

**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  
Bachelorstudium**

Feuchteschutz

**Inhaltsverzeichnisse**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....   | <b>2</b>  |
| 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        |
| <b>2</b> | <b>Tauwasserschutz</b> .....  | <b>15</b> |
| 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        |
| <b>3</b> | <b>Praktischer Feuchteschutz</b> .....  | <b>33</b> |
| 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        |
| <b>4</b> | <b>Normen und Richtlinien</b> .....   | <b>39</b> |
| <b>5</b> | <b>Literatur</b> .....  | <b>39</b> |

## 1 Einleitung

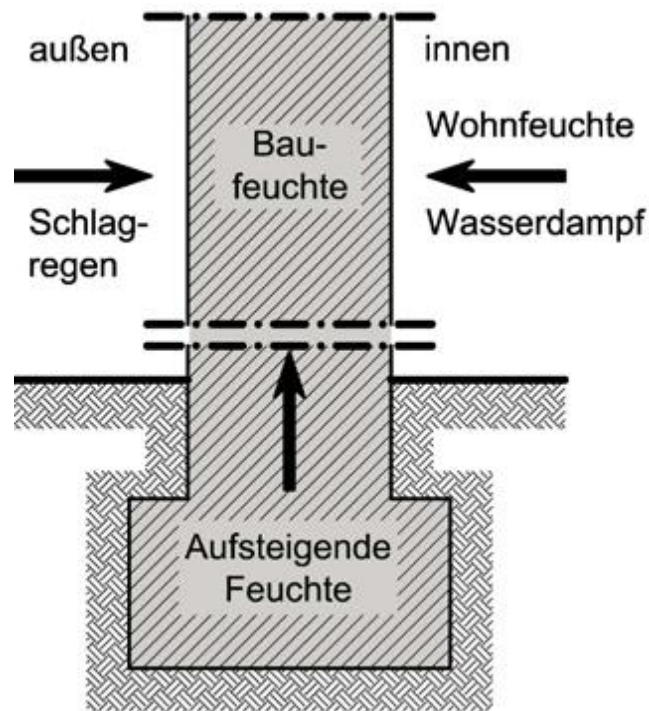
Feuchte hat Einfluss auf

- 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

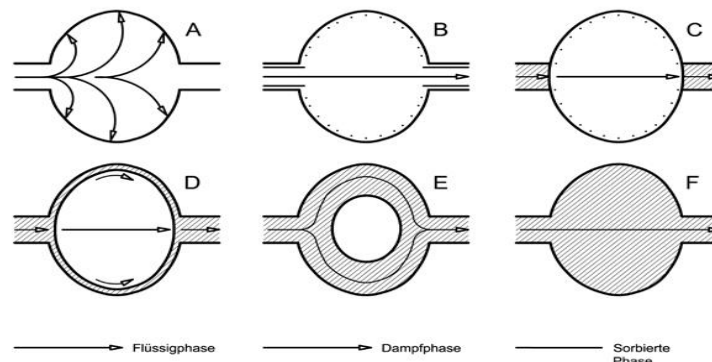
Da Wasser in allen drei Aggregatzuständen schädigend auf Gebäude einwirken kann, müssen unterschiedliche Schutzmaßnahmen vorgenommen werden, z.B.:

- 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:

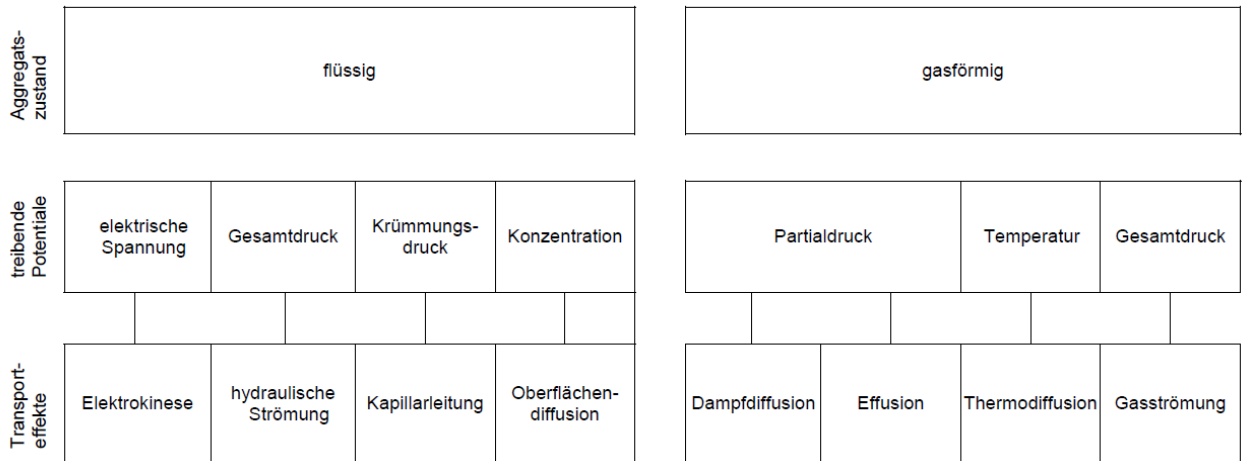
- Baustoffe können Wasser abgeben (Trocknung) oder Feuchte aufnehmen (Befeuchtung)
- im Baustoff gebundenes oder ungebundenes Wasser kann sich bewegen
- Ursachen dafür sind treibende Potentiale wie Differenzen im Druck, der Temperatur oder der Konzentration
- Bedingungen für den Transport sind der Transportraum,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



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

Folgende wesentliche Transportmechanismen gibt es:

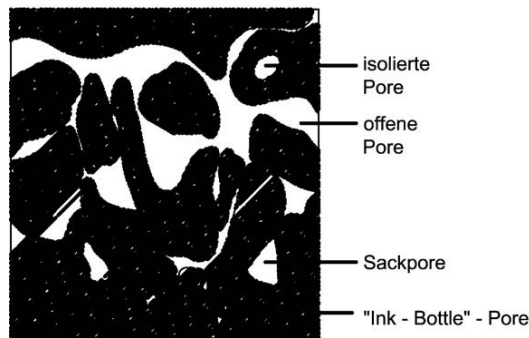
- reine Dampfdiffusion:
  - thermische Eigenbewegung der Moleküle
  - Transport wird durch Stöße der Wassermoleküle untereinander bestimmt
  - treibendes Potential: Partialdruckdifferenz
- Effusion:
  - Transport wird durch Stöße der Wassermoleküle mit der Porenwand bestimmt
  - treibendes Potential: 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  $\mu$ -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.**

