

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabe der Thermodynamik und ihre Bilanzgleichungen	1
1.1	Die Felder der Mechanik und Thermodynamik	1
1.1.1	Massendichte, Geschwindigkeit und Temperatur	1
1.1.2	Historisches zur Temperatur	2
1.2	Bilanzgleichungen	5
1.2.1	Die Erhaltungssätze der Thermodynamik	5
1.2.2	Bilanzen für abgeschlossene und offene Systeme	5
1.2.3	Lokale Bilanz in regulären Punkten	6
1.3	Massenbilanz	7
1.3.1	Integrale und lokale Massenbilanzen	7
1.3.2	Beispiel zur Massenbilanz: Düsenströmung	8
1.4	Impulsbilanz	9
1.4.1	Integrale und lokale Impulsbilanzen	9
1.4.2	Druck	11
1.4.3	Beispiel I zur Impulsbilanz: Druckverlauf in ruhender inkompressibler Flüssigkeit	11
1.4.4	Historisches zu Druck und Luftdruck. Druckeinheiten	12
1.4.5	Beispiel zum Druck: Auftriebsgesetz von Archimedes	14
1.4.6	Beispiel II zur Impulsbilanz: Raketengrundgleichung	14
1.4.7	Beispiel III zur Impulsbilanz: Konvektiver Impulsfluß	16
1.4.8	Beispiel IV zur Impulsbilanz: Düsenströmung	17
1.4.9	Beispiel V zur Impulsbilanz: Bernoulli-Gleichung	19
1.5	Energiebilanz	20

1.5.1	Kinetische Energie und Innere Energie	20
1.5.2	Integrale und lokale Energiebilanzen	23
1.5.3	Potentielle Energie	24
1.5.4	Beispiel I zum Energiesatz: Düsenströmung	25
1.5.5	Beispiel II zum Energiesatz: Adiabate Drosselung	26
1.5.6	Beispiel III zum Energiesatz: Verdampfung	27
1.5.7	Beispiel IV zum Energiesatz: Fön	28
1.5.8	Beispiel V zum Energiesatz: Turbine	29
1.6	Bilanz der Inneren Energie	30
1.6.1	Ableitung aus Energie-, Impuls- und Massenbilanz	30
1.6.2	Kurzform der Energiebilanzen für abgeschlossene Systeme	32
1.7	Erster Hauptsatz für reversible Prozesse. Grundlage der „pdV-Thermodynamik“	33
1.7.1	Arbeitsleistung und innere Arbeitsleistung im reversiblen Prozeß	33
1.7.2	Reversible Prozesse	34
1.8	Historisches zum ersten Hauptsatz	34
1.9	Zusammenfassung der Bilanzgleichungen	42
2	Materialgleichungen	43
2.1	Allgemeine Form der Materialgleichungen in Flüssigkeiten, Dämpfen und Gasen	43
2.1.1	Notwendigkeit von Materialgleichungen	43
2.1.2	Materialgleichungen für wärmeleitende Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase mit innerer Reibung	44
2.2	Bestimmung von Viskosität und Wärmeleitfähigkeit	45
2.2.1	Scherströmung zwischen zwei Platten. Newton'sches Reibungsgesetz	45

