

Vogel Fachbuch

Kamprath-Reihe

Walter Wagner

# Lufttechnische Anlagen

Ventilatoren und  
Ventilatorenanlagen

---

Walter Wagner  
Lufttechnische Anlagen

---

Kamprath-Reihe

Dipl.-Ing. Walter Wagner

# **Lufttechnische Anlagen**

**Ventilatoren und Ventilatorenanlagen**

2., überarbeitete Auflage

Vogel Buchverlag

---

Dipl.-Ing. **WALTER WAGNER**

Jahrgang 1941, absolvierte nach einer Lehre als Technischer Zeichner ein Maschinenbaustudium und war 1964 bis 1968 Anlagenplaner im Atomreaktorbau; nach einer Ausbildung zum Schweiß-Fachingenieur war er ab 1968 Technischer Leiter im Apparatebau, Kesselbau und in der Wärmetechnik. 1974 bis 1997 bekam Walter Wagner einen Lehrauftrag an der Fachhochschule Heilbronn, von 1982 bis 1984 zusätzlich an der Fachhochschule Mannheim und von 1987 bis 1989 an der Berufsakademie Mosbach. Im Zeitraum 1988 bis 1995 war er Geschäftsführer der Hoch-Temperatur-Technik Vertriebsbüro Süd GmbH. Seit 1992 ist er Leiter der Beratung und Seminare für Anlagentechnik: WTS Wagner-Technik-Service. Walter Wagner ist außerdem Obmann verschiedener DIN-Normen und öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Wärmeträgertechnik, Thermischer Apparatebau und Rohrleitungstechnik.

Dipl.-Ing. **WALTER WAGNER** ist Autor folgender Vogel Fachbücher der Kamprath-Reihe:  
Festigkeitsberechnungen im Apparate- und Rohrleitungsbau  
Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen  
Lufttechnische Anlagen  
Planung im Anlagenbau  
Regelarmaturen  
Rohrleitungstechnik  
Sicherheitsarmaturen  
Strömung und Druckverlust  
Wärmeaustauscher  
Wärmeträgertechnik  
Wärmeübertragung  
Wasser und Wasserdampf im Anlagenbau  
DIETZEL/WAGNER: Technische Wärmelehre  
HEMMING/WAGNER: Verfahrenstechnik

Zur Themenreihe gehören ebenfalls aus dem Vogel Buchverlag:

H. J. **BULLACK**: (CD-ROM)  
Berechnung von Druckbehälter-Bauteilen  
Berechnung von Sicherheitseinrichtungen  
Berechnung metallischer Rohrleitungsbauteile 1  
Berechnung metallischer Rohrleitungsbauteile 2

---

**Weitere Informationen:**  
[www.vogel-buchverlag.de](http://www.vogel-buchverlag.de)

---

ISBN 978-3-8343-3095-6

2. Auflage. 2007

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1997 by Vogel Industrie Medien

GmbH & Co. KG, Würzburg

Satz: Hümmer, Waldbüttelbrunn

---

# Vorwort

---

Lufttechnische Anlagen werden als Haupt- oder Hilfssysteme in vielen Industriebetrieben angewendet: vor allem in Trocknungsanlagen, Verbrennungsluft- und Rauchgassystemen, Zuluft-, Abluft-, Umluft- und Fortluftanlagen. Zur technischen Ausrüstung gehören auch der pneumatische Transport sowie die notwendigen Bauelemente. Raumlufttechnische Anlagen und die Klimatechnik sind hier aus Platzgründen nicht berücksichtigt. Es werden vorwiegend Eigenheiten von Ventilatoren und Ventilatorenanlagen behandelt.

Eine weitere Besonderheit in diesen Anlagen ist die übliche geringe Dichteänderung der Luft, da die Strömungsgeschwindigkeit hier weit unter der Schallgeschwindigkeit liegt, wobei der Begriff «Luft» sinngemäß auch für alle Gase gilt.

Das Buch behandelt Grundlagen und die gängige Praxis mit Beispielen für Studenten der Fachrichtungen Maschinenbau, Versorgungstechnik, Haustechnik, Umwelttechnik sowie Verfahrens- und Kraftwerkstechnik. Techniker und Ingenieure in der täglichen Praxis aller Industriebereiche, die lufttechnische Anlagen planen, projektieren und betreiben, erhalten – neben den theoretischen Ausführungen – übersichtliche Hilfsdiagramme, Tabellen, wichtige Daten und Berechnungsbeispiele, die die Arbeit erleichtern.

Resonanz aus Leserkreisen ist mir stets willkommen ([walter.wagner@wts-online.de](mailto:walter.wagner@wts-online.de)). Mein Dank gilt vor allem Herrn Prof. W. Bohl für seine Ausführungen. Dem Vogel Buchverlag danke ich für die gewohnt hervorragende Zusammenarbeit.

St. Leon-Rot

Walter Wagner

---

Der Onlineservice InfoClick bietet unter [www.vbm-fachbuch.de](http://www.vbm-fachbuch.de) nach Codeeingabe eventuell zusätzliche Informationen und Aktualisierungen. Fordern Sie für Ihr E-Book den Code unter [info@vbm-fachbuch.de](mailto:info@vbm-fachbuch.de) an!

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	5
<b>1 Stoffdaten von Luft</b> .....	11
1.1 Gasgesetze für ideale Gase .....	11
1.2 Zustandsgleichung .....	11
1.3 Normzustand .....	13
1.4 Gasmischungen .....	13
1.5 Spezifische Wärmekapazität .....	15
1.6 Barometerstand und Ortshöhe über dem Meeresspiegel .....	18
1.7 Rauchgase .....	19
<b>2 Feuchte Luft und <math>h</math>-<math>x</math>-Diagramm</b> .....	21
2.1 Feuchte Luft .....	21
2.1.1 Relative Feuchte .....	21
2.1.2 Absolute Feuchte $x$ .....	27
2.1.3 Dichte feuchter Luft $\rho_f$ .....	28
2.2 $h$ - $x$ -Diagramm für feuchte Luft .....	28
2.2.1 Wärmeinhalt .....	28
2.2.1.1 Ungesättigte Luft .....	28
2.2.1.2 Übersättigte Luft .....	29
2.2.2 Aufbau vom $h$ - $x$ -Diagramm .....	29
2.2.3 Zustandsänderungen im $h$ - $x$ -Diagramm .....	30
2.2.3.1 Mischung von Luftströmen .....	30
2.2.3.2 Erwärmung von Luft (ohne Feuchtezugabe) .....	31
2.2.3.3 Kühlung von Luft .....	31
2.2.3.4 Entfeuchtung ( $S/T$ -Faktor) .....	32
2.2.3.5 Befeuchtung von Luft .....	33
2.2.3.6 Adiabate Zustandsänderung .....	33
2.2.3.7 Handelsübliches $h$ - $x$ -Diagramm .....	34
<b>3 Luftvolumenstrombestimmung</b> .....	41
3.1 Allgemeines .....	41
3.2 Luftverschlechterung durch Fremdeinwirkung .....	41
3.3 Raumaufheizung durch freiwerdende Wärme .....	41
3.4 Luftverschlechterung von Personenansammlungen in geschlossenen Räumen .....	43
3.5 Luftwechszahlen .....	43
<b>4 Luftleitungen</b> .....	47
4.1 Allgemeines .....	47
4.2 Wahl der Geschwindigkeit .....	48
4.3 Material von Luftleitungen .....	48
4.3.1 Stahlblech und Al-Blech .....	48
4.3.2 Kunststoffe .....	50
4.3.3 Flexible Rohre und Schläuche .....	52

<b>5</b>	<b>Druckverlust</b> .....	59
5.1	Allgemeines .....	59
5.2	Grundgleichung für den Druckverlust in geraden Rohrleitungen .....	60
5.3	Druckabfall in Formstücken .....	62
5.4	Anlagenkennlinien .....	64
5.5	Optimierung von Luftkanälen .....	65
5.6	Leitungsnetze .....	76
5.7	Ermittlung vom Gesamtdruckverlust .....	76
5.7.1	Rohrleitungswiderstände .....	76
5.7.1.1	Reibungswiderstand $p_R$ .....	76
5.7.1.2	Reynoldszahl .....	78
5.7.1.3	Umlenkungswiderstände $p_U$ .....	78
5.7.2	Gerätewiderstände .....	79
5.7.3	Ausblasverlust .....	79
5.7.4	Gesamtwiderstand .....	84
5.8	Pneumatischer Transport .....	84
5.8.1	Wahl der Geschwindigkeit .....	84
5.8.2	Feststoff-Förderung im senkrechten Rohr .....	84
5.8.2.1	Physikalische Vorgänge .....	85
5.8.3	Feststoff-Förderung im waagrechten Rohr .....	85
5.8.4	Stopfgrenze .....	86
5.8.5	Druckabfall .....	86
<b>6</b>	<b>Strömungstechnik</b> .....	89
6.1	Zuluft- und Abluftkanäle .....	89
6.1.1	Bestimmungsgleichungen für Ausblas- und Absaugkanäle .....	90
6.2	Freie isotherme runde und ebene Strahlen (Freistrahlen) .....	95
6.2.1	Geschwindigkeitsprofil des Strahls .....	96
6.2.2	Wurfweite (Eindringtiefe) .....	98
6.3	Geschwindigkeitsreduzierung in Kanälen .....	99
6.3.1	Plötzliche Erweiterungen .....	99
6.3.2	Stetige Erweiterung (Diffusor) .....	99
6.4	Gestaltung von Krümmern .....	100
6.5	Stromvereinigung .....	101
6.5.1	Ausführung .....	101
6.5.1.1	Abgleich durch Verengung .....	103
6.6	Stromtrennung .....	104
6.7	Druckgleichheit in Verteilersystemen .....	105
6.8	Druckabfall mit Temperaturänderung im System .....	106
6.8.1	Ohne eingeschaltetes Heizregister .....	106
6.8.2	Mit eingeschaltetem Heizregister .....	107
6.9	Geschwindigkeitsfeld bei Saugöffnungen .....	107
<b>7</b>	<b>Ventilatoren</b> .....	109
7.1	Definition .....	109
7.2	Betriebsdaten .....	109
7.2.1	Volumenstrom $\dot{V}$ .....	109
7.2.2	Druckerhöhung des Ventilators .....	109
7.2.3	Spezifische Förderarbeit .....	110
7.2.4	Förderleistung .....	110
7.2.5	Wellenleistung .....	110
7.2.6	Wirkungsgrad .....	110
7.2.7	Dimensionslose Kennzahlen .....	111
7.2.8	Betriebsgeräusch .....	111
7.3	Einbauarten und Druckverlauf .....	112
7.4	Bauarten .....	112
7.5	Kennfelder .....	112
7.5.1	Allgemeines .....	112
7.5.2	Kennlinien von Radialventilatoren .....	119

