

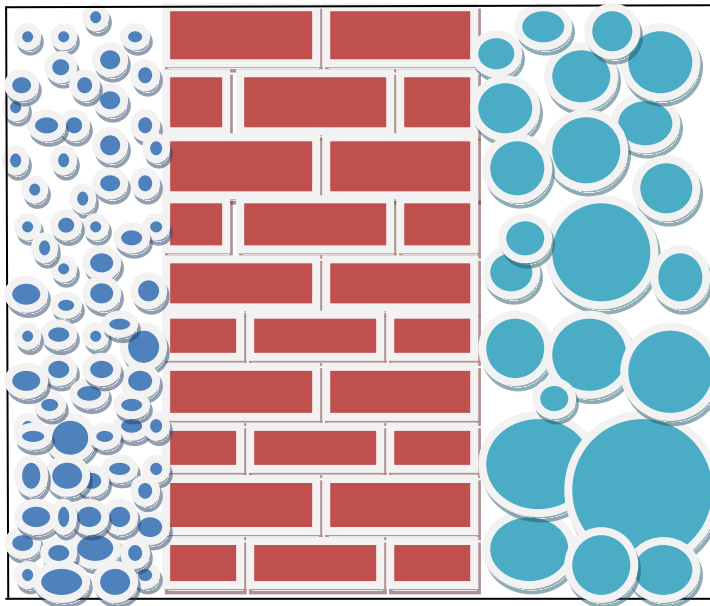
End-Fassung

Betrachtungen zur Dampfdiffusion in Baustoffen / Bauteilen

Das Mollier h,x-Diagramm - Darstellung der Luftzustandsgrößen -

Bildausschnitt:

Wasserdampfpartialdruck der Luft beidseits einer Mauer



links der Mauer ist ein höherer Partialdruck (kleine Blasen) dargestellt
als rechts (große Blasen) von der Mauer

Vorwort

Während der letzten 20 Jahre hat sich die Bauphysik zu einem bedeutenden Fachgebiet entwickelt. Die Baumethoden, die sich in der Zeit rasant geändert haben, hat diese Entwicklung notwendig gemacht.

Als Hauptgebiete der Bauphysik kann man nennen: den Wärmeschutz, den Schallschutz und den Feuchteschutz. Alle Gebiete betreffen die **Gebrauchsbeanspruchung** von Bauwerken.

Die nachfolgende Abhandlung beleuchtet und streift auf elementarer Stufe die physikalischen Grundlagen der **Dampfdiffusion** in Baustoffen und Bauteilen. Die schon bei der Konstruktion, Planung und Bauausführung auftretenden Probleme, die von der Feuchteaufnahme und Austrocknung von Bauteilen ausgehen können, sollen möglichst vermieden werden. Denkt man nur an die sich in letzter Zeit häufenden Meldungen über „Schimmelbildung in Räumen“.

Diese Abhandlung soll dem Praktiker den Zugang zu diesem immer bedeutender werdenden Fachgebiet der Bauphysik erleichtern. Dem Praktiker soll damit die Erfassung, Bewertung und die Beurteilung bei aufgetretenen Schäden an Bauteilen bzw. Baustoffen erleichtert werden.

Nur wenn ausreichend Kenntnisse auf dem Fachgebiet „Feuchteschutz“ vorhanden sind, kann im Schadensfall die Ermittlung der Ursachen zutreffend gelingen.

In dieser Betrachtung soll die Frage geklärt und erläutert werden, welche Parameter für die Feuchtigkeitsaufnahme bzw. Feuchtigkeitsabgabe und für die Wasserdampfdiffusion bei Baustoffen wie zum Beispiel Beton, Estrich, Ziegelstein, Kalkputz u.s.w. und Bauteilen aus den Baustoffen maßgebend sind. Ist es die Temperatur (Lufttemperatur), die relative Luftfeuchtigkeit, der absolute Feuchtegehalt der Luft oder der Partialdruck (Wasserdampf-Teildruck)?

Der Begriff >Feuchtigkeit< bezieht sich bei dieser Betrachtung nicht auf den Zustand >Wasser<, sondern auf Wasserdampf, d.h. Wasser in gasförmigem Zustand.

