

**HAWK - HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFT UND KUNST**

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

Baukonstruktion und Bauphysik in der Fakultät Bauwesen in Hildesheim

**Vorlesungsskripte zur Bauphysik
Masterstudium**

Feuchteschutz

Inhaltsverzeichnisse

1	Einleitung	2
1.1	Die Grundstadien des Feuchtetransportes	3
1.1.1	Baustofffeuchten	4
1.1.2	Sorption	6
1.1.3	Kapillarleitung	9
1.1.4	Wasserdampfdiffusion	12
2	Tauwasserschutz	15
2.1	Was ist Tauwasser?.....	15
2.2	Wann entsteht Tauwasser?	15
2.3	Tauwasserschutz im Bauteil	19
2.4	Randbedingungen der Berechnungen nach dem Perioden-Bilanzverfahren nach DIN 4108-3.....	19
2.4.1	Klimabedingungen	19
2.4.2	Randbedingungen der Berechnungen	20
2.5	Wann entsteht Tauwasser im Querschnitt?	20
2.6	Verlauf des Dampfsättigungsdrucks p_s über den Bauteilquerschnitt	21
2.6.1	Temperaturverlauf.....	21
2.6.2	Dampfsättigungsdruck	22
2.7	Verlauf des Dampfteildrucks p über den Bauteilquerschnitt	22
2.7.1	Berechnungsgrundlagen.....	22
2.7.2	Verlauf des Dampfteildrucks p ohne Tauwasserbildung im Querschnitt	23
2.7.3	Verlauf des Dampfteildrucks p bei Tauwasserbildung im Querschnitt	24
2.8	Tauwasser im Bauteilquerschnitt	26
2.8.1	Durchführung der Berechnungen.....	26
2.8.2	Zulässige Tauwassermasse	27
2.9	Verbesserung tauwassergefährdeter Bauteilquerschnitte	28
2.9.1	Verbesserung durch Dampfsperre - Tauwasserfreiheit im Querschnitt ($M_c = 0$).....	29
2.9.2	Verbesserung durch Dampfsperre - Tauwassermasse $M_{ev} \leq M_c$	30
2.9.3	Verbesserung durch belüfteten Hohlraum	31
2.10	Verdunstungsmasse	32
2.10.1	Ermittlung	32
2.11	Bauteile ohne Nachweis des Tauwasserschutzes für Bauteilquerschnitt	32
3	Praktischer Feuchteschutz	33
3.1	Feuchteproduktion in Räumen	33
3.2	Numerische Ermittlung des Wärme- und Feuchtetransport	34
3.3	Tauwasser in Bauteilen infolge Wasserdampf-Konvektion	36
3.4	Sommerkondensation und Umkehrdiffusion	36
3.5	Schlagregenschutz	36
4	Normen und Richtlinien	39
5	Literatur	39

1 Einleitung

Feuchte hat Einfluss auf

- behagliches und gesundes Raumklima
- Feuchtebeanspruchung von Bauteilen

Ziel des Feuchteschutzes ist die Vermeidung von Bauschäden, die durch Eis, flüssiges Wasser (und Wasserdampf) hervorgerufen werden

4 verschiedene Beanspruchungen wirken auf eine Bauteil:

- Baufeuchte (z.B. durch Anmachwasser bei Beton)
- aufsteigende Feuchte, drückendes Wasser (Wasser aus dem Baugrund)
- Niederschlagsfeuchte (z.B. durch Schlagregen)
- Wasserdampf durch die Wohnfeuchte
-

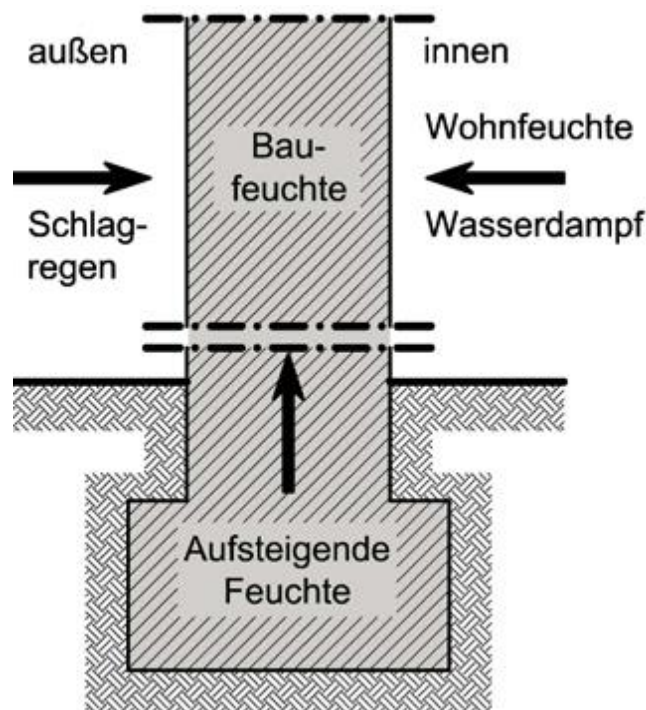


Bild 1-1 Schematische Darstellung verschiedener Feuchteeinwirkungen auf Bauteile

Da Wasser in allen drei Aggregatzuständen schädigend auf Gebäude einwirken kann, müssen unterschiedliche Schutzmaßnahmen vorgenommen werden, z.B.:

- Dichtungen (evtl. druckhaltend) gegen Fließ- und Sickerwasser sowie Grundwasser
- Dächer, Putze, Anstriche, Wandbekleidungen gegen Regen- und Spritzwasser
- Sperrschichten gegen Kapillartransport von Wasser in porösen, saugfähigen Baustoffen bei Erd- und Baufeuchtigkeit
- Dampfsperren zum Schutz vor eindiffundierenden Wasserdampf und Tauwasserbildung in Bauteilen
- Klimatisierung und Lüftung

1.1 Die Grundstadien des Feuchtetransportes

Es gilt:

- Baustoffe können Wasser abgeben (Trocknung) oder Feuchte aufnehmen (Befeuchtung)
- im Baustoff gebundenes oder ungebundenes Wasser kann sich bewegen
- Ursachen dafür sind treibende Potentiale wie Differenzen im Druck, der Temperatur oder der Konzentration
- Bedingungen für den Transport sind der Transportraum, die Wechselwirkung Wasser/Baustoff sowie die Umgebungsbedingungen.

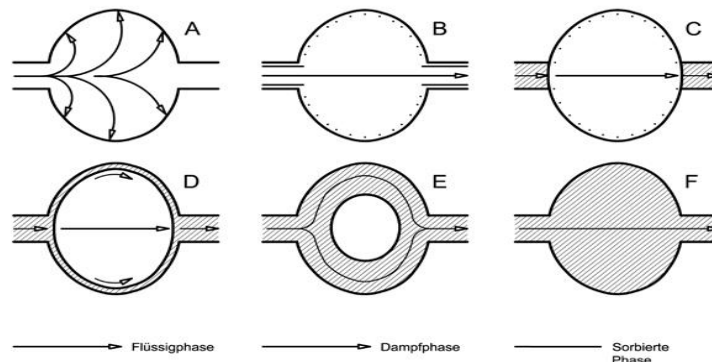


Bild 1-2 Schematische Darstellung der Feuchtetransportphänomene in porösen mineralischen Baustoffen.

Folgende wesentliche Transportmechanismen gibt es:

- reine Dampfdiffusion:
 - thermische Eigenbewegung der Moleküle
 - Transport wird durch Stöße der Wassermoleküle untereinander bestimmt
 - treibendes Potential: Partialdruckdifferenz
- Effusion:
 - Transport wird durch Stöße der Wassermoleküle mit der Porenwand bestimmt
 - treibendes Potential: Partialdruckdifferenz
 - aufgrund unterschiedlicher Porengrößen kann Diffusion und Effusion nicht klar abgegrenzt werden;
- Oberflächendiffusion (Sorbatwassertransport):
 - tritt bei hygroskopischen Stoffen auf
 - an den Probenoberflächen stellen sich Feuchtegehalte gemäß Sorptionskurve ein
 - das Sorbatwasser bekleidet die Porenoberfläche mit einer Schicht
 - Sorbatwasserstrom und Diffusionsstrom sind meist überlagert
 - im isothermen Fall Addition der beiden Transportmechanismen: kleinere μ -Werte
 - Außenwand im Winter: Subtraktion der beiden Ströme
- Lösungsdiffusion:
 - bei nicht porösen Stoffen, z.B. organische Polymere oder Dispersionen
 - Wassertransport erfolgt durch An- und Einlagern von Wassermolekülen in die Makromoleküle der Polymere auf der feuchten Seite
 - über Quellvorgänge wird das Wasser weitergeleitet
- Kapillarleitung:
 - Flüssigwassertransport in kapillarporösen Baustoffen
 - Kapillardruck als treibende Kraft; umrechenbar auf die relative Feuchte
 - wird zusammen mit der Oberflächendiffusion beschrieben

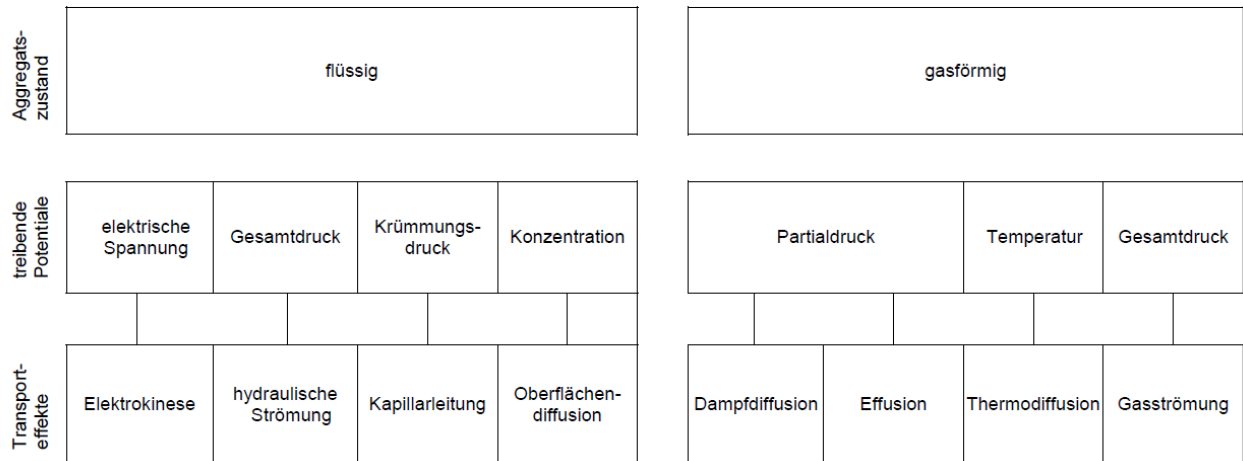


Bild 1-3 Schematische Übersicht über die Feuchtetransportphänomene in porösen mineralischen Baustoffen. Die schraffiert dargestellten Bereiche sind bauphysikalisch relevant.

1.1.1 Baustofffeuchten

Baustoffe weisen im Allgemeinen innere Hohlräume auf, die vom Makroporenbereich (mm bis 10 μm) bis in den Mikrobereich ($< \mu\text{m}$) reichen

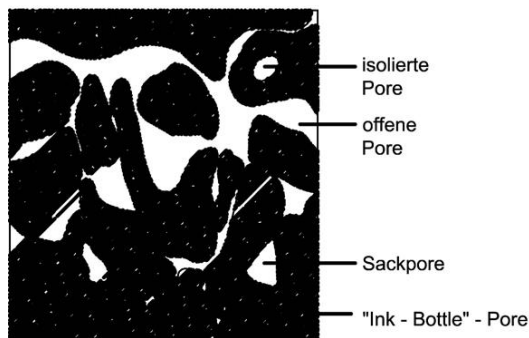


Bild 1-4 Porenstruktur von Baustoffen

Je nach Baustoff können sich in den verschiedenen Abmessungsbereichen unterschiedliche relative Häufigkeiten des Porenvolumens ergeben

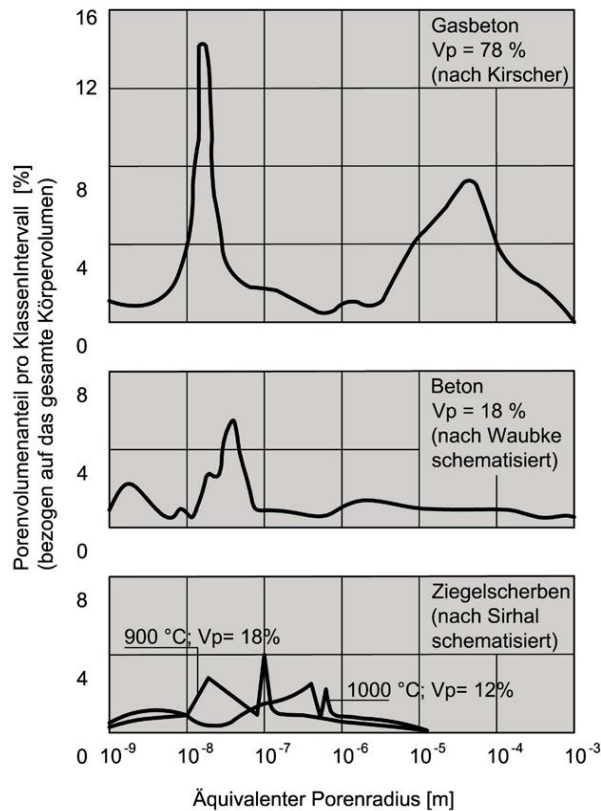


Bild 1-5 **Vergleiche von Porengrößenverteilungen verschiedener poröser Baustoffe in Abhängigkeit vom äquivalenten Porenradius**

Der in der Luft enthaltene Wasserdampf wird in diese Baustoffporen transportiert bzw. dort gebunden.