7.5.2.1	Geschwindigkeitsdreieck und Umfangsgeschwindigkeit .....	119
7.5.2.2	Theoretischer Förderdruck .....	119
7.5.2.3	Kennlinie .....	122
7.5.2.4	Druckzahl .....	122
7.5.2.5	Volumenzahl .....	122
7.5.2.6	Leistungszahl .....	122
7.5.2.7	Leistungsbedarf .....	122
7.5.2.8	Temperaturerhöhung .....	122
7.5.3	Ähnlichkeitsgesetze .....	123
7.5.3.1	Proportionalitätsgesetz .....	123
7.5.3.2	Affinitätsgesetz .....	123
7.5.4	Anwendung in der Praxis üblicher Kennlinienblätter .....	124
7.6	Betriebspunkt .....	130
7.7	Regelung .....	133
7.7.1	Drosselregelung .....	133
7.7.2	Drallregelung .....	133
7.7.3	Drehzahlregelung .....	133
7.7.4	Parallel- und Reihenschaltung .....	134
7.7.4.1	Parallelschaltung .....	134
7.7.4.2	Reihenschaltung .....	136
7.7.5	Drosselung oder Bypass? .....	136
7.7.5.1	Zusätzliche Drosselung .....	136
7.7.5.2	Bypass .....	136
7.7.5.3	Vergleich der Maßnahmen .....	137
7.8	Beachtenswertes und praktische Anwendung .....	139
7.8.1	Einfluß der Dichte vom Fördermittel auf die Leistungsdaten der Ventilatoren .....	139
7.8.2	Diffusoren an Ventilatoren .....	141
7.8.3	Temperaturerhöhung in Ventilatoren .....	142
7.9	Antriebsauslegung .....	145
7.9.1	Motoren .....	145
7.9.2	Keilriemenantrieb .....	145
7.9.3	Kupplungen .....	146
7.10	Anlagen-Einbaufaktoren .....	147
7.11	Gehäusestellung und Bauformen .....	152
<b>8</b>	<b>Einbauten</b> .....	<b>155</b>
8.1	Grafische Symbole für Kanaleinbauten .....	155
8.2	Luftfilter .....	155
8.2.1	Allgemeines .....	155
8.2.2	Filterprüfung .....	155
8.3	Luftherhitzer .....	165
8.3.1	Bauformen .....	165
8.3.2	Wärmedurchgang beim Luftherhitzer .....	165
8.4	Luftkühler .....	168
8.4.1	Bauformen .....	168
8.4.2	Wärmedurchgang beim Luftkühler .....	168
8.4.3	Kühler ohne Wasserabscheidung .....	168
8.4.4	Kühler mit Wasserabscheidung .....	169
8.5	Fliehkraftabscheidung .....	170
8.5.1	Abscheidung im Zyklon .....	170
8.6	Anschluß von Einbauten .....	173
<b>9</b>	<b>Geräusche</b> .....	<b>175</b>
9.1	Allgemeines .....	175
9.2	Geräuschbeurteilung .....	175
9.2.1	Bewertete Schallpegel .....	177
9.3	Ventilatorengeräusche .....	177
9.3.1	Drehklanggeräusche .....	177
9.3.2	Turbulenz- und Wirbelgeräusche .....	177

9.3.3	Sekundäre Geräusche .....	178
9.3.4	Abschätzung vom Ventilatorgeräusch .....	178
9.4	Geräuschausbreitung .....	180
9.4.1	Körperschall .....	180
9.4.2	Luftschall .....	180
9.5	Luftschalldämpfung .....	181
9.5.1	Natürliche Luftschalldämpfung .....	181
9.5.1.1	Gerade Kanäle .....	182
9.5.1.2	Kanalumlenkungen .....	182
9.5.1.3	Kanalverzweigungen .....	183
9.5.1.4	Querschnittserweiterungen .....	183
9.5.1.5	Luftauslässe .....	184
9.5.1.6	Sonstige Schallpegelabnahmen .....	184
9.5.2	Künstliche Schalldämpfung .....	184
9.5.2.1	Absorptionsschalldämpfer .....	185
9.6	Schallpegel im Raum .....	186
<b>10</b>	<b>Meßtechnik</b> .....	<b>193</b>
10.1	Druckmessung .....	193
10.1.1	Statischer Druck $p_s$ .....	193
10.1.2	Dynamischer Druck $p_d$ .....	193
10.1.3	Gesamtdruck $p_t$ .....	193
10.2	Volumenstrommessung .....	194
10.2.1	Allgemeines .....	194
10.2.2	Wirkdruckverfahren .....	194
10.2.3	Verwendung ungenormter Drosselgeräte .....	196
10.2.3.1	Messung mit Einströmeßdüse .....	200
10.2.3.2	Messung im Einlauf mit Blenden .....	200
10.2.3.3	Messung im Auslauf .....	201
10.2.3.4	Druckverlust .....	201
10.2.3.5	Auslegung .....	201
10.2.4	Netzmethoden .....	202
10.2.4.1	Runde Leitungen .....	203
10.2.4.2	Meßverfahren .....	204
10.2.4.3	Meßgeräte .....	204
10.2.5	Krümmermethode .....	204
10.3	Messung vom Druckabfall an Bauteilen .....	205
10.4	Messung der Ventilator Kennlinie .....	206
10.4.1	Allgemeines .....	206
10.4.2	Prüfstandsversuche .....	206
10.4.3	Versuche an Ventilatoren im Einbauzustand (In-situ-Messungen) .....	212
<b>11</b>	<b>Tabellen- und Bildanhang</b> .....	<b>213</b>
	<b>Formelzeichen</b> .....	<b>219</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>221</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>223</b>

# 1 Stoffdaten von Luft

## 1.1 Gasgesetze für ideale Gase

Für *ideale Gase* gelten die nachstehend aufgeführten Gesetze.

Bei **gleichbleibender Temperatur** verhalten sich die Dichten  $\rho$  eines Gases wie die dazugehörigen *absoluten* Drücke  $p$ .

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

□ *Gesetz von Boyle-Mariotte*

Bei **gleichbleibendem Druck** verhalten sich die Dichten  $\rho$  eines Gases umgekehrt wie die *absoluten* Temperaturen  $T$ :

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{Gl. 1.2})$$

□ *Gesetz von Gay-Lussac*

**Ändern sich Druck und Temperatur** eines Gases gleichzeitig, so gilt:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1 \cdot T_2}{p_2 \cdot T_1} \quad \text{oder}$$

$$\frac{v_1 \cdot p_1}{T_1} = \frac{v_2 \cdot p_2}{T_2} \quad (\text{Gl. 1.3})$$

□ *Vereinigtes Boyle-Mariotte-Gay-Lussacsches Gesetz*

Bei gleichem Druck und gleicher Temperatur enthalten die Gase in gleichen Räumen gleich viel Moleküle, nämlich  $2,69 \cdot 10^{19}/\text{cm}^3$  (*Avogadro'sche Zahl*). Die Dichten verhalten sich wie die molekularen Massen.

□ *Gesetz von Avogadro*

Ist  $\tilde{M}$  die molekulare Masse eines Gases, so enthalten  $\tilde{M}$  kg aller Gase die gleiche Anzahl von Molekülen, nämlich  $N = 6,023 \cdot 10^{26}$  (*Loschmidtsche Zahl*).

Eine Menge von  $\tilde{M}$  kg eines Gases nennt man 1 kmol (Kilomol), das für alle idealen Gase denselben Rauminhalt  $V$  hat. Bei  $0^\circ\text{C}$  und 1,013 bar ist  $\tilde{V}_0 = 22,414 \text{ m}^3/\text{kmol}$  (*Molvolumen*).

Aus der molaren Masse  $\tilde{M}$  errechnet sich die Dichte:  $\rho = \tilde{M}/\tilde{V}_0$ .

Eigenschaften von Gasen siehe Tabelle 1.1.

**Beispiel:**

Wie groß ist die Dichte von Sauerstoff bei  $0^\circ\text{C}$  und 1,013 bar?

Dichte  $\rho_n = \tilde{M}/\tilde{V}_0 = 32/22,4 = 1,43 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

## 1.2 Zustandsgleichung

Aus der Gleichung 1.3 folgt, daß der Wert  $p \cdot v/T$  für alle Zustände eines Gases der gleiche ist. Man nennt diesen Wert die Gaskonstante  $R$  ( $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ).

Werte von  $R$  für verschiedene Gase siehe Tabelle 1.1.

$$\frac{p \cdot v}{T} = R \quad \text{oder}$$

$$p \cdot v = R \cdot T \quad (\text{Gl. 1.4})$$

Dies ist die *Zustandsgleichung* der Gase, bezogen auf 1 kg.

Bezogen auf eine beliebige Gasmasse  $M$  mit dem Volumen  $V$  lautet die Zustandsgleichung:

$$p \cdot V = M \cdot R \cdot T \quad (\text{Gl. 1.5})$$

Bezieht man diese Gleichung auf 1 mol, also auf  $\tilde{M}$  kg eines Gases, so lautet sie:

$$p \cdot \tilde{V}_0 = \tilde{M} \cdot R \cdot T \quad \text{oder} \quad \tilde{V}_0 = \frac{\tilde{M} \cdot R \cdot T}{p}$$

Da das Molvolumen  $\tilde{V}_0$  für alle idealen Gase bei konstantem Druck und konstanter Temperatur gleich ist, muß auch  $\tilde{M} \cdot R$  für alle Gase den gleichen Wert haben. Man nennt  $\tilde{M} \cdot R = \tilde{R}_0$  die allgemeine Gaskonstante, eine universelle Konstante der Physik. Ihr Wert ergibt sich mit dem Molvolumen eines idea-

len Gases, das bei Standardbedingungen  $\tilde{V}_0 = 0,022\,414\text{ m}^3$  beträgt, als

$$\tilde{R}_0 = \frac{p \cdot \tilde{V}_0}{T} = \frac{101\,325 \cdot 0,022\,414}{273,15}$$

$$\tilde{R}_0 = 8,314 \left( \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) = 8\,314 \left( \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right)$$

Tabelle 1.1 Gaskonstante, Dichte und spezifische Wärmekapazität von Gasen

Gas	Symbol	Molekulare Masse $\tilde{M}$	Molares Normvolumen $\text{m}^3/\text{kmol } \tilde{V}_0$	Gaskonstante $R$ J/(kg · K)	Dichte bei 0 °C, 1,013 bar $\rho_n/\text{kg}/\text{m}^3$	Dichteverhältnis Luft = 1	Spez. Wärmekap. bei 0 °C		$\kappa = c_p/c_v$
							$c_p$ kJ/(kg · K)	$c_v$ kJ/(kg · K)	
Acetylen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,04	22,23	319,5	1,171	0,906	1,51	1,22	1,26
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	17,03	22,06	488,2	0,772	0,597	2,05	1,56	1,31
Argon	Ar	39,95	22,39	208,2	1,784	1,380	0,52	0,32	1,65
Chlorwasserstoff	HCl	36,46	22,20	228,0	1,642	1,270	0,81	0,58	1,40
Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,07	22,19	276,5	1,356	1,049	1,73	1,44	1,20
Ethylchlorid	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	64,50	–	128,9	2,880	2,228			1,16
Ethylen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,03	22,25	296,6	1,261	0,975	1,61	1,29	1,25
Helium	He	4,003	22,43	2077,0	0,178	0,138	5,24	3,16	1,66
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	44,01	22,26	188,9	1,977	1,529	0,82	0,63	1,30
Kohlenoxid	CO	28,01	22,40	296,8	1,250	0,967	1,04	0,74	1,40
Luft (CO <sub>2</sub> )-frei	–	28,96	22,40	287,1	1,293	1,000	1,00	0,72	1,40
Methan	CH <sub>4</sub>	16,04	22,36	518,3	0,717	0,555	2,16	1,63	1,32
Methylchlorid	CH <sub>3</sub> Cl	50,48	–	164,7	2,307	1,784	0,73	0,57	1,29
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	32,00	22,39	259,8	1,429	1,105	0,91	0,65	1,40
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub>	64,06	21,86	129,8	2,931	2,267	0,61	0,48	1,27
Stickoxid	NO	30,01	22,39	277,1	1,340	1,037	1,00	0,72	1,39
Stickoxydul	N <sub>2</sub> O	44,01	22,25	188,9	1,978	1,530	0,89	0,70	1,27
Stickstoff	N <sub>2</sub>	28,01	22,40	296,8	1,250	0,967	1,04	0,74	1,40
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	2,016	22,43	4124,0	0,0899	0,0695	14,38	10,26	1,41
Wasserdampf	H <sub>2</sub> O	18,02	(21,1)	461,5	(0,804)	(0,621)	1,93	1,45	1,33