1) Kapillarität

Verschiedene Baustoffe wie zum Beispiel Gips (G), Kalksandstein (KS), Mauerziegel (MZ), Beton (BT) und Bims (BI) haben ein unterschiedliches Kapillarverhalten, d.h. diese Baustoffe nehmen, bei gleichen Randbedingungen unterschiedliche Mengen an Feuchtigkeit auf – auch in Form von Wasser zum Beispiel bei der Herstellung von Beton. Hierbei ist die chemisch gebundene Wassermenge geringer als diejenige, die aus dem fertigen Bauteil (Baustoff) bei einer Austrocknung wieder ausdiffundieren wird.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind einige Werte des Wassergehalts von Baustoffen aufgeführt und gegenübergestellt.

Tabelle 1:

Gleichgewichtsfeuchte in Baustoffen bei einer Temperatur von 10 °C und einer relativen Feuchtigkeit (r.F.) von 50%

Baustoff (mit einer bestimmten Dichte)	Wassergehalt [Gewichts- %]
Mauerziegel $\rho = 1,4 \text{ kg/dm}^3$	0,15
Kalkputz	0,50
Beton $\rho = 2,3 \text{ kg/dm}^3$	1,10
Naturbimsbeton $\rho = 0,7 \text{ kg/dm}^3$	2,10
Kalksandstein $\rho = 1,4 \text{ kg/dm}^3$	3,45
Kalkzementmörtel	2,80

Quelle: RWE Bau-Handbuch, Technischer Ausbau; 10. Ausgabe

Kapillarität beruht auf dem Zusammenwirken von Kohäsion, Adhäsion sowie der Schwerkraft. Je poröser ein Baustoff ist und je feiner die Poren sind, desto größer ist die Kapillarität.

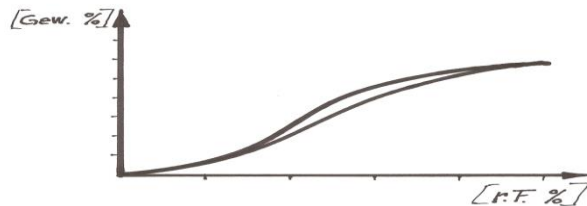
2) Adsorption und Desorption

Das genaue Verhalten eines Baustoffes, d.h. welche Feuchtigkeitsmenge der Baustoff / das Bauteil aufnehmen oder abgeben kann, ersieht man aus einer Adsorptions- bzw. Desorptionskurve wie sie beispielsweise in Abbildung 1. dargestellt ist. Manchmal wird in der Fachliteratur auch von Sorptionsisothermen gesprochen.

Diese Kurven sind baustoffspezifisch. Für jeden Baustoff ergeben sich andere Werte.

Charakteristisch ist die sogenannte >Hysteresis<, da bei der Feuchtaufnahme (Adsorption) und bei der Feuchteabgabe (Desorption), unter gleichen Bedingungen einer bestimmten Raumtemperatur und relativen Feuchte (r.F. %) der Umgebungsluft, sich doch, wenn auch marginale, Unterschiede der Feuchtigkeitsmengen im Baustoff (Gewichts-%) einstellen.

Abbildung 1



Die Kurven, wie in Abbildung 1 gezeigt, werden in Abhängigkeit der Parameter relative Luftfeuchtigkeit [%] der Umgebungsluft in dem der Baustoff lagert und dem Gewicht der vom Baustoff aufgenommenen Feuchtigkeit in Relation zum Gewicht des Baustoffs [in %] aufgezeichnet.

Jeder Kurvenpunkt bezeichnet die Ausgleichsfeuchte (Gleichgewichtsfeuchte) welche sich im Baustoff bei konstanter relativer Luftfeuchte (r.F. in %) der Umgebungsluft einstellt.

Nach diesem Zusammenhang sieht es zunächst so aus, wie wenn die Aufnahme oder Abgabe von Feuchtigkeit eines Baustoffes direkt von der relativen Luftfeuchtigkeit, in der so ein Bauteil / Baustoff (bis zur Ausgleichsfeuchte) lagert, abhängig ist.

3) Partialdruck

Nach dem *Dalton'schen* Gesetz ist der Gesamtdruck eines Gasgemisches gleich der Summe (aller Teildrucke/Partialdrucke) der einzelnen Gasgemischanteile.

Partialdruck bezeichnet nachfolgend den Wasserdampfdruck.