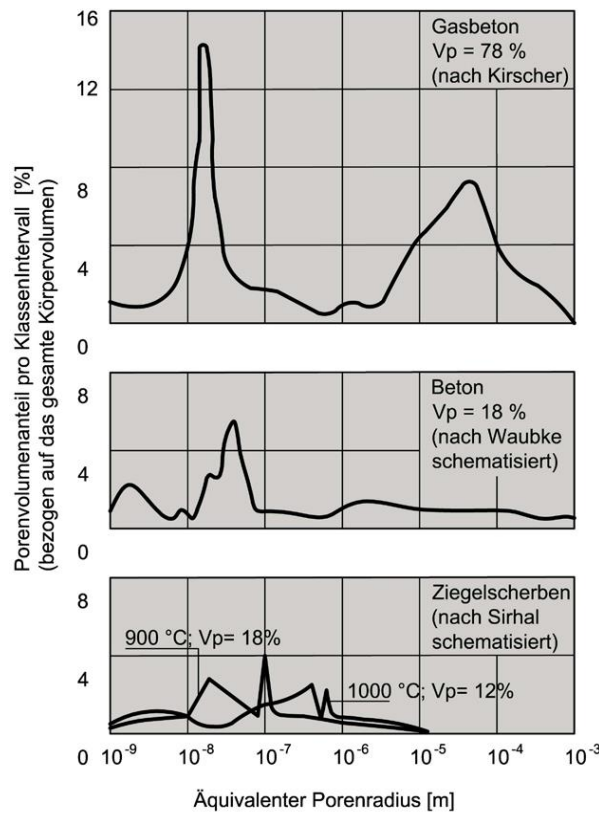
**1.1.1 Baustofffeuchten**

Baustoffe weisen im Allgemeinen innere Hohlräume auf, die vom Makroporenbereich (mm bis 10 µm) bis in den Mikrobereich (< µm) reichen



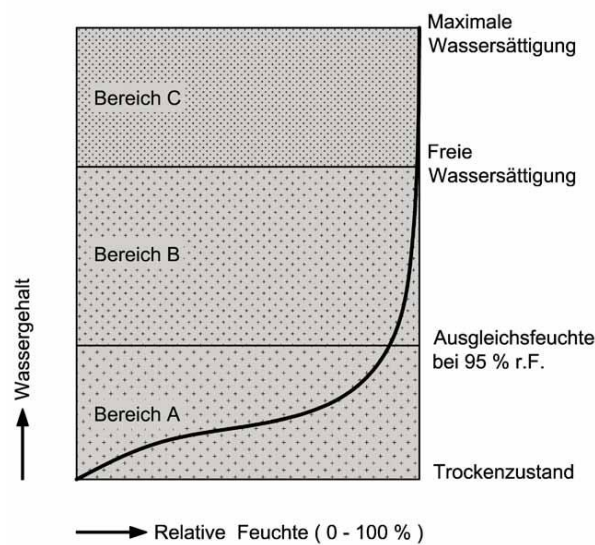
**Bild 1-4 Porenstruktur von Baustoffen**

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:

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

|            |   |                      |
|------------|---|----------------------|
| $\rho_M$ : | Rohdichte des Stoffes                           | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\rho_W$ : | Rohdichte des Wassers (1000 kg/m <sup>3</sup> ) | [kg/m <sup>3</sup> ] |

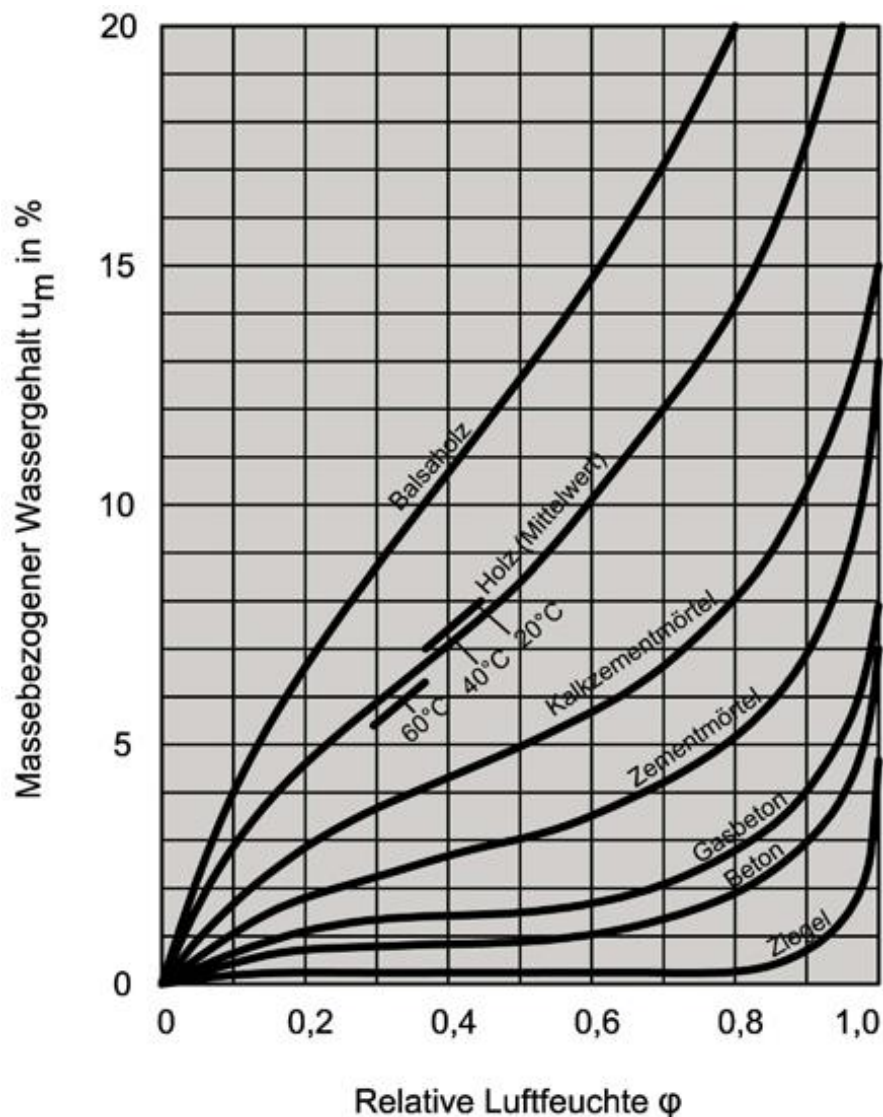
| Baustoff    | üblich (Praxis)<br>[Vol-%] | max. (Praxis)<br>[Vol-%] | max. möglich<br>[Vol-%] |
|-------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Ziegel      | 1                          | 10...12                  | 20                      |
| Porenbeton  | 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 <sup>1)</sup>             |                                     |
|-------|---|---|-------------------------------------|
|       |   | volumenbezogen <sup>2)</sup><br>U <sub>v</sub><br>% | massebezogen<br>U <sub>m</sub><br>% |
| 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                                   |

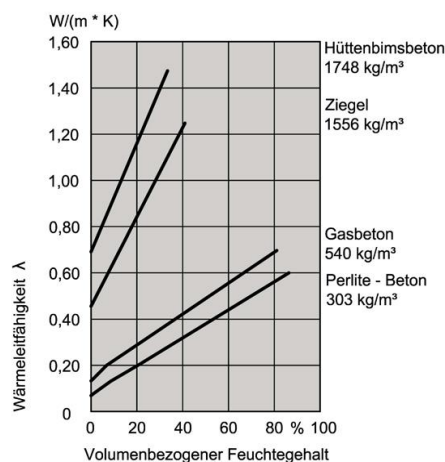
<sup>1)</sup> Unter praktischem Feuchtegehalt versteht man den Feuchtegehalt, der bei der Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Menschen dienen, in 90% aller Fälle nicht überschritten wurde.

<sup>2)</sup> 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*  $\lambda_R$  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.

