

# Wärmebrücken / Tauwasser / Schimmelpilz

Eine Übersicht

## Inhaltsverzeichnis

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>Tauwasserproblematik</b> .....                       | 3  |
| 1.1      | Einleitung .....  | 3  |
| 1.2      | Luftfeuchte und Tauwasserbildung .....                  | 3  |
| 1.3      | Luftfeuchte .....                                       | 4  |
| 1.3.1    | Wasserdampfgehalt der Luft .....                        | 4  |
| 1.3.2    | Wasserdampfdruck.....                                   | 5  |
| 1.3.3    | Relative Luftfeuchte.....                               | 7  |
| 1.3.4    | Taupunkttemperatur $\theta_{ts}$ .....                  | 8  |
| 1.3.5    | Raumluftfeuchte, Wasserdampfproduktion und Lüftung..... | 10 |
| <b>2</b> | <b>Schimmelpilze</b> .....                              | 12 |
| <b>3</b> | <b>Tauwasserbildung</b> .....                           | 13 |
| 3.1      | Tauwasser auf Bauteiloberflächen.....                   | 13 |
| 3.2      | Klimatische Randbedingungen.....                        | 13 |
| 3.2.1    | Bauliche und nutzungsbedingte Randbedingungen .....     | 14 |
| 3.2.2    | Wärmebrücken.....                                       | 15 |
| 3.3      | Tauwasser im Innern von Bauteilen .....                 | 18 |

## **1 Tauwasserproblematik**

### **1.1 Einleitung**

Tauwasser in Bauwerken führt häufig zu Schäden. In manchen Schadensfällen sind umfangreiche Sanierungsmaßnahmen erforderlich, um zukünftigen Tauwasserausfall zu vermeiden, in anderen Fällen genügt eine Änderung der Heiz- und Lüftungsgewohnheiten in den betroffenen Räumen, damit keine weiteren Schäden entstehen.

Das Auftreten von Tauwasser auf der Oberfläche oder im Innern von Bauteilen kann sich wie folgt auswirken:

- An den betroffenen Stellen der Bauteiloberflächen wachsen unter Umständen Schimmelpilze, die nicht nur optisch stören, sondern auch gesundheitsgefährdend sind.
- Die Bausubstanz kann bei einem erhöhten Feuchtegehalt und dadurch ausgelösten physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen angegriffen und möglicherweise zerstört werden.
- Feuchtes Material leitet die Wärme besser als trockenes, dadurch erhöht sich der Heizenergieverbrauch beim Beheizen eines von Tauwasser betroffenen Gebäudes im Vergleich zum Bauwerk ohne Tauwasser, es entsteht somit ein zusätzlicher, vermeidbarer Wärmeverlust.

### **1.2 Luftfeuchte und Tauwasserbildung**

Ob Tauwasser auf der Oberfläche eines Bauteils auftritt oder nicht, hängt davon ab, ob dessen Oberflächentemperatur größer oder kleiner als die Taupunkttemperatur der angrenzenden Luft ist, also von deren Temperatur und Wasserdampfgehalt.

Im Inneren eines Bauteils entscheiden sowohl die Klimawerte der beidseitig angrenzenden Luft als auch die Temperaturverteilung über den Bauteilquerschnitt in Verbindung mit dem Diffusionswiderstand der einzelnen Bauteilschichten darüber, ob es zu einem Tauwasserausfall kommt oder nicht und wie groß die eventuell anfallende Tauwassermenge ist.

In beiden Fällen sind Temperatur und Wasserdampfgehalt der an die Bauteile angrenzenden Außen- und Raumluft wichtige Einflussgrößen.

## 1.3 Luftfeuchte

### 1.3.1 Wasserdampfgehalt der Luft

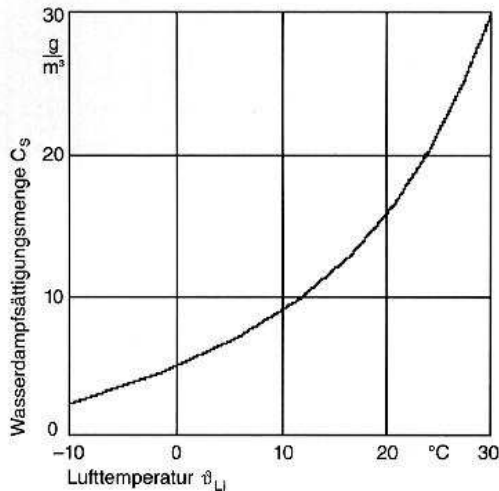


Abb. 1: Wasserdampfsättigungsmenge der Luft, abhängig von der Temperatur bei Normaldruck

Die atmosphärische Luft enthält immer Wasserdampf. Dieser hat seinen Ursprung in der Verdunstung des Wassers vom Boden und von den freien Wasseroberflächen, sowie von den in der Erdatmosphäre ablaufenden meteorologischen Vorgängen. Auch Bäume und die sonstige Vegetation geben viel Wasser durch Verdunstung an die Luft ab.

