

K. Lucas

Thermodynamik, 2. Aufl.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

K. Lucas

Thermodynamik

Die Grundgesetze der Energie-
und Stoffumwandlungen

Zweite, neubearbeitete und ergänzte Auflage

Mit 250 Abbildungen und 20 Tabellen



Springer

Dr.-Ing. Klaus Lucas

Professor für Thermodynamik
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
und
Wissenschaftlicher Direktor
Institut für Energie- und Umwelttechnik, Duisburg

ISBN 978-3-540-41000-3

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Lucas, Klaus : Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlung / Klaus Lucas. - 2. Aufl.
(Springer-Lehrbuch)

ISBN 978-3-540-41000-3 ISBN 978-3-662-10521-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-10521-4

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-Verlag Berlin Heidelberg 2000

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2000

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 oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Satzerstellung durch Autor

Einband: design & production GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier SPIN: 10756289 61/3020 hu - 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur 2. Auflage

Während der Jahre seit dem Erscheinen der 1. Auflage meines Buches habe ich sein von der üblichen Vorgehensweise abweichendes Konzept in meinen Vorlesungen weiterentwickelt. Ich habe dabei die traditionelle Gliederung des Stoffes in einzelne Prozesse wie Verbrennung, Klimaanlage, Strömungsvorgänge, Wärmekraftmaschinen etc. verlassen. Statt dessen ist der Stoff methodisch strukturiert. Die Bilanzen für Materiemenge, Energie und Entropie werden in den jeweiligen Kapiteln prozessunabhängig formuliert und exemplarisch auf die Analyse sehr unterschiedlicher Beispiele der energie- und stoffumwandelnden Prozesstechnik angewandt. Dies scheint mir besser den Anforderungen an die Grundausbildung im Ingenieurwesen zu entsprechen, zumal in einer Zeit, in der Lösungswege für einzelne Prozesse zunehmend von Computersystemen bereitgestellt werden und daher eher die Kompetenz zu originellem, systemanalytischen Vorgehen gefragt ist. Darüber hinaus habe ich mich entschlossen, die Stoffmodelle als Schlüssel für die Anwendung der Bilanzen auf praktische Prozesse ausführlicher zu behandeln. Nun können auch Prozesse mit realen flüssigen Phasen sowie verdünnten Lösungen unter Einschluss von Elektrolyten einbezogen werden. Dazu war es erforderlich, auch die Theorie thermodynamischer Gleichgewichte auf der Grundlage des chemischen Potentials aufzunehmen, allerdings auf vergleichsweise elementarer Ebene, die aber den Einstieg in die weiterführende Literatur erleichtern sollte.

Bei der Ausarbeitung der neu hinzugekommenen Beispiele und dem Lesen von Korrekturen haben mich meine Mitarbeiter Dr.-Ing. U. Delfs, Dipl.-Ing. R. Giesen, Dipl.-Ing. F. Henrich, Dr.-Ing. J. Krissmann und Dipl.-Ing. S. Uhlenbruck unterstützt. Die Abbildungen wurden von Frau M. Templin erstellt und die Übertragung des Manuskriptes in eine reproduktionsfähige Druckvorlage von Frau B. Marten. Ihnen allen sage ich meinen herzlichen Dank.

Aachen, im Frühjahr 2000

K. Lucas

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XIII
1 Allgemeine Grundlagen	1
1.1 Energie- und Stoffumwandlungen	1
1.1.1 Energieumwandlungen	1
1.1.2 Stoffumwandlungen	6
1.1.3 Energie und Stoffumwandlungen in technischen Prozessen	9
1.1.4 Allgemeine Schlussfolgerungen	11
1.2 Die thermodynamische Analyse	14
1.2.1 Das thermodynamische System	14
1.2.2 Das System als fluide Phase	25
1.2.3 Prozess und Zustandsänderung	28
2 Fluide Phasen	31
2.1 Die thermischen Zustandsgrößen	32
2.1.1 Die Materiemenge	32
2.1.2 Das Volumen	36
2.1.3 Der Druck	37
2.1.4 Die Temperatur	40
2.2 Reinstoffe	49
2.2.1 Der Gaszustand	50
2.2.2 Verdampfung und Kondensation	52
2.2.3 Das Nassdampfgebiet	58
2.2.4 Kritischer Punkt und Tripelpunkt	59
2.2.5 Schmelzen und Erstarren	61
2.2.6 Das gesamte Zustandsgebiet	62
2.3 Gemische	64
2.3.1 Verdampfung und Kondensation	65
2.3.2 Verdunstung und Absorption	72
2.3.3 Entmischung in flüssigen Gemischen	75
2.3.4 Schmelzen und Erstarren in Gemischen	77
2.3.5 Chemische Eigenschaften	79
2.4 Stoffmodelle für Reinstoffe	82
2.4.1 Die Dampftafel	82