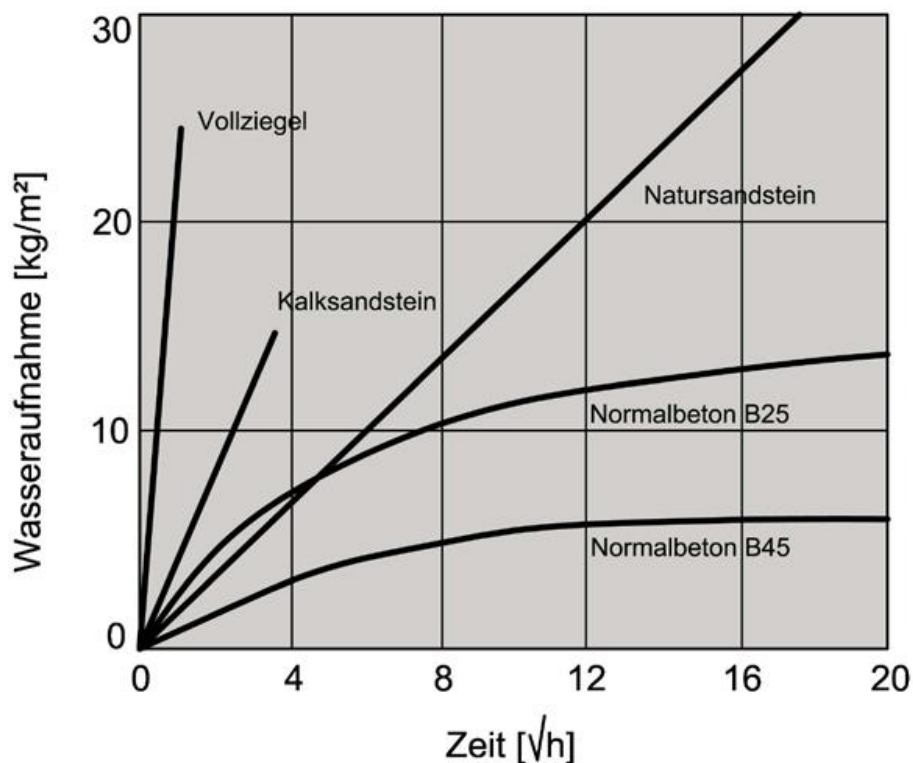
Für die Betrachtung wird i.A., bedingt durch die Vielzahl an Einflussparametern (z.B. Temperatur, Wassergehalt, etc.), keine analytischen Berechnungen geführt, sondern das Feuchteverhalten infolge Kapillarität mittels numerischer Methoden bestimmt.

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 <sup>2</sup>                     |
| t: | Zeit des Saugens                    | h                                     |
| w: | Wasseraufnahmekoeffizient           | kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> ) |



**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:

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

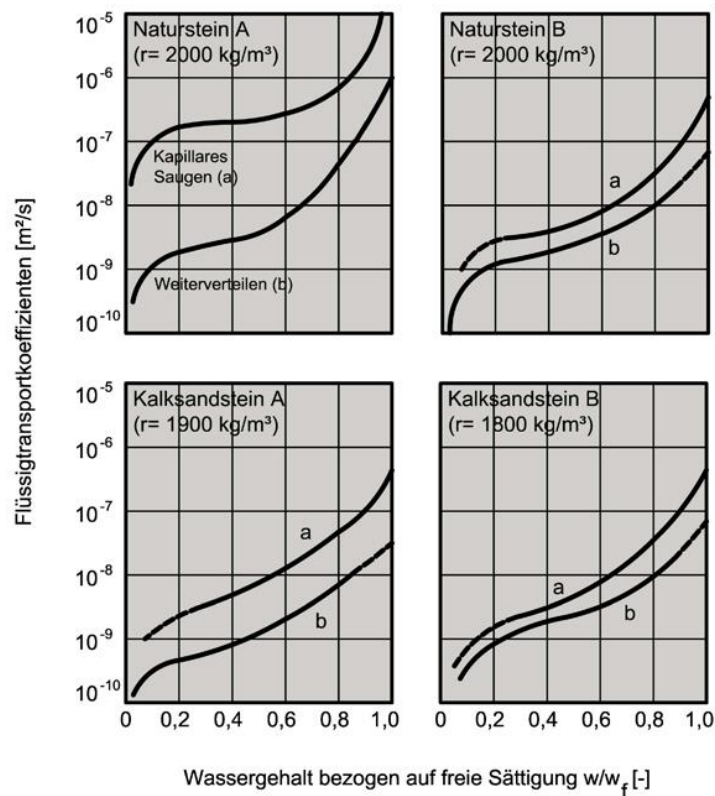
|            |   |                         |
|------------|---|-------------------------|
| $g_K$ :    | Kapillarwasserstromdichte                       | [kg/(m <sup>2</sup> s)] |
| $D(w^*)$ : | Kapillarwasserleitkoeffizient (abh. von $w^*$ ) | [m <sup>2</sup> /s]     |
| $w^*$ :    | Wassergehalt 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

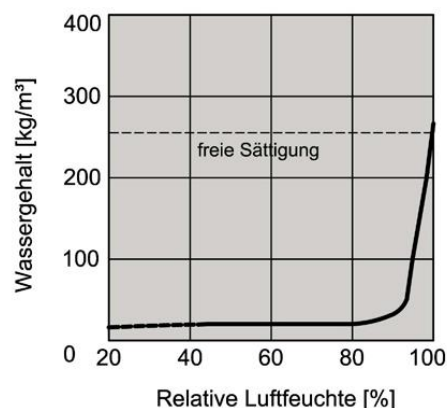
ermittelt werden.



**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.

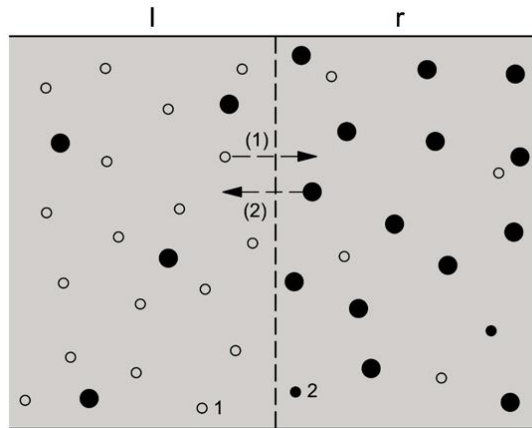
Hierbei ist der hygroscopische Bereich durch die Sorptionsisotherme beschrieben. Der überhygroscopische Bereich bis zur freien Wassersättigung wird in Abhängigkeit vom Wassergehalt anhand von Messungen der Saugspannung durchgeführt. In der Folge werden dann beide Kurven zusammengesetzt.



**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 Wasserdampfteildrücke 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 der Baustoffschichten überwinden muss, wurde das Produkt  $\mu \cdot d$  für eine Baustoffschicht eingeführt.

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

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

mit  $d$ : Dicke der Baustoffschicht m  
 $\mu$ : 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  $\mu$ . 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  $\mu$  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*  $\mu$ -Werte
- für die warme Innenseite die *kleineren*  $\mu$ -Werte

Der Bezug ist hierbei erwartete Kondensatebene im Bauteil.

