

# Falk · Ruppel

Die Physik des Naturwissenschaftlers

---

# Energie und Entropie

---

Eine Einführung in die Thermodynamik



Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

G. Falk W. Ruppel

---

*Die Physik des  
Naturwissenschaftlers*

Energie  
und  
Entropie

Eine Einführung in die  
Thermodynamik

---

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
1976

# Inhaltsverzeichnis

## I Die Energie und ihre Bedeutung

<b>§ 1 Energieumsetzungen und ihre Einteilung in Formen</b> . . . . .	2
Die Mengenartigkeit der Energie . . . . .	2
Die Formen, in denen Energie ausgetauscht wird . . . . .	4
Der Wirkungsgrad von Maschinen . . . . .	6
Energieströme . . . . .	10
Die räumliche Verteilung der strömenden Energie. Energiestromdichte	13
<b>§ 2 Die Energieumsetzungen auf der Erde</b> . . . . .	17
Die von der Erdoberfläche aufgenommenen und abgegebenen Energie- ströme . . . . .	17
Die Energieströme der Zivilisation . . . . .	21
Die Energieversorgung aus fossilen Brennstoffen . . . . .	26
Exponentielles Wachstum . . . . .	30
Unsere Energieversorgung heute . . . . .	32
Kernenergie . . . . .	35
Sonnenenergie . . . . .	37
Energiespeicherung durch Photosynthese . . . . .	38
Energieströme in Pflanzen und Tieren . . . . .	41

## II Energieformen

<b>§ 3 Die Energieform Rotationsenergie</b> . . . . .	43
Die Kennzeichnung von Energieformen durch physikalische Größen	43
Rotationsenergie und Drehimpuls . . . . .	45
Rotationsenergie-Strom und Drehimpuls-Strom . . . . .	47
Das Getriebe als Transformator für Rotationsenergie . . . . .	51
Rotationsenergie und Drehimpuls eines 2-Körper-Systems . . . . .	53
Änderungen des Trägheitsmoments. Verschiebungsenergie . . . . .	56
Die Rotation von Molekülen . . . . .	60
<b>§ 4 Die Energieformen Bewegungsenergie, Kompressionsenergie, Oberflächenenergie, elektrische Energie</b> . . . . .	63
Bewegungsenergie . . . . .	63
Kompressionsenergie . . . . .	66

Oberflächenenergie . . . . .	72
Elektrische Energie . . . . .	74
Die mathematische Gestalt von Energieformen . . . . .	76
<b>§ 5 Die Energieform chemische Energie . . . . .</b>	<b>77</b>
Die Menge eines Stoffs und die Variable „Teilchenzahl“ . . . . .	77
Einheiten der Größe Teilchenzahl . . . . .	78
Mehrere Teilchenzahl-Variablen . . . . .	81
Chemische Energie . . . . .	82
Elektrochemische Energie . . . . .	85
<b>§ 6 Die Energieform Wärme . . . . .</b>	<b>87</b>
Extensive und intensive Größen . . . . .	87
Standard-Variablen und Standard-Energieformen . . . . .	89
Wärmeenergie . . . . .	91
Wärmestrom und Entropiestrom . . . . .	93
<b>§ 7 Die Energieformen von elektromagnetischem Feld und Materie . . . . .</b>	<b>95</b>
Das System „Elektromagnetisches Feld“ . . . . .	95
Ladungen und Dipole in der Materie . . . . .	96
Die Energieform elektrische Energie des elektromagnetischen Feldes . . . . .	98
Die Energieform Polarisationsenergie eines Körpers . . . . .	101
Energieaustausch bei Erzeugung und Verschiebung eines elektrischen Dipols . . . . .	103
Die Energieform magnetische Energie des elektromagnetischen Feldes . . . . .	105
Die Energieform Magnetisierungsenergie eines Körpers . . . . .	108
Mit der Erzeugung eines magnetischen Dipols verknüpfter Energieaustausch . . . . .	110
Die Energieformen des Gesamtsystems „Elektromagnetisches Feld + Materie“ . . . . .	114

### III System, Zustand, Prozeß

<b>§ 8 Die Gibbssche Fundamentalform eines Systems . . . . .</b>	<b>117</b>
Ströme mengenartiger Größen und ihre Energieströme . . . . .	117
Systeme und ihr Energieaustausch . . . . .	123
Die Gibbssche Fundamentalform . . . . .	125
<b>§ 9 Systeme und ihre Gibbs-Funktionen . . . . .</b>	<b>127</b>
Was ist ein System? . . . . .	127
Die Gibbs-Funktion $E = E(\text{extensive Variablen})$ eines Systems . . . . .	131