2.2.2	Wärmeleitung an Fensterscheibe	47
2.3	Zustandsgleichung idealer Gase	50
2.3.1	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase	50
2.3.2	Historisches zur thermischen Zustandsgleichung idealer Gase	52
2.3.3	Kalorische Zustandsgleichung idealer Gase	54
2.3.4	Historisches zur kalorischen Zustandsgleichung idealer Gase. Der Versuch von Gay-Lussac	55
2.3.5	Eine instruktive Trivialform der kinetischen Gastheorie. Molekulare Deutung von Druck und Temperatur	57
2.3.6	Beispiel I zum idealen Gas: Kolben fällt in Zylinder	59
2.3.7	Beispiel II zum idealen Gas: Heizung eines Zimmers	61
2.3.8	Beispiel III zum idealen Gas: Geschwindigkeit und Temperatur am Austritt eines Föns	62
2.3.9	Beispiel IV zum idealen Gas: Düsenströmung	64
2.3.10	Beispiel V zum idealen Gas: Barometrische Höhenstufe	68
2.3.11	Beispiel VI zum idealen Gas: „Adiabatische Zustandsgleichung“	69
2.3.12	Beispiel VII zum idealen Gas: Kaminströmung.....	71
2.4	Zustandsgleichungen von Flüssigkeiten und Dämpfen (ohne Phasenübergang)	73
2.4.1	Die Notwendigkeit von Messungen	73
2.4.2	Thermische Zustandsgleichung	73
2.4.3	Kalorische Zustandsgleichung	75
2.4.4	Zustandsgleichungen von flüssigem Wasser	78
2.5	Zustandsdiagramme für Flüssigkeiten und Dämpfe (mit Phasenübergang)	78
2.5.1	Das Phänomen des Phasenübergangs „flüssig - dampfförmig“	78
2.5.2	Schmelzen und Sublimieren	81
2.5.3	Dampfdruckkurve und (p,T)-Diagramm von Wasser	81
2.5.4	Naßdampfgebiet und (p,v)-Diagramm von Wasser	84
2.5.5	Verdampfungswärme und (h,T)-Diagramm von Wasser	85
2.5.6	Beispiel I zur Verdampfung: Das Einweckglas	87
2.5.7	Beispiel II zur Verdampfung: Der Dampfkochtopf	88

2.5.8	Historisches zur Verflüssigung von Dämpfen und zur Erstarrung von Flüssigkeiten	89
2.5.9	Van der Waals-Gleichung	90
3	Reversible Prozesse. Die „pdV-Thermodynamik“ bei der Berechnung thermodynamischer Maschinen	93
3.1	Kompressor und Preßluftmaschine. Heißluftmaschine	93
3.1.1	Die Arbeit am Kompressor	93
3.1.2	Der zweistufige Kompressor	95
3.1.3	Die Preßluftmaschine	96
3.1.4	Die Heißluftmaschine	97
3.1.5	Die Dampfmaschine	98
3.2	Arbeit und Wärme bei speziellen reversiblen Prozessen	101
3.2.1	Arbeit und Wärme im reversiblen Prozeß allgemein	101
3.2.2	Arbeit und Wärme in reversiblen „Isoprozessen“ und im adiabaten Prozeß für ideale Gase	102
3.3	Kreisprozesse	104
3.3.1	Wirkungsgrad bei der Umsetzung der Wärme in Arbeit	104
3.3.2	Beispiel I zum Wirkungsgrad. Joule-Prozeß	105
3.3.3	Beispiel II zum Wirkungsgrad. Carnot-Prozeß	107
3.3.4	Beispiel III zum Wirkungsgrad. Ericson-Prozeß	108
3.4	Verbrennungsmotoren	110
3.4.1	Ottomotor	110
3.4.2	Dieselmotor	113
4	Entropie	117
4.1	Der zweite Hauptsatz	117
4.1.1	Formulierung	117
4.1.2	Ergebnisse	117
4.1.3	Der universelle Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses	119

4.1.4	Absolute Temperatur als integrierender Faktor	120
4.1.5	Wachstum der Entropie	124
4.1.6	(T,S)-Diagramm und Maximaler Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses	125
4.2	Auswertung des Zweiten Hauptsatzes	127
4.2.1	Integrabilitätsbedingung	127
4.2.2	Innere Energie und Entropie des Van der Waals-Gases und des idealen Gases	128
4.2.3	Alternativformen der Gibbs-Gleichung und der Integrabilitätsbedingung	129
4.2.4	Phasengleichgewicht. Gleichungen von Clausius-Clapeyron	132
4.2.5	Phasengleichgewicht im Van der Waals-Gas	134
4.2.6	Temperaturänderung bei adiabater Drosselung. Beispiel: Van der Waals-Gas	136
4.2.7	Thermodynamische Stabilitätskriterien	140
4.2.8	Stabilitätsbedingungen	142
4.3	Historisches zum Zweiten Hauptsatz	144
4.4	Die Entropie als $S = k \ln W$	148
4.4.1	Molekulare Deutung der Entropie	148
4.4.2	Entropie eines Gases und eines Polymermoleküls	149
4.4.3	Entropie als ein Maß für Unordnung	155
4.4.4	Das Wachstum der Unordnung	156
4.4.5	Maxwell'sche Verteilungsfunktion	156
4.4.6	Die Entropie eines Gummistabes	157
4.5	Beispiel zu Entropie und Zweitem Hauptsatz: Gas und Gummi	160
4.5.1	Gibbs Gleichung und Integrabilitätsbedingungen für Flüssigkeiten und Festkörper	160
4.5.2	Beispiele für entropische Elastizität	163
4.5.3	Reales Gas und Kristallisiertes Gummi	164
4.5.4	Freie Energie von Gasen und Gummis. (p,V)- und (P,L)-Kurven	167
4.5.5	Reversible und hysteretische Phasenübergänge	169