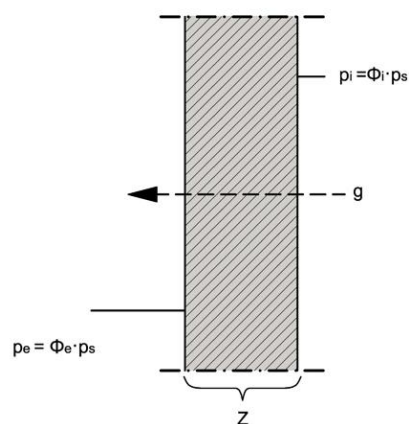
Beispiele für  $\mu$ -Werte:

|                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| 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  $\Sigma \mu \cdot d$  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 <sup>2</sup> s)  |
|     | $\delta_0$ :      | Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient der Luft                 | kg/(m s Pa)            |
|     | $p_\Delta$ :      | Differenz der Partialdrücke (z.B. der Innen- und Außenluft)    | Pa                     |
|     | $\mu$ :           | Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, "μ-Wert", des Baustoffs | (-)                    |
|     | $d$ :             | Dicke der Bauteilschicht                                       | m                      |
|     | $1/\beta_{i,e}$ : | innerer, äußerer Dampfübergangswiderstand                      | m <sup>2</sup> s Pa/kg |
|     | $s_d$ :           | wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke              | m                      |
|     | $Z_p$ :           | Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand                      | m <sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> /s |
| $R_v$ : | = 462 spezifische Gaskonstante für Wasserdampf              | J/(kgK)           |
| $T$ :   | 273 + $\theta$ 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  $\delta_0$  bei einer Bezugstemperatur von 10°C entspricht.

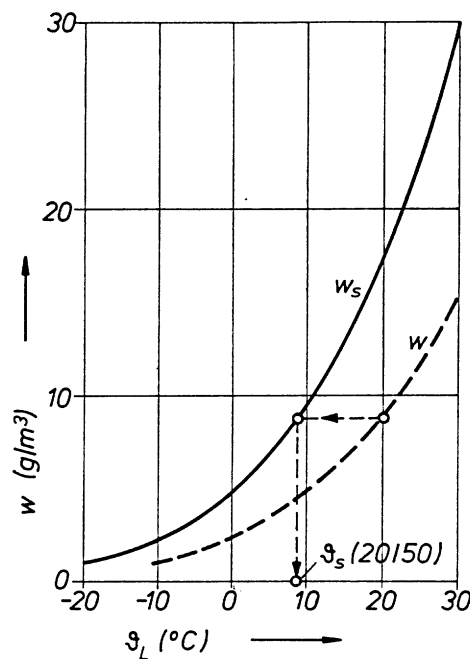
## 2 Tauwasserschutz

### 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  $\text{g/m}^3$ ) aufnehmen, die - abgesehen vom Luftdruck - nur von der Lufttemperatur  $\theta_L$  abhängt (vgl. Tab. 2-1 und Bild 2-1).



**Bild 2-1** Dampfsättigungsmenge  $w_s$  der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur  $\theta_L$  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  $\phi = 50\%$

|                                 |      |      |     |     |      |      |      |
|---------------------------------|------|------|-----|-----|------|------|------|
| $\theta_L$ ( $^\circ\text{C}$ ) | - 20 | - 10 | 0   | 10  | 20   | 30   | 50   |
| $w_s$ ( $\text{g/m}^3$ )        | 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  $\theta_L$



Tauwasser entsteht, wenn z.B.

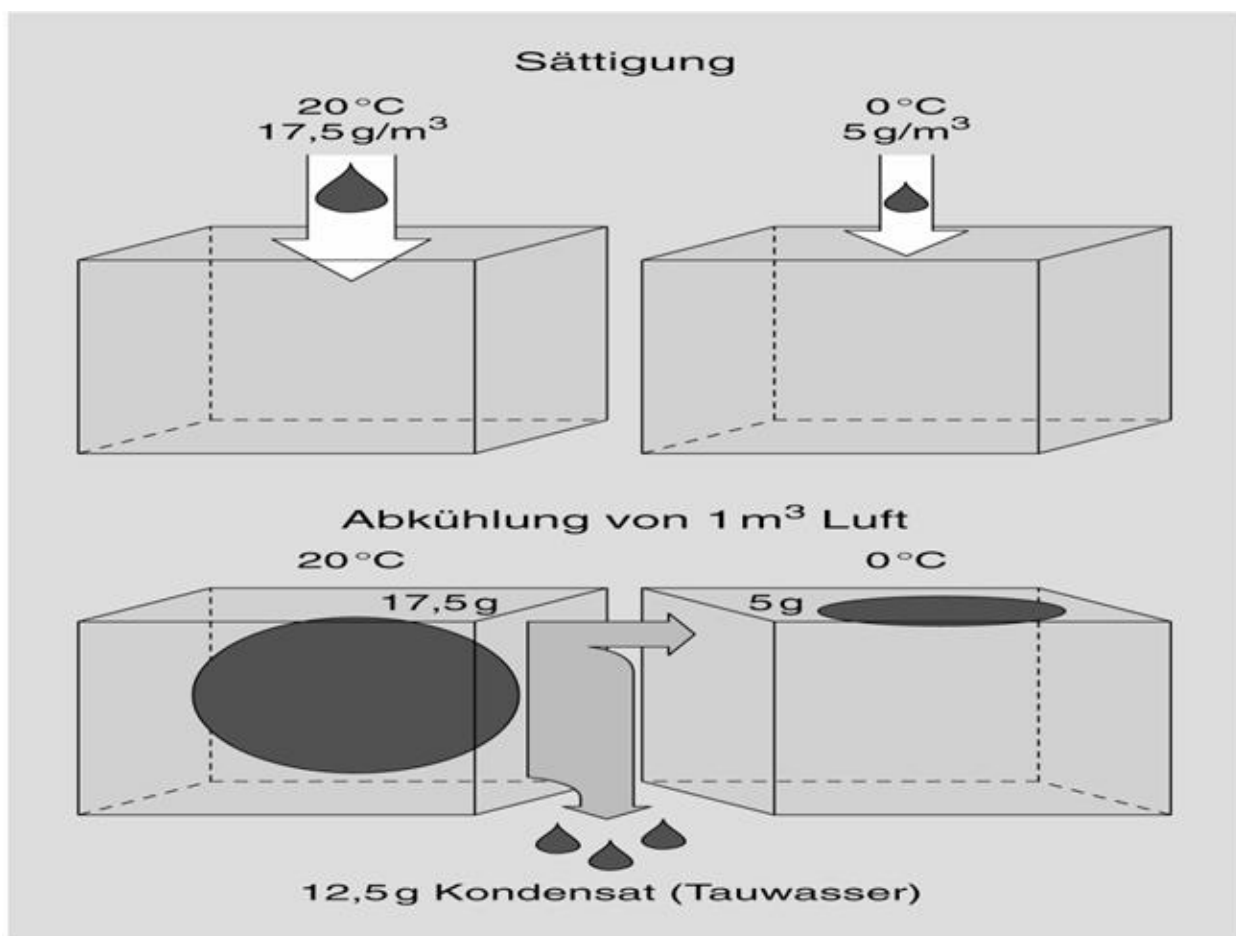
- bei konstantem  $\theta_L$  der Sättigungsgehalt an Wasserdampf bereits erreicht ist und ein weiteres Dampfangebot (z.B. durch Kochen, Duschen) vorliegt, das die Luft nicht mehr aufnehmen kann, oder
- die Lufttemperatur  $\theta_L$  mit einem vorhandenen Wasserdampfgehalt  $w$  unter jene Temperatur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

Das Verhältnis des bei einer vorgegebenen Temperatur  $\theta_L$  tatsächlich vorhandenen Wasserdampfgehalts  $w$  zur zugehörigen Sättigungsmenge  $w_s$  wird als relative Feuchte  $\phi$  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  $\theta_s$  bezeichnet.