2.4.2	Das ideale Gas	84
2.4.3	Die ideale Flüssigkeit	86
2.5	Stoffmodelle für Gemische	87
2.5.1	Partielle Größen	87
2.5.2	Gasgemische	89
2.5.3	Gas/Dampf-Gemische	90
2.5.4	Flüssige Gemische	97
3	Die Materiemengenbilanz	104
3.1	Materiemengenbilanz bei thermischen Stoffumwandlungen	105
3.1.1	Umwandlungen reiner Stoffe	106
3.1.2	Umwandlungen von Gemischen	107
3.2	Materiemengenbilanz bei chemischen Stoffumwandlungen	117
3.2.1	Vollständig ablaufende Reaktionen	117
3.2.2	Unvollständig ablaufende Reaktionen	124
3.2.3	Die Elementenbilanz	132
4	Die Energiebilanz	137
4.1	Die Erscheinungsformen der Energie	137
4.1.1	Mechanische Energieformen	138
4.1.2	Innere Energie und Enthalpie	147
4.1.3	Die Energieform Wärme	153
4.2	Die innere Energie und Enthalpie als Zustandsgrößen	156
4.2.1	Reine Gase	158
4.2.2	Reine Flüssigkeiten	160
4.2.3	Reine Fluide im gesamten Zustandsgebiet	161
4.2.4	Gasgemische	163
4.2.5	Gas/Dampf-Gemische	164
4.2.6	Flüssige Gemische	174
4.3	Innere Energie und Enthalpie bei chemischen Zustandsänderungen	190
4.3.1	Die Standardbildungsenthalpie	192
4.3.2	Sonderfall: Vollständige Verbrennung	199
4.3.3	Der Heizwert	202
4.4	Energiebilanzgleichungen	209
4.4.1	Geschlossene Systeme	210
4.4.2	Stationäre Fließprozesse	213
4.4.3	Kreisprozesse	225
4.4.4	Instationäre Prozesse	234
4.4.5	Das Energieflussbild	244

5 Die Entropiebilanz	247
5.1 Entropie	250
5.1.1 Reversibilität und Dissipation	250
5.1.2 Dissipation, Wärme und Entropie	265
5.1.3 Entropieproduktion bei Wärme- und Arbeitstransfer	269
5.1.4 Entropiebilanz und 2. Hauptsatz	272
5.1.5 Entropie und Ordnung	276
5.2 Die Entropie als Zustandsgröße	280
5.2.1 Die Fundamentalgleichung	280
5.2.2 Die thermodynamische Temperatur	281
5.2.3 Reine Gase	286
5.2.4 Reine Flüssigkeiten	287
5.2.5 Reine Stoffe im gesamten Zustandsgebiet	287
5.2.6 Gasgemische	288
5.2.7 Gas/Dampf-Gemische	293
5.2.8 Flüssige Gemische	294
5.3 Die Entropie bei chemischen Zustandsänderungen	296
5.3.1 Die Reaktionsentropie	296
5.3.2 Der Entropienullpunkt	297
5.4 Entropie und Energiequalität	300
5.4.1 Exergie und Anergie	301
5.4.2 Die Exergie eines Stoffstromes	302
5.4.3 Exergieverlust und Entropieproduktion	311
6 Reversible Energieumwandlungen	315
6.1 Reversible Strömungsprozesse	315
6.2 Reversibel-isotherme Arbeitsprozesse	316
6.3 Reversibel-adiabate Prozesse idealer Gase	319
6.4 Reversibel-adiabate Prozesse realer Fluide	324
6.5 Die reversible Wärmekraftmaschine	328
6.5.1 Das Dampfkraftwerk	331
6.5.2 Die Gasturbine	335
6.5.3 Das Strahltriebwerk	341
6.5.4 Verbrennungsmotoren	348
6.6 Die reversible Wärmepumpe	352
6.6.1 Die Dampf-Wärmepumpe	353
6.6.2 Die Gaskältemaschine	357
6.7 Berücksichtigung von Dissipation	360
6.7.1 Adiabate Arbeitsprozesse	361
6.7.2 Adiabate Strömungsprozesse	366

