

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
Masterstudium**

Bauklimatik

1 Bauklimatik

1.1 Thermodynamik der Feuchten Luft

Die Berechnung und Beurteilung bauklimatischer Zustände und klimatechnischer Prozesse setzt die Kenntnis über das thermodynamische Zustandsverhalten der atmosphärischen Luft voraus. Weil normale Luft immer eine mehr oder weniger große Wasserdampfmenge enthält, spricht man in diesem Zusammenhang auch von „Feuchter Luft“.

Definition:

Feuchte Luft ist das Gemisch von zwei idealen Gasen:

- Trockene Luft und
- Wasserdampf

Zustandsgrößen:

Der thermodynamische Zustand des Gas-Dampf-Gemisches wird durch folgende Zustandsgrößen beschrieben:

- Luftdruck p in Pa
- Dichte ρ in $\text{kg}_{\text{ feuchte Luft}} / \text{m}^3$
- Lufttemperatur θ in $^{\circ}\text{C}$
- Taupunkttemperatur θ_{Tau} in $^{\circ}\text{C}$
- Feuchtkugeltemperatur θ_{Feucht} in $^{\circ}\text{C}$
- Wassergehalt (absolute Luftfeuchte) x in $\text{g}/\text{kg}_{\text{ trockene Luft}}$
- Relative Feuchte ϕ in %
- Spezifische Enthalpie h in $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{ trockene Luft}}$

Zur Beschreibung eines Luftzustandes sind bei einem vorgegebenen Luftdruck nur zwei weitere der oben angegebenen Zustandsgrößen erforderlich.

Zur Ermittlung eines Luftzustandes oder Beschreibung einer Zustandsänderung hat sich das so genannte Mollier-Diagramm oder h-x-Diagramm bewährt.

Im h-x-Diagramm lassen sich

- Zustandsgrößen als Punkte
- Zustandsänderungen als Linienzüge
- Zustandsbereiche als Flächen
- Verlaufsrichtungen als Koordinatenrichtungen

darstellen und visuell nachvollziehen. Aufgrund der übersichtlichen und visuell einprägsamen Handhabung ist das h-x-Diagramm inhaltlich identischer Computersoftware überlegen. Das h-x-Diagramm ist ein wichtiges Planungsinstrument für Bauklimatiker und Klimatechniker.