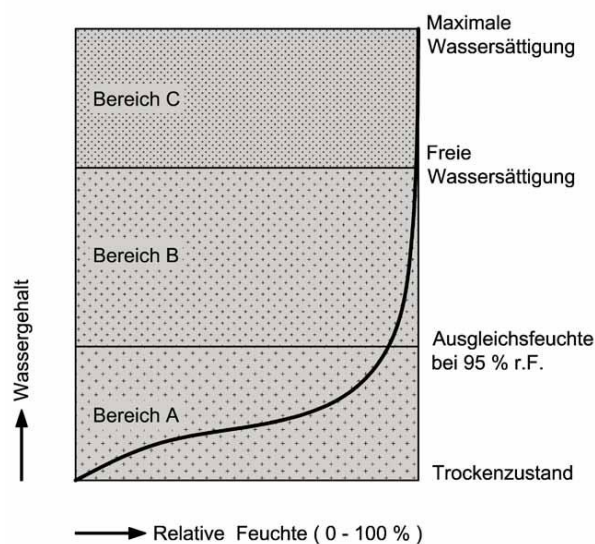


Bild 1-6 **Schematische Darstellung der Feuchtespeicherfunktion eines hygroskopischen, kapillaraktiven Baustoffes**

- Bereich A:** dieser Bereich charakterisiert den Sorptionsfeuchtebereich bis zu einer relativen Luftfeuchte von 95 %. Er wird in der Bauphysik durch Sorptionsisothermen beschrieben.
- Bereich B:** In diesem Bereich, der auch als überhygroskopischer Bereich bezeichnet wird, werden zunehmend größere Baustoffporen mit Wasser gefüllt bis zur freien Wassersättigung, der Gleichgewichtsfeuchte bei Kontakt mit Wasser.
- Bereich C:** In diesem Bereich, Übersättigungsbereich, gibt es keine Gleichgewichtszustände mehr. Die relative Feuchte beträgt dort unabhängig vom Wassergehalt stets 100%.

1.1.2 Sorption

Die Feuchtebindung im hygroskopischen Feuchtebereich (sorptive Bindung) erfolgt durch Wassersorption, indem an inneren Oberflächen des Porengefüges Wassermoleküle in mono- oder multimolekularen Schichten angelagert werden, dieses darf nicht mit der chemischen Bindung verwechselt werden.

Unter dem Begriff Sorption fasst man Absorption und Kapillarkondensation zusammen. Im überhygroskopischen Bereich ist ungebundenes Wasser (Kapillarwasser) im Baustoff vorhanden.

Zur Kennzeichnung der im Baustoff enthaltenen Wassermenge dient der

- massebezogene Wassergehalt:

$$u_m = \frac{m_f - m_t}{m_t} = \frac{m_W}{m_M} \quad [\% \text{ oder Gew.-%}] \quad (1-1)$$

m_f :	Masse des feuchten Stoffes	[kg]
m_t :	Masse des trockenen Stoffes (auch m_M)	[kg]
m_W :	Masse des Wassers	[kg]

- für den volumenbezogenen Feuchtegehalt gilt:

$$u_v = u_m \frac{\rho_M}{\rho_W} \quad [\% \text{ oder Gew.-%}] \quad (1-2)$$

ρ_M :	Rohdichte des Stoffes	[kg/m ³]
ρ_W :	Rohdichte des Wassers (1000 kg/m ³)	[kg/m ³]

Baustoff	üblich (Praxis) [Vol-%]	max. (Praxis) [Vol-%]	max. möglich [Vol-%]
Ziegel	1	10...12	20
Porenbeton	3...4	ca. 30	80
Normalbeton	ca. 5	ca. 10	20

Tabelle 1-1 volumenbezogener Feuchtegehalt einiger Baustoffe

Die meisten Baustoffe sind hygroskopisch oder sorptionsfähig sie nehmen bei längerer Lagerung in feuchter Luft eine gewisse Wassermenge („Ausgleichsfeuchte“) auf. Dieses beschreibt die Sorptionsisotherme, die so den Zusammenhang von Baustofffeuchte und relativer Luftfeuchte darstellt.

Die aufgenommene Feuchtemasse U ist abhängig von der Temperatur.

Es ergibt sich so ein praktischer, bleibender, Feuchtegehalt des Baustoffs, da Bauteile in der Praxis nicht völlig austrocknen können. Der praktische Feuchtegehalt ist der Wassergehalt u eines Stoffes/Bauteils, der bei einer Vielzahl von Proben in 90 % aller Untersuchungen (statistische Auswertung) nicht überschritten wird, er wird bestimmt bei 80 % rel. Luftfeuchte aus der Sorptionskurve.

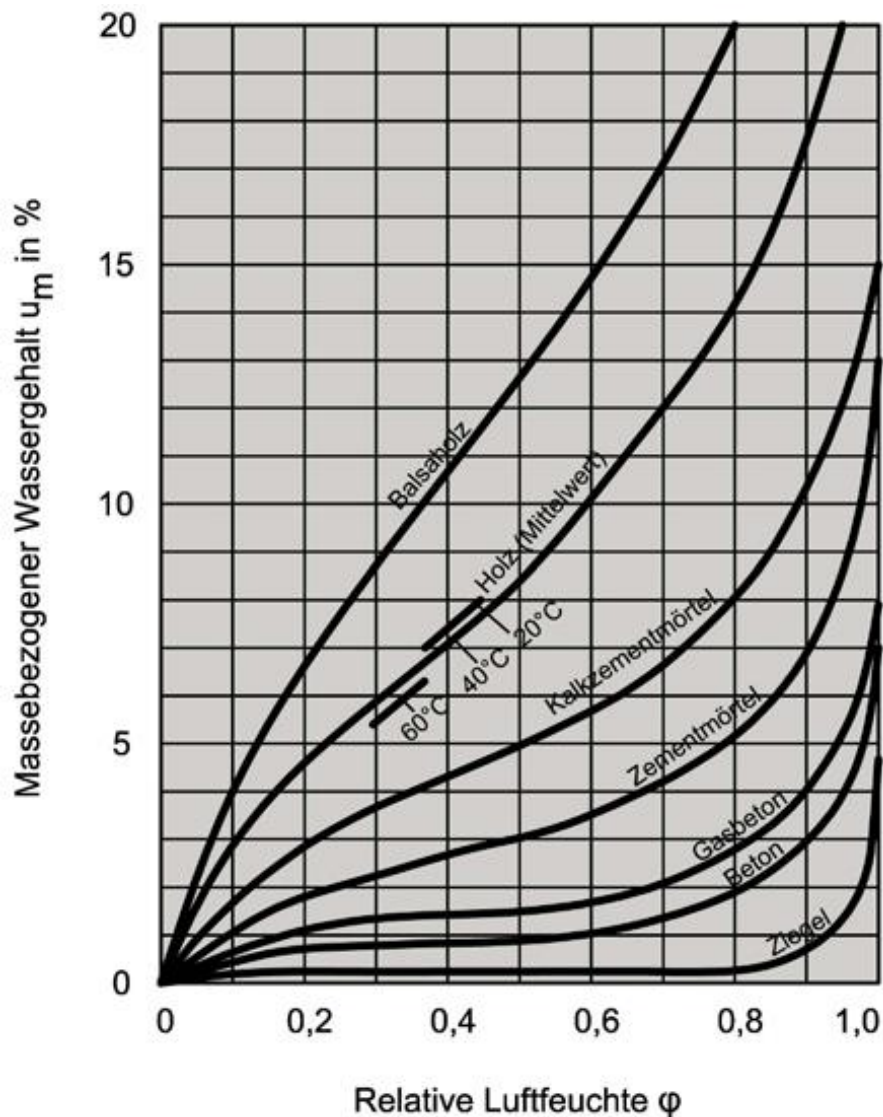


Bild 1-7 Sorptionsisothermen verschiedener Baustoffe bei 20 °C

Zeile	Baustoffe	Praktischer Feuchtegehalt ¹⁾	
		volumen- bezogen ²⁾ U _v %	masse- bezogen U _m %
1	Ziegel	1,5	-
2	Kalksandsteine	5	-
3.1	Beton mit geschlossenem Gefüge mit dicken Zuschlägen	5	-
3.2	Beton mit geschlossenem Gefüge mit porigen Zuschlägen	15	-
4.1	Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit dichten Zuschlägen nach DIN 4226 Teil 1	5	-
4.2	Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit porigen Zuschlägen nach DIN 4226 Teil 2	4	-
5	Gasbeton	3,5	-
6	Gips, Anhydrit	2	-
7	Gußasphalt, Asphaltmastix	= 0	= 0
8	Anorganische Stoffe in loser Schüttung; Expandiertes Gesteinsglas (z.B. Bläherlit)	-	5
9	Mineralische Faserdämmstoffe aus Glas-, Stein-, Hochofenschlacken-(Hütten-) Fasern	-	1,5
10	Schaumglas	= 0	= 0
11	Holz, Sperrholz, Spanplatten, Holzfaserplatten, Holzwolle-Leichtbauplatten, Schilfrohrplatten und -matten, Organische Faserdämmstoffe	-	15
12	Pflanzliche Faserdämmstoffe aus Seegrass, Holz-, Torf- und Kokosfasern und sonstige Fasern	-	15
13	Korkdämmstoffe	-	10
14	Schaumkunststoffe aus Polystyrol, Polyurethan (hart)	-	5

¹⁾ Unter praktischem Feuchtegehalt versteht man den Feuchtegehalt, der bei der Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Menschen dienen, in 90% aller Fälle nicht überschritten wurde.

²⁾ Der volumenbezogene Feuchtegehalt bezieht sich auch bei Lochsteinen, Hohlziegeln oder sonstigen Bauelementen mit Lufthohlräumen immer auf das Material allein ohne die Hohlräume.

Bild 1-8 Praktischer Feuchtegehalt von Baustoffen nach DIN 4108

Bedingt durch die in den Porenräumen eingelagerte Feuchte, verändert sich die auch die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen. Sie nimmt mit steigendem Feuchtegehalt zu.

Für Baupraktische Berechnungen wurde daher der tabellarische *Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit* λ_R eingeführt, der sich auf den praktischen Feuchtegehalt des Baustoffes bezieht.

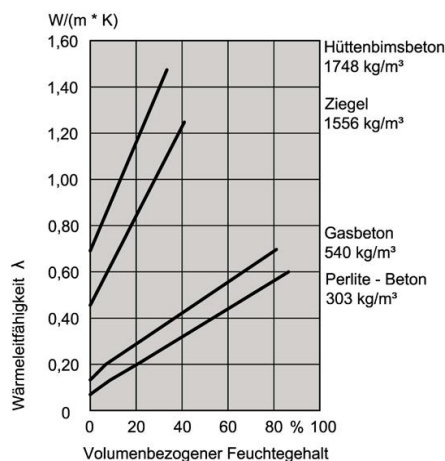


Bild 1-9 Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffe in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt; bei Dämmstoffen oft stark nicht linear Übungsskript Beispiel 4-1

1.1.3 Kapillarleitung

Die Kapillarleitung beschreibt den Flüssigwassertransport in kapillarporösen Baustoffen. Hierbei dient der Kapillardruck als treibende Kraft. Diese Größe ist in einfacher Weise nicht zu bestimmen, da der Transportkoeffizient keine Konstante, sondern eine komplexe Funktion darstellt.

Für die Betrachtung wird i.A., bedingt durch die Vielzahl an Einflussparametern (z.B. Temperatur, Wassergehalt, etc.), keine analytischen Berechnungen geführt, sondern das Feuchteverhalten infolge Kapillarität mittels numerischer Methoden bestimmt.

Zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme eines Baustoffs wird die Probe in Wasser eingetaucht und Massenzunahme über die Zeit bestimmt.

Es gilt hierbei folgendes „Wurzel-t-Gesetz“ (ergibt sich aus dem Diffusionsansatz):

$$W = w \cdot \sqrt{t} \quad \text{kg/m}^2 \quad (1-3)$$

W:	Aufgenommene Wassermenge pro Fläche	kg/m ²
t:	Zeit des Saugens	h
w:	Wasseraufnahmekoeffizient	kg/(m ² h ^{0,5})

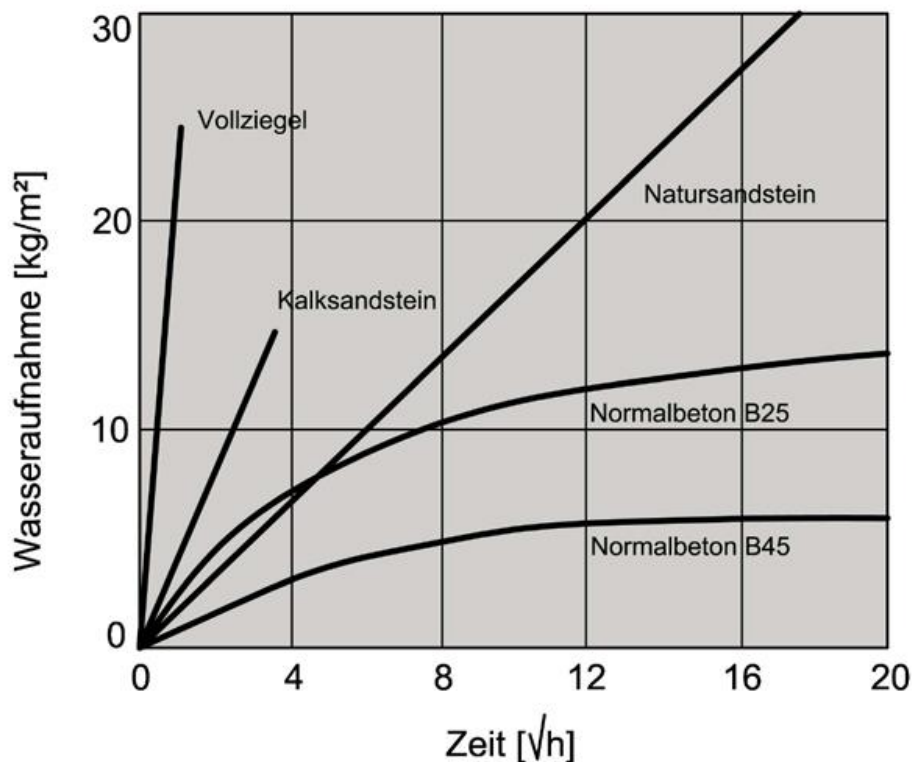


Bild 1-10 Kapillare Wasseraufnahme verschiedener mineralischer Stoffe in Abhängigkeit von der Quadratwurzel der Zeit

Die Geradlinigkeit der Messwertaufzeichnung trifft nur zu, wenn das Porengefüge durch die Wassereinwirkung keine Veränderung erfährt z.B. durch Quellvorgänge (z.B. Beton)

Bei der Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten gilt:

- größere Kapillaren saugen wegen des geringeren Strömungswiderstands rascher und quantitativ effektiver als kleine
- kleinere Poren haben eine größere Saugkraft als große, aber aufgrund des noch größeren Strömungswiderstands eine geringere Saugeschwindigkeit
- wird die Wasserzufuhr an der Saugfläche unterbunden (z.B. Ende der Beregnung); setzt sich der Wassertransport trotzdem fort: die kleineren Kapillaren saugen Wasser aus den größeren und verteilen dies im Material

es gilt folgende Gleichung:

$$g_K = D(w^*) \left(\frac{dw^*}{dx} \right) \quad \text{[kg/(m}^2 \text{ s)]} \quad (1-4)$$

g_K :	Kapillarwasserstromdichte	[kg/(m ² s)]
$D(w^*)$:	Kapillarwasserleitkoeffizient (abh. von w^*)	[m ² /s]
w^* :	Wassergehalt	[kg/m ³]
x :	Ortskoordinate	[m]

Messtechnische Erfassung der *Kapillarwasserleitkoeffizienten* erfolgt mithilfe eines NMR-Gerätes (Nuklearmagnetische Resonanz) wird der Wassergehalt in Saugrichtung während eines Saugvorgangs praktisch kontinuierlich erfasst.

