Mit Genehmigung des Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Vereins (SIA) erscheinen in dieser Publikation verschiedene Auszüge aus SIA-Normen und SIA-Dokumentationen. Für die Anwendung in der Praxis wird die Kenntnis der gesamten Norm resp. Dokumentation vorausgesetzt.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Bachmann, Hugo
Hochbau für Ingenieure : eine Einführung / Hugo Bachmann. –
2., überarb. Aufl. – Zürich : vdf, Hochsch.-Verl. ; Stuttgart : Teubner, 1997
ISBN 3-519-15041-7 (Teubner) brosch.
ISBN 3-7281-2166-5 (vdf, Hochsch.-Verl.) brosch.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsschutzgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

2., überarbeitete Auflage 1997

© 1994 vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich
und B. G. Teubner Verlag, Stuttgart

ISBN 3 7281 2166 5 (vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich)
ISBN 3 519 15041 7 (B. G. Teubner, Stuttgart)

Der vdf auf Internet: http://vdf.ethz.ch

2.2 Feuchtigkeitsschutz

(Literatur: [el 29] [Gös] [Kel] [SIA 180] [SIA 381/1] [SIA D 078] [Zim])

Problemstellung
Es sind Massnahmen erforderlich zur Verringerung ungünstiger Wirkungen des Wassers wie:
- Schimmelpilzbildung, Fäulnis
- Frostabsprengungen
- Korrosion
- Undichtigkeiten infolge Schwinden des Betons (Risse) und Quellen des Holzes.

Zielsetzung dieses Abschnittes
- Verständnis der Zusammenhänge bezüglich Kondensationsgefahr;
- Prüfung auf Kondensation und Schimmelpilzgefahr an Oberflächen;
- Prüfung auf Kondensation im Bauteilinnern, Anordnung einer Dampfsperre oder Dampfbremse.

2.2.1 Wasser und Wasserdampf

Feuchtigkeit entsteht durch Ausbreitung von Wasser. Wasser hat drei Aggregatszustände:
- flüssig
- gasförmig als Wasserdampf
- fest als Eis (+ 9 Volumen %).

Wasser kommt in Baustoffen vor als:
- Kristallwasser (physikalisch gebunden)
- Kapillarwasser in feinsten Röhrchen
- freies Wasser in Poren
- Wasserdampf in Poren.

Wasser bewirkt in Baustoffen:
- Verschlechterung der Wärmeisolation durch erhöhten Wärmetransport ($\lambda_{Wasser} \approx 25 \times \lambda_{Luft}$)
- Veränderung der mechanischen Eigenschaften
- Schwinden und Quellen
- Kapillarwirkung (Saugwirkung)

Wasser wird in Baustoffen transportiert durch treibende Wirkungen:
- Wasserdampfdruckdifferenz (Dampfdruckgradient)
- andere Druckdifferenzen (z.B. infolge Winddruck)
- Temperaturdifferenz (Temperaturgradient)
- Wassergehaltsdifferenz (Stoffeuchtegradient).

Wasserdampf in der Raumluft ist von grosser baupraktischer Bedeutung. Luft enthält immer eine gewisse Menge Feuchtigkeit, d.h. die *Wasserdampfmenge*.

Wasserdampf bewirkt einen Gasdruck, den sogenannten *Wasserdampfdruck* (durch Stösse der mit hoher Geschwindigkeit herumfliegenden Wassermoleküle). Der Wasserdampfdruck ist ein Teildruck (etwa 0.5 bis 2%) des Barometerdrucks.

Die Wasserdampfmenge und der Wasserdampfdruck in der Luft sind in Abhängigkeit von der Temperatur nach oben begrenzt durch die Sättigungswerte. Wasserdampfmenge und Wasserdampfdruck, die die Sättigungswerte überschreiten, sind nicht möglich. Beim Erreichen dieser Werte erfolgt eine Wasserausscheidung oder Kondensation.

