

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Zum Inhalt und Aufbau der Technischen Thermodynamik	1
Maßsysteme und Einheiten	2
Zusammenfassung	7

Teil A: Grundlagen der Energielehre

1	Grundbegriffe der Thermodynamik	10
1.1	Der Systembegriff in der Thermodynamik	10
1.2	Der thermodynamische Zustand eines Systems	14
1.2.1	Klassifikation und Eigenschaften der Zustandsgrößen	15
1.2.2	Die thermischen Zustandsgrößen	24
1.2.2.1	Spezifisches Volumen, Dichte und molares Volumen	24
1.2.2.2	Druck	25
1.2.2.3	Temperatur	29
1.2.3	Die thermische Zustandsgleichung	40
1.3	Vorgänge in thermodynamischen Systemen	46
1.4	Zusammenfassung	49
2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	50
2.1	Anwendung des ersten Hauptsatzes auf stoffdichte Systeme	50
2.1.1	Mathematische Formulierung für den inneren Systemzustand ..	50
2.1.1.1	Einführung der inneren Energie	50
2.1.1.2	Wärme als zusätzliche Prozeßgröße neben der Arbeit und ihre Definition	54
2.1.1.3	Definition und Berechnung der Volumenänderungsarbeit	58
2.1.1.4	Reibungsarbeit als weitere den inneren Systemzustand beeinflussende Energieform	63
2.1.1.5	Die Energiebilanzgleichungen für den inneren Systemzustand ..	65
2.1.2	Mathematische Formulierung unter Berücksichtigung des äußeren Systemzustandes	71

2.2	Anwendung des ersten Hauptsatzes auf stoffdurchlässige Systeme	73
2.2.1	Energiebilanz für nichtstationäre Prozesse in stoffdurchlässigen Systemen	74
2.2.2	Energiebilanz für stationäre Prozesse in stoffdurchlässigen Systemen	77
2.2.3	Berechnung der technischen Arbeit aus dem Zustandsverlauf...	78
2.3	Zusammenfassung	83
3	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	86
3.1	Der zweite Hauptsatz als ein Erfahrungsgesetz	86
3.2	Mathematische Formulierung des zweiten Hauptsatzes	89
3.2.1	Das Carathéodorysche Unerreichbarkeitsprinzip	89
3.2.2	Holonomität der Pfaffschen Form $dU + pdV$	94
3.2.3	Die Definitionsgleichung der metrischen Entropie (für einfache Systeme) und die thermodynamische Temperatur	98
3.2.4	Das Entropieverhalten (einfacher) stoffdichter und stoffdurchlässiger Systeme	107
3.2.4.1	Das Entropieverhalten (einfacher) stoffdichter adiabater Systeme	108
3.2.4.2	Das Entropieverhalten (einfacher) stoffdichter nichtadiabater Systeme	110
3.2.4.3	Das Entropieverhalten stoffdurchlässiger Systeme	113
3.3	Das T, s - oder Wärmediagramm	119
3.4	Thermodynamische Prozesse aus der Sicht des ersten und zweiten Hauptsatzes – Exergie und Anergie	122
3.4.1	Definition der Pseudozustandsgröße Exergie und Aufstellung der Exergiebilanzgleichung in allgemeiner Form	124
3.4.2	Darstellung der Exergie des Stoffstromes im p, v -, T, s - und h, s -Diagramm	127
3.4.3	Bewertungskriterien für stationäre Fließprozesse unter Verwendung der Exergie	131
3.4.4	Untersuchung ausgewählter irreversibler Prozesse	135
3.4.4.1	Irreversible Kompression bzw. Expansion eines Stoffstromes in einem stoffdurchlässigen adiabaten System	135
3.4.4.2	Der Drosselvorgang in einem adiabaten System	139
3.4.4.3	Isobare Mischung zweier stationärer Stoffströme in einem adiabaten System	141
3.4.4.4	Wärmeübertragung von einem Heizmittel- an einen Kühlmittstrom bei endlichem Temperaturunterschied über eine Heizfläche	145
3.5	Zusammenfassung	150