Die Maßeinheit des Wasserdampfgehaltes der Luft ist die Konzentrationsangabe in g Wasserdampf je m<sup>3</sup> Luft. Aufnehmen kann die Luft allerdings nur eine begrenzte Wasserdampfmenge; wenn diese Höchstmenge erreicht ist, ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt. Die zugehörige Menge wird als Sättigungsmenge bezeichnet und hängt sehr stark von der Lufttemperatur ab ([Abb. 1](#)); die zugehörigen Zahlenwerte sind in [Tab. 1](#) enthalten.

| $\vartheta$ | $c_s$            | $\vartheta$ | $c_s$            | $\vartheta$ | $c_s$            | $\vartheta$ | $c_s$            | $\vartheta$ | $c_s$            |
|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|
| °C          | g/m <sup>3</sup> | °C          | g/m <sup>3</sup> | °C          | g/m <sup>3</sup> | °C          | g/m <sup>3</sup> | °C          | g/m <sup>3</sup> |
| 29          | 28,8             | 20          | 17,3             | 11          | 10,0             | 2           | 5,57             | - 7         | 2,75             |
| 28          | 27,2             | 19          | 16,3             | 10          | 9,39             | 1           | 5,20             | - 8         | 2,53             |
| 27          | 25,8             | 18          | 15,4             | 9           | 8,81             | ± 0         | 4,85             | - 9         | 2,33             |
| 26          | 24,4             | 17          | 14,5             | 8           | 8,26             | - 1         | 4,49             | - 10        | 2,14             |
| 25          | 23,0             | 16          | 13,7             | 7           | 7,74             | - 2         | 4,14             | - 11        | 1,96             |
| 24          | 21,8             | 15          | 12,8             | 6           | 7,25             | - 3         | 3,81             | - 12        | 1,80             |
| 23          | 20,6             | 14          | 12,1             | 5           | 6,97             | - 4         | 3,50             | - 13        | 1,65             |
| 22          | 19,4             | 13          | 11,3             | 4           | 6,36             | - 5         | 3,23             | - 14        | 1,52             |
| 21          | 18,8             | 12          | 10,7             | 3           | 5,95             | - 6         | 2,98             | - 15        | 1,39             |

Tab. 1: Wasserdampfkonzentration in Luft im Sättigungszustand zwischen 29° C und -15° C

### 1.3.2 Wasserdampfdruck

Wie alle Gase erzeugt der Wasserdampf in der Luft einen Gasdruck, der vom Luftdruck unabhängig ist und als Wasserdampfdruck bezeichnet wird. In der Praxis kann mit ausreichender Genauigkeit Wasserdampf als ideales Gas betrachtet werden, für das folgende Beziehung gilt:

$$p = c \times R_D \times T$$

$p$  ist der Wasserdampfdruck,  $c$  die Wasserdampfkonzentration,  
 $R_D = 462 \text{ J}/(\text{kg} \times \text{K})$  die spezifische Gaskonstante des Wasserdampfes und  
 $T$  die thermodynamische Temperatur oder Kelvin-Temperatur.

Im Sättigungszustand wird der Wasserdampfdruck als Sättigungsdruck bezeichnet. In der [Tab. 2](#) wird der Sättigungsdruck für einen Temperaturbereich zwischen  $30^\circ\text{C}$  und  $-20^\circ\text{C}$  angegeben.

Näherungsweise kann der Wasserdampfsättigungsdruck auch nach folgender, in DIN 4108 Teil 5 genannten Zahlenwertgleichung berechnet werden.

$$p_s = a \cdot \left( b + \frac{\vartheta}{100^\circ\text{C}} \right)^n$$

Dabei sind für die Größen  $a$ ,  $b$  und  $n$  die in [Tab 3](#) genannten Werte zu verwenden.

| Größen | $30^\circ\text{C} \geq \vartheta \geq 0^\circ\text{C}$ | $0^\circ\text{C} > \vartheta \geq -20^\circ\text{C}$ |
|--------|--|--|
| a      | 288,68 Pa  | 4,689 Pa   |
| b      | 1,098  | 1,486  |
| n      | 8,02   | 12,3   |

Tab. 3: Parameter  $a$ ,  $b$  und  $n$  zur Berechnung des Sättigungsdampfdruckes  $p_s$  nach Gl. 2