Hierbei werden aus den Wassergehalten und den jeweiligen Wassergehaltsgradienten die beiden Leitkoeffizienten

- für das Saugen bei Wasserzufuhr
- für das Weiterverteilen bei Saugunterbrechung

ermittelt werden.

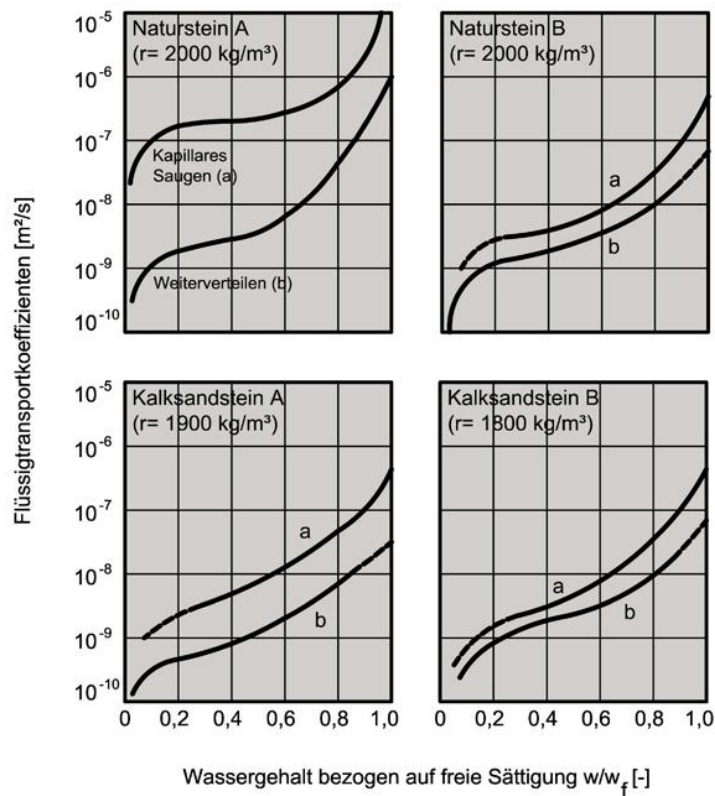


Bild 1-11 Flüssigtransportkoeffizienten von Bausteinen abhängig vom normierten Wassergehalt

Die *Feuchtespeicherfunktion* beschreibt die sich einstellenden Feuchtegehalte in Abhängigkeit von der Kapillarstruktur des Materials im Gleichgewicht mit den Umgebungsbedingungen.

Hierbei ist der hygroscopische Bereich durch die Sorptionsisotherme beschrieben. Der überhygroscopische Bereich bis zur freien Wassersättigung wird in Abhängigkeit vom Wassergehalt anhand von Messungen der Saugspannung durchgeführt. In der Folge werden dann beide Kurven zusammengesetzt.

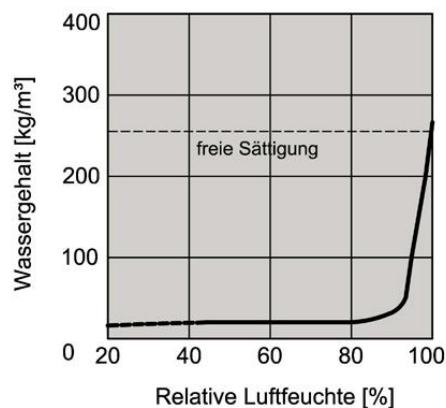


Bild 1-12 Feuchtespeicherfunktion für Kalksandstein für den hygroscopischen und überhygroscopischen Feuchtebereich; ermittelt aus der Sorptionsisotherme und Saugspannungsmesskurve

1.1.4 Wasserdampfdiffusion

Ein Gasgemisch in 2 miteinander verbundenen Räumen hat zwar überall den gleichen Gesamtdruck, aber in jedem Raum kann eine andere Konzentration der einzelnen Gase (Gaskomponenten) vorhanden sein, können also unterschiedliche Gasteildrücke herrschen. Dann erfolgt so lange ein Austausch der Moleküle eines jeden Gases zwischen den Räumen, bis auch die einzelnen Konzentrationen (Gasteildrücke) überall gleich sind.

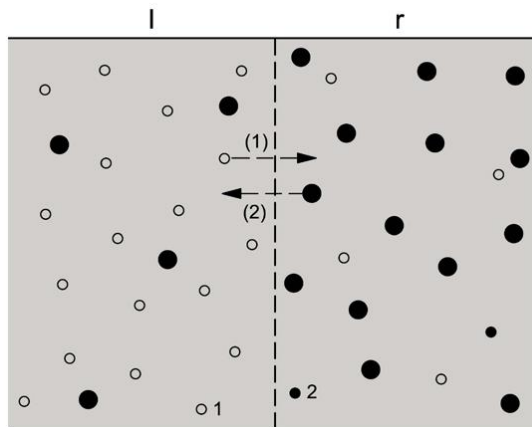


Bild 1-1 Austausch der Gasmoleküle zwischen zwei Räumen

$$\begin{array}{lll}
 t = 0 : & p_{1l} + p_{2l} = p_{1r} + p_{2r} & p_{1l} > p_{1r} & p_{2l} < p_{2r} \\
 t \rightarrow \infty : & p_{1l} + p_{2l} = p_{1r} + p_{2r} & p_{1l} = p_{1r} & p_{2l} = p_{2r}
 \end{array}$$

Der gleiche Vorgang spielt sich z.B. auch mit dem Wasserdampf-Luft-Gemisch bezüglich des Wasserdampftransports durch ein Bauteil ab, bei dem zu beiden Seiten unterschiedliche Wasserdampfteilrücke herrschen (z.B. Raumluft - Außenluft). Dann setzt aufgrund des Dampfdruckunterschiedes zwischen beiden Seiten die Dampfdiffusion ein, d.h. der Dampftransport durch das trennende Bauteil.

Diffusion ist so der Teilchentransport, der zwischen Bereichen unterschiedlicher Teilchendichte durch die thermische Bewegung erfolgt:

- die mathematische Beschreibung der Diffusion erfolgt durch das Ficksche Gesetz
- die Diffusionsgeschwindigkeit ist gegenüber der thermischen Geschwindigkeit klein:
 - etwa 10^{-6} m/s bei Gasen und
 - 10^{-7} m/s bei Flüssigkeiten und festen Stoffen

Die Wasserdampfdiffusion durch ein Bauteil hindurch erfolgt bedingt durch unterschiedliche Wasserdampfpartialdrücke auf den beiden Seiten des Bauteils.

Um den Widerstand zu beschreiben, die das Wasserdampf-Luft-Gemisch bei durchwandern des Baustoffschichten überwinden muss, wurde das Produkt $\mu \cdot d$ für eine Baustoffschicht eingeführt.

Für die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke (s_d -Wert) eines Baumaterials gilt:

$$s_d = \mu \cdot d \qquad \qquad \qquad \text{m} \qquad \qquad \qquad (1-5)$$

mit d : Dicke der Baustoffschicht m
 μ : Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, (kurz: "μ-Wert") (-)

Der s_d -Wert ist die Dicke einer Luftschicht in Metern, die denselben Wasserdampfdiffusionswiderstand aufweist, wie der Baustoff der Dicke d mit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ . Er gibt somit an, um wievielfach dichter der Baustoff ist, als eine gleichdicke, ruhende Luftschicht.

Bei mehreren hintereinanderliegenden Schichten eines Bauteils gilt:

$$s_d = \sum \mu_i d_i \quad \text{m} \quad (1-6)$$

In DIN 4108 sind Richtwerte für die Diffusionswiderstandszahl μ der Baustoffe festgelegt, häufig werden Wertebereiche angegeben (z.B. Hochlochziegel: $\mu = 5 / 10$). Bei diffusionstechnischen Berechnungen sollen die im Anwendungsfall ungünstigeren Werte verwendet werden:

- im allgemeinen für die kalte Außenseite die *größeren* μ -Werte
- für die warme Innenseite die *kleineren* μ -Werte

Der Bezug ist hierbei erwartete Kondensatebene im Bauteil.

Beispiele für μ -Werte:

Mineralischer Faserdämmstoff	$\mu = 1,$
Mauerwerk (je nach Art)	$\mu = 5 \dots 100,$
Normalbeton	$\mu = 70/150,$
Polyethylenfolie	$\mu = 100.000.$

Übungsskript Beispiel 4-2

Übungsskript Beispiel 4-3

Die Wasserdampfmengen, die durch ein Bauteil diffundieren, werden mittels der Wasserdampfdiffusionsstromdichte g ermittelt:

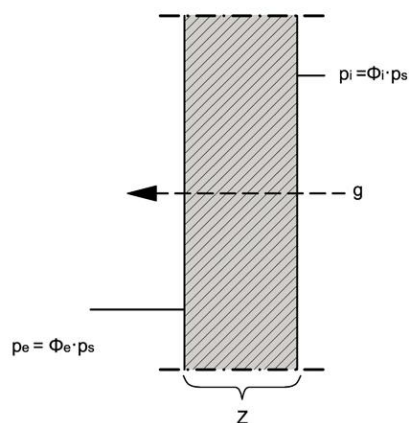


Bild 1-2 Verlauf des Dampfteildrucks $p_{i,e}$ im Bereich der Bauteiloberflächen und (Wasserdampf) Diffusionsstromdichte g

Es gilt:

$$g = \frac{\delta_0 \cdot \Delta p}{1/\beta_i + \sum_i \mu_i \cdot d_i + 1/\beta_e} = \frac{\Delta p}{s_d} = \frac{\Delta p}{Z_p} \quad \text{kg/(m}^2\text{s)} \quad (1-7)$$

Die Werte $1/\beta_i$ und $1/\beta_e$ sind jedoch im Verhältnis zu der Summe $\sum \mu \cdot d$ der einzelnen Bauteilschichten verschwindend klein, so dass sie hier zu Null angenommen werden können. Somit ergibt sich aus (Gln. 1-7):

$$g = \frac{\delta_0 \cdot \Delta p}{\sum_i \mu_i \cdot d_i} = \frac{\Delta p}{s_d} = \frac{\Delta p}{Z_p} \quad \text{kg/(m}^2\text{s)} \quad (1-8)$$

mit	g :	Wasserdampfdiffusionsstromdichte	kg/(m ² s)
	δ_0 :	Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient der Luft	kg/(m s Pa)
	p_Δ :	Differenz der Partialdrücke (z.B. der Innen- und Außenluft)	Pa
	μ :	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, "μ-Wert", des Baustoffs	(-)
	d :	Dicke der Bauteilschicht	m
	$1/\beta_{i,e}$:	innerer, äußerer Dampfübergangswiderstand	m ² s Pa/kg
	s_d :	wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke	m
	Z_p :	Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand	m ² s Pa/kg

$$\text{mit: } \delta_0 = \frac{D_0}{R_v \cdot T} \quad \text{kg/(m s Pa)} \quad (1-9)$$

D_0 :	Wasserdampf-Diffusionskoeffizient in der Luft nach Schirmer	m ² /s
R_v :	= 462 spezifische Gaskonstante für Wasserdampf	J/(kgK)
T	273 + θ thermodynamische (absolute) Temperatur	K

$$\text{mit } D_0 = 0,023 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad \text{m}^2\text{/s} \quad (1-10)$$

für praktische diffusionstechnische Berechnungen gilt $\frac{p_0}{p} \approx 1$

$$\text{folgt } \underline{\delta_0 = 1,89 \cdot 10^{-10} \approx 2 \cdot 10^{-10}} \quad \text{kg/m s Pa}$$

Der Dampfdurchlasswiderstand Z_p einer homogenen Baustoffschicht errechnet sich aus:

$$Z_p = 5 \cdot 10^9 \cdot \sum_i \mu_i \cdot d_i \quad \text{m}^2 \text{ s Pa/kg} \quad (1-11)$$

Wobei die Größe $5 \cdot 10^9$ dem gerundeten Kehrwert des Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten in Luft δ_0 entbei einer Bezugstemperatur von 10°C entspricht.

2 Tauwasserschutz

2.1 Was ist Tauwasser?

Tauwasser entsteht, wenn der in der Luft vorhandene Wasserdampf vom gasförmigen (unsichtbaren) in den flüssigen (sichtbaren) Zustand übergeht (z.B. Nebel, beschlagene Scheiben).

2.2 Wann entsteht Tauwasser?

Luft kann jeweils nur eine bestimmte Höchstmenge an Wasserdampf (Sättigungsmenge w_s in g/m^3) aufnehmen, die - abgesehen vom Luftdruck - nur von der Lufttemperatur θ_L abhängt (vgl. Tab. 2-1 und Bild 2-1).

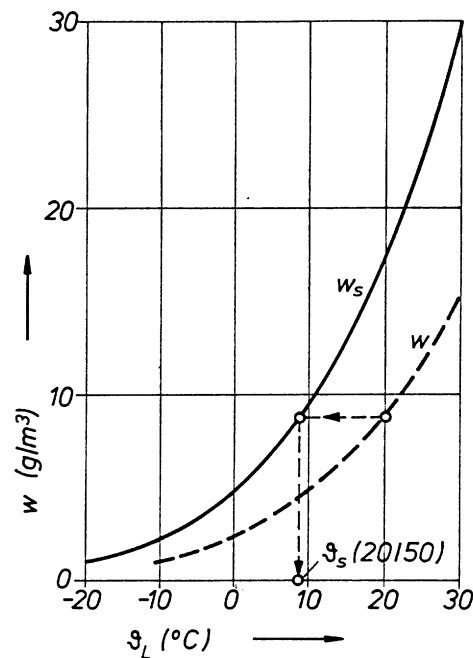


Bild 2-1 Dampfsättigungsmenge w_s der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur θ_L und vorhandene Dampfmenge w für eine relative Feuchte der Luft $\phi = 0,5$ (= 50 %); Ermittlung (Prinzip) der Taupunkttemperatur $\theta_s = 9,3^\circ\text{C}$ für $\theta_L = 20^\circ\text{C}$ und $\phi = 50\%$

θ_L ($^\circ\text{C}$)	- 20	- 10	0	10	20	30	50
w_s (g/m^3)	0,90	2,1	4,8	9,4	17,3	30,3	82,3

Tab. 2-1 Wasserdampfsättigungsmenge w_s der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur θ_L

Tauwasser entsteht, wenn z.B.