Die Luft ist in dieser Betrachtung so ein „*Gasgemisch*“ und besteht bekanntlich zu wesentlichen Anteilen aus Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlensäure. Luft nimmt immer auch eine bestimmte Menge Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf auf. Das Verhältnis der tatsächlichen Feuchtigkeitsmenge welche die Luft aufgenommen hat zur maximal möglichen Feuchtigkeitsmenge, welche die Luft bis zur Sättigung der Luft aufnehmen kann, wird als φ = „relative Feuchte“ (r.F. in %) bezeichnet und es gilt die Beziehung:

$$(1) \quad \varphi = x/x_s = p_D/p_s \quad [\text{als Dezimalzahl}]$$

$$(1.1) \quad \varphi = x/x_s \times 100 \quad [\%]$$

Darin bedeuten: x = Wasserdampfgehalt / trockener Luft [g/kg]

x_s = Wasserdampfgehalt / trockener Luft [g/kg] bei Sättigung (100%)

p_D = Dampfdruck [hPa] (Partialdruck) oder in [mbar]

p_s = Dampfdruck [hPa] bei Sättigung (100%) oder in [mbar]

Aus der Formel (1) geht die Beziehung **Partialdrucks** p_D und **Dampfdruck** p_s bei Sättigung in Abhängigkeit zur **relativen Luftfeuchtigkeit** φ [r.F. in %] hervor.

4) Analogie zum Wärmefluss

A) Wärmedurchgang / Wärmestromdichte

J.S. Cammerer und *O.Kirscher* haben schon vor vielen Jahren wissenschaftliche Untersuchungen der Feuchtigkeitsbewegung (Dampfdiffusion) in feuchten, porösen Bauteilen / Baustoffen untersucht und festgestellt, bei Vorhandensein eines Dampfdruckgefälles und eines Temperaturgefälles bewegt sich die Feuchtigkeit im Inneren eines Bauteils oder Dämmstoffes.

Das dazu passende Berechnungsmodell hat schon *O.Kirscher* aufgezeigt.

Cammerer und seine Mitarbeiter haben ebenfalls ein Berechnungsverfahren entwickelt, wo die Gleichung für den Wasser-Dampfdurchgang durch ein Bauteil formal den Grundgleichungen für den Wärmestrom durch ein Mauerwerk angepasst wurde.

Zunächst wird hier der Wärmedurchlaßwiderstand $1/\Lambda$ durch ein Mauerwerk betrachtet. Dieser errechnet sich nach folgender Beziehung:

$$(2) \quad 1/\Lambda = s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + s_3/\lambda_3 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}] \quad (\text{z.B. bei 3 Mauerschichten})$$

Quelle Formel (2): Praktische Bauphysik, G. Lohmeyer, B.G. Teubner Stuttgart, Seite 111, Formel (111.1)

Danach berechnet man den Wärmedurchgangskoeffizient k nach folgender Formel (3), in der der oben berechnete Wert für $1/\Lambda$ (z.B. für eine Wand mit 3 Schichten) eingesetzt wird. Somit folgt für k :

$$(3) \quad k = \frac{1}{1/\alpha_i + 1/\Lambda + 1/\alpha_a} \quad [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

In Formel (2) und (3) bedeuten:

α_i = der Wärmeübergangskoeffizient an der Innenseite der Wand [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

α_a = der Wärmeübergangskoeffizient an der Außenseite der Wand [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

s_1 bis s_3 die 3 Schichten der Wand [m]

λ_1 bis λ_3 die Wärmeleitfähigkeit jeder Schicht der Wand [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]

Quelle Formel (3): Praktische Bauphysik, G. Lohmeyer, B.G. Teubner Stuttgart, Seite 113

Die in dieser Betrachtung wichtige **Wärmestromdichte q** , die durch einen Quadratmeter der Mauer, in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = (\vartheta_i - \vartheta_a)$ zwischen der Innen- und Außenseite, abfließt lässt sich nun einfach bestimmen.

Es gilt:

$$(4) \quad q = \frac{(\vartheta_i - \vartheta_a)}{1/k} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad \text{oder} \quad k \times \Delta\vartheta \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (1 \text{ W} = 0,860 \text{ kcal})$$

Darin bedeuten: k = der Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

$\Delta\vartheta = (\vartheta_i - \vartheta_a)$ die Temperaturdifferenz zwischen Außenseite und Innenseite der Wand [$^\circ\text{K}$]

Quelle Formel (4): Praktische Bauphysik, G. Lohmeyer, B.G. Teubner Stuttgart, Seite 47

Die Erkenntnis aus dem zuvor beschrieben Inhalt zum „Wärmedurchgang / Wärmestromdichte“ ist einfach.