Einige technische Gase

	Zusammensetzung in Vol.-%							$\tilde{M}$	$\rho_n$ kg/m <sup>3</sup>	$R$ J/(kg · K)
	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub>			
Koksofengas	5,4	56,8	23,9	0,6	1,6	2,2	9,7	11,29	0,504	736,8
Stadtgas	1,0	63,6	17,6	–	1,9	13,2	2,7	11,65	0,52	714,0
Wassergas	40,0	50,0	0,3	–	–	5,0	4,7	16,04	0,716	518,6
Koks-Generatorgas	29,0	11,0	0,3	–	–	5,0	54,7	31,16	1,391	266,9
Gichtgas	31,0	2,3	0,3	–	–	9,0	57,4	32,66	1,458	254,7
Erdgas	–	–	90,5	2,5	–	0,4	6,6	17,38	0,776	478,6

Mit der allgemeinen Gaskonstante  $\tilde{R}_0$  und der Substanzmenge  $n$  lässt sich die allgemeine Zustandsgleichung formulieren:

$$p \cdot V = n \cdot \tilde{R}_0 \cdot T \quad (\text{Gl. 1.6})$$

**Beispiel:**

Luft hat bei 0 °C und Atmosphärendruck (1,013 bar = 1,013 · 10<sup>5</sup> Pa) eine Dichte von 1,293 kg/m<sup>3</sup>. Daraus errechnet man die Gaskonstante:

$$R = \frac{p \cdot v}{T} = \frac{p}{\rho_n \cdot T} = \frac{101\,300}{1,293 \cdot 273} = 287 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

**Beispiel:**

Wie groß ist die Gaskonstante von Sauerstoff?

$$R = \frac{\tilde{R}_0}{M} = \frac{8\,314}{32} = 259,8 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

**Beispiel:**

Wieviel CO<sub>2</sub> befindet sich in einer 10-l-Flasche bei 20 °C und 75 bar?

$$M = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{75 \cdot 10^5 \cdot 0,01}{188,9 \cdot 293} = 1,35 \text{ (kg)}$$

Gase, die den obigen Gesetzen genau folgen, nennt man vollkommene oder *ideale Gase*. Die wirklichen (realen) Gase folgen den Gesetzen nur angenähert, und zwar desto genauer, je geringer die Drücke sind.

Bei Luft, Wasserstoff und anderen Gasen ist für Drücke bis 20 bar die Abweichung ≈ 1%, für Drücke in der Nähe der Verflüssigung sind die Abweichungen größer.

Reale Gase können nach folgender Formel berechnet werden:

$$\varrho = \frac{p}{Z \cdot R \cdot T} \quad (\text{Gl. 1.6 a})$$

Z = Realgasfaktor (s. Bild 11.1)

### 1.3 Normzustand

Ein Gas befindet sich nach DIN 1343 im Normzustand, wenn es die Temperatur 0 °C und den Druck 1,013 bar hat. Es sind jedoch auch andere Bezugzustände im Gebrauch.

*Normvolumen* ist das Volumen eines Gases im Normzustand. Es dient dazu, volumenmäßige Mengenangaben von Gasen und Dämpfen miteinander vergleichbar zu machen.

Normdichten verschiedener Gase siehe Tabelle 1.1.

Hat ein Gas bei  $\theta$  °C und  $p$  bar das Volumen  $V$ , ist das Normvolumen

$$V_n = \frac{273}{273 + \theta} \cdot \frac{p}{1,013} \cdot V \quad \text{oder}$$

$$V_n = 269,5 \cdot \frac{p \cdot V}{T} \quad (\text{Gl. 1.7})$$

## 1.4 Gasmischungen

Die Summe der Teildrücke  $p_1, p_2, \dots$  einer Mischung von Gasen ist gleich dem Gesamtdruck  $p$ :

$$p_{\text{ges}} = p_1 + p_2 + \dots \quad (\text{Gl. 1.8})$$

□ *Gesetz von Dalton*

Jedes Gas in einer Mischung nimmt das gesamte Volumen  $V$  so ein, als ob die anderen Gase der Mischung nicht vorhanden wären.

Teildruck (Partialdruck):

$$p_1 = m_1 \cdot \frac{R_1}{R_m} \cdot p = r_1 \cdot p \quad (\text{Gl. 1.9})$$

$m_1$  Masseanteil  
 $r_1$  Volumenanteil

Die Dichte einer Gasmischung ist:

$$\varrho_m = r_1 \cdot \varrho_1 + r_2 \cdot \varrho_2 + \dots \quad (\text{Gl. 1.10})$$

$\varrho_1, \varrho_2$  Dichten der Einzelgase

Masseanteil des Einzelgases:

$$m_1 = r_1 \cdot \frac{\varrho_1}{\varrho_m} = r_1 \cdot \frac{R_m}{R_1} = r_1 \cdot \frac{M_1}{M_m} \quad (\text{Gl. 1.11})$$

Volumenanteil des Einzelgases:

$$r_1 = m_1 \cdot \frac{\varrho_m}{\varrho_1} = m_1 \cdot \frac{R_1}{R_m} = m_1 \cdot \frac{M_m}{M_1} = \frac{p_1}{p} \quad (\text{Gl. 1.12})$$

Tabelle 1.2 Zusammensetzung, molare Masse, Gaskonstante, Normdichte und molares Normvolumen der Luft und des Luftstickstoffes [1.1]

trockene Luft	Volumenanteile		Masseanteile	
1. Stickstoff	0,78084		0,75510	
2. Argon	0,00934		0,01289	
3. Neon	0,00002		0,00001	
4. Kohlendioxid	0,00032		0,00049	
5. Sauerstoff	0,20948		0,23151	
6. Luftstickstoff (Bestandteile 1. bis 4.)	0,79052		0,76849	
Luftstickstoff	Volumenanteile		Masseanteile	
1. Stickstoff	0,98775		0,98258	
2. Argon	0,01182		0,01677	
3. Neon	0,00003		0,00001	
4. Kohlendioxid	0,00040		0,00064	
	Wasserdampf	trockene Luft	Luftstickstoff	
molare Masse	18,0152	28,965	28,1609	kg/kmol
spez. Gaskonstante	0,46144	0,28689	0,29510	kJ/(kg · K)
Normdichte	0,80389	1,2930	1,2570	kg/m <sup>3</sup>
molares Normvolumen	22,41	22,401	22,403	m <sup>3</sup> /kmol

**Beispiel:**

Der Volumenanteil  $r_1$  des Sauerstoffes in der Luft ist 21 (Vol.-%). Dann ist der Masseanteil:

$$m_1 = r_1 \cdot \frac{R_m}{R_1} = 21 \cdot \frac{287}{259,8} = 23,2 \text{ (Mass.-%)}$$

$$R_m \text{ Gaskonstante der Luft} = 287 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

$$R_1 \text{ Gaskonstante von } O_2 = 259,8 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

**Beispiel:**

Trockene Luft ist ein Gemisch aus  $N_2$ ,  $O_2$ , Ar,  $CO_2$  und Ne, deren Molanteile in Tabelle 1.2 angegeben sind, sowie einiger anderer Gase (Kr, He,  $H_2$ , Xe,  $O_3$ ) in vernachlässigbar kleiner Menge. Es ist die Gaskonstante zu ermitteln.

Die Molmasse der trockenen Luft errechnet man aus den Molanteilen  $r_i$  und den Molmassen  $\tilde{M}_i$  der 5 Komponenten:

$$\begin{aligned} \tilde{M} &= \Sigma(r_i \cdot \tilde{M}_i) \\ &= 0,78084 \cdot 28,0134 + 0,20948 \cdot 31,9988 \\ &\quad + 0,00934 \cdot 39,948 + 0,00032 \cdot 44,010 \\ &\quad + 0,00002 \cdot 20,179 \end{aligned}$$

$$\tilde{M} = \Sigma(r_i \cdot \tilde{M}_i) = 28,9647 \text{ (kg/kmol)}$$

Damit erhalten wir für ihre Gaskonstante:

$$R = \frac{\tilde{R}_0}{\tilde{M}} = \frac{8\,314,51}{28,9647} = 287 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

**Beispiel:**

Von einem Rauchgas mit  $\vartheta = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 800 \text{ mbar}$  und den Volumen-Anteilen  $N_2 = 78\%$ ,  $O_2 = 3,8\%$ ,  $CO_2 = 13,2\%$ ,  $H_2O = 5\%$  soll die Dichte  $\rho$  bestimmt werden.

	$\tilde{M}$	$r_i$	$q_{i,n}$	$r_i \cdot q_{i,n}$
N <sub>2</sub>	28	0,780	1,250	0,975
O <sub>2</sub>	32	0,038	1,429	0,054
CO <sub>2</sub>	44	0,132	1,964	0,259
H <sub>2</sub> O	18	0,050	0,803	0,040
			$q_{m,n} =$	1,328

$$\varrho = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{0,8 \cdot 10^5}{279,5 \cdot 523} = 0,547 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

## 1.5 Spezifische Wärmekapazität

Man unterscheidet bei Gasen folgende spezifische Wärmekapazitäten:

$c_p$  spez. Wärmekapazität bei konstantem Druck bezogen auf 1 kg : (kJ/(kg · K))

$c_v$  spez. Wärmekapazität bei konstantem Volumen bezogen auf 1 kg : (kJ/(kg · K))

scheinbare molare Masse

$$\tilde{M} = 22,4 \cdot \varrho_{m,n} = 29,75 \text{ kg}$$

$$R = \frac{\tilde{R}_0}{\tilde{M}} = \frac{8314,51}{29,75} = 279,5 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

Tabelle 1.3

Wahre spezifische Wärmekapazität  $c_p$  von Gasen in kJ/(kg · K) bei 1,013 bar konstantem Druck

Temperatur [°C]	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	Luft
0	0,915	14,10	1,039	1,859	0,815	1,004
50	0,925	14,32	1,041	1,875	0,864	1,007
100	0,934	14,45	1,042	1,890	0,914	1,010
200	0,963	14,50	1,052	1,941	0,993	1,024
500	1,048	14,66	1,115	2,132	1,155	1,092
1 000	1,123	15,62	1,215	2,482	1,290	1,184
1 500	1,164	16,56	1,269	2,755	1,350	1,235
2 000	1,200	17,39	1,298	2,938	1,378	1,265

Gleichungen nach [1.2] im Bereich: +25 °C <  $\vartheta$  < 400 °C  
für Luft: -20 °C <  $\vartheta$  < 200 °C