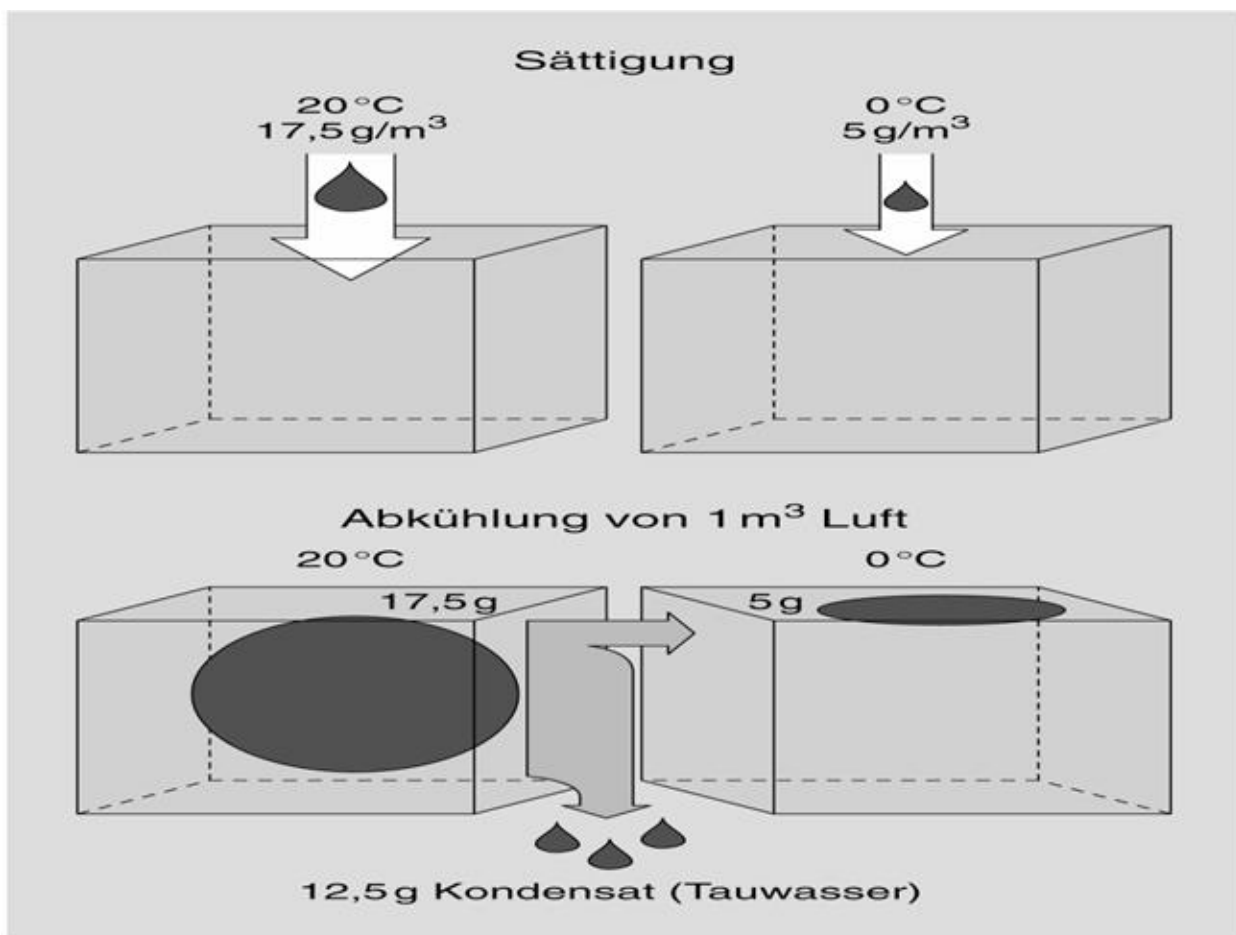
- bei konstantem θ_L der Sättigungsgehalt an Wasserdampf bereits erreicht ist und ein weiteres Dampfangebot (z.B. durch Kochen, Duschen) vorliegt, das die Luft nicht mehr aufnehmen kann, oder
- die Lufttemperatur θ_L mit einem vorhandenen Wasserdampfgehalt w unter jene Temperatur absinkt, bei der w Sättigungsgehalt w_s bedeutet.

Das Verhältnis des bei einer vorgegebenen Temperatur θ_L tatsächlich vorhandenen Wasserdampfgehalts w zur zugehörigen Sättigungsmenge w_s wird als relative Feuchte ϕ der Luft bezeichnet. Es ist:

$$\phi = w/w_s \text{ oder } \phi (\%) = w/w_s \cdot 100\%$$

Übungsskript Beispiel 4-4

Die Temperatur, bis zu der ein Wasserdampf-Luft-Gemisch abkühlen kann, ohne dass es zu einer Tauwasserbildung kommt, bei der also die Dampfsättigungsmenge w_s genau erreicht ist, wird als Taupunkttemperatur θ_s bezeichnet.



In der Baupraxis werden jedoch alle diese Beziehungen nicht über die Wasserdampfmenge, sondern über den Wasserdampfdruck ausgedrückt.

Dabei ist

- der Wasserdampfsättigungsdruck p_s (Pa) der Sättigungsmenge w_s zugeordnet, d.h. p_s ist ausschließlich abhängig von θ_L (vgl. Tab. 2-1 und Bild 2-2); in einem Wasserdampf-Luft-Gemisch der Temperatur θ_L kann kein höherer Wasserdampfdruck herrschen als der zu dieser Temperatur gehörende Dampfsättigungsdruck;
- der Wasserdampfteildruck p (Pa) der tatsächlich vorhandenen Dampfmenge w zugeordnet, also abhängig von θ_L und ϕ ; es ist

$$\phi = p/p_s \quad \text{oder} \quad \phi (\%) = p/p_s \cdot 100\%$$

Übungsskript Beispiel 4-5

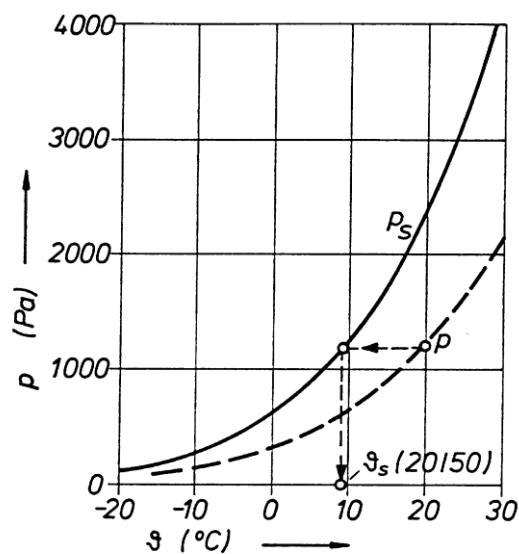


Bild 2-2 Dampfsättigungsdruck p_s und vorhandener Dampfteildruck p für $\phi = 50\%$; Ermittlung (Prinzip) der Taupunkttemperatur θ_e für 20°C und 50%

θ °C	Wasserdampf-sättigungsdruck p_s [Pa]									
	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
30	4244									
29	4006	4030								
28	3781	3803	4053							
27	3566	3588	3826	4077	4101	4124	4148	4172	4196	4219
26	3362	3382	3609	3848	3871	3894	3916	3939	3961	3984
25	3169	3188	3609	3631	3652	3674	3695	3717	3793	3759
24	2985	3003	3403	3423	3443	3463	3484	3504	3525	3544
23	2810	2827	3208	3227	3246	3266	3284	3304	3324	3343
22	2645	2661	3021	3040	3059	3077	3095	3114	3132	3151
21	2487	2504	2845	2863	2880	2897	2915	2932	2950	2968
20	2340	2354	2678	2695	2711	2727	2744	2761	2777	2794
19	2197	2212	2518	2535	2551	2566	2582	2598	2613	2629
18	2065	2079	2384	2384	2399	2413	2428	2443	2457	2473
17	1937	1950	2241	2254	2268	2283	2283	2297	2310	2324
16	1818	1830	2105	2119	2132	2145	2158	2158	2172	2185
15	1706	1717	1976	1988	2001	2014	2014	2027	2039	2052
14	1599	1610	1854	1866	1878	1889	1889	1901	1914	1926
13	1498	1508	1739	1750	1762	1773	1773	1784	1795	1806
12	1403	1413	1631	1642	1653	1663	1663	1674	1684	1695
11	1312	1321	1528	1538	1548	1559	1559	1569	1578	1588
10	1228	1237	1431	1441	1451	1460	1460	1470	1479	1488
9	1148	1156	1330	1340	1349	1358	1358	1367	1375	1385
8	1073	1081	1254	1262	1270	1279	1279	1287	1296	1304
7	1002	1008	1171	1179	1187	1195	1195	1203	1211	1218
6	935	942	1096	1103	1110	1117	1117	1125	1133	1140
5	872	878	1023	1030	1038	1045	1045	1052	1059	1066
4	813	819	955	961	968	975	975	982	988	995
3	759	765	890	896	902	907	907	913	919	925
2	705	710	831	837	843	849	849	854	861	866
1	657	662	776	781	787	793	793	798	803	808
0	611	616	721	727	732	737	737	743	748	753
- 0	611	605	667	672	677	682	687	691	696	700
- 1	562	557	621	626	630	635	640	645	648	653
- 2	517	514	595	592	587	582	582	577	572	567
- 3	476	472	547	543	538	534	534	531	527	522
- 4	437	433	505	501	496	492	492	489	484	480
- 5	401	398	464	461	456	452	452	448	444	440
- 6	368	365	426	423	419	415	415	412	408	405
- 7	337	336	391	388	385	382	382	379	375	372
- 8	310	306	359	356	353	350	350	347	343	340
- 9	284	281	330	327	324	321	321	318	315	312
- 10	260	258	301	298	296	294	294	291	288	286
- 11	237	235	276	274	272	269	269	267	264	262
- 12	217	215	255	253	251	249	249	244	242	239
- 13	198	197	231	229	228	226	226	224	221	219
- 14	181	180	211	209	208	206	206	204	202	200
- 15	165	164	193	191	190	188	188	186	184	182
- 16	150	149	177	175	173	172	172	170	168	167
- 17	137	136	161	159	158	157	157	155	153	152
- 18	125	124	146	145	144	142	142	141	139	138
- 19	114	113	133	132	131	129	129	128	127	126
- 20	103	103	122	121	120	118	118	117	116	115
			111	110	109	107	107	106	105	104

Tab. 2-2 Wasserdampf-sättigungsdruck p_s bei Temperaturen θ von 30°C bis -20°C

2.3 Tauwasserschutz im Bauteil

Neben der Tauwassergefahr für die raumseitige Bauteiloberfläche (siehe Wärmeschutzskript) besteht die Gefahr der Tauwasserbildung innerhalb des Bauteilquerschnitts, die - sofern die ausfallende Masse unzulässig groß ist - insbesondere bei leichten Bauteilen oder leichten Bauteilschichten zu Schäden oder zur Beeinträchtigung ihrer Funktion (z.B. des Wärmeschutzes) führen kann.

Nach DIN 4108 Teil 3 ist eine Tauwasserbildung in Bauteilen unschädlich, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Tauwasser M_c muss während der Verdunstungsperiode (Sommer) wieder an die Umgebung abgegeben werden können; d.h. die Verdunstungsmasse M_{ev} muss größer sein als die Tauwassermasse M_c :

$$M_{ev} \geq M_c$$

2. Während der Tauperiode (Winter) anfallendes Tauwasser M_c darf eine zulässige Wassermasse nicht überschreiten

$$M_c \leq M_{c, zul}$$

Eine Tauwasserbildung in Bauteilen ist nach DIN 4108-3 Abschn. 3.2.1 unschädlich, wenn durch Erhöhung des Feuchtegehaltes der Bau- und Dämmstoffe der Wärmeschutz und die Standsicherheit nicht gefährdet werden.

Der Durchgang des Wasserdampfes (Dampfdiffusion) durch ein Bauteil erfolgt entsprechend dem Dampfdruckgefälle zwischen beiden Seiten des Bauteils. Tauwasser entsteht im Bauteilquerschnitt an allen Stellen (x), wo - von einer Ausnahme abgesehen - der vorhandene Wasserdampfteildruck $p(x)$ den Wasserdampfsättigungsdruck $p_s(x)$ erreicht. (Anmerkung: Die Bedingung $\theta(x) \rightarrow \theta_s(x)$ für Tauwasserbildung ist hier genau so gültig wie für Bauteiloberflächen (vgl. Abschnitt 1, jedoch für den rechnerischen Nachweis sehr unhandlich.)

Im Gegensatz zur Tauwasserbildung an der Bauteiloberfläche kommt es für den Querschnitt nicht darauf an, dort Tauwasser um jeden Preis zu vermeiden - was zum einen nicht notwendig, zum anderen oft unwirtschaftlich ist -, sondern die Tauwassermasse in für die verwendete Konstruktion zulässigen Grenzen zu halten.

2.4 Randbedingungen der Berechnungen nach dem Perioden-Bilanzverfahren nach DIN 4108-3

2.4.1 Klimabedingungen

Für nicht klimatisierte Wohn- und Bürogebäude sowie vergleichbar genutzte Gebäude können nach DIN 4108 Teil 3 für die Ermittlung vereinfachte Annahmen zugrunde gelegt werden. Bei schärferen Klimabedingungen (z.B. in Schwimmbädern, Ställen, klimatisierten Räumen) sind das tatsächliche Innen- und Außenklima zu berücksichtigen.

Tab. 2-3 Klimarandbedingungen für die Beurteilung der Tauwasserbildung und Verdunstung im Inneren von Bauteilen.