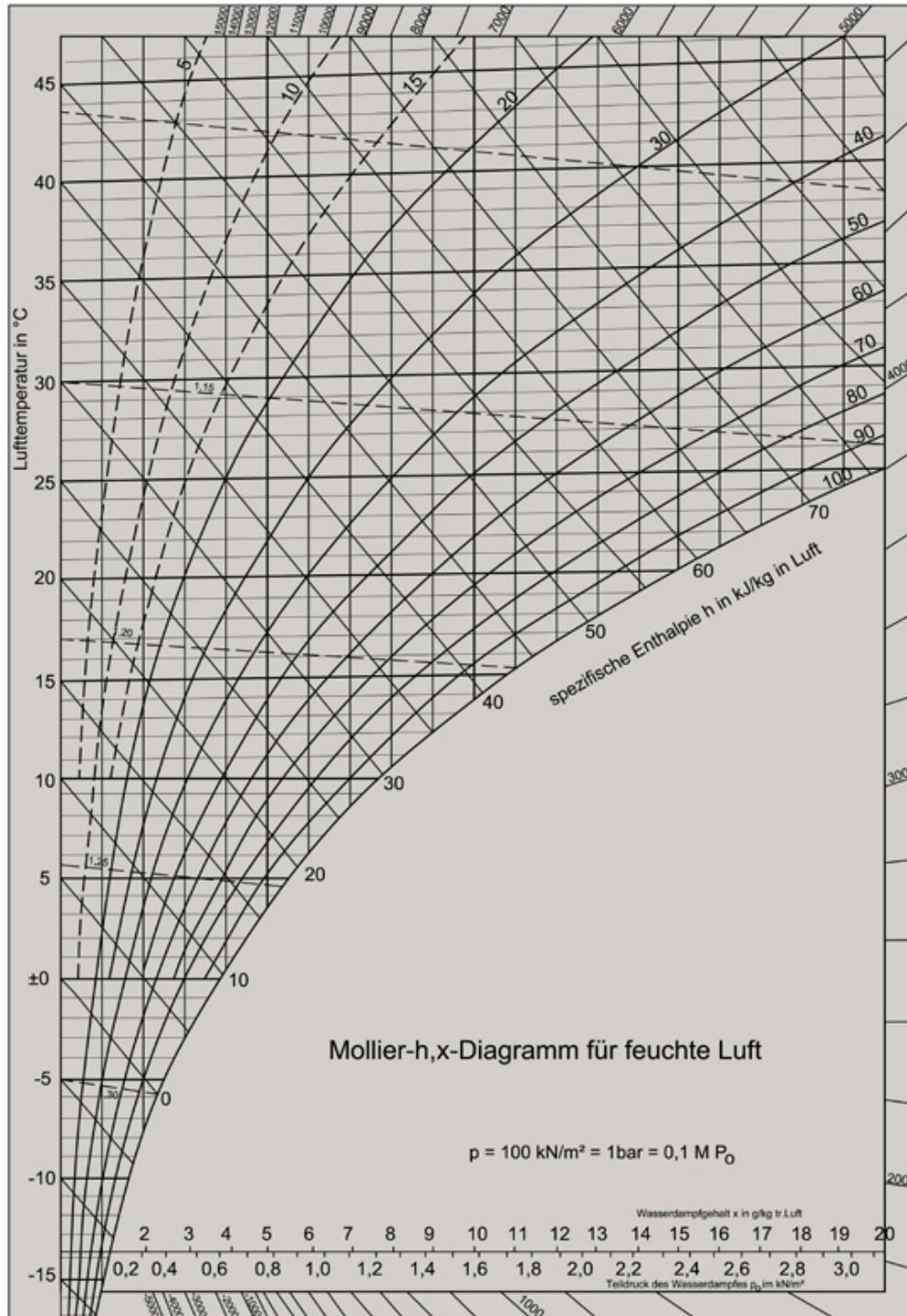


Bild 1-1 Mollier-h,x Diagramm

Der Luftdruck p ist die Summe aus

- Partialdruck der trockenen Luft p_L
- Partialdruck des Wasserdampfes (Wasserdampfteildruck) p_W

Es gilt:

$$p = p_L + p_W \quad (1-1)$$

Die absolute Feuchte beschreibt den absoluten Wassergehalt im Stoffgemisch „Feuchte Luft“. Die absolute Feuchte ist die Wasserdampfmenge, die in einem kg trockene Luft enthalten ist:

$$x = m_W / m_L \quad (1-2)$$

mit

m_W ... Masse des Wasserdampfes

m_L ... Masse der trockenen Luft

Es gilt:

$$x = 0,6222 p_W / p_L \text{ in kg/kg}_{\text{tr.L.}} \quad (1-3)$$

mit

p_W ... Partialdruck des Wasserdampfes

p_L ... Partialdruck der trockenen Luft

Übungsskript Beispiel 3-2

Anwendung in der Bauphysik:

- Wasserdampfdiffusion basiert auf dem Druck- (bzw. Konzentrations-) ausgleich zweier „Feuchte-Luft“-Gasgemische unterschiedlicher Wasserdampfteildrücke. Wasserdampfdiffusion kann sowohl durch feste Körper als auch durch fluide Medien (z. B. Luft) erfolgen.
- Aus Gründen des klimabedingten Feuchteschutzes sollte die absolute Feuchte innerhalb von Gebäuden auf $x \leq 11,5 \text{ g/kg}_{\text{trockene Luft}}$ begrenzt werden. (Tauwasser, Schutz vor Mikroorganismen, Korrosion).
- Die absolute Außenluftfeuchte besitzt einen ausgeprägten Jahresgang mit Maximum im Sommer und Minimum im Winter. Hieraus ergeben sich bauphysikalische Planungsgrundsätze für den klimabedingten Feuchteschutz (Stichworte: Lüftungsstrategien, Sommerkondensation in thermisch trägen Räumen)