| $\theta_s$<br>in °C | Wasserdampf-Sättigungsdruck $p_s$ über Wasser bzw. Eis in Pa |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | 0,0  | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  |
| 30                  | 4244   | 4269 | 4294 | 4319 | 4344 | 4369 | 4394 | 4419 | 4445 | 4469 |
| 29                  | 4006   | 4030 | 4053 | 4077 | 4101 | 4124 | 4148 | 4171 | 4196 | 4219 |
| 28                  | 3781   | 3803 | 3826 | 3848 | 3871 | 3894 | 3916 | 3939 | 3961 | 3984 |
| 27                  | 3566   | 3588 | 3609 | 3631 | 3652 | 3674 | 3696 | 3717 | 3738 | 3759 |
| 26                  | 3362   | 3382 | 3403 | 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 | 2521 | 2538 | 2554 | 2570 | 2587 | 2603 | 2620 | 2637 |
| 20                  | 2340   | 2354 | 2369 | 2384 | 2399 | 2413 | 2428 | 2443 | 2457 | 2471 |
| 19                  | 2197   | 2212 | 2227 | 2241 | 2256 | 2270 | 2283 | 2297 | 2310 | 2324 |
| 18                  | 2065   | 2079 | 2093 | 2107 | 2120 | 2133 | 2146 | 2159 | 2172 | 2185 |
| 17                  | 1937   | 1950 | 1963 | 1976 | 1989 | 2001 | 2014 | 2027 | 2039 | 2052 |
| 16                  | 1818   | 1830 | 1841 | 1854 | 1866 | 1878 | 1889 | 1901 | 1914 | 1926 |
| 15                  | 1706   | 1717 | 1728 | 1738 | 1750 | 1762 | 1773 | 1784 | 1795 | 1806 |
| 14                  | 1599   | 1610 | 1621 | 1631 | 1642 | 1653 | 1663 | 1674 | 1684 | 1695 |
| 13                  | 1496   | 1506 | 1516 | 1526 | 1536 | 1546 | 1556 | 1566 | 1576 | 1586 |
| 12                  | 1403   | 1413 | 1422 | 1431 | 1441 | 1451 | 1460 | 1470 | 1479 | 1488 |
| 11                  | 1312   | 1321 | 1330 | 1340 | 1349 | 1358 | 1367 | 1375 | 1385 | 1394 |
| 10                  | 1238   | 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  | 956  | 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                   | 758  | 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  | 657  |
| -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  | 458  | 452  | 448  | 444  | 440  |
| -4                  | 437  | 433  | 430  | 426  | 423  | 419  | 415  | 412  | 408  | 406  |
| -5                  | 401  | 398  | 395  | 391  | 388  | 385  | 382  | 379  | 375  | 372  |
| -6                  | 368  | 365  | 362  | 358  | 356  | 353  | 350  | 347  | 343  | 340  |
| -7                  | 337  | 334  | 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  | 106  | 104  |
| -20                 | 103  | 102  | 101  | 100  | 99   | 98   | 97   | 96   | 96   | 94   |

Tab. 2: Wasserdampf-Sättigungsdruck  $p_s$  zwischen 30,9 und -20,9 °C

### 1.3.3 Relative Luftfeuchte

Meistens ist die in der Luft enthaltene Wasserdampfmenge geringer als der höchstmögliche Sättigungsgehalt der Luft bei der vorhandenen Temperatur. Wenn der Feuchtezustand der Luft gekennzeichnet werden soll, muss als Folge dieser Eigenschaft der Wasserdampfgehalt der Luft immer in Verbindung mit der möglichen Sättigungsmenge angegeben werden. Nur so kann beurteilt werden, bis zu welchem Grad der Wasserdampfgehalt sich der Sättigungsmenge genähert hat. Diese Kennzeichnung des Feuchtezustandes der Luft durch zwei Zahlenwerte ist umständlich und auch nicht anschaulich. Wesentlich bildhafter ist es, die Luftfeuchte durch eine Einzahlangabe als das Verhältnis der vorhandenen Wasserdampfmenge  $c$  zur Wasserdampfsättigungsmenge  $c_s$  zu definieren. Bezeichnet wird diese Größe als die relative Luftfeuchte  $\varphi$  [phi].

Es ist

$$\varphi = c / c_s$$

Da der Wasserdampfteildruck proportional zu der in der Luft enthaltenen Wasserdampfmenge  $c$  ist, gilt auch

$$\varphi = p / p_s$$

### 1.3.4 Taupunkttemperatur $\theta_{ts}$

Ein abgeschlossenes Luftvolumen beinhaltet eine Wasserdampfmenge. Wird diese eingeschlossene Luftmenge abgekühlt, dann wird mit abnehmender Lufttemperatur die Sättigungsmenge nach [Tab 1](#) kleiner. Bei diesem Vorgang nimmt die relative Feuchte der eingeschlossenen Luft zu, und wenn der Zahlenwert der Sättigungsmenge  $c_s$  mit dem Wert der im Luftvolumen vorhandenen Wasserdampfmenge  $c$  übereinstimmt, hat die relative Feuchte den Wert 100 % erreicht. Bei einer weiteren Abkühlung der Luft muss die Wasserdampfmenge, die den Betrag der Sättigungsmenge übersteigt, als flüssiges Wasser aus der Luft ausscheiden. Diese Wasserabgabe der gesättigten Luft erfolgt entweder als Nebel oder als Tauwasserniederschlag auf festen Gegenständen, z.B. im Winter auf den "kalten" Oberflächen von Außenbauteilen. Die Grenztemperatur, bei der dieser Vorgang einsetzt, also die Temperatur, bei der die in der Luft vorhandene Wasserdampfmenge zahlenmäßig gleich der Sättigungsmenge ist, wird als Taupunkttemperatur  $\theta_{ts}$  der Luft bezeichnet. Je höher die Wasserdampfmenge bzw. die relative Luftfeuchte bei einer vorgegebenen Lufttemperatur ist, umso höher ist auch die Taupunkttemperatur  $\theta_{ts}$  bei diesem Luftzustand (s. [Tab 4](#)).

