

Peter Stephan · Karlheinz Schaber
Karl Stephan · Franz Mayinger

Thermodynamik

Grundlagen und technische Anwendungen
Band 1: Einstoffsysteme

17. Auflage

Mit 195 Abbildungen und 43 Tabellen

 Springer

Professor Dr.-Ing. Peter Stephan
Fachgebiet für Technische Thermodynamik
Technische Universität Darmstadt
Petersenstr. 30
64297 Darmstadt

Professor Dr.-Ing. Karlheinz Schaber
Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik
Universität Karlsruhe (TH)
Engler-Bunte-Ring 21
76131 Karlsruhe

Professor em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Karl Stephan
Institut für Technische Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik
Universität Stuttgart

Professor em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Franz Mayinger
Lehrstuhl für Thermodynamik
Technischen Universität München

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-540-70813-1 17. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN 978-3-540-22035-0 16. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1963, 1975, 1986, 1990, 1992, 1998, 2005 und 2007

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuziehen.

Satz: Digitale Druckvorlage der Autoren
Umschlaggestaltung: WMX Design GmbH, Heidelberg
Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig

Gedruckt auf säurefreiem Papier 7/3100/YL - 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur siebzehnten Auflage

Die sechzehnte Auflage erschien vor eineinhalb Jahren als eine umfassende Neubearbeitung des bekannten Lehrbuches von Karl Stephan und Franz Mayinger. Die gute Aufnahme unseres Buches bei Studierenden und Ingenieuren machte bereits nach nur einem Jahr einen Nachdruck erforderlich. Bei der umfassenden Neubearbeitung hatten sich trotz sorgfältigen Korrekturlesens leider einige Druckfehler eingeschlichen. Gespräche mit unseren Studierenden und Kollegen führten zudem dazu, dass wir an wenigen Stellen Formulierungen etwas präzisiert und einige genauere Stoffwerte aufgenommen haben. Daher folgt nun bereits die vorliegende siebzehnte Auflage des Buches. In ihr haben wir die genannten Änderungen eingearbeitet und nun hoffentlich alle Druckfehler beseitigt. Möge unser Buch auch weiterhin Gefallen finden und den Lesern die Grundlagen und technischen Anwendungen der Thermodynamik nahe bringen.

Darmstadt
Karlsruhe, im Dezember 2006

Peter Stephan
Karlheinz Schaber

Vorwort zur sechzehnten Auflage

Das vorliegende Buch ist eine umfassende Neubearbeitung des bekannten Lehrbuches von Karl Stephan und Franz Mayinger „Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen“, das zuletzt als 15. Auflage 1998 erschienen ist. Der Ursprung des Werkes ist das Lehrbuch von Ernst Schmidt „Technische Thermodynamik; Grundlagen und Anwendungen“, das 1936 erstmals und zuletzt als 10. Auflage 1963 unter dem Titel „Einführung in die Technische Thermodynamik und in die Grundlagen der chemischen Thermodynamik“ erschien.

Karl Stephan und Franz Mayinger haben als Autoren der 11. bis 15. Auflage eine vollständige Neubearbeitung vorgenommen und das Werk um mehrere Kapitel ergänzt, insbesondere im Bereich der Mehrstoffsysteme und der technischen Stofftrennprozesse. Seit der 11. Auflage, 1975, erscheint das Buch in zwei Bänden, von denen der erste die Thermodynamik der Einstoffsysteme, der zweite die der Mehrstoffsysteme und der chemischen Reaktionen behandelt.

Der Tradition des bekannten Lehrbuches verpflichtet, das viele Generationen von Studierenden der Ingenieurwissenschaften begleitet hat, haben wir die bewährten Inhalte und deren Aufteilung auf zwei Bände weitgehend beibehalten. Dies gilt auch für die im Vergleich zu anderen Lehrbüchern reichliche Ausstattung mit Zahlenangaben für Stoffeigenschaften.