7 Stoffumwandlungen als Gleichgewichtsprozesse	370
7.1 Ausgleichsprozesse und Gleichgewicht	370
7.1.1 Die Grundtypen der Ausgleichsprozesse	371
7.1.2 Das chemische Potenzial	378
7.1.3 Ausgleichsprozesse und Gleichgewicht in abgeschlossenen Systemen	380
7.1.4 Ausgleichsprozesse und Gleichgewicht in technischen Anlagen	384
7.2 Thermodynamische Gleichgewichte	390
7.2.1 Das Verdampfungs- und Kondensationsgleichgewicht	390
7.2.2 Das Verdunstungs- und Absorptionsgleichgewicht	401
7.2.3 Das Reaktionsgleichgewicht	409
7.3 Wärmeübertragung	416
7.3.1 Wärmeübertragung ohne Phasenwechsel	417
7.3.2 Wärmeübertragung mit Phasenwechsel	422
7.4 Verdunstung und Absorption	430
7.4.1 Die Verdunstung	430
7.4.2 Die Absorption	442
7.5 Die Rektifikation	453
7.5.1 Die Bilanzlinien	457
7.5.2 Die Anzahl der Gleichgewichtsstufen	462
7.5.3 Die Energiebilanzen der Kolonne	464
7.6 Chemische Stoffumwandlungen	469
7.6.1 Der isotherme Reaktor	470
7.6.2 Der adiabate Reaktor	475
7.6.3 Reaktor mit Temperaturprofil	479
8 Energetische Bewertung und Optimierung	486
8.1 Energie- und Entropiebilanz	486
8.2 Exergetische Bewertung	490
8.3 Umwandlung von Primärenergie in Arbeit	511
8.3.1 Die Temperatur der Wärmeaufnahme	512
8.3.2 Zwischenüberhitzung	515
8.3.3 Regenerative Speisewasservorwärmung	519
8.3.4 Kombination von Gasturbine und Dampfturbine	526
8.4 Wärmebereitstellung	537
8.4.1 Einfache Technologien	537
8.4.2 Verbrennungsluftvorwärmung	540
8.4.3 Kraft-Wärme-Kopplung	543
8.4.4 Wärmepumpe	554
8.4.5 Kombination aus Kraft-Wärme-Kopplung und Wärmepumpe ..	557

8.5 Wärmeintegration	563
8.5.1 Der „Pinch“	564
8.5.2 Summenkurve und Wärmekaskade	566
Anhang A Stoffdaten	579
Anhang B Wichtige Formeln	600
Anhang C Einheiten	612
Sachverzeichnis	615

Formelzeichen

a) Lateinische Formelbuchstaben

A	Fläche; freie Energie
a	spez. oder molare freie Energie
a_i	Aktivität der Komponente i
b	Beschleunigung; spez. oder molare Anergie
\dot{B}_Q	Anergie eines Wärmestroms
c	Geschwindigkeit; spez. oder molare Wärmekapazität
C_p, C_v	isobare bzw. isochore Wärmekapazität
c_p, c_v	spez. oder molare isobare bzw. isochore Wärmekapazität
E	Energieinhalt, Gesamtenergie eines Systems, Exergie
\dot{E}_Q	Exergie eines Wärmestroms
$\Delta\dot{E}_V$	Exergieverluststrom
e_h	spez. oder molare Exergie der Enthalpie
Δe_v	spez. oder molarer Exergieverlust
F	Kraft
G	freie Enthalpie
g	spez. oder molare freie Enthalpie; Fallbeschleunigung; gasförmig
H	Enthalpie
\dot{H}	Enthalpiestrom
H_i	Henry-Koeffizient der Komponente i
H_o	spez. oder molarer Brennwert
H_u	spez. oder molarer Heizwert
h	spez. oder molare Enthalpie
$\Delta h^{f0} (g)$	spez. oder molare Standardbildungsenthalpie im Gaszustand
$\Delta h^{f0} (l)$	spez. oder molare Standardbildungsenthalpie im flüssigen Zustand
$\Delta h^{f0} (aq)$	spez. oder molare Standardbildungsenthalpie im Zustand der ideal verdünnten wässrigen Lösung
Δh_v	spez. oder molare Verdampfungsenthalpie
Δh_m	spez. oder molare Schmelzenthalpie
K	Gleichgewichtskonstante
k	Boltzmann-Konstante; Wärmedurchgangskoeffizient; Kondensatmenge im Rauchgas
l	bezogene Luftmenge; flüssig
M	Molmasse
M_d	Drehmoment

