	9,41%	98,07%
30,00%	3,76%	37,65	2,30%	8,78%	97,70%
35,00%	4,39%	43,92	2,67%	8,16%	97,33%
40,00%	5,02%	50,20	3,05%	7,53%	96,95%
45,00%	5,65%	56,47	3,41%	6,90%	96,59%
50,00%	6,27%	62,75	3,78%	6,27%	96,22%

Tabelle 5: Ergebniszusammenfassung aus Tabelle 4

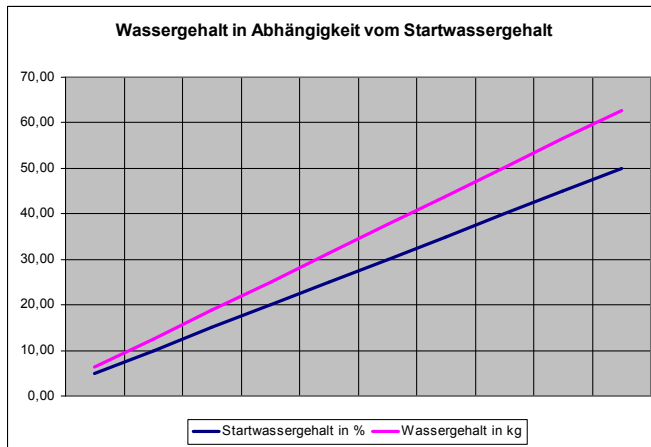


Bild 1: Wassergehalt in kg und Startwassergehalt in % für die Beispielwand

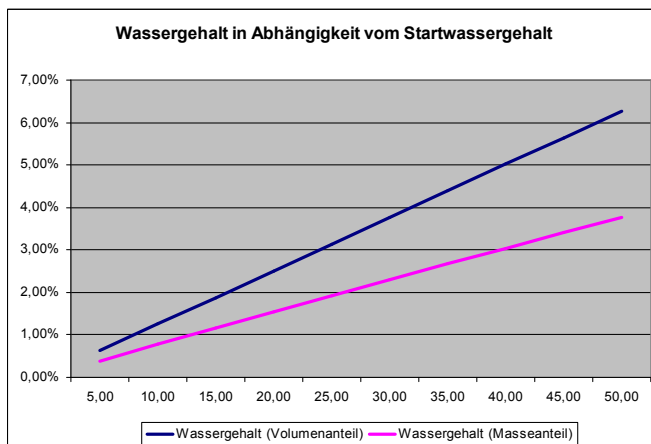


Bild 2: Wassergehalt in % (Volumenanteil) und Wassergehalt in % (Masseanteil)

Dass es sich um lineare Beziehungen handelt, sollte nicht verwundern. Es handelt sich um reine Verhältniszahlen. Das hier exerzierte analytische Verfahren soll verdeutlichen, welche Relationen sich hinsichtlich der Feuchtegehalte ergeben und inwiefern die Bauteilgeometrie und die Materialeigenschaften eine Rolle spielen.

Die Berechnungstabellen hierzu sind als Spreadsheet verfügbar, so dass variable Berechnungen durchgeführt werden können. Wichtig sind jedoch wertende Betrachtungen zu den Ergebnissen, die ggf. Hinweise für weiter anzustellende Betrachtungen und Ansätze liefern.

Im Artikel „Sorption“ wird im Kapitel „Ausgleichsfeuchte“ beschrieben, wie sich die relativen Feuchtegehalte unterscheiden können. Bemerkenswerter jedoch dürfte die Tatsache sein, dass gemessene Werte der Baustofffeuchte insbesondere bei Dämmstoffen beträchtlich höher ausfallen als die genormten.

Baustoff	Relation M.-% : V.-%
Ziegel	1 : 1,8
Porenbeton	1,3 : 1
Holzwohleplatten	2,3 : 1
Holzfaserweichplatten	4 : 1
Polystyrol	67 : 1
Mineralfasermatten	10 : 1

Tabelle 6: Relationen von M.-% zu V.-% ausgewählter Baustoffe (nach Eichler)

Eine Berechnung wie eingangs, jetzt in der Leichtbau-Variante, soll die Auswirkungen der Rohdichten auf die Relationen verdeutlichen.

Schicht	Dicke [mm]	Material	Anteil [V.-%]	Poren- anteil [%]	Wasser- sättig. [%]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
1 Innenputz	12,5	Gipskarton	100,0%	65	50	900
2 Wandmat.	210	Holzbalken	25,0%	73	50	600
		Styropor	75,0%	95	50	15
3 Außenputz	19	Holzfaserpl.	100,0%	80	50	1.000

Tabelle 7. Schichtenaufbau der Wand, Var. Leichtbau

Schicht	Dicke [mm]	Material	Anteil [V.-%]	äqu. Schicht dicke [mm]	Anteil am Volumen
1 Innenputz	12,5	Gipskarton	100,0%	12,5	5,2%
2 Wandmat.	210	Holzbalken	25,0%	52,5	21,7%
		Styropor	75,0%	157,5	65,2%
3 Außenputz	19	Holzfaserpl.	100,0%	19,0	7,9%
Σ	241,5			241,5	100,0%

Tabelle 8: Wandgeometrie bezüglich der Volumenanteile, Var. Leichtbau

Die Tabellen 7 und 8 liefern die Ausgangsgrößen für das gewählte Beispiel. Die Materialkennwerte sind der Materialdatenbank entnommen: Spalten 62, 123, 143 und 154.

Aufgrund der in Tabelle 7 angegebenen Porenwerte (Porenanteil in %) ergeben sich aus der Rohdichte bedeutend höhere Werte für die Reindichte: 2.571 kg/m<sup>3</sup> für die Gipskartonplatten, 2.222 kg/m<sup>3</sup> für das Holz, 300 für das Styropor und 5.000 für die Pressspanplatten. Das sind die eigentlichen Rechenwerte. Es verbietet sich mit der Rohdichte zu rechnen, da diese bereits gewichtslose Porenanteile (Luft) enthält.

Die folgende Berechnung ist aus Tabelle 3 bekannt und damit vergleichbar.

**StWG = 5%**

Material	Anteil	PA (WS)	WG (WS)	LG (WS)	MG (res.)	Σ
Gipskarton	3,8%	32,50%	1,63%	30,88%	67,50%	100,00%
Holzbalken	22,8%	36,50%	1,83%	34,68%	63,50%	100,00%
Styropor	68,4%	47,50%	2,38%	45,13%	52,50%	100,00%
Holzfaserpl.	5,0%	40,00%	2,00%	38,00%	60,00%	100,00%
Σ	100,0%					

Material	Anteil	PA (WS)	WG (WS)	LG (WS)	MG (res.)	Σ
Gipskarton	3,8%	1,22%	0,06%	1,16%	2,53%	3,75%
Holzbalken	22,8%	8,33%	0,42%	7,91%	14,49%	22,81%
Styropor	68,4%	32,51%	1,63%	30,88%	35,93%	68,44%
Holzfaserpl.	5,0%	2,00%	0,10%	1,90%	3,00%	5,00%
<b>ME = V.-%</b>	100,0%		2,20%	41,85%	55,95%	<b>100,00%</b>

Schicht	Dicke [mm]	Material	WG (WS)	LG (WS)	MG (res.)	Σ
1 Innenputz	15	Gipskarton	0,61	0,00	65,09	65,7
2 Wandmat.	365	Holzbalken	4,16	0,00	321,91	326,1
		Styropor	16,25	0,00	107,79	124,0
3 Außenputz	20	Holzfaserpl.	1,00	0,00	150,00	151,0
<b>ME = kg</b>		Σ	22,03	0,00	644,79	<b>666,8</b>

Schicht	Dicke [mm]	Material	WG (WS)	LG (WS)	MG (res.)	Σ
1 Innenputz	15	Gipskarton	0,09%	0,00%	9,76%	9,85%
2 Wandmat.	365	Holzbalken	0,62%	0,00%	48,28%	48,90%
		Styropor	2,44%	0,00%	16,16%	18,60%
3 Außenputz	20	Holzfaserpl.	0,15%	0,00%	22,50%	22,64%
<b>ME = M.-%</b>		Σ	3,30%	0,00%	96,70%	<b>100,00%</b>

Tabelle 9: Berechnungen zu den Volumen- und Massenanteilen im Schichtenaufbau der Wand

StWG %	WG			LG V.-%	MG V.-%
	V.-%	kg	M.-%		
5,00	2,20%	22,03	3,30%	41,85	96,70
10,00	4,41%	44,05	6,40%	39,65	93,60
15,00	6,61%	66,08	9,30%	37,45	90,70
20,00	8,81%	88,11	12,02%	35,24	87,98
25,00	11,01%	110,13	14,59%	33,04	85,41
30,00	13,22%	132,16	17,01%	30,84	82,99
35,00	15,42%	154,19	19,30%	28,63	80,70
40,00	17,62%	176,21	21,46%	26,43	78,54
45,00	19,82%	198,24	23,52%	24,23	76,48
50,00	22,03%	220,27	25,46%	22,03	74,54

Tabelle 10: Ergebniszusammenfassung aus der Tabelle mit den variierenden StWG-Werten

Die Unterschiede der Werte aus Tabelle 10 (Var. Leichtbau) sind beträchtlich im Vergleich mit den Werten aus Tabelle 5 (Var. Massivbau), die dort mit 62,5 kg Wasser bei StWG 50% enden. Die Begründung liegt in den unterschiedlich hohen Porenanteilen: 24 bzw. 28% in der Variante Massivbau (siehe Tabelle 1) und 65 / 73 / 80 / 95 % in der Variante Leichtbau (siehe Tabelle 7).