Wesentliche Änderungen wurden dagegen im vorliegenden ersten Band an der Struktur der Darstellung vorgenommen. Im Mittelpunkt der Überlegungen stand dabei, die zentrale Bedeutung der Bilanzen von Masse, Energie und Entropie in der Thermodynamik und deren Analogien stärker zur Geltung zu bringen. So wurden beispielsweise die allgemeingültige Methode einer Bilanzierung den Ableitungen der beiden Hauptsätze vorangestellt und die Kapitel zur Energiebilanz bzw. zum ersten Hauptsatz sowie zur Entropiebilanz bzw. zum zweiten Hauptsatz ähnlich strukturiert. Die Bilanzgleichungen für Energie und Entropie werden zunächst umfassend und allgemein gültig für beliebige thermodynamische Systeme vorgestellt und erst dann auf Spezialfälle angewandt. Thermische und kalorische Zustandsgleichungen werden in jeweils eigenen Kapiteln getrennt von den Hauptsätzen behandelt. Bei der Beschreibung der Stoffeigenschaften haben wir die Ergebnisse neuerer Arbeiten eingearbeitet. In das Kapitel über thermodynamische Prozesse haben wir eingangs Beschreibungen und Berechnungsgrundlagen einzelner Anlagenkomponenten wie beispielsweise Pumpen oder Turbinen eingefügt. Dem Gedanken folgend vom Allgemeinen ausgehend das Spezielle abzuleiten, sind den technischen Kreisprozessen allgemeine Betrachtungen über Wärmekraftmaschinen, Kältemaschinen und Wärmepumpen vorangestellt.

Wie die vorausgegangenen enthält auch die Neuauflage eine Einführung in die Wärmeübertragung, etwa in dem Umfang wie sie in den Grundlagenvorlesungen des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik bzw. Chemieingenieurtechnik gelehrt wird.

Gegenüber den früheren Auflagen haben wir die Formelzeichen einiger Größen geändert, wobei für uns eine konsequente, in sich konsistente Bezeichnung thermodynamischer Größen von vorrangiger Bedeutung war. Der Anhang wurde um ein Glossar mit kurzen Erläuterungen der wichtigsten thermodynamische Begriffe ergänzt.

Die Thermodynamik wird von den Studierenden allgemein als eines der schwierigsten Wissensgebiete angesehen, obwohl sie mit nur wenigen Lehrsätzen und mathematischen Kenntnissen auskommt. Dies mag vor allem an den Schwierigkeiten liegen, die wenigen, aber oft sehr abstrakten, allgemein gültigen Gesetze auf konkrete technische und physikalische Vorgänge anzuwenden. Die neue Struktur der Darstellung des Buches soll dazu beitragen, diese Schwierigkeiten zu vermindern. Der Tradition des Buches folgend werden dabei die Grundlagen trotz aller gebotenen wissenschaftlichen Strenge stets so anschaulich wie möglich dargeboten und unmittelbar im Anschluss an die entwickelten Sätze deren Anwendungen dargestellt und durch praxisnahe Beispiele sowie zahlreiche Übungsaufgaben vertieft.

Den ehemaligen Autoren, Karl Stephan und Franz Mayinger, sind wir für wertvolle Hinweise und Ratschläge zu Dank verpflichtet. Dem Springer-Verlag danken wir für die angenehme Zusammenarbeit und unseren Mitarbeitern Clemens Meyer und Michael Kempf für die sorgfältige Erstellung der druckfähigen Datei.

Darmstadt
Karlsruhe, im Juni 2005

Peter Stephan
Karlheinz Schaber

Inhaltsverzeichnis

Liste der Formelzeichen	XV
1. Gegenstand und Grundbegriffe der Thermodynamik	1
1.1 Gegenstand der Thermodynamik	1
1.2 Thermodynamische Systeme	3
1.3 Die Koordinaten und der Zustand eines Systems	5
1.4 Zustandsgrößen und Systemeigenschaften	7
1.5 Maßsysteme und Einheiten. Größengleichungen	10
1.5.1 Das Internationale Einheitensystem	10
1.5.2 Andere Einheitensysteme	13
1.5.3 Größengleichungen	14
2. Das thermodynamische Gleichgewicht und die empirische Temperatur	15
2.1 Das thermodynamische Gleichgewicht	15
2.2 Der nullte Hauptsatz und die empirische Temperatur	18
2.3 Die internationale Temperaturskala	22
2.4 Praktische Temperaturmessung	24
2.4.1 Flüssigkeitsthermometer	24
2.4.2 Widerstandsthermometer	27
2.4.3 Thermoelemente	28
2.4.4 Strahlungsthermometer	30
3. Die thermische Zustandsgleichung	31
3.1 Das totale Differential der thermischen Zustandsgleichung	32
3.2 Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	35
3.3 Die Einheit Stoffmenge und die universelle Gaskonstante	37
4. Energieformen	41
4.1 Systemenergie	42
4.1.1 Mechanische Energie	42
4.1.2 Innere Energie und ihre kinetische Deutung	43