4	Thermische und energetische Zustandseigenschaften von reinen Stoffen und Gasgemischen	154
4.1	Einige wichtige Differentialgleichungen der Technischen Thermodynamik	154
4.2	Die Zustandsgleichungen reiner Stoffe	159
4.2.1	Vorbemerkungen	159
4.2.2	Das ideale Gas	160
4.2.2.1	Die Gasgesetze von Boyle-Mariotte und Gay-Lussac und ihre Vereinigung zur thermischen Zustandsgleichung des idealen Gases	161
4.2.2.2	Das Gesetz von Avogadro und die allgemeine thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	174
4.2.2.3	Die energetischen Zustandsgleichungen des idealen Gases	181
4.2.2.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	181
4.2.2.3.2	Innere Energie und Enthalpie des idealen Gases	191
4.2.2.3.3	Entropie des idealen Gases	204
4.2.2.3.4	T, s - oder Wärmediagramm für das ideale Gas	206
4.2.3	Der reine reale Stoff	208
4.2.3.1	Thermische Zustandsgleichung	208
4.2.3.1.1	Isobarer Verdampfungsvorgang	208
4.2.3.1.2	Das Zweiphasensystem Flüssigkeit — Dampf	210
4.2.3.1.3	Überhitzter Dampf	213
4.2.3.1.4	Beschreibung des thermischen Zustandsverhaltens mit Hilfe realer Gasgleichungen	217
4.2.3.2	Die energetischen Zustandsgleichungen und -diagramme	228
4.2.3.2.1	Das Zweiphasensystem Flüssigkeit — Dampf	228
4.2.3.2.2	Die Gleichung von Clausius und Clapeyron	233
4.2.3.2.3	Überhitzter Dampf	239
4.2.3.2.4	Hinweise zur Approximation und Interpolation von Zustandsgrößen	243
4.2.3.2.5	Kalorische Zustandsdiagramme	253
4.3	Die thermischen und energetischen Zustandseigenschaften von Gemischen	263
4.3.1	Allgemeine Eigenschaften von Gemischen	263
4.3.2	Das Gemisch idealer Gase	264
4.3.2.1	Die thermische Zustandsgleichung von Idealgasgemischen	265
4.3.2.2	Die energetischen Zustandsgleichungen von Idealgasgemischen	275
4.3.3	Feuchte Luft als Beispiel eines Gas-Dampf-Gemisches	278
4.3.3.1	Thermische Zustandseigenschaften	278
4.3.3.2	Energetische Zustandseigenschaften	287
4.3.3.3	Das Mollier- h, x -Diagramm	291
4.4	Zusammenfassung	298

5	Die einfachen thermodynamischen Prozesse	304
5.1	Stationäre thermodynamische Prozesse	305
5.1.1	Innerlich reversible Prozesse mit speziellen quasistatistischen Zustandsänderungen des idealen Gases und des reinen realen Stoffes	305
5.1.1.1	Ermittlung der thermischen und energetischen Zustandsgrößen für einfache Prozesse	308
5.1.1.2	Ermittlung der Prozeßgrößen	312
5.1.1.2.1	Prozesse mit isochorer Zustandsänderung	312
5.1.1.2.2	Prozesse mit isobarer Zustandsänderung	318
5.1.1.2.3	Prozesse mit isothermer Zustandsänderung	323
5.1.1.2.4	Prozesse mit isentroper Zustandsänderung	329
5.1.2	Verallgemeinerung der Berechnungsgleichungen für Zustands- und Prozeßgrößen bei innerlich reversiblen Vorgängen mit polytropen quasistatischen Zustandsänderungen des Arbeitsmittels „ideales Gas“	339
5.1.3	Bewertung des irreversiblen Prozeßablaufs	350
5.1.4.	Thermodynamische Beschreibung stationärer Strömungsvorgänge	353
5.1.4.1	Allgemeine Grundgleichung	353
5.1.4.2	Reversibel ablaufende Strömungsvorgänge	355
5.1.4.3	Adiabatische Strömungsvorgänge	359
5.1.5	Stationäre Prozesse mit quasistatischen Zustandsänderungen feuchter Luft	369
5.1.5.1	Erwärmung und Abkühlung feuchter Luft in Wärmeübertragen	369
5.1.5.2	Mischung zweier Ströme von feuchter Luft	372
5.1.5.3	Befeuchtung mit (flüssigem) Wasser oder Wasserdampf	375
5.1.6	Der Verdunstungsvorgang	382
5.1.6.1	Die empirischen Grundgesetze	382
5.1.6.2	Die Stoff- und Energiestrombilanzen	383
5.1.6.3	Darstellung im Mollier- h, x -Diagramm	385
5.1.6.4	Das Psychrometerproblem	389
5.2	Beispiele für instationäre thermodynamische Prozesse	391
5.2.1	Der Auffüll- oder Ladevorgang	393
5.2.2	Der Ausström- oder Entladevorgang	396
5.3	Zusammenfassung	401
6	Kreisprozesse	404
6.1	Zur Bedeutung der Kreisprozesse	404
6.2	Anwendung des ersten und zweiten Hauptsatzes auf Kreisprozesse	405