4.6	Historisches zur statistischen Interpretation der Entropie	173
5	Dampfmaschine und Kältemaschinen	177
5.1	Historisches zur Dampfmaschine	177
5.2	Dampfmaschine	180
5.2.1	Das (T,s)-Diagramm	180
5.2.2	Clausius-Rankine-Prozeß im (T,s)-Diagramm	181
5.2.3	Das (h,s)-Diagramm	184
5.2.4	Beispiel: Dampfdurchsatz und Wirkungsgrad einer Dampfkraftanlage	185
5.2.5	Instruktive Versuche zur Erhöhung des Wirkungsgrades	187
5.3	Kältemaschine und Wärmepumpe	189
5.3.1	Prinzip einer Kompressionskältemaschine	189
5.3.2	Beispiel: Berechnung einer Kompressions-Kältemaschine	190
5.3.3	Wärmepumpe. Ein Beispiel	191
6	Wärmeübertragung	193
6.1	Instationäre Wärmeleitung	193
6.1.1	Wärmeleitungsgleichung	193
6.1.2	Trennung der Variablen	194
6.1.3	Beispiel I: Wärmeleitung in einem adiabaten Stab der Länge L	
6.1.4	Beispiel II: Wärmeleitung in einem unendlich langen Stab	198
6.1.5	Beispiel III: Temperaturmaximum in der Nähe eines Wärmepols	200
6.1.6	Historisches zur Wärmeleitung	201
6.2	Wärmetauscher	202
6.2.1	Wärmeübergangszahlen und Wärmedurchgangszahl	202
6.2.2	Temperaturgleichungen in Strömungsrichtung	204
6.2.3	Temperaturverläufe	206
6.3	Wärmestrahlung	209

6.3.1	Spektrales Emissionsverhältnis und spektrale Absorptionszahl.....	
6.3.2	Gemittelttes Emissionsverhältnis und gemittelte Absorptionszahl	212
6.3.3	Beispiel I zum Stefan-Boltzmann-Gesetz: Temperatur von Sonne und Planeten	215
6.3.4	Beispiel II zum Stefan-Boltzmann-Gesetz: Vergleich von Strahlung und Leitung	217
6.3.5	Historisches zur Wärmestrahlung	218
6.4	Nutzung der Sonnenenergie	221
6.4.1	Verfügbarkeit der Sonnenenergie	221
6.4.2	Thermosiphon	222
6.4.3	Aufwindkraftwerk	224
6.4.4	Treibhaus	228
6.4.5	Konzentrierende Kollektoren, das Brennglas	229
7	Mischungen und Mischphasen	231
7.1	Chemisches Potential	231
7.1.1	Charakterisierung von Mischungen, Lösungen und Legierungen	231
7.1.2	Das chemische Potential	232
7.1.3	Acht nützliche Eigenschaften des chemischen Potentials	234
7.1.4	Die Meßbarkeit des chemischen Potentials	236
7.2	Vermischungsgrößen. Chemisches Potential idealer Mischungen	238
7.2.1	Vermischungsgrößen allgemein	238
7.2.2	Vermischungsgrößen bei idealen Gasen	240
7.2.3	Ideale Mischungen	241
7.2.4	Chemische Potentialfunktionen idealer Mischungen	242
7.3	Osmose	243
7.3.1	Osmotischer Druck in verdünnten Lösungen. Van't Hoff'sches Gesetz	243
7.3.2	Beispiel I zum osmotischen Druck: Pfeffer'sche Säule	245