4.2	Arbeit	47
4.2.1	Mechanische Arbeit	48
4.2.2	Volumenänderungsarbeit und Nutzarbeit	50
4.2.3	Wellenarbeit	55
4.2.4	Elektrische Arbeit	56
4.2.5	Weitere Arbeitsformen	57
4.2.6	Verallgemeinerung des Begriffes Arbeit und die dissipierte Arbeit	66
4.3	Wärme	70
4.4	An Materietransport gebundene Energie und die Zustandsgröße Enthalpie	71
5.	Methode der Bilanzierung und der erste Hauptsatz der Thermodynamik	73
5.1	Die allgemeine Struktur einer Bilanzgleichung	73
5.2	Formulierung des ersten Hauptsatzes und die technische Arbeit ...	74
5.3	Der erste Hauptsatz für geschlossenen Systeme	76
5.4	Messung und Eigenschaften von innerer Energie und Wärme	79
5.5	Die Massenbilanz für offene Systeme	81
5.6	Der erste Hauptsatz für offene Systeme	83
5.7	Technische Arbeit in stationär durchströmten Kontrollräumen	85
6.	Die kalorischen Zustandsgleichungen und die spezifischen Wärmekapazitäten	89
6.1	Die spezifischen Wärmekapazitäten der idealen Gase	91
6.2	Die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten der idealen Gase ...	95
6.3	Die kalorischen Zustandsgleichungen inkompressibler Stoffe	104
7.	Anwendungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik	107
7.1	Zustandsänderungen idealer Gase	107
7.1.1	Zustandsänderungen bei konstantem Volumen oder Isochore	107
7.1.2	Zustandsänderung bei konstantem Druck oder Isobare	108
7.1.3	Zustandsänderung bei konstanter Temperatur oder Isotherme	109
7.1.4	Dissipationsfreie adiabate Zustandsänderungen	110
7.1.5	Polytrope Zustandsänderungen	114
7.2	Kreisprozesse	117
7.3	Wasserkraftwerke	120
7.4	Stoffstrommischung	121
7.5	Wärmeübertrager	122
7.6	Verdichten und Entspannen idealer Gase	123
7.7	Strömungen durch Kanäle mit Querschnittsänderungen	126
7.8	Drosselvorgänge	128

7.9	Überströmvorgänge	130
8.	Das Prinzip der Irreversibilität und die Zustandsgröße Entropie	135
8.1	Das Prinzip der Irreversibilität	135
8.2	Entropie und absolute Temperatur	140
8.3	Die Entropie als vollständiges Differential und die absolute Temperatur als integrierender Nenner	146
8.3.1	Mathematische Grundlagen zum integrierenden Nenner	146
8.3.2	Einführung des Entropiebegriffes und der absoluten Temperaturskala mit Hilfe des integrierenden Nenners	151
8.4	Statistische Deutung der Entropie	154
8.4.1	Die thermodynamische Wahrscheinlichkeit eines Zustandes	154
8.4.2	Entropie und thermodynamische Wahrscheinlichkeit	157
8.4.3	Die endliche Größe der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit, Quantentheorie, Nernstsches Wärmetheorem	158
8.5	Gibbssche Fundamentalgleichungen	160
8.6	Zustandsgleichungen für die Entropie und Entropiediagramme	164
8.6.1	Die Entropie idealer Gase und anderer Stoffe	164
8.6.2	Die Entropiediagramme	166
9.	Entropiebilanz und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	169
9.1	Austauschprozesse und das thermodynamische Gleichgewicht	169
9.2	Entropiebilanz und allgemeine Formulierung des zweiten Hauptsatzes	172
9.3	Der zweite Hauptsatz für geschlossene Systeme	174
9.3.1	Zusammenhang zwischen Entropie und Wärme	177
9.3.2	Zustandsänderungen geschlossener adiabater Systeme	179
9.3.3	Isentrope Zustandsänderungen	180
9.4	Der zweite Hauptsatz für offene Systeme	181
9.5	Entropiebilanz und Kreisprozesse	184
10.	Anwendung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik	189
10.1	Reibungsbehaftete Prozesse	189
10.2	Wärmeleitung unter Temperaturgefälle	194
10.3	Drosselung	196
10.4	Mischung und Diffusion	199
10.5	Isentrope Strömung eines idealen Gases durch Düsen	203
11.	Energieumwandlungen und Exergie	213
11.1	Einfluss der Umgebung auf Energieumwandlungen	213
11.2	Die Exergie eines geschlossenen Systems	214
11.3	Die Exergie eines Stoffstroms	216