Klima	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Wasserdampfteildruck	Dauer		
	θ	ϕ	p	t		
	°C	%	Pa	d	h	s
Tauperiode von Dezember bis Februar						
Innenklima	20	50	1 168	90	2 160	$7\,776 \cdot 10^3$
Außenklima	-5	80	321			
Verdunstungsperiode von Juni bis August^a						
Wasserdampfteildruck Innenklima			1 200	90	2 160	$7\,776 \cdot 10^3$
Wasserdampfteildruck Außenklima			1 200			
Sättigungsdampfdruck im Tauwasserbereich:			1 700			
— Wände, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen; Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen						
— Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen			2 000			

^a In der Verdunstungsperiode werden im Rahmen des Perioden-Bilanzverfahrens nicht die Temperaturen und Luftfeuchten, sondern nur die gerundeten Wasserdampfteildrücke als Klima-Randbedingung vorgegeben.

2.4.2 Randbedingungen der Berechnungen

Wärmeübergangswiderstände: $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$

$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ (immer; auch bei starkbelüfteten Schichten (s. Skript Wärmeschutz))

s_d -Werte von Bauteilschichten:

Luftschichten; s_d -Wert = 0,01 m (immer, unabhängig von der Neigung und Dicke)

Bauteilschichten außen auf Wärmedämmungen; s_d -Wert < 0,01 m -> s_d -Wert = 0,01 m

Bauteilschichten im Inneren; s_d -Wert < 0,01 m -> s_d -Wert = 0 bzw. 0,01 m (der ungünstigste Wert ist anzusetzen).

2.5 Wann entsteht Tauwasser im Querschnitt?

Tauwasser entsteht an allen jenen Stellen im Querschnitt, bei denen der vorhandene Dampfteildruck p den dortigen Sättigungsdruck p_s erreicht, d.h. wenn:

$$p = p_s \quad (2-1)$$

Für den Nachweis, ob bzw. wo und wie viel Tauwasser anfällt, ist also die Kenntnis,

- des Verlaufs von p_s

und

- des Verlaufs von p

notwendig.

2.6 Verlauf des Dampfsättigungsdrucks p_s über den Bauteilquerschnitt

Da p_s nur von der Temperatur θ abhängt (Bild 2-2), kann der p_s -Verlauf über den Bauteilquerschnitt ermittelt werden, wenn der θ -Verlauf bekannt ist.

Übungsskript Kapitel 4.2.5

2.6.1 Temperaturverlauf

Die Temperaturen an den Grenzen der einzelnen Baustoffschichten folgen aus den Gleichungen im Skript "Wärmeschutz".

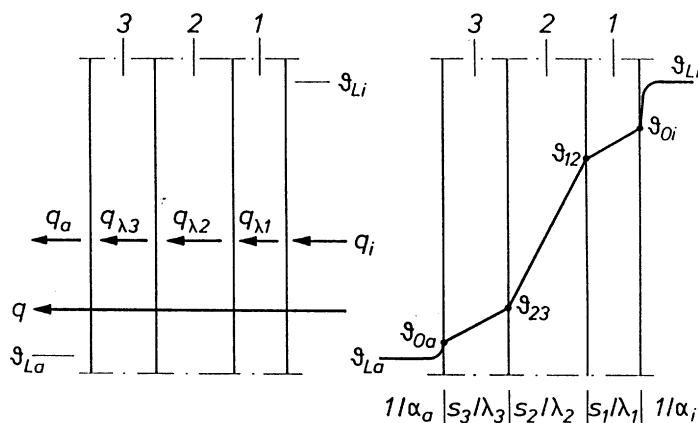


Bild 2-3 Wärmeströme q und Temperaturverlauf θ für ein dreischichtiges Bauteil (Prinzip)

Für das in Bild 2-3 dargestellte Bauteil ergibt sich aus

$$q = q_i = q_{\lambda 1} = q_{\lambda 2} = q_{\lambda 3} = q_e \quad (2-2)$$

wobei

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2-3)$$

$$q_i = h_i \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \quad (2-4)$$

$$q_{\lambda 1} = \lambda_1 / d_1 \cdot (\theta_{si} - \theta_{12}) \quad (2-5)$$

$$q_{\lambda 2} = \lambda_2 / d_2 \cdot (\theta_{12} - \theta_{23}) \text{ usw.} \quad (2-6)$$

mit (3-3) und (3-4):

$$U \cdot (\theta_i - \theta_e) = h_i \cdot (\theta_i - \theta_{si})$$

$$(\theta_i - \theta_{si}) / (\theta_i - \theta_e) = R_{si} / R_T \quad (2-7)$$

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} / R_T \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2-8)$$

mit (3-3) und (3-5):

$$U \cdot (\theta_i - \theta_e) = \lambda_1 / d_1 \cdot (\theta_{si} - \theta_{12})$$

$$(\theta_{si} - \theta_{12}) / (\theta_i - \theta_e) = (d_1 / \lambda_1) / R_T \quad (2-9)$$

$$\theta_{12} = \theta_{si} - (d_1 / \lambda_1) / R_T \cdot (\theta_i - \theta_e), \text{ usw.} \quad (2-10)$$

Aus den Gln. (3-7), (3-9), usw. ist ersichtlich: der Temperaturabfall in einer einzelnen Schicht verhält sich zur gesamten Temperaturdifferenz $\theta_i - \theta_e$ wie der Einzelwiderstand R , R_S zum Gesamtwiderstand R_T . Der Temperaturverlauf ergibt sich aus den Gln. (3-8), (3-10), usw. zu:

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2-11)$$

$$\theta_{12} = \theta_{si} - d_1 / \lambda_{R1} \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2-12)$$

$$\theta_{23} = \theta_{12} - d_2 / \lambda_{R2} \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2-13)$$

$$\theta_e = \theta_{se} - R_{se} \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \dots \text{(Kontrolle)}$$

Übungsskript Beispiel 4-6

Den erwähnten Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperaturabfall hat man früher bei vielschichtigen Bauteilen oft ausgenutzt, indem man auf der Abszisse die einzelnen Widerstände aneinander reihte. Dann brauchte man nur noch die beiden Temperaturen θ_i und θ_e geradlinig zu verbinden. Die Schnittstellen mit den Widerständen bedeuteten die dortigen Temperaturen (Bild 2-4).

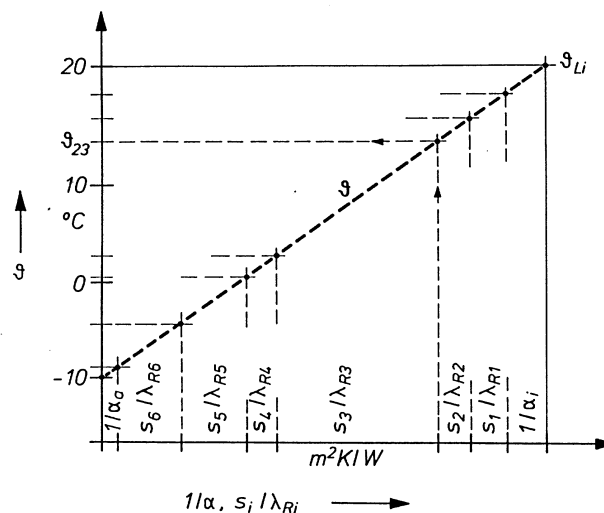


Bild 2-4 Grafische Ermittlung des Temperaturverlaufs θ über einen mehrschichtigen Bauteilquerschnitt

2.6.2 Dampfsättigungsdruck

Bei bekannten Temperaturen θ an den Schichtgrenzen können die dortigen p_s -Werte, z.B. aus Tab. 1-2, direkt ermittelt werden. In aller Regel kann der p_s -Verlauf innerhalb der einzelnen Schichten geradlinig angenommen werden, obwohl der p_s -Verlauf über θ parabelförmig verläuft (Bild 2-2; Seite 4). Ausnahme siehe Anmerkung in Abschn. „Verlauf d. Dampfteildrucks p bei Tauwasserbildung im Querschnitt“

2.7 Verlauf des Dampfteildrucks p über den Bauteilquerschnitt

2.7.1 Berechnungsgrundlagen

Die rechnerische Erfassung des Wasserdampfdurchgangs durch ein Bauteil auf Grund des Dampfdruckgefälles zwischen den beiden angrenzenden Räumen erfolgt auf der Grundlage der Gleichung (1-8) mit:

$$g = \delta_0 \cdot \frac{p_i - p_e}{\sum_i \mu_i \cdot d_i} \quad \text{kg/(m}^2\text{s)} \quad (2-1)$$

Der vorhandene Dampfdruck den beiden angrenzenden Räumen ist auf Grund der klimatischen Vorgaben ($\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e$) bekannt und ergibt sich aus:

$$p_i = \phi_i \cdot p_{si}(\theta_i) \quad (\text{Pa})$$

$$p_e = \phi_e \cdot p_{se}(\theta_e) \quad (\text{Pa})$$

mit

p_i :	Partialdruck der Innenluft	Pa
p_e :	Partialdruck der Außenluft	Pa

2.7.2 Verlauf des Dampfdruckes p ohne Tauwasserbildung im Querschnitt

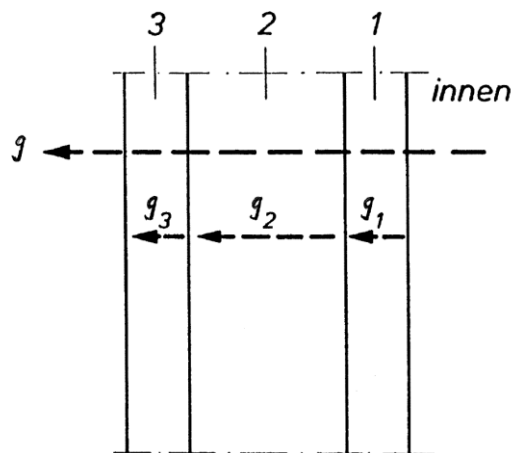


Bild 2-5 Dampfdurchgang im stationären Zustand

Vorausgesetzt werden wieder stationäre Verhältnisse, d.h.:

$$g = g_1 = g_2 = \dots = g_n$$

$$g = (p_i - p_e) / Z = (p_i - p_e) / (1,5 \cdot 10^6 \cdot \sum s_{di}) \quad (2-14)$$

$$g_1 = (p_i - p_{12}) / Z_1 = (p_i - p_{12}) / (1,5 \cdot 10^6 \cdot s_{d1}) \quad (2-15)$$

$$g_2 = (p_{12} - p_{23}) / Z_2 = (p_{12} - p_{23}) / (1,5 \cdot 10^6 \cdot s_{d2}), \text{ usw.} \quad (2-16)$$

Wie bei der Wärmestromdichte folgt auch hier: die Dampfdruckdifferenz Δp_i in der Schicht i verhält sich zur gesamten Druckdifferenz $p_i - p_e$ wie der Widerstand Z_i bzw. s_{di} der Schicht zum Gesamtwiderstand Z bzw. $\sum s_{di}$ des Bauteils. Wird also der Dampfdruckverlauf über der Widerstands- Abszisse s_d aufgetragen, dann ergibt sich ein geradliniger Verlauf von p_i auf der Innenseite nach p_e auf der Außenseite des Bauteils (Bild 2-6). Dies gilt jedoch nur solange, wie an jeder Stelle $p < p_s$ eingehalten wird!

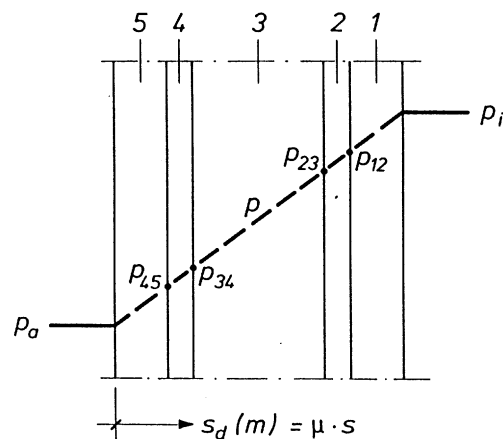


Bild 2-6 Verlauf des vorhandenen Dampfdruckes p über den Bauteilquerschnitt, solange überall $p < p_s$ eingehalten wird (tauwasserfreier Querschnitt)

2.7.3 Verlauf des Dampfdruckes p bei Tauwasserbildung im Querschnitt

Der Verlauf von p_s wird wie in Abschn. „Verlauf d. Dampfsättigungsdruckes p_s über den Querschnitt“, der von p wie in Abschn. „Verlauf d. Dampfdruckes p ohne Tauwasser im Querschnitt“ beschrieben ermittelt. Der entscheidende Unterschied zum p -Verlauf ohne Tauwasserbildung besteht hier jedoch darin, dass die geradlinige Verbindung $p_i - p_e$ die Sättigungskurve p_s schneiden würde (Bild 2-7). Da dann teilweise $p > p_s$ eintreten würde, was physikalisch nicht möglich ist, da p nicht größer als p_s sein kann, ist eine solche Gerade erst gar nicht einzuzeichnen (dieses falsche Verfahren war bis Mitte der 50er Jahre Stand unserer Erkenntnisse, wodurch es zu einer falschen Beurteilung von Konstruktionen kommen konnte).

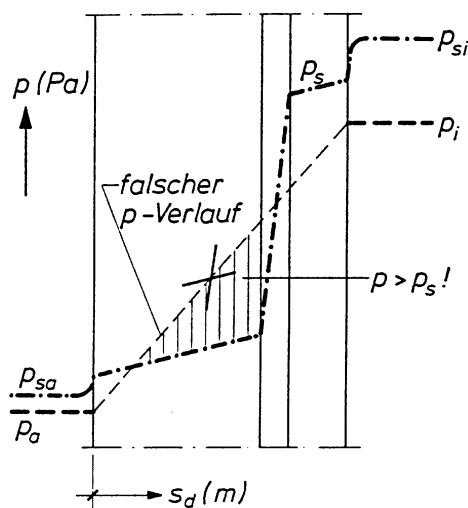


Bild 2-7 Falscher p -Verlauf, da bei geradliniger Verbindung zwischen p_i und p_e stellenweise $p > p_s$!

Zu dieser Zeit stellte **Glaser** ein neues Verfahren vor, in dem er nachwies, dass in jenen Fällen, bei denen durch die p -Gerade Bereiche mit $p > p_s$ entstünden, sich der vorhandene Dampfdruck-Verlauf "tangential" an den Sättigungsdruck-Verlauf anschmiegt (Bild 2-8). Die beiden Berührungspunkte A und B, zwischen denen p die gleiche Größe hat wie p_s , stellen die Grenzen des Tauwasserbereiches dar (Bild 2-8a). In den meisten Fällen jedoch fallen A und B zusammen, so dass dort Tauwasser "nur" in einer Ebene (an der Schichtgrenze) aus-

fällt (Bild 2-8b).