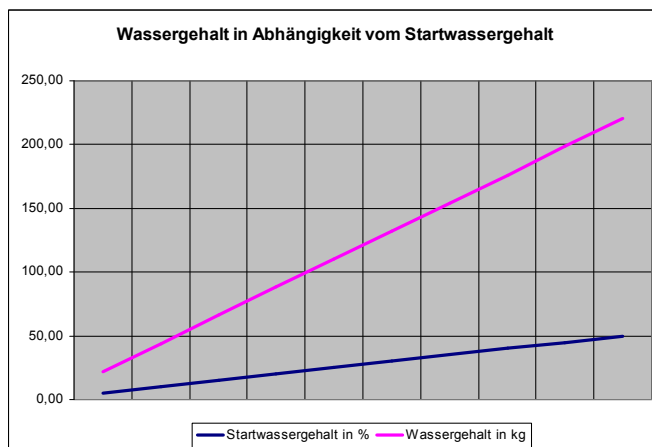


Bild 3: Wassergehalt in kg und Startwassergehalt in % für die Beispielwand, Var. Leichtbau

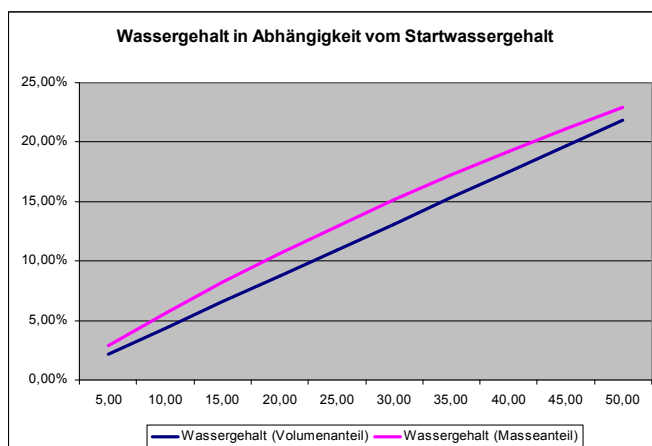


Bild 4: Wassergehalt in % (Volumenanteil) und Wassergehalt in % (Masseanteil), Var. Leichtbau

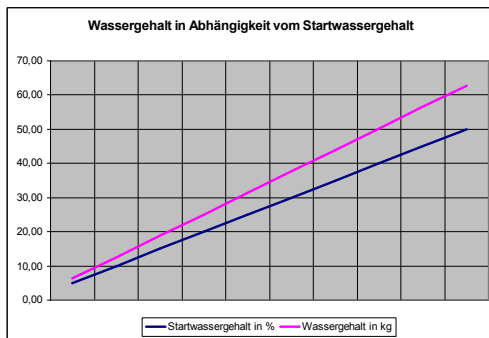


Bild 1

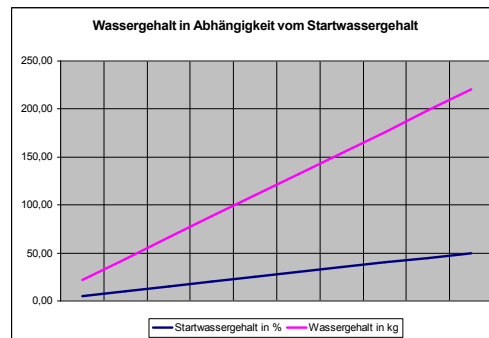


Bild 3

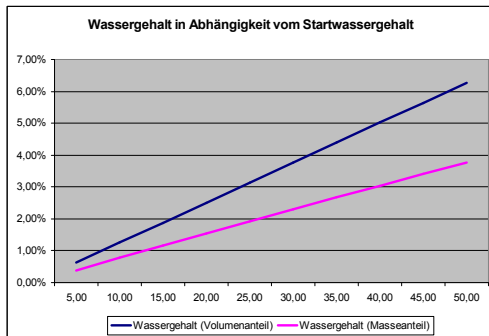


Bild 2

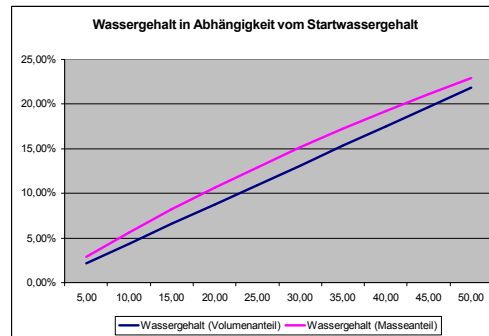


Bild 4

Bilder 1 bis 4 zusammengestellt zum Vergleich

Je nach Porosität und Rohdichte können sich die Feuchterelationen der Baustoffe stark unterscheiden und auch zu signifikanten Wirkunterschieden führen. Das Gleichnis vom nassen Pullover, der nicht wärmt, ist jedermann einleuchtend. Wer aber vermag abzuschätzen, in welchem Maße das Wärmeleit- und das Speichervermögen der Wandkonstruktion von der Feuchte beeinflusst werden?

Mit zunehmender Feuchte steigt die spezifische Wärmekapazität. Die spezifische Wärmekapazität (kurz "spezifische Wärme", Formelzeichen  $c$ ) ist jene Energiemenge, die man benötigt, um 1 kg eines Stoffes um  $1^\circ\text{C}$  zu erwärmen. Für Wasser beträgt sie  $4.190\text{ J/kg}$ , für mineralische Baustoffe ist sie mit  $1.000\text{ J/kg}$  normiert.

Die Bedeutung erkennt man an einem einfachen Rechenbeispiel. Im Fall A ist der Baustoff völlig trocken, Wasser mit  $0\text{ M.-%}$ . Die spezifische Wärmekapazität beträgt  $0,0 \times 4.190 + 1,0 \times 1.000 = 1.000$ . Im Fall B gehen wir von  $25\text{ M.-%}$  Wassergehalt aus. Die spezifische Wärmekapazität beträgt nunmehr  $0,25 \times 4.190 + 0,75 \times 1.000 = 1.797,5$ , also das rd. 1,8-fache.

Bevor mit der Wärmeschutzverordnung (WSchV) dem Bauteil Außenwand die energiebilanzrelevante Funktion der Wärmespeicherung abgesprochen wurde, kam in der DIN 4108 der Begriff der Wärmespeicherung in den Begriffserklärungen wie folgt vor:

### „3.11. Wärmespeicherung

Speicherung von Wärmemengen in einem Körper oder Bauteil bei seiner Erwärmung. Die Wärmespeicherung ist um so größer, je größer der Unterschied zwischen der Temperatur des Bauteils und der Temperatur der umgebenden Luft und je größer die Stoffwärme (3.12.) und die Masse (das Gewicht) des Bauteils sind.“

### „4.3 Wärmespeicherung

4.3.1 Wärmespeichernde Wände und Decken sind erforderlich, um im Winter eine zu schnelle Auskühlung der Räume bei nachlassen der Heizung und im Sommer eine zu rasche Erwärmung zu verhindern. Der Erfolg ist um so größer, je größer das Wärmespeichervermögen der Bauteile und je zweckmäßiger ihre Lage zur Außenluft ist.“

Quelle ist die DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau, hier zitiert aus der Ausgabe von Mai 1960. Damals war man sich noch der Bedeutung der Feuchte bewusst:

„4.1.1 Die Wärmeleitzahl  $\lambda$  ist bei festen Baustoffen abhängig ...

4.1.1.4 vom Feuchtigkeitsgehalt. Die starke Abhängigkeit der Wärmeleitzahl vom Feuchtigkeitsgehalt beruht auf der Verdrängung der Porenluft durch das Wasser, dessen Wärmeleitzahl rund 25mal größer ist als die ruhender Luft in kleinen, fein verteilten Poren und auf dem Vorgang der Dampfdiffusion, der in den luftegefüllten Poren feuchter Stoffe beim Wärmedurchgang stattfindet.“  
Quelle: ebenda.

Wie gelangt die Feuchte in die Wand?

Luftfeuchte wird sorptiv aufgenommen. Bei der Anlagerung des Sorptivs (Wassermoleküle der Luftfeuchte, Wasserdampf) an die Oberfläche des Sorbens (hier: die Wandoberfläche: Mauerwerk, Putz, Farbe, Tapete...) spricht man von Adsorption, bei der Aufnahme ins Innere von Absorption.

Der gegenläufige Vorgang wird in beiden Fällen als Desorption bezeichnet. Da man Ad- und Absorption teilweise nicht eindeutig genug voneinander unterscheiden kann, führte J. W. McBain 1909 den Oberbegriff Sorption ein.