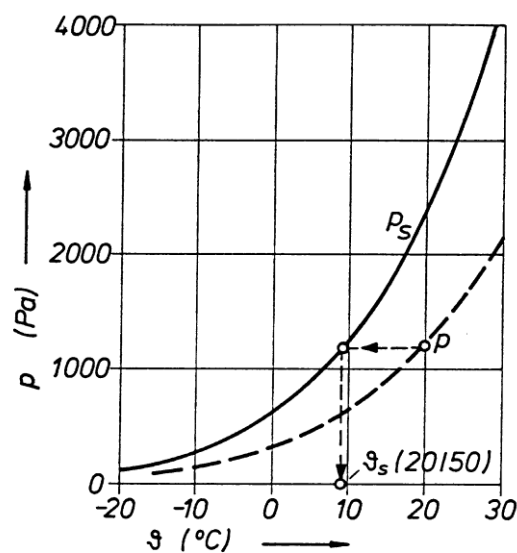
In der Baupraxis werden jedoch alle diese Beziehungen nicht über die Wasserdampfmenge, sondern über den Wasserdampfdruck ausgedrückt.

Dabei ist

- der Wasserdampfsättigungsdruck  $p_s$  (Pa) der Sättigungsmenge  $w_s$  zugeordnet, d.h.  $p_s$  ist ausschließlich abhängig von  $\theta_L$  (vgl. Tab. 2-1 und Bild 2-2); in einem Wasserdampf-Luft-Gemisch der Temperatur  $\theta_L$  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  $\theta_L$  und  $\phi$ ; 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  $\theta_e$  für  $20^\circ\text{C}$  und  $50\%$

| $\theta$<br>°C | Wasserdampf-sättigungsdruck<br>$p_s$ [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 |
|                |   |      | 3403 | 3631 | 3652 | 3674 | 3695 | 3717 | 3793 | 3759 |
|                |   |      |      | 3423 | 3443 | 3463 | 3484 | 3504 | 3525 | 3544 |
| 25             | 3169                                      | 3188 | 3208 | 3227 | 3246 | 3266 | 3284 | 3304 | 3324 | 3343 |
| 24             | 2985                                      | 3003 | 3021 | 3040 | 3059 | 3077 | 3095 | 3114 | 3132 | 3151 |
| 23             | 2810                                      | 2827 | 2845 | 2863 | 2880 | 2897 | 2915 | 2932 | 2950 | 2968 |
| 22             | 2645                                      | 2661 | 2678 | 2695 | 2711 | 2727 | 2744 | 2761 | 2777 | 2794 |
| 21             | 2487                                      | 2504 | 2518 | 2535 | 2551 | 2566 | 2582 | 2598 | 2613 | 2629 |
| 20             | 2340                                      | 2354 | 2369 | 2384 | 2399 | 2413 | 2428 | 2443 | 2457 | 2473 |
| 19             | 2197                                      | 2212 | 2227 | 2241 | 2254 | 2268 | 2283 | 2297 | 2310 | 2324 |
| 18             | 2065                                      | 2079 | 2091 | 2105 | 2119 | 2132 | 2145 | 2158 | 2172 | 2185 |
| 17             | 1937                                      | 1950 | 1963 | 1976 | 1988 | 2001 | 2014 | 2027 | 2039 | 2052 |
| 16             | 1818                                      | 1830 | 1841 | 1854 | 1866 | 1878 | 1889 | 1901 | 1914 | 1926 |
| 15             | 1706                                      | 1717 | 1729 | 1739 | 1750 | 1762 | 1773 | 1784 | 1795 | 1806 |
| 14             | 1599                                      | 1610 | 1621 | 1631 | 1642 | 1653 | 1663 | 1674 | 1684 | 1695 |
| 13             | 1498                                      | 1508 | 1518 | 1528 | 1538 | 1548 | 1559 | 1569 | 1578 | 1588 |
| 12             | 1403                                      | 1413 | 1422 | 1431 | 1441 | 1451 | 1460 | 1470 | 1479 | 1488 |
| 11             | 1312                                      | 1321 | 1330 | 1340 | 1349 | 1358 | 1367 | 1375 | 1385 | 1394 |
| 10             | 1228                                      | 1237 | 1245 | 1254 | 1262 | 1270 | 1279 | 1287 | 1296 | 1304 |
| 9              | 1148                                      | 1156 | 1163 | 1171 | 1179 | 1187 | 1195 | 1203 | 1211 | 1218 |
| 8              | 1073                                      | 1081 | 1088 | 1096 | 1103 | 1110 | 1117 | 1125 | 1133 | 1140 |
| 7              | 1002                                      | 1008 | 1016 | 1023 | 1030 | 1038 | 1045 | 1052 | 1059 | 1066 |
| 6              | 935                                       | 942  | 949  | 955  | 961  | 968  | 975  | 982  | 988  | 995  |
| 5              | 872                                       | 878  | 884  | 890  | 896  | 902  | 907  | 913  | 919  | 925  |
| 4              | 813                                       | 819  | 825  | 831  | 837  | 843  | 849  | 854  | 861  | 866  |
| 3              | 759                                       | 765  | 770  | 776  | 781  | 787  | 793  | 798  | 803  | 808  |
| 2              | 705                                       | 710  | 716  | 721  | 727  | 732  | 737  | 743  | 748  | 753  |
| 1              | 657                                       | 662  | 667  | 672  | 677  | 682  | 687  | 691  | 696  | 700  |
| 0              | 611                                       | 616  | 621  | 626  | 630  | 635  | 640  | 645  | 648  | 653  |
| - 0            | 611                                       | 605  | 600  | 595  | 592  | 587  | 582  | 577  | 572  | 567  |
| - 1            | 562                                       | 557  | 552  | 547  | 543  | 538  | 534  | 531  | 527  | 522  |
| - 2            | 517                                       | 514  | 509  | 505  | 501  | 496  | 492  | 489  | 484  | 480  |
| - 3            | 476                                       | 472  | 468  | 464  | 461  | 456  | 452  | 448  | 444  | 440  |
| - 4            | 437                                       | 433  | 430  | 426  | 423  | 419  | 415  | 412  | 408  | 405  |
| - 5            | 401                                       | 398  | 395  | 391  | 388  | 385  | 382  | 379  | 375  | 372  |
| - 6            | 368                                       | 365  | 362  | 359  | 356  | 353  | 350  | 347  | 343  | 340  |
| - 7            | 337                                       | 336  | 333  | 330  | 327  | 324  | 321  | 318  | 315  | 312  |
| - 8            | 310                                       | 306  | 304  | 301  | 298  | 296  | 294  | 291  | 288  | 286  |
| - 9            | 284                                       | 281  | 279  | 276  | 274  | 272  | 269  | 267  | 264  | 262  |
| - 10           | 260                                       | 258  | 255  | 253  | 251  | 249  | 246  | 244  | 242  | 239  |
| - 11           | 237                                       | 235  | 233  | 231  | 229  | 228  | 226  | 224  | 221  | 219  |
| - 12           | 217                                       | 215  | 213  | 211  | 209  | 208  | 206  | 204  | 202  | 200  |
| - 13           | 198                                       | 197  | 195  | 193  | 191  | 190  | 188  | 186  | 184  | 182  |
| - 14           | 181                                       | 180  | 178  | 177  | 175  | 173  | 172  | 170  | 168  | 167  |
| - 15           | 165                                       | 164  | 162  | 161  | 159  | 158  | 157  | 155  | 153  | 152  |
| - 16           | 150                                       | 149  | 148  | 146  | 145  | 144  | 142  | 141  | 139  | 138  |
| - 17           | 137                                       | 136  | 135  | 133  | 132  | 131  | 129  | 128  | 127  | 126  |
| - 18           | 125                                       | 124  | 123  | 122  | 121  | 120  | 118  | 117  | 116  | 115  |
| - 19           | 114                                       | 113  | 112  | 111  | 110  | 109  | 107  | 106  | 105  | 104  |
| - 20           | 103                                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

