

Inhaltsverzeichnis

1. Grundbegriffe	7
1.1. Thermodynamisches System	7
1.2. Zustand und Zustandsgrößen	10
1.3. Thermodynamisches Gleichgewicht	13
1.4. Temperatur	15
1.4.1. Temperaturdefinition	15
1.4.2. Temperaturmessung	16
1.4.3. Temperaturfixpunkte und Teilung	16
1.4.4. Temperaturskala Fahrenheit und Rankine	17
1.5. Ideales Gas	17
1.6. Gasthermometer	20
1.7. Prozess- und Zustandsänderung	22
1.8. Kreisprozesse und Zustandsgrößen	23
1.9. Thermische Zustandsgleichung	24
2. Bilanzen	26
2.1. Die Apfelbilanz	26
2.2. Massenbilanz	27
2.3. Energiebilanz	28
2.4. Entropiebilanz	28
2.5. Exergiebilanz	28
2.6. Geldbilanz	29
2.7. Systeme	29
3. Erster Hauptsatz der Thermodynamik	31
3.1. Energieerhaltungsprinzip	31
3.2. Energiekonzept der Mechanik	32
3.2.1. Arbeit	32
3.2.2. Kinetische Energie	32
3.2.3. Potentielle Energie	33
3.3. Formen der Arbeit	33
3.3.1. Volumenänderungsarbeit	33
3.3.2. Nutzarbeit	34
3.3.3. Elektrische Arbeit	35
3.3.4. Wellenarbeit	36
3.3.5. Reibungsarbeit oder Dissipation	37

3.3.6.	Weitere Formen der Arbeit	40
3.3.7.	Zwei Bemerkungen zum Begriff „Arbeit“	40
3.3.8.	Äußere Arbeit	41
3.3.9.	Vorzeichenregelung, Mathematik und Schreibweise . . .	41
3.4.	Innere Energie	42
3.5.	Enthalpie	44
3.6.	Wärme	45
3.7.	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	46
3.7.1.	Erster Hauptsatz für Offene und Instationäre Systeme .	47
3.7.2.	Massenbilanz	49
3.7.3.	Erster Hauptsatz für offene und instationäre Systeme mit vielen Massenströmen, vielen Wärmeströmen und vielen Arbeiten	50
3.7.4.	Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme	50
3.7.5.	Technische Arbeit, Bilanz für eine Zustandsänderung . .	51
3.8.	Ideales Gas	52
3.8.1.	Kalorische Zustandsgleichung	53
3.8.2.	Überströmversuch von Gay-Lussac	54
3.8.3.	(Spezifische) Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p .	57
3.8.4.	Zusammenhang zwischen c_p und c_v für Ideale Gase . . .	57
3.8.5.	Zustandsänderungen am Beispiel des Idealen Gases . . .	58
4.	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	65
4.1.	Reversible und Irreversible Prozesse	65
4.2.	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik in verbaler Formulierung	68
4.3.	Die Entropie	69
4.3.1.	Statistische Deutung des adiabaten Druckausgleichs . .	70
4.3.2.	Statistische Energieverteilung	72
4.3.3.	Wahrscheinlichkeit und Entropie	75
4.4.	Gibb'sche Fundamentalrelation	77
4.4.1.	Wärmeübertragung und Entropieänderung	78
4.5.	Innere Energie, Enthalpie und Entropie einfacher Stoffe	82
4.5.1.	Ideales Gas	82
4.5.2.	Inkompressible feste und flüssige Stoffe	83
4.6.	Entropietransport und Entropieerzeugung	84
4.7.	Der Zweite Hauptsatz nach der Apfelbilanz	86
4.8.	$T - s$ -Diagramme für einfache Stoffe	88
4.9.	Mittlere Wärmekapazität	92
5.	Kreisprozesse	95
5.1.	Kreisprozesse als Folge von stationären Fließprozessen	96
5.2.	Kreisprozesse in geschlossenen Systemen	98

5.3. Studie zur Entropie und zu periodischen Prozessen (Kreisprozesse)	101
5.3.1. Kältemaschinen und Wärmepumpen	103
5.4. Studie Wärmepumpe	105
5.5. Studie Kältemaschine	106
5.6. Studie Wärmekraftmaschinen	107
5.7. Beispiel Ventilator	107
5.8. Carnot Prozess	109
6. Exergie	113
6.1. Exergie eines Stoffstroms	115
6.2. Exergie- und Anergie-Fluss-Diagramm	117
6.3. Exergie im $h - s$ -Diagramm	118
6.3.1. Herleitung Exergiebilanz beim stationären Fließprozess mit beliebiger Wärmeübertragung	120
6.4. Exergie geschlossener Systeme	127
6.4.1. Exergiebilanz zwischen Zustand 1 und Zustand 2 für geschlossenes System	129
6.4.2. Exergiebilanz für allgemeines, offenes und instationäres System	130
6.4.3. Exergieverlust bei adiabater Zustandsänderung im $h - s$ -Diagramm	132
6.5. Zusammenfassung Exergie	133
7. Reine Stoffe und Clausius Rankine Prozess	135
7.1. Allgemeines Verhalten reiner Stoffe	137
7.1.1. Wasserkochen bei 1 bar	137
7.2. Der Siedevorgang von Wasser	139
7.2.1. Dreidimensionale Diagramme	141
7.2.2. Dampfdruckkurve	141
7.2.3. Zur Definition Dampfgehalt	144
7.2.4. Quantitative Diagramme	146
7.3. Zustandseigenschaften realer Fluide	148
7.4. Realgase, Virialkoeffizienten	150
7.4.1. Virialkoeffizienten	150
7.4.2. Realgasfaktor	151
7.5. Naßdampfgebiet	152
7.5.1. Skizze der wichtigsten Diagramme	155
7.6. Clausius-Rankine-Prozess	157
8. Gemische und Feuchte Luft	163
8.1. Nomenklatur für Gemische	163
8.2. Extensive Zustandsgrößen U und H bei Mischungen	166
8.3. Mittlere Wärmekapazitäten	167

