

Karl Friedrich Knoche

Technische Thermodynamik

für Studenten des Maschinenbaus
und der Elektrotechnik
ab 1. Semester

2., vollständig überarbeitete Auflage

Mit 131 Bildern

Vieweg

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Knoche, Karl-Friedrich:

Technische Thermodynamik: Studienbuch für Studenten
d. Maschinenbaus u. d. Elektrotechnik ab 1. Semester.

-- 2., vollst. überarb. Aufl. -- Braunschweig: Vieweg, 1978.

(Uni-Texte: Studienbücher)

ISBN 978-3-528-13023-7
DOI 10.1007/978-3-322-93815-2

ISBN 978-3-322-93815-2 (eBook)

Verlagsredaktion: Alfred Schubert, Willy Ebert

1. Auflage 1972

2., vollständig überarbeitete Auflage 1978

Alle Rechte vorbehalten

©Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1978

Die Vervielfältigung und Übertragung einzelner Textabschnitte, Zeichnungen oder Bilder, auch für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, gestattet das Urheberrecht nur, wenn sie mit dem Verlag vorher vereinbart wurden. Im Einzelfall muß über die Zahlung einer Gebühr für die Nutzung fremden geistigen Eigentums entschieden werden. Das gilt für die Vervielfältigung durch alle Verfahren einschließlich Speicherung und jede Übertragung auf Papier, Transparente, Filme, Bänder, Platten und andere Medien.

Satz: Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Vorwort zur 1. Auflage

Die Fülle der im In- und Ausland zur Technischen Thermodynamik erschienenen Bücher könnte nur schwer ein weiteres Lehrbuch zu diesem Thema rechtfertigen. Dieses Studienbuch ist deshalb auch betont als *Vorlesungsbegleiter* konzipiert. Es soll dem Studenten das Mitschreiben ersparen, bietet also in knapper stichwortartiger Notierung die in der Vorlesung vermittelten Informationen. Dadurch wird der Leser auch nicht so leicht zum „Vorauslesen“ verführt, hat aber jederzeit die Möglichkeit, das schon Verstandene nachzuschlagen und zu repetieren. Die Literaturhinweise am Ende eines jeden Abschnitts sollen zur weiteren Vertiefung des Stoffes anregen. Die Auswahl des Stoffes entspricht etwa dem Inhalt der an deutschen Hochschulen gehaltenen Einführungsvorlesungen in die Technische Thermodynamik. Im Vergleich zu bekannten Lehrbüchern wurden die quasistatisch polytropen Zustandsänderungen mit Rücksicht auf viele technische Problemstellungen etwas ausführlicher behandelt.

Einer anschaulichen, insbesondere den Ingenieur ansprechenden Darstellung wurde – wo immer es ohne allzu schwerwiegende Einbußen an genauer Begriffsbestimmung möglich war – der Vorzug gegeben. Speziell bei der Einführung des zweiten Hauptsatzes wurde zunächst eine anschauliche Interpretation statistischer Gedankengänge versucht und darauf aufbauend die Aussagen des zweiten Hauptsatzes in Anlehnung an die Formulierungen von R. Haase (Thermodynamik der irreversiblen Prozesse) postuliert.

Herrn Professor *Bošnjaković* verdanke ich zahlreiche kritische Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge. Ebenso danke ich Herrn Dr. *J. Keller* für die kritische Durchsicht eines Teils des Manuskripts. Herr Dipl.-Ing. *H. Roertgen* hat mich beim Gestalten des Manuskripts durch viele wertvolle Anregungen und außerdem beim Korrekturlesen und bei der Vorbereitung der Diagramme sehr unterstützt; ich möchte ihm hierfür ganz besonders danken.

Aachen, im April 1972

K. F. Knoche

Vorwort zur 2. Auflage

Für die 2. Auflage wurde das Konzept des Studienbuches als Vorlesungsbegleiter konsequent beibehalten und durchgeführt. Gegenüber der 1. Auflage wurden nur geringfügige Änderungen und einige Umstellungen vorgenommen.

Herr Dr.-Ing. *A. Maurer* hat das ganze Manuskript sehr kritisch durchgelesen; ihm verdanke ich zahlreiche wertvolle Verbesserungsvorschläge. Ich bin ihm außerdem für sein sorgfältiges Korrekturlesen sehr zu Dank verpflichtet.