Standard-Variablen . . . . .	133
Gewinnung der intensiven Variablen eines Systems aus seiner Gibbs-Funktion . . . . .	135
<b>§ 10 Zerlegung von Systemen . . . . .</b>	<b>137</b>
Zerlegung der Energie in Anteile . . . . .	137
Zerlegung eines Systems in Teilsysteme . . . . .	139
Die innere Energie als Energieanteil . . . . .	143
Die Unzerlegbarkeit eines Systems in relativistischen Zuständen . . . . .	144
<b>§ 11 Zustand und Prozeß . . . . .</b>	<b>146</b>
Was ist ein Zustand? . . . . .	146
Prozesse als Übergänge zwischen Zuständen . . . . .	148
Prozesse als Änderungen dynamischer Größen . . . . .	149
Dynamische und kinematische Größen . . . . .	151
<b>IV Gleichgewichte</b>	
<b>§ 12 Gleichgewicht beim Austausch von Verschiebungsenergie, Bewegungsenergie, Rotationsenergie, Kompressionsenergie, Oberflächenenergie . . . . .</b>	<b>153</b>
Gleichgewicht beim Austausch von Verschiebungsenergie. Kräftegleichgewicht . . . . .	156
Minimumprinzip der Energie . . . . .	159
Gleichgewicht beim Austausch von Bewegungsenergie. Translatives Bremsgleichgewicht . . . . .	161
Gleichgewicht beim Austausch von Rotationsenergie. Rotatives Bremsgleichgewicht . . . . .	162
Gleichgewicht beim Austausch von Kompressionsenergie. Druckgleichgewicht . . . . .	164
Gleichgewicht beim Austausch von Oberflächenenergie. Minimalfächen . . . . .	167
Die Oberfläche als Grenzfläche zwischen verschiedenen Medien . . . . .	171
Die Grenzfläche zwischen einer flüssigen und einer festen Phase . . . . .	174
<b>§ 13 Gleichgewichte beim Austausch geladener Teilchen . . . . .</b>	<b>176</b>
Elektronengleichgewicht zwischen Festkörpern. Kontaktspannung . . . . .	176
Halbleiterrandschicht . . . . .	179
Batterien . . . . .	183
Chemische Gleichgewichte in der Batterie . . . . .	185
Die EMK der geladenen Batterie . . . . .	187
Die entladene Batterie . . . . .	190

<b>§ 14 Thermisches Gleichgewicht</b> . . . . .	192
Gleichgewicht beim Austausch von Wärme . . . . .	192
Maximumprinzip der Entropie . . . . .	193
Gleichgewichte und Nicht-Gleichgewichte . . . . .	194
Allgemeine Bedeutung des Gleichgewichts. . . . .	196
<b>V Temperatur</b>	
<b>§ 15 Die Messung der Temperatur. Gasthermometer</b> . . . . .	199
Empirische Temperaturen . . . . .	201
Die Gastemperatur . . . . .	204
Ideale Gase . . . . .	206
Beweis der Proportionalität zwischen der Gastemperatur eines idealen Gases und der absoluten Temperatur . . . . .	207
Grenzen des Gasthermometers . . . . .	208
Die Kelvin-Skala der Temperatur . . . . .	210
<b>§ 16 Temperatur und Expansionsprozesse bei Gasen</b> . . . . .	212
Die isotherme Expansion eines Gases. . . . .	212
Realisierungen idealer Gaszustände . . . . .	213
Die Expansion bei konstanter Energie . . . . .	216
Experimentelle Realisierung der isoenergetischen Expansion. Freie Expansion . . . . .	217
Thermodynamische Charakterisierung der isoenergetischen Expansion . . . . .	219
<b>§ 17 Temperatur und Kreisprozesse</b> . . . . .	221
Kreisprozesse . . . . .	221
Kreisprozesse zwischen zwei festen Temperaturen . . . . .	222
Der Carnotsche Kreisprozeß . . . . .	225
Andere Kreisprozesse zwischen zwei Temperaturen . . . . .	229
<b>§ 18 Die Temperatur magnetischer Systeme</b> . . . . .	233
Paramagnetische Festkörper . . . . .	233
Der ideale Paramagnet . . . . .	236
Die Entropie des idealen Paramagneten. . . . .	238
Der Paramagnet als Arbeitssystem. Adiabatische Entmagnetisierung . . . . .	241
Die Messung tiefster Temperaturen . . . . .	243
<b>VI Entropie</b>	
<b>§ 19 Prozesse und ihre Realisierung</b> . . . . .	247
Austausch und Erzeugung von Entropie . . . . .	247
Realisierungen von Prozessen . . . . .	248