8.4. Entropie von Gemischen	167
8.5. Mischungen Idealer Gase	168
8.6. Trockene Luft	170
8.7. Mischungstemperatur	170
8.8. Mischungsentropie	172
8.9. Gibt es eine reversible Vermischung?	173
8.10. Stationärer und adiabater Mischungs-Fließprozess	176
8.11. Vergleich Mischungsentropie in der Literatur	178
8.12. Feuchte Luft	181
8.13. Enthalpie feuchter Luft	185
8.13.1. A: Ungesättigte Luft	188
8.13.2. B: Gesättigte Luft	188
8.13.3. C: Gesättigte Luft	188
8.14. Mollier $h - x$ - Diagramm für feuchte Luft	189
8.15. Mischungsvorgänge mit feuchter Luft und Wärmez- oder -abfuhr	193
8.15.1. Mischung zweier feuchter Luftströme	193
8.15.2. Zufuhr oder Abfuhr von Wärme zu einem Strom feuch-	
ter Luft	195
8.15.3. Zufuhr oder Abfuhr von reinem Wasser zu oder von	
einem Strom feuchter Luft	197
9. Verbrennung und chemische Umsetzungen	201
9.1. Massenbilanz, Elementbilanz, Stoffbilanz, Speziesbilanz	201
9.2. Energiebilanz, erster Hauptsatz stationärer Fließprozess	205
9.3. Entropiebilanz und Irreversibilität der Verbrennung	207
9.4. Mengenberechnung bei vollständiger Verbrennung	208
9.5. Stöchiometrische Verbrennung	210
9.6. Energiebilanz Verbrennung, Erster Hauptsatz stationärer Fließ-	
prozess	210
9.7. Brennwerte und Heizwert	214
9.8. Adiabte Verbrennungstemperatur	217
9.9. Entropiebilanz und Irreversibilität der Verbrennung	220
9.10. Exergieverlust der Verbrennung	221
9.11. Typische Exergieverluste bei Verbrennungs-Kraftwerken	223
9.12. Brennstoffzelle	223
10. Wärmeübertragung, Wärmeübertrager	226
10.1. Arten der Wärmeübertragung	227
10.2. Fourier-Gesetz der Wärmeleitung	230
10.3. Das Fourier-Gesetz in Analogie zum Ohmschen Gesetz	234
10.3.1. Das Fourier-Gesetz der Wärmeleitung in Analogie zum	
Ohmschen Gesetz: Reihenschaltung	235
10.3.2. Das Fourier-Gesetz der Wärmeleitung in Analogie zum	
Ohmschen Gesetz: Parallelschaltung	236

10.4. Wärmedurchgang	239
10.5. Mittlere Flächen, mittlere Wärmeleitzahlen	244
10.5.1. Herleitung Mittlere Flächen für Zylinderrohr und Ku- gelschale	245
10.6. Wärmeübertrager	248
10.6.1. Bestimmung der mittleren Temperaturdifferenz	253
10.6.2. Grenzleistung	255
10.7. Gegen- oder Gleichstromwärme- übertragung mit $\dot{C} = \text{const}$. .	255
10.7.1. Auslegung	257
10.7.2. Nachrechnen oder statisches Verhalten	257
10.8. Diagramme und Dimensionslose Kennzahlen	257
10.8.1. Auslegung und Nachrechnen im Diagramm	260
A. Mollier $h - s$-Diagramm von Wasserdampf	263
B. Stoffwertetabellen	265
B.1. Stoffwerte von siedendem Wasser und gesättigtem Wasserdampf	266
B.2. Stoffwerte von flüssigem Wasser und überhitztem Wasserdampf	267
B.3. Stoffwerte von trockener Luft	269
C. Formelsammlung	271
C.1. Umrechnungsbeziehungen des IES	272
C.2. Grundbegriffe	273
C.3. Erster Hauptsatz	273
C.3.1. Geschlossene Systeme	274
C.3.2. Offene Systeme	274
C.3.3. Stationäre Fließprozesse	274
C.3.4. Mechanische Energiebilanz	274
C.4. Zweiter Hauptsatz	274
C.4.1. Geschlossene Systeme	274
C.4.2. Offene Systeme	275
C.4.3. Stationäre Fließprozesse	275
C.5. Exergiebilanz	275
C.6. Inkompressible feste und flüssige Stoffe	276
C.7. Ideale Gase	276
C.7.1. Thermische Zustandsgleichung	276
C.7.2. Energetische Zustandsgleichungen	276
C.8. Zustandsänderungen	277
C.9. Naßdampf	278
C.10. Kreisprozesse	278
C.11. Technische Vergleichsprozesse	279
C.12. Gemische	280
C.13. Gemische idealer Gase	280
C.14. Feuchte Luft	280

C.15.Chemische Reaktionen	281
C.16.Wärmeübertragung	281
C.16.1. Stationäre Wärmeübertragung	282
C.17.Wärmeübertrager	283