K. F. Knoche

Inhaltsverzeichnis

1	Grundbegriffe	1
1.1	Thermodynamisches System	1
1.2	Zustand und Zustandsgrößen; Prozeß	1
1.3	Natürliche Vorgänge und Gleichgewicht; Temperatur	3
1.4	Nullter Hauptsatz	5
1.5	Temperaturfixpunkte und empirische Temperaturskala	5
2	Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltungsprinzip)	7
2.1	Arbeit am geschlossenen System	7
2.2	Innere Energie und Wärme	10
2.2.1	Diathermes, isoliertes und adiabates System	10
2.2.2	Innere Energie	10
2.2.3	Wärme	11
2.3	Erster Hauptsatz für ein geschlossenes System	12
3	Zustandsgleichungen und Zustandsänderungen	14
3.1	Zustandseigenschaften einfacher Körper	14
3.2	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase	15
3.2.1	Versuch von Gay-Lussac (1816)	15
3.2.2	Boyle-Mariottesches Gesetz (1664–1676)	16
3.2.3	Zustandsgleichung idealer Gase	16
3.2.4	Abweichungen vom idealen Verhalten	17
3.3	Kalorische Zustandsgleichung idealer Gase	19
3.4	Nichtstatische und quasistatische Zustandsänderungen	24
3.5	Quasistatische Zustandsänderungen in ruhenden homogenen Systemen	25
3.5.1	Quasistatische Zustandsänderungen bei konstantem Volumen (Isochore)	25
3.5.2	Quasistatische Zustandsänderungen bei konstantem Druck (Isobare)	26
3.5.3	Quasistatische Zustandsänderungen bei $pV = \text{konst}$	27
3.5.4	Quasistatische Zustandsänderungen mit $\partial q + \partial w_R = 0$ (Isentrope)	28
3.5.5	Polytrope Zustandsänderung	30

4	Kreisprozesse	32
4.1	Kreisprozesse in geschlossenen Systemen	32
4.1.1	Rechtslaufender Carnotscher Kreisprozeß mit id. Gas konst. spez. Wärmekapazität	33
4.2.1	Linkslaufender Carnotscher Kreisprozeß	35
4.1.3	Umkehrung des Carnotschen Kreisprozesses	36
5A	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	37
5.1	Umkehrbare und nichtumkehrbare Prozesse	37
5.2	Statistische Deutung des adiabaten Druckausgleichs	38
5.3	Statistische Energieverteilung	41
5.4	Wahrscheinlichkeit und Entropie	45
5.5	Temperatur	46
5.6	Zweiter Hauptsatz für geschlossene Systeme	48
5.7	Zusammenhang zwischen Wärmeaustausch und Entropieänderung	49
5.8	Entropie, Enthalpie und innere Energie einfacher Stoffe	51
5.8.1	Entropie idealer Gase	51
5.8.2	Entropie beliebiger Stoffe, deren Zustand durch zwei unabhängige Zustandsgrößen eindeutig bestimmt ist	52
5.8.3	Enthalpie und innere Energie beliebiger Stoffe, deren Zustand durch zwei unabhängige Zustandsgrößen eindeutig bestimmt ist	54
5.9	T,s-Diagramm für einfache Stoffe	56
5.9.1	Darstellung von Prozeßgrößen im T,s-Diagramm	57
5B	Offene Systeme	60
5.10	Erster und zweiter Hauptsatz für ein offenes System	60
5.10.1	Erster Hauptsatz	60
5.10.2	Zweiter Hauptsatz	61
5.11	Erster und zweiter Hauptsatz für einen stationären Fließprozeß	61
5.11.1	Erster Hauptsatz	62
5.11.2	Zweiter Hauptsatz	62
5.11.3	Quasistatische Zustandsänderungen bei stationären Fließprozessen	62
5.11.4	Kreisprozesse als Folge von stationären Fließprozessen	66
5.12	Mollier h,s-Diagramm für einfache Stoffe	68

