

Klaus Lucas

Thermodynamik

Die Grundgesetze
der Energie- und Stoffumwandlungen

7. korrigierte Auflage

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Grundlagen	1
1.1 Energie- und Stoffumwandlungen	1
1.1.1 Energieumwandlungen	2
1.1.2 Stoffumwandlungen	6
1.1.3 Energie- und Stoffumwandlungen in technischen Prozessen.....	9
1.1.4 Allgemeine Schlussfolgerungen	11
1.2 Die thermodynamische Analyse	13
1.2.1 Das thermodynamische System.....	14
1.2.2 Das System als fluide Phase	25
1.2.3 Prozess und Zustandsänderung	29
1.3 Kontrollfragen	30
2. Fluide Phasen	33
2.1 Materiemenge und thermische Zustandsgrößen	34
2.1.1 Die Materiemenge	34
2.1.2 Das Volumen	38
2.1.3 Der Druck	38
2.1.4 Die Temperatur	42
2.2 Reinstoffe	50
2.2.1 Der Gaszustand	51
2.2.2 Verdampfung und Kondensation	53
2.2.3 Das Nassdampfgebiet	59
2.2.4 Kritischer Punkt und Tripelpunkt	60
2.2.5 Schmelzen und Erstarren	62
2.2.6 Das gesamte Zustandsgebiet	63
2.3 Gemische	65
2.3.1 Verdampfung und Kondensation	66
2.3.2 Verdunstung und Absorption	74
2.3.3 Entmischung in flüssigen Gemischen	76
2.3.4 Schmelzen und Erstarren in Gemischen	78
2.3.5 Chemische Eigenschaften	80
2.4 Stoffmodelle für Reinstoffe	84
2.4.1 Die Dampftafel	84

2.4.2	Gase bei niedrigen Drücken	85
2.4.3	Flüssigkeiten	87
2.5	Stoffmodelle für Gemische	88
2.5.1	Partielle Größen	88
2.5.2	Gasgemische	90
2.5.3	Gas/Dampf-Gemische	93
2.5.4	Flüssige Gemische	99
2.6	Kontrollfragen	104
2.7	Aufgaben	106
3.	Die Materiemengenbilanz	115
3.1	Materiemengenbilanz bei thermischen Energie- und Stoffumwandlungen	116
3.1.1	Umwandlungen reiner Stoffe	117
3.1.2	Umwandlungen von Gemischen	118
3.2	Materiemengenbilanz bei chemischen Energie- und Stoffumwandlungen	126
3.2.1	Vollständig ablaufende Reaktionen	127
3.2.2	Unvollständig ablaufende Reaktionen	133
3.2.3	Die Elementenbilanz	140
3.3	Kontrollfragen	143
3.4	Aufgaben	143
4.	Die Energiebilanz	147
4.1	Die Erscheinungsformen der Energie	148
4.1.1	Mechanische Energieformen	148
4.1.2	Innere Energie und Enthalpie	157
4.1.3	Die Energieform Wärme	162
4.2	Energiebilanzgleichungen	165
4.2.1	Geschlossene Systeme	165
4.2.2	Offene Systeme	168
4.2.3	Kreisprozesse	173
4.3	Energiebilanzen bei thermischen Zustandsänderungen	176
4.3.1	Prozesse mit reinen Stoffen	176
4.3.2	Prozesse mit Gemischen	189
4.4	Energiebilanzen bei chemischen Zustandsänderungen	218
4.4.1	Thermischer und chemischer Anteil	219
4.4.2	Die Standardbildungsenthalpie	223
4.4.3	Der Heizwert	230
4.5	Das Energieflussbild	242
4.6	Kontrollfragen	244
4.7	Aufgaben	246

