



## Inhaltsverzeichnis

Günter Cerbe, Gernot Wilhelms

Technische Thermodynamik

Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen

ISBN (Buch): 978-3-446-43638-1

ISBN (E-Book): 978-3-446-43750-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43638-1>

sowie im Buchhandel.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	13
<b>1 Grundlagen der Thermodynamik</b>	17
1.1 Aufgabe der Thermodynamik	17
1.2 Größen und Einheitensysteme	17
1.2.1 Physikalische Größen und Größenarten	17
1.2.2 Größengleichungen	18
1.2.3 Zahlenwertgleichungen	19
1.2.4 Einheitensysteme	20
1.3 Thermische Zustandsgrößen	23
1.3.1 Volumen	23
1.3.2 Druck	24
1.3.3 Temperatur	29
1.4 Thermische Zustandsgleichung	32
1.4.1 Thermische Zustandsgleichung eines homogenen Systems	32
1.4.2 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	32
1.5 Mengenmaße Kilomol und Normvolumen; molare Gaskonstante	36
1.5.1 Kilomol	36
1.5.2 Normvolumen	37
1.5.3 Molare Gaskonstante	38
1.6 Thermische Ausdehnung	40
1.6.1 Längenänderung	40
1.6.2 Volumenänderung	42
1.7 Thermodynamisches System	46
1.7.1 Systeme und Systemgrenzen	46
1.7.2 Zustandsgrößen und Prozessgrößen	47
1.7.3 Zustandsänderungen und Prozesse	48
Kontrollfragen	51
<b>2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik</b>	52
2.1 Energieerhaltung, Energiebilanz	52
2.2 Arbeit am geschlossenen System	52
2.3 Innere Energie	56
2.4 Wärme	58
2.5 Arbeit am offenen System und Enthalpie	60
2.6 Formulierungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik	66
2.7 Kalorische Zustandsgleichungen	68
2.7.1 Kalorische Zustandsgleichungen eines homogenen Systems	68
2.7.2 Spezifische Wärmekapazitäten eines homogenen Systems	68
2.7.3 Kalorische Zustandsgleichungen des idealen Gases	72
2.7.4 Spezifische Wärmekapazitäten des idealen Gases	75
2.7.5 Molare Wärmekapazitäten des idealen Gases	78
Kontrollfragen	80

<b>3 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik</b> . . . . .	82
3.1 Aussagen des zweiten Hauptsatzes . . . . .	82
3.2 Entropie . . . . .	82
3.2.1 Einführung der Entropie . . . . .	82
3.2.2 Entropiebilanzen . . . . .	84
3.2.3 $T,S$ -Diagramm . . . . .	88
3.3 Fundamentalgleichungen . . . . .	89
3.4 Einfache Zustandsänderungen des idealen Gases . . . . .	90
3.4.1 Isochore Zustandsänderung . . . . .	91
3.4.2 Isobare Zustandsänderung . . . . .	94
3.4.3 Isotherme Zustandsänderung . . . . .	98
3.4.4 Isentrope Zustandsänderung . . . . .	103
3.4.5 Polytrope Zustandsänderung . . . . .	109
3.4.6 Zustandsänderungen in adiabaten Systemen . . . . .	118
3.5 Kreisprozesse . . . . .	121
3.5.1 Kontinuierlicher Ablauf in Kreisprozessen . . . . .	121
3.5.2 Arbeit und Prozessverlauf . . . . .	122
3.5.3 Wärmekraftmaschine . . . . .	126
3.5.4 Grenzen der thermischen Energieumwandlung . . . . .	129
3.5.5 Vergleich reversibler und irreversibler Kreisprozesse . . . . .	132
3.5.6 Wärmepumpe und Kältemaschine . . . . .	137
3.6 Adiabate Drosselung . . . . .	140
3.7 Instationäre Prozesse . . . . .	144
3.7.1 Füllen eines Behälters . . . . .	144
3.7.2 Temperatenausgleich . . . . .	145
3.8 Wärmetransport . . . . .	149
3.8.1 Entropieerzeugung beim Wärmetransport . . . . .	149
3.8.2 Thermodynamische Mitteltemperatur . . . . .	150
3.9 Exergie und Anergie . . . . .	152
3.9.1 Begrenzte Umwandelbarkeit der inneren Energie und der Wärme . . . . .	152
3.9.2 Exergie und Anergie eines strömenden Fluids . . . . .	153
3.9.3 Exergie und Anergie eines geschlossenen Systems . . . . .	157
3.9.4 Exergie und Anergie der Wärme . . . . .	158
3.9.5 Exergieverlust . . . . .	162
3.9.6 Exergetischer Wirkungsgrad . . . . .	165
3.9.7 Energie- und Exergie-Flussbild . . . . .	165
Kontrollfragen . . . . .	167
<b>4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen</b> . . . . .	170
4.1 Kreisprozesse für Wärme- und Verbrennungskraftanlagen . . . . .	170
4.1.1 Vergleichsprozesse . . . . .	170
4.1.2 Bewertungszahlen für die Kreisprozesse . . . . .	171
4.2 Kreisprozesse der Gasturbinenanlagen . . . . .	177
4.2.1 Arbeitsprinzip der Gasturbinenanlagen . . . . .	177
4.2.2 Joule-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage . . . . .	178