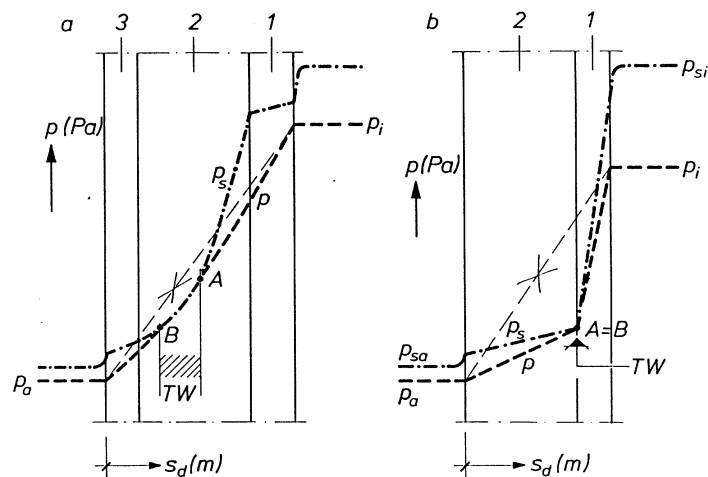


Bild 2-8 Beispiele für Verlauf des vorhandenen Dampfdrucks p bei Tauwasserbildung TW im Querschnitt;

- a) Tauwasserbereich A-B innerhalb einer Schicht (dort $p = p_s$);
- b) Tauwasserebene A=B an der Grenze zwischen zwei Baustoffschichten

Anmerkung zum p_s -Verlauf in Bild 2-8a:

Bei Schichten mit größerem s_d -Wert und stärkerem Abfall von θ und damit von p_s ist der gekrümmte Verlauf von p_s über θ zu berücksichtigen, da sonst u.U. eine fehlerhafte Beurteilung der Tauwassergefahr in dieser Schicht folgt. Zu diesem Zweck wird die s_d -Breite dieser Schicht in 3 oder 4 gleiche Abschnitte unterteilt, für deren Grenzen dann die Temperaturen θ ermittelt und die zugehörigen p_s -Werte eingetragen und parabelförmig untereinander verbunden werden.

ABER:

Bedingt durch die Anforderungen der ENEC, Energieeinsparverordnung, wird der Einsatz erheblicher Dämmschichtdicken erforderlich. Dieses führt, bedingt durch den starken Temperaturabfall in der Wärmedämmschicht, i.A. zum Tauwasserausfall lediglich in einer Ebene direkt hinter der Wärmedämmschicht (von innen gesehen), sodass der Fall nach Bild 2-8a in der Praxis praktisch nicht mehr vorkommt.

Übungsskript Beispiel 4-7

2.8 Tauwasser im Bauteilquerschnitt

2.8.1 Durchführung der Berechnungen

Tauwasserbildung im Querschnitt ist zulässig. Es ist jedoch nachzuweisen, dass vorgegebene zulässige Massen dabei nicht überschritten werden. Ein solcher Nachweis lässt sich relativ einfach nach der rechnerisch-grafischen Methode nach **Glaser** führen.

Im weiteren Vorgehen wird lediglich der Tauwasserausfall in einer Ebene erläutert.

1. Auftragen der Konstruktion im s_d -Maßstab (Abszisse)
2. Eintragen des p_s -Verlaufs
3. Eintragen von p_i und p_e an den beiden Bauteiloberflächen (geradlinige Verbindung $p_i - p_e$ würde p_s -Kurve schneiden)
4. Tangentiale Verbindungen $p_i - p_c$ -Kurve und $p_e - p_c$ -Kurve \Rightarrow Berührungspunkt p_c (Tauwasserebene).
5. Die Größe der Tauwassermasse M_c ergibt sich aus der Differenz der zum Tauwasserbereich eindiffundierenden Diffusionsstromdichte und der vom Tauwasserbereich ausdiffundierenden Diffusionsstromdichte.

Nachfolgend werden u.a. folgende Größen benutzt:

index_c Tauwasserebene

index_{ev} Bereich von der Tauwasserebene nach außen

d Schichtdicke des Baustoffs in m

μ Wasserdampf – Diffusionswiderstandszahl der Baustoffschicht - dimensionslos

$s_{d,T}$ Summe der s_d -Werte aller Einzelschichten des Bauteils $\sum \mu \cdot d$ in m

$s_{d,c}$ Summe der s_d -Werte aller Einzelschichten von der Innenoberfläche bis zur Tauwasserebene

g Wasserdampf - Diffusionsstromdichte in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$

g_i Wasserdampf - Diffusionsstromdichte in das Bauteil von innen in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$

g_e Wasserdampf - Diffusionsstromdichte von der Tauwasserebene aus dem Bauteil in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$

t_c Dauer der Tauperiode in s

t_{ev} Dauer der Verdunstungsperiode in s

M_c Tauwassermasse während der Tauperiode in kg/m^2

M_{ev} Verdunstungsmasse während der Verdunstungsperiode in kg/m^2

Auf der Grundlage der Gln. 2-1 ff folgt die Berechnung der Diffusionsstromdichte g_c :

$$g_c = \delta_0 \cdot \frac{p_i - p_c}{s_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s_{d,T} - s_{d,c}}$$

$$M_c = g_c \cdot t_c \quad (2-17)$$

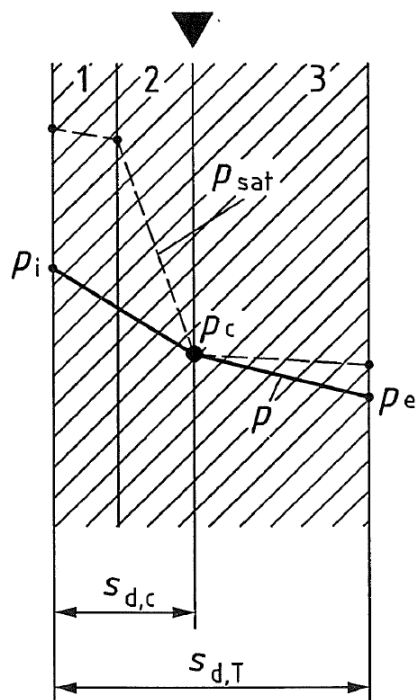


Bild 2-9 Erforderliche Größen zur Ermittlung der Tauwassermasse

2.8.2 Zulässige Tauwassermasse

In DIN 4108 Teil 3 ist bezüglich der zulässigen Tauwassermasse $m_{w,T}$ während der kalten Jahreszeit unter den jeweiligen Klimabedingungen folgendes festgelegt:

Nach DIN 4108 Teil 3 ist eine Tauwasserbildung in Bauteilen unschädlich, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Tauwasser M_c muss während der Verdunstungsperiode (Sommer) wieder an die Umgebung abgegeben werden können; d.h. die Verdunstungsmasse M_{ev} muss größer sein als die Tauwassermasse M_c :
 - a. $M_{ev} \geq M_c$
2. Während der Tauperiode (Winter) anfallendes Tauwasser M_c darf eine zulässige Wassermasse nicht überschreiten $M_c \leq M_{c,zul}$
3. Baustoffe dürfen durch Tauwasser nicht geschädigt werden (z.B. Korrosion bei Stahl, Pilzbefall bei Holz und Holzwerkstoffen).
4. Es gilt als zulässige Tauwassermasse für Dächer und Wände (insgesamt für den Bauteilquerschnitt):
 - a. $M_{c,zul} = 1,0 \text{ kg/m}^2$, ausgenommen die Fälle 3) und 4).
 - b. $M_{c,zul} = 0,5 \text{ kg/m}^2$ an Berührungsflächen von kapillar nicht wasseraufnahmefähigen Schichten, siehe Bild (2-10). An diesen Flächen kann sich während des Winters theoretisch die gesamte anfallende Tauwassermasse als Eisschicht aufbauen, anschließend innerhalb kurzer Zeit abtauen und dadurch übrige Teile der Konstruktion gefährden.
5. Für Holz: $M_{c,zul} = 0,05 \cdot m(H)$.
6. Für Holzwerkstoffe: $M_{c,zul} = 0,03 \cdot m(HWS)$.

Darin sind $m(H)$ Masse des tauwassergefährdeten Holzbereiches, $m(HWS)$ die des Holzwerkstoffes.
 Beispiel: 16 mm Spanplatte, $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$; $zul\ m_{w,T} = 0,03 \cdot m(HWS) = 0,03 \cdot 0,016 \cdot 700 = 0,33 \text{ kg/m}^2$;
 Anrechenbare Dicke der Holzschicht ca. $\leq 5 \text{ cm}$!!

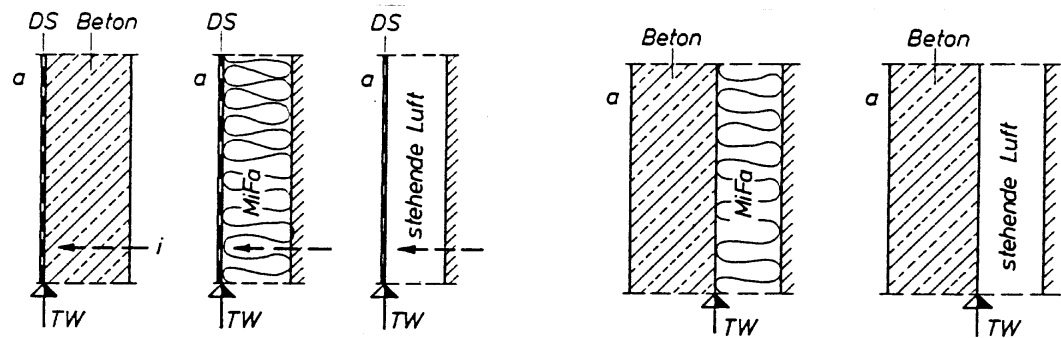


Bild 2-10 Berührungsflächen von im Sinne von DIN 4108 Teil 3 kapillar nicht wasseraufnahmefähigen Schichten, g Diffusionsstrom, TW Tauwasserebene, DS Dampfsperre

Übungsskript Beispiel 4-8

2.9 Verbesserung tauwassergefährdeter Bauteilquerschnitte

Die Verbesserung von Bauteilquerschnitten, bei denen die rechnerisch während der Wintermonate auftretende Tauwassermasse M_c die zulässige Höchstmenge überschreitet, kann prinzipiell nach 2 Gesichtspunkten erfolgen:

- 1) $M_c = 0$ (völlige Tauwasserfreiheit), i.a. nicht erforderlich, kann zu unwirtschaftlichen Lösungen führen
- 2) $M_c \leq M_{c, \text{zul}}$.

Soll ein tauwassergefährdetes Bauteil verbessert werden (wird also nicht etwa eine andere Konstruktion gewählt), dann existieren 2 Möglichkeiten (Bild 2-11)):

- 3) Anordnung einer Dampfsperre in der Nähe der raumseitigen Bauteiloberfläche (Regelfall)
- 4) Anordnung eines mit der Außenluft in Verbindung stehenden, belüfteten Hohlraumes raumseitig vor der ursprünglich tauwassergefährdeten Schicht (kann aber andere bauphysikalische Nachteile mit sich bringen und ist zudem oft konstruktiv nicht möglich).

Eine "Dampfsperre" dient lediglich zur Reduzierung der Diffusionsstromdichte, hat also keine weiteren bauphysikalischen Funktionen (z.B. keinen Beitrag zum Wärmeschutz). Besteht in der Regel aus einer dünnen, vollflächigen Folie (z.B. Alu-, Polyethylen(PE)-Folie). Eine Dampfsperre ist keinesfalls gleichbedeutend mit einer "dampfdichten" Schicht; "praktisch dampfdicht" bedeutet nach DIN 4108 Teil 3 $s_d \geq 1500 \text{ m}$.

Die in der Praxis oft zu hörende Behauptung, wonach in den Außenbauteilen angeordnete Dampfsperren das Raumklima ungünstig beeinflussen (angeblich Erhöhung der relativen Raumluftfeuchte ϕ_i), ist sachlich nicht berechtigt.

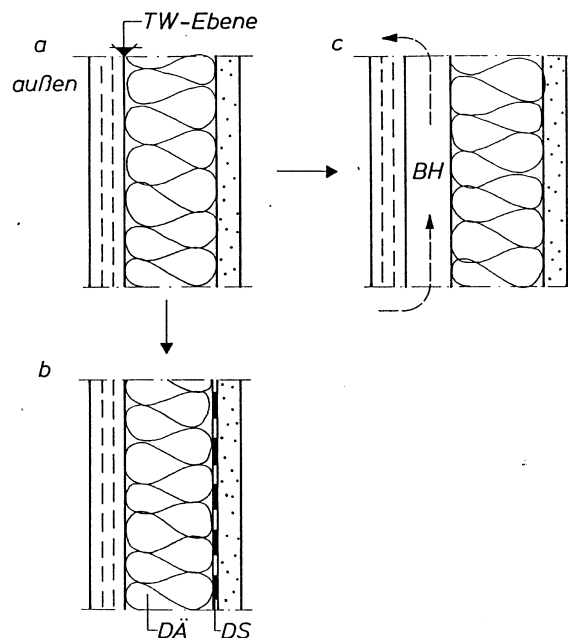


Bild 2-11 Verbesserung einer tauwassergefährdeten Konstruktion (a); b durch Anordnung einer Dampfsperre (DS) raumseitig vor der Dämmschicht DÄ; c durch belüfteten Hohlraum raumseitig vor der ursprünglich tauwassergefährdeten Schicht

2.9.1 Verbesserung durch Dampfsperre - Tauwasserfreiheit im Querschnitt ($M_c = 0$)

Tauwasserfreiheit liegt vor, wenn der p -Verlauf zwischen p_i und p_e geradlinig ist, ohne die p_s -Kurve zu schneiden (da die Neigung dieser Geraden der Größe der Diffusionsstromdichte entspricht). Folglich muss der geknickte oder gekrümmte p -Verlauf des ursprünglich tauwassergefährdeten Querschnitts zu einer Geraden werden. Das kann - bei gleichbleibenden Klimabedingungen - nur dadurch erfolgen, dass man die geradlinige Verbindung p_e -B bis zur Waagerechten von p_i verlängert. Der Schnittpunkt dieser Geraden p mit p_i ergibt den erforderlichen s_d -Wert für das gesamte Bauteil und somit die Größe von zus. s_d der Dampfsperre.