Baustoff	Ausgleichsfeuchte
Holz	14 %
Porenbeton	4,0 %
Kalkputz, außen	3,0 %
Vollziegel	1,5 %
Kalkmörtel	0,5 %

Tabelle 6: Ausgleichsfeuchten verschiedener Materialien (V.-% bei 75% rel.LF)

Schlagregen wird kapillar aufgenommen. Die Eigenschaft eines Baustoffes zur Wasseraufnahme ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und Porosität und sie ist auch entscheidend für ihre Frostsicherheit.

Eine Fassadenbeschichtung sollte einen möglichst geringen Wasseraufnahmewert (kleiner  $w$ -Wert) und eine möglichst hohe Wasserdampfdurchlässigkeit (geringer  $s_d$ -Wert) aufweisen. Ein weiteres Qualitätskriterium ist rissefreies Auftrocknen des Anstrichfilms und dessen Fähigkeit, kleinere Risse im Untergrund zu überbrücken.

Der  $w$ -Wert ist das Maß der kapillaren Wasseraufnahme, angegeben wird er in  $\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ .  $\text{h}^{0,5}$  bedeutet  $\sqrt{h}$  (Wurzel aus). Wenn man den  $w$ -Wert einer Beschichtung mit 5 multipliziert, erhält man die Wassermenge, die in 24 h Beregnung durch 1  $\text{m}^2$  der Beschichtung aufgesaugt wird:  $w$ -Wert 0,1, dann werden in 24 Stunden über 1  $\text{m}^2$  Fläche 0,5 l bzw. kg Wasser aufgenommen.

Ein weiterer Wert wird mit der EN 1062 (Entsprechung ist die DIN 52617) eingeführt: der  $V$ -Wert. Aus der Relation  $V = 21 / s_d$  lässt sich bei bekanntem  $w$ -Wert die Austrocknungszeit für jede beliebige Wasseraufnahme bei 23°C berechnen. Bsp.:  $s_d$ -Wert = 0,02, dann beträgt der  $V$ -Wert =  $21 : 0,02 = 1.050 \text{ g/m}^2 \text{ d}$  (Gramm je  $\text{m}^2$  und Tag). Bei einem  $w$ -Wert von 0,1 beträgt die Wasseraufnahme 500  $\text{g/m}^2 \text{ d}$ . Die Austrocknung beträgt demnach rd. einen halben Tag. Bei nur 3°C (das sind  $2 \times 10^\circ\text{C}$  weniger als 23°C und somit ist die Austrocknungsgeschwindigkeit 2x halbiert, der  $V$ -Wert beträgt hier  $1.050 : 2 : 2 = 262,50$ ) dauert die Austrocknung 2 Tage.

Dass der  $w$ -Wert gering sein soll und der  $s_d$ -Wert auch, leuchtet ein: wenig Wasser soll aufgenommen werden, aber Feuchte soll rasch ausdiffundieren können. Bei allem Verständnis dafür, hierfür Formeln und Kennwerte finden zu wollen, sei auf ein entscheidendes Manko hingewiesen: das Alterungsverhalten wird nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass viele schöne Laborwerte in der Praxis nur kurzzeitig bzw. gar nicht auftauchen.

Zudem wird anhand der Wirkmechanismen von ThermoShield deutlich, dass die Vereinfachung „Wasseraufnahme kapillar – Wasserabgabe diffundiv“ nicht allgemein anzusetzen ist – zumindest nicht, wenn es um die Beschreibung der Wirkung einer Membrantechnologie geht. Zwar wurden für ThermoShield  $s_d$ -Werte von 0,02 gemessen (TNO, 2005), es sind aber auch andere Werte bekannt:



0,70 (IBP, 1999), 0,54 (EMPA, 2000), wobei es sich hierbei um importierte Ware handelt und seit 2003 ThermoShield in Berlin Pankow produziert wird.

Was in der Normung noch nicht berücksichtigt wird: für die thermokeramische Membrantechnologie ThermoShield sind 2  $s_d$ -Werte anzugeben. Der für den trockenen und der für den feuchten Zustand. Zum Verständnis hier ein Verweis auf die TNO-Werte aus 2005: 0,02 im feuchten und 1,7 im trockenen Bereich.

Die praktische Bedeutung liegt auf der Hand: im Sommer ist das Dampfdruckgefälle nach innen gerichtet, im Sommer werden die Gebäude feucht, im Winter werden sie trocken geheizt. Demnach kann der  $s_d$ -Wert im Sommer nicht hoch genug sein. Demnach ist ein sehr geringer  $s_d$ -Wert im Sommer nachteilig.

Es gibt noch eine weitere Eigenschaft der ThermoShield-Membran, die sich anhand der herkömmlichen Normen nicht beschreiben lässt: die begrenzte Wasseraufnahme, das heißt es wird bei Regen eine bestimmte Menge aufgenommen und dann riegelt die Membran ab.

Wie lässt sich der Feuchtetransport berechnen?

Für viele Baustoffe sind die Sorptionsisothermen weitgehend bekannt. Aus Wetterbeobachtungen lassen sich die langjährigen Mittel der relLF außen angeben. Für das Gebäudeinnere ist bekannt, dass die relLF im Winter stark abnimmt. Je nach Belegung und Nutzergewohnheit lassen sich temporäre Spitzen definieren, die aus Duschen und Kochen resultieren.

Aus Wetterbeobachtungen lassen sich die langjährigen Mittel der Niederschläge angeben, die sich allerdings auf horizontale Flächen beziehen. In der Regel gehen Niederschläge mit höheren Windgeschwindigkeiten einher, so dass meist von einer Benetzung der Wände auszugehen ist.

Bedeutend schwieriger ist es hingegen, brauchbare hygrische Werte für die Baustoffe zu bekommen. Hauptsächlich liegt das daran, dass man sich selbst herstellerseitig noch zu wenig damit befasst hat. Dies mag durch die Situation motiviert sein, dass der Feuchtegehalt eines Baustoffes nach DIN 4108 unveränderlich ist.

Angesichts der Tatsache, dass Feuchtetransporte stets mit Energietransporten gekoppelt sind, dass der Wert der Wärmeleitfähigkeit stark vom Feuchtegehalt beeinflusst wird und dass der Faktor Feuchte nicht zuletzt angesichts ungelöster Probleme am Bau immer mehr an Aufmerksamkeit gewinnt, gewinnt die Betrachtung des hygrischen Verhaltens der Baustoffe an Bedeutung.

Mit einigen wenigen Werten und Gleichnissen scheint es jedoch nicht getan zu sein, wenn man bedenkt, dass Diffusions- und kapillare Leitungsvorgänge gleichzeitig gegengerichtet ablaufen können, was sogar partiell zu Kreislaufsituationen führen kann.

[- nach oben -](#)

**ThermoShield**

[- nach oben -](#)

## **Technologie statt nur Farbe**

Farbtechnisch gesehen, handelt es sich um eine Dispersionsfarbe. Erst die Wirkung an den gestrichenen Bauteilen zeigt, warum ThermoShield die thermokeramische Membrantechnologie ist. „Mehr als nur Farbe“, „eine Farbe gegen Schimmel“ oder „Klimaaktivfarbe“ sind mittlerweile bekannte

Begriffe. Im Folgenden soll lediglich das nicht unwesentliche Wechselspiel mit der Feuchte im und am Bauteil beschrieben werden.

[- nach oben -](#)

## Wirkmechanismen

<http://download.dimagb.de/html/thermoshield.htm>

[http://download.dimagb.de/docs/TS/produkt/TS\\_Wirkanteile.pdf](http://download.dimagb.de/docs/TS/produkt/TS_Wirkanteile.pdf)

[http://download.dimagb.de/docs/TS/produkt/ThermoShield\\_acting\\_mechanisms.pdf](http://download.dimagb.de/docs/TS/produkt/ThermoShield_acting_mechanisms.pdf)

[- nach oben -](#)

## Entfeuchten und Schützen / Trocknen und Trockenhalten

Forschungen an der Thermo-Shield Farbe zur Anwendung bei der Denkmalpflege

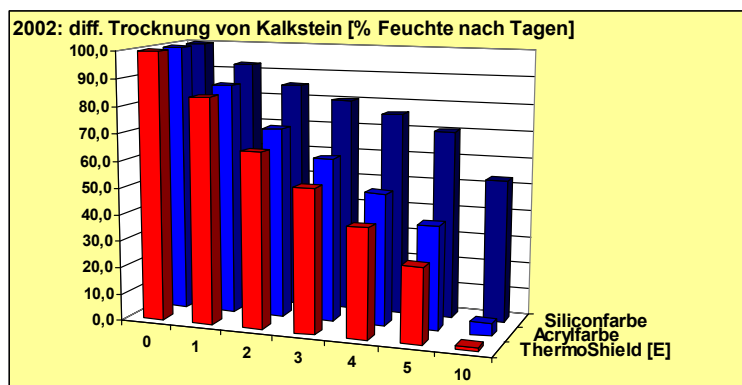


Bild 01: ThermoShield Exterior trocknet besser als die Siliconfarbe und die Acrylfarbe (2002) [1]