4.2.3	Ericsson-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage . . . . .	186
4.2.4	Der wirkliche Prozess in der Gasturbinenanlage . . . . .	189
4.3	Kreisprozess des Heißgasmotors . . . . .	197
4.3.1	Arbeitsprinzip des Heißgasmotors . . . . .	197
4.3.2	Stirling-Prozess als Vergleichsprozess des Heißgasmotors . . . . .	197
4.3.3	Der wirkliche Prozess im Heißgasmotor . . . . .	199
4.4	Kreisprozesse der Verbrennungsmotoren . . . . .	201
4.4.1	Übertragung des Arbeitsprinzips der Motoren in einen Kreisprozess . . . . .	201
4.4.2	Otto-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichraumprozess)	201
4.4.3	Diesel-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gleichdruckprozess) . . . . .	205
4.4.4	Seiliger-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors (Gemischter Vergleichsprozess) . . . . .	207
4.4.5	Der wirkliche Prozess in den Verbrennungsmotoren . . . . .	209
4.5	Kolbenverdichter . . . . .	210
4.5.1	Der verlustlose Kolbenverdichter ohne Schadraum . . . . .	210
4.5.2	Bewertungszahlen für den Kolbenverdichter . . . . .	215
	Kontrollfragen . . . . .	222
<b>5</b>	<b>Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen . . . . .</b>	<b>223</b>
5.1	Das reale Verhalten der Stoffe . . . . .	223
5.1.1	Aggregatzustandsänderungen, Phasenwechsel . . . . .	223
5.1.2	Thermische Zustandsgleichungen realer Fluide . . . . .	227
5.1.3	$p, v, T$ -Diagramm . . . . .	230
5.2	Wasserdampf . . . . .	231
5.2.1	Zustandsgleichungen des Wasserdampfes . . . . .	231
5.2.2	Spezifische Zustandsgrößen . . . . .	232
5.2.3	Gleichung von Clausius und Clapeyron . . . . .	243
5.2.4	Zustandsänderungen des Wasserdampfes . . . . .	244
5.3	Dampfkraftanlagen . . . . .	247
5.3.1	Arbeitsprinzip der Dampfkraftanlagen . . . . .	247
5.3.2	Clausius-Rankine-Prozess als Vergleichsprozess der Dampfkraftanlage . . . . .	248
5.3.3	Verfahren zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades . . . . .	253
5.3.4	Zwischenüberhitzen. Verfahren zur Verringerung des Wassergehaltes im Abdampf . . . . .	259
5.3.5	Der wirkliche Prozess in Dampfkraftanlagen . . . . .	261
5.4	Kombiniertes Gas-Dampf-Kraftwerk (GUD-Prozess) . . . . .	268
5.4.1	Zweck der Kombination . . . . .	268
5.4.2	Grundschtaltung des Gas-Dampf-Kraftwerkes . . . . .	268
5.4.3	Wirkungsgrade beim Gas-Dampf-Kraftwerk . . . . .	270
5.4.4	Schaltungsbeispiele . . . . .	272
5.5	Organische Rankine-Prozesse (ORC) . . . . .	278
5.5.1	Prozessverlauf . . . . .	278
5.5.2	Organische Arbeitsfluide . . . . .	279
5.6	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen . . . . .	284
	Kontrollfragen . . . . .	289

<b>6 Gemische</b>	291
6.1 Zusammensetzung von Gemischen	291
6.1.1 Massenanteil	291
6.1.2 Stoffmengenanteil (Molanteil)	292
6.1.3 Molare Masse des Gemisches	292
6.1.4 Beladung	293
6.2 Ideale Gemische	295
6.2.1 Gesetz von Amagat	295
6.2.2 Partialdichte (Massenkonzentration) und Gemischdichte	296
6.2.3 Raumenteil	297
6.2.4 Die extensiven Zustandsgrößen des idealen Gemisches	299
6.3 Gemisch idealer Gase	304
6.3.1 Thermische Zustandsgleichung	304
6.3.2 Partialdruck (Gesetz von Dalton)	304
6.3.3 Mischungsentropie und Exergie eines Gemisches idealer Gase	305
6.3.4 Zusammensetzung von Gemischen idealer Gase	308
6.4 Gas-Dampf-Gemisch; Feuchte Luft	311
6.4.1 Sättigungszustand, Taupunkt	311
6.4.2 Feuchte Luft als Beispiel eines Gas-Dampf-Gemisches	313
6.4.3 Zusammensetzung feuchter Luft	314
6.4.4 Spezifisches Volumen feuchter Luft	318
6.4.5 Spezifische Enthalpie feuchter Luft	319
6.4.6 $h,x$ -Diagramm von Mollier	321
6.4.7 Einfache isobare Zustandsänderungen feuchter Luft im $h,x$ -Diagramm	324
Kontrollfragen	332
<b>7 Strömungsvorgänge</b>	335
7.1 Kontinuitätsgleichung	335
7.2 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	336
7.2.1 Arbeitsprozesse	336
7.2.2 Strömungsprozesse	341
7.3 Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	345
7.3.1 Impulsatz	345
7.3.2 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	349
7.4 Düsen- und Diffusorströmung	350
7.4.1 Energieumwandlung in Düsen und Diffusoren	350
7.4.2 Reibungsfreie Düsenströmung	352
7.4.3 Schallgeschwindigkeit	356
7.4.4 Reibungsfreie Diffusorströmung	356
7.4.5 Ausbildung einer Laval-Düse oder eines Überschall-Diffusors	357
Kontrollfragen	362
<b>8 Wärmeübertragung</b>	363
8.1 Arten der Wärmeübertragung	363
8.2 Wärmeleitung	363
8.2.1 Ebene Wand	363
8.2.2 Zylindrische Wand	369
8.2.3 Hohlkugelwand	370
8.3 Konvektiver Wärmeübergang	371
8.3.1 Wärmeübergangsbeziehungen	371

