

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 Berufshochschule 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

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). 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

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Stoffdaten von Luft	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
2 Feuchte Luft und h-x-Diagramm	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 ρ_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
3 Luftvolumenstrombestimmung	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
4 Luftleitungen	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

5	Druckverlust	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
6	Strömungstechnik	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
7	Ventilatoren	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
8	Einbauten.....	155
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
9	Geräusche	175
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
10	Meßtechnik	193
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
11	Tabellen- und Bildanhang	213
	Formelzeichen	219
	Literaturverzeichnis	221
	Stichwortverzeichnis	223

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 ρ 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 ρ 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°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°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 $\rho_n/\text{kg/m}^3$	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 ₂ H ₂	26,04	22,23	319,5	1,171	0,906	1,51	1,22	1,26
Ammoniak	NH ₃	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 ₂ H ₆	30,07	22,19	276,5	1,356	1,049	1,73	1,44	1,20
Ethylchlorid	C ₂ H ₅ Cl	64,50	–	128,9	2,880	2,228			1,16
Ethylen	C ₂ H ₄	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 ₂	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 ₂)-frei	–	28,96	22,40	287,1	1,293	1,000	1,00	0,72	1,40
Methan	CH ₄	16,04	22,36	518,3	0,717	0,555	2,16	1,63	1,32
Methylchlorid	CH ₃ Cl	50,48	–	164,7	2,307	1,784	0,73	0,57	1,29
Sauerstoff	O ₂	32,00	22,39	259,8	1,429	1,105	0,91	0,65	1,40
Schwefeldioxid	SO ₂	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 ₂ O	44,01	22,25	188,9	1,978	1,530	0,89	0,70	1,27
Stickstoff	N ₂	28,01	22,40	296,8	1,250	0,967	1,04	0,74	1,40
Wasserstoff	H ₂	2,016	22,43	4124,0	0,0899	0,0695	14,38	10,26	1,41
Wasserdampf	H ₂ 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}	ρ_n kg/m ³	R J/(kg · K)
	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	CO ₂	O ₂ + N ₂			
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 = $1,013 \cdot 10^5$ Pa) eine Dichte von $1,293 \text{ kg/m}^3$. 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 CO₂ 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 $\approx 1\%$, für Drücke in der Nähe der Verflüssigung sind die Abweichungen größer.

Reale Gase können nach folgender Formel berechnet werden:

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

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 θ °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:

$$\rho_m = r_1 \cdot \rho_1 + r_2 \cdot \rho_2 + \dots \quad (\text{Gl. 1.10})$$

ρ_1, ρ_2 Dichten der Einzelgase

Masseanteil des Einzelgases:

$$m_1 = r_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_m} = r_1 \cdot \frac{R_m}{R_1} = r_1 \cdot \frac{M_1}{M_m} \quad (\text{Gl. 1.11})$$

Volumenanteil des Einzelgases:

$$r_1 = m_1 \cdot \frac{\rho_m}{\rho_1} = m_1 \cdot \frac{R_1}{R_m} = m_1 \cdot \frac{M_m}{M_1} = \frac{p_1}{p} \quad (\text{Gl. 1.12})$$

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 ³
molares Normvolumen	22,41	22,401	22,403	m ³ /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 ρ bestimmt werden.

	\tilde{M}	r_i	$q_{i,n}$	$r_i \cdot q_{i,n}$
N ₂	28	0,780	1,250	0,975
O ₂	32	0,038	1,429	0,054
CO ₂	44	0,132	1,964	0,259
H ₂ O	18	0,050	0,803	<u>0,040</u>
			$q_{m,n} =$	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 ₂	H ₂	N ₂	H ₂ O	CO ₂	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 < ϑ < 400 °C
für Luft: -20 °C < ϑ < 200 °C

Gas	Approximationsgleichung	max. Fehler
O ₂	$c_p = 0,907 + \frac{2,893535}{10^4} \cdot \vartheta - \frac{1,113131}{10^7} \cdot \vartheta^2 + \frac{3,474747}{10^{10}} \cdot \vartheta^3$	0,13 %
N ₂	$c_p = 1,040 - \frac{1,050303}{10^4} \cdot \vartheta + \frac{9,369697}{10^7} \cdot \vartheta^2 - \frac{9,212121}{10^{10}} \cdot \vartheta^3$	0,20 %
H ₂ 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 ₂	$c_p = 0,804 + \frac{1,570414}{10^3} \cdot \vartheta - \frac{3,588586}{10^6} \cdot \vartheta^2 + \frac{3,923232}{10^9} \cdot \vartheta^3$	0,58 %
SO ₂	$c_p = 0,584 + \frac{9,173737}{10^4} \cdot \vartheta - \frac{1,629293}{10^6} \cdot \vartheta^2 + \frac{1,494949}{10^9} \cdot \vartheta^3$	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: N/m bei $^\circ\text{C}$
 Spez. elektr. Widerstand: Ωcm bei $^\circ\text{C}$
 Heizwert: kJ/kg n. DIN 5499