11.4	Die Exergie einer Wärme	218
11.5	Die Exergie bei der Mischung zweier idealer Gase	218
11.6	Exergieverlust und Exergiebilanz	219
12.	Beziehungen zwischen kalorischen und thermischen Zustandsgrößen	227
12.1	Darstellung der thermodynamischen Eigenschaften durch Zustandsgleichungen	227
12.2	Innere Energie und Enthalpie als Funktion der thermischen Zustandsgrößen	229
12.3	Die Entropie als Funktion der thermischen Zustandsgrößen	233
12.4	Die spezifischen Wärmekapazitäten	235
13.	Thermodynamische Eigenschaften der Materie	237
13.1	Thermische Zustandsgrößen und p,v,T-Diagramme	238
13.2	Kalorische Zustandsgrößen. Enthalpie- und Entropiediagramme . . .	250
13.2.1	Kalorische Zustandsgrößen von Dämpfen	250
13.2.2	Tabellen und Diagramme der kalorischen Zustandsgrößen . .	254
13.3	Die Gleichung von Clausius und Clapeyron	262
13.4	Spezifische Wärmekapazität und Entropie fester Körper	266
13.4.1	Das Gefrieren von Wasser	266
13.4.2	Kristalline Festkörper	267
13.5	Zustandsgleichungen für reale Fluide	269
13.5.1	Reale Gase	269
13.5.2	Die van-der-Waalssche Zustandsgleichung	272
13.5.3	Das erweiterte Korrespondenzprinzip	278
13.5.4	Zustandsgleichungen für den praktischen Gebrauch und Stoffdaten.	279
13.5.5	Zustandsgleichungen des Wasserdampfes	283
13.6	Zustandsänderungen realer Fluide	285
13.6.1	Die adiabate Drosselung realer Gase	285
13.6.2	Zustandsänderungen im Nassdampfgebiet	289
14.	Thermodynamische Prozesse, Maschinen und Anlagen	295
14.1	Thermodynamische Modelle von Anlagenkomponenten	296
14.1.1	Pumpen	296
14.1.2	Verdichter, Kompressoren und Ventilatoren	297
14.1.3	Turbinen	299
14.1.4	Verdampfer und Kondensatoren	300
14.2	Rechtsläufige und linksläufige Kreisprozesse. Wärme- und Kältemaschinen, Kältemaschinen und Wärmepumpen	301
14.3	Der rechtsläufige Carnotsche Kreisprozess und seine Anwendung auf das ideale Gas	305

14.4	Der linksläufige Carnotsche Kreisprozess	309
14.5	Die Heißluftmaschine und die Gasturbine	310
14.6	Der Stirling-Motor	317
14.7	Die Stirling-Kältemaschine	320
14.8	Verbrennungsmotoren mit innerer Verbrennung.	
	Otto- und Diesel-Motor	322
14.8.1	Der Otto-Prozess	324
14.8.2	Der Diesel-Prozess	327
14.8.3	Der gemischte Vergleichsprozess	329
14.8.4	Abweichungen des Vorganges in der wirklichen Maschine vom theoretischen Vergleichsprozess; Wirkungsgrade	330
14.9	Die Dampfkraftanlage	332
14.9.1	Der Clausius-Rankine-Prozess	334
14.9.2	Verluste beim Clausius-Rankine-Prozess und Maßnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrades	339
14.10	Kombinierte Gas-Dampf-Prozesse	344
14.11	Kraft-Wärme-Kopplung	348
14.12	Der linksläufige Clausius-Rankine-Prozess	351
14.12.1	Die Kaltdampfmaschine als Kältemaschine	352
14.12.2	Die Kaltdampfmaschine als Wärmepumpe	353
15.	Grundbegriffe der Wärmeübertragung	357
15.1	Allgemeines	357
15.2	Stationäre Wärmeleitung	358
15.3	Wärmeübergang und Wärmedurchgang	362
15.4	Nichtstationäre Wärmeleitung	366
15.5	Grundlagen der Wärmeübertragung durch Konvektion	370
15.5.1	Dimensionslose Kenngrößen und Beschreibung des Wärmetransportes in einfachen Strömungsfeldern	373
15.5.2	Spezielle Probleme der Wärmeübertragung ohne Phasenumwandlung	382
15.6	Wärmeübertragung beim Sieden und Kondensieren	394
15.6.1	Wärmeübergang beim Sieden	394
15.6.2	Wärmeübergang beim Kondensieren	399
15.7	Wärmeübertrager – Gleichstrom, Gegenstrom, Kreuzstrom	404
15.7.1	Gleichstrom	405
15.7.2	Gegenstrom	407
15.7.3	Kreuzstrom	408
15.8	Die Wärmeübertragung durch Strahlung	411
15.8.1	Grundbegriffe, Emission, Absorption, das Gesetz von Kirchhoff	411
15.8.2	Die Strahlung des schwarzen Körpers	415