Für Lufttemperaturen  $\theta_{tL}$  gleich oder größer als 0°C und unter der Voraussetzung, dass  $\theta_{ts}$  keine negativen Werte annimmt, kann die Taupunkttemperatur auch nach folgender Zahlenwertgleichung berechnet werden:

$$\theta_{ts} = \varphi^{0,125} \cdot (109,8 + \theta_{tL}) - 109,8 \text{ in Grad C}$$

$$\vartheta_s = \varphi^{0,125} \cdot (109,8 + \vartheta_L) - 109,8 \text{ in } ^\circ\text{C}$$

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

<sup>1)</sup> Näherungsweise darf geradlinig interpoliert werden.

**Tab. 4: Taupunkttemperatur  $\vartheta_s$  der Luft, unabhängig von der Lufttemperatur  $\vartheta_L$  und der relativen Feuchte  $\phi$**

### 1.3.5 Raumlufffeuchte, Wasserdampfproduktion und Lüftung

Wenn es um die Frage geht, ob Tauwasser auf Bauteiloberflächen auftritt oder nicht, ist nach Abschnitt 3.2.1.1 der Wasserdampfgehalt bzw. der Wert der relativen Feuchte der Raumluff eine wichtige Einflussgröße, wobei die mit der Temperatur zunehmende Wasserdampfaufnahmefähigkeit der Luft sich ebenfalls auf den Vorgang auswirkt.

In Wohn- und Arbeitsräumen wird von den Nutzern Wasserdampf produziert. Der anfallende Wasserdampf stammt teils aus der Atemluft der anwesenden Personen, teils aus der Verdunstung des Gießwassers bei Topfpflanzen, er entsteht beim Kochen, Baden, Duschen und dergleichen. Bis auf ganz geringe, für das Wachstum benötigte Mengen, verdunstet bei Topfpflanzen das gesamte Gießwasser. Auch wenn die Verdunstungsmengen der einzelnen Pflanzen in den Wohnungen gering sind, so können sich die an die Raumluff abgegebenen Wasserdampfmengen, wenn viele Pflanzen vorhanden sind, auf recht erhebliche Beträge aufsummieren. Tabelle 5 enthält Angaben über die hierbei zu erwartenden Wasserdampfmengen.

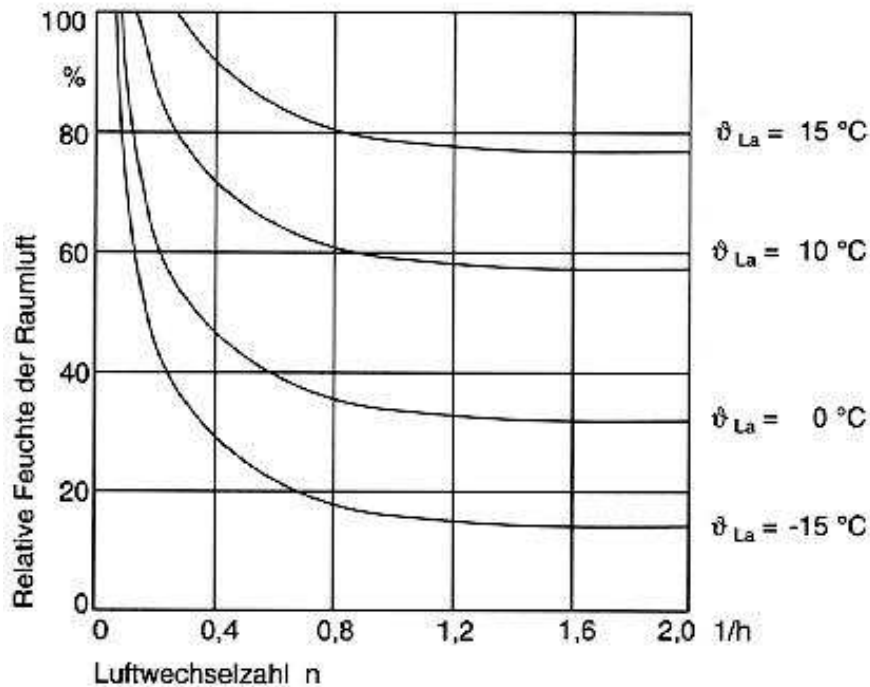
Um zu verhindern, dass die Lufffeuchte nicht allmählich auf den Wert von 100 % ansteigt, muss ein Teil der in die Luft gelangenden Wasserdampfmenge der Raumluff entzogen werden. In der Regel erfolgt dies durch die Raumlüftung, d.h., dass ein Teil der Raumluff durch Außenluff ersetzt wird.

Dies ist im Winter besonders wirkungsvoll, denn bei den um diese Jahreszeit im Freien vorhandenen Lufftemperaturen ist deren Wasserdampfgehalt deutlich geringer als der Wasserdampfgehalt der Raumluff eines beheizten Gebäudes. Dies trifft auch dann zu, wenn die relative Lufffeuchte im Freien bei sehr hohen Werten liegt, z.B. bei 90 % und mehr. Bei 0° C enthält Luff bei 100 % relativer Feuchte 4,84 g Wasserdampf je m<sup>3</sup> Luff; die auf eine Temperatur von 20° C erwärmte Raumluff in einem beheizten Gebäude kann nach [Tab 1](#) dagegen bis zu 17,3 g/m<sup>3</sup> Wasserdampf aufnehmen und bei einer relativen Feuchte von 50 % enthält die Raumluff dann immer noch 8,65 g/cbm, also wesentlich mehr, als die Außenluff bei 0° C enthalten kann. Wird beim Lüften 1 m<sup>3</sup> Luff der zuvor erwähnten, auf 20° C beheizten Raumluff gegen 1 m<sup>3</sup> Außenluff ausgetauscht, dann werden bei diesem Lüftungsvorgang der Raumluff 8,65 - 4,85 = 3,8 g/m<sup>3</sup> Wasserdampf entzogen. Dieser Vergleich der unterschiedlichen Beträge der in der Raumluff und in der Außenluff vorhandenen Wasserdampfmengen zeigt, dass bei ausreichender Raumlüftung im Winter die Raumlufffeuchte gesenkt werden kann.