Gas	Approximationsgleichung	max. Fehler
O <sub>2</sub>	$c_p = 0,907 + \frac{2,893535}{10^4} \cdot \vartheta - \frac{1,113131}{10^7} \cdot \vartheta^2 + \frac{3,474747}{10^{10}} \cdot \vartheta^3$	0,13 %
N <sub>2</sub>	$c_p = 1,040 - \frac{1,050303}{10^4} \cdot \vartheta + \frac{9,369697}{10^7} \cdot \vartheta^2 - \frac{9,212121}{10^{10}} \cdot \vartheta^3$	0,20 %
H <sub>2</sub> O	$c_p = 1,862 + \frac{2,858485}{10^4} \cdot \vartheta + \frac{6,148483}{10^7} \cdot \vartheta^2 - \frac{2,060606}{10^{10}} \cdot \vartheta^3$	0,06 %
CO <sub>2</sub>	$c_p = 0,804 + \frac{1,570414}{10^3} \cdot \vartheta - \frac{3,588586}{10^6} \cdot \vartheta^2 + \frac{3,923232}{10^9} \cdot \vartheta^3$	0,58 %
SO <sub>2</sub>	$c_p = 0,584 + \frac{9,173737}{10^4} \cdot \vartheta - \frac{1,629293}{10^6} \cdot \vartheta^2 + \frac{1,494949}{10^9} \cdot \vartheta^3$	0,32 %
CO	$c_p = 1,041 - \frac{1,626869}{10^4} \cdot \vartheta + \frac{1,477980}{10^6} \cdot \vartheta^2 - \frac{1,680808}{10^9} \cdot \vartheta^3$	0,08 %
Luft	$c_p = 1,006256 + \frac{2,120536}{10^5} \cdot \vartheta + \frac{4,180195}{10^7} \cdot \vartheta^2 - \frac{1,521916}{10^{10}} \cdot \vartheta^3$	0,05 %

Tabelle 1.4 a Stoffdaten von trockener Luft [1.3]

Luft (trocken) bei  $p = 1,01325 \text{ bar}$

**Siedebeginn**

bei 1,01325 bar:  $-194,0 \text{ }^\circ\text{C}$  n. DIN 51 356  
 Fließgrenze (Pourpoint):  $- \text{ }^\circ\text{C}$  n. DIN ISO 3016

**Obere Anwendungsgrenzen**

Zulässige Vorlauftemperatur:  $^\circ\text{C}$   
 Zulässige Filmtemperatur:  $^\circ\text{C}$

**Untere Anwendungsgrenzen (Anhaltswerte)**

Füllen und Anfahren bei  $\nu = 300 \text{ mm}^2/\text{s}$ :  $^\circ\text{C}$   
 Wirtschaftlicher Betrieb bei  $\nu = 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ :  $^\circ\text{C}$

**Physikalische Ergänzungsdaten**

Farbzahl:  $(-)$  n. DIN ISO 2049  
 Molmasse:  $28,96 \text{ kg/kmol}$   
 Oberflächenspannung:  $\text{N/m}$  bei  $^\circ\text{C}$   
 Spez. elektr. Widerstand:  $\Omega\text{cm}$  bei  $^\circ\text{C}$   
 Heizwert:  $\text{kJ/kg}$  n. DIN 5499

**Stoff-Ergänzungsdaten**

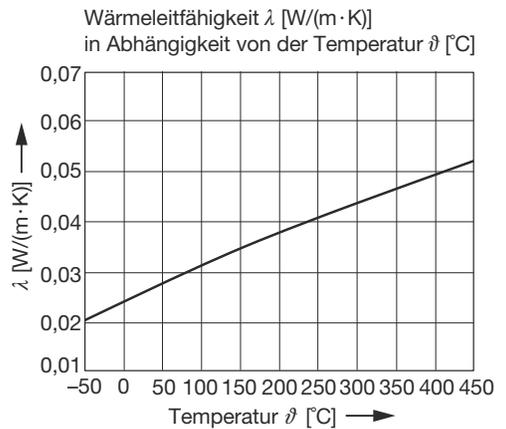
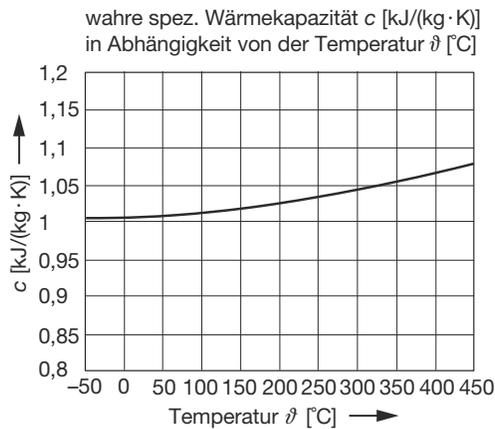
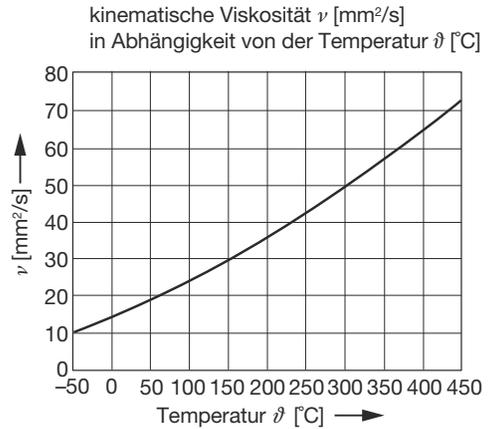
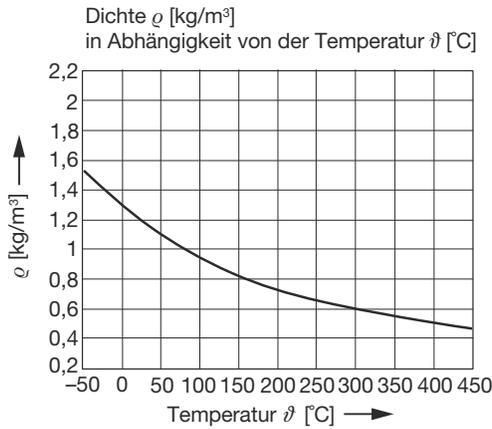
Flammpunkt:  $^\circ\text{C}$  n. DIN 51 758  
 Zündtemperatur:  $^\circ\text{C}$  n. DIN 51 794  
 Neutralisationszahl:  $\text{mgKOH/g}$  n. DIN 51 558 T 1  
 Gehalt an Asphalt:  $\text{Mass.-%}$  n. DIN 51 595  
 Koksrückstand:  $\text{Mass.-%}$  n. DIN 51 551  
 Aschegehalt:  $\text{Mass.-%}$  n. DIN EN 7  
 Wassergehalt:  $\text{Mass.-%}$  n. DIN ISO 3733  
 Schwefelgehalt:  $\text{Mass.-%}$  n. DIN 51 400 T 6  
 Korrosionswirkung  
 auf Kupfer:  $(-)$  n. DIN 51 759

**Weitere Ergänzungsdaten**

Krit. Temperatur:  $-140,63 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Krit. Druck:  $37,66 \text{ bar}$   
 Krit. Dichte:  $313 \text{ kg/m}^3$   
 Tripelpunkttemp.:  $-213,15 \text{ }^\circ\text{C}$

Stamm-Stoffdaten Herstellerrangaben (Stützstellen) mit * gekennzeichnet					Aus den Stammfunktionen berechnet					
Temperatur $\vartheta$ $^\circ\text{C}$	Dichte $\rho$ $\text{kg/m}^3$	Wahre sp. Wärmekap. $c$ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Kinemat. Viskosität $\nu$ $\text{mm}^2/\text{s}$	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Vol. spez. Wärmekap. $C$ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$	Spez. Enthalpie $h$ $\text{kJ/kg}$	Dynam. Viskosität $\eta$ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	Temp.-leitfähigkeit $\alpha$ $\text{mm}^2/\text{s}$	Vol. ausd.-koeffizient $\beta$ $1/\text{K}$	Prandtlzahl $Pr$ $-$
-60	1,64	1,007	8,6	0,019	1,65	-60,4	0,014	11,8	3,42E-03	0,730
-40	1,50	1,007	10,1	0,021	1,51	-40,2	0,015	14,0	3,42E-03	0,726
-20	1,38	1,007	11,8	0,023	1,39	-20,1	0,016	16,3	3,43E-03	0,722
0	1,29	1,006	13,5	0,024	1,28	0,0	0,017	18,9	3,41E-03	0,717
20	1,19	1,007	15,4	0,026	1,20	20,1	0,018	21,5	3,66E-03	0,715
40	1,11	1,007	17,3	0,027	1,12	40,3	0,019	24,3	3,42E-03	0,712
60	1,05	1,009	19,3	0,029	1,05	60,4	0,020	27,1	3,42E-03	0,710
80	0,99	1,010	21,4	0,030	1,00	80,6	0,021	30,1	3,42E-03	0,708
100	0,93	1,012	23,5	0,031	0,94	100,8	0,022	33,3	3,42E-03	0,707
120	0,89	1,014	25,8	0,033	0,90	121,1	0,023	36,5	3,42E-03	0,706
140	0,84	1,016	28,1	0,034	0,86	141,4	0,024	39,8	3,42E-03	0,705
160	0,80	1,019	30,5	0,035	0,82	161,8	0,025	43,2	3,42E-03	0,705
180	0,77	1,022	32,9	0,037	0,79	182,2	0,025	46,7	3,42E-03	0,705
200	0,74	1,026	35,5	0,038	0,76	202,7	0,026	50,3	3,42E-03	0,705
220	0,69	1,029	38,1	0,039	0,71	223,2	0,026	55,1	3,61E-03	0,691
240	0,66	1,033	40,8	0,040	0,68	243,8	0,027	59,1	3,64E-03	0,689
260	0,64	1,037	43,5	0,042	0,66	264,5	0,028	62,7	3,57E-03	0,694
280	0,62	1,041	46,3	0,043	0,65	285,3	0,029	66,3	3,52E-03	0,699
300	0,61	1,046	49,2	0,044	0,64	306,2	0,030	69,4	3,42E-03	0,709
320	0,59	1,049	52,1	0,045	0,62	327,1	0,031	73,2	3,41E-03	0,712
340	0,57	1,054	55,1	0,046	0,60	348,1	0,032	76,9	3,38E-03	0,717
360	0,55	1,059	58,2	0,048	0,58	369,3	0,032	81,6	3,41E-03	0,713
380	0,54	1,063	61,3	0,049	0,57	390,5	0,033	84,8	3,34E-03	0,723
400	0,52	1,069	64,5	0,050	0,55	411,8	0,033	90,4	3,42E-03	0,714
420	0,51	1,073	67,7	0,051	0,54	433,2	0,034	93,9	3,38E-03	0,721
440	0,49	1,078	71,0	0,052	0,52	454,7	0,035	99,4	3,44E-03	0,714
460	0,46	1,083	74,4	0,053	0,50	476,3	0,035	105,9	3,55E-03	0,702

Tabelle 1.4 b

 Luft (trocken) bei  $p = 1,01325 \text{ bar}$ 


Gleichungen und Konstanten für die Stammfunktionen:

$$\rho, c, \nu, \lambda(\vartheta) = a_0 + a_1 \cdot \vartheta + a_2 \cdot \vartheta^2 + a_3 \cdot \vartheta^3 + \dots + a_n \cdot \vartheta^n$$

	Dichte $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	wahre spez. Wärmekapazität $c$ kJ/(kg·K)	kinematische Viskosität $\nu$ mm <sup>2</sup> /s	Wärme- leitfähigkeit $\lambda$ W/(m·K)
$a_0$	1,29	1,006	13,54	2,40E-02
$a_1$	-4,63E-03	1,77E-05	8,90E-02	7,65E-05
$a_2$	1,09E-05	4,61E-07	1,10E-04	-4,28E-08
$a_3$	-1,03E-08	-2,92E-10	-3,49E-08	3,18E-11

 Temperatur  $\vartheta$  in °C einsetzen

Das Verhältnis der spezifischen Wärmen  $\kappa = c_p/c_v$ , das bei Berechnungen von Zustandsänderungen wichtig ist, beträgt nach Versuchswerten:

- bei 1atomigen Gasen:  $\kappa = 1,67 = 5/3$
- bei 2atomigen Gasen:  $\kappa = 1,40 = 7/5$
- bei 3atomigen Gasen:  $\kappa = 1,33 = 8/6$

In Tabelle 1.3 sind die spezifischen Wärmekapazitäten von verschiedenen Gasen aufgeführt.