Adiabatische Prozeßrealisierungen . . . . .	249
Temperaturausgleich innerhalb eines adiabatisch abgeschlossenen Systems . . . . .	251
Beim Temperaturausgleich erzeugte Entropie . . . . .	254
<b>§ 20 Reversibilität und Irreversibilität . . . . .</b>	<b>256</b>
Der Begriff der Wärme bei CLAUSIUS . . . . .	257
Der herkömmliche Gebrauch des Wortes „Wärme“ . . . . .	258
Irreversible und reversible Realisierung des Wärmeaustausches . . . . .	261
Wärmeaustausch bei kleinen Temperaturdifferenzen . . . . .	264
Irreversible und reversible Realisierung der isoenergetischen Expansion eines idealen Gases . . . . .	266
Irreversible und reversible Realisierung des Mischens idealer Gase . . . . .	270
Zustand. Prozeß. Realisierung . . . . .	273
Die Umkehrbarkeit von Prozessen . . . . .	274
Arbeitsfähigkeit eines Systems . . . . .	275
Energiedissipation . . . . .	277
Die Unmöglichkeit der Entropievernichtung . . . . .	278
Die Entropie als Maß des „Wertes“ der Energie . . . . .	281
<b>§ 21 Die Messung der Entropie . . . . .</b>	<b>282</b>
Entropieänderungen und Prozesse . . . . .	283
Beispiele der Entropiemessung . . . . .	284
Die Messung der Entropie bei konstanten Werten der intensiven Variablen . . . . .	288
Die zur Messung benutzten Prozeßrealisierungen . . . . .	289
Definition und Messung der Entropie nach CLAUSIUS . . . . .	291
<b>§ 22 Entropie und Wärmekapazitäten . . . . .</b>	<b>294</b>
Entropiedifferenzen und Wärmekapazitäten . . . . .	294
Die historische Wurzel des Begriffs der Wärmekapazität . . . . .	297
Die Wärmekapazitäten als Ableitungen physikalischer Größen . . . . .	299
Die Differenz $C_p - C_v$ . . . . .	301
Allgemeine Suszeptibilitäten . . . . .	303
Die Abhängigkeit der Entropie von $V$ und $p$ . . . . .	304
Die Abhängigkeit der Entropie von $N$ . Größen pro Teilchenzahl . . . . .	306
<b>§ 23 Die Entropie von Gasen . . . . .</b>	<b>309</b>
Die Entropie idealer Gase . . . . .	309
Die Wärmekapazitäten von Gasen . . . . .	311
Die Messung von $\gamma = c_p/c_v$ . . . . .	313
Zerlegung eines idealen Gases in elementare ideale Gase . . . . .	316
Die Wärmekapazität elementarer idealer Gase . . . . .	318
Die innere Zustandssumme eines idealen Gases . . . . .	321
Wärmekapazitäten und innere Anregungen der Moleküle eines Gases . . . . .	322

<b>§ 24 Die Entropie von Festkörpern</b> . . . . .	329
Die Abhängigkeit der Entropie eines Festkörpers von $v$ und $p$ . . . . .	329
Gitter- und Elektronen-System als Teilsysteme eines Festkörpers . . . . .	330
Die Teilchenzahl-Variablen eines Festkörpers . . . . .	332
Die Entropie des Gitter-Systems eines Festkörpers . . . . .	334
Die Entropie des Elektronen-Systems eines Festkörpers . . . . .	338
Das Elektronen-System eines Halbleiters . . . . .	340
Das Elektronen-System eines Metalls . . . . .	342
Die Entropie eines paramagnetischen Festkörpers . . . . .	345
Die Rolle von Spin- und Gitter-System eines paramagnetischen Festkörpers bei der adiabatischen Entmagnetisierung . . . . .	351
 <b>VII Die Hauptsätze</b>	
<b>§ 25 Der 1. Hauptsatz</b> . . . . .	354
Die historische Entwicklung des Begriffs der Energie und ihrer Erhaltung . . . . .	354
Das Wärmeäquivalent . . . . .	356
Das Problem der Formulierung des 1. Hauptsatzes . . . . .	359
Die Energie als einseitige und absolute Variable . . . . .	363
 <b>§ 26 Der 2. Hauptsatz</b> . . . . .	366
Die historischen Formulierungen des 2. Hauptsatzes . . . . .	366
Die Entropie als einseitige und absolute Variable . . . . .	369
Der Zusammenhang zwischen Entropie und Temperatur eines Systems . . . . .	370
 <b>§ 27 Systeme mit negativer Temperatur</b> . . . . .	375
Stabilität und Temperatur . . . . .	375
Die Grenzen der Wertebereiche von $T$ und $1/T$ . . . . .	378
2-Zustands-Systeme . . . . .	379
Die experimentelle Erzeugung negativer Temperaturen . . . . .	383
Maser und Laser . . . . .	384
 <b>§ 28 Der 3. Hauptsatz. Der Absolutwert der Entropie</b> . . . . .	388
Das Nernstsche Wärmetheorem . . . . .	388
Instabilitäten bei $T \rightarrow 0$ . Mischungsentropie . . . . .	390
Folgerungen aus dem 3. Hauptsatz . . . . .	391
Die Absolutbestimmung der Entropie . . . . .	394
Die chemische Konstante eines idealen Gases . . . . .	396
 <b>Anhang</b> . . . . .	401
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	403
 <b>Naturkonstanten</b>	
<b>Wichtige Einheiten</b>	