Definitionen

Wasserdampfmenge ρ *(g Wasser/m³ Luft)*
wird auch als absolute Luftfeuchtigkeit bezeichnet

Wasserdampf-Sättigungsmenge ρ_s *(g Wasser/m³ Luft)*
maximal mögliche Wasserdampfmenge in der Luft; abhängig von der Lufttemperatur (Beiblatt 2.16)

Wasserdampfdruck p ($Pa = 10^{-6}\ N/mm^2$)
Gasdruck infolge Wasserdampf in der Luft

Wasserdampf-Sättigungsdruck p_s ($Pa = 10^{-6}\ N/mm^2$)
maximal möglicher Wasserdampfdruck in der Luft; abhängig von der Lufttemperatur (Beiblatt 2.16)

Relative Luftfeuchtigkeit φ *(%)*
Die relative Luftfeuchtigkeit lässt sich aus dem vorhandenen Wasserdampfdruck und dem Sättigungsdruck bestimmen. Analog lässt sich die relative Luftfeuchtigkeit auch aufgrund der Wasserdampfmenge bestimmen:

$$\varphi = \frac{p}{p_s} \cdot 100\,\% \approx \frac{\rho}{\rho_s} \cdot 100\,\%$$

— S. 77

Die Sättigungskurven von Wasserdampfdruck und Wasserdampfmenge stimmen nicht genau überein. Die Abweichung ist jedoch ohne praktische Bedeutung.

Taupunkttemperatur ϑ_T *(°C)*
Die Taupunkttemperatur ist die tiefste Temperatur, die eine gegebene Luftmasse ohne Wasserausscheidung (Nebel, Tau) oder eine Oberfläche ohne Kondensation (Tauwasser) annehmen kann. Damit ist sie diejenige Temperatur, deren Sättigungsdampfdruck dem vorhandenen Dampfdruck entspricht. Bei Abkühlung der Luft unter den Taupunkt wird also Wasser ausgeschieden.

Beispiel für die Bestimmung des Taupunktes bei gegebener Temperatur und relativer Feuchtigkeit der Raumluft gemäss Beiblatt 2.16: $\vartheta = 20°$ C, $\varphi = 50\% \rightarrow \vartheta_T = 9.3°$ C.

2.2.2 Kondensation und Schimmelpilzgefahr an Oberflächen

Kondensation

Kondensation des Wasserdampfes an raumseitigen Oberflächen erfolgt, *wenn die Oberflächentemperatur kleiner ist als die Taupunkttemperatur der Raumluft.*

Gemäss Normanforderungen muss der k-Wert von Bauteilen der Gebäudehülle (und auch der Wärmedurchgang bei Wärmebrücken) so klein sein, dass bei der Aussentemperatur ϑ_{min} keine Kondensation auftritt. Dabei ist ϑ_{min} die für die Baukonstruktion massgebende Temperatur im Winter gemäss [SIA 180] Anhang 1, d.h. das Temperatur-Tagesmittel, das statistisch einmal in 20 Jahren an drei aufeinanderfolgenden Tagen unterschritten wird (z.B. Zürich −14 °C, St. Moritz -20°C, Unterschied allgemein ca. 0.5°C pro 100 m Meereshöhe).

Damit Kondensation an Oberflächen im Nachweis ausgeschlossen werden kann, muss also gelten:

$$\vartheta_{oi} \geq \vartheta_T$$

Oberflächentemperatur von ebenen Bauteilen

Die Grundgleichung des Wärmedurchgangswiderstandes lautete:

$$R_{tot} = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \Sigma\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}$$

Das heisst, die Temperaturdifferenz zwischen den verschiedenen Schichten verhält sich proportional zu den entsprechenden Wärmewiderständen. Also gilt für den Übergang von der Raumluft zur inneren Wandoberfläche (Abb. 2.14):

$$\frac{\vartheta_i - \vartheta_{oi}}{\vartheta_i - \vartheta_a} = \frac{1/\alpha_i}{1/k} \; ; \qquad \vartheta_{oi} = \vartheta_i - \frac{k}{\alpha_i}(\vartheta_i - \vartheta_a)$$

Darin ist nach [SIA 180] $\alpha_i = 6\ \mathrm{W/m^2\,K}$ zu setzen (Beiblatt 2.3).