Das ungesättigte Gas-Dampf-Gemisch „Feuchte Luft“ kann in Abhängigkeit der Lufttemperatur nur eine bestimmte Wasserdampfmenge aufnehmen. Die maximal mögliche Wasserdampfmenge bei einer Lufttemperatur bezeichnet man als Sättigungsmenge x_s (Sättigungszustand). Je höher die Lufttemperatur der feuchten Luft, desto größer ist die Sättigungsmenge.

$$x_s = f(\theta) \quad (1-4)$$

Den Wasserdampfdruck im Sättigungszustand bezeichnet man als Sättigungsdruck

$$p_s = f(\theta). \quad (1-5)$$

Die Funktion $p_s = f(\theta)$ wird auch als Sättigungskurve bezeichnet.

Feuchte Luft mit

$$x > x_s \quad (1-6)$$

wird übersättigte Luft genannt. Hierbei wird in die Bereiche Flüssigkeitsnebel und Eisnebel unterschieden.

Die **relative Feuchte** ist eine Verhältnisgröße, die angibt wieviel Prozent des maximal möglichen Wasserdampfes in der Luft enthalten sind. Es gilt:

$$\phi = p_w / p_s(\theta) \quad (1-7)$$

Wegen $p_s = f(\theta)$ gilt

$$\phi = f(\theta), \text{ bei } p_w = \text{const.} \quad (1-8)$$

Verhalten der relativen Luftfeuchte bei thermodynamischen Zustandsänderungen:

- Heizen: $\phi \downarrow$
- Kühlen: $\phi \uparrow$
- Befeuchten: $\phi \uparrow$
- Entfeuchten: $\phi \downarrow$

Die relative Luftfeuchte ist neben der Lufttemperatur die wichtigste Zustandsgröße für die Beurteilung bauklimatischer Zustände und Abläufe. Das hygrische Verhalten von allen Stoffen (auch Baustoffen) ist eng mit der relativen Luftfeuchte verbunden. Die Abhängigkeit der Stofffeuchte von der relativen Luftfeuchte wird als Sorptionsisotherme bezeichnet (Isotherme: $\theta = \text{const.}$).

Anwendung in der Bauphysik:

- Bauphysikalische Einschätzung des Raumklimas von Lagerräumen mit feuchteempfindlichem Lagergut (z. B. Papier \Rightarrow Bibliotheken, Bürolager in Kellern, usw.); Stichwörter: Auswahl geeigneter Baustoffe, Restfeuchte, Abdichtungstechnik, Lüftungsstrategie, Nutzerverhalten, Sommerheizung
- Bauphysikalische Einschätzung des Raumklimas in museal genutzten Räumen mit konservatorischen Anforderungen. Die relative Feuchte besitzt von allen konservatorisch relevanten Größen die höchste Priorität. Insbesondere deren Schwankungsbreite und Schwankungshäufigkeit. Schwankungen der relativen Feuchte führen zu einem ständigen Wechsel von Quellen und Schwinden \Rightarrow künstliche Alterung wertvoller Exponate wird beschleunigt. Planungsregel: Erst die bauphysikalischen Möglichkeiten zur autarken Klimatisierung ausschöpfen und erst dann mit Anlagentechnik eingreifen.
- Der Behaglichkeitsparameter relative Luftfeuchte spielt bei normalen Lufttemperaturen eine eher unterge-

ordnete Rolle. Kritische Zustände können jedoch eintreten bei rel. Luftfeuchten $\phi \geq 80\%$ (Schwülegefühl) oder $\phi \leq 30\%$ (Austrocknen der Schleimhäute, Kontaktlinsenträger). Bei Lufttemperaturen von $\theta \geq +28^\circ\text{C}$ nimmt der Einfluss der relativen Luftfeuchte für die thermische Behaglichkeit stark zu. Die Erträglichkeitsgrenze verläuft bei steigender Lufttemperatur mit abnehmender relativer Luftfeuchte. Selbstregulierung der Körperkerntemperatur über Verdunstungskühlung (Transpiration)
 \Rightarrow daher bei $\theta \uparrow (\geq +28^\circ\text{C}) \rightarrow \phi \downarrow$.