15.8.3 Die Strahlung technischer Oberflächen. Der graue Körper . .	418
15.8.4 Der Strahlungsaustausch	421
Anhang A: Dampftabellen	427
Anhang B: Lösungen der Übungsaufgaben	441
Anhang C: Glossar	463
Sachverzeichnis	493

Liste der Formelzeichen

(SI-Einheiten sind in eckigen Klammern hinzugefügt. Größen, bei denen diese Angabe fehlt, sind dimensionslos.)

1. Lateinische Buchstaben

A	Fläche [m ²]
a	Absorptionsgrad
a	Kohäsionskonstante in der van-der-Waalsschen Gleichung [Nm ⁴ /kg ²]
a	Abstand [m]
a	Querteilungsverhältnis
a	Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]
Ar	Archimedes-Zahl
B	magnetische Induktion [N/(Am)]
B	Anergie [J]
B	Breite [m]
b	Kovolumen in der van-der-Waalsschen Zustandsgleichung [m ³ /kg]
b	Längsteilungsverhältnis
Bi	Biot-Zahl
C	Strahlungsaustauschkonstante [W/(m ² K ⁴)]
C	Kapazität [As/V]
$\overline{C}, \overline{C}_p, \overline{C}_v$	Molwärmen, molare Wärmekapazität [J/(kmol K)]
\dot{C}	Wärmekapazitätsstrom [W/K]
c	spezifische Wärmekapazität [J/(kg K)]
c_p	– bei konstantem Druck [J/(kg K)]
c_v	– bei konstantem Volumen [J/(kg K)]
D	dielektrische Verschiebung [As/m ²]
D	Durchmesser [m]
d	Durchmesser, Bezugslänge [m]
d	Durchlassgrad, Transmissionsgrad
E	elektrische Feldstärke [V/m]
E	Emission [W/m ²]
E	Energie [J]
\overline{E}	molare Energie [J/kmol]
\dot{E}	Energiestrom [W]
E^*	Elastizitätsmodul [N/m]
E_s	Emission des schwarzen Körpers
e	Elementarladung [C]

Ex_V	Exergieverlust [J]
$\dot{E}x_V$	Exergieverluststrom [W]
ex_V	spezifischer Exergieverlust [J/kg]
F	Kraft [N]
F	Sichtfaktor, Einstrahlzahl
Fo	Fourier-Zahl
g	Fallbeschleunigung [m/s^2]
Gr	Grashof-Zahl
H	Enthalpie [J]
H	Helligkeit einer Strahlung [W/m^2]
H	Höhe [m]
\overline{H}	magnetische Feldstärke [A/m]
\overline{H}	molare Enthalpie [J/kmol]
h	spezifische Enthalpie [J/kg]
h', h'', h'''	– auf den Phasengrenzkurven [J/kg]
h	Plancksches Wirkungsquantum [Js]
Δh_V	spez. Verdampfungsenthalpie [J/kg]
I	Strom [A]
J	Impuls [$kg\ m/s^3$]
J	Intensität einer Strahlung [W/m^3]
k	Boltzmannsche Konstante [J/K]
k	Wärmedurchgangskoeffizient [$W/(m^2K)$]
L	Arbeit [J]
L_{el}	elektrische Arbeit [J]
L_{ex}	Exergie [J]
L_{diss}	Dissipationsarbeit [J]
L_m	mechanische Arbeit [J]
L_n	Nutzarbeit [J]
L_R	Reibungsarbeit [J]
L_t	technische Arbeit [J]
L_v	Volumenänderungsarbeit [J]
l	spezifische Arbeit [J/kg]
l	Länge [m]
M	Masse [kg]
\overline{M}	Molmasse [kg/kmol]
M_d	Drehmoment [Nm]
\dot{M}	Massenstrom [kg/s]
m	Masse eines Moleküls [kg]
\dot{m}	Massenstromdichte [$kg/(m^2\ s)$]
N	integrierender Nenner
N	Molmenge, Anzahl der Mole [mol], [kmol]
N_A	Avogadro-Konstante [l/mol], [l/kmol]
n	Drehzahl [1/s]
n	Polytropenexponent
Nu	Nußelt-Zahl
P	elektrische Polarisation [As/m^2]
P	Leistung [W]
P_{el}	elektrische Leistung [W]
p	Druck [N/m^2], [bar]
p_k	kritischer Druck [bar]
p_r	reduzierter Druck
p_u	Umgebungsdruck [bar]