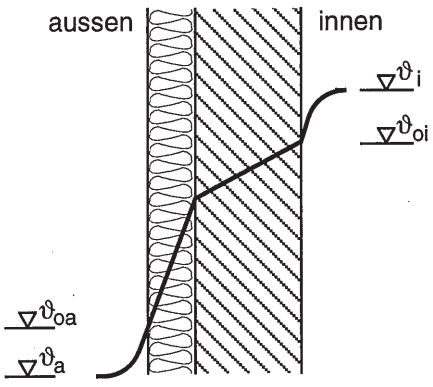


Abb. 2.14: Oberflächentemperatur innen

Bei *Wärmebrücken* ist die Oberflächentemperatur nach anderen Regeln zu bestimmen. Sie sind in [SIA 180], Ziffer 3 4 1 zu finden.

Standardnachweis für Wohnräume
Nach [SIA 180] Ziffer 3 4 2 ist der Nachweis für Kondensation für die Raumluftbedingung $\vartheta_i = 20°C$ und $\varphi = 50\%$ zu führen. Für Nasszellen oder andere Räume mit spezieller Nutzung sind andere Werte anzusetzen.

Beispiel für den Nachweis der Kondensation in einem Badezimmer
Ebene Bauteile im Badezimmer eines Hauses in Zürich:

Wandkonstruktion	k	$= 0.6\ W/m^2K$
Raumluftbedingungen	ϑ_i	$= 22°,\ \varphi_i = 70\%$
Aussentemperatur	ϑ_a	$= \vartheta_{min} = -14°C$
Oberflächentemperatur	ϑ_{oi}	$= 22 - (0.6/6)\ (22 + 14) = 18.4°C$
Taupunkttemperatur	ϑ_T	$= 16.3°C$ aus Beiblatt 2.16

Es gilt $\vartheta_{oi} > \vartheta_T$. Der Nachweis der Kondensation ist somit erfüllt, da auch bei einer Aussentemperatur ϑ_{min} an den Innenoberflächen der Wände die Temperatur genügend hoch bleibt und somit keine Kondensation auftritt.

Schimmelpilz
Schimmelpilzgefahr an raumseitigen Oberflächen besteht, wenn die längerfristige relative Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche φ_{oi} mehr als 80% beträgt. Der Wert $\varphi = 80\%$ ist jener nach [SIA 180]. In der Literatur, z.B. im Wärmebrückenkatalog [SIA D 078], wird $\varphi = 70\%$, d.h. ein strengeres Kriterium, verwendet.

Für Nachweise nach [SIA 180] wird somit gefordert, dass die relative Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche für eine längerfristige Aussentemperatur im Winter unter 80% bleibt, d.h.:

$$\varphi_{oi\ \text{langfristig}} \leq 80\ \%$$

Als "längerfristige Aussentemperatur" kann z.B. das Januarmittel, das statistisch einmal in 20 Jahren auftritt, verwendet werden (z.B. Zürich -1°C).

Beispiel für den Nachweis der Schimmelpilzgefahr in einem Badezimmer
Ebene Bauteile im Badezimmer eines Hauses in Zürich:

Wandkonstruktion	k	$= 0.6\ W/m^2K$
Raumluftbedingungen	ϑ_i	$= 22°C,\ \varphi_i = 70\ \%$
Aussentemperatur	ϑ_a	$= -1°C$
Oberflächentemperatur	ϑ_{oi}	$= 22 - (0.6/6)\ (22+1) = 19.7°C$
Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche	φ_{oi}	$= 81\%$ (Beiblatt 2.16 und Abb. 2.15)

Es gilt $\varphi_{oi\ langfristig} > 80\ \%$. Damit besteht Schimmelpilzgefahr.