6.2.1	Allgemeine Grundlagen	405
6.2.2	Rechtsprozesse	409
6.2.3	Linksprozesse	415
6.3	Prozeßbedingungen und deren Auswirkungen auf die Gestaltung theoretischer Kreisprozesse	420
6.4	Die Vergleichsprozesse der Gasturbinenanlagen	429
6.4.1	Der Ackeret-Keller-Prozeß	430
6.4.2	Der Joule-Prozeß	434
6.4.2.1	Der einfache Joule-Prozeß	434
6.4.2.2	Der Joule-Prozeß mit Regeneration	443
6.4.2.3	Der Joule-Prozeß mit mehrstufiger Kompression und Expansion	447
6.5	Die Vergleichsprozesse der Verbrennungsmotoren	451
6.5.1	Der Seiliger-Prozeß	451
6.5.2	Der Otto-Prozeß als erster Grenzfall des Seiliger-Prozesses ..	455
6.5.3	Der Diesel-Prozeß als zweiter Grenzfall des Seiliger-Prozesses ..	461
6.6	Die Vergleichsprozesse der Dampfkraftanlagen	472
6.6.1	Der einfache Clausius-Rankine-Prozeß	474
6.6.1.1	Der Satteldampfprozeß	474
6.6.1.2	Der Heißdampfprozeß	479
6.6.2	Rechtsläufige Dampfkreisprozesse mit Regeneration	485
6.6.3	Rechtsläufige Dampfkreisprozesse mit Zwischenüberhitzung ..	495
6.7	Der Vergleichsprozeß der Kompressionskälteanlagen	511
6.8	Die exergetische Bewertung von Kreisprozessen	525
6.8.1	Rechtsprozesse	525
6.8.2	Linksprozesse	527
6.9	Zusammenfassung	532

Teil B: Chemische Thermodynamik und Mischphasen-thermodynamik

7	Thermodynamik und Stoffwandelvorgänge	539
	Zusammenfassung	542
8	Grundlagen für Umsatzberechnungen bei Stoffwandelprozessen ..	543
8.1	Mengenangaben und Konzentrationsmaße	543
8.2	Technische Verbrennungsprozesse — Beispiele für Stoffwandelvorgänge	549
8.2.1	Kennzeichnung der Brennstoffe	551
8.2.2	Erforderlicher Sauerstoff- und Luftbedarf	553
8.2.3	Abgasmenge und -zusammensetzung	555
8.3	Zusammenfassung	561

9	Abhängigkeit thermodynamischer Zustandsgrößen von Druck, Temperatur und Zusammensetzung	562
9.1	Allgemeines Berechnungskonzept	562
9.2	Partielle Größen	564
9.3	Die speziellen Gibbs-Duhemschen Gleichungen und die Ermittlung partieller Größen	567
9.4	Partielle molare Reaktionsgrößen	573
9.5	Zusammenfassung	574
10	Chemisches Potential	576
10.1	Allgemeine Einführung	576
10.2	Ermittlung des chemischen Potentials	578
10.3	Hinweise zur Ermittlung von Fugazitäten	581
10.4	Zusammenfassung	586
11	Anwendung des ersten Hauptsatzes auf Stoffwandelvorgänge – Thermochemie	588
11.1	Grundgesetze der Thermochemie	588
11.1.1	Reaktionsenthalpien und -energien	588
11.1.2	Der Satz von Heß	591
11.1.3	Druck- und Temperaturabhängigkeit der Reaktionsenthalpie	592
11.2	Praktische Anwendung der Grundgesetze der Thermochemie	594
11.3	Technische Verbrennung – ein Anwendungsfall der Thermochemie	599
11.4	Zusammenfassung	607
12	Anwendung des zweiten Hauptsatzes auf Stoffwandelvorgänge	608
12.1	Entropieproduktion und chemische Reaktionen	608
12.2	Reversible chemische Arbeit	610
12.3	Bestimmung der Reaktionsentropie	611
12.4	Zusammenfassung	614
13	Berechnung von Phasengleichgewichten und chemischen Reaktionen	616
13.1	Gibbssche Phasenregel	618
13.2	Phasengleichgewichte	619
13.2.1	Gleichgewicht zwischen reinen Phasen	619
13.2.1.1	Allgemeine Grundlagen	619
13.2.1.2	Ermittlung der Gleichgewichtsdampfdrucke für reine Phasen	620
13.2.2	Mischphasengleichgewichte	625
13.2.2.1	Allgemeine Beschreibung	625
13.2.2.2	Anwendung auf Lösungsgleichgewichte	627

13.2.2.2.1 Flüssig-gasförmige Gleichgewichte	628
13.2.2.2 Gleichgewichte zwischen flüssigen und festen Phasen	635
13.2.2.3 Membrangleichgewichte	637
13.2.3 Gleichgewichte in binären Mischungen	639
13.2.3.1 Flüssig-gasförmige Gleichgewichte	639
13.2.3.1.1 Ideale Mischphasen	640
13.2.3.1.2 Reale Mischphasen	643
13.2.3.1.3 Beschränkte Mischbarkeit	651
13.2.3.2 Gleichgewichte zwischen flüssigen und festen Mischphasen	653
13.3 Chemische Reaktionen	657
13.3.1 Ausbeute chemischer Reaktionen	657
13.3.2 Ermittlung der Gleichgewichtskonstanten für unterschiedliche Reaktionen	658
13.3.3 Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der freien molaren Reaktionsenthalpie	660
13.3.4 Berechnung von Reaktionsgleichgewichten	661
13.3.4.1 Homogene Gasreaktionen	661
13.3.4.2 Heterogene Reaktionen	664
13.3.4.3 Thermische Dissoziation	666
13.4 Zusammenfassung	670
 Literaturverzeichnis	672
 Sachwortverzeichnis	677