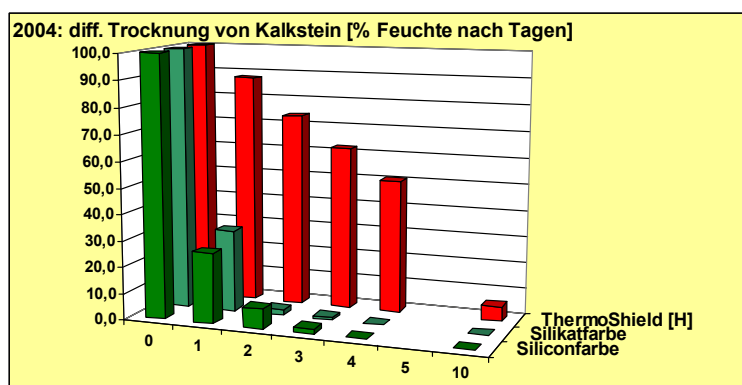


Bild 02: ThermoShield History trocknet sanfter als die Silikat- und die Siliconfarbe (2004) [2]

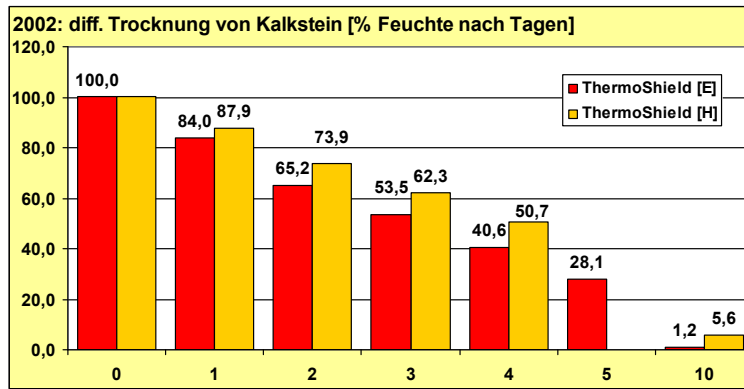


Bild 03: Vergleich der diffundiven Trocknung bei ThermoShield Exterior [E] und History [H] [2]

**Untersuchungen zum w-Wert beschichteter Putzproben**

Vergleichsprodukte: ThermoShield History, Silikatfarbe „Granital“, Silikonfarbe „Amphisilan“  
 Norm: PN-97/B-10106 „Putz und Baumörtel – Putzmassen für den verdünnten Putz“  
 Probekörper: Putzproben 100 x 100 x 3 mm  
 Messgerät: Präzisionswaage (0,01 g genau)  
 Durchführung: Messung vor und nach 24 h Wasserkontakt  
 Messwert 1: die Feuchteaufnahme nP [kg/m<sup>2</sup>]  
 Messwert 2: der w-Wert [kg / m<sup>2</sup> h<sup>1/2</sup>]

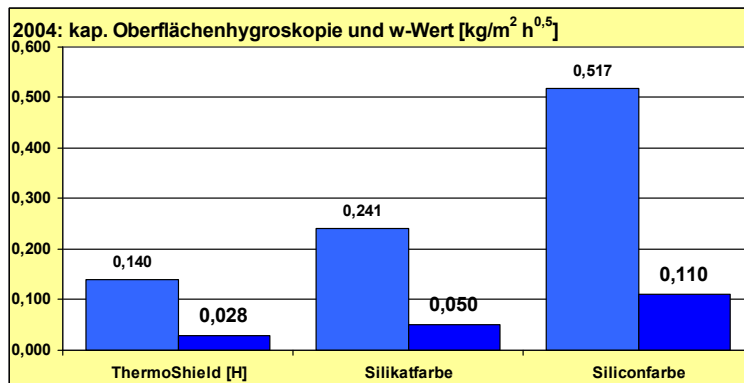


Bild 04: Feuchteaufnahme (Messwert 1) und w-Werte (Messwert 2) im Vergleich [3]

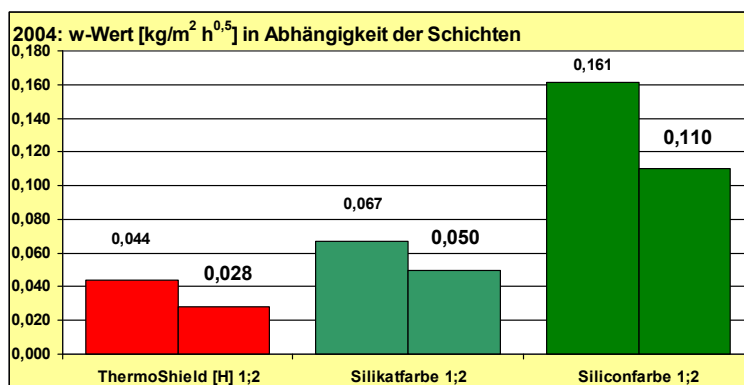


Bild 05: der w-Wert der der untersuchten Farben bei 1 und bei 2 Schichten [3]

„Die Untersuchungen habe ich auch mit anderen Verfahren durchgeführt, z.B. durch Tauchen ins Wasser von den auf allen Flächen bemalten Putzstücken, und dabei den Zuwachs der Probenmasse beobachtet. Doch hier beeinflusste der hydrostatische Flüssigkeitsdruck, was nicht den Fassadenfarben entspricht.“

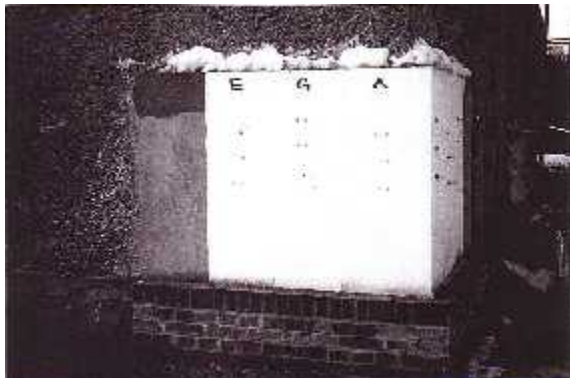
**Untersuchungen der GWD Berlin in 2001 zum Trocknungsverhalten vergleichener Farben in der Praxis**



ungeputzte Südwand



ungeputzte Ostwand

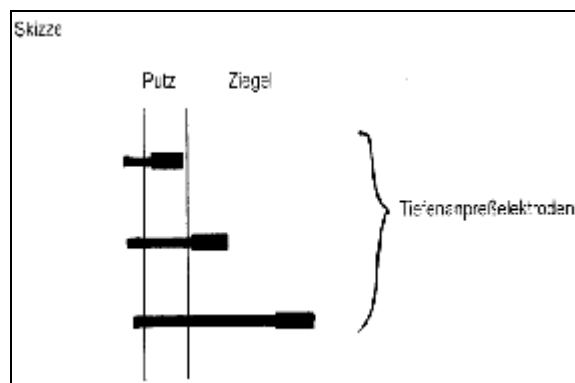


geputzte Südwand



geputzte Ostwand

E = ThermoShield Exterieur, G = Granital, A = Amphisilan



Tiefenkontakt-Anpresseelektroden

„Nach diesen Erstmessungen ergibt sich, daß hinter Exterieur (Thermo-Shield) die Oberfläche um die Hälfte trockener ist als bei den anderen beiden Anstrichen (Keim Granital und Caparol Amphisilan). Die letzteren Anstriche verhalten sich ähnlich.“

Quelle: [4]

ThermoShield verringert das Risiko der Ansiedlung von Schimmelpilzen

**“Consequently, this reduces thermal bridging and the risks of fungal growth. The coating may act as a hygric ‘diode’, adapting it’s water vapour permeability to transient relative humidity (R.H.) conditions.” [8]**

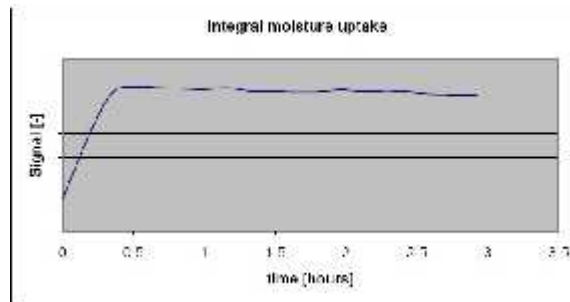


Bild a: integrale Feuchtaufnahme von ThermoShield, aus [8]



Bild b: praktische Ergebnisse der Schimmelprophylaxe aus Feldversuchen [8]

ThermoShield reduziert die Wärmebrücken sowie das Risiko von Schimmelwachstum. Die Beschichtung wirkt als eine Hygrische Diode. Dieses Alleinstellungsmerkmal von ThermoShield bezieht sich auf die Wasserdurchlässigkeit bezüglich veränderlicher Bedingungen der relativen Luftfeuchte. Die Kurve in Bild a verdeutlicht zugleich den besonderen w-Wert von ThermoShield, der im Unterschied zu herkömmlichen Farben quantitativ begrenzt ist.