In Tabelle 1.4 sind die Stoffwerte von trockener Luft dargestellt.

### 1.6 Barometerstand und Ortshöhe über dem Meeresspiegel

Liegt der Aufstellungsort einer Anlage über NN, ist zur Ermittlung der Stoffdaten mit dem mittleren absoluten Druck der Ortshöhe zu rechnen (Tabelle 1.5).

Berechnung des Luftdruckes:

$$p_L = p_{L,0} \cdot \exp\left(-\frac{g \cdot H}{R_L \cdot T_L}\right) \pm \Delta p \quad (\text{Gl. 1.13})$$

- $p_{L,0}$  101 325 (Pa)
- $H$  Höhe über NN (m)
- $R_L$  287 (J/(kg · K))
- $T_L = 273 + \vartheta_L$  (K)
- $\Delta p$  witterungsbedingter Schwankungsbereich
- $\Delta p = 4300$  (Pa)

**Beispiel:**

In einer Höhe von 1 300 m über NN (Normal Null) beträgt die Lufttemperatur  $\vartheta = 23$  °C, die Gaskonstante  $R = 287$  J/(kg · K). Mit welcher Dichte ist zu rechnen?

Aus Tabelle 1.5 entnimmt man  $p = 867$  mbar.

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{0,867 \cdot 10^5}{287 \cdot 296} = 1,02 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Tabelle 1.5 Barometerstand in Abhängigkeit von der Ortshöhe über NN bei ca. 15 °C

Ortshöhe [m]	Druck, abs. [mbar]	Ortshöhe [m]	Druck, abs. [mbar]
0	1013	1 600	836
100	1002	1 700	825
200	990	1 800	815
300	978	1 900	805
400	966	2 000	796
500	955	2 200	776
600	944	2 400	756
700	932	2 600	738
800	921	2 800	719
900	910	3 000	701
1 000	899	3 200	684
1 100	888	3 400	666
1 200	877	3 600	649
1 300	867	3 800	633
1 400	856	4 000	616
1 500	846		

## 1.7 Rauchgase

Für die Verbrennung ist Sauerstoff ( $O_2$ ) erforderlich. Hierfür wird üblicherweise der Sauerstoff der Luft verwendet.

Als Brennstoff dienen (ob fest, flüssig oder gasförmig) Kohlenstoff (C) sowie Wasserstoff ( $H_2$ ).

Als Reaktionsprodukte ergeben sich somit  $CO_2$  und  $H_2O$ .

Je nach Massenanteil von  $CO_2$  und  $H_2O$  verändern sich die Stoffdaten der Rauchgase gegenüber der Luft.

Gaskonstante:

$$R_g \approx (0,2869 - 0,0746 \cdot m_{CO_2} + 0,1746 \cdot m_{H_2O}) \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (\text{Gl. 1.14})$$

Die im **Anhang** aufgeführten Nährungsgleichungen (Tabelle 11.1) haben einen Gültigkeitsbereich von:  $0^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 2000^\circ\text{C}$ .

Die Gleichungen gelten mit  $m_{CO_2} = 0$  auch für feuchte sowie trockene Luft und für  $m_{H_2O} = 0$  auch für trockene Rauchgase.



## 2 Feuchte Luft und $h$ - $x$ -Diagramm

### 2.1 Feuchte Luft

Feuchte Luft ist ein Gemisch aus *trockener* Luft und Wasserdampf. Beide Komponenten verhalten sich wie ideale Gase.

Normale Luft enthält immer eine mehr oder weniger große Wasserdampfmenge in unsichtbarer Form, die einen bestimmten Dampfdruck ausübt. Die Dampfmenge, die  $1 \text{ m}^3$  Luft aufnehmen kann, ist begrenzt und von der Temperatur abhängig. Je höher die Temperatur, desto größer die Dampfmenge, die aufgenommen werden kann. Bei der größtmöglichen Dampfmenge ist der Wasserdampfdruck gleich dem Siededruck bei der entsprechenden Temperatur. Wird mehr Wasserdampf zugeführt als dem Sättigungswert entspricht, schlägt sich der überschüssige Dampf in Form von *Nebel* (= kleinste Wassertröpfchen) nieder.

Der Gesamtdruck  $p_{\text{ges}}$  setzt sich aus den Partialdrücken der Luft  $p_L$  und  $p_D$  zusammen.

$$p_{\text{ges}} = p_L + p_D \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Der Partialdruck des Wasserdampfes  $p_D$  erreicht bei gegebener Temperatur  $\vartheta$  als Maximalwert den zu  $\vartheta$  gehörigen Sättigungsdruck  $p_D''$ .

#### 2.1.1 Relative Feuchte $\varphi$

$$\varphi = \frac{p_D}{p_D''} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Tabelle 2.1 Dampfdruck  $p_D''$ , Wassergehalt  $x_s$ , Enthalpie  $h''$ , Dichte  $\rho_f$  von wassergesättigter Luft bei 1000 mbar sowie Verdampfungsenthalpie  $\Delta h_v$

$\vartheta$ °C	$p_D''$ mbar	$x_s$ g/kg	$h''$ kJ/kg	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\Delta h_v$ kJ/kg
-20	1,03	0,64	-18,5	1,38	2839
-19	1,13	0,71	-17,4	1,37	2839
-18	1,25	0,78	-16,4	1,36	2839
-17	1,37	0,85	-15,0	1,36	2838
-16	1,50	0,94	-13,8	1,35	2838
-15	1,65	1,03	-12,5	1,35	2838
-14	1,81	1,13	-11,3	1,34	2838
-13	1,98	1,23	-10,0	1,34	2838
-12	2,17	1,35	- 8,7	1,33	2837
-11	2,37	1,48	- 7,4	1,33	2837
-10	2,59	1,62	- 6,0	1,32	2837
- 9	2,83	1,77	- 4,6	1,32	2836
- 8	3,09	1,93	- 3,2	1,31	2836
- 7	3,38	2,11	- 1,8	1,31	2836
- 6	3,68	2,30	- 0,3	1,30	2836
- 5	4,01	2,50	+ 1,2	1,30	2835
- 4	4,37	2,73	+ 2,8	1,29	2835
- 3	4,75	2,97	+ 4,4	1,29	2835

Tabelle 2.1 (Fortsetzung)

$\vartheta$ °C	$p''_D$ mbar	$x_s$ g/kg	$h''$ kJ/kg	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\Delta h_v$ kJ/kg
- 2	5,17	3,23	+ 6,0	1,28	2834
- 1	5,62	3,52	+ 7,8	1,28	2834
0	6,11	3,82	9,5	1,27	2500
1	6,56	4,11	11,3	1,27	2498
2	7,05	4,42	13,1	1,26	2496
3	7,57	4,75	14,9	1,26	2493
4	8,13	5,10	16,8	1,25	2491
5	8,72	5,47	18,7	1,25	2489
6	9,35	5,87	20,7	1,24	2486
7	10,01	6,29	22,8	1,24	2484
8	10,72	6,74	25,0	1,23	2481
9	11,47	7,22	27,2	1,23	2479
10	12,27	7,73	29,5	1,22	2477
11	13,12	8,27	31,9	1,22	2475
12	14,01	8,84	34,4	1,21	2472
13	15,00	9,45	37,0	1,21	2470
14	15,97	10,10	39,5	1,21	2468
15	17,04	10,78	42,3	1,20	2465
16	18,17	11,51	45,2	1,20	2463
17	19,36	12,28	48,2	1,19	2460
18	20,62	13,10	51,3	1,19	2458
19	21,96	13,97	54,5	1,18	2456
20	23,37	14,88	57,9	1,18	2453
21	24,85	15,85	61,4	1,17	2451
22	26,42	16,88	65,0	1,17	2448
23	28,08	17,97	68,8	1,16	2446
24	29,82	19,12	72,8	1,16	2444
25	31,67	20,34	76,9	1,15	2441
26	33,60	21,63	81,3	1,15	2439
27	35,64	22,99	85,8	1,14	2437
28	37,78	24,42	90,5	1,14	2434
29	40,04	25,94	95,4	1,14	2432
30	42,41	27,52	100,5	1,13	2430
31	44,91	29,25	106,0	1,13	2427
32	47,53	31,07	111,7	1,12	2425
33	50,29	32,94	117,6	1,12	2422
34	53,18	34,94	123,7	1,11	2420
35	56,22	37,05	130,2	1,11	2418
36	59,40	39,28	137,0	1,10	2415
37	62,74	41,64	144,2	1,10	2413
38	66,24	44,12	151,6	1,09	2411
39	69,91	46,75	159,5	1,08	2408

Tabelle 2.1 (Fortsetzung)

$\vartheta$ °C	$p_D''$ mbar	$x_s$ g/kg	$h''$ kJ/kg	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$\Delta h_v$ kJ/kg
40	73,75	49,52	167,7	1,08	2406
41	77,77	52,45	176,4	1,08	2403
42	81,98	55,54	185,5	1,07	2401
43	86,39	58,82	195,0	1,07	2398
44	91,00	62,26	205,0	1,06	2396
45	95,82	65,92	215,6	1,05	2394
46	100,85	69,76	226,7	1,05	2391
47	106,12	73,84	238,4	1,04	2389
48	111,62	78,15	250,7	1,04	2386
49	117,36	82,70	263,6	1,03	2384
50	123,35	87,52	277,3	1,03	2382
51	128,60	92,62	291,7	1,02	2379
52	136,13	98,01	306,8	1,02	2377
53	142,93	103,73	322,9	1,01	2375
54	150,02	109,80	339,8	1,00	2372
55	157,41	116,19	357,7	1,00	2370
56	165,09	123,00	376,7	0,99	2367
57	173,12	130,23	396,8	0,99	2365
58	181,46	137,89	418,0	0,98	2363
59	190,15	146,04	440,6	0,97	2360
60	199,17	154,72	464,5	0,97	2358
61	208,6	163,95	489,9	0,96	2356
62	218,4	173,80	517,0	0,95	2353
63	228,5	184,22	545,6	0,95	2350
64	239,1	195,55	576,4	0,94	2348
65	250,10	207,44	609,2	0,93	2345
66	261,5	220,13	643,9	0,93	2343
67	273,3	233,92	681,5	0,92	2341
68	285,6	248,66	721,7	0,91	2338
69	298,3	264,42	764,6	0,90	2336
70	311,6	281,54	811,1	0,90	2333
71	325,3	299,89	861,0	0,89	2331
72	339,6	319,85	915,1	0,88	2328
73	354,3	341,30	973,3	0,87	2326
74	385,5	364,67	1036,6	0,86	2323
75	385,50	390,20	1105,7	0,85	2320
80	473,60	559,61	1563,0	0,81	2309
85	578,00	851,90	2351,0	0,76	2295
90	701,10	1459,00	3983,0	0,70	2282
95	845,20	3396,00	9190,0	0,64	2269
100	1013,0			0,58	2257

Tabelle 2.2 Zustandsdaten feuchter Luft mit:  $p$  1000 mbar,  $p_D$  Dampfdruck in mbar,  $x$  Wassergehalt in g/kg tr. Luft,  $h$  Enthalpie feuchter Luft in kJ/(1 +  $x$ ) kg