Der Wärmestrom in einem Baustoff / Bauteil folgt stets dem Temperaturgefälle – vom höheren zum niedrigen Temperaturniveau.

B) Wasserdampfdiffusion

Für den Wasserdampfdurchgang durch eine Wand – z.B. mit 3 Schichten – hat, wie schon ausgeführt, *J.S. Cammerer* in Analogie zum Wärmedurchgang schon früher folgende Gleichung aufgestellt:

$$(5) \quad m_w = \frac{p_i - p_a}{1/\beta_i + s_1/\delta_1 + s_2/\delta_2 + s_3/\delta_3 + 1/\beta_a} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}]$$

Darin bedeuten: p_i = Dampfdruck der Luft auf der (warmen) Innenseite der Mauer [kg/m²]
 p_a = Dampfdruck der Luft auf der (kalten) Außenseite der Mauer [kg/m²]
 β_i = Wasserdampfübergangszahl auf der Innenseite der Mauer [1/h]
 β_a = Wasserdampfübergangszahl auf der Außenseite der Mauer [1/h]
 s_1 bis s_3 = Dicken der einzelnen Mauerschichten [m]
 δ_1 bis δ_3 = Dampfleitzahl der einzelnen Mauerschichten [m/h]

Quelle Formel (5): Handbuch der Isoliertechnik, Band 1, VEB Fachbuchverlag, Seite 123, Formel (160)

Die Übergangswiderstände β_i und β_a sind bei der Dampfdiffusion vernachlässigbar klein.

Will man die **Wasserdampf-Diffusionsstromdichte i** , die durch die Mauer analog Formel (4), der Wärmestromdichte ausdrücken, so gelangt man zu folgender Beziehung:

Diffusionsstromdichte	Wärmestromdichte zum Vergleich
$(6) \quad i = \frac{p_i - p_a}{1/\Delta} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}]$	$(4) \quad q = \frac{(\vartheta_i - \vartheta_a)}{1/k} \quad [\text{W/m}^2]$

Darin bedeuten: p_i = Dampfdruck der Luft auf der Innenseite der Mauer [Pa]
 p_a = Dampfdruck der Luft auf der Außenseite der Mauer [Pa]

$1/\Delta$ = Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand [m²·h·Pa/kg]

berechnet wird dieser mit $1/\Delta = N \cdot \mu \cdot s$

N = ist hierbei ein Beiwert und kann im Temperaturbereich zwischen -20°C und +30°C mit $\approx 1,5 \cdot 10^6$ ausreichend genau, eingesetzt werden. Es ist darin:

μ = Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl [-]

s = Schichtdicke [m]

Für mehrere Baustoffschichten (im Beispiel 3 Schichten) gilt:

$$1/\Delta = 1,5 \cdot 10^6 (\mu_1 \cdot s_1 + \mu_2 \cdot s_2 + \mu_3 \cdot s_3) \quad [\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa} / \text{kg}]$$

Quelle Formel (6): Praktische Bauphysik, *G. Lohmeyer*, B.G. Teubner Stuttgart, Seite 188/189

Die Diffusions-Widerstandszahl μ [ohne Dimension] eines Baustoffs gibt an, wieviel mal höher dessen Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion ist als der einer Luftschicht. Der Diffusions-Widerstand einer **ein Meter** dicken Luftschicht wird $\mu = 1$ gesetzt.

Die Erkenntnis aus dem zuvor beschriebenen Inhalt zur „Wasserdampfdiffusion“ ist einfach.

Der Wasserdampfstrom folgt stets dem (Partial-)Druckgefälle – vom höheren zum niedrigen (Partial-)Druck.

5) Austrocknung in Klimakammer

Die zuvor beschriebenen Vorgänge und mathematischen Beziehungen für die Bewegung der Feuchtigkeit (Dampfdiffusion) in einem Bauteil, lassen nunmehr den Rückschluss zu, dass für die Feuchtigkeitsaufnahme bzw. –abgabe sowohl der Partialdruck vor und hinter dem Bauteil, wohl auch der absolute Feuchtegehalt, maßgebend ist.