Die Taupunkttemperatur ist die Temperatur, bis zu der feuchte Luft bei konstantem absoluten Feuchtegehalt abgekühlt werden muss, damit der Sättigungszustand erreicht wird. Es ist die Temperatur bei der in der Luft enthaltene Wasserdampf gerade zu kondensieren beginnt. Der zur Taupunkttemperatur zugehörige Wasserdampfdruck ist der Sättigungsdruck p_s . Die relative Feuchte des Taupunktes beträgt $\phi = 100\%$.

Die Taupunkttemperatur eines Luftzustandes kann im h-x-Diagramm mit einem vertikalen Linienzug vom Zustandspunkt bis zur Sättigungslinie $\phi = 100\%$ ermittelt werden.

Anwendung in der Bauphysik:

- Sobald die Innenoberflächentemperatur eines Bauteiles die Taupunkttemperatur der Innenluft unterschreitet kommt es zur Bildung von Oberflächenkondensat. \rightarrow Prüfkriterium für die Beurteilung von Wärmebrücken und Fensterverglasung (klimabedingter Feuchteschutz auf der Bauteiloberfläche).
- Die Taupunkttemperatur kann auch innerhalb des Bauteilquerschnittes unterschritten werden. Im Rahmen eines Nachweisverfahrens sind in der DIN 4108 hierzu zulässige Grenzwerte angegeben (klimabedingter Feuchteschutz im Bauteilinnern)

Die Dichte der feuchten Luft ist wie folgt definiert:

$$\rho = (m_L + m_W) / V \quad (1-9)$$

mit

- m_L ... Masse der trockenen Luft
- m_W ... Masse des Wasserdampfes
- V ... Volumen der feuchten Luft

ABER:

Das spezifische Volumen der feuchten Luft ist wie folgt definiert:

$$v = V / m_L \quad (1-10)$$

mit

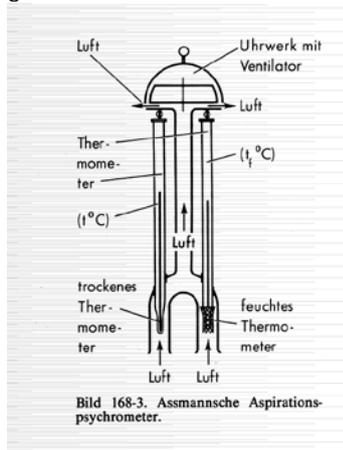
- v ... spezifisches Volumen der feuchten Luft
- V ... Volumen der feuchten Luft
- m_L ... Masse der trockenen Luft

Anwendung in der Bauphysik:

- Warme Luft ist leichter als kalte Luft
- Feuchte Luft ist leichter als trockene Luft

Die thermodynamischen Zustandsgrößen Feuchtkugeltemperatur und spezifische Enthalpie spielen in der Bauphysik eine untergeordnete Rolle.

Die Feuchtkugeltemperatur ist die tiefste Temperatur, auf die Wasser durch Luft eines betrachteten Zustandes gekühlt werden kann (daher auch Kühlgrenztemperatur). Die praktische Umsetzung erfolgt beim *Assmannschen Aspirationspsychrometer* bei der Messung der Luftfeuchte. Hier wird die Temperatur an zwei Thermometern gemessen:



- Lufttemperatur θ am *trockenen Thermometer*
- Feuchtkugeltemperatur θ_{Feucht} am, z. B. mit einem feuchten Wattebausch, *angefeuchteten Thermometer*. Infolge der eintretenden Verdunstung wird Verdunstungswärme frei, der feuchte Wattebausch kühlt ab. Die Intensität der Verdunstung und die damit einhergehende Abkühlung des flüssigen Wassers hängt auch vom thermodynamischen Zustand der Luft ab.

