

Thema: Das h,x-Diagramm

Neben Wasser und Nahrung ist Luft eine weitere Mindestvoraussetzung für unser Leben. Die Anforderungen Energieeinsparung, Wärmedämmung und dichte Gebäudehüllen führen zwangsläufig zu neuen Gesamtkonzeptionen in der Gebäudeheizung, Kühlung und Klimatisierung. Daher sind Kenntnisse über die Luft für den Anlagenmechaniker wichtig. Denn Luft ist nicht nur Luft, sie enthält auch Wasser. Verändert sich eine Einflussgröße, so ändern sich zwangsläufig die anderen Parameter. Diese Veränderungen können mit Hilfe des h,x-Diagramms dargestellt werden.

**Einflussgrößen**

Luftdruck und Temperatur sind zwei wichtige Größen, die die Dichte, Feuchte, spezifische Wärmekapazität und den Luftwärmehalt bestimmen.

**Luftdruck – Temperatur – Wärmekapazität**

Der Luftdruck (p) wird in Millibar (mbar) bzw. Pascal (Pa) gemessen; 1 mbar = 1 Hektopascal (hPa). Die Dichte (ρ, Rho) wird in kg/m<sup>3</sup> Luft angegeben. Je höher der Luftdruck, desto dichter wird Luft.

Luftdruck in mbar	Dichte in kg/m <sup>3</sup>
800	1,0
900	1,13
1000	1,27
1013	1,293
1060	1,35

Je höher die Temperatur (θ), desto leichter wird Luft.

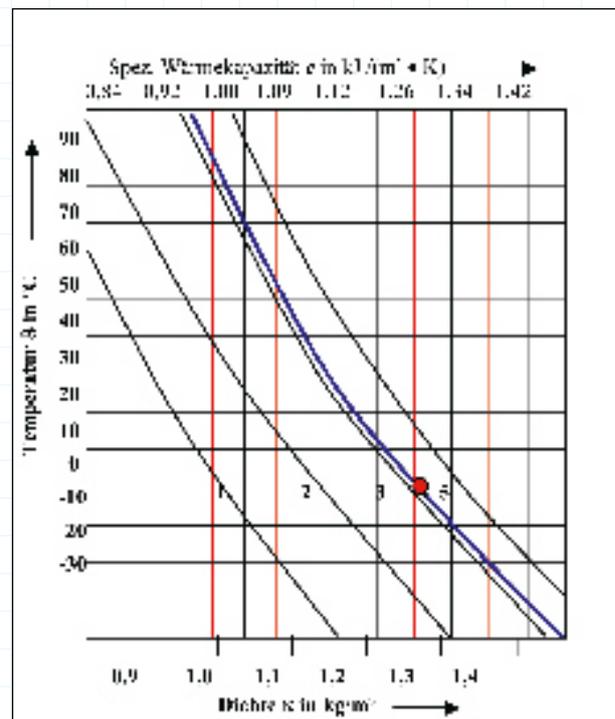
Temperatur in °C	Dichte in kg/m <sup>3</sup>
-30	1,45
0	1,293
30	1,15
60	1,03
90	0,97

Luftdruck und Temperatur haben Einfluss auf die Luftdichte (in kg/m<sup>3</sup>).

Temperatur in °C	Luftdichte in kg/m <sup>3</sup> bei verschiedenen Luftdruckwerten (mbar)			
	900	1000	1013	1060
-30	1,28	1,42	1,45	1,6
0	1,14	1,22	1,29	1,36
30	1,02	1,14	1,15	1,2
60	0,93	1,04	1,03	1,12
90	0,86	0,95	0,97	0,99

Druckänderungen treten „wetterbedingt“ durch Hochdruck- bzw. Tiefdruckeinflüsse auf. Die „höhenbedingte Lage eines Ortes“, ob auf einem Berg oder in Tallage, hat weiteren Einfluss auf den örtlichen Luftdruck.

Im Normzustand (1013 hPa, 0 °C) hat Luft eine Dichte von 1,293 kg/m<sup>3</sup> und eine spezifische Wärmekapazität (c) von 1,23 kJ/(m<sup>3</sup> · K). Dies bedeutet, dass für die Erwärmung von 1 m<sup>3</sup> Luft je Kelvin (K) 1,23 kJ erforderlich sind. Mit zunehmender Luftdichte steigt die spezifische Wärmekapazität. Der Zusammenhang kann in einem Schaubild dargestellt werden.

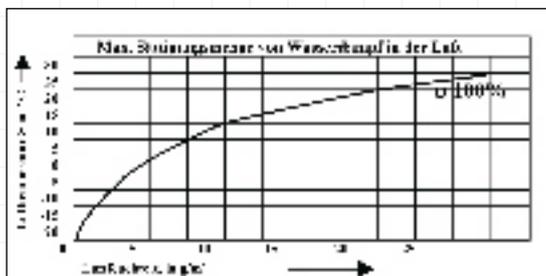


Luft kann Wasserdampf aufnehmen. Mit steigender Lufttemperatur kann mehr Wasserdampf aufgenommen werden.