**Tab. 2-2 Wasserdampf-sättigungsdruck  $p_s$  bei Temperaturen  $\theta$  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 Wasserdampfdruck  $p(x)$  den Wasserdampf-sättigungsdruck  $p_s(x)$  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 |       |                     |
|--|------------|----------------------|----------------------|-------|-------|---------------------|
|  | $\theta$   | $\phi$               | $p$                  | $t$   |       |                     |
|  | °C         | %                    | Pa                   | $d$   | $h$   | $s$                 |
| <b>Tauperiode von Dezember bis Februar</b>   |            |                      |                      |       |       |                     |
| Innenklima   | 20         | 50                   | 1 168                | 90    | 2 160 | $7\,776 \cdot 10^3$ |
| Außenklima   | -5         | 80                   | 321                  |       |       |                     |
| <b>Verdunstungsperiode von Juni bis August<sup>a</sup></b>   |            |                      |                      |       |       |                     |
| 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                |       |       |                     |

<sup>a</sup> 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.

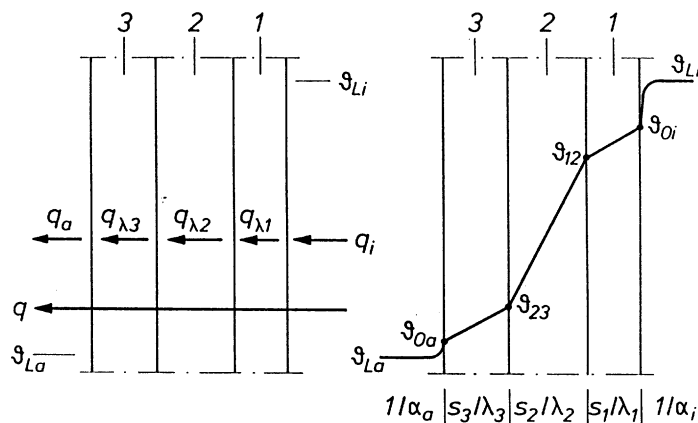
## 2.6 Verlauf des Dampfsättigungsdrucks $p_s$ über den Bauteilquerschnitt

Da  $p_s$  nur von der Temperatur  $\theta$  abhängt (Bild 2-2), kann der  $p_s$ -Verlauf über den Bauteilquerschnitt ermittelt werden, wenn der  $\theta$ -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  $\theta$  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

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

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

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

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

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

$$U \cdot (\theta_i - \theta_e) = h_i \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \quad (2-7)$$

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

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

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

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

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

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

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:

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

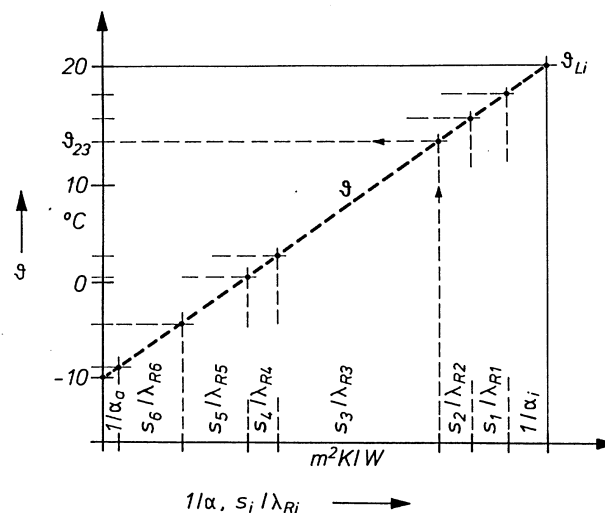
$$\theta_{12} = \theta_{si} - d_1 / \lambda_{R1} \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2-12)$$

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

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

### Übungskript 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  $\theta_i$  und  $\theta_e$  geradlinig zu verbinden. Die Schnittstellen mit den Widerständen bedeuteten die dortigen Temperaturen (Bild 2-4).



**Bild 2-4 Grafische Ermittlung des Temperaturverlaufs  $\theta$  über einen mehrschichtigen Bauteilquerschnitt**

## 2.6.2 Dampfsättigungsdruck

Bei bekannten Temperaturen  $\theta$  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  $\theta$  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:

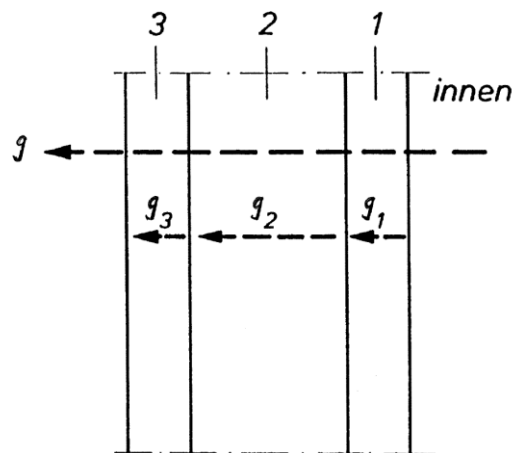
$$p_i = \phi_i \cdot p_{si}(\theta_i) \quad (\text{Pa})$$

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

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.:

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

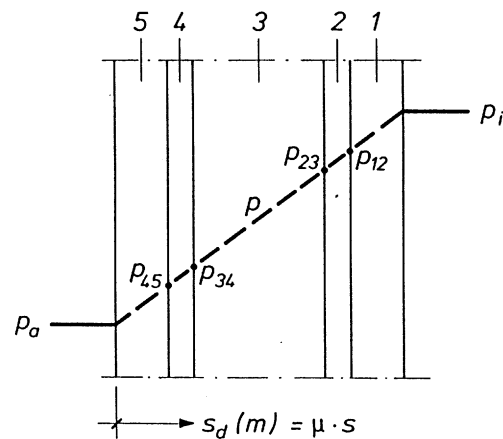
$$g = (p_i - p_e) / Z = (p_i - p_e) / (5 \cdot 10^9 \cdot \sum s_{di}) \quad (2-14)$$

$$g_1 = (p_i - p_{12}) / Z_1 = (p_i - p_{12}) / (5 \cdot 10^9 \cdot s_{d1}) \quad (2-15)$$

$$g_2 = (p_{12} - p_{23}) / Z_2 = (p_{12} - p_{23}) / (5 \cdot 10^9 \cdot s_{d2}), \text{ usw.} \quad (2-16)$$

Wie bei der Wärmestromdichte folgt auch hier: die Dampfdruckdifferenz  $\Delta p_i$  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!