Pe	Péclet-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
Q	Wärme [J]
Q_{el}	elektrische Ladung [As]
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
q	spezifische Wärme [J/kg]
\dot{q}	Wärmestromdichte [W/m ²]
R	Gaskonstante [J/(kg K)]
R	Wärmewiderstand [K/W]
R_{el}	elektrischer Widerstand [Ω]
\bar{R}	universelle Gaskonstante [J/(kmol K)]
r	Radius, Abstand [m]
r	Reflexionsgrad
Re	Reynolds-Zahl
S	Entropie [J/K]
S_{irr}	Entropieerzeugung durch Irreversibilitäten [J/K]
\bar{S}	molare Entropie [J/(kmol K)]
\dot{S}	Entropiestrom [W/K]
s	Abstand [m]
s	spezifische Entropie [J/(kg K)]
s', s'', s'''	– auf den Phasengrenzkurven [J/(kg K)]
St	Stanton-Zahl
T	absolute Temperatur [K]
T_k	kritische Temperatur [K]
T_r	reduzierte Temperatur
T_s	Sättigungstemperatur [K]
T_{tr}	Temperatur am Tripelpunkt [K]
T_u	Umgebungstemperatur [K]
t	Temperatur [°C]
U	innere Energie [J]
U_{el}	elektrische Spannung [V]
\bar{U}	molare innere Energie [J/kmol]
u	spezifische innere Energie [J/kg]
u', u'', u'''	– auf den Phasengrenzkurven [J/kg]
V	Volumen [m ³]
\bar{V}	Molvolumen [m ³ /kmol]
v	spezifisches Volumen [m ³ /kg]
v', v'', v'''	– auf den Phasengrenzkurven [m ³ /kg]
v_k	kritisches spezifisches Volumen [m ³ /kg]
v_r	reduziertes spezifisches Volumen
W	thermodynamische Wahrscheinlichkeit
w	elektrischer Widerstand [Ω]
w	Geschwindigkeit [m/s]
Z	Realgasfaktor
X	Plattendicke [m]
x	Dampfgehalt
X, Y, Z	Variablen, allgemein
x, y, z	Variablen, allgemein
z	Länge, Weg [m]

2. Griechische Buchstaben

α	Drehwinkel, Winkel
α	Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]
α	Neigungswinkel
β	Ausdehnungskoeffizient [1/K]
β	Winkel
γ	Flächenverhältnis
γ	Spannungskoeffizient [1/K]
δ	Wanddicke [m]
ε	Dehnung
ε	Dielektrizitätskonstante [C ² /(Nm ²)]
ε	Emissionszahl
ε	Verdichtungsverhältnis
ε_{KM}	Leistungszahl einer Kältemaschine
ε_{WP}	Leistungszahl einer Wärmepumpe
η	Wirkungsgrad, Gütegrad
η	dynamische Viskosität [kg/(m s)]
η_C	Carnot-Faktor, Carnot-Wirkungsgrad
Θ	Debye-Temperatur [K]
Θ	dimensionslose Temperatur
ϑ	empirische Temperatur [°C], [K]
κ	Isentropenexponent
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(Km)]
λ	Wellenlänge der Strahlung [m]
μ	Einschnürungszahl bei der Strömung durch Blenden
μ	magnetische Permeabilität [Vs/Am]
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]
ρ	Dichte [kg/m ³]
σ	Normalspannung [N/m ²]
σ	Strahlungsaustauschkonstante des schwarzen Körpers [W/(m ² K ⁴)]
σ'	Oberflächenspannung [N/m]
τ	Zeit [s]
τ	Schubspannung [N/m ²]
Φ	Potential
φ	Einspritzverhältnis bei Dieselmotoren
φ	Geschwindigkeitszahl
φ	Lennard-Jones-Potential [J]
φ	Winkel
χ	isothermer Kompressibilitätskoeffizient [m ² /N]
Ψ	Dissipationsenergie [J]
ψ	Ausflussfunktion
ψ	Reibungsbeiwert
ω	dimensionslose Geschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit [1/s]