ThermoShield entfeuchtet die Wand und hält sie trocken. Aufgrund der Mikroporenstruktur finden die hygrischen Transportprozesse gerichtet statt. Die Anhebung der Oberflächentemperatur und deren Vergleichmäßigung mindern infolge Taupunktverschiebung das Risiko von Schimmelpilzbefall. Gleichzeitig wird die thermische Behaglichkeit spürbar verbessert. [2] [3]

#### Literatur:

- [1] Magisterin Dorota Sobkowiak, Techniker G. Zabłowski: Forschungen an der Thermo-Shield Farbe zur Anwendung bei der Denkmalpflege, PPKZ, Torun, 2002 [ThermoShield Exterieur]
- [2] Magisterin Dorota Sobkowiak, Techniker G. Zabłowski: Forschungen an der Thermo-Shield Farbe zur Anwendung bei der Denkmalpflege, PPKZ, Torun, 2004 [ThermoShield History]
- [3] Magisterin Dorota Sobkowiak, Techniker G. Zabłowski: „Untersuchungen zur oberflächigen Hygroskopie und zum oberflächigem Hygroskopiefaktor von Putzproben, die mit einer Fassadenfarbe beschichtet sind“, PPKZ, Torun, 23.05.2004
- [4] Dipl.-Chem. Detlef G. Ullrich, Dipl.-Ing. Lutz Reimann, Dipl.-Ing. Thomas Reuthe: "ZWISCHENBERICHT MUSTERWAND ÜBERPRÜFUNG AUSTROCKNUNGS-VERHALTEN ANSTRICHE", Bericht Nr. 00/083, GWD, Gesellschaft für Wissenstransfer in der Gebäude-Diagnostik mbH Berlin, Berlin, 08.01.2001
- [5] Künzel 1994: „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, Lehrstuhl für Konstruktive Bauphysik der Universität Stuttgart, 1994
- [6] Krus 1995: „Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken“, von der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung,, vorgelegt von Dipl.-Ing. Martin Krus, Universität Stuttgart, 1995
- [7] Beilagen zur Berliner Wetterkarte (KBD), Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin; Hupfer, P. und Chmielewski, F.-M.: Das Klima von Berlin, 1990; Legende: \*) 1909-1999
- [8] ir. M. M. Sanders: "Performance of Thermo-Shield Interior", TNO report 2005-BCS-R0135, TNO Built Environment and Geosciences, Delft, Netherlands, 08.04.2005
- [9] Protokoll über Messung des thermischen Raumklimas im Gebäude der Deutschen Welle in 53113 Bonn, Kurt-Schumacher-Str. 3, TFH Berlin, 06.09.2005 - berichtet in: dib: "Die Raumklima-Analyse vom 01. und 02.09.2005 bei der Deutschen Welle in Bonn", SICC GmbH, 16.09.2005

[- nach oben -](#)

## Feuchteadaptivität

ThermoShield kann bei Schlagregen rasch eine Wassermenge von 450...500 ml/m<sup>2</sup> aufnehmen. Dann riegelt die Membran ab und es wird nicht mehr aufgenommen. Es kommt aber nicht zu einer Einleitung in das dahinter befindliche Mauerwerk (geputzt oder ungeputzt), weil dies durch das Kapillarprinzip „von groß nach klein“ verhindert wird. Dass nur äußerst geringe Wassermengen an der Grenzschicht von der Wand aufgenommen werden ist so sicher, wie der Umstand dass Wasser nicht den Berg hinauf fließt.

Dabei geht es um kapillare Vorgänge. Doch wie ist es um die Diffusionseigenschaft von ThermoShield bestellt? Werte sind zur Genüge bekannt und der Hersteller gibt Werte für den Trocken- und für den Feuchtzustand nach DIN 52615 an. Die folgende Tabelle liefert eine Übersicht gemessener Werte.

Insbesondere bei Exterieur erkennt man eine recht starke Streuung. Wenn man sich die Messdatenreihen anschaut, aus denen dann der  $\mu$ -Wert gemittelt wurde, stellt man eine erhebliche Streuung fest – ein Umstand, der die Normenhörigkeit und –gläubigkeit gerade hinsichtlich des  $s_d$ -Wertes relativieren dürfte.

Institut	Prüfdatum	Produkt	$s_d$ trocken	$s_d$ feucht
FWS	10.04.1997	Interieur	1,60	--
IBP	16.08.1999	Exterieur	1,30	0,70
IBP	16.08.1999	TopShield	0,58	0,42
EMPA	17.03.2000	Exterieur	4,08	0,54
EMPA	17.03.2000	TopShield	2,54	0,88
EMPA	17.03.2000	Interieur	2,46	0,31

Tabelle 15:  $s_d$ -Werte von ThermoShield mit je  $s = 0,3$  mm

Deutlich wird anhand der Tabellenwerte, dass ThermoShield im Feuchtbereich deutlich „bessere“  $s_d$ -Werte hat als im Trockenbereich. Dies ist jedoch keine Eigenschaft mit Alleinbesitzanspruch, wie die folgenden Ausführungen verdeutlichen.

1999 entwickelte das IBP (Institut für Bauphysik) eine Feuchteadaptive Dampfbremse, FADAB genannt. Es handelt sich dabei um eine Polyamidfolie (Nylon). Der Ansatzpunkt besteht darin, dass bei einem feuchten Bauteil eine hohe Trocknungsgeschwindigkeit erwünscht ist und dass „nicht

einfach eine beliebige, ausreichend diffusionsoffene Dampfbremse verwendet werden“ darf, da diese im Winter zuviel Feuchte in das Bauteil eindringen ließe.

Das feuchteadaptive Verhalten der als intelligent bezeichneten Polyamidfolie soll auf der Fähigkeit beruhen, Wasserdampf zu absorbieren, was bei höherer Umgebungsfeuchte dazu führe, dass mehr Wassermoleküle zwischen die langkettigen Polymermoleküle eingelagert werden, die sich ihre eigenen Porenräume schaffen. Dadurch nähme die Dampfdurchlässigkeit der Folie zu.

„Eine Dampfbremse, deren Dampfdiffusionswiderstandszahl bei einer hohen relativen Feuchte deutlich kleiner ist als bei einer geringeren Luftfeuchte, fördert deshalb die sommerliche Trocknungsmöglichkeit bei gleichzeitiger guter Sperrwirkung gegen die Wohnfeuchte im Winter.“ So weit die Darstellung des IBP, illustriert durch eine Grafik, der sich folgende ca.-Werte entnehmen lassen:

$s_d$ [m]	4,7	3,9	1,1	0,4	0,1
Rel. LF [%]	25	42	62	70	90

Tabelle 16:  $s_d$ -Werte einer feuchteadaptiven Dampfbremse

Im Bundesbaublatt 10/96 wurde darüber berichtet, dass Bauteile bei Verwendung dieser Dampfbremse besser austrocknen können. Von 08.1996 bis 09.1997 wurden beim IBP bei 3 Sparrenfeldern mit unterschiedlichen Dampfbremsfolien der mittlere Feuchteverlauf gemessen. Dabei zeigte sich, dass im Winter eine Umverlagerung der Feuchte von den Sparren in die Schalung stattfindet.

ThermoShield® ist eine High-Tech-Beschichtung, die seit nunmehr 20 Jahren weltweit erfolgreich eingesetzt wird. Die Wirksamkeit wurde u.a. in den USA durch das Energy-Star® Label anerkannt. Mit den Jahren und den fortschreitenden Erkenntnissen „wanderte“ das Material vom Dach an die Außenwand und dann zur Innenwand: TopShield, Exterieur, Interieur.

Bei ThermoShield® handelt es sich um eine thermokeramische Membrantechnologie mit endothermischen Effekten®, wobei sich die Membran feuchteadaptiv verhält. In der Produktdarstellung wurde es bislang unterlassen, dem Material Intelligenz zuzusprechen.

Die Verbundbeschichtung mit keramischen Hohlkugeln und fakultativ synchronisierenden Aktivatoren bildet auf der Wandoberfläche eine Membran, die neben Langzeitschutz eine Feuchte regulierende Wirkung zeigt. Bei Niederschlägen wird eine gewisse Wassermenge aufgenommen, woraufhin eine Abschottung der Oberfläche eintritt, weiterem Wasser wird der Zutritt unterbunden. Diese feuchteadaptivität beruht auf kapillarem Verhalten.

Im Normalwetterfall ohne Niederschlag entfeuchtet diese Membran permanent die Außenwand. Im Winter wird die Feuchte von innen nach außen transportiert, vielen bekannt ist der Begriff des „Trockenwohnens“. Dabei spielt die Kapillarstruktur die bestimmende Rolle: die Membran wirkt als Sorptionsmotor. Auf der Oberfläche verdunstende Feuchte bringt im Sommer eine kühlende Wirkung – ganz ohne Energieeinsatz.

Im Sommer ist das Dampfdruckgefälle von außen nach innen gerichtet. Das zieht nach sich, dass Kondensatbildung im Inneren (des Bauteils bzw. des Wohnraums) stattfindet, weswegen man im Sommer tags die Kellerfenster geschlossen halten soll. Angesichts dieser physikalischen Gesetzmäßigkeiten stellt sich die Frage nach der Sinnhaftigkeit traumhaft niedriger  $s_D$ -Werte von Außenwandbelägen wie Farben und Dämmschichten – im Sommer z.B. kann dies nur nachteilig sein.

Aufgrund der eingangs geschilderten Umstände kann der  $s_D$ -Wert der Außenbeschichtung im Sommer folglich nicht hoch genug sein. Wobei klar sein muss, dass auch der  $s_D$ -Wert eine veränderliche Größe ist, eine labormäßige Normierung ist daher alles andere als praxisnah. Fa. K. ist stolz auf ihre Produkte mit einem  $s_D$ -Wert von 0,010. Das bedeutet jedoch, dass mit dem nach innen gerichteten Dampfdruckgefälle die Feuchte ungehindert in das Außenmauerwerk eindringen kann.