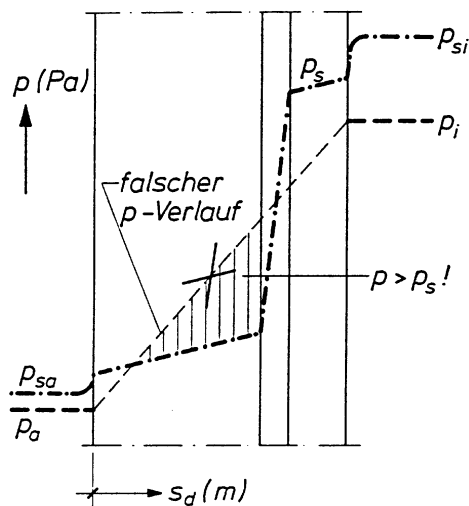




**Bild 2-6** Verlauf des vorhandenen Dampfdruck  $p$  über den Bauteilquerschnitt, solange überall  $p < p_s$  eingehalten wird (tauwasserfreier Querschnitt)

### 2.7.3 Verlauf des Dampfdruck $p$ bei Tauwasserbildung im Querschnitt

Der Verlauf von  $p_s$  wird wie in Abschn. „Verlauf d. Dampfsättigungsdrucks  $p_s$  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-



## 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<sub>c</sub> Tauwasserebene

index<sub>ev</sub> Bereich von der Tauwasserebene nach außen

$d$  Schichtdicke des Baustoffs in m

$\mu$  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

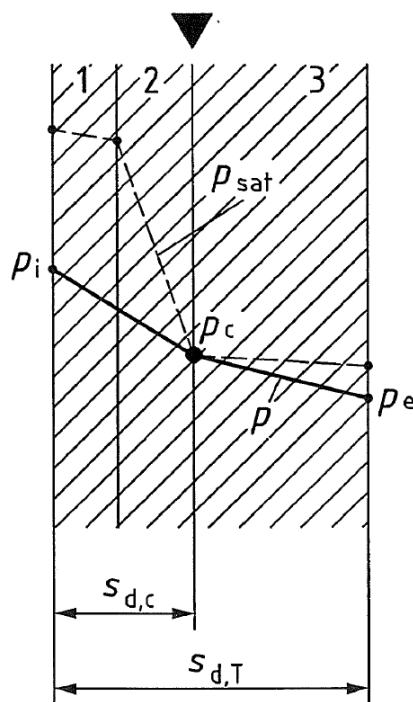
$M_c$  Tauwassermasse während der Tauperiode in  $\text{kg}/\text{m}^2$

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

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

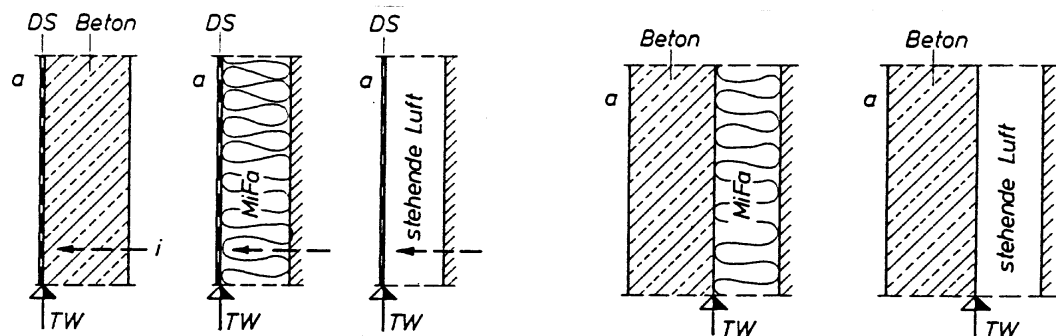
### 2.8.2 Zulässige Tauwassermasse

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:

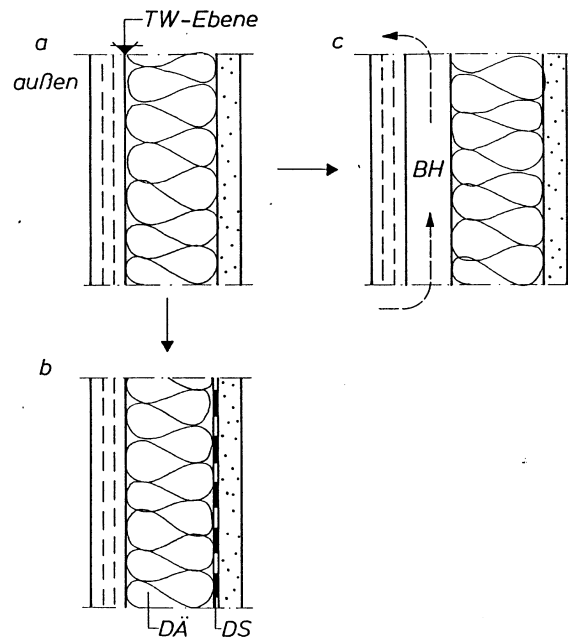
- 1)  $M_c = 0$  (völlige Tauwasserfreiheit), i.a. nicht erforderlich, kann zu unwirtschaftlichen Lösungen führen
- 2)  $M_c \leq M_{c, \text{zul}}$ .

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  $s_{d} \geq 1500$  m.

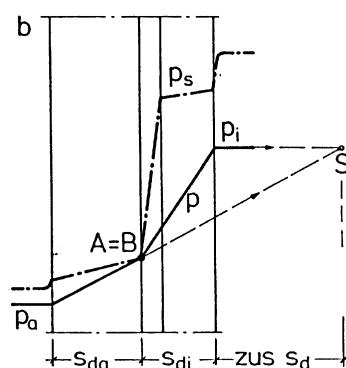
Die in der Praxis oft zu hörende Behauptung, wonach in den Außenbauteilen angeordnete Dampfsperren das Raumklima ungünstig beeinflussen (angeblich Erhöhung der relativen Raumluftfeuchte  $\phi_i$ ), ist sachlich nicht berechtigt.



**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.



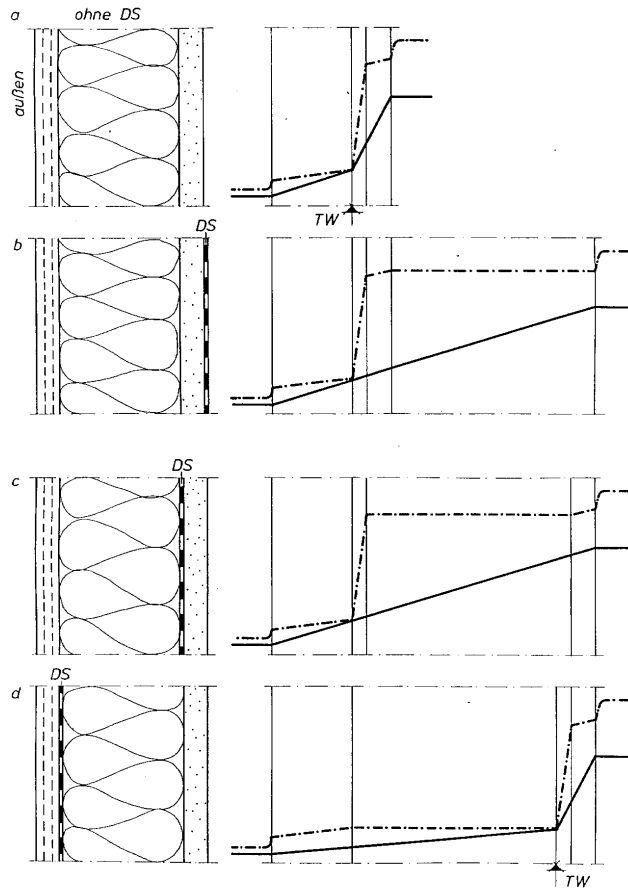
**Bild 2-12** Grafische Ermittlung von zus.  $s_d$  einer zusätzlichen Dampfsperre an der Innenseite für  $m_{w,T} = 0$  eines vorher gefährdeten Querschnitts; a bei vorher gekrümmtem, b bei vorher geknicktem Verlauf von  $p$