Stoff-Ergänzungsdaten

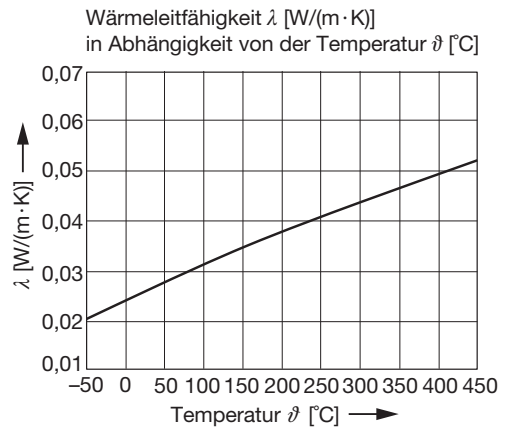
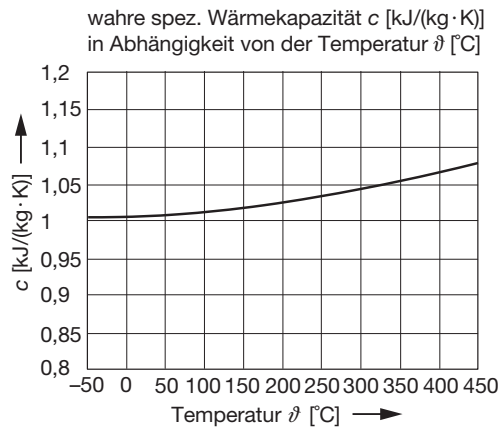
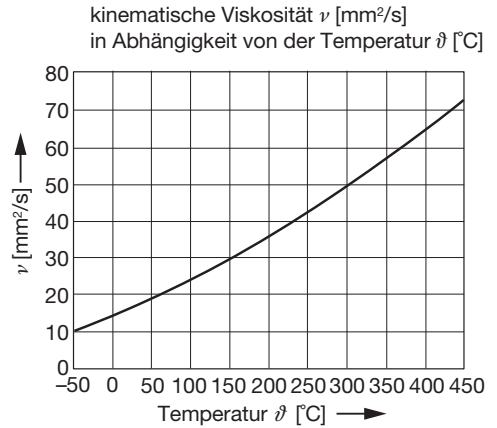
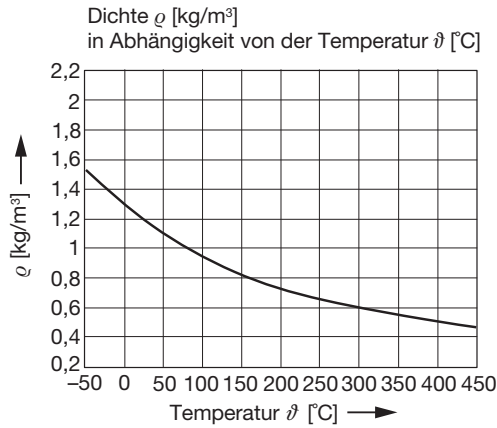
Flammpunkt: $^\circ\text{C}$ n. DIN 51 758
 Zündtemperatur: $^\circ\text{C}$ n. DIN 51 794
 Neutralisationszahl: mgKOH/g n. DIN 51 558 T 1
 Gehalt an Asphalt: Mass.-% n. DIN 51 595
 Koksrückstand: Mass.-% n. DIN 51 551
 Aschegehalt: Mass.-% n. DIN EN 7
 Wassergehalt: Mass.-% n. DIN ISO 3733
 Schwefelgehalt: 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 kg/m^3
 Tripelpunkttemp.: $-213,15 \text{ }^\circ\text{C}$

Stamm-Stoffdaten Herstellerrangaben (Stützstellen) mit * gekennzeichnet					Aus den Stammfunktionen berechnet					
Temperatur ϑ $^\circ\text{C}$	Dichte ρ kg/m^3	Wahre sp. Wärmekap. c $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Kinemat. Viskosität ν mm^2/s	Wärmeleitfähigkeit λ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Vol. spez. Wärmekap. C $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$	Spez. Enthalpie h kJ/kg	Dynam. Viskosität η $\text{mPa} \cdot \text{s}$	Temp.-leitfähigkeit α mm^2/s	Vol. ausd.-koeffizient β $1/\text{K}$	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 ρ kg/m ³	wahre spez. Wärmekapazität c kJ/(kg·K)	kinematische Viskosität ν mm ² /s	Wärme- leitfähigkeit λ 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 ϑ 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)
- Δp 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 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_{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 ϑ als Maximalwert den zu ϑ gehörigen Sättigungsdruck p_D'' .

2.1.1 Relative Feuchte φ

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

Tabelle 2.1 Dampfdruck p_D'' , Wassergehalt x_s , Enthalpie h'' , Dichte ρ_f von wassergesättigter Luft bei 1000 mbar sowie Verdampfungsenthalpie Δh_v

ϑ °C	p_D'' mbar	x_s g/kg	h'' kJ/kg	ρ kg/m ³	Δh_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)

ϑ °C	p''_D mbar	x_s g/kg	h'' kJ/kg	ρ kg/m ³	Δh_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)

ϑ °C	p_D'' mbar	x_s g/kg	h'' kJ/kg	ρ kg/m ³	Δh_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