Hingegen kommt im Sommer die Wirkung des – nach DIN schlechten, eine Dichtheit suggerierenden –  $s_D$ -Wertes von ThermoShield® zur Geltung. Wie kann eine diffusionshemmende bis wasserdampfdichte Beschichtung die Außenwand entfeuchten? Das Wirkprinzip liegt im kapillaren

Bereich. Die Membran entfeuchtet durch kapillare Desorption mittels von innen nach außen kleineren Kapillaren.

Im Sommer ist es vorwiegend niederschlagsarm bei hoher Luftfeuchte und das Dampfdruckgefälle ist nach innen gerichtet. Der hohe  $s_a$ -Wert von ThermoShield® verhindert zusätzlichen Eintrag von Feuchte. Im Winter bildet sich Tauwasser, welches kapillar nach außen geleitet wird. Kapillare Leitungsvorgänge lassen sich jedoch über den  $s_a$ -Wert nicht beschreiben.

Kapillare Leitungsvorgänge setzen hydrophile Zustände voraus. Das Bindemittel füllt die Zwischenräume zwischen den Kügelchen nicht vollständig aus, es ist ein Netz von Kapillaren, die als Sorptionsmotor wirken und die Bauwerksfeuchte „herausziehen“.

Für die Trocknung ist jedoch auch eine natürliche Grenze gesetzt. Ein Baustoff kann in praxi nicht auf 0 getrocknet werden, dies geht nur unter labormäßigen Bedingungen entweder durch hermetisches Separieren und Vakuumisieren oder durch die Schaffung entsprechender künstlicher Umgebungsbedingungen (hohe Temperatur und eine gegen 0 gehende Luftfeuchte).

Da ThermoShield® diese Mechanismen nicht zu leisten vermag, kann es einen Baustoff nicht unter die ausgleichsfeuchte trocknen. ThermoShield® ist diffusionsoffen genug, die Korrespondenz der Porenräume mit der Umgebung zuzulassen, woraufhin sich die Ausgleichsfeuchte einstellen kann. Dies ist u.a. eine Erklärung für das Phänomen des „Schwarzen Hauses“ [Link].

[- nach oben -](#)

## **Hygrische Diode**

TNO stellt fest: ThermoShield ist eine hygrische Diode – siehe oben im Kapitel „Entfeuchten und Schützen / Trocknen und Trockenhalten“ mit Auszug aus [8].

Der Begriff der Diode im herkömmlichen Sinn: Die Diode (griech.: di zwei, doppelt; hodos Weg) ist ein elektronisches Bauelement mit zwei Polen. Der Begriff Diode wird als Synonym für den Begriff „ungesteuerter Gleichrichter“ verwendet.

Eine hygrische Diode ist z.B. eine Membran, die für den Wassertransport eine eingrenzende Wirkung zeigt. Es kommt zur Gleichrichtung des Wassertransportes, da das Wasser die hygrische Diode nur in eine Richtung passieren kann. Die hygrische Diode kann man also mit einem mechanischen Rückschlagventil vergleichen, da dieses den Massenfluss nur in eine Richtung erlaubt. (DIMaGB, Berlin, 2007)

[- nach oben -](#)



## Literatur/Quellen

1. Tabellenbücher, Fachbücher und Lexika
2. Energieeffizienz- Richtlinie der EU: RICHTLINIE 2002/91/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
3. Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (EnEG), vom 22. Juli 1976, Fundstelle: BGBl I 1976, 1873
4. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung (EnEV)), vom 16. November 2001, Fundstelle: BGBl I 2001, 3085, in der Neufassung vom 2. Dezember 2004, bekanntgemacht im Bundesgesetzblatt I S. 3146
5. DIN 4108 Baulicher Wärmeschutz im Hochbau; insbesondere Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte, 2004-07 (vordem 2002-02)
6. TU Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Fachbereich Bauphysik: Druck 2 Kenndaten Feuchte
7. F. Eichler: Bauphysikalische Entwurfslehre, Band 2, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1972
8. Herbert Rätzer: Richtlinien für den Materialbedarf im Bauwesen, 12., verbesserte Auflage, 01. Januar 1977, VEB Verlag für Bauwesen Berlin
9. Prof. Jens P. Fehrenberg: Energie-Einsparen durch nachträgliche Außendämmung bei monolithischen Außenwänden? In der Praxis kommt wenig heraus!, in: vbn-info Sonderheft WärmeEnergie 2003
10. Paul Bossert: Wärmehaushalt und Mauerwerk, Neuigkeiten über Feuchte und Wärme im Fassadenmauerwerk, in: db, 9/82, S. 58-62
11. Paul Bossert, Dipl.-Ing. Architekt, Oetwil a.d. Limmat, Schweiz: Gespeicherte Solarenergie in einer Ziegelwand (Gymnasium Bruchsal), 20.02.1982, Auswertung (Messung: Z. Varsek)
12. Dr.-Ing. H. Künzel, Dr.-Ing. H. Werner: Untersuchungen über den effektiven Wärmeschutz verschiedener Ziegelaußenwandkonstruktionen, Bericht über den 1. und 2. Untersuchungsabschnitt, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Außenstelle Holzkirchen, 05. Juli 1983, 8 Ho 8/83-II
13. Prof. Dr. Anton Schneider: Wohnklima, Wärmedämmung, Wärmespeicherung, Institut für Baubiologie + Oekologie IBN, Neubeuern, 6. Auflage, 1997, ISBN3-923531-09-5
14. Bernhard Wedler: Berechnungsgrundlagen für Bauten, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München, 1965
15. Prof. Dr.-Ing. habil. Claus Meier: Richtig bauen, Bauphysik im Widerstreit – Probleme und Lösungen, 2., durchgesehene Auflage, expert verlag, Renningen, 2003, ISBN 3-8169-2187-6
16. Dipl.-Ing. Martin Krus: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken, Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, 11. Juli 1995

17. K. Sedlbauer, A. Holm und H.M. Künzel: Hygrothermisches Raummodell zur Berechnung der instationären Feuchte- und Temperaturverhältnisse in Wohnungen, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen (Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis), ENSAN, 26.07.2002
18. Martin Krus, Andreas H. Holm: Approximationsverfahren für die Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Valley, (Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis), 50Approximationsverfahren.PDF, 02.04.2001
19. Internetseite des Fraunhofer Institut für Bauphysik  
(Quelle der Zitate)
20. Internetseite der SICC GmbH ThermoShield Europe:  
[www.thermoshield-europe.com](http://www.thermoshield-europe.com)
21. Internetseite DIMaGB.de - Informationen für Bauherren:  
[www.dimagb.de](http://www.dimagb.de) – insbesondere Dokumente im Download: <http://download.dimagb.de>
22. Internetseite Altbau- und Denkmalpflegeinformationen  
[www.konrad-fischer-info.de](http://www.konrad-fischer-info.de)

[- nach oben -](#)

## Literatur/in den Quellen zitierte & weiterführende

von Krus 1995 zitierte

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

29. Fagerlund, G.: Determination of pore-size distribution from freezing-point depression. *Matériaux et construction* 6 (1973), H. 33, S. 215-225.
30. Fanney, A.H. et al.: Measurements of moisture diffusion in building materials. *ASHRAE Transactions* 97 (1991), H. 2, S. 99-112.
31. Farrar, T.C., Becker, E.D.: *Pulse and Fourier Transform NMR*. New York. London Academic Press (1971).
32. Fitzner, B.: Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen Hohlraumgefüge von Naturstein und physikalischen Verwitterungsvorgängen. *Mitteilung zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie* (1988), H. 29.
33. Fukushima, E., Roeder, S.: *Experimental Pulse NMR*. Addison-Wesley Publishing Company Inc. London (1981).
34. Gagarin, V.G., Mogutov, V.A.: Unsteady Movement of Fluid in Building Materials. *Proceedings of the ICHMT Symposium "Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structures"*. Hemisphere Publishing Corporation, New York (1990), S. 43-62.
35. Galbraith, G.H., McLean, R.C.: Realistic Vapour Permeability Values. *Heat and Mass Transfer. CI/SfB (L27) UDC 697147*, S. 98 - 103.
36. Gardner, W.R.: Calculation of capillary conductivity from pressure plate flow out data. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 20 (1956).H. 3, S. 317-320.
37. Garrecht, H.: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. *Diss. Universität Karlsruhe* (1992).
38. Gömesi, J.: Untersuchung der Kapillarscheinungen in Beton mit zerstörungsfreien Methoden. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen, Leipzig* (1969), H. 3, S. 175-177.
39. Gertis, K. und Werner, H.: Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen. *Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton* (1972), H. 258, S. 6-36.
40. Glaser, H.: Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. *Kältetechnik* 11 (1959), H. 10, S. 345-349.
41. Grimm, W.D.: *Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland*. Arbeitsheft 50 (1990), Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.
42. Grüneberg, H., Lehmann, S.: Zur Entwicklung eines elektrischen Bodenfeuchtegebers für die automatische Berechnungssteuerung. *Automatisierungspraxis* 12 (1975), H. 5, S. 123-124.
43. Günther, H.: *NMR-Spektroskopie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York (1983).
44. Hansen, K. K.. *Sorption isotherms Catalogue*. Technical report 162186, Technical University of Denmark (1986).
45. Harmathy, T.Z.: *Moisture Sorption of Building Materials*. NRC Canada, Div. Building Research, Techn. paper No.242 (1967).
46. Hart, H.: *Radioaktive Isotope in der Betriebsmeßtechnik*. 2. Auflage Berlin VEB Verlag Technik (1962).
47. Hartge, K.H.: *Die physikalische Untersuchung von Böden*. Enke Verlag Stuttgart (1971).
48. Harz, H.P., Weisser, H.: Einsatz von Kernresonanzspektrometern in der Lebensmittelindustrie. *ZfL* 4 (1986), H. 4, S. 278-281.
49. Hausser, K.H.: Kernmagnetische Resonanz in Biologie und Medizin. *Physik. Blätter* 42 (1986), H. 7, S. 225-233.
50. Henrich, G.: Feuchteschäden zerstörungsfrei analysiert mit der Neutronensonde. *Bautenschutz+Bausanierung* 12 (1989), H. 1, S. 24-27.
51. Holz, M., Knüttel, B.: Gepulste Kernspinresonanz. *Physikalische Blätter* 38 (1982), H. 12, S. 368-374.
52. Hounsfield, G.N.: Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography): Part I Description of System. *British Journal Radiology* 46 (1973), H. 552, S. 1016-1022.
53. Hundt, J., Buschmann, J.: Moisture Measurement in Concrete. *Matériaux et Constructions* 4 (1971), H.22, S. 253-259.
54. Hussein, F.: Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion. *Diss. Universität Dortmund* (1982).
55. Kießl, K., Gertis, K.: Feuchtetransport in Baustoffen. Eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene. *Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen* 13 (1980), Universität Essen Gesamthochschule.
56. Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. *Diss. Universität Gesamthochschule Essen* (1983).
57. Kießl, K., Krus, M., Künzel, H.M.: Weiterentwickelte Meß- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen. *Praktische Anwendungsbeispiele. Bauphysik* 15 (1993), H. 2, S. 61 - 67.