Hinweis
Bei Wärmebrücken treten tiefere Temperaturen auf als an den angrenzenden ebenen Bauteilen. Damit ergibt sich eine grössere lokale Schimmelpilzgefahr!

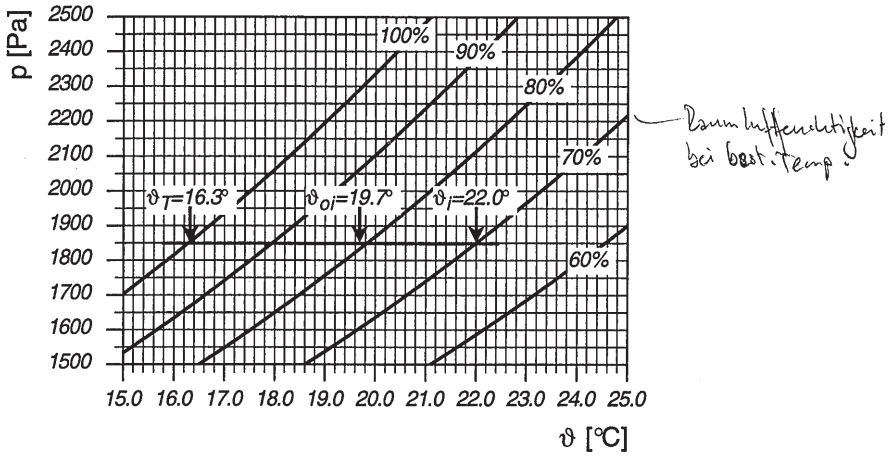


Abb. 2.15: Ermittlung von φ_{oi} für Schimmelpilzgefahr

2.2.3 Kondensation im Bauteilinnern, Dampfsperre

Kondensation

Kondensation des Wasserdampfes im Bauteilinnern tritt auf, wenn dort der Wasserdampfsättigungsdruck erreicht wird. Im Rahmen einer einfachen Prüfung wird angenommen, dass dies der Fall ist, *wenn der scheinbare Wasserdampfdruck p grösser wird als der Wasserdampf-Sättigungsdruck p_s.*

Bei tiefen Aussentemperaturen ist der Wasserdampfdruck im Gebäudeinnern wesentlich grösser als aussen. Damit besteht ein Dampfdruckgefälle durch die Aussenbauteile. Dieses Dampfdruckgefälle bewirkt eine *Diffusion* (Wanderung) *des Wasserdampfs von innen nach aussen*. Trifft der Wasserdampf im Bauteilinnern auf eine "kalte Schicht" mit der Temperatur $\vartheta \leq \vartheta_T$ (Taupunkttemperatur), so kondensiert der Wasserdampf, d.h. es wird Kondenswasser ausgeschieden.

Bei der einfachen Prüfung auf Kondensation im Bauteilinnern muss also der scheinbare Wasserdampfdruck kleiner bleiben als der Wasserdampf-Sättigungsdruck:

$$p < p_s$$

Die Berechnung des *scheinbaren Dampfdruckverlaufes* in einem Bauteil erfolgt auf analoge Weise wie die Berechnung des Temperaturverlaufes.

Möglicherweise kann eine relativ geringe, im Winter (Kondensationsperiode) ausgeschiedene Wassermenge im Sommer (Trocknungsperiode) wieder austrocknen. Andernfalls ergeben sich die bekannten Wirkungen und Bauschäden wie

- Durchfeuchtung der Aussenbauteile;
- durch erhöhten Wassergehalt bewirkte grössere Wärmeleitfähigkeit und somit eine schlechtere Wärmedämmung der Baustoffe;
- ausfliessendes Kondenswasser am Fuss der Fassade bei mehrschichtigen Konstruktionen (z.B. in Beton-Zweischalenmauerwerk);
- Sprengwirkung durch Eisbildung im Winter bei gestautem Kondenswasser.