m	Masse
m_i	Molalität der Komponente i
\dot{m}	Massenstrom
N	Teilchenzahl
N_A	Avogadro-Konstante
n	Stoffmenge
n_d	Drehzahl
o_{\min}	spez. oder molare Mindestsauerstoffmenge
P	Leistung
p	Druck
Q	Wärme
\dot{Q}	Wärmestrom
q	spez. oder molare Wärme
\dot{q}	Wärmestromdichte
R	allgemeine Gaskonstante
r	spez. oder molare Verdampfungsenthalpie
S	Entropie
\dot{S}	Entropiestrom
$\Delta\dot{S}^{\text{irr}}$	Entropieproduktionsstrom
s	spez. oder molare Entropie
Δs^{irr}	spez. oder molare Entropieerzeugung
T	thermodynamische Temperatur
T_m	thermodynamische Mitteltemperatur
t	Celsius-Temperatur
U	innere Energie
u	spez. oder molare innere Energie
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
v	spez. oder molares Volumen; bezogene Abgasstoffmenge
W	Arbeit
w	spez. oder molare Arbeit
w_t	spez. oder molare technische Arbeit
w_i	Massenanteil der Komponente i
x	Dampfgehalt; Wasserbeladung feuchter Luft
x_i	Stoffmengenanteil der Komponente i
z	Höhenkoordinate; Zustandsgröße

b) Griechische Formelbuchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient; relative Flüchtigkeit
β	Wärmeverhältnis; Stromausbeute

γ_i	Aktivitätskoeffizient der Komponente i
ε	Leistungszahl einer Wärmepumpe
ε_0	Leistungszahl einer Kältemaschine
ζ	exergetischer Wirkungsgrad
η	(energetischer) Wirkungsgrad
η_c	Carnot-Faktor
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine
η_s	isentropen Wirkungsgrad
Θ^{ig}	Temperatur des idealen Gasthermometers
κ	Isentropenexponent
λ	Luftverhältnis; Wärmeleitfähigkeit
μ_i	chemisches Potenzial der Komponente i
ν_i	stöchiometrischer Koeffizient der Komponente i
ρ	Dichte
ξ	Reaktionslaufzahl
τ	Zeit
φ	relative Feuchte
ω	Winkelgeschwindigkeit; Gesamtwirkungsgrad

c) Indizes

0	Bezugsstand
1,2,3,...	Zustände 1, 2, 3. ...
12	Doppelindex: Prozessgröße eines Prozesses, der vom Zustand 1 in den Zustand 2 führt
A, B, ...	Systeme A, B, ...
a	Austrittsquerschnitt
ad	adiabat
B	Brennstoff
e	Eintrittsquerschnitt
i	Komponente i in einem Gemisch, im Systeminneren
K	Kessel
k	kritisch
L	Luft
0 <i>i</i>	reine Komponente i
s	isentrop; Sättigung
T	Taupunkt, Turbine
t	technisch
tr	Tripelpunkt
u	Umgebung
V	Verdichter; Verbrennungsgas; Volumenänderung
W	Welle

d) Suffices

0	Standardwert
irr	irreversibel
rev	reversibel
'	siedender Zustand
"	gesättigter Dampfzustand
V	Verbrennungsgas
if	Ideale Flüssigkeit
ig	Ideales Gas
il	Ideale Lösung
ivl	ideal verdünnte Lösung
l,L	flüssig
s	fest
g,G	gasförmig