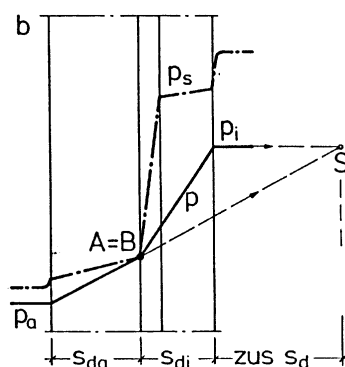


Bild 2-12 Grafische Ermittlung von zus. s_d einer zusätzlichen Dampfsperre an der Innenseite für $m_{w,T} = 0$ eines vorher gefährdeten Querschnitts; a bei vorher gekrümmtem, b bei vorher geknicktem Verlauf von p

Aus Bild 2-13 folgt mit $\tan \alpha_i = \tan \alpha_e$:

$$(p_{sA} - p_e) / s_{de} = (p_i - p_{sA}) / (s_{di} + \text{zus } s_d) \quad (2-18)$$

$$\text{zus } s_d = (p_i - p_{sA}) / (p_{sA} - p_e) \cdot s_{de} - s_{di} \quad (2-19)$$

Die Dampfsperre ist derart anzuordnen, dass die geradlinige Verbindung von p zwischen p_i und p_e erhalten bleibt (siehe Bild 2-13), d.h. allgemein raumseitig vor der Dämmschicht. Anderenfalls würde es wieder zur Tauwasserbildung kommen!

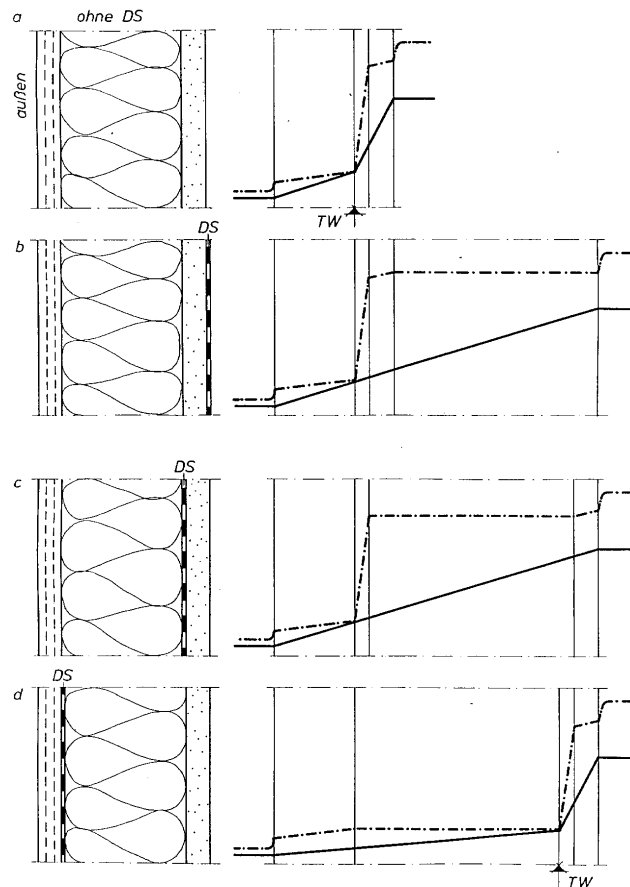


Bild 2-13 Richtige und falsche Lage der zusätzlichen Dampfsperre DS für ursprünglich tauwassergefährdetes Bauteil (a), b, c richtig (p geradlinig), d falsch (geknickter p -Verlauf, d.h. erneut Tauwasserausfall)

Übungsskript Beispiel 4-9
Übungsskript Beispiel 4-10

2.9.2 Verbesserung durch Dampfsperre - Tauwassermasse $M_{ev} \leq M_c$

Der für die Dampfsperre erforderliche zus. s_d -Wert kann näherungsweise (auf der sicheren Seite liegend) aus dem Verhältnis

$$M_{c,Tm} / M_{c,To} = (s_{di} + \text{ZUS. } s_d) / s_{di} \quad (2-20)$$

bestimmt werden, worin $M_{c,To}$ die Tauwassermasse für den Bauteilquerschnitt ohne, $M_{c,Tm}$ jene für den Querschnitt mit Dampfsperre bedeuten. Daraus folgt mit $M_{c,Tm} \leq M_c$, zul:

$$\text{ZUS } s_d \geq ((M_{c,To} / (M_c, \text{zul} \cdot s_{di})) - s_{di}) \quad (2-21)$$

2.9.3 Verbesserung durch belüfteten Hohlraum

Durch Anordnung eines mit der Außenluft in Verbindung stehenden belüfteten Hohlraums raumseitig unmittelbar vor der tauwassergefährdeten Schicht lässt sich ebenfalls Tauwasserfreiheit erzielen (Prinzip siehe Bild 2-14).

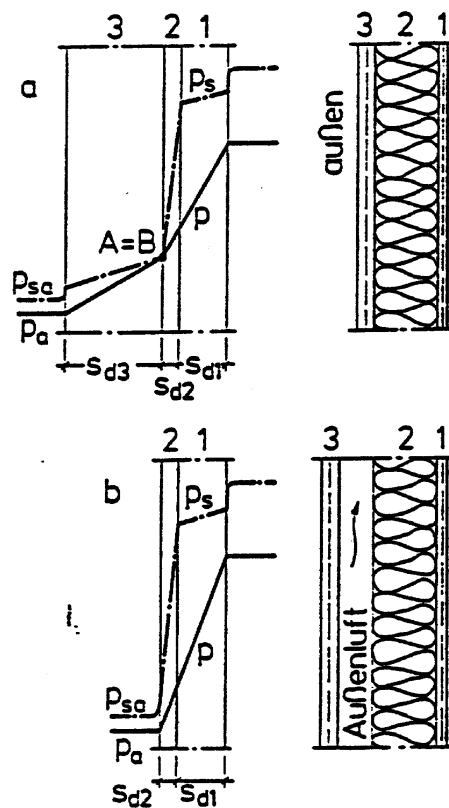


Bild 2-14 Verbesserung durch Hinterlüftung der tauwassergefährdeten Grenzschicht, a Ausgangssituation, b mit belüftetem Hohlraum

Anmerkungen zum belüfteten Hohlraum:

1. Der freie Lüftungsquerschnitt der mindestens an den zwei gegenüberliegenden Seiten des Bauteils angebrachten Öffnungen muss mindestens je $1/500$ der zu belüftenden Fläche betragen.
2. Bei belüfteten Flachdächern ist wegen der Gefahr der "Selbstblockade" des belüfteten Hohlraums in jedem Fall eine zusätzliche Dampfsperre vorzusehen, deren erforderliches s_d mit der Länge des belüfteten Hohlraums zunimmt.

2.10 Verdunstungsmasse

2.10.1 Ermittlung

Die während der Wintermonate ausgefallene Tauwassermasse M_c , muss während der Sommermonate (Verdunstungsperiode t_{ev}) über die Verdunstungsmasse M_{ev} wieder vollständig entweichen können, d.h.:

$$M_{ev} \geq M_c \quad (2-22)$$

Für die Ermittlung von W_v setzt man in den Poren der Tauwasserebene einen Sättigungsdruck (p_c) voraus, so dass sich von hier ein Dampfdruckgefälle in der Regel nach beiden Bauteiloberflächen einstellt (vgl. Bild 2-15).

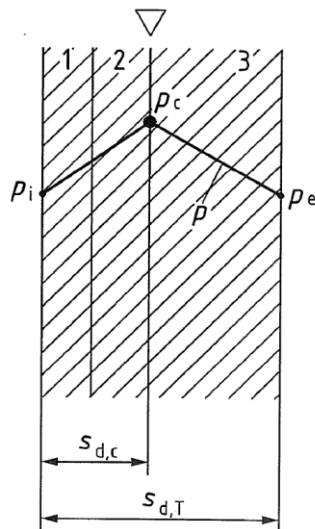


Bild 2-15 Dampfdruckdiagramm für den Verdunstungsfall während des Sommers in Bauteilen mit Tauwasserebene

Die Dampfdrücke beziehen sich auf dieselben Stellen des Bauteils wie in Abschnitt 2.8.1, sind aber von anderer Größe, da sie den Klimabedingungen für den Sommer zugeordnet sind.

$$g_{ev} = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_i}{s_{d,c}} + \frac{p_c - p_e}{s_{d,T} - s_{d,c}}$$

$$M_{ev} = g_{ev} \cdot t_{ev} \quad (2-23)$$

Übungsskript Beispiel 4-11

Übungsskript Beispiel 4-12

2.11 Bauteile ohne Nachweis des Tauwasserschutzes für Bauteilquerschnitt

DIN 4108 Teil 3 nennt die Außenbauteile, für die kein Nachweis des Tauwasserschutzes geführt zu werden braucht, wenn sie in nicht klimatisierten Wohn- oder Bürogebäuden oder in vergleichbar genutzten Gebäuden eingesetzt werden. Diese Bauteile werden in den nach stehenden Bildern 2-19 bis 2-22 auszugsweise wiedergegeben. Die genaue Beschreibung geht aus DIN 4108 Teil 3, Abschn. 5.3 hervor.

3 Praktischer Feuchteschutz

3.1 Feuchteproduktion in Räumen

In durchschnittlichen Wohnungen entstehen durch Kochen, Transpiration (Schwitzen) und Verdunstung bei Pflanzen einige 100 g Wasserdampf am Tag typische Feuchteabgabe:

Topfpflanze:	7...15 g/h
Mensch bei leichter Aktivität:	30...40 g/h
freie Wasseroberfläche bei 20 °C:	40 g/(m ² h)

Feuchtebilanz im Raum:

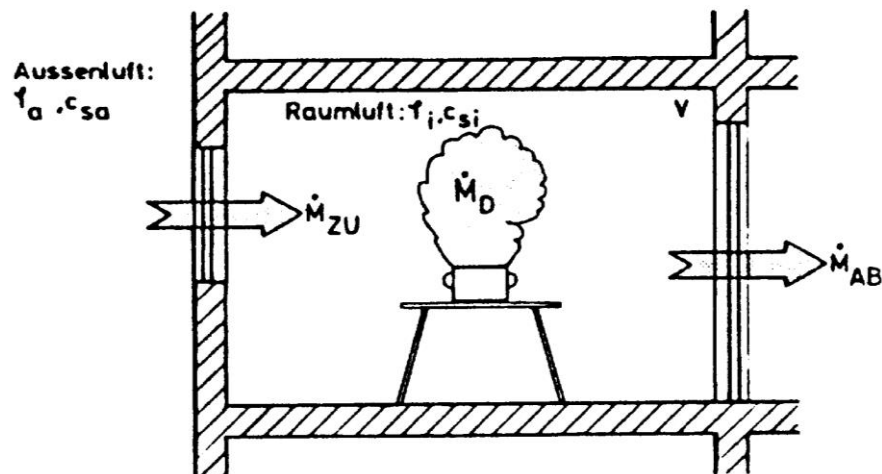


Bild 3-1 Schematische Darstellung der Feuchteströme in einem Raum

Es gilt folgende Bilanzgleichung:

$$M_{zu} + M_D = M_{ab} \quad [\text{kg/h}] \quad (3-1)$$

M_{zu} : zugeführter Wasserdampfstrom [kg/h]

M_{ab} : abgeführter Wasserdampfstrom [kg/h]

M_D : im Raum produzierter Wasserdampf [kg/h]

ferner gilt für die Einzelkomponenten:

$$M_{zu} = n V c_a \quad [\text{kg/h}] \quad (3-2)$$

$$M_{ab} = n V c_i \quad [\text{kg/h}] \quad (3-3)$$

n : Luftwechsel [1/h]

V : Raumvolumen [m³]

$c_{a/i}$: absolute Feuchte außen/innen [kg/m³]

damit gilt für die relative Feuchte im Raum:

$$\varphi_i = \left(\frac{T_i}{p_{Si}} \right) \left(\frac{p_{Sa} \cdot \varphi_a}{T_a} + \frac{M_D \cdot R_D}{n \cdot V} \right) \quad [-] \quad (3-4)$$

φ_i :	relative Feuchte im Rauminnenen	[-]
φ_a :	relative Feuchte außen	[-]
T_i :	Temperatur im Raum	[K]
T_a :	Temperatur außen	[K]
p_{Si} :	Sättigungsdampfdruck innen	[Pa]
p_{Sa} :	Sättigungsdampfdruck außen	[Pa]
R_D :	Gaskonstante (0,462 kJ/(kg K))	[kJ/(kg K)]

Übungsskript Beispiel 4-13

3.2 Numerische Ermittlung des Wärme- und Feuchtetransport

Im Bauteil treten in der Praxis überlagert verschiedene Übertragungsmechanismen gleichzeitig mit unterschiedlichen Transportintensitäten auf; dies soll rechnerisch abgebildet werden können

Wärme- und feuchtetechnische Berechnungen ergänzen messtechnische Untersuchungen und dienen der Vorhersage von bauphysikalischen Zuständen über lange Zeiträume oder für unterschiedliche Konstruktionsaufbauten

bisher standen im wesentlichen zwei Methoden zur Verfügung:

- reine stationäre Dampfdiffusion (siehe Abschnitt „Glaser-Verfahren“), d.h. Sorption und Flüssigtransport wird nicht berücksichtigt
- kapillares Saugen (Wurzel-t-Gesetz) keine Möglichkeit zur Ermittlung von Feuchteverteilungen

Da beide Verfahren ungeeignet sind zur Beschreibung von realen Befeuchtungs- und Trocknungsvorgängen, wurden Rechenverfahren entwickelt. Zur numerischen Berechnung des instationären Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen sind mindestens folgende physikalische Effekte zu berücksichtigen:

Diffusion

- Lösungsdiffusion
- Kapillarleitung und Oberflächendiffusion
- hygriischer Einfluss auf die Wärmeleitung
- Latentwärmeeffekte beim Übergang von Wasser zu Eis bzw. Dampf und flüssiges Wasser und umgekehrt

folgende Randbedingungen müssen instationär berücksichtigt werden:

- Temperatur
- relative Feuchte der Oberfläche und der Umgebung
- Sonneneinstrahlung
- Niederschlag

Numerische Berechnung erfolgt durch zwei gekoppelte partielle Differentialgleichungen für den Wärme- und Feuchtetransport für deren Berechnung einige EDV-Programme zur Verfügung stehen:

- WUFI vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik; vgl. Ziffer 6.5.2
- DIM von der Uni Dresden
- MATCH von der Uni Kopenhagen

Hinweise bei der Benutzung von Rechenprogrammen:

- stets sind Validierungen (Vergleich mit Messergebnissen) erforderlich
- zur Kontrolle der Ergebnisse sollten Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden

Im Gegensatz zur rein stationären, diffusionstechnischen Berechnung eines Bauteils nach DIN 4108 können mit dem thermischen und hygrischen Simulationsprogrammen auch instationäre, sorptive und kapillar-leitende Prozesse berücksichtigt werden.