$\vartheta$ °C		Relative Luftfeuchtigkeit in %									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	$p_D$	0,61	1,22	1,83	2,44	3,06	3,67	4,28	4,89	5,50	6,11
	$x$	0,38	0,76	1,14	1,52	1,91	2,29	2,67	3,06	3,44	3,82
	$h$	0,95	1,90	2,85	3,80	4,75	5,70	6,65	7,60	8,55	9,55
1	$p_D$	0,66	1,31	1,97	2,62	3,28	3,94	4,59	5,25	5,90	6,56
	$x$	0,41	0,82	1,23	1,63	2,05	2,46	2,87	3,28	3,69	4,11
	$h$	2,02	3,05	4,07	5,07	6,12	7,15	8,18	9,20	10,2	11,3
2	$p_D$	0,71	1,41	2,12	2,82	3,53	4,23	4,94	5,64	6,35	7,05
	$x$	0,44	0,88	1,32	1,76	2,20	2,64	3,09	3,53	3,97	4,42
	$h$	3,10	4,20	5,30	6,40	7,50	8,60	9,73	10,8	11,9	13,1
3	$p_D$	0,76	1,51	2,27	3,03	3,79	4,54	5,30	6,06	6,81	7,57
	$x$	0,47	0,94	1,42	1,89	2,37	2,84	3,31	3,79	4,26	4,75
	$h$	4,17	5,34	6,55	7,73	8,93	10,1	11,3	12,5	13,7	14,9
4	$p_D$	0,81	1,63	2,44	3,25	4,07	4,88	5,69	6,50	7,32	8,13
	$x$	0,50	1,02	1,52	2,03	2,54	3,05	3,56	4,07	4,59	5,10
	$h$	5,25	6,55	7,81	9,09	10,4	11,6	12,9	14,2	15,5	16,8
5	$p_D$	0,87	1,74	2,61	3,48	4,36	5,23	6,10	6,97	7,84	8,72
	$x$	0,54	1,08	1,63	2,17	2,72	3,27	3,82	4,37	4,92	5,47
	$h$	6,35	7,71	9,09	10,4	11,8	13,2	14,6	16,0	17,3	18,7
6	$p_D$	0,93	1,87	2,81	3,74	4,68	5,61	6,55	7,48	8,42	9,35
	$x$	0,58	1,17	1,75	2,34	2,92	3,51	4,10	4,69	5,28	5,87
	$h$	7,45	8,93	10,4	11,9	13,3	14,8	16,3	17,8	19,3	20,7
7	$p_D$	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,01
	$x$	0,62	1,25	1,87	2,50	3,13	3,75	4,38	5,02	5,65	6,29
	$h$	8,55	10,1	11,7	13,3	14,9	16,4	18,0	19,6	21,2	22,8
8	$p_D$	1,07	2,14	3,22	4,29	5,36	6,43	7,50	8,58	9,65	10,72
	$x$	0,67	1,33	2,01	2,68	3,35	4,03	4,70	5,38	6,06	6,72
	$h$	9,68	11,3	13,1	14,7	16,4	18,1	19,8	21,5	23,2	25,0
9	$p_D$	1,15	2,29	3,44	4,59	5,74	6,88	8,03	9,18	10,32	11,47
	$x$	0,72	1,43	2,15	2,87	3,59	4,31	5,04	5,76	6,49	7,22
	$h$	10,8	12,6	14,4	16,2	18,0	19,8	21,7	23,5	25,3	27,2
10	$p_D$	1,23	2,45	3,68	4,91	6,14	7,36	8,59	9,82	11,04	12,27
	$x$	0,77	1,53	2,30	3,07	3,84	4,61	5,39	6,17	6,94	7,73
	$h$	11,9	13,9	15,8	17,7	19,7	21,6	23,6	25,5	27,5	29,5
11	$p_D$	1,31	2,62	3,94	5,25	6,56	7,87	9,18	10,5	11,8	13,12
	$x$	0,82	1,63	2,46	3,28	4,11	4,93	5,76	6,60	7,43	8,27
	$h$	13,1	15,1	17,2	19,3	21,4	23,4	25,5	27,6	29,7	31,8
12	$p_D$	1,40	2,80	4,20	5,60	7,01	8,41	9,81	11,2	12,6	14,0
	$x$	0,87	1,75	2,62	3,50	4,39	5,28	6,16	7,05	7,94	8,84
	$h$	14,2	16,4	18,6	20,8	23,1	25,3	27,5	29,8	32,0	34,3
13	$p_D$	1,50	3,00	4,50	6,00	7,50	9,00	10,5	12,0	13,5	15,0
	$x$	0,93	1,87	2,81	3,75	4,70	5,65	6,60	7,55	8,51	9,45
	$h$	15,3	17,7	20,1	22,5	24,9	27,3	29,7	32,1	34,5	36,9
14	$p_D$	1,60	3,20	4,80	6,40	8,00	9,60	11,2	12,8	14,4	16,0
	$x$	1,00	2,00	3,00	4,01	5,02	6,03	7,05	8,06	9,06	10,1
	$h$	16,5	19,1	21,6	24,1	26,7	29,2	31,8	34,4	37,0	39,5
15	$p_D$	1,70	3,40	5,11	6,81	8,52	10,2	11,9	13,6	15,3	17,0
	$x$	1,06	2,12	3,19	4,26	5,34	6,41	7,49	8,58	9,66	10,8
	$h$	17,7	20,4	23,1	25,8	28,5	31,2	33,9	36,7	39,4	42,0
16	$p_D$	1,81	3,63	5,45	7,27	9,09	10,9	12,7	14,5	16,4	18,2
	$x$	1,13	2,27	3,41	4,56	5,71	6,85	8,00	9,15	10,3	11,5
	$h$	18,9	21,7	24,6	27,5	30,4	33,3	36,2	39,1	42,1	45,1

Tabelle 2.2 (Fortsetzung)

$\theta$ °C		Relative Luftfeuchtigkeit in %									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
17	$p_D$	1,94	3,87	5,81	7,74	9,68	11,6	13,6	15,5	17,4	19,4
	$x$	1,21	2,42	3,63	4,85	6,08	7,30	8,58	9,79	11,0	12,3
	$h$	20,1	23,1	26,2	29,3	32,4	35,5	38,7	41,8	44,8	48,1
18	$p_D$	2,06	4,12	6,19	8,25	10,3	12,4	14,4	16,5	18,6	20,6
	$x$	1,28	2,57	3,87	5,17	6,47	7,81	9,09	10,4	11,8	13,1
	$h$	21,2	24,5	27,8	31,1	34,3	37,8	41,0	44,3	47,9	51,2
19	$p_D$	2,20	4,39	6,59	8,78	11,0	13,2	15,4	17,6	19,8	22,0
	$x$	1,37	2,74	4,13	5,51	6,92	8,32	9,73	11,1	12,6	14,0
	$h$	22,5	25,9	29,5	33,0	36,5	40,1	43,7	47,1	50,9	54,5
20	$p_D$	2,34	4,67	7,01	9,35	11,7	14,0	16,4	18,7	21,0	23,4
	$x$	1,46	2,92	4,39	5,87	7,36	8,83	10,4	11,9	13,3	14,9
	$h$	23,7	27,4	31,1	34,9	38,7	42,4	46,4	50,2	53,7	57,8
21	$p_D$	2,49	4,97	7,46	9,94	12,4	14,9	17,4	19,9	22,4	24,9
	$x$	1,55	3,11	4,67	6,24	7,81	9,41	11,0	12,6	14,3	15,9
	$h$	24,9	28,9	32,9	36,4	40,8	44,9	48,9	53,0	57,3	61,4
22	$p_D$	2,64	5,28	7,93	10,6	13,2	15,9	18,5	21,1	23,8	26,4
	$x$	1,65	3,30	4,97	6,66	8,32	10,1	11,7	13,4	15,2	16,9
	$h$	26,2	30,4	34,6	38,9	43,1	47,7	51,7	56,0	60,6	64,9
23	$p_D$	2,81	5,62	8,42	11,25	14,0	16,8	19,7	22,5	25,3	28,1
	$x$	1,75	3,52	5,28	7,06	8,83	10,6	12,5	14,3	16,2	18,0
	$h$	27,4	32,0	36,4	41,0	45,5	50,0	54,8	59,4	64,2	68,8
24	$p_D$	2,98	5,96	8,95	11,9	14,9	17,9	20,9	23,9	26,8	29,8
	$x$	1,86	3,73	5,62	7,49	9,41	11,3	13,3	15,2	17,1	19,1
	$h$	28,7	33,5	38,3	43,1	47,9	52,8	57,8	62,7	67,5	72,6
25	$p_D$	3,17	6,33	9,50	12,7	15,8	19,0	22,2	25,3	28,5	31,7
	$x$	1,98	3,96	5,97	8,00	9,99	12,1	14,1	16,2	18,3	20,4
	$h$	30,0	35,1	40,2	45,4	50,4	55,8	60,9	66,3	71,6	76,9
26	$p_D$	3,36	6,72	10,1	13,4	16,8	20,2	23,5	26,9	30,2	33,6
	$x$	2,10	4,21	6,35	8,45	10,6	12,8	15,0	17,2	19,4	21,6
	$h$	31,3	36,7	42,2	47,5	53,0	58,6	64,2	69,8	75,4	81,1
27	$p_D$	3,56	7,13	10,7	14,3	17,8	21,4	24,9	28,5	32,1	35,6
	$x$	2,22	4,47	6,73	9,02	11,3	13,6	15,9	18,3	20,6	23,0
	$h$	32,7	38,4	44,2	50,0	55,8	61,7	67,5	73,7	79,5	85,7
28	$p_D$	3,78	7,56	11,3	15,1	18,9	22,7	26,4	30,2	34,0	37,8
	$x$	2,36	4,74	7,11	9,54	12,0	14,5	16,9	19,4	21,9	24,4
	$h$	34,0	40,1	46,1	52,3	58,6	65,0	71,1	77,5	83,9	90,3
29	$p_D$	4,00	8,00	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0
	$x$	2,50	5,02	7,55	10,1	12,7	15,3	17,9	20,6	23,2	25,9
	$h$	35,4	41,8	48,3	54,8	61,4	68,1	74,7	81,6	88,3	95,1
30	$p_D$	4,24	8,48	12,7	17,0	21,2	25,4	29,7	33,9	38,2	42,4
	$x$	2,65	5,32	8,00	10,8	13,5	16,2	19,0	21,8	24,7	27,5
	$h$	36,8	43,6	50,4	57,6	64,5	71,4	78,6	85,7	93,1	100,3
31	$p_D$	4,49	8,98	13,5	18,0	22,5	26,9	31,4	35,9	40,4	44,9
	$x$	2,81	5,64	8,51	11,4	14,3	17,2	20,2	23,2	26,2	29,2
	$h$	38,2	45,4	52,8	60,2	67,6	75,0	82,7	90,3	98,0	105,7
32	$p_D$	4,75	9,51	14,3	19,0	23,8	28,5	33,3	38,0	42,8	47,5
	$x$	2,97	5,97	9,02	12,1	15,2	18,3	21,4	24,6	27,8	31,1
	$h$	39,6	47,3	55,1	63,0	70,9	78,8	86,8	95,0	103,2	111,3
33	$p_D$	5,03	10,1	15,1	20,1	25,1	30,2	35,2	40,2	45,3	50,3
	$x$	3,14	6,35	9,54	12,8	16,0	19,4	22,7	26,1	29,5	32,9
	$h$	41,0	49,3	57,4	65,8	74,0	82,7	91,1	99,9	108,6	117,3

Tabelle 2.2 (Fortsetzung)