7.3.3	Beispiel II zum osmotischen Druck: Meerwasserentsalzung	248
7.3.4	Beispiel III zum osmotischen Druck: Physiologische Kochsalzlösung	249
7.3.5	Eine energetische Interpretation der Osmose	250
7.4	Mischphasen	252
7.4.1	Gibbs'sche Phasenregel	252
7.4.2	Freiheitsgrade	253
7.5	Flüssig-Dampf-Gleichgewichte (Ideal)	254
7.5.1	Ideales Raoult'sches Gesetz	254
7.5.2	Ideale Phasendiagramme binärer Mischungen	255
7.5.3	Beispiel I zum Raoult'schen Gesetz: CO ₂ in Atmosphäre und Meer	258
7.5.4	Beispiel II zum Raoult'schen Gesetz: Mineralwasser	259
7.5.5	Beispiel III zum Raoult'schen Gesetz: Binäre Mischung aus Propan und Butan	259
7.5.6	Beispiel IV zum Raoult'schen Gesetz: Dampfdruckerniedrigung und Siedepunkterhöhung	262
7.5.7	Verdampfungsvorgang im Phasendiagramm	263
7.6	Flüssig-Dampf-Gleichgewichte (Real)	264
7.6.1	Aktivität und Fugazität	264
7.6.2	Reales Raoult'sches Gesetz	266
7.6.3	Bestimmung der Aktivitätskoeffizienten	267
7.6.4	Bestimmung der Fugazitätskoeffizienten	268
7.6.5	Aktivitätskoeffizient bei Mischungswärme. Konstruktion von Phasendiagrammen	269
7.7	Freie Enthalpie einer Phasenmischung	272
7.7.1	Graphische Bestimmung der Gleichgewichtsbedingungen	272
7.7.2	Phasendiagramm bei lückenloser Mischbarkeit	275
7.7.3	Mischungslücke in der flüssigen Phase	277
7.8	Legierungen	277
7.8.1	(T,c ₁)-Diagramme	277
7.8.2	Mischkristalle und Eutektikum	280
7.8.3	Gibb'sche Phasenregel	281

7.8.4	Andere Phasendiagramme	281
8	Chemisch reagierende Mischungen	282
8.1	Stöchiometrie und Massenwirkungsgesetz	282
8.1.1	Stöchiometrie	282
8.1.2	Massenwirkungsgesetz	284
8.1.3	Massenwirkungsgesetz für ideale Mischungen und Mischungen idealer Gase	285
8.1.4	Historisches zum Massenwirkungsgesetz	286
8.1.5	Beispiel I zum Massenwirkungsgesetz idealer Gase: Haber-Bosch-Synthese	287
8.1.6	Historisches zur Haber-Bosch-Synthese	288
8.1.7	Beispiel II zum Massenwirkungsgesetz idealer Gase: Zerfall von Kohlendioxid	289
8.1.8	Gleichgewicht in stöchiometrischen Mischungen idealer Gase	291
8.2	Reaktionswärmen, Reaktionsentropie und absolute Entropiewerte	294
8.2.1	Die additiven Konstanten in u und s	294
8.2.2	Reaktionswärmen und Bindungsenergien	295
8.2.3	Reaktionsentropien	297
8.2.4	Prinzip vom kleinsten Zwang	298
8.2.5	Absolutwerte von Energie und Entropie	299
8.3	Energetische und entropische Beiträge zum Gleichgewicht	302
8.3.1	Drei Anteile der freien Enthalpie	302
8.3.2	Beispiel I: Wasserstoffdissoziation	303
8.3.3	Beispiel II: Ammoniaksynthese	305
8.4	Die Brennstoffzelle	307
8.4.1	Chemische Reaktionen	307
8.4.2	Typenvielfalt	309
8.4.3	Thermodynamik	309
8.4.4	Effekt von Temperatur- und Druckänderungen	312
8.4.5	Leistung der Brennstoffzelle	313