Anhand der beiden gemessenen Zustandsgrößen θ und θ_{Feucht} ist der thermodynamische Zustand der feuchten Luft bei einem vorgegebenen Luftdruck eindeutig bestimmt. Das Messgerät zeigt z. B. die relative Feuchte an.

Im h-x-Diagramm ist die Feuchtkugeltemperatur am Schnittpunkt der vom Zustandspunkt ausgehenden $h = \text{const.}$ -Linie und der Sättigungslinie $\phi = 100\%$ ablesbar.

Die spezifische Enthalpie ist eine Größe die den energetischen Zustand der feuchten Luft beschreibt. Sie setzt sich wie folgt zusammen:

- Wärmemenge der trockenen Luft
- Wärmemenge des Wasserdampfes

Die spezifische Enthalpie der feuchten Luft ist als eine Bezugsgröße mit dem Bezugspunkt $\theta = 0\text{ °C}$ definiert.

Für den ungesättigten Zustand gilt:

$$h = h_L + x h_w \quad (1-11)$$

mit

- h ... Enthalpie der feuchten Luft
- h_L ... Enthalpie der trockenen Luft
- h_w ... Enthalpie des Wasserdampfes

$x...$ absolute Feuchte der Luft in $\text{kg}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}}$

Weiterhin gilt:

$$h_L = c_{p,L} \theta \quad (1-12)$$

mit

$c_{p,L}...$ spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) der trockenen Luft; $c_{p,L} = 1,01 \text{ kJ}/(\text{kgK})$

$\theta...$ Temperatur der feuchten Luft in $^{\circ}\text{C}$

$$h_W = r_0 + c_{p,W} \theta \quad (1-13)$$

mit

$r_0...$ Verdampfungswärme des Wassers am Tripelpunkt; $r_0 = 2501 \text{ kJ}/\text{kg}$

$c_{p,W}...$ spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Druck) des Wasserdampfes; $c_{p,W} = 1,86 \text{ J}/(\text{kgK})$

Daraus folgt für den ungesättigten Zustand die Zahlenwertgleichung:

$$h = 1,01 \theta + x (2501 + 1,86 \theta) \text{ in kJ}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}} \quad (1-14)$$

Für den übersättigten Bereich gelten weitere Abhängigkeiten, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Die Enthalpie wird in der Klimatechnik sehr oft benötigt, da für jede Änderung des Luftzustandes Energie benötigt wird.

Übungsskript Beispiel 3-3 / 4-13

Typische in der Bauphysik häufig wiederkehrende thermodynamische Luftzustände (bei $p = 100 \text{ kPa}$)

Luftzustand	Lufttemperatur θ in °C	Relative Luftfeuchte ϕ in %	Absolute Luftfeuchte x in $\text{g/kg}_{\text{r.L.}}$	Taupunkttemperatur θ_{Tau} in °C	Feuchtkugeltemperatur θ_{Feucht} in °C	Sättigungsdruck p_s in Pa	Partialdruck Wasserdampf p_w in Pa	Partialdruck trockene Luft p_L in Pa	Dichte ρ in $\text{kg}_{\text{r.L.}}/\text{m}^3$	Spezifisches Volumen v in $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{r.L.}}$	Spezifische Enthalpie h in $\text{kJ/kg}_{\text{r.L.}}$
Normklima Wohnräume	20	50	7,4	9,2	13,8	2 337	1 168	98 831	1,183	0,852	38,9
Büroraum im Winter	20	40	5,9	6,0	12,3	2 337	935	99 065	1,184	0,850	35,1
Schwimmbad	30	65	17,6	22,7	24,7	4 242	2 757	97 242	1,137	0,895	75,4
Heißer Sommertag	32	40	12,1	16,7	21,6	4 754	1 902	98 098	1,133	0,893	63,2
Kalter Wintertag	-10	80	1,3	-13,3	-10,6	259	207	99 792	1,323	0,757	-6,9
Sehr kalter Wintertag	-15	80	0,8	-18,0	-15,4	165	132	99 868	1,349	0,742	-13,1