**Maximale Feuchtigkeit  $x_s$ .**

°C	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
g/m <sup>3</sup>	1,0	1,2	1,5	2,5	3,8	5,4	7,6	10,6	14,7	20,1	27,2

Die maximale (theoretische) Luftfeuchte ( $x_s$ ) ist erreicht, wenn die Luft entsprechend ihrer Temperatur mit Wasserdampf gesättigt ist. Sind dies bei 0°C nur 3,8 g/m<sup>3</sup>, steigt die Wasserdampfaufnahmefähigkeit bei z. B. 32°C auf ca. 30 g/m<sup>3</sup> und bei 100°C auf ca. 590 g/m<sup>3</sup> an. In der Natur kommt dies jedoch real nicht vor. Selbst bei strömendem Regen oder im Spritzbereich von Wasserfällen hat die Luft eine etwas geringere Sättigungsmenge.



Um den tatsächlichen Feuchtegehalt benennen zu können, wird der Begriff „Relative Luftfeuchte“ ( $\varphi$ , Phi) verwendet und der Feuchtegehalt in % angegeben. Beinhaltet die Luft keine Feuchte, so wäre  $\varphi$  gleich 0%. Doch selbst die trockenste Wüstenluft beinhaltet noch eine messbare Wasserdampfmasse.

Die absolute Luftfeuchte ( $x$ ) ist die tatsächliche Wasserdampfmasse in g. Sie wird im Vergleich zu der im gleichen Volumen enthaltenen Gesamtmasse trockener Luft in kg bestimmt (g/kg trockener Luft).

Die Relative Luftfeuchte ( $\varphi$ ) gibt an, wie viel % der maximal möglichen Wasserdampfmasse in der Luft vorhanden sind. Zeigt die Feuchtemessung bei einer Temperatur von 30°C z. B. 64% an, so sind je m<sup>3</sup> ca. 17,4 g Wasser als Dampf gelöst. Die Luft könnte theoretisch noch 9,8 g Wasserdampf aufnehmen.

Die Relative Feuchte kann mit Hilfe der „absoluten“ Feuchte und „maximalen“ Feuchte bestimmt werden.

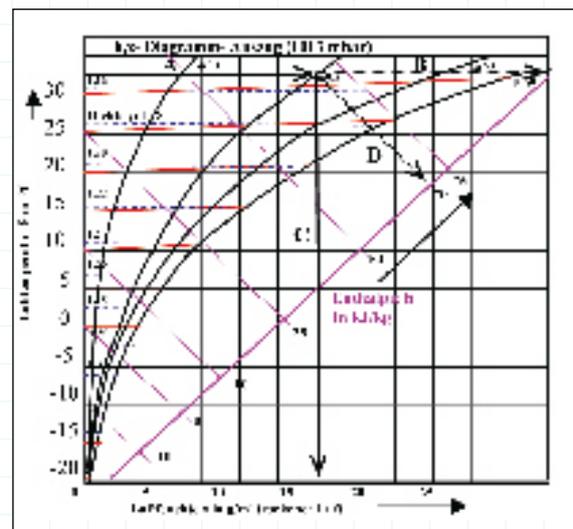
$$\text{Relative Luftfeuchte } \varphi = \frac{\text{absolute Luftfeuchte } x}{\text{maximale Luftfeuchte } x_s} \cdot 100$$

Beispiel: Bei 32°C sind 15 g ( $x$ ) Wasserdampf je m<sup>3</sup> Luft enthalten. Die Aufnahmefähigkeit ( $x_s$ ) wäre jedoch 30 g.

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{x}{x_s} \cdot 100\% \\ &= \frac{15\text{g}}{30\text{g}} \cdot 100\% \\ &= 0,5 \cdot 100\% \\ &= 50\% \end{aligned}$$

In der Natur können die ständigen Änderungsprozesse an der Wolkenbildung, dem Nebel oder Regen eindrucksvoll beobachtet werden. Im täglichen Leben ist es beispielsweise eine Flasche Wasser, die aus dem Kühlschrank geholt wurde: An der Oberfläche kondensiert Wasserdampf.

Die in feuchter Luft enthaltene Wärme wird als Enthalpie ( $h$ ) bezeichnet und deren Wert in kJ/kg angegeben. Die gesamten Zusammenhänge können im  $h,x$ -Diagramm dargestellt werden. Dieses ist auf den Normzustand (1013 mbar, Meeresspiegel) bezogen. Für andere Luftdrücke bzw. Höhenlagen sind Korrekturfaktoren bzw. abgestimmte  $h,x$ -Diagramme zu verwenden.



Das Diagramm setzt sich aus einer Vielzahl von Einzeldiagrammen zusammen. Zur Nutzung müssen mindestens zwei Größen gemessen bzw. bekannt sein. So kann über die Temperatur ( $\vartheta$ ) und relative Feuchte ( $\varphi$ ) die Dichte ( $\rho$ ), die absolute Feuchte ( $x$ ) sowie die Enthalpie ( $h$ ) bestimmt werden. Umgekehrt lassen sich die verändernden Luftzustände ebenfalls nachvollziehen.

Durch Ergänzungsskalierungen können weitere Parameter wie Wasserdampfdruck abgelesen werden.

Folgt man dem Beispiel, so zeigen die Pfeile

- A:  $\vartheta = 32^\circ\text{C}$  bei r.F.  $\varphi = 50\%$ ,
- B: führt zu  $\varphi = 100\%$ ,
- C: absolute Feuchte  $x = 15\text{ g/m}^3$ ,
- D: Enthalpie  $h = \text{ca. } 70\text{ kJ/kg trockener Luft}$ .