

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Grundlagen	1
1.1	Thermodynamik	1
1.1.1	Von der historischen Entwicklung der Thermodynamik	1
1.1.2	Was ist Thermodynamik?	9
1.2	System und Zustand	11
1.2.1	System und Systemgrenzen	12
1.2.2	Zustand und Zustandsgrößen	13
1.2.3	Extensive, intensive, spezifische und molare Zustandsgrößen, Dichten	16
1.2.4	Fluide Phasen. Zustandsgleichungen	20
1.3	Prozesse	21
1.3.1	Prozess und Zustandsänderung	21
1.3.2	Reversible und irreversible Prozesse	22
1.3.3	Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik als Prinzip der Irreversibilität	26
1.3.4	Quasistatische Zustandsänderungen und irreversible Prozesse	27
1.3.5	Stationäre Prozesse	28
1.4	Temperatur	30
1.4.1	Thermisches Gleichgewicht und Temperatur	30
1.4.2	Thermometer und empirische Temperatur	33
1.4.3	Die Temperatur des idealen Gasthermometers	35
1.4.4	Celsius-Temperatur. Internationale Praktische Temperaturskala	38
1.4.5	Die thermische Zustandsgleichung idealer Gase	41
2	Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik	43
2.1	Der 1. Hauptsatz für geschlossene Systeme	43
2.1.1	Mechanische Energien	43
2.1.2	Der 1. Hauptsatz. Innere Energie	47
2.1.3	Die kalorische Zustandsgleichung fluider Phasen	51
2.1.4	Die Energiebilanzgleichung	54
2.2	Arbeit und Wärme	56
2.2.1	Mechanische Arbeit und Leistung	56
2.2.2	Volumenänderungsarbeit	58

2.2.3	Wellenarbeit	62
2.2.4	Elektrische Arbeit und Arbeit nichtfluider Systeme ...	64
2.2.5	Wärme und Wärmestrom	68
2.3	Energiebilanzgleichungen	70
2.3.1	Energiebilanzgleichungen für geschlossene Systeme....	70
2.3.2	Massenbilanz und Energiebilanz für einen Kontrollraum	76
2.3.3	Instationäre Prozesse offener Systeme	82
2.3.4	Der 1. Hauptsatz für stationäre Fließprozesse.....	85
2.3.5	Enthalpie	87
3	Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	93
3.1	Entropie und Entropiebilanzen	93
3.1.1	Einführende Überlegungen.....	94
3.1.2	Die Formulierung des 2. Hauptsatzes durch Entropie und thermodynamische Temperatur	97
3.1.3	Die Entropiebilanzgleichung für geschlossene Systeme .	101
3.1.4	Die Irreversibilität des Wärmeübergangs und die thermodynamische Temperatur	106
3.1.5	Die Umwandlung von Wärme in Nutzarbeit. Wärmekraftmaschinen	112
3.1.6	Die Entropiebilanzgleichung für einen Kontrollraum...	117
3.1.7	Die Entropiebilanzgleichung für stationäre Fließprozesse	120
3.2	Die Entropie als Zustandsgröße.....	125
3.2.1	Die Entropie reiner Stoffe	125
3.2.2	Die Messung thermodynamischer Temperaturen und die Entropie idealer Gase	129
3.2.3	Das T,s -Diagramm	134
3.2.4	Fundamentalgleichungen und charakteristische Funktionen	137
3.2.5	Gleichgewichts- und Stabilitätsbedingungen. Phasengleichgewicht	142
3.3	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf Energieumwandlungen: Exergie und Anergie	150
3.3.1	Die beschränkte Umwandelbarkeit der Energie	150
3.3.2	Die Definitionen von Exergie, Anergie und thermodynamischer Umgebung.....	152
3.3.3	Die Rolle der Exergie in der Thermodynamik und ihren technischen Anwendungen	156
3.3.4	Die Berechnung von Exergien und Exergieverlusten ...	159
3.3.5	Exergie und Anergie der Wärme	164
3.3.6	Exergie und Anergie eines Stoffstroms.....	169
3.3.7	Exergiebilanzen und exergetische Wirkungsgrade	171