Gekennzeichnet wird die Intensität der Raumlüftung durch die Luffwechselzahl n. Diese gibt an, wie oft während einer Stunde das Luffvolumen des Raumes gegen Außenluff ausgetauscht wird. Bei einer Luffwechselzahl  $n = 2 \text{ h}^{-1}$  wird demnach die Raumluff während einer Stunde 2 mal durch Außenluff erneuert.

[Abb 2](#) zeigt den Einfluss der Raumlüftung im Winter auf die relative Feuchte der Luff in einem auf 20° C beheizten Raum bei einem ständigen Wasserdampfanfall von 80 g/h, abhängig von der Außenlufftemperatur und der Luffwechselzahl n. Aus dem Rechenbeispiel in [Abb. 2](#) ist zu erkennen, dass die Raumlufffeuchte umso niedriger ist, je intensiver der Luffwechsel bzw. je größer die Luffwechselzahl n und je niedriger die Temperatur der Außenluff ist. Wenn also während der kalten Jahreszeit ein zu starker Anstieg der Lufffeuchte in bewohnten Räumen verhindert werden soll, müssen dieselben ausreichend gelüftet werden; in der Regel durch

gezielte Fensterlüftung. Je dichter die Fensterfugen sind, desto häufiger ist also eine Fensterlüftung notwendig.



**Abb. 2:** Relative Feuchte, die sich in einem auf 20° C beheizten Raum mit einem Volumen von 75 cbm bei einem Wasserdampfanfall von 80 g je Stunde einstellt, abhängig von der Luftwechselzahl n bei verschiedenen Außentemperaturen mit einer relativen Feuchte von 100 %

| Quelle des Wasserdampfes                         |                             | Wasserdampfmenge          |
|--|-----------------------------|---------------------------|
| Mensch,  | leichte Arbeit              | 30 - 60 g/h               |
|  | mittelschwere Arbeit        | 120 - 200 g/h             |
|  | schwere Arbeit              | 200 - 300 g/h             |
| Bad,   | Wannenbad                   | ca. 700 g/h               |
|  | Duschen                     | ca. 2600 g/h              |
| Küche,   | Koch- und Arbeitsvorgänge   | 600 - 1500 g/h            |
|  | Im Tagesmittel              | ca. 100 g/h               |
| Trocknende Wäsche (4,5 kg Trommel), geschleudert |                             | 50 - 200 g/h              |
|  | tropfnaß                    | 100 - 500 g/h             |
| Topfpflanzen,                                    | z.B. Farn                   | 7 - 15 g/h                |
|  | z.B. mittelgroßer Gummibaum | 10 - 20 g/h               |
| Freie Wasseroberfläche - Aquarium                |                             | ca. 40 g/m <sup>2</sup> h |

**Tab. 5:** Wasserdampfabgabe in Wohnungen von Pflanzen, von Menschen sowie bei Trocknungsvorgängen und in Haßzellen [1]

## 2 Schimmelpilze

Eine häufig zu beobachtende Folge von Tauwasser auf Bauteiloberflächen ist das Wachsen von Schimmelpilzen. Diese gehören hauptsächlich zur Gattung Penicillin und Aspergillus, sie bilden sich, wenn freies Wasser und Nährstoffe vorhanden sind, wobei im Einzelnen folgende Randbedingungen erfüllt sein müssen:

- Feuchtigkeit: Zum Keimen, Wachsen und zur Fortpflanzung der Pilze muss freies Wasser auf der Oberfläche des Bauteils oder innerhalb der Materialporen vorhanden sein. Es wird in der Regel aus Tauwasser auf der Bauteiloberfläche stammen.
- Temperatur: Schimmelpilze überleben in einem relativ breiten Temperaturbereich zwischen 0°C und 50°C. Bildung und Fortpflanzung erfolgt jedoch besonders schnell bei Temperaturen zwischen etwa +15°C und +30°C, also bei Temperaturbedingungen, die in bewohnten Gebäuden während des ganzen Jahres anzutreffen sind.
- Nahrung: Für Bildung und Wachstum benötigt der Schimmelpilz Proteine. Die Ausgangssubstanzen für die Entstehung sind vielfältig und praktisch immer gegeben, sei es aus den Baustoffen, sei es aus Ablagerungen auf der Oberfläche aus der Luft.
- Zeit: Sporen von Pilzen sind in der Luft stets in großen Mengen vorhanden, nämlich etwa  $10^3$  bis  $10^6$  Sporen je  $m^3$ , die sich auf den Oberflächen absetzen und dort wachsen können, wenn Feuchtigkeit und Nahrung vorhanden sind. Die Inkubationszeit für die Bildung von Hyphen, der Grundstruktur der Pilze, beträgt etwa eine Woche.