Definitionen

Wasserdampfleitfähigkeit λ_D (mg/m h Pa)

Wasserdampfmenge, die pro Zeiteinheit durch 1 m² Querschnitt eines homogenen Stoffes von 1m Dicke diffundiert, wenn die Wasserdampfdruckdifferenz der Oberflächen 1 Pa beträgt. Für Zahlenwerte für λ_D siehe Beiblatt 2.1 und Beiblatt 2.2 [SIA 381/1].

Diffusionswiderstand R_D (m² h Pa/mg)

Die Dampfübergangskoeffizienten α_{iD} und α_{aD} sind sehr gross; die entsprechenden kleinen Widerstände (Kehrwerte) dürfen vernachlässigt werden. Es gilt dann:

- einschichtige (homogene) Bauteile mit der Dicke d: $R_D = d/\lambda_D$
- mehrschichtige Bauteile: $R_D = \Sigma(d/\lambda_D)$

Diffusionswiderstandszahl μ (-)

Anstatt mit λ_D kann mit μ gearbeitet werden. Die Diffusionswiderstandszahl μ ist ein Kennwert der Dampfdurchlässigkeit von Baustoffen, der angibt, wievielmal kleiner die Wasserdampfleitfähigkeit bzw. wievielmal grösser der Diffusionswiderstand einer Stoffschicht ist als der einer gleich dicken Luftschicht: $\mu = \lambda_{DL}/\lambda_D$. Zahlenwerte für μ sind ersichtlich in [SIA 381/1].

Wasserdampfleitfähigkeit der ruhenden Luft λ_{DL} (mg/m h Pa)

Abhängig von Temperatur und Barometerdruck, im Bereich von 0.60 - 0.75 (mg/m h Pa):

- mittlere Verhältnisse im schweizerischen Mittelland: 0.72 (mg/m h Pa)
- Rechenwert gemäss [SIA 381/1]: 0.64 (mg/m h Pa)

a) Vorgehen bei einfacher Prüfung auf Kondensation im Bauteilinnern

Oft genügt eine einfache Prüfung auf Kondensation im Bauteilinnern, um zu entscheiden, ob eine Dampfsperre anzuordnen ist (Abb. 2.16):

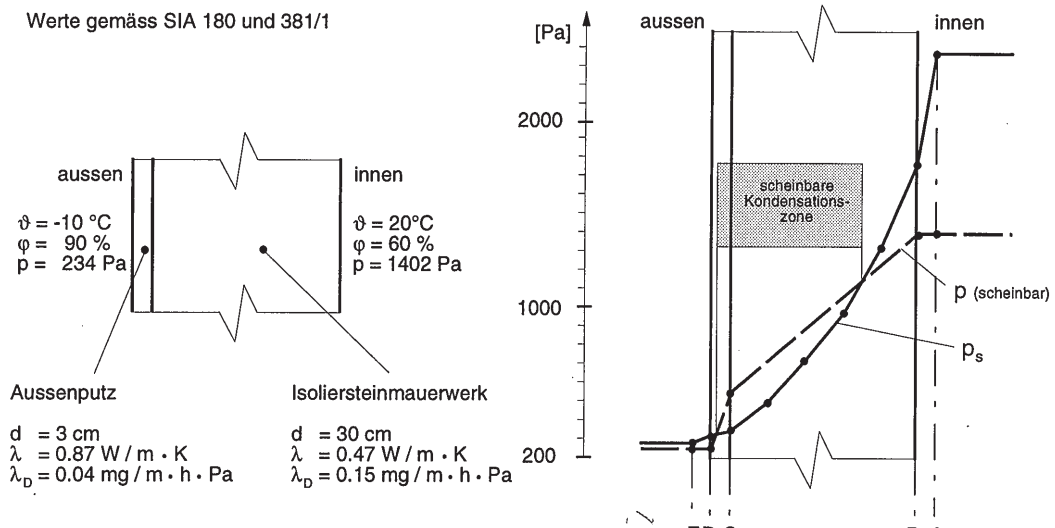
- Berechnung des Temperaturverlaufes ϑ durch das Bauteil;
- Ermittlung des entsprechenden Sättigungs-Dampfdruckverlaufes p_s (p_s zur jeweiligen Temperatur);
- Berechnung des scheinbaren Dampfdruckverlaufes p durch das Bauteil;
- Vergleich: Kondensation erfolgt, wenn $p > p_s$.