5. Die Entropiebilanz	259
5.1 Das Naturgesetz der Unsymmetrie	259
5.1.1 Technische Konsequenzen	260
5.1.2 Dissipation	262
5.2 Die Zustandsgröße Entropie	278
5.2.1 Entropie und Dissipation	279
5.2.2 Entropie und Wärme	280
5.2.3 Entropieproduktion bei Energietransfer über Temperatur- und Druckdifferenzen	283
5.2.4 Atomistische Interpretation	286
5.3 Der 2. Hauptsatz	290
5.4 Die Berechnung der Entropie aus Stoffmodellen	293
5.4.1 Die Fundamentalgleichung	294
5.4.2 Die thermodynamische Temperatur	295
5.4.3 Reine Gase	298
5.4.4 Reine Flüssigkeiten	299
5.4.5 Reine Stoffe im gesamten Zustandsgebiet	299
5.4.6 Gasgemische	300
5.4.7 Gas/Dampf-Gemische	304
5.4.8 Flüssige Gemische	305
5.4.9 Chemische Zustandsänderungen	308
5.5 Energiequalität	311
5.5.1 Exergie und Anergie	313
5.5.2 Die Exergie eines Stoffstromes	313
5.5.3 Exergieverlust und Entropieproduktion	322
5.5.4 Exergetische Bewertung	323
5.6 Kontrollfragen	328
5.7 Aufgaben	330
6. Modellprozesse für Energieumwandlungen	335
6.1 Grundprozesse	336
6.1.1 Reversible Strömungsprozesse	336
6.1.2 Reversibel-isotherme Arbeitsprozesse	337
6.1.3 Reversibel-adiabate Prozesse	339
6.2 Die Umwandlung von Brennstoffenergie in Arbeit	347
6.2.1 Das Dampfkraftwerk	351
6.2.2 Die Gasturbine	366
6.2.3 Das Kombi-Kraftwerk	371
6.2.4 Das Strahltriebwerk	381
6.2.5 Verbrennungsmotoren	388
6.3 Wärme- und Kälteerzeugung	392
6.3.1 Die Wärmepumpe	392
6.3.2 Kraft-Wärme-Kopplung	400
6.4 Maschinenwirkungsgrade	410
6.4.1 Isentrope Wirkungsgrade	410

6.4.2	Polytrope Wirkungsgrade	418
6.5	Kontrollfragen	421
6.6	Aufgaben	422
7.	Modellprozesse für Stoffumwandlungen	431
7.1	Grundprozesse	431
7.1.1	Die Grundtypen der Ausgleichsprozesse	432
7.1.2	Das chemische Potenzial	440
7.1.3	Ausgleichsprozesse und Gleichgewicht in abgeschlossenen Systemen	443
7.1.4	Ausgleichsprozesse und Gleichgewicht in technischen Anlagen	446
7.2	Thermodynamische Gleichgewichte	452
7.2.1	Das Verdampfungs- und Kondensationsgleichgewicht ..	452
7.2.2	Das Verdunstungs- und Absorptionsgleichgewicht ..	462
7.2.3	Das Reaktionsgleichgewicht	469
7.3	Thermische Stoffumwandlungen	475
7.3.1	Wärmeübertragung	475
7.3.2	Die Verdunstung	489
7.3.3	Die Absorption	499
7.3.4	Die Rektifikation	510
7.4	Chemische Stoffumwandlungen	526
7.4.1	Der isotherme Reaktor	526
7.4.2	Der adiabate Reaktor	530
7.4.3	Reaktor mit Temperaturprofil	534
7.5	Apparatewirkungsgrade	539
7.5.1	Wirkungsgrad eines Wärmeübertragers	539
7.5.2	Wirkungsgrad einer thermischen Trennstufe	539
7.5.3	Wirkungsgrad einer chemischen Stoffumwandlung ..	540
7.6	Kontrollfragen	541
7.7	Aufgaben	542
Anhang A	Stoffdaten	547
Tabelle A1	.....	547
Tabelle A2	.....	566
Tabelle A3	.....	568
Tabelle A4	.....	572
Tabelle A5	.....	572
Tabelle A6	.....	573
Abbildung A1	.....	574
Anhang B	Wichtige Formeln	575
B1	Stoffmodelle für Reinststoffe	575
B2	Stoffmodelle für Gemische	576
B3	Stoffmodelle für Phasen- und Reaktionsgleichgewichte	579

B4	Berechnung der Enthalpie und Entropie aus der thermischen Zustandsgleichung $p = p(T, v)$	580
B5	Materiemengenbilanzen	581
B6	Energiebilanzen	582
B7	Arbeit und Wärme bei quasistatischer Zustandsänderung	583
B8	Isentrope und polytrophe Zustandsänderungen idealer Gase	583
B9	Verbrennung	584
B10	Beiträge zur irreversiblen Entropieproduktion	584
B11	Wirkungsgrade	585
B12	Exergieformeln	585
Anhang C	Einheiten	586
Anhang D	Antworten auf die Kontrollfragen	588
Anhang E	Ergebnisse der Aufgaben	600
Sachverzeichnis		621