Schimmelpilze auf Bauteilen sind nicht nur aus ästhetischer Sicht zu beanstanden, sondern vordringlich auch aus hygienischen Gründen, denn die von ihnen abgeschiedenen Sporen können bei den Bewohnern allergische Erkrankungen hervorrufen.

### 3 Tauwasserbildung

#### 3.1 Tauwasser auf Bauteiloberflächen

#### 3.2 Klimatische Randbedingungen

Wenn die Temperatur der Bauteiloberflächen niedriger als die Taupunkttemperatur der sie berührenden Luft ist, entsteht auf diesen ein Tauwasserniederschlag. Eine mitentscheidende Einflussgröße ist der Feuchtegehalt der Raumluft. Um das Raumklima im Hinblick auf die Gefahr von Tauwasserschäden bewerten zu können, muss ein Bezugsklima festgelegt werden.

Nach DIN 4108, Teil 3, kann man bei üblicher Nutzung und Lüftung der Räume von folgenden Klimawerten ausgehen:

|   |       |
|---|-------|
| Raumlufttemperatur:                             | 20°C  |
| relative Luftfeuchte:                           | 50 %  |
| Taupunkttemperatur nach <a href="#">Tab 4</a> : | 9,3°C |
| Außenlufttemperatur:                            | -15°C |

Die Oberflächentemperatur eines Bauteils hängt von der Temperatur der beiderseits angrenzenden Luft, vom Wärmedurchlasswiderstand und den Wärmeübergangswiderständen an der Innen- und Außenseite des Bauteils ab. Bei vorgegebenen Lufttemperaturen ist die Oberflächentemperatur des Bauteils umso höher, je größer dessen Wärmedurchlasswiderstand  $R$  bzw. je kleiner der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  und je kleiner der Wärmeübergangswiderstand  $R_i$  der raumseitigen Bauteilfläche ist. Letzterer hängt von der Strömungsgeschwindigkeit der angrenzenden Luft, von den Strahlungseigenschaften der Bauteiloberfläche und der Geometrie des Raumes ab. Wegen der Vielfalt der Einflussgrößen variiert der Zahlenwert des Wärmeübergangswiderstandes  $R_i$  zwischen 0,13 und 0,33  $\text{m}^2 \times \text{K/W}$ .

### 3.2.1 Bauliche und nutzungsbedingte Randbedingungen

Bei folgenden Situationen kann in einem Raum die Taupunkttemperatur der Luft niedriger als die Oberflächentemperatur der Bauteile sein und damit einen Tauwasserniederschlag verursachen; die Gründe hierfür können konstruktiver Art sein oder sich aus der Nutzung ergeben:

- a. Wenn Außenbauteile wärmeschutztechnisch unterdimensioniert sind, bzw. wenn sie Wärmebrücken enthalten und die Oberflächentemperatur deshalb in einem örtlich begrenzten Bereich relativ niedrig ist, kann Tauwasser sich bereits bei üblichen Werten der Lufttemperatur und Luftfeuchte bilden. Nicht jede Wärmebrücke muss aber automatisch einen Tauwasserniederschlag verursachen. Wenn ein Außenbauteil mit einem hohen Wärmedurchlasswiderstand eine nur schwach ausgeprägte Wärmebrücke enthält, ist in der Regel kein Tauwasserniederschlag zu erwarten.
- b. Wenn die Raumluftfeuchte und damit auch die Taupunkttemperatur der Raumluft durch eine übermäßige Wasserdampfproduktion im Raum deutlich höher als bei üblicher Nutzung ist, kann sich auf den Oberflächen von Bauteilen, auch wenn sie einen Mindestwärmeschutz nach DIN 4108 aufweisen, Tauwasser niederschlagen.
- c. Bei ausgekühlten Räumen, deren Bauteile aus schweren Materialien bestehen, steigt beim Aufheizvorgang wegen der thermischen Trägheit der Baustoffe die Oberflächentemperatur der Bauteile nur langsam an. Wenn in dieser Zeitphase im Raum Wasserdampf erzeugt oder ihm von außen zugeführt wird, kann die Taupunkttemperatur der Raumluft zeitweise höher als die Oberflächentemperatur der Außenbauteile, auch höher als die von innenliegenden Trennwänden sein, es tritt ein Tauwasserausfall auf.
- d. Wenn unbeheizte Räume dadurch temperiert werden, dass die Verbindungstür zu einem beheizten Raum geöffnet bleibt, kann aus dem beheizten Bereich Wasserdampf in den unbeheizten Raum eindringen und sich dort auf den relativ "kalten" Oberflächen der Außenbauteile niederschlagen.
- e. Wenn Einrichtungsgegenstände vor oder in die Nähe von Außenwänden mit einem knapp bemessenen Wärmeschutz aufgestellt werden, wird die Luftbewegung in der Nähe der Außenwand behindert. Die Oberflächentemperatur derselben nimmt niedrigere Werte an, als ohne Behinderung zu erwarten wäre. Da aber Wasserdampf auch an diese Stellen gelangt, ist dort mit einem Tauwasserniederschlag zu rechnen. Tauwasser wird von Gips- oder Kalkputzen absorbiert und gespeichert, sofern keine Feuchtigkeitssperre, z.B. als Fliesenbelag, vorhanden ist. In der Zeitspanne nach der Tauwasserbildung verdunstet ein Teil des gespeicherten Tauwassers und geht an die Raumluft über, der restliche Teil wird von dem Mauerwerk aufgenommen und nach außen weitergeleitet. Unter diesen Umständen führt eine kurzzeitige Tauwasserbildung nicht zu einem Schaden. Nur bei einem länger andauernden Tauwasserniederschlag ist eine wichtige Voraussetzung für das Wachsen von Schimmelpilzen erfüllt.