5C Exergie	70
5.13 Natürliche Vorgänge und Gleichgewicht	70
5.14 Umwelt und Energieumwandlung	71
5.15 Exergie und Anergie	71
5.15.1 Stationäre Fließprozesse; Wärmeaustausch nach außen nur mit der Umgebung	71
5.15.2 Stationärer Fließprozeß mit beliebigem Wärmeaustausch	73
5.15.3 Exergie geschlossener Systeme (maximale Arbeit)	77
6 Zustandsgleichungen realer Gase	78
6.1 Zustandsgleichungen nach van der Waals (1873)	78
6.2 Weitere Zustandsgleichungen	81
6.2.1 Beattie-Bridgeman-Gleichung	81
6.2.2 Benedict-Webb-Rubin-Gleichung	81
6.2.3 Virialkoeffizienten	82
6.2.4 Wasserdampfformeln	82
6.3 Zweiphasengebiete	83
6.3.1 Clapeyron-Clausius-Gleichung	85
6.4 Verdampfung	87
6.4.1 Der Verdampfungsvorgang	87
6.4.2 Quasistatische Zustandsänderungen vom Naßdampf	89
6.5 Mollier h,s-Diagramm für Wasserdampf	90
6.6 Joule-Thomson-Effekt; Grundlagen der Gasverflüssigung	91
6.6.1 Gasverflüssigungsverfahren nach Linde	92
7 Gemische und Mischungsprozesse	94
7.1 Gemische	94
7.1.1 Gemische idealer Gase	95
7.2 Adiabate Mischung idealer Gase (geschlossenes System)	96
7.3 Stationärer und adiabater Mischungsprozeß	100
7.4 Feuchte Luft	101
7.4.1 Zustandsgrößen feuchter Luft	101
7.4.2 Mollier h,x-Diagramm für feuchte Luft	105
7.4.3 Stationäre und adiabate Mischungsvorgänge mit feuchter Luft ...	106
7.4.4 Stationäre Mischung mit Wärmezufuhr	108
7.4.5 Stationäre und adiabate Zumischung von reinem Wasser bzw. Wasserdampf	108

8	Verbrennungsvorgänge und andere chemische Umsetzungen	110
8.1	Stoffumsatz	110
8.1.1	Oxidationsverhältnis λ und Verbrennungsgasverhältnis χ	111
8.2	Energiebilanz	113
8.2.1	Adiabate Verbrennungstemperatur	115
8.3	Entropiebilanz und Irreversibilität der Verbrennung	116
8.3.1	Exergieverlust bei adiabater Verbrennung	116
9	Strömungs- und Arbeitsprozesse	119
9.1	Beliebige Expansion bzw. Kompression mit quasistatischer polytroper Zustandsänderung	119
9.2	Verzögerte und beschleunigte stationäre Strömungsvorgänge ohne Arbeitsleistung	123
9.3	Stationäre Strömung konstanten Querschnitts mit Wärmeaustausch	125
9.4	Adiabate Strömungsprozesse	126
9.4.1	Strömungsquerschnitte	128
9.4.1.1	Geschwindigkeit im Lavalzustand	129
9.4.1.2	Lavaldruck	130
9.4.1.3	Lavalquerschnitt und beliebiger Düsenquerschnitt	131
9.4.2	Der senkrechte Verdichtungsstoß	132
9.4.3	Schwacher Stoß; Schallgeschwindigkeit	134
9.5	Arbeitsprozesse mit adiabater Expansion oder Kompression	135
9.6	Isotherme Kompression (bzw. Expansion)	139
10	Energieumwandlung Wärme-Arbeit	142
10.1	Thermodynamische Mitteltemperatur beim isobaren Wärmeaustausch (Mittlere Wärmezufuhrtemperatur bzw. Wärmeabfuhrtemperatur)	142
10.2	Dampfkraftprozeß	144
10.2.1	Einfache Dampfkraftanlage	144
10.2.2	Zwischenüberhitzung	147
10.2.3	Speisewasservorwärmung	147
10.3	Gasturbinenprozesse	149
10.3.1	Geschlossener Gasturbinenprozeß	149
10.3.2	Geschlossener Gasturbinenprozeß im Wärmeaustausch	150
10.3.3	Einfacher offener Gasturbinenprozeß	151
10.3.4	Prinzip des Strahltriebwerkes	153
	Literaturverzeichnis	155
	Sachwortverzeichnis	156