b) Massnahmen

Ist aufgrund der einfachen Prüfung Kondensation im Bauteilinnern zu erwarten, so kann eine Dampfsperre angeordnet oder in gewissen Fällen eine weitergehende Berechnung durchgeführt werden [Kel].

Dampfsperre anordnen

Die Wirkung der Dampfsperre kann man sich wie folgt vorstellen: Der Wasserdampf wird durch die Dampfsperre daran gehindert, weiter in das Bauteil zu diffundieren. Er kann also nicht mehr bis zur "kalten Schicht" vordringen und dort kondensieren. Daraus folgt auch die wichtige Regel: *Dampfsperren gehören immer auf die warme Seite der Wärmedämmung!* Beispiele für die Anordnung von Dampfsperren finden sich auf Beiblatt 2.17 und Beiblatt 2.18.



	d [m]	λ [W/mK]	α [W/m² K]	R_i [m² K / W]	Δϑ [K]	ϑ [°C]	p_s [Pa]	λ_D [mg / m h Pa]	R_i [m² h Pa / mg]	Δp_i [Pa]	p [Pa]	φ
A						20	2337				1402	60%
Übergang Luft - Wand, innen			8	0.125	4.4							
B						15.6	1771				1402	
Isolierstein	0.3	0.47		0.638	22.6			0.15	2.0	849		
C						-7.0	*338*				*553*	
Aussenputz	0.03	0.87		0.034	1.2			0.04	0.75	319		
D						-8.2	304				234	
Übergang Wand - Luft, aussen			20	0.050	1.8							
E						-10.0	260				234	90%
				0.847					2.75			

Abb. 2.16: Einfache Prüfung auf Kondensation im Bauteilinnern (Beispiel)

Eine Dampfsperre (oder Dampfbremse) besteht aus einem dünnen Material mit extrem kleinem λ_D (grossem μ), d.h. kleiner Wasserdampfleitfähigkeit. Übliche Materialien sind:

- Kunststoffolie (bei Innenisolation einer Wand, Dachisolation, usw.);
- Alufolie (auf Wärmedämmplatten fertig aufgezogen);
- Bitumendachpappe (bei Flachdächern).

In allen Fällen müssen die *Fugen und Ränder sorgfältig abgeklebt und gedichtet* werden. Auch allfällige Verletzungen müssen sorgfältig repariert werden!

Eine Dampfsperre ist praktisch immer nötig:

- in Räumen mit hoher Innenfeuchtigkeit (z.B. 70% bei 20°C) wie z.B. in Wäschereien, Hallenbädern, Textilfabriken, usw.;
- in Kühlhäusern;
- bei Wärmedämmung von Kühl- oder Kaltwasserleitungen.

Weitergehende Berechnungen durchführen

In manchen Fällen lohnt sich eine detailliertere Berechnung, die das Verhalten über das ganze Jahr (Kondensations- und Trocknungsperiode) berücksichtigt. Es werden dabei folgende Grössen bestimmt:

- tatsächlicher Dampfdruckverlauf;
- im Winter (Kondensationsperiode) ausgeschiedene Wassermenge G_K;
- im Sommer (Trocknungsperiode) austrocknende Wassermenge G_A.

Die Berechnung erfolgt nach der *Methode von Glaser* mit effektiven Klimawerten oder nach dem vereinfachten *Verfahren der Pascaltage*, beide gemäss [SIA 180].

Sofern sich kein Restkondensat ergibt, ist eine Dampfsperre nicht unbedingt erforderlich. Bei geringem Restkondensat genügt allenfalls die Anordnung einer Dampfbremse.