Ein Gedankenexperiment soll dies näher erleutern:

- a) In einer **Klimakammer 1** wird ein Luftzustand eingestellt mit $\vartheta = 15\text{ °C}$ und eine r.F. = 50%. Daraus ergibt sich ein Wasserdampfteildruck p_D von 8,25 hPa gleichzeitig ergibt sich aus diesem Luftzustand in der Klimakammer der Wasserdampfgehalt von $x_D = 5,3\text{ g/kg}$.
- b) In einer weiteren **Klimakammer 2** wird ein Luftzustand eingestellt mit $\vartheta = 30\text{ °C}$ und r.F. = 20%. Daraus ergibt sich ein Wasserdampfteildruck p_D von 8,2 hPa und gleichzeitig ein Wasserdampfgehalt von $x_D = 5,25\text{ g/kg}$.

Der Unterschied in beiden Klimakammern, sowohl beim Wasserdampfteildruck p_D als auch beim Wasserdampfgehalt x_D ist marginal. Würde ein ausgebrochenes Stück z.B. aus einer Tragschicht aus Estrichmörtel, bis zur Erreichung der Gleichgewichtsfeuchte (Ausgleichsfeuchte) zunächst in der Klimakammer 1 und anschließend in Klimakammer 2 gelagert, so würde dieses Estrichstück fast keine „Austrocknung“ erfahren, obwohl in der 2. Klimakammer ein scheinbar „trockneres Klima“ mit einer um 15 °C höheren Temperatur und einer „trockeneren“ Luft (nur 20% r.F.) eingestellt ist.

Der „Austrocknungsvorgang würde sehr,sehr lange dauern .

Die Werte für einen Wasserdampfdruck (Partialdruck) p_D [hPa] oder für einen Wasserdampfgehalt x_D [g/kg] jeglicher Luftzustände, lassen sich auf einfache Weise aus dem im **Anhang 2** beigefügten Diagramm, dem **Mollier-h,x-Diagramm** entnehmen. In älterer Fachliteratur wird der Partialdruck p_D auch in Torr angegeben.

Wenn man über eine Tabelle verfügt, in der der Wasserdampfdruck p_s in Abhängigkeit von der Temperatur aufgeführt ist, lässt sich der Wasserdampf-Partialdruck p_D berechnen nach

$$(7) \quad p_D = \varphi \times p_s$$

für die relative Luftfeuchte φ ist das Verhältnis x/x_s nach Formel (1) und als Dezimalbruch einzusetzen.

6) Resümee

Für die Feuchtigkeitsmenge (Feuchtigkeitswanderung), die durch einen Baustoff / Bauteil strömt, ist **nur die (Partial-)Druckdifferenz** maßgebend.

[Feuchtigkeitsmenge ist gleich Wasserdampfmenge ist gleich Wasser in Gasform]

Weil bei der Luft der Partial-Dampfdruck p_D physikalisch mit dem Wassergehalt, der von der Luft bei einer bestimmten Temperatur aufgenommen werden kann, verbunden ist, gilt diese Prämisse auch für den Wasserdampfgehalt x in g pro kg trockene Luft angegeben

Die Strömungsrichtung der Wasserdampfmenge (der Feuchte) wird dadurch bestimmt, dass der „Feuchtefluss“ immer vom höheren zum niedrigen Druckniveau erfolgt.

Wasserdampf folgt stets dem Dampfdruckgefälle.

Analog dazu fließt auch der Wärmestrom, wie zuvor schon erwähnt, z.B. durch eine Wand, immer in Richtung vom hohen zum niedrigen Temperaturniveau.