$\theta$ °C		Relative Luftfeuchtigkeit in %									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
34	$p_D$	5,32	10,6	16,0	21,3	26,6	31,9	37,2	42,5	47,9	53,2
	$x$	3,33	6,66	10,1	13,5	17,0	20,5	24,0	27,6	31,3	34,9
	$h$	42,5	51,1	59,9	68,6	77,6	86,5	95,5	104,2	114,2	123,7
35	$p_D$	5,62	11,2	16,9	22,5	28,1	33,7	39,4	45,0	50,6	56,2
	$x$	3,52	7,05	10,7	14,3	18,0	21,7	25,5	33,2	33,2	37,0
	$h$	44,0	53,1	62,4	71,7	81,2	90,7	100,4	120,2	120,2	129,9
36	$p_D$	5,94	11,9	17,8	23,8	29,7	35,6	41,6	47,8	53,5	59,4
	$x$	3,72	7,49	11,3	15,2	19,0	23,0	27,0	31,2	35,2	39,3
	$h$	45,5	55,2	65,0	75,0	84,8	95,0	105,3	115,6	126,4	136,9
37	$p_D$	6,27	12,6	18,8	25,1	31,4	37,6	43,9	50,2	56,5	62,7
	$x$	3,92	7,94	11,9	16,0	20,2	24,3	28,6	32,9	37,3	41,6
	$h$	47,1	57,4	67,6	78,1	88,9	99,4	110,5	121,5	132,8	143,9
38	$p_D$	6,62	13,2	19,9	26,5	33,1	39,7	46,4	53,0	59,6	66,2
	$x$	4,15	8,32	12,6	16,9	21,3	25,7	30,3	34,8	39,4	44,1
	$h$	48,7	59,4	70,4	81,4	92,8	104,1	115,9	127,5	139,3	151,4
39	$p_D$	6,99	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0	49,0	56,0	63,0	69,9
	$x$	4,38	8,83	13,3	17,9	22,6	27,3	32,1	36,9	41,8	46,8
	$h$	50,3	61,7	73,2	85,1	97,1	109,2	121,6	133,9	146,5	159,4
40	$p_D$	7,38	14,8	22,1	29,5	36,9	44,3	51,6	59,0	66,4	73,8
	$x$	4,62	9,34	14,1	18,9	23,8	28,8	33,8	39,0	44,2	49,5
	$h$	51,9	64,0	76,3	88,7	101,3	114,1	127,0	140,4	153,8	167,7
41	$p_D$	7,78	15,6	23,3	31,1	38,9	46,7	54,4	62,2	70,0	77,8
	$x$	4,88	9,86	14,8	20,0	25,2	30,5	35,8	41,3	46,8	52,5
	$h$	53,6	66,4	79,1	92,5	105,9	119,6	133,3	147,4	161,6	176,3
42	$p_D$	8,20	16,4	24,6	32,8	41,0	49,2	57,4	65,6	73,8	82,0
	$x$	5,14	10,4	15,7	21,1	26,6	32,2	37,9	43,7	49,6	55,5
	$h$	55,3	68,8	82,5	96,4	110,6	125,0	139,7	154,7	169,9	185,3
43	$p_D$	8,64	17,3	25,9	34,6	43,2	51,8	60,5	69,1	77,8	86,4
	$x$	5,42	11,0	16,5	22,3	28,1	34,0	40,1	46,2	52,5	58,8
	$h$	57,0	71,4	85,6	100,5	115,5	130,7	146,5	162,2	178,5	194,7
44	$p_D$	9,10	18,2	27,3	36,4	45,5	54,6	63,7	72,8	81,9	91,0
	$x$	5,71	11,5	17,5	23,5	29,7	35,9	42,3	48,8	55,5	62,3
	$h$	58,7	73,7	89,2	104,7	120,7	136,8	153,2	170,0	187,3	204,9
45	$p_D$	9,58	19,2	28,7	38,3	47,9	57,5	67,1	76,7	86,2	95,8
	$x$	6,02	12,2	18,4	24,8	31,3	38,0	44,7	51,7	58,7	65,9
	$h$	60,6	76,5	92,5	109,1	125,9	143,2	160,5	178,6	196,7	215,3
46	$p_D$	10,1	20,2	30,3	40,3	50,4	60,5	70,6	80,7	90,8	100,8
	$x$	6,35	12,8	19,4	26,1	33,0	40,1	47,3	54,6	62,1	69,8
	$h$	62,4	79,1	96,2	113,5	131,3	149,7	168,3	187,2	206,6	226,2
47	$p_D$	10,6	21,2	31,8	42,4	53,1	63,7	74,3	84,9	95,5	106,1
	$x$	6,66	13,5	20,4	27,5	34,9	42,3	49,9	57,7	65,7	73,8
	$h$	64,2	81,9	99,8	118,2	137,3	156,5	176,1	196,3	217,0	238,0
48	$p_D$	11,2	22,3	33,5	44,6	55,8	67,0	78,1	89,3	100,4	111,6
	$x$	7,05	14,2	21,6	29,0	36,8	44,7	52,7	61,0	69,4	78,1
	$h$	66,3	84,8	103,9	123,1	143,3	163,7	184,5	206,0	227,7	250,2
49	$p_D$	11,7	23,5	35,2	46,9	58,7	70,4	82,2	93,9	105,7	117,4
	$x$	7,36	15,0	22,7	30,6	38,8	47,1	55,7	64,5	73,5	82,7
	$h$	68,1	87,9	107,8	128,3	149,5	171,0	193,3	216,1	239,5	263,3
50	$p_D$	12,3	24,7	37,0	49,3	61,7	74,0	86,3	98,7	111,0	123,3
	$x$	7,75	15,8	23,9	32,3	40,9	49,7	58,8	68,1	77,7	87,5
	$h$	70,1	91,0	112,0	133,8	156,1	178,9	202,5	226,6	251,5	276,9

Den Sättigungsdruck  $p_D''$  erhält man aus Tabelle 2.1 oder errechnet ihn [2.1] ( $p_D''$  in Pa,  $g_L$  in °C):

$$p_D'' = 611 \cdot \exp\left(-\frac{1,91275}{10^4} + \frac{7,258}{10^2} \cdot g_L - \frac{2,939}{10^4} \cdot g_L^2 + \frac{9,841}{10^7} \cdot g_L^3 - \frac{1,92}{10^9} \cdot g_L^4\right) \quad (\text{Gl. 2.3})$$

gültig für:

$$0^\circ\text{C} \leq g_L \leq 100^\circ\text{C}; \text{ Fehler} < 0,02\%$$

$$p_D'' = 611 \cdot \exp\left(\frac{6}{10^5} + \frac{7,13274}{10^2} \cdot g_L - \frac{2,581631}{10^4} \cdot g_L^2 + \frac{6,311955}{10^7} \cdot g_L^3 - \frac{7,167112}{10^{10}} \cdot g_L^4\right) \quad (\text{Gl. 2.4})$$

gültig für:

$$100^\circ\text{C} < g_L \leq 200^\circ\text{C}; \text{ Fehler} < 0,03\%$$

*Taupunkt* ist diejenige Temperatur, bis zu der man ungesättigte feuchte Luft abkühlen muß, bis sie gesättigt ist.

Bestimmung der Sattdampf­temperatur (Taupunktstemperatur) [2.2] ( $g_T$  in °C,  $p_D''$  in Pa; Fehler  $\leq 0,2\%$ ):

$$g_T = \frac{3864,005}{18,657 - \ln\left(\frac{p_D''}{100}\right)} - 229,218 \quad (\text{Gl. 2.5})$$

## 2.1.2 Absolute Feuchte $x$

Da wechselnde Massen von Wasserdampf in der Luft vorhanden sind, bezieht man die Feuchte auf die Masse von 1 kg trockener Luft.

Sind je kg trockener Luft  $x$  kg Dampf beige­mischt, so ist die Masse der Mischung  $(1 + x)$  kg.

Aus den Gasgesetzen ergibt sich:

$$\text{Wasserdampf: } p_D \cdot V = M_D \cdot R_D \cdot T \quad (\text{Gl. 2.6})$$

$$\text{Luft: } p_L \cdot V = M_L \cdot R_L \cdot T \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Durch Gleichsetzen des Volumens erhält man:

$$\frac{M_D}{M_L} = \frac{p_D}{p_L} \cdot \frac{R_L}{R_D}$$

Die absolute Feuchte (Wassergehalt) ist definiert als:

$$x = \frac{M_D}{M_L} \quad \text{und somit:}$$

$$x = \frac{p_D}{p_L} \cdot \frac{R_L}{R_D} \quad (\text{Gl. 2.8})$$

Mit den Gaskonstanten:

$$R_D = 461,4 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \quad \text{und} \quad R_L = 287,1 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$$

erhält man:

$$x = \frac{287,1}{461,4} \cdot \frac{p_D}{p_L} = 0,6222 \cdot \frac{p_D}{p_L} \quad (\text{Gl. 2.9})$$

und schließlich mit:  $p_L = p_{\text{ges}} - p_D$

$$x = 0,6222 \cdot \frac{p_D}{p_{\text{ges}} - p_D} \left(\frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg tr. Luft}}\right) \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Der Partialdruck des Wasserdampfes  $p_D$  berechnet sich bei gegebener Feuchte  $x$  somit zu:  $p_D$

$$p_D = \frac{x \cdot p_{\text{ges}}}{0,6222 + x} \quad (\text{Gl. 2.10 a})$$

Die absolute Feuchte gesättigter Luft ( $\varphi = 100\%$ ) wird mit  $x_s$  bezeichnet (Tabelle 2.1 u. 2.2).

### Beispiel:

Gesättigte Luft von 15 °C und 1 000 mbar hat nach Tabelle 2.1 einen Dampfdruck vom 17,0 mbar.

Wassergehalt:

$$x_s = 0,6222 \cdot \frac{17}{1000 - 17} = 10,76 \text{ g/kg tr. Luft}$$

### 2.1.3 Dichte feuchter Luft $\varrho_f$

Die Dichte feuchter Luft gibt die Gemischmasse bezogen auf das Volumen an:

$$\varrho_f = \varrho_L + \varrho_D \quad (\text{Gl. 2.11})$$

mit: 
$$\varrho_i = \frac{p_i}{R_i \cdot T} \quad (\text{Gl. 2.12})$$

wird: 
$$\varrho_L = \frac{p_L}{R_L \cdot T} = 3,483 \cdot \frac{p_L}{T} \quad (\text{Gl. 2.13})$$

und 
$$\varrho_D = \frac{p_D}{R_D \cdot T} = 2,167 \cdot \frac{p_D}{T} \quad (\text{Gl. 2.14})$$

daraus folgt:

$$\varrho_f = 3,483 \cdot \frac{p_L}{T} + 2,167 \cdot \frac{p_D}{T} \quad (\text{Gl. 2.15})$$

und mit:  $p_L = p_{\text{ges}} - p_D$

$$\varrho_f = 3,483 \cdot \frac{p_{\text{ges}}}{T} - 1,316 \cdot \frac{p_D}{T} \quad (\text{Gl. 2.16})$$

$p_L$ ,  $p_D$  und  $p_{\text{ges}}$  in (mbar);  $T$  in (K) und  $\varrho$  in ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) für die Gl. 2.13 bis Gl. 2.16.

Oder allgemein:

$$\varrho_f = \frac{p_{\text{ges}}}{R_L \cdot T} \cdot \frac{1 + x}{1 + \frac{R_D}{R_L} \cdot x} \quad (\text{Gl. 2.16 a})$$

Anmerkung:

Feuchte Luft ist also immer leichter als trockene Luft bzw. das spezifische Volumen  $v_f$  feuchter Luft, mit

$$v_f = \frac{1}{\varrho_f} \quad (\text{Gl. 2.17})$$

ist immer größer als das spezifische Volumen  $v_L$  trockener Luft.