58. Kießl, K., Gertis, K.: Isothermer Feuchtetransport in porösen Baustoffen. Sonderdruck aus "Deutscher Ausschuss für Stahlbeton" (1976), H. 258, S. 86-110.
59. Klein, A.: Microwave Determination of Moisture in Coal. Comparison of Attenuation and Phase Measurement. *Journal of Microwave Power* 16 (1981), H. 3 und 4, S. 290-304.
60. Klein, A.: Erfahrungen beim Einsatz von Meßgeräten zur Schnellbestimmung des Wassergehaltes. *Aufbereitungstechnik* 28 (1987), H. 1, S. 10 - 16.
61. Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH. Wiesbaden (1974).
62. Kober, K., Mehlhorn, L.: Radiometrische Feuchtemessung in Bauteilen mit hoher räumlicher Auflösung. *Bauphysik* 13 (1991), H. 2, S. 43-49.
63. Kohonen, R.: A method to analyze the transient hygrothermal behaviour of building materials and components. Diss. Helsinki University Espoo (1984).
64. Kooi van der, J.: Moisture Transport in Cellular Concrete Roofs. Diss. TH Eindhoven (1971).
65. Krause, D. et al.: Kapazitive Messung des Wassergehaltes von Böden in Kulturgefäßen. *GIT Fachz. Labor* 29 (1985), H. 2, S. 91 - 105.
66. Krestel, E.: Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik. Siemens AG Berlin, München (1980).
67. Krischer, O. und Mahler, K.: Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der kapillaren Flüssigkeitsleitfähigkeit aus stationären und instationären Vorgängen. *VDI-Forschungsheft* 473 (1959), Ausgabe B, Band 25.
68. Krischer, O. und Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Auflage, Springer Verlag Berlin (1978).
69. Krus, M. und Kießl, K.: NMR-Messung kapillarer Flüssigkeitsbewegungen in porösen Gesteinen und Ableitung neuer Kapillartransport- Kenngrößen. *Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall Steinkonservierung* (1989), Band 1, Verlag Ernst & Sohn, S. 39-45.
70. Krus, M. und Kießl, K.: Vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung der Porenradialverteilung von Natursandstein mittels Saugspannungsmessung und Quecksilber-Druckporosimetrie. *IBP-Bericht* FtB-11/1991.
71. Krus, M. und Kießl, K.: Ist der Diffusionswiderstand von Baustoffen wirklich feuchteabhängig? *IBP-Mitteilung* 18 (1991) Nr. 208.
72. Krus, M.: Does vapour diffusion really depend on moisture content? IEA-Annex 24 Projekt, Report T3-D-92102.
73. Krus, M. und Künzel, H.M.: Liquid water transport above capillary saturation. IEA-Annex 24 Projekt, Report T3-D-92/03.
74. Krus, M.: Determination of  $D_w$  from A-value. IEA-Annex 24-Projekt, Report T3-D93/01.
75. Krus, M., Künzel, H.M., Klier, M.: Liquid Transport Over the Boundary Layers of Two Different Hygroscopic Capillary Active Materials. IEA-Annex 24 Projekt, Report T1-D93/08.
76. Ksenschek, O.S. et al.: Centrifugal Method for Finding Pore-size Distribution Function in Porous Media. *Russian Journal of Phys. Chem.* 41 (1967), H.7, S. 856-863.
77. Kuhn, K.: Kernresonanzmessungen und Wasseraktivitätsbestimmungen zur Aufklärung des Trocknungsverhaltens von Kartoffeln. Diss. Universität Hamburg (1986).
78. Kumaran, M.K., Bomberg, M.: A Gamma- Spectrometer for Determination of Density Distribution and Moisture Distribution in Building Materials. *Proc. of the International Symposium on Moisture and Humidity, Washington D.C.*, (1985), S. 485-490.
79. Kumaran, M.K.: Moisture diffusivity of gypsum board from gamma-ray attenuation measurements. IEA-Annex 24 Projekt, Report T3-CA-93/03.
80. Künzel, H. und Schwarz, B.: Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. *Berichte aus der Bauforschung* (1968) H. 51, S. 99-113, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
81. Künzel, H. und Bernhardt, P.: Wasserdampfdurchlässigkeit von Baustoffen bei verschiedenen Feuchtezuständen. *Berichte aus der Bauforschung* (1973), H. 80, S. 15-19, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
82. Künzel, H.: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. *Bauphysik* 4 (1982), H. 3, S. 101 -107 .
83. Künzel, H. und Holz, D.: Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten und beheizten Kirchen alter Bauart. *IBP-Bericht* FB-32/1991.
84. Künzel, H.M. und Kießl, K.: Ist Vakuumtrocknung günstiger als Konvektionstrocknung? Untersuchungsergebnisse für Natursteine. *Bauphysik* 12 (1990), H. 1, s. 27-30.
85. Künzel, H.M. und Kießl, K.: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von mineralischen Baustoffen aus Sorptionsversuchen. *Bauphysik* 12 (1990), H. 5, s. 140-144.