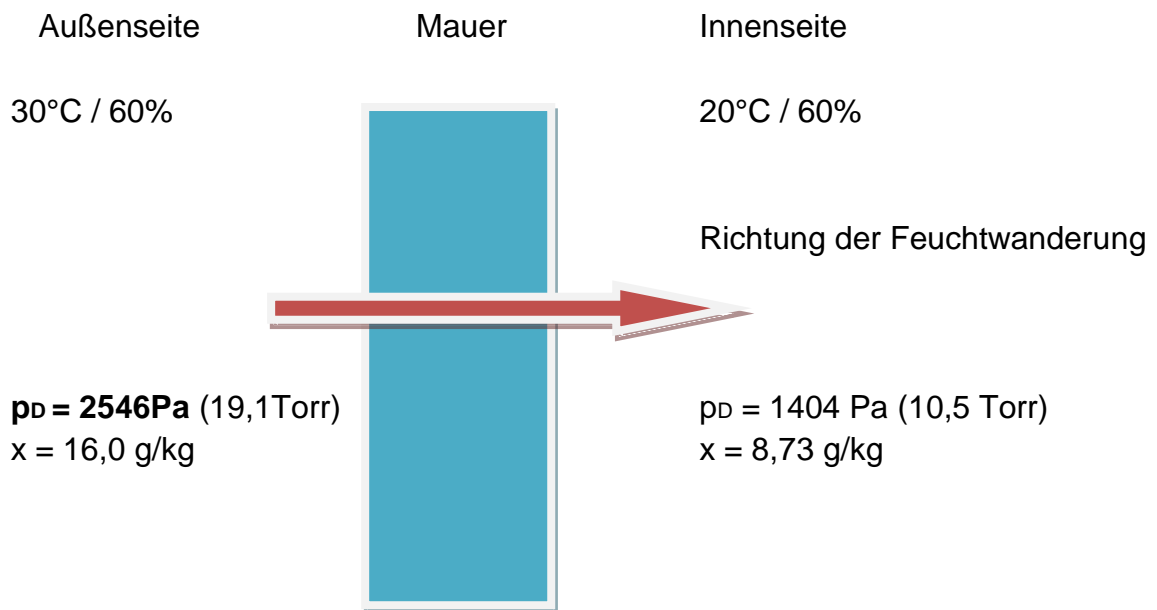
Siehe nachfolgend Anhang 1 bis Anhang 5

Anhang 1: Diffusionsstrom in einer Mauer

3 Beispiele zeigen die Wasserdampfbewegung (den Diffusionsstrom) in einer Mauer bei unterschiedlichen Luftzuständen (Temperatur / rel. Feuchtigkeit) auf der Innen- und Außenseite der Mauer

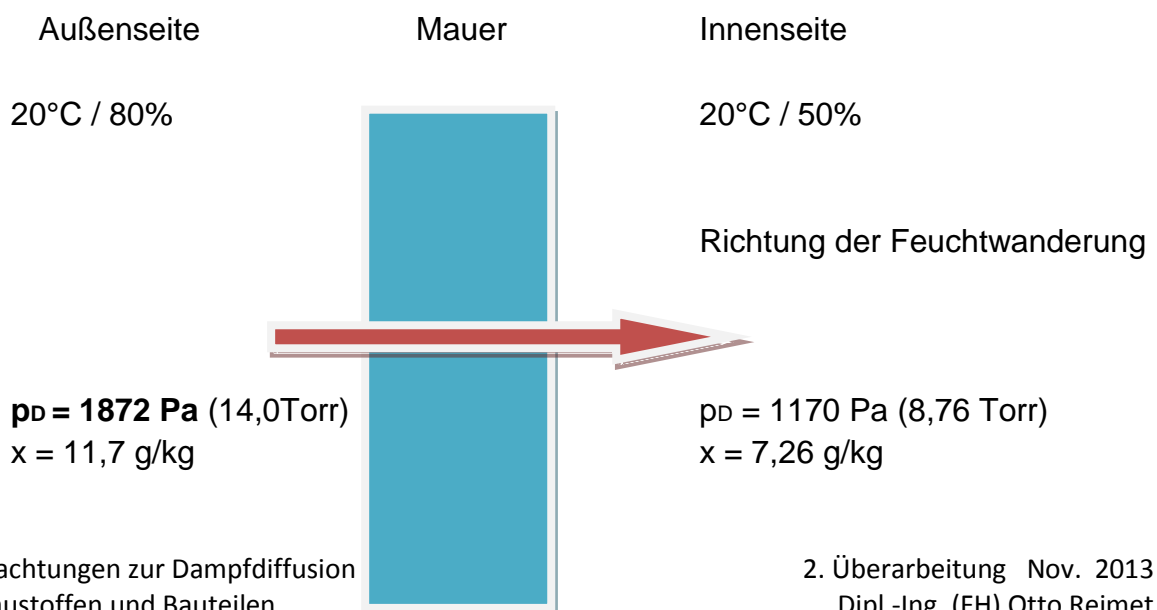
Beispiel 1.