## 2.2 $h$ - $x$ -Diagramm für feuchte Luft

### 2.2.1 Wärmehalt

Für wärmetechnische Berechnungen mit feuchter Luft benötigt man den Wärmehalt (Enthalpie  $h$ ) bei den verschiedenen Temperaturen und Wassergehalten. Die spezifische Enthalpie der Luft-Wasserdampf-Mischung ist gleich der Summe der Enthalpien der Bestandteile bezogen auf 1 kg trockene Luft und  $\vartheta_B$ .

$$h_{1+x} = h_L + x \cdot h_D \quad \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \quad (\text{Gl. 2.18})$$

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot \Delta\vartheta_{L,B} + x \cdot (\Delta h_{v,B} + c_{p,D} \cdot \Delta\vartheta_{L,B}) \quad (\text{Gl. 2.19})$$

Als Nullpunkt (Bezugstemperatur  $\vartheta_B$ ) wird gewählt:

$$\vartheta_B = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$x = 0$  (Wasser im flüssigen Zustand)

$\Delta\vartheta_{L,B}$  ist die Temperaturdifferenz der Luft zwischen Lufttemperatur  $\vartheta_L$  und Bezugstemperatur  $\vartheta_B$ .

$$\Delta\vartheta_{L,B} = \vartheta_L - \vartheta_B \quad (\text{Gl. 2.20})$$

Mit  $\vartheta_B = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  wird  $\Delta\vartheta_{L,B} = \vartheta_L$  und ist somit korrekt in der Einheit Kelvin (K) anzugeben.

Der Begriff «spezifisch» bedeutet hier – abweichend von der regulären Bezeichnung – nicht den Bezug auf die Masse des Gas-Dampf-Gemisches (feuchte Luft), sondern den Bezug auf die darin enthaltene Masse des Gases (trockene Luft).

#### 2.2.1.1 Ungesättigte Luft

Damit lautet die Enthalpiegleichung für die feuchte Luft ( $0 < x < x_s$ ):

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot \vartheta_L + x \cdot (\Delta h_{v,B} + c_{p,D} \cdot \vartheta_L) \quad (\text{Gl. 2.21})$$

**2.2.1.2 Übersättigte Luft**

- **Bei Nebel** ( $\vartheta_L > 0\text{ °C}$ )  
 Im Bereich übersättigter Luft ( $x > x_s$ ) und  $\vartheta_L > 0\text{ °C}$  liegt zusätzlich Flüssigkeitsnebel vor mit der Masse  $(x - x_s)$ .

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot \vartheta_L + x_s \cdot (\Delta h_{V,B} + c_{p,D} \cdot \vartheta_L) + (x - x_s) \cdot c_{p,W} \cdot \vartheta_L \quad (\text{Gl. 2.22})$$

- **Bei Eisnebel** ( $\vartheta_L \leq 0\text{ °C}$ )  
 Befindet sich das übersättigte Gemisch im Eisnebel, d. h.  $\vartheta_L \leq 0\text{ °C}$ , ist der zusätzliche Anteil von Erstarrungs- und Eiswärme zu berücksichtigen.

$$h_{1+x} = c_{p,L} \cdot \vartheta_L + c_s \cdot (\Delta h_{V,B} + c_{p,D} \cdot \vartheta_L) + (x - x_s) \cdot (\Delta h_{Sch,B} + c_{p,Eis} \cdot \vartheta_L) \quad (\text{Gl. 2.23})$$

Es gilt überschlägig:

- $c_{p,W} = 4,190\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $c_{p,D} = 1,861\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $c_{p,L} = 1,006\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $c_{p,Eis} \approx 2,090\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- $\Delta h_{V,B} = 2501\text{ kJ}/\text{kg}$
- $\Delta h_{Sch,B} = -344\text{ kJ}/\text{kg}^*$

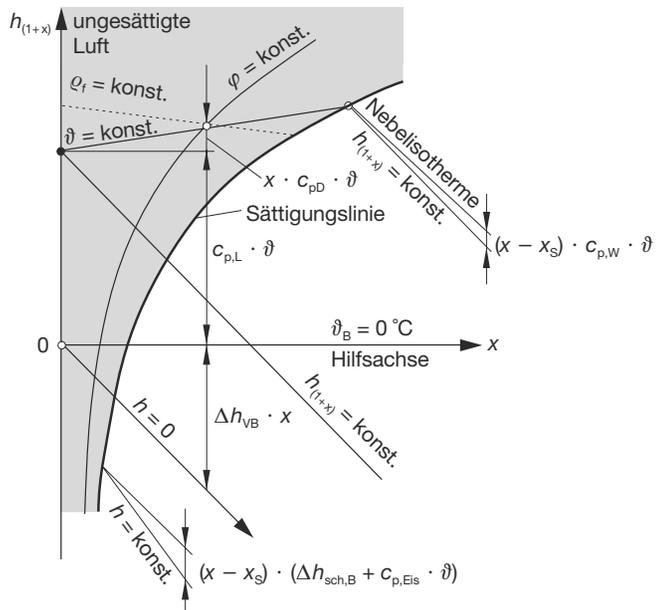
\* Da die Enthalpie für Wasser von  $0\text{ °C} = 0$  gesetzt wird, hat Eis eine negative Enthalpie.

**2.2.2 Aufbau vom *h-x*-Diagramm**  
(Bild 2.1)

Zur Erleichterung der Rechnungen mit feuchter Luft und zur übersichtlichen Darstellung von Zustandsänderungen dient das *h-x*-Diagramm von MOLLIER (1923).

Das Diagramm ergibt sich aus den vorausgegangenen Gleichungen. Es ist ein schiefwinkliges Koordinatensystem, das auf der schräg nach rechts unten laufenden Abszissenachse die *x*-Werte (Wassergehalt) und auf der Ordinatenachse  $h_{1+x}$ -Werte (Wärmeinhalt) enthält. Zum leichteren Ablesen der *x*-Achse ist eine waagrechte Hilfsachse vorhanden.

Bild 2.1  
Aufbau des *h-x*-Diagramms



In das Diagramm ist die Sättigungskurve für den Gesamtdruck  $p_{ges}$  eingetragen, die das Diagramm in ein Gebiet ungesättigter Luft und gesättigter Luft (Nebelgebiet) aufteilt.

Die Isothermen sind im ungesättigten Gebiet schwach ansteigende Geraden, die an der Sättigungskurve nach rechts unten *umknicken*.

Weiter sind eingetragen die relative Luftfeuchte  $\varphi$ , die Dichte  $\rho_f$  und der Dampfdruck  $p_D$  der Luft.

### 2.2.3 Zustandsänderungen im $h$ - $x$ -Diagramm

#### 2.2.3.1 Mischung von Luftströmen (Bild 2.2)

Zwei Massenströme von trockener Luft  $\dot{M}_{L,1}$  und  $\dot{M}_{L,2}$  mit je einem Wassergehalt von  $x_1$  und  $x_2$  werden miteinander vermischt.

Es entsteht ein Massenstrom  $\dot{M}_{L,3}$  trockener Luft mit dem Wassergehalt  $x_3$ .  
Massenbilanz:

$$\dot{M}_{L,1} + \dot{M}_{L,2} = \dot{M}_{L,3} \quad (\text{Gl. 2.24})$$

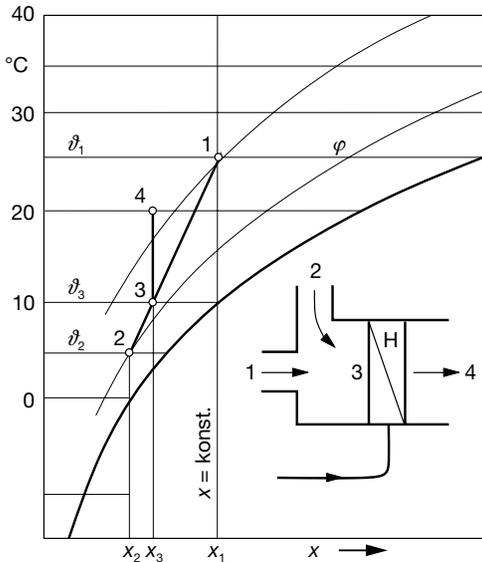


Bild 2.2 Zustandsänderung der Luft bei Mischung von zwei Luftmassenströmen und danach erfolgter Erwärmung

Bilanz des Wassergehalts:

$$x_1 \cdot \dot{M}_{L,1} + x_2 \cdot \dot{M}_{L,2} = x_3 \cdot \dot{M}_{L,3} \quad (\text{Gl. 2.25})$$

Aus beiden Gleichungen erhält man:

$$x_3 = \frac{x_1 \cdot \dot{M}_{L,1} + x_2 \cdot \dot{M}_{L,2}}{\dot{M}_{L,1} + \dot{M}_{L,2}} \quad (\text{Gl. 2.26})$$

Die Enthalpie der Mischung ist:

$$h_1 \cdot \dot{M}_{L,1} + h_2 \cdot \dot{M}_{L,2} = h_3 \cdot \dot{M}_{L,3} \quad (\text{Gl. 2.27})$$

Mit Gleichung 2.24 ergibt sich:

$$h_3 = \frac{h_1 \cdot \dot{M}_{L,1} + h_2 \cdot \dot{M}_{L,2}}{\dot{M}_{L,1} + \dot{M}_{L,2}} \quad (\text{Gl. 2.28})$$

Die Darstellung erfolgt nun im  $h$ - $x$ -Diagramm durch Bezug der Einzelmassenströme auf den Gesamtmassenstrom der Mischung:

$$\dot{m}_{L,1}^* = \frac{\dot{M}_{L,1}}{\dot{M}_{L,3}} \quad (\text{Gl. 2.29})$$

$$\dot{m}_{L,2}^* = \frac{\dot{M}_{L,2}}{\dot{M}_{L,3}} \quad (\text{Gl. 2.30})$$

Mit  $\dot{m}_{L,2}^* = 1 - \dot{m}_{L,1}^*$  erhält man den Wassergehalt der Mischung:

$$x_3 = \dot{m}_{L,1}^* \cdot x_1 + (1 - \dot{m}_{L,1}^*) \cdot x_2 \quad (\text{Gl. 2.31})$$

und schließlich:

$$\begin{aligned} \frac{x_2 - x_3}{x_3 - x_1} &= \frac{x_2 \cdot \dot{m}_{L,1}^* - x_1 \cdot \dot{m}_{L,1}^*}{(1 - \dot{m}_{L,1}^*) \cdot x_2 - (1 - \dot{m}_{L,1}^*) \cdot x_1} \\ &= \frac{\dot{m}_{L,1}^*}{1 - \dot{m}_{L,1}^*} \\ \frac{x_2 - x_3}{x_3 - x_1} &= \frac{\dot{m}_{L,1}^*}{\dot{m}_{L,2}^*} = \frac{\dot{M}_{L,1}}{\dot{M}_{L,2}} \quad (\text{Gl. 2.32}) \end{aligned}$$

Teilt man also den Abstand zwischen  $x_1$  und  $x_2$  bzw. die Strecke 1–2 im Verhältnis der Luftmassenströme, erhält man den Zustand der Mischung.

Die Mischung zweier Luftströme  $\dot{M}_{L,1}$  und  $\dot{M}_{L,2}$  liegt somit auf der geraden Verbindungs-