Hierdurch ist es möglich, das Bauteil in bauphysikalischer Sicht genauer zu erfassen und Feuchteprozesse auch visuell durch eine Filmdarstellung nachzuvollziehen.

Hierbei werden als Randbedingungen der Berechnung die meteorologischen Daten wie Temperatur, Strahlung, Regen/Schlagregen, relative Luftfeuchte nach eigenen Angaben oder nach Testreferenzjahren auf das Bauteil bezogen.

Die Raumklimadaten, Temperatur und relative Feuchte, werden auf das Bauteil aufgebracht und die Feuchteentwicklung im Bauteil während einer oder mehrerer Jahresperioden dargestellt.

Bei der Berechnung des Wärmetransports werden u.a. folgende Transportmechanismen berücksichtigt:

- Wärmeleitung,
- Enthalpieströme durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel,
- kurzwellige Sonnenstrahlung,
- langwellige nächtliche Abstrahlung.

Konvektiver Wärmetransport durch Luftströmungen werden meist nicht mit aufgenommen, da er meist schwer zu erfassen und selten eindimensional ist.

Bei der Berechnung des Dampftransports werden u.a. folgende Transportmechanismen berücksichtigt:

- Dampfdiffusion,
- Lösungsdiffusion.

Bei der Berechnung des Flüssigtransports werden u.a. folgende Transportmechanismen berücksichtigt:

- Kapillarleitung,
- Oberflächendiffusion.

Die durch Schwerkraft bedingten Sickerströmungen, hydraulische Strömungen aufgrund von Gesamtdruckunterschieden, elektrokinetische und osmotische Effekte sowie die durch Luftströmung verursachten konvektiven Dampftransporte werden meist nicht erfasst.

3.3 Tauwasser in Bauteilen infolge Wasserdampf-Konvektion

Bei nicht massiven, luftdurchlässigen Konstruktionen (z.B. bei Holztafelbauweise) muss der Feuchteintrag durch Luftdurchströmungen beachtet werden. Undichtheiten in einer Konstruktion haben Luftströmungen zur Folge:

- unter dem Einfluss von Druckdifferenzen (Windanfall) oder
- Temperaturdifferenzen zwischen Raumluft und Außenluft (Thermik)

Dies führt zu erhöhten Wärmeverlusten und zu Tauwasserbildung, durch die mit dem Luftdurchgang bedingte Wasserdampf-Konvektion kann wesentlich mehr Feuchtigkeit in eine Konstruktion eingebracht werden als durch Diffusion, deshalb müssen Undichtheiten und Leckstellen in Außenbauteilen vermieden werden:

- Notwendigkeit einer „Windsperre“ oder „Konvektionssperre“
- kann an der Außen- oder Innenseite einer Konstruktion angebracht sein
- in der Regel wird sie in Verbindung mit der Dampfsperre - also innen – angebracht

3.4 Sommerkondensation und Umkehrdiffusion

Tauwasser- oder Kondensatbildung tritt in Wohnungen oder Baukonstruktionen hauptsächlich im Winter auf:

- warm-feuchte Raumluft kommt mit kalten Flächen in Berührung
- der Wassergehalt oder die Taupunkttemperatur der Raumluft verursacht die Tauwasserbildung

es gibt aber auch die Sommerkondensation:

- der Wassergehalt der Außenluft ist für Tauwasserbildungen an Oberflächen oder im Inneren einer Konstruktion die Ursache
- Beispiele hierfür sind die Tauwasserbildung infolge nächtlicher Unterkühlung auf Wiesen („taunasses Gras“) oder auf dem Autodach

Umkehrdiffusion:

- tritt auf, wenn hohe äußere Oberflächentemperaturen, z.B. aufgrund hoher solarer Einstrahlung die Diffusionsrichtung umdrehen
- Feuchte wird dann zum Rauminnen transportiert und kann dort an diffusionsdichten Schichten auskondensieren

3.5 Schlagregenschutz

Durch Einwirken von Regen und Wind (Schlagregen) kann Wasser in Wände eindringen und sich dort in Rissen oder kapillar in den Baustoffporen verteilen dies führt zu erhöhten Wärmeverlusten durch feuchtes Wandmaterial und zu einem hohen Risiko von Frostschäden. Abhilfe schaffen z. B. wasserabweisende oder wasserhemmende Putze oder Beschichtungen.

Die Beanspruchung von Gebäuden wird durch sog. „Beanspruchungsgruppen“ (I,II,III) definiert (DIN 4108):

Beanspruchungsgruppe I: Geringe Schlagregenbeanspruchung:

- gilt für Gebiete mit Jahresniederschlagsmengen unter 600 mm und
- besonders windgeschützte Lagen

Beanspruchungsgruppe II: Mittlere Schlagregenbeanspruchung:

- in Gebieten mit Jahresniederschlagsmengen von 600 mm bis 800 mm
- in windgeschützten Lagen in Gebieten mit größeren Niederschlagsmengen

- bei Hochhäusern in exponierter Lage, aber in Gebieten mit wenig Niederschlag

Beanspruchungsgruppe III: Starke Schlagregenbeanspruchung:

- in Gebieten mit Jahresniederschlagsmengen über 800 mm und windstark
- bei Hochhäusern in exponierter Lage,
- aber in Gebieten mit mittlerer Schlagregenbeanspruchung.

In DIN 4108 ist für die 3 Beanspruchungsgruppen festgelegt, welche Putze, Platten oder Verschalungen entsprechend den wasseraufnehmenden Eigenschaften erlaubt sind.

Zeile	Beanspruchungsgruppe I	Beanspruchungsgruppe II	Beanspruchungsgruppe III
	geringe Schlagregenbeanspruchung	mittlere Schlagregenbeanspruchung	starke Schlagregenbeanspruchung
1	Außenputz ohne besondere Anforderungen an den Schlagregenschutz auf	Wasserabweisender Außenputz nach Tabelle 4 auf	
	<ul style="list-style-type: none"> – Außenwänden aus Mauerwerk, Wandbauplatten, Beton u. ä. – sowie verputzten außenseitigen Wärmebrückendämmungen 		
2	Einschaliges Sichtmauerwerk mit einer Dicke von 31 cm (mit Innenputz)	Einschaliges Sichtmauerwerk mit einer Dicke von 37,5 cm (mit Innenputz)	Zweischaliges Verblendmauerwerk mit Luftschicht und Wärmedämmung oder mit Kerndämmung (mit Innenputz)
3	Außenwände mit im Dickbett oder Dünnbett angemörtelten Fliesen oder Platten		Außenwände mit im Dickbett oder Dünnbett angemörtelten Fliesen oder Platten nach DIN 18515-1 mit wasserabweisendem Ansetzmörtel
4	Außenwände mit gefügedichter Betonaußenschicht		
5	Wände mit hinterlüfteten Außenwandbekleidungen ^a		
6	Wände mit Außendämmung durch ein Wärmedämmputzsystem oder durch ein bauaufsichtlich zugelassenes Wärmedämmverbundsystem		
7	Außenwände in Holzbauart mit Wetterschutz nach DIN 68800-2		
^a Offene Fugen zwischen den Bekleidungsplatten beeinträchtigen den Regenschutz nicht.			

Bild 3-4 Beispiele für die Zuordnung von Wandbauplatten und Beanspruchungsgruppen nach DIN 4108-3

Definition der Schlagregeneigenschaften von Putzen:

Die Wasseraufnahmeeigenschaften werden mit dem w-Wert (Wasseraufnahmekoeffizienten) in Kombination mit dem s_d -Wert beschrieben:

- Wasserhemmende Putze:
 - $w \leq 2 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ mit $s_d \leq 2 \text{ m}$
 - Außenputze aus Mörteln der Gruppe II und III, DIN 18550
- Wasserabweisende Putze:
 - $w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ mit $s_d \leq 2 \text{ m}$ oder
 - $w * s_d \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$

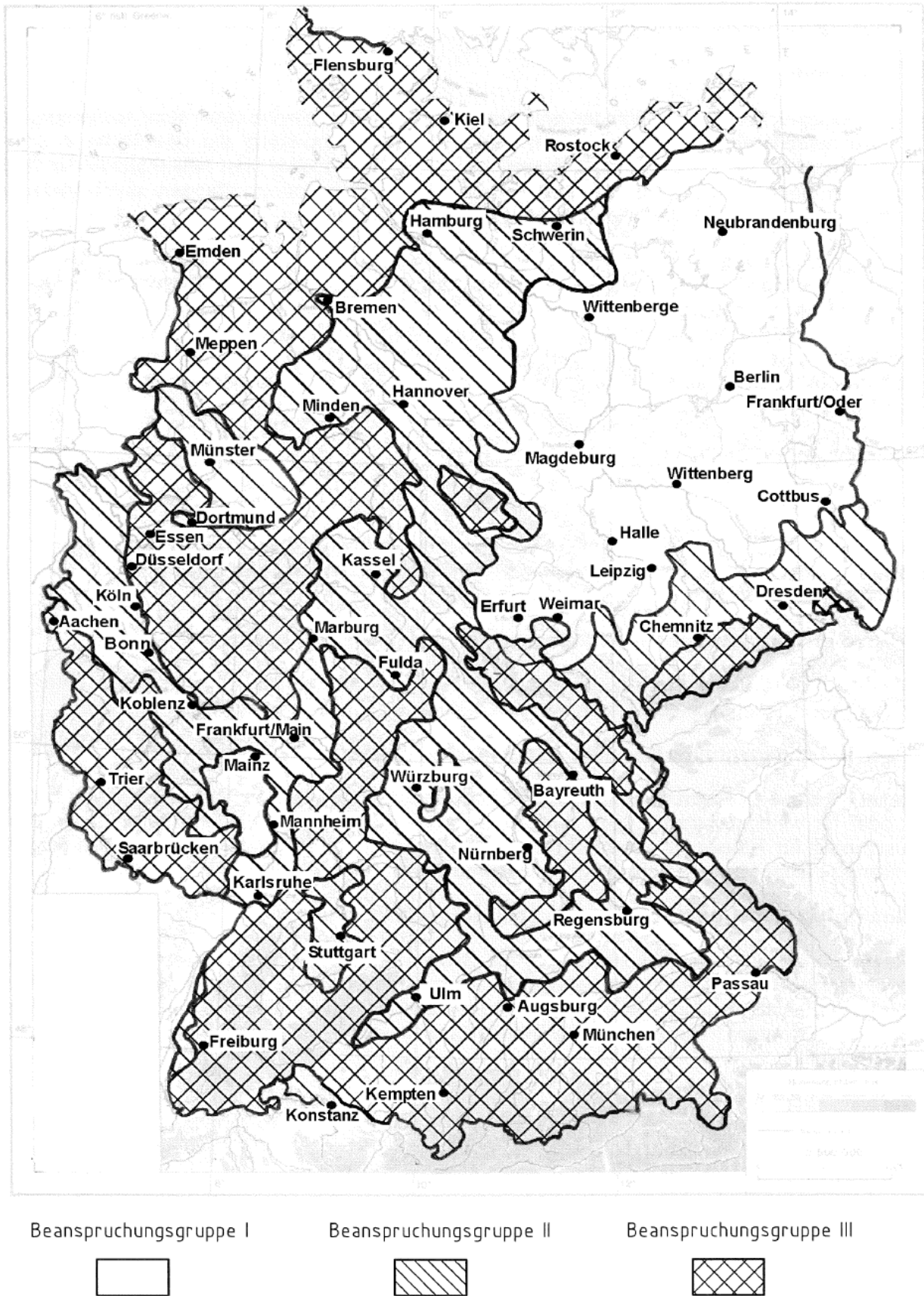


Bild 3-3 Schlagregenbeanspruchung in der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 4108-3

4 Normen und Richtlinien

Die DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden besteht aus folgenden Teilen:

- DIN 4108-1 Wärmeschutz im Hochbau; Größen und Einheiten (zurückgezogen und ersetzt durch die DIN EN ISO 7345:1995)
- DIN 4108-2 Mindestanforderungen an den Wärmeschutz zur Vermeidung von Tauwasser und unhygienischen Raumluftverhältnissen sowie den sommerlichen Wärmeschutz (aktuelle Ausgabe 2013-02)
- DIN 4108-3 Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung Enthält Randbedingungen und Rechenvorschriften für das Glaser-Verfahren (aktuelle Ausgabe 2014-11)
- DIN 4108-4 Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Enthält wesentliche bauphysikalische Kennwerte einzelner Baustoffe (Lambda- und My-Werte) (aktuelle Ausgabe 2013-02)
- DIN V 4108-6 Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs; enthält alle wesentlichen Rechenvorschriften zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs in Wohngebäuden nach EnEV (für Nichtwohngebäude siehe DIN V 18599) (aktuelle Ausgabe 2003-06)
- DIN 4108-7 Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele (aktuelle Ausgabe 2011-01)
- DIN 4108-10 Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe (aktuelle Ausgabe 2008-06)
- DIN 4108 Beiblatt 1 Wärmeschutz im Hochbau; Inhaltsverzeichnisse; Stichwortverzeichnis (ungültig)
- DIN 4108 Beiblatt 2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele (aktuelle Ausgabe 2006-03)

EnEV Energie Einsparverordnung - Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden

5 Literatur

[1] DIN - Taschenbuch 189 "Bauphysik; Normen für das Studium"; Beuth Bauverlag, Berlin

[2] Gösele/Schüle "Schall, Wärme, Feuchte"; Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin

[3] Wendehorst/Muth "Bautechnische Zahlentafeln", Teubner-Verlag, Stuttgart

[4] Schneider "Bautabellen, mit Berechnungshinweisen und Beispielen", Werner-Verlag, Düsseldorf

[5] Schulze "Hausdächer in Holzbauart, Konstruktion, Statik, Bauphysik"; Werner-Verlag

[6] Schulze „Holzbau, Wände-Decken-Dächer,, Teubner-Verlag, Stuttgart