86. Künzel, H.M.: Heat and Moisture Transfer in Porous Media; a comparison of measurement and calculation and its consequences for the treatment of vapour diffusion. IEA-Annex 24 Projekt, Report T1-D92/01.
87. Künzel, H.M.: Rechnerische Untersuchungen des Langzeit-Feuchteverhaltens von Wärmedämmschichten in Umkehrdächern mit Begrünung. IBP-Bericht FtB-23/1 993.
88. Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss. Universität Stuttgart (1994).
89. Kupfer, K.: Feuchtemessung an Zuschlagstoffen für die Betonherstellung unter Verwendung der Mikrowellenmeßtechnik. Diss. Hochschule für Architektur und Bauwesen Wismar (1990).
90. McLean, R.C., Galbraith, G.H., Sanders, C.: Moisture transmission testing of building materials and the presentation of vapour permeability values. Building Research And Practice. The Journal of CIB, No. 2 (1990).
91. Lück, W.: Feuchtigkeit. Verlag R. Oldenbourg, München (1964).
92. Luikov, A.V.: Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies (Review). Intern. Journ. Heat & Mass Transfer 18 (1975), H. 1, S. 1-14, Pergamon Press.
93. Lykow, A.W.: Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. Akademie Verlag, Berlin (1958).
94. Mahler, K.: Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der kapillaren Flüssigkeitsleitfähigkeit aus stationären und instationären Vorgängen. Diss. Technische Hochschule Darmstadt 1958.
95. Martin, M.: Practical NMR Spectroscopy. Heyden Verlag London, Philadelphia, Rheine (1980).
96. Matzkanin, G.A.: Application of Spatially Localized NMR to Non-destructive Evaluation. Proc. of the second World Conf. on NDT, 3-8. Nov. 1985, Las Vegas.
97. Michel, D.: Grundlagen und Methoden der kernmagnetischen Resonanz. Akademie-Verlag Berlin (1981).
98. Molenda, C.H.A., Crausse, P. und Lemarchand, D.: The influence of capillary hysteresis effects on the humidity and heat coupled transfer in a non-saturated porous medium. Intern. Journal Heat & Mass Transfer 35 (1992), H. 6, S. 1385-1396.
99. Neiß, J.: Numerische Simulation des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden. Fortschrittsbericht VDI-Z. 3 (1982), H. 73, S. 1-293.
100. Neue, J.: Anwendung des dielektrischen Meßprinzips zur Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung in Baumaterial. 2. Bauklimatisches Symposium der Sektion Architektur. Schriftenreihe der Sektion Architektur der TU Dresden (1978), H. 11, S. 133 - 143.
101. Nielsen, A.F.: Gamma-Ray-Attenuation Used for Measuring the Moisture Content and Homogeneity of Porous Concrete. Building Science 7 (1972), H. 4, S. 257-263.
102. Ostman, E.: The Use of Computed Tomography in Non-destructive Testing of Polymeric Materials, Aluminium and Concrete. 2. Intern. Conference on Testing, Evaluation and Quality Control of Composites - TEQC 87. University of Surrey, Guildford, U.K., 22.-24. Sept. 1987.
103. Paetzold, R.F., Matzkanin, G.A., De Los Santos, A.: Surface Soil Water Content Measurement Using Pulsed NMR Techniques. Soil Science Society of America Journal 49 (1985), H. 3, S. 537-540.
104. Peck, A.J.: Diffusivity Determination by a New Outflow Method. Proc. Wageningen Symposium (1969), S. 191-202.
105. Perrin, B. et al.: Détermination du Coefficient de Diffusion Isotherme de l'Humidité dans des Matériaux de Construction. Matériaux et Construction Vol. 16 (1983), H. 91, S. 27 - 33.
106. Philip, J.R., de Vries, D.A.: Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients. Transactions, Amer. Geophysical Union 38 (1957), H.2, S. 222-232.
107. Pratt, A.W.: Some observations on the variation of the thermal conductivity of porous inorganic solids with moisture content. Thermal Conductivity Conference. National Physical Laboratory, Great Britain, (1964).
108. Prazak, J. et al.: Bemerkungen zur Beschreibung des Flüssigtransportes in porösen Baumaterialien. Gesundheitsingenieur 110 (1989), H. 6, S. 308-312.
109. Queisser, A.: Zerstörungsfreie Materialuntersuchungen an Natursandstein mittels Computertomographie. Bautenschutz und Bausanierung 1 (1988), S. 54-60.
110. Quenard, D., Sallee, H.: A Gamma-Ray Spectrometer for Measurement of the Water Diffusivity of Cementitious Material. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 137 (1989), S. 165-169.
111. Rao, K.S.: Hysteresis in Sorption. Journ. Phys. Chem. 45 (1941), H. 45, S. 500-539.
112. Reinhardt, H.W., Gaber, K.: Equivalent pore size characterizing the pore size distribution of cement mortar. Advances in Cementitious Materials, Sidney Mindess (ed.), Ceramic Transactions, Am. Ceram. Soc., Westerville 16 (1990), S. 319-335.

113. Richards, L.A.: Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science* 68 (1949), H. 68, S. 95-112.
114. Ricken, D.: Ein einfaches Berechnungsverfahren für die instationäre Wasserdampfdiffusion. *Bauphysik* 13 (1991), H.2, S. 33-37.
115. Rode, C.: Combined heat and moisture transfer in building constructions. Diss. Technical University of Denmark (1990).
116. Rollwitz, W.C.: Moisture Measurement in various hygroscopic materials using nuclear magnetic resonance. *Humidity and Moisture, Vol.2* (1965), New York.
117. Roos, H., Niesel, K., Hoffmann, D.: Über Phänomene des Feuchtigkeitstransports in Ziegeln und Mauerwerk. *GIT Fachz. f. d. Lab.* 32 (1988), H. 5, S. 16-21.
118. Rose, D.A.: Water movement in porous materials. *Brit. Journal Appl. Phys.*, Vol. 14 (1963), H. 5, S. 256-262.
119. Rowell, R.L. et al.: Gas and Vapour Permeability: Surface Flow Through Porous Media. *Journ. of Colloid and Interface Sc.* 37 (1971), H. 1, S.242-246.
120. Rowley, F.B. und Lund, C.E.: Vapour Transmission Analysis of Structural Insulating Board. *Bulletin Nr.22* (1944), University of Minnesota.
121. Schaefer, K.: Messung des Wassergehaltes und der Wasserbindung in Papier mit Hilfe der gepulsten Kernresonanz-Spektroskopie. Diplomarbeit Lehrstuhl für Brauereianlagen und Lebensmittelverpackungstechnik, Weihenstephan (1988).
122. Schaschek, H.: Bewegungsmechanismus von Wasserdampf in porösen blattförmigen Materialien. *Chemie-Ingenieur-Technik* 28 (1956), H. 11, S.698-702.
123. Scheffer, F. und Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. Enke-Verlag Stuttgart (1976).
124. Schirmer, R.: Diffusionszahl von Wasserdampf-Luft-Gemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. *VDI Beil. Verfahrenstechnik* (1938), H. 6, S. 170-177.
125. Schubert, H.: Kapillarität in porösen Feststoffsystemen. Springer-Verlag Berlin (1982).
126. Schwarz, B.: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. *Gesundheits-Ingenieur* 93 (1972), H. 7, S. 206-211.
127. Sommer, E.: Beitrag zur Frage der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porigen Stoffen bei Be- und Entfeuchtungsvorgängen. Diss. TU Darmstadt (1971).
128. Stroosnijder, L. and De Swart, J.G.: Column Scanning with Simultaneous Use of <sup>241</sup>Am and <sup>137</sup>Cs Gamma radiation. *Soil Science* 118 (1978), H. 2, S. 61 - 69.
129. De Swart, J.G. and Groenevelt, P.: Column Scanning with 60 keV. Gamma Radiation. *Soil Sci. Vol. 112* (1971), H. 6, S.419-424.
130. Timofijew, D.P.: Adsorptionskinetik VEBVerlag Leipzig (1967).
131. Timur, A.: Pulsed NMR Studies of Porosity, Movable Fluid and Permeability of Sandstones. *Journal of Petroleum Techn.* 21 (1969); H. 5, S. 775-786.
132. Trost, A.: Industrielle Feuchtemessung mit Neutronen. *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 73 (1965), H. 12, S. 329-336.
133. Tveit, A.: Measurements of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. Norwegian Building Research Institute, Oslo (1966), Rapport 45.
134. Tyoniak, J. et al.: Feuchtemessung mittels Neutronenradiographie. *Bautenschulz + Bausanierung* 14 (1991), H. 2, S. 20-23.
135. Vetterlein, E.: Untersuchungen über den Einfluß der Temperatur auf die kapillare Leitfähigkeit und Wasserbindung in Böden. *Albrecht-Thaer-Arch.*, 12 (1968), H. ??, S. 385-400.
136. Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Bericht aus dem Bauforschungsinstitut (1991) Technische Universität München, H. 1, S. 1 - 131.
137. Vos, B.H.: Meßmethoden zur Bestimmung des Wärmedurchlaßwiderstandes, des Feuchtegehaltes und der Feuchteverteilung. *Gesundheits-Ingenieur* 89 (1968), H. 3, S. 74-80 und H. 4, S. 115-118.
138. Wißmann W.: Über das Verhalten von Baustoffen gegen Feuchtigkeitseinwirkungen aus der umgebenden Luft. Diss. TH Darmstadt (1964).
139. Wittig, G. und Lingott, H.: Untersuchungen mit Mikrowellen zur Feuchtwanderung in Baustoffproben. *Bauphysik* 14 (1992), H. 2, S. 45-49.
140. Wittmann, H.: Kann das Prinzip der Elektrosmose zur Trockenlegung von Mauerwerk angewendet werden? *Bautenschutz und Bausanierung* 4 (1981), H. 4. S. 126-132.
141. Zacharias, S., Venzmer, H.: Ein Kapillarmodell zur Abschätzung der Wirkung äußerer Kräfte auf den kapillaren Feuchtetransport. Tagung "Feuchtegeschädigte Wände", TH Wismar (1989).
142. Zehendner, H.: Ein Meßverfahren zur Bestimmung des Wasserdampf-Diffusionswiderstandsfaktors von Bau- und Wärmedämmstoffen. *Kältetechnik-Klimatisierung* 19 (1967), H. 5, S.141-146.

143. Zeilinger, A.: Untersuchung des Feuchtetransports in Beton des SNR-300 durch Neutronentransmission. Kerntechnik 18 (1976), H. 3, S. 119-125

von Krus/Holm 2001 zitierte:

1. de Freitas, V.P., Krus, M., Künzel, H.M., Quenard, D: Determination of the Water Diffusivity of Porous Materials by Gamma-ray Attenuation and NMR. International Symposium on Moisture Problems in Building Walls. Proceedings, IL-13. Sept. 1995. Porto, 1995, S. 445-460.
2. Krischer, O., Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin (1978).
3. Kießl, K.: Kapillarer und dampfarmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen 1983.
4. Krus, M., Holm, A., Schmidt, Th: Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3 (1997) H. 3, S. 1-16.
5. Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
6. Holm, A., Krus, M.: Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung. Bauinstandsetzen 4 (1998) H. 1, S. 33-52.

weitere Zitatstellen

1. Gertis, Kießl, Werner, Wolseher: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen, DafStb Heft 258, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1976

[- nach oben -](#)