8.3.2	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs . . . . .	372
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen . . . . .	383
8.4	Temperaturstrahlung . . . . .	387
8.4.1	Einführung . . . . .	387
8.4.2	Wärmeübertragung durch Strahlung . . . . .	392
8.4.3	Gas- und Flammenstrahlung . . . . .	393
8.5	Wärmedurchgang . . . . .	394
8.5.1	Wärmedurchgangsbeziehungen . . . . .	394
8.5.2	Beeinflussung des Wärmedurchgangs . . . . .	396
8.5.3	Zwischentemperaturen . . . . .	397
8.6	Wärmeübertrager . . . . .	397
8.6.1	Gegen-, Gleich- und Kreuzstrom . . . . .	398
8.6.2	Berechnungsverfahren . . . . .	401
8.6.3	Verfahrensoptimierung bei der Wärmenutzung . . . . .	405
8.6.4	Exergieverlust im Wärmeübertrager . . . . .	406
	Kontrollfragen . . . . .	408
<b>9</b>	<b>Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen . . . . .</b>	<b>410</b>
9.1	Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung . . . . .	410
9.1.1	Verbrennungstechnische Eigenschaften der Brennstoffe . . . . .	410
9.1.2	Verbrennungsvorgang . . . . .	413
9.1.3	Reaktionsgleichungen . . . . .	414
9.2	Verbrennungsrechnung . . . . .	415
9.2.1	Feste und flüssige Brennstoffe . . . . .	415
9.2.2	Gasförmige Brennstoffe . . . . .	424
9.2.3	Näherungslösungen . . . . .	428
9.3	Verbrennungskontrolle . . . . .	429
9.3.1	Messmethode . . . . .	429
9.3.2	Auswertung der Messung . . . . .	430
9.3.3	Verbrennungsdreiecke . . . . .	433
9.4	Theoretische Verbrennungstemperatur . . . . .	437
9.5	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad . . . . .	443
9.5.1	Konventionelle Verbrennungsanlagen . . . . .	443
9.5.2	Verbrennungsanlagen mit Kondensation im Abgas . . . . .	444
9.6	Abgastaupunkt . . . . .	448
9.7	Emissionen aus Verbrennungsanlagen . . . . .	449
9.7.1	Einführung . . . . .	449
9.7.2	Minderung der Schwefeloxidemission . . . . .	453
9.7.3	Minderung der Stickoxidemission . . . . .	455
9.7.4	Minderung der Kohlendioxidemission . . . . .	458
9.8	Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung . . . . .	463
9.8.1	Enthalpie, Entropie, freie Enthalpie . . . . .	463
9.8.2	Brennstoffexergie . . . . .	471
9.8.3	Exergieverlust bei der Verbrennung . . . . .	475
9.9	Brennstoffzellen . . . . .	477
9.9.1	Wirkprinzip . . . . .	477

---

9.9.2	Energetische Bewertung . . . . .	478
9.9.3	Bauarten . . . . .	482
	Kontrollfragen . . . . .	486
<b>10</b>	<b>Lösungsergebnisse der Aufgaben</b> . . . . .	<b>488</b>
<b>11</b>	<b>Antworten auf die Kontrollfragen</b> . . . . .	<b>498</b>
11.1	Grundlagen der Thermodynamik . . . . .	498
11.2	Erster Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	499
11.3	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik . . . . .	501
11.4	Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen . . . . .	504
11.5	Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen . . . . .	505
11.6	Gemische . . . . .	507
11.7	Strömungsvorgänge . . . . .	509
11.8	Wärmeübertragung . . . . .	509
11.9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen . . . . .	511
<b>Anhang</b>	. . . . .	<b>513</b>
A1	Schrifttum . . . . .	513
A2	Nachweis verwendeter Unterlagen . . . . .	515
A3	Wiederholung häufig benutzter Tafeln . . . . .	516
<b>Sachwortverzeichnis</b>	. . . . .	<b>533</b>