Gleiche r.F. von 60% an der Innen- und Außenseite der Mauer



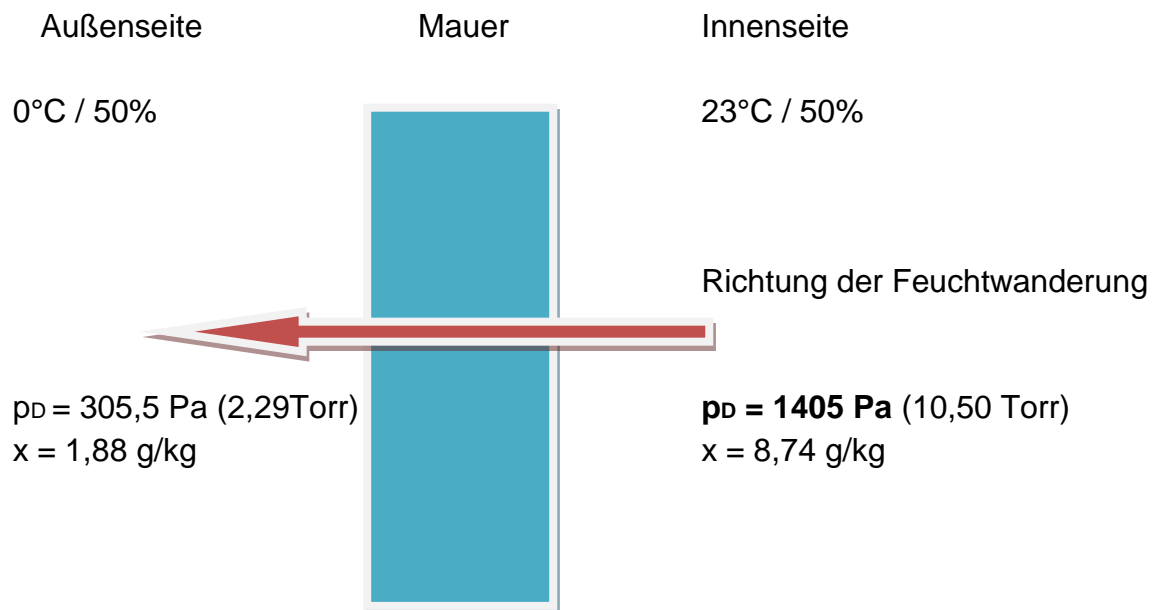
Beispiel 2

Gleiche Temperatur von 20°C an der Innen- und Außenseite der Mauer



Beispiel 3

Gleiche r.F. von 50 % an der Innen- und Außenseite der Mauer, jedoch niedrige Temperatur an der Außenseite der Mauer



Anmerkung:

Die Werte für den Wasserdampf-sättigungsdruck p_s in [Pa] (in Pascal) wurden der Tafel 177.1, aus dem Fachbuch „Praktische Bauphysik“; Teubner Verlag Stuttgart, entnommen und daraus der Partialdruck p_D nach der Formel (1) bzw. (1.1) berechnet.

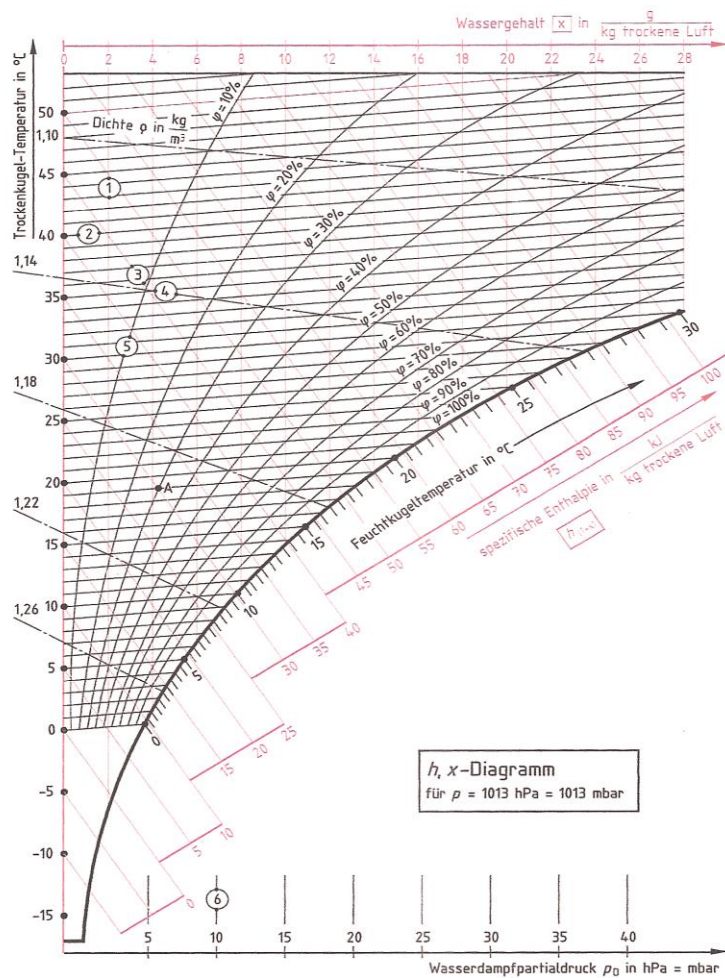
Die drei Beispiele zeigen anschaulich (Pfeile) folgendes:

Wenn die Wasserdampf-teildrücke p_D verschieden sind, so ist Wasserdampf bestrebt, von Orten höheren Druckes zu solchen geringeren Druckes zu strömen, also in Richtung eines Dampfdruckgefälles.

Dies kann entweder im Temperaturgleichgewicht (s. Beispiel 2) oder bei einem Temperaturgefälle stattfindet, grundsätzlich immer bei einem Unterschied des Partialdruckes p_D . Im Fall Beispiel 3 (mit dem Temperaturunterschied von 23°C) wird durch die Wasserdampfdiffusion auch Wärme nach außen übertragen.

Anhang 2: *h,x-Diagramm von Mollier*

Es dient zur Erleichterung von Berechnungen und zur übersichtlichen Darstellung der Luftzustandsgrößen



Für eine exakte Maßstäblichkeit dieses Diagrammes wird keine Gewähr übernommen. Genaue h, x -Diagramme sind klimatechnischen Handbüchern oder den Firmenunterlagen der Hersteller klimatechnischer Gerätschaften bzw. Anlagen zu entnehmen.

Anhang 3: Tauwasserbildung

Infolgen der Feuchtigkeit im Mauerwerk kann es zur Tauwasserbildung kommen wenn ein entsprechender Temperaturverlauf im Mauerwerk herrscht.

Die Bildung von Tauwasser ist ein Kondensationsvorgang. Dabei geht der Wasserdampf (gasförmig) in den flüssigen Zustand über. Der Vorgang kann auch im Inneren von Bauteilen erfolgen.

Von Glaser wurde ein graphisches Verfahren entwickelt, mit dem man den Verlauf des Wasserdampfsättigungsdruckes z.B. für ein mehrschichtiges Bauteil wie eine Mauer darstellen kann. Damit läßt sich eine mögliche Tauwasserbildung und der Tauwasser-ausfall im Inneren der Mauer bestimmen.

Anhang 4: Druck-Einheiten

Die Angaben der Druck-Einheiten erfolgen in der Fachliteratur oft in unterschiedlichen Maßeinheiten. Vor allem in älteren Ausgaben werden noch Angaben in Torr verwendet.

Es bestehen folgende Beziehungen zwischen den Drucken:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-5} \text{ bar} = 7,5 \times 10^{-3} \text{ Torr} = 1,02 \times 10^{-5} \text{ kp/cm}^2 (= 1 \text{ at}),$$

$$1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 100 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ torr} = 133 \text{ Pa} = 1,335 \times 10^{-3} \text{ bar}$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2$$

Anhang 5: Quellenangaben

Quellen-Literatur:

Praktische Bauphysik, Einführung mit Berechnungsbeispielen, *G. Lohmeyer*, Teubner Verlag Stuttgart
RWE Bau-Handbuch, Technischer Ausbau; 10. Ausgabe
Handbuch der Isoliertechnik Band 1, *Herbert Zeltner*, VEB Fachbuchverlag Leipzig

Literatur zur Vertiefung der Thematik:

Recknagel-Sprenger „Taschenbuch Heizung- und Klimatechnik, R.Oldenburger Verlag, 57. Auflage
VDI-Arbeitsmappe „Heizung-Lüftung-Klimatechnik
Bauphysik, *Walter Bläsi*, EUROPA-Lehrmittel
Technische Bauphysik, Wärmelehre, *Horst Herr*, Band 3, EUROPA-Lehrmittel
Lehrbuch der Klimatechnik Band 1 „Grundlage“, Arbeitskreis der Dozenten, C.F.Müller Verlag
Kältetechnik; *Bäckström Emblick*, G. Braun Verlag
Heiz- und Klimatechnik. 15. Auflage; Rietschel / Reiß, Springer-Verlag