### **3.2.2 Wärmebrücken**

#### **3.2.2.1 Definition**

Als Wärmebrücken werden örtlich begrenzte Stellen bezeichnet, die im Vergleich zu den angrenzenden Bauteilbereichen eine höhere Wärmestromdichte aufweisen. Ihr physikalisches Merkmal ist, dass die Wärmestromlinien an dieser Stelle nicht mehr parallel zueinander verlaufen, sondern verzerrt sind. Diese örtlich erhöhte Wärmestromdichte verursacht nicht nur einen zusätzlichen Wärmeverlust im Vergleich zum ungestörten Bauteil, sondern reduziert auch in dem betreffenden Bereich die Oberflächentemperatur des Bauteils.

Für die Praxis sind die wesentlichen Auswirkungen von Wärmebrücken also

- erhöhte Wärmeverluste sowie
- verringerte Oberflächentemperaturen in diesem Bereich.

#### **3.2.2.2 Wärmebrückenproblematik**

Wärmebrücken sind immer Schwachstellen in der Baukonstruktion. Ihre Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur hängen vom Grad der Schwächung des Wärmeschutzes an dieser Stelle ab. Wenn die Oberflächentemperatur so stark absinkt, dass sie den Wert der Taupunkttemperatur unterschreitet, treten in ihrem Bereich oft Tauwasserschäden auf.

Bei weniger ausgeprägten Wärmebrücken ist deren Oberflächentemperatur nicht niedriger als die Taupunkttemperatur der Raumluft, Tauwasserschäden bleiben deshalb aus. Die Bereiche solcher Wärmebrücken machen sich trotzdem durch verstärkte Staubablagerungen an diesen Stellen bemerkbar, weil im Grenzschichtbereich zwischen Bauteiloberfläche und Luft als Folge der abgesenkten Oberflächentemperatur die relative Feuchte der angrenzenden Luft ansteigt. Je nach Verlauf der Sorptionsisothermen des Oberflächenmaterials absorbiert dieses in mehr oder weniger großem Umfang Wasserdampf aus der Luft. Wegen der elektrischen Wechselwirkung zwischen den Wasserdipolen und den Staubionen, die sich gegenseitig anziehen, lagert sich zusammen mit dem Wasserdampf Staub vermehrt im Bereich der Wärmebrücke ab und die Oberfläche wird allmählich dunkler als die Umgebung. Diese Oberflächenverfärbungen sind grundsätzlich kein Baumangel, sie werden in der Regel nur sichtbar, wenn die üblichen Zeitintervalle für Schönheitsreparaturen überschritten werden.

In der Umgangssprache werden Wärmebrücken oft als Kältebrücken bezeichnet und der auftretende Wärmeverlust als Kältezufuhr beschrieben. Physikalisch ist diese Aussage nicht korrekt, denn bei dem in der Schwachstelle der Baukonstruktion stattfindenden Vorgang wird Energie in Form von Wärme von einem höheren zu einem niedrigeren Energieniveau transportiert.

### 3.2.2.3 Arten von Wärmebrücken

Wenn zwischen den beiden Oberflächen eines ebenen, plattenförmigen Bauteils eine Temperaturdifferenz vorhanden ist, fließt durch das Bauteil ein Wärmestrom, dessen Richtung vom Temperaturgefälle bestimmt wird. Wenn es sich um homogenes Material handelt, verlaufen die Wärmestromlinien über den gesamten Bauteilquerschnitt senkrecht zur Oberfläche und parallel zueinander. Entstehen - aus welchen Gründen auch immer - Temperaturunterschiede in einer Ebene parallel zur

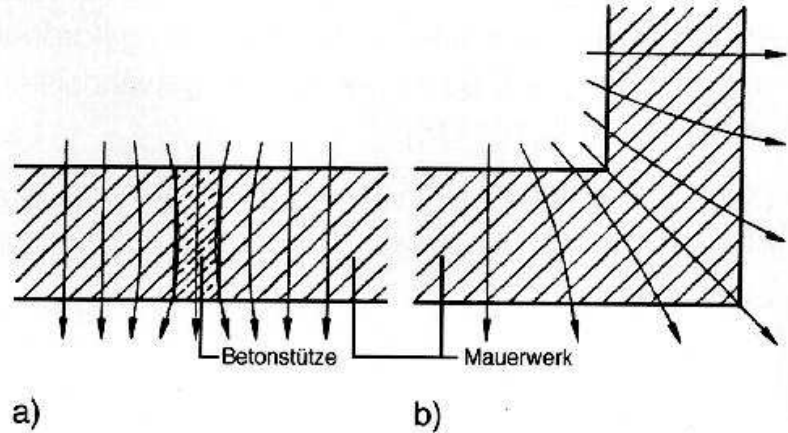


Abb. 4: Wärmestromlinien in einer stoffbedingten (a) und formbedingten (b) Wärmebrücke