4	Die thermodynamischen Eigenschaften reiner Fluide	177
4.1	Die thermischen Zustandsgrößen	177
4.1.1	Die p, v, T -Fläche	178
4.1.2	Das p, T -Diagramm und die Gleichung von Clausius-Clapeyron	181
4.1.3	Die thermische Zustandsgleichung	185
4.1.4	Das Prinzip der korrespondierenden Zustände	190
4.1.5	Kubische Zustandsgleichungen	192
4.2	Das Nassdampfgebiet	199
4.2.1	Nasser Dampf	199
4.2.2	Dampfdruck und Siedetemperatur	200
4.2.3	Die spezifischen Zustandsgrößen im Nassdampfgebiet	203
4.3	Zwei Stoffmodelle: ideales Gas und inkompressibles Fluid	208
4.3.1	Die Zustandsgleichungen des idealen Gases	208
4.3.2	Die spezifischen Wärmekapazitäten idealer Gase	211
4.3.3	Entropie und isentrope Zustandsänderungen idealer Gase	214
4.3.4	Das inkompressible Fluid	217
4.4	Zustandsgleichungen, Tafeln und Diagramme	220
4.4.1	Die Bestimmung von Enthalpie und Entropie mit Hilfe der thermischen Zustandsgleichung	221
4.4.2	Fundamentalgleichungen	224
4.4.3	Schallgeschwindigkeit und Isentropenexponent	226
4.4.4	Tafeln der Zustandsgrößen	229
4.4.5	Zustandsdiagramme	231
5	Gemische und chemische Reaktionen	235
5.1	Mischphasen und Phasengleichgewichte	235
5.1.1	Größen zur Beschreibung der Zusammensetzung	236
5.1.2	Mischungsgrößen und die Irreversibilität des Mischungsvorgangs	240
5.1.3	Partielle molare Größen	243
5.1.4	Die Gibbs-Funktion einer Mischphase	248
5.1.5	Chemische Potenziale. Membrangleichgewicht	252
5.1.6	Phasengleichgewichte	257
5.1.7	Phasengleichgewichte in Zweistoffsystemen	260
5.2	Ideale Gemische	266
5.2.1	Ideale Gasgemische	266
5.2.2	Die Zustandsgleichungen idealer Gasgemische	268
5.2.3	Ideale Lösungen	272
5.2.4	Phasengleichgewicht. Gesetz von Raoult	277
5.3	Ideale Gas-Dampf-Gemische. Feuchte Luft	281
5.3.1	Der Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes und der Taupunkt	282
5.3.2	Absolute und relative Feuchte	286

5.3.3	Die Wasserbeladung	288
5.3.4	Das spezifische Volumen feuchter Luft	290
5.3.5	Die spezifische Enthalpie feuchter Luft	291
5.3.6	Das Enthalpie, Wasserbeladungs-Diagramm	295
5.3.7	Die spezifische Entropie feuchter Luft	297
5.4	Reale fluide Gemische	302
5.4.1	Realpotenzial und Fugazitätskoeffizient	302
5.4.2	Thermische Zustandsgleichungen für Gemische	306
5.4.3	Die Berechnung des Verdampfungs-gleichgewichts mit der thermischen Zustandsgleichung des Gemisches	310
5.4.4	Exzesspotenzial und Aktivitätskoeffizient	311
5.4.5	Das Verdampfungs-gleichgewicht bei mäßigen Drücken .	315
5.4.6	Die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten	320
5.5	Chemisch reagierende Gemische	327
5.5.1	Reaktionen und Reaktionsgleichungen	327
5.5.2	Stöchiometrie	333
5.5.3	Reaktionsenthalpien und Standard-Bildungsenthalpien	338
5.5.4	Der 3. Hauptsatz der Thermodynamik	344
5.5.5	Die Anwendung des 2. Hauptsatzes auf chemische Reaktionen	346
5.5.6	Chemische Exergien	350
5.6	Reaktionsgleichgewichte	356
5.6.1	Die Bedingungen des Reaktionsgleichgewichts	356
5.6.2	Das Reaktionsgleichgewicht in einfachen Fällen. Gleichgewichtskonstanten	363
5.6.3	Gasgleichgewichte	367
5.6.4	Heterogene Reaktionsgleichgewichte	371
6	Stationäre Fließprozesse	375
6.1	Technische Arbeit, Dissipationsenergie und die Zustandsänderung des strömenden Fluids	375
6.1.1	Dissipationsenergie und technische Arbeit	376
6.1.2	Polytrophen. Polytrope Wirkungsgrade	382
6.2	Strömungs- und Arbeitsprozesse	387
6.2.1	Strömungsprozesse	387
6.2.2	Adiabate Düsen und Diffusoren	394
6.2.3	Querschnittsflächen adiabater Düsen und Diffusoren ..	397
6.2.4	Adiabate Turbinen und Verdichter	401
6.2.5	Nichtadiabate Verdichtung	408
6.3	Wärmeübertrager	411
6.3.1	Die Anwendung des 1. Hauptsatzes	411
6.3.2	Die Temperaturen der beiden Fluidströme	415
6.3.3	Der Exergieverlust eines Wärmeübertragers	418
6.4	Thermische Stofftrennprozesse	420
6.4.1	Trocknen	420

