

# Inhaltsverzeichnis

## Einleitung

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

## Teil A: Grundlagen der Energielehre

<b>1</b>	<b>Grundbegriffe der Thermodynamik .....</b>	<b>10</b>
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
<b>2</b>	<b>Der erste Hauptsatz der Thermodynamik .....</b>	<b>50</b>
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
<b>3</b>	<b>Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik .....</b>	<b>86</b>
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	Holonomie der Pfaffschen Form $dU + p dV$ .....	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 Kühlmittelstrom bei endlichem Temperaturunterschied über eine Heizfläche .....	145
3.5	Zusammenfassung .....	150

<b>4</b>	<b>Thermische und energetische Zustandseigenschaften von reinen Stoffen und Gasgemischen</b>	<b>154</b>
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

<b>5</b>	<b>Die einfachen thermodynamischen Prozesse</b>	<b>304</b>
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	Adiabate Strömungsvorgänge	359
5.1.5	Stationäre Prozesse mit quasistatischen Zustandsänderungen feuchter Luft	369
5.1.5.1	Erwärmung und Abkühlung feuchter Luft in Wärmeübertragern	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
<b>6</b>	<b>Kreisprozesse</b>	<b>404</b>
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 Satttdampfprozeß .....	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	<b>Thermodynamik und Stoffwandelvorgänge .....</b>	539
	Zusammenfassung .....	542
8	<b>Grundlagen für Umsatzberechnungen bei Stoffwandelprozessen ..</b>	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

<b>9</b>	<b>Abhängigkeit thermodynamischer Zustandsgrößen von Druck, Temperatur und Zusammensetzung .....</b>	<b>562</b>
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
<b>10</b>	<b>Chemisches Potential .....</b>	<b>576</b>
10.1	Allgemeine Einführung .....	576
10.2	Ermittlung des chemischen Potentials .....	578
10.3	Hinweise zur Ermittlung von Fugazitäten .....	581
10.4	Zusammenfassung .....	586
<b>11</b>	<b>Anwendung des ersten Hauptsatzes auf Stoffwandelvorgänge – Thermochemie .....</b>	<b>588</b>
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
<b>12</b>	<b>Anwendung des zweiten Hauptsatzes auf Stoffwandelvorgänge ...</b>	<b>608</b>
12.1	Entropieproduktion und chemische Reaktionen .....	608
12.2	Reversible chemische Arbeit .....	610
12.3	Bestimmung der Reaktionsentropie .....	611
12.4	Zusammenfassung .....	614
<b>13</b>	<b>Berechnung von Phasengleichgewichten und chemischen Reaktionen .....</b>	<b>616</b>
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 Gleichgewichtsdampfdrücke für reine Phasen ...	620
13.2.2	Mischphasengleichgewichte .....	625
13.2.2.1	Allgemeine Beschreibung .....	625
13.2.2.2	Anwendung auf Lösungsgleichgewichte .....	627

Inhaltsverzeichnis	XV
13.2.2.2.1 Flüssig-gasförmige Gleichgewichte	628
13.2.2.2.2 Gleichgewichte zwischen flüssigen und festen Phasen	635
13.2.2.2.3 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