8.4.6	Wirkungsgrad	314
8.5	Thermodynamik der Photosynthese	315
8.5.1	Das Dilemma der Glukose-Synthese	315
8.5.2	Massenbilanzen	316
8.5.3	Energiebilanz. Warum eine Pflanze viel Wasser braucht	318
8.5.4	Entropiebilanz. Warum eine Pflanze viel Luft braucht	320
8.5.5	Diskussion	322
9	Feuchte Luft	323
9.1	Charakterisierung feuchter Luft	323
9.1.1	Feuchtegrad	323
9.1.2	Enthalpie feuchter Luft	324
9.1.3	Tabelle für feuchte Luft	326
9.1.4	Das (h_{1+x} , x)-Diagramm	326
9.2	Einfache Prozesse in feuchter Luft	328
9.2.1	Zufuhr von Wasser	328
9.2.2	Erwärmung	328
9.2.3	Mischen	328
9.2.4	Mischung feuchter Luft mit Nebel	329
9.3	Verdampfungsgrenze und Kühlgrenze	330
9.3.1	Massenbilanz und Verdampfungsgrenze	330
9.3.2	Energiebilanz und Kühlgrenze	331
9.4	Zwei instruktive Beispiele - Sauna und Wolkenuntergrenze	333
9.4.1	Eine Sauna wird klimatisiert	333
9.4.2	Wolkenuntergrenze	335
9.5	Faustregeln	337
9.5.1	Alternative Feuchteangaben	337
9.5.2	Trocken-adiabatischer Temperaturgradient	338
9.5.3	Die Wolkenuntergrenze. Abschätzung	339

9.6	Verdunstung	340
9.6.1	Der Druck von gesättigtem Dampf bei Gegenwart von Luft	340
9.6.2	Verdunstung	342
9.6.3	Zwei Beispiele für Verdunstung	343
10	Ausgesuchte Kapitel der Thermodynamik	344
10.1	Tropfen und Blasen	344
10.1.1	Verfügbare Freie Energie	344
10.1.2	Notwendige und hinreichende Gleichgewichtsbedingungen	345
10.1.3	Verfügbare Freie Energie als Funktion des Radius	346
10.1.4	Keimbildungsbarriere für Tropfen	348
10.1.5	Keimbildungsbarriere für Blasen	350
10.1.6	Bewertung	350
10.2	Nebel und Wolken. Tropfen in feuchter Luft	351
10.2.1	Problemstellung	351
10.2.2	Verfügbare freie Energie, Gleichgewichtsbedingungen	351
10.2.3	Wasserdampfdruck im Phasengleichgewicht	353
10.2.4	Die Form der verfügbaren freien Energie	354
10.2.5	Keimbildungsbarriere und Tropfenradius	357
10.3	Luftballons	358
10.3.1	Druck-Radius-Charakteristik	358
10.3.2	Stabilität eines Ballons	362
10.3.3	Ein anschauliches Argument zur Stabilität des Ballons	365
10.3.4	Gleichgewichte kommunizierender Ballons	367
10.4	Schall	370
10.4.1	Wellengleichung	370
10.4.2	Lösung der Wellengleichung, d'Alembert-Methode	373
10.4.3	Ebene harmonische Wellen	376
10.4.4	Ebene harmonische Schallwellen	377
10.5	Landau-Theorie der Phasenübergänge	379
10.5.1	Freie Energie und Last als Funktion von Temperatur und Dehnung. Phasenübergänge Erster und Zweiter Ordnung	379

10.5.2	Phasenübergänge Erster Ordnung	379
10.5.3	Phasenübergang Zweiter Ordnung	382
10.5.4	Phasenübergänge unter Last	384
10.5.5	Eine Bemerkung zur Klassifizierung von Phasenübergängen	385
10.6	Schwellen und Schrumpfen von Gelen	386
10.6.1	Phänomen	386
10.6.2	Freie Enthalpie.....	388
10.6.3	Schwellen und Schrumpfen als Funktion der Temperatur	391
10.7	Gedächtnislegierungen	394
10.7.1	Phänomene und Anwendungen	394
10.7.2	Ein Modell für Gedächtnislegierungen	398
10.7.3	Entropische Stabilisierung	402
10.7.4	Pseudoelastizität	405
10.7.5	Latente Wärme	410
10.7.6	Simulation einer Gedächtnislegierung	412
	Namen- und Sachverzeichnis	417