6.4.2	Verdampfen und Eindampfen	427
6.4.3	Destillieren und Rektifizieren	430
6.4.4	Absorbieren	436
7	Verbrennungsprozesse und Verbrennungskraftanlagen	443
7.1	Mengenberechnung bei vollständiger Verbrennung	443
7.1.1	Brennstoffe und Verbrennungsgleichungen	444
7.1.2	Mindestluftmenge, Luftverhältnis und Verbrennungsgas	446
7.1.3	Brennstoffe mit bekannter Elementaranalyse	449
7.1.4	Brennstoffe mit bekannter chemischer Zusammensetzung	453
7.2	Energetik der Verbrennungsprozesse	457
7.2.1	Die Anwendung des 1. Hauptsatzes	457
7.2.2	Heizwert und Brennwert	464
7.2.3	Abgasverlust und Kesselwirkungsgrad	468
7.2.4	Die Nutzung der Wasserdampf-Teilkondensation in Brennwertkesseln	471
7.2.5	Die adiabate Verbrennungstemperatur	478
7.2.6	Die Exergie der Brennstoffe	480
7.2.7	Der Exergieverlust der adiabaten Verbrennung	484
7.3	Verbrennungskraftanlagen	487
7.3.1	Leistungsbilanz und Wirkungsgrad	487
7.3.2	Die einfache Gasturbinenanlage	489
7.3.3	Die genauere Berechnung des Gasturbinenprozesses ...	494
7.3.4	Die Gasturbine als Flugzeugantrieb	500
7.3.5	Verbrennungsmotoren	504
7.3.6	Die Brennstoffzelle	508
7.3.7	Brennstoffzellen-Systeme	517
8	Thermodynamik der Wärmekraftanlagen	523
8.1	Die Umwandlung von Primärenergie in Nutzenergie	523
8.1.1	Übersicht über die Umwandlungsverfahren	527
8.1.2	Thermische Kraftwerke	530
8.1.3	Kraftwerkswirkungsgrade	532
8.1.4	Kreisprozesse für Wärmekraftmaschinen	535
8.2	Dampfkraftwerke	541
8.2.1	Die einfache Dampfkraftanlage	541
8.2.2	Zwischenüberhitzung	548
8.2.3	Regenerative Speisewasser- und Luftvorwärmung	550
8.2.4	Das moderne Dampfkraftwerk	553
8.2.5	Kombinierte Gas-Dampf-Kraftwerke	555
8.2.6	Kernkraftwerke	558
8.3	Die CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	560
8.3.1	Die Berechnung der CO ₂ -Emission	561
8.3.2	Ergebnisse	564

9	Thermodynamik des Heizens und Kühlens	569
9.1	Thermodynamische Grundlagen des Heizens und des Kühlens	569
9.1.1	Die Grundaufgabe der Heiztechnik und der Kältetechnik	569
9.1.2	Wärmepumpe und Kältemaschine	572
9.1.3	Wärmetransformation	576
9.2	Heizsysteme	579
9.2.1	Heizzahl und exergetischer Wirkungsgrad	579
9.2.2	Konventionelle Heizsysteme	582
9.2.3	Wärmepumpen-Heizsysteme	584
9.2.4	Kraft-Wärme-Kopplung. Heizkraftwerke	586
9.3	Einige Verfahren zur Kälteerzeugung	590
9.3.1	Kompressionskältemaschinen	592
9.3.2	Absorptionskältemaschinen	597
9.3.3	Kältemittel	602
9.3.4	Das Linde-Verfahren zur Luftverflüssigung	605
10	Mengenmaße, Einheiten, Stoffdaten	609
10.1	Mengenmaße	609
10.1.1	Masse und Gewicht	609
10.1.2	Teilchenzahl und Stoffmenge	610
10.1.3	Das Normvolumen	612
10.2	Einheiten	613
10.2.1	Die Einheiten des Internationalen Einheitensystems	613
10.2.2	Einheiten anderer Einheitensysteme. Umrechnungsfaktoren	616
10.3	Stoffdaten	618
10.3.1	Allgemeine Daten	618
10.3.2	Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie von Luft und Verbrennungsgasen	620
10.3.3	Tabellen der mittleren spezifischen Wärmekapazität und der spezifischen Entropie beim Standarddruck	624
10.3.4	Aus der Dampftafel für Wasser	627
10.3.5	Heizwerte, Brennwerte und Brennstoff-Exergien	628
	Literatur	631
	Index	651