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:

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





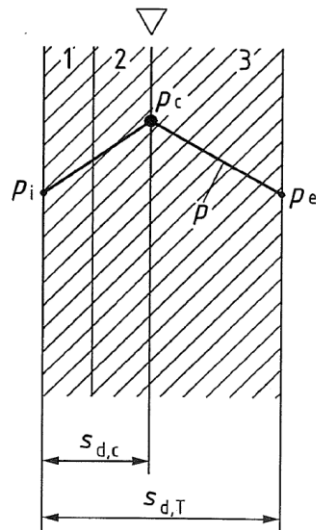
## 2.10 Verdunstungsmasse

### 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 <sup>2</sup> h) |

Feuchtebilanz im Raum:

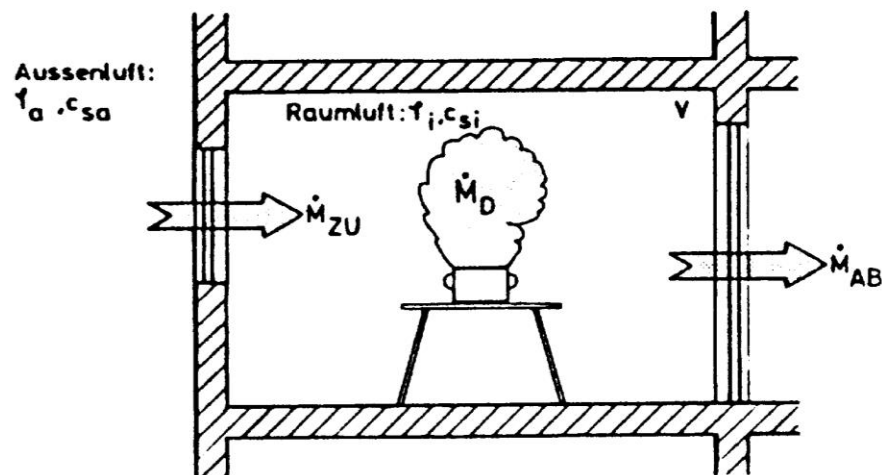


Bild 3-1 Schematische Darstellung der Feuchteströme in einem Raum

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 [m<sup>3</sup>]

$c_{a/i}$ : absolute Feuchte außen/innen [kg/m<sup>3</sup>]

damit gilt für die relative Feuchte im Raum:

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

|               |                                 |             |
|---------------|---------------------------------|-------------|
| $\varphi_i$ : | relative Feuchte im Rauminnenen | [-]         |
| $\varphi_a$ : | 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 Feuchteeintrag 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.

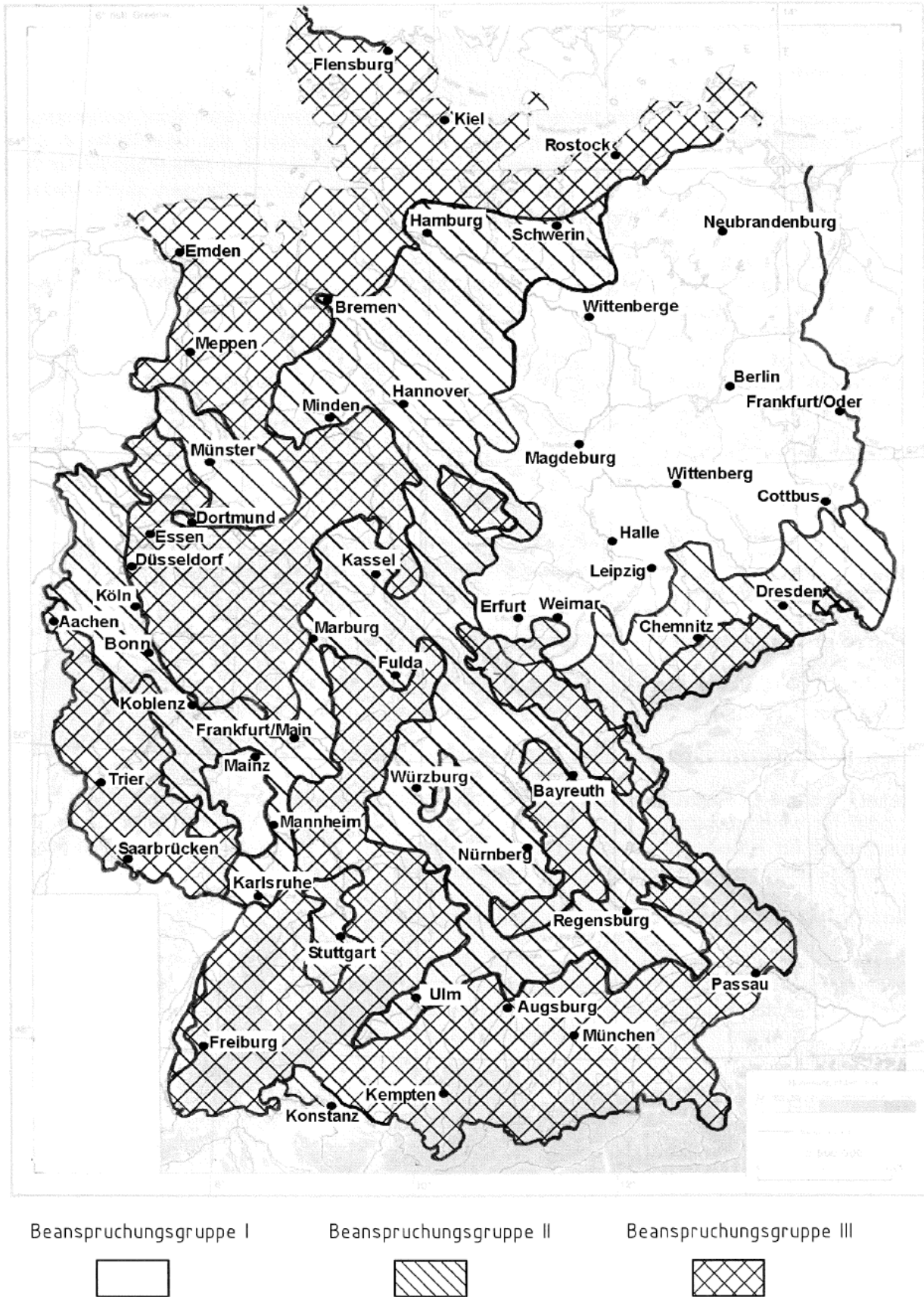
| Zeile  | Beanspruchungsgruppe I   | Beanspruchungsgruppe II   | Beanspruchungsgruppe III  |
|--|--|---|---|
|  | geringe Schlagregenbeanspruchung   | mittlere Schlagregenbeanspruchung                                       | starke Schlagregenbeanspruchung   |
| 1  | Außenputz ohne besondere Anforderungen an den Schlagregenschutz auf  | Wasserabweisender Außenputz nach Tabelle 4 auf                          |   |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Außenwänden aus Mauerwerk, Wandbauplatten, Beton u. ä.</li> <li>– sowie verputzten außenseitigen Wärmebrückendämmungen</li> </ul> |   |   |
| 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 <sup>a</sup>  |   |   |
| 6  | Wände mit Außendämmung durch ein Wärmedämmputzsystem oder durch ein bauaufsichtlich zugelassenes Wärmedämmverbundsystem  |   |   |
| 7  | Außenwände in Holzbauart mit Wetterschutz nach DIN 68800-2   |   |   |
| <sup>a</sup> 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