Bauteiloberfläche, dann ändern die Wärmestromlinien wegen der Querkomponente ihre Richtung und weichen vom parallelen Verlauf ab. Dies ist der Fall, wenn entweder Stoffe unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit nebeneinander angeordnet sind, oder wenn die Bauteile von der Plattenform abweichen, beispielsweise an der Anschlussstelle zweier senkrecht aufeinander stehender Bauteile. Im ersten Fall spricht man von einer stoffbedingten, im zweiten Fall von einer form- oder geometriebedingten Wärmebrücke. [Abb. 4](#) zeigt beispielhaft die beiden Wärmebrückenarten.

### 3.2.2.4 Außenwandwinkel

#### 3.2.2.4.1 Symmetrischer Aufbau

Beim Winkel zweier aufeinanderstoßender Außenwände ist die an der Innenseite vorhandene Erwärmungsfläche, je nachdem, ob es sich um einen vorspringenden oder eingezogenen Außenwinkel handelt, kleiner oder größer als die Auskühlungsfläche an der Außenseite der Wand [Abb. 5](#). Nur beim vorspringenden Außenwinkel (Fall a) besteht eine kritische Situation, denn wie in [Abb. 4](#) gezeigt wird, divergieren die Wärmestromlinien im Bereich des Wandwinkels, somit ist dort die Wärmestromdichte höher als in der Wandfläche, was zu einer Absenkung der Temperatur im Wandwinkel im Vergleich zur Wandfläche führt.

#### 3.2.2.4.2 Unsymmetrischer Aufbau

In manchen Fällen bestehen zwei aneinanderstoßende Außenwände aus unterschiedlichem Material, wobei in der Regel eine der beiden Wände als Mauerwerk ausgeführt ist. Bei Wandanschlüssen mit ungleichem Wandaufbau wird die Oberflächentemperatur im Winkelbereich nicht nur durch die geometrische Form, sondern auch vom Wärmeleitvermögen der verschiedenen zur Anwendung kommenden Materialien und deren Anordnung beeinflusst.

Wird der Wärmeschutz einer der Außenwände durch eine raum- oder außenseitig aufgebrachte Wärmedämmschicht verbessert, so bestimmt nicht nur deren Wärmedämmwert, sondern auch ihre Anordnung die Oberflächentemperatur im Anschlussbereich an die angrenzende Mauerwerkswand.

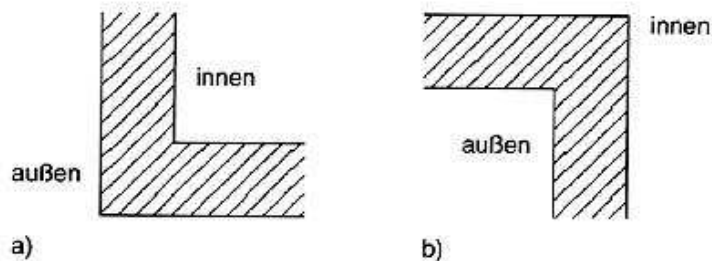


Abb. 5: Vorspringender (a) und eingezogener (b) Außenwinkel

### 3.3 Tauwasser im Innern von Bauteilen

Die Klimawerte der Luft in beheizten Gebäuden und im Freien unterscheiden sich während des Winters. Im Innern eines beheizten Gebäudes ist auf Grund der höheren Lufttemperaturen und bei den üblich vorhandenen Werten der Luftfeuchte der Wasserdampfdruck höher als im Freien. Unter dem Druckunterschied bewegen sich die Wasserdampfmoleküle vom beheizten Raum durch die luftgefüllten Poren und die dazwischenliegenden Kapillaren der Baustoffe in Richtung zum Freien. Bezeichnet wird diese Art von Wasserdampftransport als Wasserdampfdiffusion. Die dabei transportierte Wasserdampfmenge hängt vom Wasserdampf-Diffusionsstrom, dieser wiederum von der Differenz des Dampfdruckes zu beiden Seiten des Bauteiles und vom Diffusionswiderstand der einzelnen Baustoffschichten ab. Hierbei nimmt der Wasserdampfdruck in den Baustoffschichten des Bauteils linear ab. Bei ungünstigem Temperatur- und Dampfdruckverlauf kann im Innern eines Bauteils Tauwasser ausscheiden.

Dieses ist unbedenklich, wenn folgende Bedingungen erfüllt werden:

- die Austrocknung des Tauwassers aus dem Bauteil muss im nachfolgenden Sommer gewährleistet sein.
- die Baustoffe dürfen durch das Tauwasser nicht geschädigt werden (siehe hier Gipskartonplatten).
- der Wärmeschutz der Bauteile darf durch die Feuchtezunahme nicht in unzulässigem Umfang verschlechtert werden.
- die bei normaler Lüftung zu erwartenden Werte ansteigt, kann eine kritische Situation entstehen.